

**ТОМСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

На правах рукописи

Экз. № 5

Карнышев Владимир Иванович

УДК 621.396.96

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОНТРАСТ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.12.04 - радиолокация и радионавигация

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
доктор технических наук
профессор Татарников В.Н.**

Томск - 1993

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 5 |
| I. Возможности радиолокационной поляриметрии в задаче повышения поляризационного контраста радиолокационных объектов | 13 |
| I.1. Понятие поляризационного контраста радиолокационных (РЛ) объектов | 13 |
| I.2. Описание рассеивающих свойств объектов поляризационными характеристиками | 16 |
| I.2.1. Характерные поляризационные состояния | 18 |
| I.2.2. Параметризация Хойнзена при описании матрицы рассеяния РЛ объекта | 20 |
| I.2.3. Параметризация матрицы рассеяния РЛ объекта в отечественной поляриметрии | 21 |
| I.3. Результаты поляриметрических исследований в задаче оценки поляризационного контраста | 23 |
| I.3.1. Поляризационные параметры, используемые в радиометеорологии | 24 |
| I.3.2. Связь поляризационных характеристик метеособъектов с инвариантами матрицы рассеяния | 27 |
| I.3.3. Идентификация (селекция) РЛ объектов поляризационными методами | 31 |
| I.3.4. Теоретические исследования в области поляризационного контраста | 40 |
| I.4. Выводы. Постановка задачи | 44 |
| 2. Процедура оценки поляризационного контраста РЛ объектов по степени поляризационной анизотропии | 47 |
| 2.1. Отображение поляризационных свойств РЛ объектов в матрице когерентности рассеянного потока | 48 |
| 2.2. Свойства матрицы когерентности (МК) рассеянного | |

| | |
|--|-----|
| сигнала. | 56 |
| 2.2.1. МК сигнала, рассеянного искусственной целью. Коэффициент поляризационной анизотропии по мощности искусственной цели | 56 |
| 2.2.2. Матрица когерентности сигнала, рассеянного "фоном". Интегральный коэффициент поляризационной анизотропии по мощности распределенного объекта. | 59 |
| 2.3. Матрица когерентности суммы двух потоков, рассеянных искусственной целью и фоновым образованием | 61 |
| 2.3.1. Интегральный коэффициент поляризационной анизотропии объекта "фон + цель" | 61 |
| 2.3.2. Анализ интегрального коэффициента поляризационной анизотропии объекта "фон + цель" | 69 |
| 2.3.3. Определение параметров собственного базиса матрицы рассеяния объекта "фон + цель" | 70 |
| 2.4. Оценка поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" по степени поляризационной анизотропии. . . | 75 |
| 2.4.1. Обоснование статистической модели "фона" по результатам моноимпульсных поляризационных измерений | 77 |
| 2.4.2. Определение поляризационного контраста по коэффициенту поляризационной анизотропии и РЛ контраста по ЭПР . . | 88 |
| 2.4.3. ПК радиолокационных объектов для выбранной модели "фона" и конкретных параметров искусственной цели. | 91 |
| 2.4.4. Оценка влияния движения сосредоточенной "цели" на измеряемые поляризационные параметры. | 104 |
| 2.5. Краткие выводы. | 110 |
| 3. Экспериментальная проверка полученных результатов теоретического анализа поляризационного контраста. | 111 |
| 3.1. Алгоритм измерения поляризационного параметра в моноимпульсной обзорной РЛС. | 111 |

| | |
|---|-----|
| 3.2. Описание структурной схемы моноимпульсного поляризационного измерителя. | 115 |
| 3.3. Алгоритм измерения поляризационных параметров в обзорном локаторе модуляционного типа | 120 |
| 3.4. Описание структурной схемы поляризационного измерителя модуляционного типа. | 126 |
| 3.5. Оценка величины поляризационного контраста РЛ целей по результатам экспериментальных измерений параметров поляризационной анизотропии и ЭПР. | 133 |
| 3.5.1. Краткое описание условий проведения поляризационных измерений. | 133 |
| 3.5.2. Оценка поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР стационарных искусственных сооружений | 139 |
| 3.5.3. Особенности поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР движущихся судов. | 154 |
| 3.5.4. Результаты измерения параметров ЭПР и поляризационной анизотропии при РЛ наблюдении за летящим вертолетом. | 172 |
| 3.5.5. Оценка поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР транспортных средств. | 175 |
| 3.5.6. Особенности поляризационного контраста объектов с малой ЭПР по результатам измерения ЭПР и поляризационной анизотропии | 209 |
| Основные результаты и выводы. Заключение | 219 |
| Список использованной литературы | 222 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы.

Радиолокационное зондирование земной (водной) поверхности и метеообразований широко используется для решения задач управления воздушным движением (УВД), определения параметров метеообразований, обнаружения движущихся целей, обеспечения безопасного судоходства, и т.д. Техническими средствами для решения этих задач являются обзорные радиолокационные системы (ОРЛС), осуществляющие обнаружение объектов, измерение их параметров и формирующие панорамное РЛ изображение местности. Обзорные РЛС могут существенно отличаться друг от друга по техническим параметрам, сложности, стоимости и т.п. Однако, для большинства из них характерна эксплуатация в сложной помеховой обстановке.

Так, например, появление в секторе обзора РЛС УВД сильных отражений от метеообразований приводит к ухудшению наблюдаемости летательных аппаратов (ЛА), снижая безопасность полетов. Значительные отражения от возмущенной водной поверхности, береговой линии и метеообразований не позволяют надежно опознавать РЛ навигационные ориентиры, препятствуя безопасной проводке судов в условиях пониженной видимости, в узкостях и на сложных фарватерах. Обзорные РЛС ЛА должны надежно оценивать степень опасности гидрометеоров на маршруте следования, обнаруживать цели на фоне метеообразований (отражений от земной поверхности), а также выделять наземные ориентиры независимо от облачности и осадков. Специализированные ОРЛС, препятствующие несанкционированному доступу в охраняемую зону, должны обнаруживать движущиеся объекты с малой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) в условиях помеховых отражений и т.д.

Таким образом, обязательным требованием, предъявляемым к ОРЛС, является эффективное выделение сосредоточенных искусственных целей

на фоне поверхностно (объемно)-распределенных объектов. Выполнение этого требования связано с задачей радиолокационного контраста наблюдаемых объектов, возникающей при сравнении параметров, характеризующих соседние элементы разрешения обзорной РЛС. Традиционно РЛ контраст определяется в виде отношения величин, пропорциональных эффективной поверхности рассеяния. Присутствие сосредоточенной цели в одном из элементов разрешения локатора приводит к изменению ЭПР составного объекта по сравнению с распределенным объектом, что создает объективную основу для их распознавания по соответствующим отметкам на радиолокационном изображении. Однако, если ЭПР распределенного объекта превышает ЭПР искусственной цели, то радиолокационный контраст (РЛК) двух объектов типа "фон" и "фон + цель" оказывается незначительным.

Улучшить наблюдаемость искусственных целей можно, уменьшив размеры элементарного объема разрешения ОРЛС или используя информацию о доплеровском смещении частоты сигнала, вызванном перемещением объекта, и т.п. Однако, этот путь не всегда возможен из-за ограничений на размеры антенны, применения "простых" зондирующих сигналов, а также при обнаружении объектов с нулевой составляющей радиальной скорости. В таких случаях использование поляризационных характеристик наблюдаемых объектов становится единственным средством улучшения селективных возможностей ОРЛС. При этом переход к описанию рассеивающих свойств объектов с помощью поляризационных параметров позволяет ввести понятие "поляризационного контраста" (ПК), как частный случай радиолокационного контраста. Если два РЛ объекта имеют близкие величины ЭПР, но существенно различные значения некоторого поляризационного параметра, то поляризационный контраст этих объектов будет превышать соответствующую величину РЛК. Это позволяет сформировать контрастное радиолокационное изображение местности и повысить возможности ОРЛС по обнаружению и селекции объектов.

Несмотря на большое число работ в области РЛ поляриметрии, проблема оценки поляризационного контраста искусственных целей на фоне распределенных объектов остается на уровне теоретического моделирования, не подтвержденного экспериментальными результатами. Не определены условия, при которых использование поляризационных параметров при формировании радиолокационного изображения имеет преимущества по сравнению с величиной параметра ЭПР. Причиной этого является отсутствие общего подхода к оценке ПК двух РЛ объектов с произвольными величинами ЭПР и поляризационных инвариантов матриц рассеяния фонового образования и искусственной цели. Кроме того, использование поляризационных методов, имеющих ограниченное быстродействие, не позволяет исследовать влияние параметров движения цели на измеряемые поляризационные характеристики и на величину поляризационного контраста.

Из изложенного следует, что в настоящее время существует актуальная научно-техническая задача разработки процедуры оценки поляризационного контраста РЛ объектов и анализа возможностей использования поляризационных параметров в обзорных РЛС с низким разрешением с целью повышения эффективности выделения стационарных и перемещающихся искусственных целей на фоне распределенных природных образований.

Состояние вопроса.

Одной из первых теоретических работ, в которых рассматривался поляризационный контраст РЛ объектов с произвольными поляризационными свойствами, является статья Козлова А.И. [11]. В ней был использован подход, позволяющий найти представления матриц рассеяния и соответствующих им энергетических матриц Грейвса двух объектов в некотором поляризационном базисе. Затем исследования поляризационного контраста (ПК) были начаты работами Костиноки, Бернара, Иоанидиса, Танака и др. [29, 30, 77]. Однако, полученные в них

результаты оценки ПК связаны с использованием данных измерения обзорных РЛС с высоким разрешением или синтезированной апертурой и обработкой больших массивов данных вне реального масштаба времени.

В отечественной литературе основные теоретические положения, необходимые для выработки общего подхода к оценке поляризационного контраста объектов в обзорных РЛС с низким разрешением, сформулированы в работах Канарейкина Д.Б., Павлова Н.Ф., Потехина В.А., Богородского В.В., Козлова А.И. [1, 3], Татаринова В.Н., Хлусова В.А., Масалова Е.В. [4, 6, 17]. В этих работах обоснована возможность представления всего многообразия РЛ объектов двумя подмножествами типа "фон" и "фон + цель" [1], получено представление обобщенной матрицы рассеяния произвольного РЛ объекта при выполнении теоремы взаимности, определены требования к матрице когерентности излучаемого потока для случая однопозиционного зондирования [6, 17], выработан подход к определению поляризационной структуры суммы рассеянных потоков [4].

В настоящее время наиболее развитыми областями в РЛ поляриметрии являются радиометеорология и идентификация (селекция) целей. Измеряемые при этом поляризационные параметры являются, как правило, эмпирическими, инвариантными величинами, зависящими от взаимной ориентации собственного поляризационного базиса объекта и измерительной системы координат РЛС, а также от других факторов. Кроме того, для большинства теоретических и экспериментальных работ РЛ поляриметрии характерно предположение о наличии у наблюдаемых объектов линейных собственных поляризаций, тогда как в общем случае объекты РЛ зондирования могут обладать произвольными эллиптическими собственными поляризациями.

Большой объем данных РЛ наблюдения искусственных объектов на фоне подстилающей поверхности, содержится в работах, проводимых в ТИАСУР. Особенностью этих исследований является измерение поляриза-

ционных параметров РЛ объектов двумя принципиально различными методами : модуляционным (одноканальным) и моноимпульсным (двухканальным). Полученные результаты однопозиционного зондирования распределенных и составных ("фон + цель") объектов подтверждают факт существования поляризационного контраста РЛ целей этого типа.

Таким образом, существуют как теоретические, так и практические предпосылки для решения в общем виде задачи оценки поляризационного контраста двух РЛ объектов с произвольными поляризационными свойствами, а также для определения возможностей практического использования поляризационных параметров в ОРЛС с низким разрешением.

Цель работы.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка, и исследование процедуры оценки поляризационного контраста РЛ объектов по степени поляризационной анизотропии, а также экспериментальная проверка полученных теоретических результатов.

Обоснование структуры работы.

Сформулированная цель работы позволяет выбрать направление исследований и обосновать структуру диссертации.

Прежде всего необходимо выработать аналитический подход к расчету поляризационного контраста двух радиолокационных объектов типа "фон" и "фон + цель" с произвольными значениями поляризационных инвариантов матриц рассеяния "фона" и "цели" для взаимного случая активной однопозиционной радиолокации.

Кроме того, следует обосновать выбор инварианта МР объектов, в отношении которого производится анализ поляризационного контраста.

На основе известных экспериментальных данных необходимо определить параметры модели временных флуктуаций поляризационных инвариантов статистической матрицы рассеяния фоновое образования. Исходя из этой модели, следует показать принципиальную возможность повышения контраста радиолокационного изображения при использовании

в качестве отображаемой величины выбранного инварианта МР.

Затем необходимо получить количественные оценки поляризационного контраста объектов "фон" и "фон + цель" для выбранной статистической модели распределенного объекта и заданных инвариантов МР осредоточенной цели, в зависимости от соотношения ЭПР цель/фон, и сравнить эти оценки с соответствующими величинами радиолокационного контраста по ЭПР.

Кроме этого следует оценить влияние перемещения осредоточенной искусственной цели относительно подстилающей поверхности на величину оцениваемого инвариантного параметра матрицы рассеяния составного РЛ объекта "фон + цель".

Логическим завершением работы должна стать экспериментальная проверка результатов теоретического анализа поляризационного контраста, осуществленная в ходе натурных измерений поляризационных параметров распределенного ("фон") и составного ("фон + цель") РЛ объектов для конкретных типов осредоточенных искусственных целей и различных видов подстилающей поверхности.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Получены аналитические выражения, определяющие преобразование матрицы когерентности излучаемого потока радиолокационным объектом "фон + цель" для произвольных инвариантов матриц рассеяния "фона" и "цели". Это дает возможность, задавая параметры статистической модели временных флуктуаций инвариантов МР распределенного и осредоточенного объектов, получать количественные оценки поляризационного контраста малоразмерной искусственной цели, наблюдаемой на фоне поверхностно (объемно)-распределенного объекта.

2. Определены потенциальные возможности выделения целей типа трехгранного (двухгранного) РЛ отражателей и вырожденных целей типа вертикально и горизонтально ориентированных диполей на фоне распределенных объектов с конкретными параметрами статистической модели

поляризационных инвариантов МР. Полученные результаты позволяют решать практические задачи по обнаружению малоразмерных целей в условиях сильных помеховых отражений от подстилающей поверхности.

3. Результаты статистического моделирования временных флуктуаций инвариантов МР фонового образования позволяют уточнить природу экспериментальных данных измерения модуля коэффициента поляризационной анизотропии реальных распределенных объектов (лесные покровы, водная поверхность, покрытые снегом поля, пашня).

4. Доказано, что при определенных корреляционных свойствах флуктуаций инвариантов матрицы рассеяния "фона" и конкретных отношениях ЭПР цель/фон, поляризационные параметры РЛ объекта "фон + движущаяся цель" являются более чувствительными к перемещению "цели", чем параметр эффективной поверхности рассеяния.

5. Проведены экспериментальные измерения поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии и радиолокационного контраста по ЭПР объектов типа "фон" и "фон + цель" для конкретных типов искусственных целей и подстилающей поверхности, представляющих самостоятельный интерес для специалистов в области радиолокации. Проведено сравнение чувствительности параметров ЭПР и поляризационной анизотропии составных объектов "фон + движущаяся цель" к перемещению различных искусственных объектов.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенный аналитический подход к определению поляризационного контраста радиолокационных объектов типа "фон" и "фон + цель" с произвольными поляризационными свойствами "цели" и "фона" позволяет получить количественные оценки информативности РЛ изображения обзорной РЛС произвольной конфигурации для случая однопозиционного зондирования объектов в дальней зоне и выполнения теоремы взаимности.

Результаты работы могут быть использованы при создании высокоинформативных обзорных РЛС на этапе системного проектирования, что

позволит оценить затраты на их создание оптимальным образом.

Результаты работы использованы в ОКР " Новелла-2 " в НИИ РЭС (г.Санкт - Петербург), в ОКР РАС " Рея " НИИ " Радар " (г.Санкт - Петербург), а также при определении путей модификации РАС обнаружения и предупреждения ИРЛЗЗ в НИИ " Стрела " (г.Тула).

На публичную защиту выносятся следующие положения :

1. Оценка поляризационного контраста радиолокационных объектов возможна при произвольных значениях инвариантных параметров их матриц рассеяния.

2. Поляризационный контраст по параметру поляризационной анизотропии наблюдаемых объектов типа "фон" и "фон + цель" для искусственной "цели" с эффективной поверхностью рассеяния, сравнимой или меньшей ЭПР "фона", превосходит радиолокационный контраст по ЭПР для этих объектов.

3. Инвариантные характеристики (степень поляризационной анизотропии по мощности, модуль комплексного коэффициента поляризационной анизотропии) матрицы рассеяния РЛ объекта типа "фон + цель" обладают высокой чувствительностью к перемещению искусственных целей, имеющих радиальную составляющую скорости близкую к нулю.

Публикации и апробация работы.

Основные результаты работы изложены в 8 статьях, тезисах докладов и депонированной в ЦНТИ ГА рукописи и обсуждались на :

1. XVI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн, Харьков 1990 г.;

2. Всесоюзной конференции " Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации ", Киев, 1991 г.

І. ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО КОНТРАСТА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Данная глава посвящена анализу теоретических и экспериментальных исследований в области радиолокационной поляриметрии применительно к задаче оценки поляризационного контраста наблюдаемых РЛ объектов в обзорных локахторах, проведенному по данным отечественной и зарубежной литературы. По результатам анализа сформулированы конкретные задачи, поставленные в настоящей диссертации.

І.І. Понятие поляризационного контраста радиолокационных (РЛ) объектов.

Радиолокационное зондирование земной (водной) поверхности и метеос образований является необходимым условием для решения многих задач мирного и военного характера. К их числу относятся : управление воздушным движением, определение параметров метеос образований, обнаружение движущихся целей, обеспечение безопасного судоходства, выделение наземных навигационных ориентиров и т.д.

Основным "инструментом" при решении задач дистанционного зондирования остаются обзорные радиолокационные системы (ОРЛС), выполняющие ряд взаимосвязанных между собой функций : формирование панорамного РЛ изображения местности, обнаружение объектов, измерение их параметров и т.д. Обзорные РЛС могут существенно отличаться друг от друга по тактико-техническим характеристикам, сложности, стоимости и т.п. Однако, для большинства из них характерна эксплуатация в сложной помеховой обстановке. Так, например, наличие сильных отражений от метеос образований заметно осложняет работу ОРЛС управления воздушным движением, снижая наблюдаемость летательных аппаратов

(ЛА). Обеспечение безопасной проводки судов непосредственно связано с надежным опознаванием навигационных ориентиров при значительных отражениях от водной поверхности, береговой линии и метеообразованиях. Для ОРЛС, размещенных на борту ЛА, необходимо обнаруживать РЛ цели на фоне метеообразований или отражений от земной поверхности и выделять наземные ориентиры независимо от облачности и осадков.

Следовательно, повышение эффективности выделения сосредоточенных искусственных целей на фоне поверхности (или объема) — распределенных объектов является общим требованием к таким обзорным РЛС.

Прием и обработка РЛ сигналов в обзорных локах осуществляются системами первичной и вторичной обработки. Основным назначением системы первичной обработки является формирование РЛ изображения наблюдаемой местности (среды) с отметками целей. Решение по обнаружению, распознаванию и определению местоположения объектов принимается, как правило, оператором РЛС на основе визуального анализа отраженных сигналов на устройствах отображения РЛИ.

Особая роль оператора в системе обнаружения состоит в том, что он частично выполняет функции устройства вторичной обработки сигнала: на основании опыта и интуиции оператор анализирует получаемую информацию с учетом возможного положения цели и закономерностей ее движения. При этом эффективность РЛ наблюдения с использованием индикаторных устройств во многом зависит от контрастной чувствительности зрения оператора, поскольку [9] процесс считывания информации с экрана индикатора определяется, главным образом, разницей в яркостях свечения соседних элементов РЛ изображения, а не их абсолютными значениями. Поэтому, чем больше будут отличаться амплитуды сигналов, определяющих яркость двух соседних элементов РЛИ, тем выше будет его информативность. При этом яркостный контраст элементов изображения оказывается однозначно связан с радиолокационным контрастом (РЛК) наблюдаемых объектов. Понятие РЛ контраста возникает

при сравнении принятых сигналов, характеризующих два соседних объема разрешения локатора [11]. Если рассеивающие объекты в этих объемах по-разному изменяют характеристики одной и той же облучающей волны, то создается объективная основа для их распознавания по соответствующим отметкам на радиолокационном изображении.

Если на РЛ индикаторе отображается величина, пропорциональная эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) наблюдаемых целей, то под РЛ контрастом двух объектов следует понимать отношение их ЭПР. При этом величина K может быть определена в виде ненормированного

$$K = A_1 / A_2 \quad (1.1)$$

или нормированного

$$K_H = |(A_1 - A_2) / (A_1 + A_2)|, \quad (0 \leq K_H \leq 1) \quad (1.2)$$

отношений (A_1 — ЭПР 1-го объекта).

Типичной ситуацией для РЛ боевора является наблюдение искусственной цели на фоне совокупности большого числа случайно расположенных, независимых и хаотически перемещающихся отражателей. При этом рассеянный сигнал является суммой сигналов, соответствующих сосредоточенному и распределенному объектам. Для искусственной цели с малой ЭПР интенсивность отражений от распределенного объекта "фон" может быть соизмерима и даже превышать мощность сигналов, отраженных от "цели". В этом случае радиолокационный контраст K_H двух объектов типа "фон" и "фон + цель" оказывается незначительным.

Повысить наблюдаемость сосредоточенных целей путем снижения интенсивности отражения от фонового образования можно, уменьшив размеры элементарного объема разрешения РЛС. Однако, этот путь не всегда возможен из-за ограничений на размеры антенны ОРЛС и применения "простых" зондирующих сигналов с $AP \cdot \tau_H \approx 1$. В таких случаях использование поляризационных параметров РЛ целей становится единственным средством повышения контрастности РЛ изображения [12].

Таким образом, переход к описанию свойств объектов с помощью поляризационных параметров позволяет ввести понятие "поляризационного контраста" (ПК) двух объектов, как частный случай радиолокационного контраста. При этом нормированная величина ПК может быть определена по аналогии с (1.2) в виде :

$$W_H = |(\Pi_1 - \Pi_2) / (\Pi_1 + \Pi_2)|, \quad (0 \leq W_H \leq 1), \quad (1.3)$$

где Π_1 - некоторый поляризационный параметр, характеризующий РЛ объект в 1-ом элементе разрешения ОРЛС. Понятно, что когда два объекта имеют близкие величины ЭПР, но существенно различные значения некоторого поляризационного параметра, то поляризационный контраст W_H этих объектов будет превышать соответствующую величину K_H . Поскольку в качестве параметра Π могут выступать различные величины, рассмотрим, какие поляризационные характеристики наблюдаемых целей нашли применение в теории и практике РЛ поляриметрии.

1.2. Описание рассеивающих свойств объектов поляризационными характеристиками.

Для активной радиолокации объективное суждение о наблюдаемом объекте возможно в результате анализа рассеянной им. электромагнитной волны. С точки зрения поляризационных измерений существуют два общих способа теоретического описания процесса рассеяния падающей на объект волны. Первый из них был развит Стоксом и Миллером. При этом состояние поляризации волн и антенн характеризуется вещественным вектором Стокса $\vec{G} = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4]$, что позволяет осуществить описание рассеивающих свойств РЛ объекта в виде

$$\vec{G}_p = [M] \cdot \vec{G}_o, \quad (1.4)$$

Здесь $[M]$ - вещественная матрица (4x4), называемая матрицей Миллера, а векторы \vec{G}_o и \vec{G}_p - соответственно векторы Стокса падаю-

щей на объект и рассеянной волн. Несколько иной подход был предложен Джонсоном и Синклером, использовавшими для описания излученного и принятого сигналов результаты измерения комплексных напряжений. При этом рассеянная электромагнитная волна представляется двумерным комплексным вектором, а свойства рассеивающего объекта — комплексной (2x2) матрицей $[\dot{S}]_0$:

$$[\dot{S}]_0 = \begin{bmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}_{11} \exp(j\varphi_{11}) & \dot{s}_{12} \exp(j\varphi_{12}) \\ \dot{s}_{21} \exp(j\varphi_{21}) & \dot{s}_{22} \exp(j\varphi_{22}) \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Считая, что падающая на объект и рассеянная волны являются плоскими, вектор Джонса \vec{E}_p рассеянного поля можно найти путем линейного преобразования матрицы-столбца падающего поля \vec{E}_0 в виде :

$$\vec{E}_p = [\dot{S}]_0 \cdot \vec{E}_0 \quad (1.6)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{p1} \\ \dot{E}_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_{01} \\ \dot{E}_{02} \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

В общем случае ЭМ волна, рассеянная РЛ объектом, является частично поляризованной. Однако, если эта волна является квазимонохроматической, то соотношения (1.6, 1.7) остаются в силе и при замене $[\dot{S}]_0$ на $[\dot{S}(t)]_0$, где $[\dot{S}(t)]_0$ характеризует изменение свойств объекта во времени [3]. При этих допущениях изменяющаяся во времени матрица рассеяния в любой момент времени t будет обладать теми же свойствами, что и МР стабильного объекта [12].

Таким образом, для активной однопозиционной радиолокации объектов в дальней зоне и выполнения теоремы взаимности ($\dot{s}_{21} = \dot{s}_{12}$) матрица $[\dot{S}]_0$ несет всю информацию о рассеивающих свойствах целей. Поэтому однозначно определить поляризационные свойства стабильного (или флуктуирующего) объекта можно двумя равноценными путями [1, 12] : измерив в заданном поляризационном базисе элементы \dot{s}_{11} , \dot{s}_{12} , \dot{s}_{22} матрицы рассеяния, или, найдя ее инварианты (характерные поля-

ризаационные состояния). Однако, описание свойств РД целой совокупностью элементов МР осложняется высокой чувствительностью \dot{s}_{1j} к изменениям условий наблюдения [12,13], зависимостью \dot{s}_{1j} от вращения цели в плоскости, перпендикулярной линии визирования "РДС - цель", а также от вида поляризаационного базиса (линейный, круговой, эллиптический), в котором производится измерения. Поэтому более подробно рассмотрим второй способ описания поляризаационных свойств объектов.

1.2.1. Характерные поляризаационные состояния.

Концепция оптимальных поляризаций излучаемого сигнала впервые была предложена Кенно в конце 40-х - начале 50-х годов. Затем она рассматривалась во многих работах, например [20,25,87,88 и др.]. В последние годы она интенсивно развивается в исследованиях Бернера, Давидовича, Костиноки, Агровала [27, 28,89]. Так, в работе [89] подробно рассмотрены 6 характерных поляризаационных состояний (ХПС) излученной волны. К четырем традиционным ХПС : двум ХPOL-Nulls, при которых принятая мощность в ортогональном канале равна нулю, и двум SOPOL-Nulls - с нулевой мощностью в основном канале, Бернер и Агровал [89] добавили еще два - ХPOL-Maxs, при которых в ортогональных каналах наблюдается максимально возможное значение мощности принятого сигнала.

В отечественной литературе 4 из 6 поляризаационных состояния излучаемой волны получили название "собственных поляризаций" (аналог - ХPOL-Nulls) и "поляризаций нулевого сигнала" (аналог - SOPOL-Nulls). Две собственные поляризации цели (собственный поляризаационный базис) представляют собой поляризации облучаемой волны, при которых перекрестная компонента в рассеянной волне отсутствует. В свою очередь поляризациям нулевого сигнала соответствуют такие поляризации антенны РДС, при которых отраженная от цели волна ортого-

нальна падающей волне [I, 9I].

При использовании концепции Кенно поляризационные свойства сигналов и объектов описываются в полярной системе координат на сфере Пуанкаре. Доказано, что все множество оптимальных поляризаций, рассмотренных в [89], отображается на круге большого диаметра сферы Пуанкаре и представляет собой "вилку" с одной "ручкой" (OX_1) и пятью "зубцами" (OX_2 , OC_1 , OC_2 , OS_1 , OS_2). При этом собственный поляризационный базис объекта (XPOL-Nulls) представлен диаметрально противоположными точками X_1 и X_2 , отображающими два эллипса поляризации, у которых ориентация отличается на 90° , а углы эллиптичности равны и противоположны по знаку. Поляризации нулевого сигнала (COPOL-Nulls) обозначены точками C_1 и C_2 , расположенными симметрично относительно оси X_1X_2 ($\angle C_1OX_2 = \angle C_2OX_2$). В свою очередь точки, соответствующие поляризационным состояниям XPOL-Maxes, лежат на том же круге, причем диаметр S_1S_2 перпендикулярен диаметру X_1X_2 .

Доказано [I], что положение оптимальных поляризаций инвариантно по отношению к поляризационному базису, в котором проводятся измерения. В частности, поляризационно инвариантна "вилка", соединяющая точки X_1 , C_1 , C_2 (так называемая "вилка Хойнзена"). При этом задание матрицы рассеяния объекта на сфере Пуанкаре является достаточным, если известно положение : двух точек (C_1 , C_2), соответствующих поляризациям нулевого сигнала ; либо одной из точек (C_1) поляризаций нулевого сигнала и одной из точек (X_1), описывающих собственные поляризации объекта.

Таким образом, определение двух характерных поляризационных состояний объекта является одним из путей преодоления недостатков, связанных с описанием его свойств совокупностью элементов $\hat{\epsilon}_{1j}$ матрицы рассеяния.

1.2.2. Параметризация Хойнена при описании матрицы рассеяния РЛ объекта.

С другой стороны, определение оптимальных поляризаций излучаемой волны связано с решением задачи собственных значений [20] :

$$[\dot{S}] \cdot \vec{X} = \lambda \cdot \vec{X}, \quad (1.8)$$

дающим в общем случае два различных собственных вектора \vec{X}_1, \vec{X}_2 . Этим векторам соответствуют два комплексных собственных значения $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ матрицы рассеяния $[\dot{S}]$. Полученные значения собственных чисел были представлены Хойненом следующим образом [20] :

$$\dot{\lambda}_1 = m \cdot \exp(j2\nu), \quad \dot{\lambda}_2 = m \cdot \operatorname{tg}^2(\gamma) \cdot \exp(-j2\nu), \quad (1.9)$$

где $|\dot{\lambda}_1| \geq |\dot{\lambda}_2|$, $-45^\circ \leq \nu \leq +45^\circ$, $0^\circ \leq \gamma \leq 45^\circ$.

При выполнении теоремы взаимности для однозначного описания матрицы рассеяния с относительной фазой, характеризующей РЛ объект в дальней зоне,

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} |\dot{S}_{11}| \cdot \exp j(\varphi_{11} - \varphi_{12}) & |\dot{S}_{12}| \\ |\dot{S}_{21}| & |\dot{S}_{22}| \cdot \exp j(\varphi_{22} - \varphi_{12}) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Хойнен предложил использовать следующие инвариантные параметры :

- m — "величина цели", предложенная для оценки ее эффективной поверхности рассеяния ($m = |\dot{\lambda}_1|$) ;
- φ — "угол ориентации", определяющий меру ориентации цели в плоскости, перпендикулярной линии визирования "РЛС-цель" ;
- τ — "угол эллиптичности", как мера симметрии цели относительно правой и левой круговых поляризаций ($\tau = 0^\circ$ для "симметричных" и $\tau = \pm 45^\circ$ для "полностью асимметричных" объектов) ;
- ν — "скачковый угол", характеризующий множественность отражений на цели ;
- γ — "характеристический угол", описывающий способность РЛ цели

поляризовать падающее неполяризованное излучение ; при этом $\gamma = 0^\circ$ для полностью поляризованного и $\gamma = 45^\circ$ для неполяризованного рассеянных сигналов.

Для невязанных моностатических случаев или бистатической радиолокации, в которых $\dot{s}_{12} \neq \dot{s}_{21}$, подход Хойнана требует введения дополнительных параметров и пересмотра понятия характеристического угла γ .

1.2.3. Параметризация матрицы рассеяния РЛ объекта в отечественной поляриметрии.

В отечественной РЛ поляриметрии сформировался несколько иной подход к описанию наблюдаемых объектов инвариантными поляризационными параметрами. Доказано [1, 2, 3], что для МР [\dot{S}] объекта такими параметрами являются сумма квадратов модулей ее элементов

$$A_0 = |\dot{s}_{11}|^2 + 2 \cdot |\dot{s}_{12}|^2 + |\dot{s}_{22}|^2 = |\dot{\lambda}_1|^2 + |\dot{\lambda}_2|^2 \quad (I.II)$$

и модуль определителя МР

$$B_0 = |\det[\dot{S}]| = |\dot{s}_{11} \cdot \dot{s}_{22} - \dot{s}_{12}^2| = |\dot{\lambda}_1| \cdot |\dot{\lambda}_2|. \quad (I.I2)$$

В дальнейшем, величина $A_0 = |\dot{\lambda}_1|^2 + |\dot{\lambda}_2|^2$ была названа "полной ЭПР цели", а вместо параметра $B_0 = |\dot{\lambda}_1| \cdot |\dot{\lambda}_2|$ предложили использовать нормированную величину "коэффициента поляризационной анизотропии объекта по мощности" [3] :

$$\mu_{\Pi} = (|\dot{\lambda}_1|^2 - |\dot{\lambda}_2|^2) / (|\dot{\lambda}_1|^2 + |\dot{\lambda}_2|^2). \quad (I.I3)$$

Кроме того, широкое применение в качестве инвариантных параметров МР объекта нашли безразмерные действительные величины "степень поляризационной анизотропии μ_0 " и "модуль электрического фактора формы ρ_0 " объекта [1, 3, 10, 15, 16] :

$$\mu_0 = (|\dot{\lambda}_1| - |\dot{\lambda}_2|) / (|\dot{\lambda}_1| + |\dot{\lambda}_2|), \quad (I.I4)$$

$$\rho_0 = |\dot{\lambda}_2| / |\dot{\lambda}_1|. \quad (I.I5)$$

связанные соотношениями

$$\mu_0 = (1 - \rho_0)/(1 + \rho_0), \quad \rho_0 = (1 - \mu_0)/(1 + \mu_0). \quad (I.16)$$

Для РЛ объекта с линейными собственными поляризациями и действительными собственными числами λ_1, λ_2 поляризационные инварианты $\mu_0(\rho_0)$ и динамический параметр θ_0 ориентации базиса однозначно описывают его поляризационные свойства [15]. Однако, в общем случае собственный поляризационный базис (СПБ) объекта является эллиптическим, а $\dot{\lambda}_1$ и $\dot{\lambda}_2$ — комплексные величины. В работах [6, 17] доказано, что для однопозиционной радиолокации целей в дальней зоне и выполнения теоремы взаимности их полное и однозначное представление возможно следующей группой инвариантов:

A_0 — "полная ЭПР объекта" ($A_0 = |\dot{\lambda}_1|^2 + |\dot{\lambda}_2|^2$);

ρ_0 — "модуль электрического фактора формы объекта" (или μ_0 — "степень поляризационной анизотропии объекта");

$\Delta\varphi$ — "угол фазового сдвига" собственных чисел МР цели;

θ_0 — "угол ориентации собственного базиса объекта";

ε_0 — "угол эллиптичности собственного базиса объекта".

Кроме инвариантных параметров μ_0, ρ_0 (I.14, I.15) в работе [17] подробно проанализированы комплексные величины фактора формы и степени анизотропии РЛ объекта:

$$\dot{\rho} = \dot{\lambda}_2 / \dot{\lambda}_1 = \rho_0 \exp(j\Delta\varphi), \quad (I.17)$$

$$\dot{\mu} = (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) / (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) = \mu_d \exp(j\Phi), \quad (I.18)$$

где

$$\mu_d = \left[\frac{1 - 2 \cdot \rho_0 \cdot \cos \Delta\varphi + \rho_0^2}{1 + 2 \cdot \rho_0 \cdot \cos \Delta\varphi + \rho_0^2} \right]^{0.5}, \quad (I.19)$$

$$\Phi = \arctg (2 \cdot \rho_0 \cdot \sin \Delta\varphi / (1 - \rho_0^2)). \quad (I.20)$$

Использование параметров μ_d, Φ для описания поляризационных

свойств рассеивающих объектов связано, в первую очередь, с возможностью измерения этих величин в моноимпульсных поляризационных РЛС [17]. Во-вторых, модуль μ_d и фаза Φ комплексной степени анизотропии однозначно определяют инвариантный параметр μ_{Π} :

$$\mu_{\Pi} = 2 \cdot \mu_d \cdot \cos \Phi / (1 + \mu_d^2). \quad (1.21)$$

Кроме того, когда нет необходимости измерять инварианты ρ_0 , μ_0 , μ_{Π} с большой точностью, в качестве их оценки используется

$$\tilde{\mu} = \operatorname{Re}(\dot{\mu}) = \mu_d \cdot \cos \Phi, \quad (1.22)$$

причем погрешность в определении этих величин составляет величину $\pm 15\%$, исчезающую в крайних точках интервала определения параметров.

1.3. Результаты поляриметрических исследований в задаче оценки поляризационного контраста.

Все параметры, рассмотренные выше, можно использовать для анализа поляризационного контраста (ПК) РЛ объектов. Вместе с тем, ввиду бесконечного числа и разнообразия объектов и условий их наблюдения обзорными РЛС, решение задачи ПК в данной работе для всей группы поляризационных инвариантов не представляется возможным.

Для упрощения анализа воспользуемся разбиением всего множества РЛ объектов на два наиболее характерных подмножества [1]: естественные образования, состоящие из большого числа элементарных отражателей с ЭПР одного порядка ("фон"), и составные объекты, представленные в виде совокупности распределенного фонового образования и некоторой малоразмерной искусственной цели ("фон + цель"). При этом для решения задачи оценки поляризационного контраста РЛ объектов, принадлежащих к этим подмножествам, требуется знать априорные данные о величинах поляризационных параметров распределенных и сосредоточенных объектов, их статистических характеристиках, и т.д.

Рассмотрим далее результаты измерения поляризационных параметров объектов. Как следует из [12], наибольшее количество экспериментальных и теоретических работ в области радиолокационной поляриметрии характерно для радиометеорологии и идентификации (селекции) объектов. Определим, в какой степени результаты, полученные в этих областях поляриметрии, могут быть использованы для анализа поляризационного контраста объектов при РЛ обзоре.

1.3.1. Поляризационные параметры, используемые в радиометеорологии.

Среди первых работ, в которых делались попытки связать поляризационные характеристики рассеянного сигнала с определенными типами атмосферных осадков, следует выделить работы Брауна и Робинсона (1962), Хантера (1964), Ньюела (1967), Шупяцкого и Минервина (1969, 1963) и др. Объективную информацию о гидрометеорах было предложено извлекать из отношения интенсивностей поляризованной и кросс-поляризованной составляющей отраженной волны. Для излучения РЛ сигнала с линейной (круговой) поляризацией отношение интенсивности кросс-поляризованной компоненты принятого сигнала к исходной получило название "отношение линейной (круговой) деполаризации".

Систематическое исследование осадков поляризационными методами за рубежом началось с развертывания в 1968 г. двух метео-РЛС с поляризационным разнесом [54], обеспечивающих излучение импульсного РЛ сигнала с любой эллиптической поляризацией, одновременный прием основной и ортогональной компонент рассеянной волны и измерение комплексной корреляции между ними. В частности, для случая излучения РЛ сигнала с круговой поляризацией Мак-Кормик и Хендри [53] представили матрицу когерентности рассеянного совокупностью гидрометеоров сигнала в виде :

$$\dot{J} = \begin{bmatrix} W_1 & \dot{W} \\ \dot{W}^* & W_2 \end{bmatrix}, \quad (I.23)$$

где

W_1 — интенсивность принятого сигнала в ортогональном ($i = 1$) и основном ($i = 2$) каналах, \dot{W} — комплексная корреляция между амплитудами принятых сигналов в обоих каналах,

и предложили использовать для описания объемно-распределенной совокупности гидрометеоров следующие параметры :

1. "коэффициент отражаемости" Z_e , получаемый при нормировании интенсивности сигнала принятого в основном канале ;

2. "коэффициент подавления" CAN

$$10 \cdot \log_{10} (W_2 / W_1) ; \quad (I.24)$$

3. нормированный "коэффициент корреляции" основной и ортогональной компонент принятого сигнала ORCT

$$| \dot{W} | / (W_1 \cdot W_2)^{0.5} ; \quad (I.25)$$

4. "средний угол ориентации частиц" внутри объема разрешения

$$ALD_{\pm} = \pm 0.5 (\arg(\dot{W}_{\pm}) - 180^\circ) , \quad (I.26)$$

где "+" и "-" соответствуют излучению сигналов с правой и левой круговой поляризацией.

Среди работ в 70-е годы, необходимо отметить работы Шупяцкого и др. [5, 55, 56], в которых рассматривались вопросы измерения дифференциальной отражаемости и величины деполаризации в задаче дистанционного обнаружения и селекции осредоточенных градовых зон в облаках. В 1976 г. Ивановым и Колосковым [39] был предложен метод селекции деполаризованных зон в облаках и осадках, основанный на излучении линейных вертикальной и горизонтальной поляризаций и попеременном приеме основной и ортогональной составляющих отраженного сигнала. В 1976 г. Селига и Бринги [57] высказывали предполо-

жение, что наличие в разрешаемом объеме хаотически расположенных частиц, форма которых отличается от сферической, должно привести к возникновению заметной разницы между результатами почти одновременного измерения коэффициентов отражаемости на двух ортогональных линейных поляризациях – вертикальной ("Н") и горизонтальной ("V"). Тем самым они ввели еще одну поляризационную характеристику, получившую название "дифференциальной отражаемости" Z_{DR}

$$10 \cdot \log_{10} (P_H / P_V), \quad (I.27)$$

где P_H и P_V – средние мощности рассеянного сигнала при облучении метеорообъекта волнами с соответствующими поляризациями.

Начиная с конца 70-х годов интенсивные исследования метеорообъектов поляризационными методами были начаты коллективом под руководством Татарина В.Н. (ТИАСУР). В результате этих исследований было теоретически доказано и практически подтверждено, что повышение информативности метео-РЛС однозначно связано с использованием РЛ сигналов с динамической поляризационной структурой (ДПС). В этом случае формирование зондирующих сигналов обеспечивается при модуляции характеристик потока излучения вращающейся четвертьволновой фазовой пластинкой [I4], излучении линейно поляризованной волны с вращающейся плоскостью поляризации [I5], манипуляции поляризацией излучаемого сигнала от импульса к импульсу [I6]. Кроме того, был проведен подробный анализ видов поляризации РЛ сигналов и закона их изменения для оценки степени поляризационной анизотропии объектов, найдены одноканальные алгоритмы оценки фактора формы ρ_0 и угла ориентации θ_0 базиса цели [I0, I5], предложен одноканальный метод измерения ρ_0 , фазового сдвига $\Delta\varphi$ и θ_0 объекта, основанный на поляризационной модуляции излученного сигнала и анализе спектра огибающей принятого сигнала [I03].

Проведенный обзор поляризационных методов исследования метео-

образований [63,65,66,67,84,85,86 и др.] показывает, что наибольшее распространение среди рассмотренных радиометеорологических параметров нашли величины Z_{DR} , CDR и ORTT. Их применение широко используется для определения параметров экспоненциальной модели распределения размеров капель, улучшения точности дистанционного измерения интенсивности дождя и удельного ослабления, идентификации области переохлажденных капель выше нулевой изотермы и наиболее важных классов осадков, и т.д.

Однако, для рассмотренных параметров характерны следующие существенные недостатки : величина Z_{DR} сильно зависит от ориентации капель, обнаружение града методом Z_{DR} приводит к большим неопределенностям, параметр CDR эффективен при идентификации типа гидрометеоров лишь в сочетании с другими параметрами, ALD зависит не только от реальной ориентации частиц, но и от других факторов, и т.п. Тем не менее в 80-е годы продолжались работы по увеличению точности методов Z_{DR} и CDR [44,59,63,64,74]. Кроме того, для устранения зависимости Z_{DR} от средней ориентации гидрометеоров, было предложено [15,73] использовать РЛ сигналы с вращающейся или дискретно изменяющей свою ориентацию [61] линейной поляризацией. Однако, проблемы, возникающие при интерпретации данных измерения Z_{DR} , CDR и ORTT объясняются не только сложностью процессов внутри метеообразований, но и тем, что эти параметры в общем случае не являются инвариантами матрицы рассеяния метеообъекта.

1.3.2. Связь поляризационных характеристик метеообъектов с инвариантами матрицы рассеяния.

Для того, чтобы определить каким образом эта группа параметров (Z_{DR} , LDR, CDR(CAN), ORTT, ALD) связана с инвариантами МР наблюдаемого метеообъекта, воспользуемся обобщенной формой записи матри-

цы рассеяния с произвольными собственными поляризациями в заданном поляризационном базисе (ПБ) [17, 6] и соотношениями (I.6, I.7). Покажем эту связь на примере величин Z_{DR} и CDR . Согласно определению [57], величина дифференциальной отражаемости Z_{DR} пропорциональна отношению P_H / P_V средних мощностей сигнала принятого в основном канале при излучении горизонтально ("H") и вертикально ("V") поляризованных волн.

Запишем матрицу рассеяния метеорообъекта с произвольными поляризационными свойствами в линейном базисе докатора в виде [6]

$$[\dot{S}(t)]_{(л)} = 0.5 \cdot (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}(t) & \dot{B}(t) \\ \dot{B}(t) & \dot{C}(t) \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

где $\dot{A}(t) = \dot{\mu}(t) \cdot \cos 2\theta_0(t) + \cos 2\varepsilon_0(t) + j \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \sin 2\theta_0(t)$,
 $\dot{B}(t) = \dot{\mu}(t) \cdot \sin 2\theta_0(t) - j \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \cos 2\theta_0(t)$,
 $\dot{C}(t) = -\dot{\mu}(t) \cdot \cos 2\theta_0(t) + \cos 2\varepsilon_0(t) - j \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \sin 2\theta_0(t)$,
а $\dot{\lambda}_1(t)$, $\dot{\lambda}_2(t)$, $\theta_0(t)$, $\varepsilon_0(t)$ — отражают временную зависимость собственных чисел МР, угла ориентации и эллиптичности собственного базиса (СПБ) метеоцели. Величины P_H и P_V представим, как

$$P_H = \overline{(\dot{E}_H'(t) \cdot \dot{E}_H'^*(t))}, \quad P_V = \overline{(\dot{E}_V''(t) \cdot \dot{E}_V''^*(t))},$$

где (...) — означает операцию усреднения во времени, а комплексные составляющие рассеянной волны $\dot{E}_H'(t)$ и $\dot{E}_V''(t)$ находятся в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_H'(t) \\ \dot{E}_V'(t) \end{bmatrix} = [\dot{S}(t)]_{(л)} \cdot \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}_{(л)}, \quad (I.29)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_H''(t) \\ \dot{E}_V''(t) \end{bmatrix} = [\dot{S}(t)]_{(л)} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}_{(л)}. \quad (I.30)$$

Здесь $\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}_{(л)}$, $\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}_{(л)}$ — векторы Джонса излучаемой волны с горизонтальной и вертикальной поляризацией.

Выполнив преобразования, находим, что

$$\dot{\mathbf{E}}_H'(t) = 0.5 \cdot [(\dot{\lambda}_1(t) - \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \cos 2\theta_0(t) + (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot (\cos 2\varepsilon_0(t) + j \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \sin 2\theta_0(t))] ,$$

$$\dot{\mathbf{E}}_V''(t) = 0.5 [-(\dot{\lambda}_1(t) - \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \cos 2\theta_0(t) + (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot (\cos 2\varepsilon_0(t) - j \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \sin 2\theta_0(t))] .$$

Для примера рассмотрим случай, когда СПБ метеорообъекта является линейным, с неизменными во времени собственными числами и углом θ_0 :

$$\varepsilon_0(t) = 0, \quad \dot{\lambda}_1(t) = \dot{\lambda}_1, \quad \dot{\lambda}_2(t) = \dot{\lambda}_2, \quad \theta_0(t) = \theta_0. \quad (I.31)$$

При этих предположениях величина Z_{DR} запишется, как

$$Z_{DR} \sim \frac{|\dot{\mathbf{E}}_H'|^2}{|\dot{\mathbf{E}}_V''|^2} = \frac{I + 2 \cdot \mu_d \cdot \cos \Phi \cdot \cos 2\theta_0 + \mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0}{I - 2 \cdot \mu_d \cdot \cos \Phi \cdot \cos 2\theta_0 + \mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0}. \quad (I.32)$$

Если собственные значения МР действительны, то Z_{DR} имеет вид

$$Z_{DR} \sim \left[\frac{I + \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0}{I - \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0} \right]^2 \quad (I.33)$$

и зависит от двух величин: μ_0 и θ_0 . Прямая связь Z_{DR} с одним инвариантом МР наблюдается лишь в случае совпадения ориентации собственного базиса цели и системы координат лоатора $\theta_0 = \theta = 0^\circ$:

$$Z_{DR} \sim \left[\frac{I + \mu_0}{I - \mu_0} \right]^2 = I / \rho_0^2. \quad (I.34)$$

Распространенный в радиометеорологии параметр CDR представляет собой отношение средних мощностей поляризованной и кросс-поляризованной составляющих принятого сигнала в круговом базисе: P_1 / P_2 , где $P_1 \sim |\dot{\mathbf{E}}_1(t)|^2$, $P_2 \sim |\dot{\mathbf{E}}_2(t)|^2$. При этом ортогональные комплексные составляющие рассеянной волны $\dot{\mathbf{E}}_1(t)$, $\dot{\mathbf{E}}_2(t)$ находятся в результате преобразования:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{E}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{E}}_2(t) \end{bmatrix} = [\dot{\mathbf{S}}(t)]_{(K)} \cdot \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}_{(K)}, \quad (I.35)$$

где матрица рассеяния в круговом измерительном базисе докатора

$$[\dot{S}(t)]_{(K)} = 0.5 \cdot (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}(t) & \dot{B}(t) \\ \dot{B}(t) & \dot{C}(t) \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

имеет следующие элементы

$$\dot{A}(t) = (\dot{\mu}(t) + \sin 2\varepsilon_0(t)) \cdot \exp(j2\theta_0(t)),$$

$$\dot{B}(t) = j \cos 2\varepsilon_0(t),$$

$$\dot{C}(t) = (-\dot{\mu}(t) + \sin 2\varepsilon_0(t)) \cdot \exp(-j2\theta_0(t)).$$

Выполнив преобразования, получим

$$\dot{E}_1(t) = 0.5 \cdot [(\dot{\lambda}_1(t) - \dot{\lambda}_2(t)) + (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \sin 2\varepsilon_0(t)] \cdot \exp(j2\theta_0(t)),$$

$$\dot{E}_2(t) = j \cdot 0.5 \cdot (\dot{\lambda}_1(t) + \dot{\lambda}_2(t)) \cdot \cos 2\varepsilon_0(t).$$

Пусть наблюдаемый метеороBJECT удовлетворяет условиям (I.31). В этом случае величина кругового деполаризационного отношения одновременно связана с модулем комплексного коэффициента анизотропии

$$CDR \sim \frac{\lambda_1^2 - 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2}{\lambda_1^2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2} = \mu_d^2 \quad (I.37)$$

и не зависит от угла ориентации θ_0 собственного базиса МР объекта. Для объекта с действительными собственными числами ($\Delta\varphi = 0^\circ$)

$$CDR \sim \mu_o^2. \quad (I.38)$$

Проведя аналогичные преобразования в отношении параметров LDR, ALD, ORTT для метеороBJECTа с линейными собственными поляризациями, запишем их в общем виде следующим образом

$$LDR \sim \frac{\mu_o^2(t) \cdot \sin^2 2\theta_0(t)}{(1 + \mu_o(t) \cdot \cos 2\theta_0(t))^2}, \quad (I.39)$$

ORTT ~

$$\sim \left[\frac{(\mathbf{I} - \rho_o^2(t))^2 + 4 \cdot \rho_o^2(t) \cdot \sin^2 \Delta\varphi}{(\mathbf{I} - 2\rho_o(t) \cdot \cos \Delta\varphi + \rho_o^2(t))(\mathbf{I} + 2\rho_o(t) \cdot \cos \Delta\varphi + \rho_o^2(t))} \right]^{0.5}, \quad (I.40)$$

$$ALD \sim 0.5 \cdot \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{2\rho_0(t) \cdot \sin \Delta\varphi}{(1 - \rho^2(t))} \right) + 2\theta_0(t) - \text{const} \right]. \quad (I.4I)$$

Проведенный обзор литературных источников, связанных с исследованием метеорообъектов поляризационными методами, показал, что среди них практически отсутствуют работы, затрагивающие вопросы выделения искусственных объектов с произвольными поляризационными свойствами на фоне метеорообразований, на временных интервалах, сравнимых с интервалами измерения обзорных РЛС. Кроме того, большинство поляризационных параметров, за исключением CDR(CAN), зависит от величины "среднего угла наклона" частиц гидрометеоров и несут верную информацию лишь в случае совпадения ориентации собственного базиса матрицы рассеяния метеоцели и измерительной системы координат локатора. Таким образом, использование данных радиометеорологии для объективной оценки поляризационного контраста искусственных целей на фоне метеорообразований не представляется целесообразным.

1.3.3. Идентификация (селекция) РЛ объектов поляризационными методами.

При исследовании проблемы идентификации (селекции) РЛ объектов были изучены потенциальные возможности каждого параметра зондирующей волны в отдельности и в различных сочетаниях. Поляризационный анализ, позволяющий учитывать тонкую структуру отраженного РЛ сигнала был признан наиболее перспективным [12, 13]. При этом сформировались следующие основные подходы к решению задачи идентификации РЛ объектов поляризационными методами : разработка систем поляризационной идентификации (селекции) целей в РЛС с низким разрешением ; создание поляризационных РЛС с высоким разрешением.

В литературе известны описания технических систем поляризационной идентификации (селекции) на базе РЛС с низким разрешением

[80,81,82,83]. Так, в [80] описана "РЛ установка, чувствительная к форме цели", предназначенная для обнаружения военных транспортных средств. По утверждению автора, при излучении линейно поляризованного сигнала с ориентацией плоскости поляризации $\alpha = +45^\circ$ к горизонту, военные автомобили создают мощные отражения на ортогональной поляризации с углом $\alpha = -45^\circ$. Отличительной особенностью "РЛС обнаружения и подавления сигналов активных постановщиков помех" [81] является предположение о более случайном характере изменения поляризации сигнала, отраженного целью, чем излученного станцией передачи помехи. Для функционирования "Устройства поиска целей на основе поляризационной корреляции" [82] необходимо наличие априорной информации о поляризационных свойствах обнаруживаемых целей. Результат взаимно-корреляционной обработки двух ортогональных поляризационных компонент принимаемого сигнала сравнивается с пороговым уровнем, после чего объект относят к определенному классу. "РЛС распознавания целей" [83], обеспечивает двухчастотное измерение в линейном базисе 4-х величин, пропорциональных элементам матрицы рассеяния цели. При этом утверждается, что для "простых" РЛ объектов оцениваемые величины практически всегда являются постоянными величинами, а для объектов "сложной" формы они изменяются от расстояния между целью и локатором.

Рассмотрим более подробно связь измеряемых в [80] и [83] величин с инвариантами матрицы рассеяния. Из описания [80], следует, что военные автомобили с прямоугольным кузовом рассматриваются авторами в виде двухгранного углового РЛ отражателя. Его матрица рассеяния в собственном базисе ($\theta_0 = 0^\circ$) имеет вид [1] :

$$[S]_0 = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & -\lambda_2 \end{bmatrix} .$$

Поэтому при излучении линейно поляризованного сигнала с углом на-

лона плоскости поляризации $\alpha = +45^\circ$ к горизонту

$$\vec{E}_0 = 2^{-0.5} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{(л)}$$

вектор Джонса отраженной волны будет иметь вид

$$\vec{E}_p = [S]_0 \cdot \vec{E}_0 = \lambda_1 \cdot 2^{-0.5} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}_{(л)},$$

представляя собой волну линейной поляризации, ортогональную излученной ($\alpha = -45^\circ$). Решение об обнаружении военной цели принимается в том случае, когда кросс-поляризованный сигнал превышает сигнал, принятый в основном канале. Не обсуждая возможность представления обнаруживаемых объектов РЛ целью типа двухгранного УО, отметим, что предполагаемый авторами результат следует ожидать при незначительном влиянии подстилающей поверхности на отраженный сигнал и в небольшом диапазоне изменения угла ориентации собственного базиса объекта: $-22.5^\circ \leq \theta_0 \leq +22.5^\circ$. Во всех остальных случаях данная система идентификации дает неверный результат. Алгоритм измерения "РЛС распознавания целей" [83] совпадает с алгоритмом оценки параметра Z_{DR} , использующего выражения (I.29, I.30). Отличие состоит в том, что РЛ сигналы с горизонтальной и вертикальной поляризациями излучаются на разных частотах (f_1 и f_2), а в качестве оцениваемых параметров выступают величины P_1, P_2, P_3 :

$$\frac{|\dot{E}_H''(t)|}{|\dot{E}_H'(t)|}, \quad \frac{|\dot{E}_V''(t)|}{|\dot{E}_H'(t)|} \quad \text{и} \quad \frac{|\dot{E}_V''(t)|}{|\dot{E}_H''(t)|}.$$

Для РЛ объектов, удовлетворяющих (I.31), параметры P_1 имеют вид:

$$P_1 = \frac{|\dot{E}_H''|}{|\dot{E}_H'|} \sim \frac{|\lambda_1 - \lambda_2| \cdot \sin 2\theta_0}{|(\lambda_1 + \lambda_2) + (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \cos 2\theta_0|} = \frac{\mu_d}{(1 + 2 \cdot \mu_d \cdot \cos 2\theta_0 \cdot \cos \Phi + \frac{\sin 2\theta_0}{\mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0})^{0.5}}, \quad (I.42a)$$

$$P_2 = \frac{|\dot{E}_V''|}{|\dot{E}_H'|} \sim \frac{|(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) - (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) \cdot \cos 2\theta_0|}{|(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) + (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) \cdot \cos 2\theta_0|} = \frac{(1 - 2 \cdot \mu_d \cdot \cos 2\theta_0 \cdot \cos \Phi + \mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0)^{0.5}}{(1 + 2 \cdot \mu_d \cdot \cos 2\theta_0 \cdot \cos \Phi + \mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0)^{0.5}}, \quad (I.426)$$

$$P_3 = \frac{|\dot{E}_V''|}{|\dot{E}_H''|} \sim \frac{|(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) - (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) \cdot \cos 2\theta_0|}{|\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2| \cdot \sin 2\theta_0} = \frac{(1 - 2 \cdot \mu_d \cdot \cos 2\theta_0 \cdot \cos \Phi + \mu_d^2 \cdot \cos^2 2\theta_0)^{0.5}}{\mu_d \cdot \sin 2\theta_0}. \quad (I.428)$$

Для действительных чисел МР λ_1 и λ_2 выражения (I.42) упрощаются

$$P_1 \sim \frac{\mu_0 \cdot \sin 2\theta_0}{1 + \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0}, \quad P_2 \sim \frac{1 - \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0}{1 + \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0}, \quad P_3 \sim \frac{1 - \mu_0 \cdot \cos 2\theta_0}{\mu_0 \cdot \sin 2\theta_0}, \quad (I.43)$$

так, что P_1 зависят от двух инвариантов МР : μ_0 и θ_0 .

Анализ систем поляризационной идентификации (селекции) [80, 81, 82, 83] показывает наличие у них серьезных недостатков : предположения о поляризационных свойствах РЛ объектов [80] или особенностях флуктуаций рассеянных сигналов [81, 82] постулируются без доказательств ; эффективное функционирование систем [80, 83] имеет место лишь при незначительном влиянии подотилающей поверхности ; оцениваемые в [83] поляризационные параметры являются модификациями линейного деполаризационного отношения LDR, зависящими от инвариантов матрицы рассеяния объекта.

Аналогичный эвристический подход к идентификации РЛ целей рассмотрен в [93]. В рамках этого подхода были проведены измерения рассеивающих свойств моделей летательных аппаратов в линейном базисе в безэховой камере. В качестве измеряемых величин выступали :

$$|\dot{E}_H'|, |\dot{E}_V''|, |\dot{E}_H''|,$$

$$\Delta\varphi_1 = \arg(\dot{E}_H') - \arg(\dot{E}_H''), \quad \Delta\varphi_2 = \arg(\dot{E}_V'') - \arg(\dot{E}_H''),$$

где \dot{E}_H' , \dot{E}_V'' , \dot{E}_H'' определены согласно (I.29, I.30). На I-ом этапе исследовались признаки, построенные в соответствии с выражениями :

$$X_1 = \operatorname{arctg} \cdot \left[\frac{|\dot{E}_H''|}{|\dot{E}_H'|} \right], \quad X_2 = \operatorname{arctg} \cdot \left[\frac{|\dot{E}_H'|}{|\dot{E}_V''|} \right], \quad X_3 = \operatorname{arctg} \cdot \left[\frac{|\dot{E}_H|}{|\dot{E}_V''|} \right]. \quad (I.44)$$

Нетрудно показать, что признаки X_1 связаны с параметрами P_1 (I.42), рассмотренными выше : $X_1 = \operatorname{arctg} (P_1)$, $X_2 = \operatorname{arctg} (P_3^{-1})$, $X_3 = \operatorname{arctg} (P_2^{-1})$. В результате экспериментов были получены данные об идентификации различных ЛА по каждому из трех указанных признаков.

Анализ результатов показал, что достоверность идентификации по этим признакам X_1 оказалась невысокой. На втором этапе были рассмотрены признаки, построенные в соответствии с выражениями

$$\left. \begin{aligned} X_1' &= \frac{|\dot{E}_H''|}{|\dot{E}_H''| + |\dot{E}_V''|}, \quad X_2' = \frac{|\dot{E}_V''|}{|\dot{E}_H'| + |\dot{E}_V''|}, \\ X_3' &= \frac{\Delta\varphi_1}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\arg(\dot{E}_H') - \arg(\dot{E}_H'')) , \\ X_4' &= \frac{\Delta\varphi_2}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\arg(\dot{E}_V'') - \arg(\dot{E}_H'')) . \end{aligned} \right\} \quad (I.45)$$

По результатам измерений предлагается идентифицировать РЛ объекты, используя линейные комбинации величин X_1' с учетом парных корреляций между ними, что по мнению авторов [93] позволяет обеспечить высокую достоверность распознавания летательных аппаратов. Однако, с точки зрения инвариантного описания наблюдаемой цели предлагаемая совокупность признаков X_1' , а тем более их линейные комбинации, представляют собой сложные функции параметров μ_0 , θ_0 , $\Delta\varphi$ матрицы рассеяния объекта. Следовательно, для реальных ЛА в условиях помеховых отражений использование данного подхода весьма проблематично.

Одной из немногих действующих систем, использующей поляризационные признаки для идентификации ЛА и мешающих отражений от земной

поверхности, является ОРЛС управления воздушным движением [94]. Данная РЛС обеспечивала излучение сигнала с круговой поляризацией и одновременный прием ортогональных составляющих, дискретизацию и накопление данных о рассеянных сигналах в основном и ортогональном каналах для заданного элемента разрешения. Обработка выборок из 20 временных отсчетов велась вне реального масштаба времени и позволяла оценивать углы эллиптичности τ_1 и ориентации ϕ_1 эллипса поляризации рассеянной волны для 1-го отсчета. Анализ экспериментальных данных измерения поляризационных параметров (τ_1, ϕ_1) дал возможность авторам [12, 70, 94] сделать вывод о принципиальной возможности поляризационной идентификации ЛА на фоне мешающих отражений от поверхности земли. Однако, использование этого подхода в обзорных РЛС остается проблематичным из-за обработки данных вне реального масштаба времени и нерешенности вопроса панорамного отображения оцениваемых параметров τ, ϕ на традиционных индикаторах РЛ информации. Вместе с тем, экспериментальные данные, полученные с помощью ОРЛС УВД [94], позволили расширить возможности метода доплеровской селекции движущейся цели при ее наблюдении на фоне отражений от земли. Так, в [70] доказано, что использование поляризационных характеристик РЛ объектов позволяет добиться лучшего разрешения целей и уменьшить спектральное смещение оценок доплеровского сдвига по сравнению с традиционными методами.

В отличие от эвристических подходов к идентификации (селекции) РЛ целей, изучение поляризационных свойств рассеивающих объектов в ТИАСУР связано с описанием поляризационных свойств РЛ объектов инвариантами матрицы рассеяния (см. (I.13) – (I.16)), а также с измерением поляризационных параметров в реальном масштабе времени достаточно простыми техническими средствами, позволяющими модифицировать существующие обзорные РЛС. Начиная с конца 70-х годов, в коллективе под руководством Татарникова В.Н. проводились измерения по-

ляризационных инвариантов ρ_o , μ_o , θ_o , $\Delta\varphi$ матрицы рассеяния различных РЛ объектов. Так, в работе [14] был рассмотрен одноканальный метод оценки поляризационных свойств объектов путем измерения спектра огибающей принятого сигнала при вращении $\lambda/4$ -волновой фазовой пластинки, позволяющий производить селекцию поляризационно - изотропных объектов. Дальнейшее развитие принципов одноканального согласованного приема в задаче РЛ наблюдения нашло в кандидатской диссертации Масалова Е.В. [15]. В ней антенна РЛС и преобразователь поляризации рассматриваются с единых позиций - в виде оператора поляризационных преобразований потока излучения и оператора приемной части, осуществляющего сравнение поляризационных характеристик рассеянного поля с характеристиками излученного. В [15] были удачно использованы теоретические результаты исследований применительно к задаче синтеза одноканальных алгоритмов оценки инвариантных и динамического параметров матрицы рассеяния осесимметричных объектов (ОСО). Приведенные в диссертации экспериментальные данные доказали возможность выделения объектов с известными поляризационными свойствами на фоне распределенных поверхностей. Следующим этапом в развитии поляризационных методов стал одноканальный метод оценки рассеивающих свойств объектов путем манипуляции поляризационных характеристик потока излучения от импульса к импульсу, рассмотренный в кандидатской диссертации Лукьянова С.П. [16]. В ней показано, что использование поляризационной манипуляции позволяет обрабатывать отраженный сигнал на основе алгоритмов череспериодной компенсации. Кроме того, в [16] приведен обширный экспериментальный материал, содержащий оценки инвариантного (степень поляризационной анизотропии) и динамического (угол ориентации собственного базиса) параметров сосредоточенных и распределенных объектов.

Несмотря на достоинства одноканальных поляризационных методов селекции РЛ целей (ослабление влияния неустойчивости приемного

тракта, простота реализации и др.) характерное для них объединение процессов излучения и приема накладывает принципиальное ограничение на быстродействие и не позволяет производить оценку поляризационных свойств объектов с нестабильными во времени инвариантами МР.

Поэтому на определенном этапе актуальным стало повышение быстродействия поляризационных радиолокаторов. Решение этой задачи стало возможным, благодаря разработке нового подхода к измерению поляризационных параметров. Основные положения подхода были сформулированы в кандидатской диссертации Хлусова В.А. [17], обобщившей опыт применения "быстрых" поляризационных методов исследовательской группой в составе Хлусова В.А., Карнышева В.И., Кокташева С.И., Русина А.Н. и Хребтова В.Д. на протяжении 1987-1989 г.г. Так, в [17] нашли отражение : разработка двухчастотного метода моноимпульсной оценки группы поляризационных параметров РЛ объекта ; разработка и экспериментальная проверка обзорной РЛС, формирующей в реальном масштабе времени РЛ изображение местности при совместном использовании поляризационного и энергетического параметров ; разработка и экспериментальная проверка нелинейной процедуры селекции объектов по их поляризационным признакам ; результаты экспериментальных измерений величин модуля комплексного коэффициента поляризационной анизотропии искусственных и распределенных природных объектов. Кроме [17], особенности данного подхода к измерению поляризационных параметров РЛ объектов защищены рядом авторских свидетельств [99 - 104], а также рассмотрены в работах Татарнинова В.Н., Хлусова В.А., Карнышева В.И., Кокташева С.И., Кунтикова С.И. [6, 32 - 38].

Наряду с использованием методов поляризационной обработки в РЛС с низким разрешением, на рубеже 70-80-х годов выявилась тенденция к совмещению поляризационного анализа с методами высокого разрешения. Утверждается [12], что значения элементов матрицы рассеяния объектов при излучении широкополосных сигналов обладают мень-

шей степени неопределенности и поэтому более пригодны для классификации и идентификации целей. С этой точки зрения представляет интерес РЛС IPAR [60] с внутриимпульсным управлением поляризацией, позволяющая кодировать излучаемый импульс посредством переключения от одной круговой поляризации к другой на каждом элементарном субимпульсе длительностью 10 нс по коду Баркера и обрабатывать принимаемые сигналы с использованием обычной техники сжатия. По мнению авторов [60], зависимость кода поляризации отраженного сигнала от свойств объектов позволяет получать данные для их идентификации.

Среди немногочисленных сообщений о РЛС с высоким разрешением, использующих поляризационные методы следует выделить информацию о разработке перспективного обзорного лоатора HIRKS-95 [78]. Данная двухполяризационная система предназначена для измерения в когерентном режиме МР каждого элемента разрешения РЛС в координатах "азимут — угол места — дальность". Для этого предусматривается быстрое переключение поляризации излучаемых импульсов и поляризационно — разнесенный прием отраженных сигналов в линейном базисе.

Другим примером использования поляризационных методов в РЛС с высоким разрешением является работа Мэнсона и Бернера [26], в которой получены оценки поляризационных инвариантов Хойнена для управляемого реактивного снаряда (УРС). Приведенные результаты доказывают принципиальную возможность определения поляриметрических характеристик цели с высокой разрешающей способностью для выработки алгоритмов распознавания РЛ объектов. Однако, по признанию авторов нерешенными остаются вопросы влияния на подобные измерения помеховых отражений, а также использование в качестве наблюдаемых объектов более сложных РЛ целей на фоне подстилающей поверхности.

В 80-е годы оформился еще один подход, объединивший методы высокого разрешения с поляризационным анализом. Это относится к созданию бортовых поляриметрических РЛС с синтезированной апертурой

(РЛС СА). В таких РЛС предусматривается возможность одновременного получения поляризационных характеристик объектов в разных частотных диапазонах, наличие нескольких рабочих режимов, определяемых комбинациями несущих частот, видов поляризации излучаемого сигнала, периодов повторения импульсов и т.п. [72, 74 - 76]. Например, за один проход самолета DC - IO, на котором размещена РЛС СА [75], осуществляется непосредственное измерение комплексных элементов матрицы рассеяния в линейном базисе каждого участка формируемого РЛ изображения. При этом изучение полученных результатов дает возможность классифицировать объекты, определить преобладающие механизмы рассеяния ЭМ волн и оптимизировать методы и технику дистанционного зондирования [79], подтверждая большие информационные возможности бортовых поляриметров с синтезированной апертурой.

1.3.4. Теоретические исследования в области поляризационного контраста.

Проведенный выше анализ открытых публикаций в отечественной и зарубежной литературе показывает, что, проблема оценки поляризационного контраста РЛ целей затрагивается в них косвенным образом. Причем четкая постановка этой проблемы встречается лишь в нескольких работах. Среди них следует выделить работу Козлова А.И. [II], в которой величина поляризационного контраста (ПК) двух РЛ объектов была определена в виде отношения мощностей рассеянных сигналов. Поставленная задача заключалась в отыскании поляризационных параметров облучающей электромагнитной волны, максимизирующих контраст между двумя наблюдаемыми объектами с произвольными поляризационными свойствами. Для этого были найдены представления соответствующих матриц рассеяния в одном и том же базисе, выраженные через собственные числа каждой матрицы и параметры, связывающие между собой

собственные поляризации каждого из объектов. Далее, определив энергетические матрицы Грейвса объектов, и, задавая падающую эллиптическую волну в общем виде, автором [II] были получены величины отраженной от объектов мощности, а затем — искомое отношение мощностей отраженных сигналов в зависимости от вида поляризации потока излучения. Величина контраста наблюдаемых объектов, найденная Коэловым А.И., представляет собой произведение двух сомножителей, первое из которых — это независящее от вида поляризации падающей волны отношение полных ЭПР объектов, а второе — определяется отношением величин коэффициентов поляризационной анизотропии по мощности этих объектов и параметров эллипса поляризации зондирующей волны.

Значительно позже появления статьи [II] аналогичные по сути исследования были начаты рядом отечественных и зарубежных специалистов. Характерным примером такого подхода к оценке поляризационного контраста является статья Мицуру Танака [77], в которой рассматриваются два флуктуирующих объекта с известными априори усредненными вещественными (4×4) -матрицами Мюллера. Представляя вектор Стокса рассеянного сигнала в виде суммы векторов Стокса полностью поляризованной (ПП) и полностью неполяризованной (НП) волн, автор получает отношение двух ПП-составляющих мощности в рассеянной волне в зависимости от состояния поляризации излучаемого сигнала. Найдя экстремальные значения этого отношения, автор оценивает поляриметрический контраст с помощью нормированного отношения. Характерной особенностью работы [77] и других подобных исследований являются априорные предположения о свойствах "цели" и "помехи", не связанные с результатами экспериментальных измерений РЛ объектов.

Среди зарубежных исследователей наиболее последовательно поляризационный контраст РЛ объектов изучается в работах Бернера и его коллег. Примером этому служит разработанная Бернером и др. [29,30] концепция оптимального поляриметрического фильтра, использованная

для анализа данных радиолокационного изображения когерентной РЛС с синтезированной апертурой. Эти данные включали результаты измерения матриц рассеяния в линейном базисе каждого из 4096×1024 элементов (пикселей) РЛ изображения, соответствующих участку поверхности размерами 10×10 м. Поставленная задача заключалась в подавлении помеховых отражений от поверхности океана и получении максимально возможного яркостного контраста с искусственными образованиями. Для ее решения Бернером и др. [30] была предложена следующая трехэтапная вычислительная процедура (TSP) :

1. На первом этапе определялись собственные векторы МР 1-го пиксела $\vec{E}_{T, \text{опт}1}$ и $\vec{E}_{T, \text{опт}2}$, соответствующие наибольшему (λ_1) и наименьшему (λ_2) собственным числам. После чего рассчитывались параметры эллиптичности и ориентации эллипса поляризации излучаемого потока для каждого пиксела изображения $(\tau, \phi)_T$.

2. Второй этап связан с определением рассеянной пикселем волны

$$\vec{E}_{R, \text{опт}} = [\hat{S}]_{(L)} \cdot \vec{E}_{T, \text{опт}},$$

и соответствующей ей пары поляризационных параметров $(\tau, \phi)_R$. Далее находились "типичные" статистики зон океанской поверхности и территории города в виде совместных двупараметрических распределений $(\tau, \phi)_T$ и $(\tau, \phi)_R$.

3. На третьем этапе осуществлялась "подстройка" параметров вектора поляризации приемной антенны \vec{h} таким образом, чтобы большинство "нежелательных" пикселей в рассматриваемой области РЛ изображения было затемнено.

Предварительные результаты изображений РЛС СА являются, по мнению авторов [30], многообещающими и свидетельствуют о заметном улучшении яркостного контраста между искусственными сооружениями, растительной зоной и поверхностью океана. При этом поляризационный контраст объектов типа "фон" и "фон + цель" улучшается при разделе-

нии гистограмм в поляризационном пространстве признаков (τ , ϕ). Таким образом, предложенная Бернером и др. концепция повышения контраста формируемого в РЛС СА изображения позволяет подавить отражения от распределенных природных образований и уменьшить зернистость когерентного РЛ изображения. Вместе с тем данный подход связан с проведением большого объема вычислений вне реального масштаба времени. Кроме того, для проверки этой концепции были использованы уникальные данные РЛС с синтезированной апертурой. Поэтому использование полученных в [30] результатов применительно к обзорным РЛС с низким разрешением не представляется возможным.

Процедура фильтрации целей в пространстве поляризационных признаков для обзорных РЛС с низким разрешением рассмотрена в [17]. Она позволяет подавлять помеховые отражения от распределенных природных объектов и выделять сосредоточенные искусственные цели с заданными поляризационными свойствами, формируя тем самым высококонтрастное РЛ изображение. При этом автором [17] был предложен критерий оценки поляризационного контраста соседних пикселей РЛ изображения, определяемый степенью перекрытия функций плотности вероятности поляризационных параметров.

Сравнивая различные подходы к оценке поляризационного контраста, отметим достоинства подхода, сформулированного в [17] :

1. использование моноимпульсной оценки поляризационных инвариантов МР цели исключает громоздкие вычисления информативных признаков вне реального масштаба времени, а также дает объективную оценку поляризационного контраста РЛ объектов на малых временных интервалах ;
2. полученные теоретические и практические результаты напрямую относятся к широкому классу обзорных РЛС с низким разрешением ;
3. экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного метода поляризационной фильтрации (селекции) РЛ объектов с известными поляризационными свойствами.

1.4. Выводы. Постановка задачи.

По результатам аналитического обзора можно сформулировать следующие выводы :

1. В настоящее время наиболее развитыми областями в РЛ поляриметрии являются радиометеорология и идентификация (селекция) целей. Однако, прямое использование полученных результатов для оценки поляризационного контраста объектов с произвольными поляризационными свойствами наталкивается на целый ряд трудностей :

а) Существующие подходы к изучению поляризационных свойств объектов связаны с разработкой преимущественно методов измерений. При этом, как правило, не анализируется связь измеряемых поляризационных характеристик объекта с инвариантами его матрицы рассеяния.

б) В большинстве случаев измеряемые поляризационные параметры являются эмпирическими, неинвариантными величинами (Z_{DR} , LDR , различные комбинации элементов MP и т.д.), зависящими от взаимной ориентации собственного поляризационного базиса объекта и измерительной системы координат РЛС, а также от других факторов. Это существенно ограничивает область применения таких результатов.

в) Для теоретических и экспериментальных работ в области РЛ поляриметрии характерно предположение о наличии у наблюдаемых объектов линейных собственных поляризаций, тогда как в общем случае объекты РЛ зондирования могут обладать произвольными эллиптическими собственными поляризациями.

г) В зарубежных поляриметрических исследованиях отсутствуют работы, определяющие общие требования к излучаемому обзорной РЛС потоку для случая оценки инвариантных параметров MP объектов.

д) Экспериментальные данные о наблюдаемости искусственных целей на фоне распределенных образований поляризационными РЛС малочисленны и содержат результаты измерения неинвариантных параметров. Известные

исследования поляризационного контраста наблюдаемых РЛ объектов связаны с использованием данных измерения уникальных РЛС с высоким разрешением или синтезированной апертурой. При этом необходимо выполнение большого объема вычислений вне реального масштаба времени. Подобные обстоятельства не позволяют применить эти результаты в традиционных обзорных РЛС с низким разрешением.

е) Зарубежные исследования не содержат данных о влиянии параметров движения малоразмерных искусственных целей относительно подстилающей поверхности на измеряемые поляризационные характеристики.

ж) В теоретических исследованиях отсутствуют результаты оценки предельных значений поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" для произвольных поляризационных свойств распределенного объекта и сосредоточенной искусственной цели.

2. Большой объем данных РЛ наблюдения искусственных объектов на фоне подстилающей поверхности, содержится в работах, проводимых в ТИАСУР в течение ряда лет. Особенностью этих исследований является измерение поляризационных параметров наблюдаемых объектов двумя принципиально различными методами: модуляционным (одноканальным) и моноимпульсным (двухканальным). Полученные результаты однопозиционного зондирования распределенных и составных ("фон + цель") объектов подтверждают факт существования поляризационного контраста РЛ целей этого типа. Кроме того, измерение поляризационных характеристик составных объектов типа "подстилающая поверхность + движущаяся цель" показали большую чувствительность этих величин к параметрам движения искусственной цели по сравнению с оценкой ЭПР.

3. Выработка общего подхода к оценке поляризационного контраста РЛ объектов возможна с учетом следующих теоретических положений:

- а) представление всего многообразия наблюдаемых радиолокационных объектов двумя подмножествами типа "фон" и "фон + цель" [I] ;
- б) описание матриц рассеяния и энергетических матриц Грейвса двух

объектов с произвольными поляризационными свойствами в конкретном поляризационном базисе [II] ;

в) представление обобщенной матрицы рассеяния произвольного РЛ объекта с взаимной областью рассеяния [6] ;

г) определение требования к матрице когерентности излучаемого потока, позволяющего однозначно оценить симметричную матрицу рассеяния цели для случая однопозиционного зондирования [6, 17] ;

д) описание поляризационной структуры суммы двух рассеянных потоков [4] .

Таким образом, решение вопроса оценки поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" требует рассмотрения следующих задач :

1. Определение общего аналитического подхода к оценке поляризационного контраста радиолокационных объектов с произвольными поляризационными свойствами.

2. Обоснование выбора инвариантного параметра матрицы рассеяния, в отношении которого исследуется поляризационный контраст объектов.

3. Обоснование статистической модели поляризационных инвариантов матрицы рассеяния распределенного фонового образования на основе известных экспериментальных данных.

4. Получение конкретных количественных оценок поляризационного контраста объектов "фон" и "фон + цель" для выбранных статистик инвариантов матрицы рассеяния распределенного объекта и заданных параметров сосредоточенной искусственной цели.

5. Оценка влияния параметров движения искусственной цели относительно подстилающей поверхности на инвариантные параметры МР составного радиолокационного объекта "фон + цель".

2. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО КОНТРАСТА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ.

При формировании РЛ изображения земной (водной) поверхности использование ЭПР в качестве отображаемого параметра становится недостаточным для повышения информативности этого изображения [13]. Переход к использованию поляризационных характеристик РЛ целей ставит задачу оценки их поляризационного контраста (ПК) в обзорных РЛС с низким разрешением. Анализ поляризационного контраста в отношении всей группы известных поляризационных инвариантов представляется чрезвычайно сложным. Поэтому рассмотрим задачу ПК двух РЛ объектов на примере одного из инвариантов матрицы рассеяния.

Решение этой задачи возможно различными способами. Наиболее целесообразным представляется подход, объединяющий описание РЛ объекта поляризационной матрицей рассеяния [1,6] с математическим аппаратом матрицы когерентности (МК) анализируемой электромагнитной волны [4]. Упростить теоретический анализ поляризационного контраста и оценить его экстремальные значения можно с учетом положений, сформулированных в работах [1,3,4,6]. Так, ввиду бесконечного числа и разнообразия РЛ объектов и условий их наблюдения, воспользуемся предложенным в [1] разбиением всего множества целей на два характерных подмножества : а) распределенные радиолокационные объекты, состоящие из большого числа элементарных отражателей, с ЭПР одного порядка ("фон") ; б) составные объекты, представленные в виде совокупности флуктуирующего естественного образования и некоторой искусственной цели ("фон + цель"). Для описания однородного распределенного объекта, занимающего в пространстве несколько элементов разрешения локатора, примем статистическую матрицу рассеяния [3], а искусственную цель представим в виде некоторого то-

чечного отражателя, что вполне правомерно для случая однопозиционного РЛ обзора в дальней зоне [90].

В этом случае задача поляризационного контраста заключается в нахождении величин конкретного поляризационного параметра для объектов типа "фон" и "фон + цель" и вычислении меры их различия в соответствии с (1.3).

2.1. Отображение поляризационных свойств РЛ объектов в матрице когерентности рассеянного потока.

Рассмотрим следующую элементарную ситуацию, возникающую при РЛ обзоре : последовательно во времени облучаются соседние участки распределенного природного образования (земная поверхность, водная поверхность, объемное метеообразование и т.п.). При этом оба фрагмента "фона" имеют одинаковые электрофизические свойства и могут быть описаны статистическими матрицами рассеяния с идентичными характеристиками. Отличие между ними состоит в том, что в одном из них расположена сосредоточенная искусственная цель. Присутствие искусственной цели приводит к тому, что составной РЛ объект ("фон + цель") обладает в общем случае иными рассеивающими свойствами, чем у фонового образования. Последнее обстоятельство создает объективную основу для контрастирования элементов радиолокационного изображения, соответствующих обоим участкам.

Пусть наблюдаемый РЛ объект представляет собой флуктуирующее поверхностно - распределенное образование, на котором расположена сосредоточенная искусственная цель. При этом МР [\dot{S}] такого составного объекта может быть представлена в виде суммы матриц рассеяния

$$[\dot{S}] = [\dot{S}_1] \cdot \exp(j\varphi_{01}) + [\dot{S}_2] \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) , \quad (2.1)$$

где

$$(2.2a) \quad [\dot{S}_1] = \begin{bmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{bmatrix} \quad - \text{симметричная } (\dot{s}_{21} = \dot{s}_{12}) \text{ МР "цели"} ;$$

$$(2.2б) \quad [\dot{S}_2] = \begin{bmatrix} \dot{c}_{11}(t) & \dot{c}_{12}(t) \\ \dot{c}_{21}(t) & \dot{c}_{22}(t) \end{bmatrix} \quad - \text{симметричная } (\dot{c}_{21}(t) = \dot{c}_{12}(t)) \text{ статистическая МР "фона"} ;$$

$\varphi_{01}, \varphi_{02}(t)$ - фазовые сдвиги, обусловленные пространственным положением центров рассеяния "цели" и "фона", соответственно.

Определяя вектор Джонса излучаемого потока в виде :

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

запишем векторы Джонса волн, рассеянных "целью" и "фоном"

$$\vec{E}^0(t) = [\dot{S}_1] \cdot \exp(j\varphi_{01}) \cdot \vec{E}(t), \quad (2.4)$$

$$\vec{E}^\Phi(t) = [\dot{S}_2] \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) \cdot \vec{E}(t). \quad (2.5)$$

Будем считать, что рассеянное объектом "фон + цель" поле является суммой некоррелированных частично-поляризованных потоков. Тогда матрицы когерентности (МК) каждого из потоков имеют вид :

$$[\dot{M}_1] = \langle \vec{E}^0(t) \cdot \vec{E}^0(t)^+ \rangle = \langle [\dot{S}_1] \cdot (\vec{E}(t) \cdot \vec{E}^+(t)) \cdot [\dot{S}_1]^+ \rangle, \quad (2.6)$$

$$[\dot{M}_2] = \langle \vec{E}^\Phi(t) \cdot \vec{E}^\Phi(t)^+ \rangle = \langle [\dot{S}_2] \cdot (\vec{E}(t) \cdot \vec{E}^+(t)) \cdot [\dot{S}_2]^+ \rangle, \quad (2.7)$$

Здесь " $^+$ " и " $\langle \dots \rangle$ " - знаки эрмитова сопряжения и математического ожидания. В силу детерминированного характера элементов МР $[\dot{S}_1]$, МК волны, рассеянной "целью", запишется как

$$[\dot{M}_1] = [\dot{S}_1] \cdot \langle \vec{E}(t) \cdot \vec{E}^+(t) \rangle \cdot [\dot{S}_1]^+ = [\dot{S}_1] \cdot [\dot{M}] \cdot [\dot{S}_1]^+, \quad (2.8)$$

где $[\dot{M}]$ - матрица когерентности излучаемой волны :

$$[\dot{M}] = \langle \vec{E}(t) \cdot \vec{E}^+(t) \rangle = \begin{bmatrix} \langle E_1(t) \cdot E_1^*(t) \rangle & \langle E_1(t) \cdot E_2^*(t) \rangle \\ \langle E_2(t) \cdot E_1^*(t) \rangle & \langle E_2(t) \cdot E_2^*(t) \rangle \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

где (...) — знак комплексного сопряжения.

В свою очередь матрица когерентности волны, рассеянной фоновым образованием, с учетом равенства $\dot{c}_{21}(t) = \dot{c}_{12}(t)$ принимает вид :

$$[\dot{M}_2] = \begin{bmatrix} \langle \dot{M}_{11}^{(2)} \rangle & \langle \dot{M}_{12}^{(2)} \rangle \\ \langle \dot{M}_{21}^{(2)} \rangle & \langle \dot{M}_{22}^{(2)} \rangle \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

где элементы матрицы $[\dot{M}_2]$ представлены группой выражений (2.11) :

$$\begin{aligned} \dot{M}_{11}^{(2)} = & \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \\ & + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{M}_{12}^{(2)} = & \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t) + \\ & + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{M}_{21}^{(2)} = & \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \\ & + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{M}_{22}^{(2)} = & \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t) + \\ & + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_1^*(t) \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_2^*(t) \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t). \end{aligned}$$

Таким образом, каждый из элементов матрицы когерентности волны, рассеянной "фоном", представляет собой сумму 4-х слагаемых вида :

$$\dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_j^*(t) \cdot \dot{c}_{kl}(t) \cdot \dot{c}_{mn}^*(t), \quad (\text{где } 1, j, k, l, m, n = 1, 2). \quad (2.12)$$

Рассмотрим математическое ожидание комплексной величины $\dot{Z}(t)$, представляющей собой произведение 4-х комплексных функций времени :

$$\langle \dot{Z}(t) \rangle = \langle \dot{z}_1(t) \cdot \dot{z}_2^*(t) \cdot \dot{z}_3(t) \cdot \dot{z}_4^*(t) \rangle. \quad (2.13)$$

Пусть $\dot{z}_1(t)$ соответствует $\dot{E}_1(t)$, $\dot{z}_2(t) \rightarrow \dot{E}_j^*(t)$, $\dot{z}_3(t) \rightarrow \dot{c}_{kl}(t)$, $\dot{z}_4(t) \rightarrow \dot{c}_{mn}^*(t)$. Каждую из функций $\dot{z}_p(t)$ можно записать в виде

$$\dot{z}_p(t) = x_p(t) + j \cdot y_p(t),$$

где $x_p(t)$ и $y_p(t)$ — косинусная и синусная временные квадратуры

функции $\dot{z}_p(t)$. Учитывая это, запишем согласно [I]

$$\langle \dot{Z}(t) \rangle = \langle \operatorname{Re}\{\dot{Z}(t)\} \rangle + j \langle \operatorname{Im}\{\dot{Z}(t)\} \rangle. \quad (2.14)$$

При этом, опуская индекс временной зависимости у квадратур, получим

$$\begin{aligned} \langle \operatorname{Re}\{\dot{Z}(t)\} \rangle &= \langle x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \rangle + \langle x_1 \cdot x_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \rangle + \\ &+ \langle y_1 \cdot y_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \rangle + \langle y_1 \cdot y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \rangle - \\ &- \langle x_1 \cdot y_2 \cdot x_3 \cdot y_4 \rangle + \langle x_1 \cdot y_2 \cdot x_4 \cdot y_3 \rangle + \\ &+ \langle x_2 \cdot y_1 \cdot x_3 \cdot y_4 \rangle - \langle x_2 \cdot y_1 \cdot x_4 \cdot y_3 \rangle, \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \langle \operatorname{Im}\{\dot{Z}(t)\} \rangle &= \langle x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot y_3 \rangle - \langle x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot y_4 \rangle - \\ &- \langle y_1 \cdot y_2 \cdot x_3 \cdot y_4 \rangle + \langle y_1 \cdot y_2 \cdot x_4 \cdot y_3 \rangle - \\ &- \langle x_1 \cdot y_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \rangle - \langle x_1 \cdot y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \rangle + \\ &+ \langle x_2 \cdot y_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \rangle + \langle x_2 \cdot y_1 \cdot y_3 \cdot y_4 \rangle. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Рассмотрим в качестве примера одно из слагаемых $\langle \operatorname{Re}\{\dot{Z}(t)\} \rangle$:

$$\langle x_1 \cdot y_2 \cdot x_3 \cdot y_4 \rangle = \langle x_1(t) \cdot y_2(t) \cdot x_3(t) \cdot y_4(t) \rangle.$$

По определению [96] , моментная функция первого порядка произведения величин $x_1(t)$, $y_2(t)$, $x_3(t)$, $y_4(t)$ равна :

$$\begin{aligned} m_{1234}^{(1)}(t) &= \langle x_1(t) \cdot y_2(t) \cdot x_3(t) \cdot y_4(t) \rangle = \\ &= \iiint x_1(t) y_2(t) x_3(t) y_4(t) \cdot W_4(x_1, y_2, x_3, y_4, t) \cdot dx_1 dy_2 dx_3 dy_4. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Здесь $W_4(x_1, y_2, x_3, y_4, t)$ — совместная плотность вероятности квадратурных составляющих $x_1(t)$, $y_2(t)$, $x_3(t)$, $y_4(t)$. Поскольку процесс формирования зондирующей волны, описываемой вектором Джонса

$$\dot{\vec{E}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1(t) \\ \dot{E}_2(t) \end{bmatrix},$$

является независимым по отношению к случайным изменениям элементов МР " фона " , то совместная плотность вероятности может быть представлена в виде следующего произведения :

$$W_4(x_1, y_2, x_3, y_4, t) = W_2(x_1, y_2, t) \cdot W_2(x_3, y_4, t), \quad (2.18)$$

где $W_2(x_1, y_2, t)$ и $W_2(x_3, y_4, t)$ — совместные плотности вероятности квадратурных составляющих ортогональных компонент излучаемого потока (x_1, y_2) и элементов МР "фона" (x_3, y_4) . Подставляя (2.18) в (2.17), получим

$$\begin{aligned} m^{(1)}_{1234}(t) &= \langle x_1(t) \cdot y_2(t) \cdot x_3(t) \cdot y_4(t) \rangle = \\ &= \langle x_1(t) \cdot y_2(t) \rangle \cdot \langle x_3(t) \cdot y_4(t) \rangle. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Пусть РЛ объект "фон" состоит из множества независимых элементарных отражателей. При этом фазовые аргументы элементов матрицы рассеяния "фона" $[\dot{S}_2]$ распределены равномерно в интервале $(0, 2\pi)$ и не коррелированы друг с другом. Тогда временные квадратуры элементов $\dot{c}_{1j}(t)$ будут иметь нулевые средние значения [1]:

$$\langle x_3(t) \rangle = \langle y_3(t) \rangle = \langle x_4(t) \rangle = \langle y_4(t) \rangle = 0. \quad (2.20)$$

Кроме того, будем считать квадратурные составляющие $x_p(t)$, $y_p(t)$ ($p=1,2,3,4$) стационарными, эргодическими процессами. Тогда моментные функции для рассматриваемого случая могут быть записаны [96]:

$$\langle x_1(t) \cdot y_2(t) \rangle = \overline{x_1(t) \cdot y_2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x_1(t) \cdot y_2(t) \cdot dt,$$

$$\langle x_3(t) \cdot y_4(t) \rangle = \overline{x_3(t) \cdot y_4(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x_3(t) \cdot y_4(t) \cdot dt,$$

(знак $\overline{(\dots)}$ означает усреднение по времени на интервале $(0, T)$)

Естественно, что аналогичные рассуждения могут быть проделаны и в отношении остальных слагаемых, входящих в (2.15, 2.16). Тогда

$$\langle \dot{Z}(t) \rangle = \overline{\dot{Z}(t)} = \overline{\text{Re}\{\dot{Z}(t)\}} + j \cdot \overline{\text{Im}\{\dot{Z}(t)\}}, \text{ где}$$

$$\begin{aligned} \overline{\text{Re}\{\dot{Z}(t)\}} &= \overline{[x_1(t) \cdot x_2(t) + y_1(t) \cdot y_2(t)] \cdot [x_3(t) \cdot x_4(t) + y_3(t) \cdot y_4(t)]} - \\ &- \overline{[x_2(t) \cdot y_1(t) - x_1(t) \cdot y_2(t)] \cdot [x_4(t) \cdot y_3(t) - x_3(t) \cdot y_4(t)]}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \overline{\text{Im}\{\dot{Z}(t)\}} &= \overline{[x_1(t) \cdot x_2(t) + y_1(t) \cdot y_2(t)] \cdot [x_4(t) \cdot y_3(t) - x_3(t) \cdot y_4(t)]} + \\ &+ \overline{[x_2(t) \cdot y_1(t) - x_1(t) \cdot y_2(t)] \cdot [x_3(t) \cdot x_4(t) + y_3(t) \cdot y_4(t)]}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

В свою очередь матрица когерентности излучаемого потока (2.9) при-

нимает вид :

$$[\dot{M}] = \begin{bmatrix} \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_1^*(t)} & \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \dot{E}_2^*(t)} \\ \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_1^*(t)} & \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \dot{E}_2^*(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{e_{11}} & \overline{e_{12}} \\ \overline{e_{21}} & \overline{e_{22}} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Учитывая это, перепишем выражения для МК волн, рассеянных искусственной целью и "фоном", следующим образом :

$$[\dot{M}_1] = [\dot{S}_1] \cdot \begin{bmatrix} \overline{e_{11}} & \overline{e_{12}} \\ \overline{e_{21}} & \overline{e_{22}} \end{bmatrix} \cdot [\dot{S}_1]^+ , \quad (2.22)$$

$$[\dot{M}_2] = \begin{bmatrix} \overline{M_{11}^{(2)}} & \overline{M_{12}^{(2)}} \\ \overline{M_{21}^{(2)}} & \overline{M_{22}^{(2)}} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{M_{11}^{(2)}} &= \overline{e_{11} \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t)} + \overline{e_{12} \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \\ &+ \overline{e_{21} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t)} + \overline{e_{22} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)}, \\ \overline{M_{12}^{(2)}} &= \overline{e_{11} \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \overline{e_{12} \cdot \dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t)} + \\ &+ \overline{e_{21} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \overline{e_{22} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t)}, \\ \overline{M_{21}^{(2)}} &= \overline{e_{11} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t)} + \overline{e_{12} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \\ &+ \overline{e_{21} \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t)} + \overline{e_{22} \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)}, \\ \overline{M_{22}^{(2)}} &= \overline{e_{11} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \overline{e_{12} \cdot \dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t)} + \\ &+ \overline{e_{21} \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \overline{e_{22} \cdot \dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t)}. \end{aligned}$$

Предположим теперь, что на интервале наблюдения $T_{\text{набл}}$ матрица когерентности излучаемого потока равна

$$[M] = a \cdot \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

где a — скаляр, имеющий размерность мощности. В этом случае (2.24) соответствует матрице когерентности неполяризованной волны [4].
Техническая реализация РЛС, формирующей поток излучения с подобной

МК, опирается на принцип оптической эквивалентности Стокса [95], согласно которому две ЭМ волны с одинаковыми векторами Стокса неразличимы по мощности, форме и степени поляризации. Известно [7], что для частично-поляризованного (ЧП) потока параметры Стокса получают усреднением за некоторый промежуток времени соответствующих квадратичных и билинейных форм :

$$\begin{aligned} g_0 &= \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \ddot{E}_1(t)} + \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \ddot{E}_2(t)}, & g_1 &= \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \ddot{E}_1(t)} - \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \ddot{E}_2(t)}, \\ g_2 &= \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \ddot{E}_2(t)} + \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \ddot{E}_1(t)}, & g_3 &= \overline{j\dot{E}_1(t) \cdot \ddot{E}_2(t)} - \overline{j\dot{E}_2(t) \cdot \ddot{E}_1(t)}. \end{aligned}$$

Поэтому если оформить поток излучения $\vec{E}(t)$, для которого на интервале наблюдения справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} |\dot{E}_1(t)|^2 &= |\dot{E}_2(t)|^2 = a, \\ \overline{\dot{E}_1(t) \cdot \ddot{E}_2(t)} - \overline{\dot{E}_2(t) \cdot \ddot{E}_1(t)} &= 0, \end{aligned} \right\}, \quad (2.25)$$

то соответствующий ему вектор Стокса

$$\vec{G}_0 = [g_0, g_1, g_2, g_3] = [2a, 0, 0, 0]$$

будет неотличим от вектора Стокса неполяризованной волны. При этом поток излучения, для которого выполняются условия (2.25), принято называть "псевдополяризованным". В общем случае свойства матрицы когерентности (2.9) рассмотрены в работе [6].

В настоящее время известны различные методы формирования псевдополяризованного потока излучения : манипуляция поляризацией излучаемого сигнала с периодом повторения зондирующих импульсов [16, 39, 57 и др.] или внутри каждого импульса [60] ; обеспечение режима полного поляризационного сканирования [3] ; использование поляризованной волны с вращающейся плоскостью поляризации [15, 61, 73] ; применение моноимпульсного двухчастотного метода [17] и др. Отвлекаясь от конкретного способа формирования псевдополяризованного потока излучения РЛС, будем считать, что ортогональные компо-

ненты вектора Джонса излучаемой волны удовлетворяют (2.25). Тогда выражения для элементов МК (2.23) примут вид :

$$\left. \begin{aligned} \overline{\dot{M}_{11}}^{(2)} &= \overline{|\dot{E}_1(t)|^2} \cdot \overline{|\dot{c}_{11}(t)|^2} + \overline{|\dot{E}_2(t)|^2} \cdot \overline{|\dot{c}_{12}(t)|^2}, \\ \overline{\dot{M}_{12}}^{(2)} &= \overline{|\dot{E}_1(t)|^2} \cdot \overline{\dot{c}_{11}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)} + \overline{|\dot{E}_2(t)|^2} \cdot \overline{\dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{22}^*(t)}, \\ \overline{\dot{M}_{21}}^{(2)} &= \overline{|\dot{E}_1(t)|^2} \cdot \overline{\dot{c}_{12}(t) \cdot \dot{c}_{11}^*(t)} + \overline{|\dot{E}_2(t)|^2} \cdot \overline{\dot{c}_{22}(t) \cdot \dot{c}_{12}^*(t)}, \\ \overline{\dot{M}_{22}}^{(2)} &= \overline{|\dot{E}_1(t)|^2} \cdot \overline{|\dot{c}_{12}(t)|^2} + \overline{|\dot{E}_2(t)|^2} \cdot \overline{|\dot{c}_{22}(t)|^2}. \end{aligned} \right\} (2.26)$$

Соответственно, матрица когерентности (2.23) запишется, как

$$[\dot{M}_2] = a \cdot \begin{bmatrix} \overline{|\dot{c}_{11}(t)|^2 + |\dot{c}_{12}(t)|^2} & \overline{\dot{c}_{11}(t) \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{c}_{12}(t) \dot{c}_{22}^*(t)} \\ \overline{\dot{c}_{11}^*(t) \dot{c}_{12}(t) + \dot{c}_{12}^*(t) \dot{c}_{22}(t)} & \overline{|\dot{c}_{12}(t)|^2 + |\dot{c}_{22}(t)|^2} \end{bmatrix}. (2.27)$$

Нетрудно показать, что в этом случае

$$[\dot{M}_2] = [\dot{S}_2] \cdot [\dot{S}_2]^*. (2.28a)$$

Согласно [3], полученная матрица когерентности (2.27) ((2.28a)) волны, рассеянной фоновым образованием, совпадает с комплексно сопряженной средней энергетической матрицей Грейвса $[\dot{G}] = [\dot{S}]^* \cdot [\dot{S}]$, являющейся удобным и информативным способом описания свойств флуктуирующих объектов. В свою очередь, при соблюдении условий (2.25) МК волны, рассеянной искусственной целью, принимает вид

$$[\dot{M}_1] = [\dot{S}_1] \cdot [\dot{S}_1]^+. (2.28b)$$

Для рассматриваемого случая однопозиционной радиолокации объектов с симметричной матрицей рассеяния ($\dot{s}_{21} = \dot{s}_{12}$), операция эрмитова сопряжения (+) тождественна комплексному сопряжению (*), поэтому матрица когерентности $[\dot{M}_1]$ запишется следующим образом :

$$[\dot{M}_1] = [\dot{S}_1] \cdot [\dot{S}_1]^* = [\dot{G}_1]^*,$$

где $[\dot{G}_1]^*$ — матрица, комплексно сопряженная матрице Грейвса $[\dot{G}_1]$

сосредоточенной цели.

Таким образом, при условии независимости свойств формируемого в РЛС псевдополяризованного потока излучения и временных флуктуаций элементов $\dot{c}_{1j}(t)$ статистической матрицы рассеяния распределенного объекта ("фон"), а также представления квадратур $\dot{c}_{1j}(t)$ стационарными эргодическими процессами с нулевыми средними, матрицы когерентности волн, рассеянных искусственной целью и "фоном", совпадают с точностью до постоянного множителя с соответствующими комплексно сопряженной и средней энергетической матрицами Грейвса :

$$[\dot{M}_1] = [\dot{G}_1] = [\dot{S}_1] \cdot [\dot{S}_1]^*, \quad (2.29a)$$

$$[\dot{M}_2] = \overline{[\dot{G}_2]^*} = \overline{[\dot{S}_2] \cdot [\dot{S}_2]^*}, \quad (2.29b)$$

2.2. Свойства матрицы когерентности (МК) рассеянного сигнала.

2.2.1. МК сигнала, рассеянного искусственной целью.

Коэффициент поляризационной анизотропии по мощности искусственной цели.

Особенностью рассматриваемого аналитического подхода к решению задачи поляризационного контраста, объединяющего описание РЛ объекта матрицей рассеяния с аппаратом матрицы когерентности рассеянной волны, является не только возможность использования известных теоретических результатов [1,3,4,6,17], но и обоснованный выбор поляризационного параметра из целой группы инвариантов МР, в отношении которого следует проводить анализ ПК.

Поляризационный контраст двух РЛ объектов может быть определен для любой поляризационной величины, описывающей их свойства. Учитывая большое число параметров, характеризующих те или иные поляризационные особенности объектов, проведем теоретический анализ ПК на

примере величины коэффициента поляризационной анизотропии по мощности, определяемого в виде следующего отношения квадратов модулей собственных чисел МР объекта [3] :

$$\mu_{\Pi} = (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) / (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) . \quad (2.30)$$

Выбор данного параметра объясняется не столько тем, что μ_{Π} является нормированной величиной инвариантной к различным возмущениям, сколько из-за его связи со степенью поляризации волны, рассеянной объектом при его облучении псевдополяризованным потоком. Рассмотрим степень поляризации m_1 волны, рассеянной искусственной целью. В соответствии с [4], величина m_1 записывается в виде следующего отношения собственных чисел ξ_1' , ξ_2' матрицы когерентности $[\dot{M}_1]$:

$$m_1 = \frac{\xi_1' - \xi_2'}{\xi_1' + \xi_2'} = \left[1 - 4 \cdot \frac{\text{Det}[\dot{M}_1]}{(\text{Sp}[\dot{M}_1])^2} \right]^{0.5} , \quad (2.31)$$

где $\text{Det}[\dot{M}_1]$ и $\text{Sp}[\dot{M}_1]$ — детерминант и след МК $[\dot{M}_1]$.

Для определения собственных чисел ξ_1' , ξ_2' воспользуемся (2.29а). В [6] доказано, что для взаимного случая однопозиционного зондирования матрица рассеяния $[\dot{S}_1]$ искусственной цели может быть представлена в линейном декартовом (ХОУ) базисе следующим образом :

$$[\dot{S}_1] = [\dot{T}_1] \cdot [\dot{S}_1'] \cdot [\dot{T}_1] , \quad (2.32)$$

где

$[\dot{S}_1'] = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1' & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2' \end{bmatrix}$ — МР цели в собственном поляризационном базисе (СПБ) ;

$$(2.33) \quad [\dot{T}_1] = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 & -j \sin \varepsilon_1 \\ -j \sin \varepsilon_1 & \cos \varepsilon_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} (\cos \theta_1 \cdot \cos \varepsilon_1 + j \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \varepsilon_1) & (\sin \theta_1 \cdot \cos \varepsilon_1 - j \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \varepsilon_1) \\ (-\sin \theta_1 \cdot \cos \varepsilon_1 - j \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \varepsilon_1) & (\cos \theta_1 \cdot \cos \varepsilon_1 - j \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \varepsilon_1) \end{bmatrix} -$$

— унитарная матрица перехода из СПБ в линейный декартовый базис,

при этом

$$[\dot{T}_1] \cdot \widetilde{[\dot{T}_1]}^* = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}; \quad (2.34)$$

$\widetilde{[\dot{T}_1]}$ — транспонированная матрица $[\dot{T}_1]$;

ε_1 и θ_1 — угол эллиптичности и угол ориентации (относительно системы координат XOY локатора) собственного базиса "цели".

В этом случае матрица когерентности (2.29а) принимает вид

$$\begin{aligned} [\dot{M}_1] &= [\dot{S}_1] \cdot [\dot{S}_1]^* = (\widetilde{[\dot{T}_1]} \cdot [\dot{S}_1'] \cdot [\dot{T}_1]) \cdot (\widetilde{[\dot{T}_1]} \cdot [\dot{S}_1'] \cdot [\dot{T}_1])^* \\ &= \widetilde{[\dot{T}_1]} \cdot [\dot{S}_1'] \cdot [\dot{T}_1] \cdot \widetilde{[\dot{T}_1]}^* \cdot [\dot{S}_1']^* \cdot [\dot{T}_1]^*. \end{aligned}$$

Поскольку матрица перехода $[\dot{T}_1]$ является унитарной ((2.34)), то

$$[\dot{M}_1] = \widetilde{[\dot{T}_1]} \cdot ([\dot{S}_1'] \cdot [\dot{S}_1']^*) \cdot [\dot{T}_1]^* = \widetilde{[\dot{T}_1]} \cdot \begin{bmatrix} |\dot{\lambda}_1'|^2 & 0 \\ 0 & |\dot{\lambda}_2'|^2 \end{bmatrix} \cdot [\dot{T}_1]^*.$$

Умножив $[\dot{M}_1]$ слева — на $[\dot{T}_1]^*$, а справа — на $\widetilde{[\dot{T}_1]}$, получим, с учетом (2.34), выражение для МК $[\dot{M}_1]$ в собственном базисе

$$[\dot{M}_{1c}] = [\dot{T}_1]^* \cdot [\dot{M}_1] \cdot \widetilde{[\dot{T}_1]} = \begin{bmatrix} |\dot{\lambda}_1'|^2 & 0 \\ 0 & |\dot{\lambda}_2'|^2 \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Таким образом, преобразование подобия с помощью матрицы $\widetilde{[\dot{T}_1]}$ матрица когерентности волны, рассеянной искусственной целью, приведена к диагональному виду. Следовательно, при использовании псевдо-неполяризованного потока излучения собственные числа МК $[\dot{M}_1]$ совпадают с квадратами модулей собственных чисел МР "цели":

$$\xi_1' = |\dot{\lambda}_1'|^2, \quad \xi_2' = |\dot{\lambda}_2'|^2,$$

а значит

$$\mu_1 = \frac{\xi_1' - \xi_2'}{\xi_1' + \xi_2'} = \frac{|\dot{\lambda}_1'|^2 - |\dot{\lambda}_2'|^2}{|\dot{\lambda}_1'|^2 + |\dot{\lambda}_2'|^2} = \mu_{\Pi 1}, \quad (2.36)$$

где $\mu_{\Pi 1}$ — коэффициент поляризационной анизотропии по мощности сосредоточенной цели. То есть коэффициент $\mu_{\Pi 1}$ совпадает с величиной сте-

пени поляризации рассеянной целью волны, которая может быть измерена при ее облучении псевдонеполаризованным потоком. К тому же коэффициент анизотропии $\mu_{\Pi 1}$, являясь высокоинформативным параметром, в сочетании с величиной полной ЭПР объекта способен описывать поляризационные свойства широкого круга РЛ целей. Поэтому выбор $\mu_{\Pi 1}$ для анализа поляризационного контраста объектов можно считать достаточно обоснованным.

Однако, рассматриваемый подход к описанию свойств искусственной цели связан с потерей некоторой информации об объекте. Так, описание поляризационных свойств РЛ цели в сжатой форме возможно с помощью следующих пяти величин [6] :

$$|\dot{\lambda}_1'|, |\dot{\lambda}_2'|, \Delta\varphi = \arg(\dot{\lambda}_1') - \arg(\dot{\lambda}_2'), \theta_1, \epsilon_1, \quad (2.37)$$

характеризующих МР с относительной фазой. В свою очередь наблюдаемый объект может быть описан с помощью инвариантных параметров матрицы когерентности [\dot{M}_1] рассеянной им волны :

$$\xi_1' = |\dot{\lambda}_1'|^2, \xi_2' = |\dot{\lambda}_2'|^2, \theta = \theta_1, \epsilon = -\epsilon_1. \quad (2.38)$$

Нетрудно видеть, что эти группы параметров прямо связаны между собой. Отличия заключаются в потере информации об относительном фазовом сдвиге $\Delta\varphi$ и изменении знака угла эллиптичности у группы параметров, соответствующих матрице когерентности (матрице Грейвса).

2.2.2. Матрица когерентности сигнала, рассеянного " фоном ".

Интегральный коэффициент поляризационной анизотропии по мощности распределенного объекта.

Рассмотрим МК потока, рассеянного распределенным образованием. Наиболее полной характеристикой такой цели является статистическая матрица рассеяния [\dot{S}_2] (2.26), элементы которой суть случайные функции времени. Если время корреляции элементов $\dot{s}_{1j}(t)$ много боль-

ше ВЧ периода излучаемой волны, то возможно говорить о "мгновенном" приведении МР распределенной цели к диагональному виду [3]:

$$[\dot{S}_2''] = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1''(t) & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2''(t) \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

При этом случайными функциями времени будут как собственные числа МР $\dot{\lambda}_1''(t)$, $\dot{\lambda}_2''(t)$, так и ее собственный базис: $(\theta_2(t), \varepsilon_2(t))$.

В разделе (2.1) показано, что при использовании псевдонеполаризованного потока излучения матрица когерентности волны, рассеянной "фоном", совпадает со средней энергетической матрицей Грейвса этого объекта:

$$[\dot{M}_2] = \overline{[\dot{G}_2]}^*. \quad (2.40)$$

При этом всегда существует поляризационный базис, в котором средняя энергетическая матрица Грейвса имеет диагональный вид [3]. Для флуктуирующих объектов этот базис играет ту же роль, как и собственный базис для стабильных целей. Таким образом, по аналогии с МК искусственной цели, для описания матрицы когерентности $[\dot{M}_2]$ волны, рассеянной "фоном", будем использовать следующие параметры:

$$\xi_1'' = |\dot{\lambda}_1''|^2, \xi_2'' = |\dot{\lambda}_2''|^2, \theta = \theta_2, \varepsilon = -\varepsilon_2. \quad (2.41)$$

При этом для определения контраста объектов "фон" и "фон + цель" необходимо введение адекватного $\mu_{\Pi 1}$ поляризационного параметра, характеризующего распределенный объект. Поскольку понятие коэффициента поляризационной анизотропии μ_{Π} используется в отношении стабильных объектов, для описания фоновых образований было предложено рассматривать параметр "степени псевдочастичной поляризации" рассеянной "фоном" волны [6], представленный в виде:

$$m_2 = \frac{\xi_1'' - \xi_2''}{\xi_1'' + \xi_2''} = \left[1 - 4 \cdot \frac{\text{Det} [\dot{M}_2]}{(\text{Sp} [\dot{M}_2])^2} \right]^{0.5} = \mu_{\Pi 2}. \quad (2.42)$$

Математически выражения (2.36) и (2.42) абсолютно эквивалентны, а физически последнее выражение (2.42) следует интерпретировать в качестве "интегрального" коэффициента анизотропии по мощности распределенного фонового образования.

2.3. Матрица когерентности суммы двух потоков, рассеянных искусственной целью и фоновым образованием.

2.3.1. Интегральный коэффициент поляризационной анизотропии составного объекта "фон + цель".

Используем для описания поляризационных свойств РЛ объекта "фон + цель" параметр μ_{Π} поляризационной анизотропии по мощности, определяемый аналогично величинам $\mu_{\Pi 1}$ "цели" (2.36) и $\mu_{\Pi 2}$ "фона" (2.42). Для этого найдем выражения для собственных чисел матрицы когерентности суммарного потока от "цели" и "фона" :

$$[\dot{M}_0] = [\dot{S}] \cdot (\vec{\dot{E}}(t) \cdot \vec{\dot{E}}^+(t)) \cdot [\dot{S}]^+.$$

Здесь матрица $[\dot{S}]$ и вектор Джонса $\vec{\dot{E}}(t)$ удовлетворяют выражениям (2.1) и (2.3). Подставляя их, и учитывая свойства излучаемого потока (см. (2.24)), получим

$$[\dot{M}_0] = [\dot{M}_1] + [\dot{M}_2] + \overline{[\dot{M}_{12}] \cdot \exp(j\varphi(t))} + \overline{[\dot{M}_{12}] \cdot \exp(-j\varphi(t))}.$$

Здесь $[\dot{M}_2]$ и $[\dot{M}_1]$ — матрицы когерентности волн, рассеянных "фоном" и "целью", $\varphi(t) = \varphi_{01} - \varphi_{02}(t)$, а матрица $[\dot{M}_{12}]$ имеет вид

$$[\dot{M}_{12}] = \begin{bmatrix} \dot{m}_{11} & \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{21} & \dot{m}_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{где}$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{s}_{11} \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{s}_{12} \cdot \dot{c}_{21}^*(t), \quad \dot{m}_{12} = \dot{s}_{11} \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{s}_{12} \cdot \dot{c}_{22}^*(t),$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{s}_{21} \cdot \dot{c}_{11}^*(t) + \dot{s}_{22} \cdot \dot{c}_{21}^*(t), \quad \dot{m}_{22} = \dot{s}_{21} \cdot \dot{c}_{12}^*(t) + \dot{s}_{22} \cdot \dot{c}_{22}^*(t).$$

Предположим для простоты $\varphi(t) = \varphi_{01} - \varphi_{02}(t) = 0$. Тогда

$$[\dot{M}_{12}] = \begin{bmatrix} \overline{(\dot{s}_{11} \cdot \dot{c}_{11}(t) + \dot{s}_{12} \cdot \dot{c}_{21}(t))} & \overline{(\dot{s}_{11} \cdot \dot{c}_{12}(t) + \dot{s}_{12} \cdot \dot{c}_{22}(t))} \\ \overline{(\dot{s}_{21} \cdot \dot{c}_{11}(t) + \dot{s}_{22} \cdot \dot{c}_{21}(t))} & \overline{(\dot{s}_{21} \cdot \dot{c}_{12}(t) + \dot{s}_{22} \cdot \dot{c}_{22}(t))} \end{bmatrix}.$$

Считая свойства искусственной цели (\dot{s}_{1j}) и "фона", элементы МР которого удовлетворяют (2.20), независимыми друг от друга, получаем

$$\overline{\dot{s}_{1j} \cdot \dot{c}_{kl}(t)} - \overline{\dot{s}_{1j}} \cdot \overline{\dot{c}_{kl}(t)} = 0.$$

Повтому матрица $[\dot{M}_{12}]$ тождественно равна нулевой матрице и, следовательно, МК волны, рассеянной составным РЛ объектом, будет равна сумме матриц когерентности потоков от "цели" и "фона":

$$[\dot{M}_0] = [\dot{M}_1] + [\dot{M}_2].$$

Однако, даже в этом случае собственные значения матрицы $[\dot{M}_0]$ не будут равны простой сумме собственных чисел соответствующих матриц когерентности $[\dot{M}_1]$ и $[\dot{M}_2]$ слагаемых потоков, поскольку параметры их собственных поляризационных базисов (2.38), (2.41) могут быть произвольными и отличаться друг от друга. Еще более задача усложняется при изменении во времени параметров матрицы рассеяния искусственной "цели" или отличных от нуля средних значений величин $\dot{c}_{kl}(t)$ МР "фона". Повтому для определения собственных чисел $[\dot{M}_0]$ воспользуемся подходом к построению матрицы когерентности суммы двух некоррелированных потоков, предложенным в [4].

Пусть $\vec{E}'(t)$ и $\vec{E}''(t)$ — два совпадающих по направлению распространения некоррелированных, и в общем случае — частично-поляризованных потоков, рассеянных сосредоточенной целью и фоновым образованием, соответственно. Причем векторы Джонса, описывающие эти потоки в линейном базисе, заданы выражениями

$$\vec{E}'(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1'(t) \\ \dot{E}_2'(t) \end{bmatrix}, \quad \vec{E}''(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1''(t) \\ \dot{E}_2''(t) \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

Тогда суммарный поток в том же самом линейном базисе запишется, как

$$\vec{E}(t) = \vec{E}'(t) + \vec{E}''(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1'(t) + \dot{E}_1''(t) \\ \dot{E}_2'(t) + \dot{E}_2''(t) \end{bmatrix} . \quad (2.44)$$

Комплексные векторы $\vec{E}'(t)$, $\vec{E}''(t)$ и $\vec{E}(t)$ можно разложить в любых произвольных ортонормированных поляризационных базисах [1,3]. Выберем в качестве таких базисов пары собственных векторов соответствующих матриц когерентности :

$$\left. \begin{aligned} [M_1] : (\vec{a}, \vec{b}) , \text{ где } \vec{a} &= \begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \end{bmatrix}, \vec{b} = \begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \end{bmatrix}; \\ [M_2] : (\vec{c}, \vec{d}) , \text{ где } \vec{c} &= \begin{bmatrix} \dot{c}_1 \\ \dot{c}_2 \end{bmatrix}, \vec{d} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix}; \\ [M] : (\vec{f}, \vec{g}) , \text{ где } \vec{f} &= \begin{bmatrix} \dot{f}_1 \\ \dot{f}_2 \end{bmatrix}, \vec{g} = \begin{bmatrix} \dot{g}_1 \\ \dot{g}_2 \end{bmatrix}; \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

и примем условия нормирования поляризационных базисов в виде :

$$\dot{a}_j \cdot \dot{a}_j^* = \dot{b}_j \cdot \dot{b}_j^* = \dot{c}_j \cdot \dot{c}_j^* = \dot{d}_j \cdot \dot{d}_j^* = \dot{f}_j \cdot \dot{f}_j^* = \dot{g}_j \cdot \dot{g}_j^* = I . \quad (2.46)$$

Здесь и далее используется краткое обозначение сумм произведений элементов с повторяющимися индексами, например, выражение $\dot{c}_j \cdot \dot{c}_j^* = I$ означает следующее равенство $\dot{c}_1 \cdot \dot{c}_1^* + \dot{c}_2 \cdot \dot{c}_2^* = I$. Таким образом, можно записать, что

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}'(t) &= \dot{E}_a'(t) \cdot \vec{a} + \dot{E}_b'(t) \cdot \vec{b} , \\ \vec{E}''(t) &= \dot{E}_c''(t) \cdot \vec{c} + \dot{E}_d''(t) \cdot \vec{d} , \\ \vec{E}(t) &= \dot{E}_f(t) \cdot \vec{f} + \dot{E}_g(t) \cdot \vec{g} , \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

где $\dot{E}_a'(t)$, $\dot{E}_b'(t)$, $\dot{E}_c''(t)$, $\dot{E}_d''(t)$, $\dot{E}_f(t)$, $\dot{E}_g(t)$, — "проекции" комплексных векторов $\vec{E}'(t)$, $\vec{E}''(t)$, $\vec{E}(t)$ на "направления" комплексных ортов \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} , \vec{d} , \vec{f} , \vec{g} [3]. Следовательно, комплексные векторы, описывающие парциальные потоки от "цели" и "фона"

и суммарный поток, запишутся в собственных базисах матриц когерентности $[\dot{M}_1]$, $[\dot{M}_2]$ и $[\dot{M}]$ следующим образом :

$$\vec{E}_M'(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_a'(t) \\ \dot{E}_b'(t) \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_M''(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_c''(t) \\ \dot{E}_d''(t) \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_M(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_f(t) \\ \dot{E}_g(t) \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

Причем ($j = 1, 2$)

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_a'(t) &= \dot{E}_1'(t) \cdot \dot{a}_1 + \dot{E}_2'(t) \cdot \dot{a}_2 - \dot{E}_j'(t) \cdot \dot{a}_j, \\ \dot{E}_b'(t) &= \dot{E}_1'(t) \cdot \dot{b}_1 + \dot{E}_2'(t) \cdot \dot{b}_2 - \dot{E}_j'(t) \cdot \dot{b}_j, \\ \dot{E}_c''(t) &= \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{c}_j, \quad \dot{E}_d''(t) = \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{d}_j, \\ \dot{E}_f(t) &= \dot{E}_j(t) \cdot \dot{f}_j, \quad \dot{E}_g(t) = \dot{E}_j(t) \cdot \dot{g}_j. \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

Рассмотрим в качестве примера парциальный поток $\vec{E}_M''(t)$, рассеянный "фоном". Его матрица когерентности, записанная в своем собственном поляризационном базисе (\dot{c}, \dot{d}), принимает вид :

$$[\dot{M}_{2c}] = \begin{bmatrix} \overline{\dot{E}_c''(t) \cdot \dot{E}_c''(t)} & \overline{\dot{E}_c''(t) \cdot \dot{E}_d''(t)} \\ \overline{\dot{E}_d''(t) \cdot \dot{E}_c''(t)} & \overline{\dot{E}_d''(t) \cdot \dot{E}_d''(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1'' & 0 \\ 0 & \xi_2'' \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Отсюда вытекают следующие соотношения :

$$\left. \begin{aligned} |\dot{E}_c''(t)|^2 &= \overline{\dot{E}_1''(t) \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{c}_j} = \xi_1'', \\ |\dot{E}_d''(t)|^2 &= \overline{\dot{E}_1''(t) \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{d}_j} = \xi_2'', \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\dot{E}_c''(t) \cdot \dot{E}_d''(t)} &= \overline{\dot{E}_1''(t) \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{d}_j} = 0, \\ \overline{\dot{E}_d''(t) \cdot \dot{E}_c''(t)} &= \overline{\dot{E}_1''(t) \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{E}_j''(t) \cdot \dot{c}_j} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

Точно также можно показать, что

$$|\dot{E}_a'(t)|^2 = \xi_1', \quad |\dot{E}_b'(t)|^2 = \xi_2'; \quad |\dot{E}_f(t)|^2 = \xi_1, \quad |\dot{E}_g(t)|^2 = \xi_2.$$

Запишем теперь комплексный вектор суммарного потока $\vec{E}(t)$ через его "проекции" на орты собственного базиса (\dot{f}, \dot{g}) МК $[\dot{M}]$:

$$\vec{E}(t) = \dot{E}_f(t) \cdot \dot{f} + \dot{E}_g(t) \cdot \dot{g}. \quad (2.54)$$

и найдем развернутые выражения, описывающие $\dot{E}_f(t)$ и $\dot{E}_g(t)$. Так,

$$\dot{\mathbf{E}}_f(t) = \dot{\mathbf{E}}_j(t) \cdot \dot{\mathbf{f}}_j^* = \dot{\mathbf{E}}_1(t) \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \dot{\mathbf{E}}_2(t) \cdot \dot{\mathbf{f}}_2^* .$$

Учитывая, что $\dot{\mathbf{E}}_1(t) = \dot{\mathbf{E}}_1'(t) + \dot{\mathbf{E}}_1''(t)$, $\dot{\mathbf{E}}_2(t) = \dot{\mathbf{E}}_2'(t) + \dot{\mathbf{E}}_2''(t)$, а также то, что

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_1'(t) &= \dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{a}}_1 + \dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{b}}_1, & \dot{\mathbf{E}}_1''(t) &= \dot{\mathbf{E}}_c''(t) \cdot \dot{\mathbf{c}}_1 + \dot{\mathbf{E}}_d''(t) \cdot \dot{\mathbf{d}}_1, \\ \dot{\mathbf{E}}_2'(t) &= \dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{a}}_2 + \dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{b}}_2, & \dot{\mathbf{E}}_2''(t) &= \dot{\mathbf{E}}_c''(t) \cdot \dot{\mathbf{c}}_2 + \dot{\mathbf{E}}_d''(t) \cdot \dot{\mathbf{d}}_2, \end{aligned}$$

получаем

$$\dot{\mathbf{E}}_f(t) = \dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{a}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{b}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \dot{\mathbf{E}}_c''(t) \cdot \dot{\mathbf{c}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \dot{\mathbf{E}}_d''(t) \cdot \dot{\mathbf{d}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^*$$

или, с учетом (2.50),

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_f(t) &= [\dot{\mathbf{E}}_j'(t) \cdot \dot{\mathbf{a}}_j] \cdot \dot{\mathbf{a}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + [\dot{\mathbf{E}}_j'(t) \cdot \dot{\mathbf{b}}_j] \cdot \dot{\mathbf{b}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \\ &+ [\dot{\mathbf{E}}_j''(t) \cdot \dot{\mathbf{c}}_j] \cdot \dot{\mathbf{c}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + [\dot{\mathbf{E}}_j''(t) \cdot \dot{\mathbf{d}}_j] \cdot \dot{\mathbf{d}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^*, \end{aligned} \quad (2.55)$$

где $(i, j = 1, 2)$.

Теперь, получив выражение для "проекции" комплексного вектора $\dot{\mathbf{E}}(t)$ на орт $\dot{\mathbf{f}}$ собственного базиса матрицы когерентности $[\dot{\mathbf{M}}]$ суммарного потока от "цели" и "фона", найдем ее первое собственное число, как

$$\xi_1 = \overline{|\dot{\mathbf{E}}_f(t)|^2} = \overline{\dot{\mathbf{E}}_f(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_f^*(t)},$$

где $(k, l = 1, 2)$:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_f(t) &= [\dot{\mathbf{E}}_k'(t) \cdot \dot{\mathbf{a}}_k] \cdot \dot{\mathbf{a}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + [\dot{\mathbf{E}}_k'(t) \cdot \dot{\mathbf{b}}_k] \cdot \dot{\mathbf{b}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + \\ &+ [\dot{\mathbf{E}}_k''(t) \cdot \dot{\mathbf{c}}_k] \cdot \dot{\mathbf{c}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* + [\dot{\mathbf{E}}_k''(t) \cdot \dot{\mathbf{d}}_k] \cdot \dot{\mathbf{d}}_1 \cdot \dot{\mathbf{f}}_1^* . \end{aligned}$$

Считая рассеянные сосредоточенной целью и распределенным объектом волны некоррелированными, запишем это условие в виде равенства корреляционной матрицы $[\dot{\mathbf{K}}]$ потоков $\dot{\mathbf{E}}_M'(t)$ и $\dot{\mathbf{E}}_M''(t)$ нулевой матрице, т.е.

$$[\dot{\mathbf{K}}] = \overline{\dot{\mathbf{E}}_M'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_M''(t)^+} = \begin{bmatrix} \overline{\dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_c''(t)} & \overline{\dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_d''(t)} \\ \overline{\dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_c''(t)} & \overline{\dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_d''(t)} \end{bmatrix} = [0] .$$

Учитывая это, а также то, что по аналогии с (2.53)

$$\overline{\dot{\mathbf{E}}_a'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_b'(t)} = \overline{\dot{\mathbf{E}}_b'(t) \cdot \dot{\mathbf{E}}_a'(t)} = 0 ,$$

$$\xi_1 = |\dot{E}_a'(t)|^2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{a}_1 \cdot \dot{f}_1 + |\dot{E}_b'(t)|^2 \cdot \dot{b}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{b}_1 \cdot \dot{f}_1 + \\ + |\dot{E}_c''(t)|^2 \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{f}_1 + |\dot{E}_d''(t)|^2 \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{f}_1$$

или

$$\xi_1 = \xi_1' \cdot (\dot{a}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{a}_1 \cdot \dot{f}_1) + \xi_2' \cdot (\dot{b}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{b}_1 \cdot \dot{f}_1) + \\ + \xi_1'' \cdot (\dot{c}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{f}_1) + \xi_2'' \cdot (\dot{d}_1 \cdot \dot{f}_1 \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{f}_1). \quad (2.56)$$

Точно также, опуская промежуточные выкладки, можно получить выражение для второго собственного числа МК суммарного потока :

$$\xi_2 = \xi_1' \cdot (\dot{a}_1 \cdot \dot{g}_1 \cdot \dot{a}_1 \cdot \dot{g}_1) + \xi_2' \cdot (\dot{b}_1 \cdot \dot{g}_1 \cdot \dot{b}_1 \cdot \dot{g}_1) + \\ + \xi_1'' \cdot (\dot{c}_1 \cdot \dot{g}_1 \cdot \dot{c}_1 \cdot \dot{g}_1) + \xi_2'' \cdot (\dot{d}_1 \cdot \dot{g}_1 \cdot \dot{d}_1 \cdot \dot{g}_1). \quad (2.57)$$

Таким образом, собственные числа ξ_1, ξ_2 матрицы когерентности суммарного потока, рассеянного составным РЛ объектом "фон + цель", представляют собой взвешенные суммы собственных чисел матриц когерентности потоков, рассеянных осредоточенной целью и фоновым образованием :

$$\xi_1 = k_{11} \cdot \xi_1' + k_{12} \cdot \xi_2' + k_{13} \cdot \xi_1'' + k_{14} \cdot \xi_2'' , \\ \xi_2 = k_{21} \cdot \xi_1' + k_{22} \cdot \xi_2' + k_{23} \cdot \xi_1'' + k_{24} \cdot \xi_2'' . \quad (2.58)$$

Рассмотрим теперь более подробно коэффициенты k_{mn} ($m = 1, 2$; $n = 1, 2, 3, 4$). В качестве собственных векторов матриц когерентности $[\dot{M}_1]$, $[\dot{M}_2]$, $[\dot{M}]$, выступают столбцы соответствующих им матриц перехода $[\dot{T}_1]$, $[\dot{T}_2]$ и $[\dot{T}]$ (см. (2.35)) :

$$[\dot{T}_1] = \left[\begin{pmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{pmatrix} \right], [\dot{T}_2] = \left[\begin{pmatrix} \dot{c} \\ \dot{d} \end{pmatrix} \right], [\dot{T}] = \left[\begin{pmatrix} \dot{f} \\ \dot{g} \end{pmatrix} \right] .$$

Примем для сокращения записи условные обозначения тригонометрических функций углов вида $C_\alpha = \cos \alpha$, $S_\alpha = \sin \alpha$, где в качестве угла α выступают величины $\theta_1, \epsilon_1, \theta_2, \epsilon_2, \theta, \epsilon$. Тогда

$$\dot{\vec{a}} = \begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} C_{\epsilon_1} + JS_{\theta_1} S_{\epsilon_1} \\ S_{\theta_1} C_{\epsilon_1} - JS_{\theta_1} S_{\epsilon_1} \end{bmatrix}, \quad \dot{\vec{b}} = \begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_{\theta_1} C_{\epsilon_1} - JC_{\theta_1} S_{\epsilon_1} \\ C_{\theta_1} C_{\epsilon_1} - JS_{\theta_1} S_{\epsilon_1} \end{bmatrix},$$

$$\vec{c} = \begin{bmatrix} \dot{c}_1 \\ \dot{c}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} C_{\epsilon 2} + JS_{\theta 2} S_{\epsilon 2} \\ S_{\theta 2} C_{\epsilon 2} - JC_{\theta 2} S_{\epsilon 2} \end{bmatrix}, \quad \vec{d} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_{\theta 2} C_{\epsilon 2} - JC_{\theta 2} S_{\epsilon 2} \\ C_{\theta 2} C_{\epsilon 2} - JS_{\theta 2} S_{\epsilon 2} \end{bmatrix},$$

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta} C_{\epsilon} + JS_{\theta} S_{\epsilon} \\ S_{\theta} C_{\epsilon} - JC_{\theta} S_{\epsilon} \end{bmatrix}, \quad \vec{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_{\theta} C_{\epsilon} - JC_{\theta} S_{\epsilon} \\ C_{\theta} C_{\epsilon} - JS_{\theta} S_{\epsilon} \end{bmatrix}.$$

Подставляя значения ортогональных компонент собственных векторов в выражения для $k_{\text{пп}}$ и опуская несложные, но громоздкие преобразования, получим окончательный результат :

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= \cos^2(\theta_1 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_1 - \epsilon) + \sin^2(\theta_1 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_1 + \epsilon) , \\ k_{12} &= \cos^2(\theta_1 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_1 - \epsilon) + \sin^2(\theta_1 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_1 + \epsilon) , \\ k_{13} &= \cos^2(\theta_2 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_2 - \epsilon) + \sin^2(\theta_2 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_2 + \epsilon) , \\ k_{14} &= \cos^2(\theta_2 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_2 - \epsilon) + \sin^2(\theta_2 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_2 + \epsilon) , \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{21} &= \sin^2(\theta_1 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_1 + \epsilon) + \cos^2(\theta_1 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_1 - \epsilon) , \\ k_{22} &= \cos^2(\theta_1 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_1 - \epsilon) + \sin^2(\theta_1 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_1 + \epsilon) , \\ k_{23} &= \sin^2(\theta_2 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_2 + \epsilon) + \cos^2(\theta_2 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_2 - \epsilon) , \\ k_{24} &= \cos^2(\theta_2 - \theta) \cdot \cos^2(\epsilon_2 - \epsilon) + \sin^2(\theta_2 - \theta) \cdot \sin^2(\epsilon_2 + \epsilon) . \end{aligned} \right\} \quad (2.60)$$

Нетрудно убедиться, что данные коэффициенты попарно равны. Поэтому введем для них обозначения : $k_{11} = k_{22} = k_1$, $k_{12} = k_{21} = k_2$, $k_{13} = k_{24} = k_3$, $k_{14} = k_{23} = k_4$. При этом

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= k_1 \cdot \xi_1' + k_2 \cdot \xi_2' + k_3 \cdot \xi_1'' + k_4 \cdot \xi_2'' , \\ \xi_2 &= k_2 \cdot \xi_1' + k_1 \cdot \xi_2' + k_4 \cdot \xi_1'' + k_3 \cdot \xi_2'' . \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

Необходимо также отметить, что при любых величинах углов θ_1 , θ_2 , θ и ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ выполняются тождества : $k_1 + k_2 = I$, $k_3 + k_4 = I$. Отсюда полная мощность потока, рассеянного составным РЛ объектом "фон + цель", определяется суммой собственных чисел матрицы когерентности $[M]$ в виде : $\xi_1 + \xi_2 = (\xi_1' + \xi_2') + (\xi_1'' + \xi_2'')$.

Тогда искомая степень псевдочастичной поляризации суммарного потока, несущая информацию о величине "интегральной" поляризационной анизотропии по мощности объекта типа "фон + цель", запишется в виде суммы коэффициентов анизотропии сосредоточенного ($\mu_{п1}$) и распределенного ($\mu_{п2}$) объектов, умноженных на коэффициенты, зависящие от относительных ЭПР и параметров соответствующих поляризационных базисов :

$$\begin{aligned} \mu_{п} &= \frac{\xi_1 - \xi_2}{\xi_1 + \xi_2} = \frac{(\xi_1' - \xi_2') \cdot (k_1 - k_2) + (\xi_1'' - \xi_2'') \cdot (k_3 - k_4)}{(\xi_1' + \xi_2') + (\xi_1'' + \xi_2'')} = \\ &= \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot P_1 \cdot \mu_{п1} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot P_2 \cdot \mu_{п2} . \end{aligned} \quad (2.62)$$

где

A_1 и A_2 - полные мощности потоков, рассеянных искусственной целью и "фоном", соответственно, или полные ЭПР этих объектов :

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \xi_1' + \xi_2' = |\dot{\lambda}_1'|^2 + |\dot{\lambda}_2'|^2 , \\ A_2 &= \xi_1'' + \xi_2'' = |\dot{\lambda}_1''|^2 + |\dot{\lambda}_2''|^2 ; \end{aligned} \right\} , \quad (2.63)$$

P_1 и P_2 - взвешивающие коэффициенты :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= k_1 - k_2 = \cos^2(\theta_1 - \theta) \cdot \cos 2(\varepsilon_1 - \varepsilon) - \sin^2(\theta_1 - \theta) \cos 2(\varepsilon_1 + \varepsilon) , \\ P_2 &= k_3 - k_4 = \cos^2(\theta_2 - \theta) \cdot \cos 2(\varepsilon_2 - \varepsilon) - \sin^2(\theta_2 - \theta) \cos 2(\varepsilon_2 + \varepsilon) ; \end{aligned} \right\} \quad (2.64)$$

$(\theta_1, \theta_2, \theta)$ и $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon)$ - углы ориентации и эллиптичности собственных ПБ матриц когерентности $[\dot{M}_1]$, $[\dot{M}_2]$ и $[\dot{M}]$;

$\mu_{п1}$ и $\mu_{п2}$ - коэффициенты поляризационной анизотропии по мощности "цели" и "фона", соответственно :

$$\begin{aligned} \mu_{п1} &= \frac{\xi_1' - \xi_2'}{\xi_1' + \xi_2'} = \frac{|\dot{\lambda}_1'|^2 - |\dot{\lambda}_2'|^2}{|\dot{\lambda}_1'|^2 + |\dot{\lambda}_2'|^2} , \\ \mu_{п2} &= \frac{\xi_1'' - \xi_2''}{\xi_1'' + \xi_2''} = \frac{|\dot{\lambda}_1''|^2 - |\dot{\lambda}_2''|^2}{|\dot{\lambda}_1''|^2 + |\dot{\lambda}_2''|^2} . \end{aligned}$$

2.3.2. Анализ интегрального коэффициента поляризационной анизотропии объекта "фон + цель".

Рассмотрим более подробно выражение (2.62). "Интегральный" коэффициент поляризационной анизотропии μ_{Π} составного объекта "фон + цель" представляет собой сумму взвешенных коэффициентов $\mu_{\Pi 1}$, $\mu_{\Pi 2}$ "цели" и "фона". При этом весовые множители

$$A_1 \cdot P_1 / (A_1 + A_2) \text{ и } A_2 \cdot P_2 / (A_1 + A_2)$$

определяются относительными мощностями каждого из потоков или величинами отношений ЭПР "цели" и "фона" к полной ЭПР составного объекта, а также коэффициентами P_1 и P_2 , зависящими от параметров собственных ПБ матриц когерентности $[\dot{M}_1]$, $[\dot{M}_2]$, $[\dot{M}]$.

Для того, чтобы определить поляризационный контраст двух РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" при измерении коэффициента поляризационной анизотропии по мощности, перепишем выражение (1.3) в виде

$$W_{\Pi} = |(\mu_{\Pi} - \mu_{\Pi 2}) / (\mu_{\Pi} + \mu_{\Pi 2})|.$$

Задавая поляризационные параметры, характеризующие сосредоточенную искусственную цель и распределенное фоновое образование, можно вычислить μ_{Π} составного объекта (2.62) и найти величину поляризационного контраста W_{Π} , как функцию соответствующих параметров "цели" и "фона". Однако, важно отметить, что вошедшие в формулы (2.64) для P_1 и P_2 параметры ориентации θ и эллиптичности ϵ собственного ПБ матрицы когерентности суммарного потока не являются произвольными. Они однозначно связаны с группой параметров: $|\dot{\lambda}_1'|$, $|\dot{\lambda}_2'|$, $\Delta\varphi'$, θ_1 , ϵ_1 матрицы рассеяния $[\dot{S}]$ (2.37) сосредоточенной цели, а также с аналогичными величинами $|\dot{\lambda}_1''(t)|$, $|\dot{\lambda}_2''(t)|$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\epsilon_2(t)$, характеризующими собственный поляризационный базис матрицы рассеяния $[\dot{S}_2]$ "фона".

В разделе (2.1) доказано, что матрицы когерентности волн, рассеянных "целью" и "фоном", описываются матрицами Грейвса (2.29а) и (2.29б), приводимыми к диагональному виду преобразованием подобия при помощи соответствующих матриц перехода. При этом параметры собственных базисов (углы ориентации и эллиптичности) матриц когерентности $[\dot{M}_1]$ и $[\dot{M}_2]$ непосредственно связаны с соответствующими параметрами СПБ матриц рассеяния "цели" и "фона". Поэтому, определив параметры θ_0, ε_0 поляризационного базиса, в котором МР составного объекта "фон + цель" имеет диагональный вид, найдем соответствующие параметры для собственного ПБ матрицы когерентности $[\dot{M}]$ суммарного рассеянного потока: $\theta = \theta_0, \varepsilon = \varepsilon_0$.

2.3.3. Определение параметров собственного базиса матрицы рассеяния объекта "фон + цель".

Пусть $[\dot{S}_1]$ и $[\dot{S}_2]$ — матрицы рассеяния сосредоточенной цели и фонового образования, записанные в линейном декартовом (ХОУ) базисе. Используя матрицы перехода $[\dot{T}_1]$ (2.33) для "цели" и $[\dot{T}_2]$ для "фона", представим $[\dot{S}_1]$ и $[\dot{S}_2]$ в виде:

$$\frac{\dot{\lambda}_1' + \dot{\lambda}_2'}{2} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}' & \dot{B}' \\ \dot{B}' & \dot{C}' \end{bmatrix} \text{ и } \frac{\dot{\lambda}_1''(t) + \dot{\lambda}_2''(t)}{2} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}''(t) & \dot{B}''(t) \\ \dot{B}''(t) & \dot{C}''(t) \end{bmatrix}, \quad (2.65)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \dot{A}' &= \cos 2\varepsilon_1 + \dot{\mu}_1 \cdot \cos 2\theta_1 + j \sin 2\theta_1 \cdot \sin 2\varepsilon_1, \\ \dot{B}' &= \dot{\mu}_1 \cdot \sin 2\theta_1 - j \cos 2\theta_1 \cdot \sin 2\varepsilon_1, \\ \dot{C}' &= \cos 2\varepsilon_1 - \dot{\mu}_1 \cdot \cos 2\theta_1 - j \sin 2\theta_1 \cdot \sin 2\varepsilon_1, \\ \dot{\mu}_1 &= (\dot{\lambda}_1' - \dot{\lambda}_2') / (\dot{\lambda}_1' + \dot{\lambda}_2'); \end{aligned} \right\}, \quad (2.66)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{A}''(t) &= \cos 2\varepsilon_2(t) + \dot{\mu}_2(t) \cdot \cos 2\theta_2(t) + j \sin 2\theta_2(t) \cdot \sin 2\varepsilon_2(t), \\ \dot{B}''(t) &= \dot{\mu}_2(t) \cdot \sin 2\theta_2(t) - j \cos 2\theta_2(t) \cdot \sin 2\varepsilon_2(t), \\ \dot{C}''(t) &= \cos 2\varepsilon_2(t) - \dot{\mu}_2(t) \cdot \cos 2\theta_2(t) - j \sin 2\theta_2(t) \cdot \sin 2\varepsilon_2(t), \\ \dot{\mu}_2(t) &= (\dot{\lambda}_1''(t) - \dot{\lambda}_2''(t)) / (\dot{\lambda}_1''(t) + \dot{\lambda}_2''(t)). \end{aligned} \right\}, \quad (2.67)$$

С другой стороны матрицы $[\dot{S}_1]$ и $[\dot{S}_2]$ можно представить в любом произвольном поляризационном базисе [3]. Запишем матрицы рассеяния сосредоточенной цели и "фона" в собственном ПБ матрицы рассеяния $[\dot{S}]$ составного объекта "фон + цель" (2.1). Для этого воспользуемся результатами [6], согласно которым

$$[\dot{S}_{10}] = \begin{bmatrix} C_{\epsilon_0} & jS_{\epsilon_0} \\ jS_{\epsilon_0} & C_{\epsilon_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{\theta_0} & S_{\theta_0} \\ -S_{\theta_0} & C_{\theta_0} \end{bmatrix} \cdot [\dot{S}_1] \cdot \begin{bmatrix} C_{\theta_0} & -S_{\theta_0} \\ S_{\theta_0} & C_{\theta_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{\epsilon_0} & jS_{\epsilon_0} \\ jS_{\epsilon_0} & C_{\epsilon_0} \end{bmatrix}, \quad (2.68)$$

где $1 = 1, 2$, а $C_{\theta_0} = \cos \theta_0$, $S_{\theta_0} = \sin \theta_0$, $C_{\epsilon_0} = \cos \epsilon_0$, $S_{\epsilon_0} = \sin \epsilon_0$. При этом величины θ_0 и ϵ_0 соответствуют углам ориентации и эллиптичности собственного базиса МР объекта "фон + цель".

Выполнив преобразования (2.68) в отношении МР $[\dot{S}_1]$ и $[\dot{S}_2]$, представим матрицу рассеяния (2.1) составного объекта в виде:

$$\begin{aligned} [\dot{S}_0] &= [\dot{S}_{10}] \cdot \exp(j\varphi_{01}) + [\dot{S}_{20}] \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) = \\ &= \begin{bmatrix} \dot{S}_{110} & \dot{S}_{120} \\ \dot{S}_{210} & \dot{S}_{220} \end{bmatrix} \cdot \exp(j\varphi_{01}) + \begin{bmatrix} \dot{S}_{110}(t) & \dot{S}_{120}(t) \\ \dot{S}_{210}(t) & \dot{S}_{220}(t) \end{bmatrix} \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)). \end{aligned} \quad (2.69)$$

По определению [3], матрица рассеяния $[S_0]$ составного объекта в собственном ПБ имеет нулевые внедиагональные элементы, т.е.

$$\dot{S}_{120} \cdot \exp(j\varphi_{01}) + \dot{S}_{120}(t) \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) = 0,$$

или
$$\dot{S}_{210} \cdot \exp(j\varphi_{01}) + \dot{S}_{210}(t) \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) = 0.$$

Найдем параметры θ_0 и ϵ_0 матрицы рассеяния $[\dot{S}_0]$, воспользовавшись комплексным уравнением

$$\dot{H} = \dot{S}_{120} \cdot \exp(j\varphi_{01}) + \dot{S}_{120}(t) \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)) = 0. \quad (2.70)$$

Для этого необходимо решить систему из двух вещественных уравнений

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\dot{H}) = 0, \\ \operatorname{Im}(\dot{H}) = 0, \end{cases}$$

с двумя неизвестными θ_0 и ε_0 . Развернутые выражения для \dot{s}_{120} и $\dot{s}_{120}(t)$, входящие в (2.69), определяются формулами (2.71) :

$$\begin{aligned} \dot{n}_1 \cdot \{ [\dot{\mu}_1 \cdot \sin 2(\theta_1 - \theta_0) - j \cos 2(\theta_1 - \theta_0) \cdot \sin 2\varepsilon_1] \cdot \cos 2\varepsilon_0 + j \cos 2\varepsilon_1 \cdot \sin 2\varepsilon_0 \} , \\ \dot{n}_2 \cdot \{ [\dot{\mu}_2 \cdot \sin 2(\theta_2 - \theta_0) - j \cos 2(\theta_2 - \theta_0) \cdot \sin 2\varepsilon_2] \cdot \cos 2\varepsilon_0 + j \cos 2\varepsilon_2 \cdot \sin 2\varepsilon_0 \} , \end{aligned}$$

где

$$\dot{n}_1(2) = 0.5 \cdot (\dot{\lambda}_1^{('')} + \dot{\lambda}_2^{('')}) = n_1(2) \cdot \exp(jx_1(2)) , \quad (2.72)$$

$$\dot{\mu}_1(2) = (\dot{\lambda}_1^{('')} - \dot{\lambda}_2^{('')}) / (\dot{\lambda}_1^{('')} + \dot{\lambda}_2^{('')}) = \mu_{д1}(2) \cdot \exp(j\eta_1(2)) .$$

При этом у параметров, характеризующих МР "фона", опущен для краткости индекс "t" временной зависимости. Так, что входящие в (2.72) величины могут быть записаны следующим образом :

$$n_1(2) = \frac{1}{2} \lambda_1^{('')} \cdot \Gamma_{12}(22) , \quad \mu_{д1}(2) = \Gamma_{11}(21) / \Gamma_{12}(22) , \quad (2.73)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{11}(12) &= (I + 2 \cdot \rho_1 \cdot \cos \Delta\varphi' + \rho_1^2)^{0.5} , \\ \Gamma_{21}(22) &= (I + 2 \cdot \rho_2 \cdot \cos \Delta\varphi'' + \rho_2^2)^{0.5} , \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

$$x_1(2) = \arctg[\rho_1(2) \cdot \sin \Delta\varphi^{('')} / (I + \rho_1(2) \cdot \cos \Delta\varphi^{('')})] , \quad (2.75)$$

$$\eta_1(2) = \arctg[2 \cdot \rho_1(2) \cdot \sin \Delta\varphi^{('')} / (I - \rho_1^2(2))] ,$$

а величины модулей электрического фактора формы ρ_1 и ρ_2 в выражениях (2.74) и (2.75) можно представить, как

$$\rho_1(2) = [(I - \mu_{п1}(2)) / (I + \mu_{п1}(2))]^{0.5} . \quad (2.76)$$

При использовании принятых выше обозначений, реальная и мнимая части комплексного уравнения (2.70) записываются в виде :

$$\left\{ \begin{aligned} \operatorname{Re}\{\dot{H}\} &= (T_1 \cdot \cos 2\theta_0 - U_1 \cdot \sin 2\theta_0) \cdot \cos 2\varepsilon_0 - V_1 \cdot \sin 2\varepsilon_0 , \\ \operatorname{Im}\{\dot{H}\} &= (T_2 \cdot \cos 2\theta_0 - U_2 \cdot \sin 2\theta_0) \cdot \cos 2\varepsilon_0 + V_2 \cdot \sin 2\varepsilon_0 . \end{aligned} \right. , \quad (2.77)$$

где

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= n_1 \cdot P_{11} + n_2 \cdot P_{12} , \\ T_2 &= n_1 \cdot P_{21} + n_2 \cdot P_{22} . \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= n_1 \cdot Q_{11} + n_2 \cdot Q_{12} , & U_2 &= n_1 \cdot Q_{21} + n_2 \cdot Q_{22} , \\ V_1 &= n_1 \cdot R_{11} + n_2 \cdot R_{12} , & V_2 &= n_1 \cdot R_{21} + n_2 \cdot R_{22} . \end{aligned} \right\} , \quad (2.78)$$

При этом

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= a_1 \cdot \sin 2\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 - (b_1 \cdot \sin 2\theta_1 - \sin 2\varepsilon_1 \cdot \cos 2\theta_1) \cdot \sin \varphi_1 , \\ P_{21} &= a_1 \cdot \sin 2\theta_1 \cdot \sin \varphi_1 + (b_1 \cdot \sin 2\theta_1 - \sin 2\varepsilon_1 \cdot \cos 2\theta_1) \cdot \cos \varphi_1 , \\ Q_{11} &= a_1 \cdot \cos 2\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 - (b_1 \cdot \cos 2\theta_1 + \sin 2\varepsilon_1 \cdot \sin 2\theta_1) \cdot \sin \varphi_1 , \\ Q_{21} &= a_1 \cdot \cos 2\theta_1 \cdot \sin \varphi_1 + (b_1 \cdot \cos 2\theta_1 + \sin 2\varepsilon_1 \cdot \sin 2\theta_1) \cdot \cos \varphi_1 , \\ R_{11} &= \cos 2\varepsilon_1 \cdot \sin \varphi_1 , & R_{21} &= \cos 2\varepsilon_1 \cdot \cos \varphi_1 , \end{aligned} \right\} , \quad (2.79)$$

где $1 = (1, 2)$.

Входящие в (2.79) параметры a_1 , b_1 и φ_1 определены выражениями :

$$a_1 = \mu_{д1} \cdot \cos \eta_1 , \quad b_1 = \mu_{д1} \cdot \sin \eta_1 , \quad \varphi_1 = \varphi_{01} + \varkappa_1 . \quad (2.80)$$

Приравняв $\operatorname{Re}\{\dot{H}\}$ и $\operatorname{Im}\{\dot{H}\}$ (2.77) нулю и разрешая систему уравнений относительно двух неизвестных θ_0 и ε_0 , находим следующие соотношения :

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = \frac{T_1 \cdot V_2 + T_2 \cdot V_1}{V_1 \cdot U_2 + V_2 \cdot U_1} , \quad (2.81)$$

$$\operatorname{tg} 2\varepsilon_0 = \left[\frac{T_1 \cdot U_2 - T_2 \cdot U_1}{V_1 \cdot U_2 + V_2 \cdot U_1} \right] \cdot \cos 2\theta_0 . \quad (2.82)$$

Введем в рассмотрение параметры, характеризующие отличия в поляризационных свойствах искусственной цели и фонового образования :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{12} &= \frac{A_1}{A_2} = \frac{|\dot{\lambda}_1'|^2 + |\dot{\lambda}_2'|^2}{|\dot{\lambda}_1''|^2 + |\dot{\lambda}_2''|^2} - \\ &\quad - \text{отношение полной ЭПР "цели" к полной} \\ &\quad \text{ЭПР флуктуирующего "фона" ;} \\ \rho_{12} &= (\alpha_{12} (1 + \rho_2^2) / (1 + \rho_1^2))^{0.5} ; \\ \Delta\eta &= \eta_2 - \eta_1 ; \\ \Delta\varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 = (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + (\varkappa_1 - \varkappa_2) . \end{aligned} \right\} . \quad (2.83)$$

Тогда, опустив длинные и громоздкие преобразования, запишем выражения (2.81), (2.82) в следующем виде :

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = \left[\frac{\rho_{12}^2 \cdot g_1 \cdot \sin 2\theta_1 + \rho_{12} \cdot [g_2 \cdot \sin 2\theta_1 + r_{12} r_{22} \cdot (g_3 \cdot \cos 2\theta_1 - \right. \\ \left. - g_4 \cdot \cos 2\theta_2) \cdot \sin \Delta\varphi + g_5 \cdot \sin 2\theta_2] + g_6 \cdot \sin 2\theta_2}{\rho_{12}^2 \cdot g_1 \cdot \cos 2\theta_1 + \rho_{12} \cdot [g_2 \cdot \cos 2\theta_1 - r_{12} r_{22} \cdot (g_3 \cdot \sin 2\theta_1 - \right. \\ \left. - g_4 \cdot \sin 2\theta_2) \cdot \sin \Delta\varphi + g_5 \cdot \cos 2\theta_2] + g_6 \cdot \cos 2\theta_2} \right], \quad (2.84)$$

где $g_1 = r_{11} \cdot r_{12} \cdot \cos \eta_1 \cdot \cos 2\varepsilon_1$, $g_2 = r_{11} \cdot r_{22} \cdot \cos(\eta_1 + \Delta\varphi) \cdot \cos 2\varepsilon_2$,

$g_3 = \sin 2\varepsilon_1 \cdot \cos 2\varepsilon_2$, $g_4 = \sin 2\varepsilon_2 \cdot \cos 2\varepsilon_1$,

$g_5 = r_{12} \cdot r_{21} \cdot \cos(\eta_2 - \Delta\varphi) \cdot \cos 2\varepsilon_1$, $g_6 = r_{21} \cdot r_{22} \cdot \cos \eta_2 \cdot \cos 2\varepsilon_2$;

$$\operatorname{tg} 2\varepsilon_0 = \left[\frac{\rho_{12}^2 \cdot h_1 + \rho_{12} \cdot [(h_2 + h_3) \cdot \cos 2(\theta_1 - \theta_2) + \right. \\ \left. + (h_4 - h_5 \cdot \sin \Delta\varphi) \cdot \sin 2(\theta_1 - \theta_2)] + h_6}{\rho_{12}^2 \cdot g_1 \cdot \cos 2\theta_1 + \rho_{12} \cdot [g_2 \cdot \cos 2\theta_1 - r_{12} \cdot r_{22} \cdot (g_3 \cdot \sin 2\theta_1 - \right. \\ \left. - g_4 \cdot \sin 2\theta_2) \cdot \sin \Delta\varphi + g_5 \cdot \cos 2\theta_2] + g_6 \cos 2\theta_2} \right] \cdot \cos 2\theta_0, \quad (2.85)$$

где $h_1 = r_{11} \cdot r_{12} \cdot \cos \eta_1 \cdot \sin 2\varepsilon_1$, $h_2 = r_{11} \cdot r_{22} \cdot \cos(\eta_1 + \Delta\varphi) \cdot \sin 2\varepsilon_2$,

$h_3 = r_{12} \cdot r_{21} \cdot \cos(\eta_2 - \Delta\varphi) \cdot \sin 2\varepsilon_1$, $h_4 = r_{11} \cdot r_{21} \cdot \sin(\Delta\eta - \Delta\varphi)$,

$h_5 = r_{12} \cdot r_{22} \cdot \sin 2\varepsilon_1 \cdot \sin 2\varepsilon_2$, $h_6 = r_{21} \cdot r_{22} \cdot \cos \eta_2 \cdot \sin 2\varepsilon_2$.

Таким образом, полученные выражения (2.84), (2.85), позволяющие определить инвариантные параметры углов ориентации и эллиптичности собственного ПБ составного объекта "фон + цель", представляют собой сложные функции от соответствующих параметров МР "цели" и "фона":

$$\left. \begin{aligned} &|\dot{\lambda}_1'|, |\dot{\lambda}_2'|, \Delta\varphi', \theta_1, \varepsilon_1, \\ &|\dot{\lambda}_1''(t)|, |\dot{\lambda}_2''(t)|, \Delta\varphi''(t), \theta_2(t), \varepsilon_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (2.86)$$

При этом, учитывая временную зависимость параметров МР "фона", ве-

личины θ_0 и ε_0 также будут зависеть от времени. Поэтому в качестве параметров собственного ПБ матрицы когерентности $[M]$ потока, рассеянного составным РЛ объектом, следует рассматривать

$$\theta(t) = \theta_0(t) \text{ и } \varepsilon(t) = \varepsilon_0(t) . \quad (2.87)$$

Используя величину $\alpha_{12} = A_1 / A_2$ (2.83), которую следует интерпретировать, как отношение полной ЭПР искусственного сосредоточенного объекта к средней на интервале измерения полной ЭПР "фона", и, восстанавливая опущенный индекс "t", перепишем формулу (2.62) для μ_{Π} составного объекта "фон + цель" следующим образом :

$$\mu_{\Pi}(t) = (\alpha_{12} \cdot P_1(t) / (1 + \alpha_{12})) \cdot \mu_{\Pi 1} + (P_2(t) / (1 + \alpha_{12})) \cdot \mu_{\Pi 2}(t),$$

где $P_1(t) = P_1(\theta_1, \varepsilon_1, \theta(t), \varepsilon(t))$ и $P_2(t) = P_2(\theta_2(t), \varepsilon_2(t), \theta(t), \varepsilon(t))$ определены в (2.64).

2.4. Оценка поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" по степени поляризационной анизотропии.

Анализ полученной величины интегральной поляризационной анизотропии составного РЛ объекта "фон + цель" показывает, что параметр μ_{Π} зависит от нескольких величин : $\alpha_{12}, \mu_{\Pi 1}, \mu_{\Pi 2}(t), P_1(t), P_2(t)$. При этом коэффициенты $P_1(t)$ и $P_2(t)$ являются функциями углов ориентации и эллиптичности собственных поляризационных базисов (СПБ) МК волн, рассеянных "целью", "фоном" и составным РЛ объектом. А вошедшие в формулы (2.64) ориентация $\theta(t)$ и эллиптичность $\varepsilon(t)$ СПБ матрицы когерентности суммарного потока зависят от параметров (2.86), описывающих свойства МР "цели" и "фона" на интервале измерения T , а также от разности $\varphi_{01} - \varphi_{02}$ (см. (2.83)). Соответственно, величина μ_{Π} поляризационного контраста РЛ объектов "фон" и "фон + цель" по степени поляризационной анизотропии по мощности принимает вид :

$$W_H(t) = |(\mu_H(t) - \mu_{H2}(t)) / (\mu_H(t) + \mu_{H2}(t))|. \quad (2.89)$$

Таким образом, в разделах (2.1 – 2.3) рассмотрен аналитический подход к оценке поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" для случая измерения коэффициента μ_H поляризационной анизотропии по мощности. Отметим, что задача поляризационного контраста по μ_H решена в общем виде без ограничений на поляризационные свойства искусственной "цели" и фонового образования. При этом данный подход справедлив для однопозиционной радиолокации объектов в дальней зоне, когда рассеянные "фоном" и "целью" потоки некоррелированы. Проведенный теоретический анализ контраста W_H был выполнен в предположении неизменных поляризационных свойств искусственной цели на интервале наблюдения. Однако, полученные выводы справедливы и для случая временных флуктуаций поляризационных параметров МР "цели", если учесть, что ее параметры в выражениях (2.69 – 2.85) будут зависеть от времени.

Полученные выражения (2.88), (2.89) для поляризационного контраста W_H позволяют оценить эффективность использования поляризационного инварианта μ_H при формировании РЛ изображения, сравнивая величины W_H с соответствующими оценками РЛ контраста K_H по ЭПР. Для рассмотренного случая наблюдения двух радиолокационных объектов типа "фон" и "фон + цель" выражение для K_H (1.2) имеет вид :

$$K_H = \frac{(A_1 + A_2) - A_2}{(A_1 + A_2) + A_2} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{12} + 2}, \quad (2.90)$$

где A_1, A_2 – полные ЭПР осредоточенной "цели" и распределенного объекта "фон", α_{12} – отношение их ЭПР "цель / фон".

Следовательно, зная поляризационные свойства искусственного и распределенного объектов (2.86), отношение их ЭПР, можно определить возможности поляризационного метода μ_H при выделении осредоточенных искусственных целей на фоне подстилающей поверхности.

2.4.1. Обоснование статистической модели "фона" по результатам моноимпульсных поляризационных измерений.

Проведенный анализ показывает, что получение зависимостей W_H (2.89) от всей группы параметров (2.86) и α_{12} в явной, аналитической форме не представляется возможным из-за сложных функциональных связей между ними и случайного характера изменения величин, описывающих МР "фона". В этом случае оценка характера изменения поляризационного контраста $W_H(t)$, его экстремальных значений возможна с помощью метода статистического моделирования [98]. При этом должны быть известны одномерные законы распределения случайных инвариантов МР "фона" : $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$.

Однако, данные I-ой главы говорят об отсутствии результатов прямого измерения этих величин в реальных обзорных РЛС. Для того, чтобы предположения о характере флуктуаций инвариантных параметров матрицы рассеяния "фона" были обоснованы, оценим статистику этих инвариантов косвенным путем. С этой целью воспользуемся результатами измерений моноимпульсной обзорной РЛС "Кедр-2", проведенными в 1987-1991 годах [17,32,34-36]. Измерения поляризационных свойств РЛ объектов выполнялись в круговом базисе. Алгоритм функционирования РЛС "Кедр-2" можно описать выражениями (1.35) и (1.36) так, что амплитуды сигналов в I-ом и 2-ом приемных каналах имеют вид :

$$\left. \begin{aligned} E_1(t) &= 0.5 \cdot [x^2 + 2 \cdot x \cdot y \cdot \sin 2\varepsilon_0(t) \cdot \cos \Delta\varphi(t) + (y \cdot \sin 2\varepsilon_0(t))^2]^{0.5}, \\ E_2(t) &= 0.5 \cdot y \cdot |\cos 2\varepsilon_0(t)|, \end{aligned} \right\} (2.91)$$

$$\text{где } x \equiv \Delta(t) = (\lambda_1^2(t) - 2 \cdot \lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) \cdot \cos \Delta\varphi_0(t) + \lambda_2^2(t))^{0.5},$$

$$y \equiv \Sigma(t) = (\lambda_1^2(t) + 2 \cdot \lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) \cdot \cos \Delta\varphi_0(t) + \lambda_2^2(t))^{0.5},$$

$$\Delta\varphi(t) = - \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot \lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t)}{\lambda_1^2(t) - \lambda_2^2(t)} \cdot \sin \Delta\varphi_0(t) \right],$$

а $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\Delta\varphi_0(t)$, $\varepsilon_0(t)$ — инвариантные параметры МР наблюдаемого РЛ объекта. При этом в ОРЛС "Кадр-2" оценивались следующие параметры, характеризующие радиолокационную цель :

— величина A_0 , пропорциональная сумме амплитуд $E_1(t)$ и $E_2(t)$,

$$A_0, \text{дБ} \sim \log_{10} (E_1^2(t) + E_2^2(t)), \quad (2.92)$$

— нормированная величина μ_d' , определяемая следующим образом

$$\mu_d' = \begin{cases} 1 - E_2(t)/E_1(t), & E_1(t) > E_2(t); \\ 0, & E_1(t) = E_2(t); \\ -(1 - E_1(t)/E_2(t)), & E_1(t) < E_2(t). \end{cases} \quad (2.93)$$

Для определения статистических свойств инвариантов МР "фона" $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$, использовались результаты измерения величин A_0 (2.92), μ_d' (2.93) распределенных естественных образований, полученные исследовательской группой в составе Хлусова В.А., Карнышева В.И., и др. Типичные результаты исследования объектов "фон" в сжатой форме представлены в Табл.2.1, Табл.2.2 и на рис.2.1, 2.2. Результаты поимпульсных измерений A_0 и μ_d' включают разнообразные фоновые образования на дальностях от 1.29 до 7.40 км, в различных климатических и погодных условиях в окрестностях г.Томска. В их числе были распределенные РЛ объекты с однородной (водная поверхность, поля, с/х угодья) и более сложной структурой — участки берега р.Томи, лесные массивы, водная поверхность с перемещающимися льдинами различных размеров и т.д.

Получаемые во время измерений временные реализации параметров $A_0(t)$, $\mu_d'(t)$ длительностью 10 секунд (число выборочных значений $N_0 = 1000$) разбивались на десять 1-секундных интервалов, по которым оценивались статистические характеристики A_0 , μ_d' . Величина этой выборки ($N = 100$) является компромиссной, поскольку с одной стороны она должна быть близка к интервалу измерения реальных объектов систем, а с другой — давать устойчивые статистические выводы.

Табл.2.І. Наблюдаемые распределенные РЛ объекты.

| №/п | Вид объекта " фон ". Краткое описание условий измерения. |
|-----|--|
| І. | Участок спокойной водной поверхности. R - 4.ІІ км. (р.Томь, І5.06.1987). |
| 2. | Участок сильно ваволнованной водной поверхности после прохода толкача с ненагруженной баржей. R - 4.ІІ км. (р.Томь, І5.06.1987). |
| 3. | Участок сильно ваволнованной водной поверхности. R - І.6 км. (о.Иссык-Куль, август 1990). |
| 4. | Участок водной поверхности с перемещающимися льдинами различных размеров (р.Томь) : 4.І. R - І.53 км , (27.І0.1987); 4.2. R - І.29 км , 4.3. R - І.83 км (29.І0.1987) ; 4.4. R - І.29 км , 4.5. R - І.83 км (30.І0.1987). |
| 5. | Крутой высокий правый берег р.Томи, покрытый деревьями и кустарником. R - 5.47 км : 5.І. (29.І0.1987); 5.2. (30.І0.1987); 5.3. (І0.ІІ.1987); 5.4. (08.І2.1987). |
| 6. | Участок смешаного лесного массива : 6.І. R - 5.85 км (І0.ІІ.1987); 6.2. R - 7.00 км, 6.3. R - 7.40 км (ІІ.05.1989); 6.4. R - 5.00 км (июль 199І). |
| 7. | Участок пологого левого берега р.Томи, покрытого деревьями и кустарником. R - І.59 км. (І2.05.1989). |
| 8. | Участок поля, покрытого высохшей травой. R - 3.І5 км. (0І.06.1989). |
| 9. | Участок сельскохозяйственных угодий. R - 4.70 км. (июль 199І). |

Табл.2.2. Результаты анализа статистики параметров A , μ_d'
для распределенных объектов

| Номер объекта (табл.2.1) | Характер изменения стационарности | | | | $M(\bar{A}_1)$, дБ | Средний размах Амакс- Амин, дБ | Средний инт-л кор- реляции А тк, сек | $M(\mu_d' \bar{1})$ | Средний размах μ_d' макс- μ_d' мин | Средний инт-л кор- реляции μ_d' тк, сек |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------|---------|---------|------------------------|---|---|---------------------|---|--|
| | m_A | D_A | m_μ | D_μ | | | | | | |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | | | | | | |
| 1. | P | P | S | S | 11.8 | 8.6 | 0.06 | +0.16 | 0.65 | 0.03 |
| 2. | P | P | S | S | 22.9 | 12.0 | 0.07 | -0.04 | 0.90 | 0.04 |
| 3. | S | S | S | S | 20.0 | 12.6 | 0.11 | -0.06 | 1.90 | 0.09 |
| 4.1. | S | S | S | S | 26.2 | 11.1 | 0.08 | -0.11 | 1.40 | 0.08 - 0.12 |
| 4.2. | S | P | N | S | 36.0 | 8.5 | 0.09 | 0 | 1.2-1.3 | 0.03 - 0.06 |
| 4.3. | P | S | N | N | 28.0 | 9.0 | 0.25 | -0.15 | 1.2-1.3 | 0.18 - 0.25 |
| 4.4. | P | P | N | N | 16.0 | 10 - 12 | 0.06 | +0.27 | 0.6-1.0 | 0.06 - 0.08 |
| 4.5. | S | S | S | S | 27.0 | 8.5 | 0.06 | 0 | 1.20 | 0.03 |
| 5.1. | N | N | N | N | 10.6 | 10.3 | 0.10-0.18 | -0.18 | 1.10 | 0.10 - 0.35 |
| 5.2. | P | P | N | N | 13.5 | 12.5 | 0.12 | -0.17 | 1.20 | 0.08 - 0.12 |
| 5.3. | P | P | N | P | 11.8 | 13 - 14 | 0.19 | -0.30 | 1.10 | 0.08 - 0.12 |
| 5.4. | S | N | S | S | 20.0 | 3 - 4 | 0.80 | -0.30 | 0.44 | 0.06 |
| 6.1. | S | S | S | S | 8.5 | 11.0 | 0.10 | 0 | 1.00 | 0.10 |
| 6.2. | S | S | N | P | 6.5 | 11.0 | 0.09 | +0.23 | 1.10 | 0.04 - 0.06 |
| 6.3. | S | P | N | P | 17.0 | 10 - 11 | 0.14 | +0.16 | 1.40 | 0.10 - 0.14 |
| 6.4. | S | S | N | P | 22.0 | 10.3 | 0.30 | +0.12 | 1.30 | 0.15 - 0.20 |
| 7. | S | S | S | S | 34.0 | 11.8 | 0.20 | +0.09 | 1.60 | 0.08 - 0.14 |
| 8. | P | S | N | N | 28.0 | 11.0 | 0.06 | +0.18 | 1.20 | 0.03 - 0.06 |
| 9. | S | S | S | S | 14.0 | 3.2 | 0.70 | -0.12 | 0.70 | 0.06 |

В таблице 2.2 приведены некоторые результаты оценки статистических оценок $A_0(t)$ и $\mu_d'(t)$ для объектов "фон". В частности, при использовании критерия инверсий [97] определен характер изменения "среднего" (m) и дисперсии (D) соответствующих величин на 10-сек интервале (столбцы (1)–(4)). При этом S — означает, что статистический параметр стационарен на интервале 10 секунд ; N — свидетельствует о ярко выраженной нестационарности параметра на этом же интервале ; а P — говорит о промежуточном характере изменения оцениваемой величины. Нетрудно видеть, что характер изменения среднего и дисперсии одного и того же параметра, как правило, совпадает, однако, поведение (m_A, m_μ) или (D_A, D_μ), может существенно отличаться на 10 сек интервале. В столбцах (7) и (10) даны результаты оценки среднего интервала корреляции τ_K величин A_0, μ_d' , полученные в ходе анализа автокорреляционных функций 1-секундных реализаций. Обычно, значение τ_K параметра A_0 не меньше интервала корреляции μ_d' , изменяясь от 0.05 до 0.8 секунд. Приведенные результаты оценки "среднего" и "размаха" A_0 за 10 сек (столбцы (5), (6)) говорят о сильной изменчивости этой величины от вида фонового образования и условий наблюдения. Для параметра $\mu_d' \in (-1; +1)$, характерно группирование средних значений μ_d' вблизи нуля и большой разброс значений "размаха" в зависимости от вида "фона" (столбцы (8), (9)).

Кроме этого, на рис.2.1, 2.2 изображены гистограммы A_0, μ_d' распределенных объектов, полученные по 1-сек выборкам стационарных по "среднему" участков реализаций $A_0(t), \mu_d'(t)$. Несмотря на большую изменчивость флуктуаций параметров A_0, μ_d' , анализ результатов измерения и статистической обработки позволяет сделать некоторые общие выводы о характере выборочных распределений этих параметров. К ним относятся наличие одной моды гистограмм параметра A_0 и оправданность нулевой гипотезы о нормальности выборочных распределений для большинства стационарных по m_A участков реализаций $A_0(t)$, а

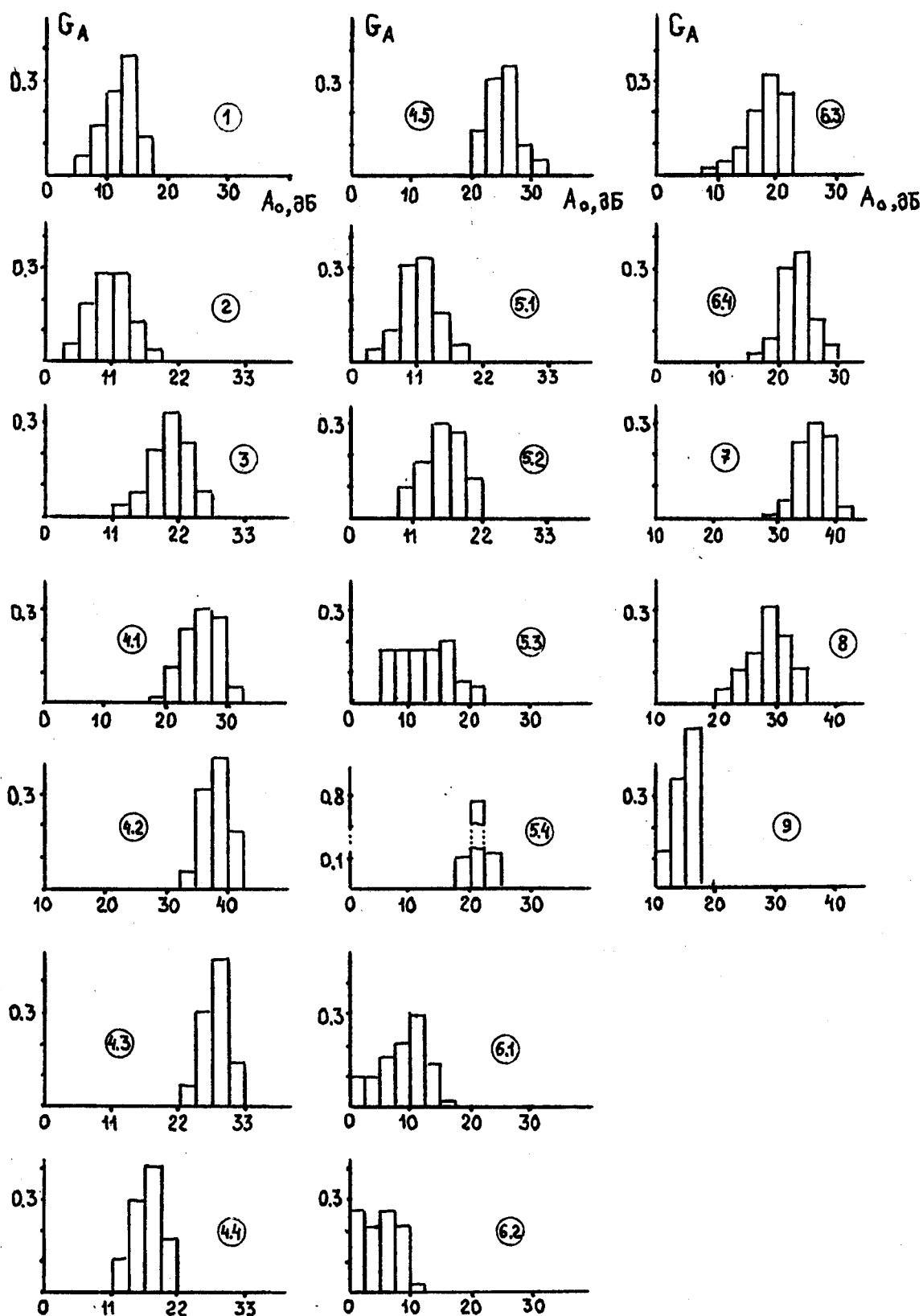


Рис.2.1. Характерные гистограммы 1-секундных временных реализаций $A_0(t)$ распределенных РЛ объектов (см.табл.2.1).

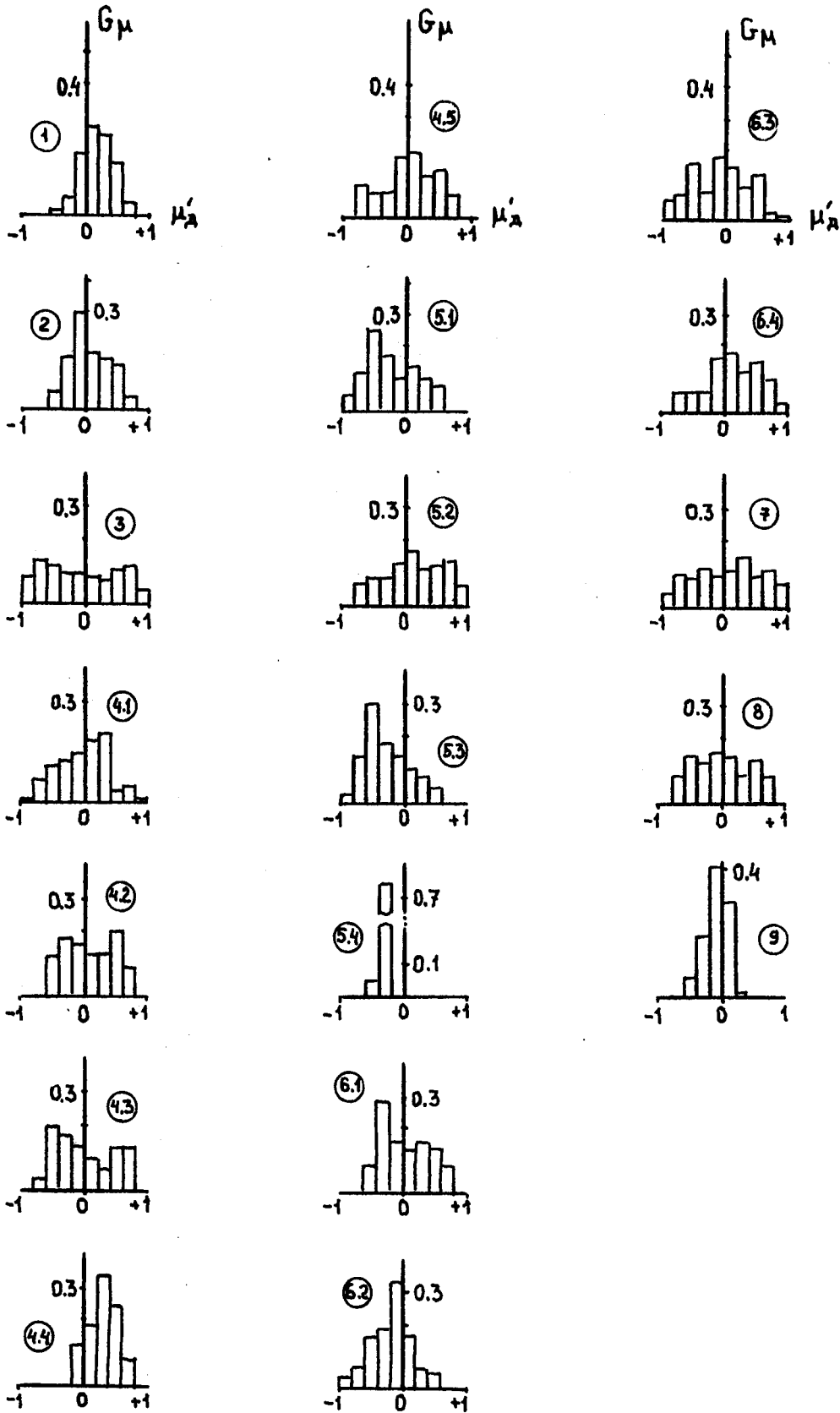


Рис.2.2. Характерные гистограммы 1-секундных временных реализаций $\mu'_д(t)$ распределенных РЛ объектов (см.табл.2.1).

также то, что гистограммы параметра μ_d' , как правило, сгруппированы около нуля и могут быть описаны двумя типами распределений : первый, преобладающий — близок к равномерному, со средним значением μ_d' вблизи нуля, а второй — к гауссовскому, с нулевым или несколько смещенным средним значением.

Для определения вида одномерных распределений параметров матрицы рассеяния "фона" : $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$, обеспечивающих результаты моделирования величин A_0 (2.92) и μ_d' (2.93), совпадающие с экспериментальными оценками G_A , G_{μ_d} в ОРЛС "Кедр-2", воспользуемся расчетными данными работы [30]. В ней, в частности, были получены выборочные распределения угла эллиптичности собственного базиса МР участков распределенного объекта типа океанской поверхности. Мода этого гауссовского распределения совпала с величиной $\varepsilon = 0^\circ$. Пусть для рассмотренных выше фоновых образований (Табл.2.1) собственные поляризации также оказываются близки к линейным. Подставляя в (2.91) значение $\varepsilon_0(t) = 0$, перепишем выражения (2.92) и (2.93) следующим образом :

$$A_{0, \text{дБ}} \sim \log_{10} (\lambda_1^2(t) + \lambda_2^2(t)), \quad (2.94)$$

$$\mu_d' = \begin{cases} I - \mu_d^{-1}, & E_1(t) > E_2(t); \\ 0, & E_1(t) = E_2(t); \\ - (I - \mu_d^{-1}), & E_1(t) < E_2(t); \end{cases} \quad (2.95)$$

где μ_d удовлетворяет (1.19).

Рассмотрим более подробно параметр A_0 (2.94). Результаты исследований в [98] показывают, что распределения случайной величины (СВ) в логарифмическом масштабе, форма которых близка к нормальной, порождаются СВ с характерной асимметричной гистограммой с большим правым "хвостом". Статистическое моделирование $\lambda_1^2(t) + \lambda_2^2(t)$ показало, что подобные гистограммы с изменяемой положительной величиной коэффициента асимметрии могут быть получены для случайных

параметров $\lambda_1^M(t)$, $\lambda_2^M(t)$ с усеченными гауссовскими распределениями

$$\lambda_1(2)^M(t) = m_1(2) + \sigma_1(2) \cdot x_1(2)(t) ,$$

где индекс "м" означает моделируемую величину ; m_1 и σ_1 - "средние" и с.к.о., определяющие нормальное распределение параметра $\lambda_1^M(t)$; $x_1(t)$ - генерируемая нормированная случайная последовательность с усеченным гауссовским законом распределения ($-3 < x_1 < +3$, $m_x = 0$, $\sigma_x = 1$). В результате статистического моделирования было доказано, что при определенных соотношениях между параметрами m_1 и σ_1 выборочные гистограммы величины

$$A_M(t) = k \cdot \log_{10} [(\lambda_1^M(t))^2 + (\lambda_2^M(t))^2] , \quad (2.96)$$

где $\lambda_1^M(t)$ - формируемая случайная последовательность с заданными статистическими свойствами и числом отсчетов $N = 100$, k - коэффициент пропорциональности, удовлетворяют нулевой гипотезе о нормальности распределения A_M с доверительной вероятностью 0.9 (критерий Пирсона). При этом между параметрами m_1 , σ_1 существовали следующие соотношения :

$$\left. \begin{aligned} m_1/m_2 \text{ (или } m_2/m_1 \text{)} &\in (1 ; 3) , \\ \sigma_1/m_1 &\in (0.05 ; 0.30) . \end{aligned} \right\} \quad (2.97)$$

Естественно, что полученные выводы о типе распределений $\lambda_1^M(t)$, $\lambda_2^M(t)$ не являются однозначными, а носят характер доказанного предположения. Тем не менее, они могут быть использованы при определении поляризационного контраста $W_H(t)$ (2.89), поскольку выборочные распределения случайной величины A_O (2.96) достаточно точно аппроксимируют вид гистограмм параметра A_O (2.94), полученных экспериментальным путем. Кроме того, гауссовский закон распределения величин $\lambda_1^M(t)$ не противоречит физическим представлениям о распределенном РЛ объекте, как флуктуирующей двухвибраторной модели [3].

Дальнейший этап статистического моделирования был связан с

определением типа распределения параметра $\Delta\varphi$. При этом процедура поиска заключалась в генерировании случайных последовательностей с числом отсчетов $N = 100$, соответствующих величинам $\lambda_1^M(t)$, $\lambda_2^M(t)$ с усеченным гауссовским законом распределения (m_1, σ_1) и $\Delta\varphi_M(t)$ с заданным законом распределения. После этого согласно (2.91, 2.93), формировалась реализация параметра $\mu_{дм}'(t)$, определялось выборочное распределение и сравнивалось по критериям Пирсона и Романовского [97] с двумя типами экспериментальных гистограмм $\mu_{д}'$ с "равномерным" и "гауссовским" законами распределений. Анализ 200 выборочных гистограмм $\mu_{дм}'$, полученных при различных предположениях о характере распределения величины $\Delta\varphi_M$, позволяет сделать следующие выводы о виде распределений $\mu_{дм}'(t)$:

I. равномерное и симметричное относительно нуля, распределение параметра $\mu_{дм}'$ имеет место в следующих двух случаях :

а) фазовый сдвиг $\Delta\varphi_M$ является случайной величиной с равномерным распределением от 0° до 180° ; при этом для величины коэффициента вариации $(\sigma_1/m_1) = (0.02 ; 0.3)$ и $\sigma_1 \approx \sigma_2$ интервал изменения $\mu_{дм}'$ определяется отношением средних значений m_1 гауссовского распределения собственных чисел МР "фона" $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$:

$$\mu_{дм}' \in (-1.0 ; +1.0) \text{ при } m_2 = 1.0 \cdot m_1 ,$$

$$\mu_{дм}' \in (-0.9 ; +0.9) \text{ при } m_2 = 1.5 \cdot m_1 ,$$

$$\mu_{дм}' \in (-0.8 ; +0.8) \text{ при } m_2 = 2.0 \cdot m_1 ,$$

$$\mu_{дм}' \in (-0.6 ; +0.6) \text{ при } m_2 = 3.0 \cdot m_1 ;$$

б) величины $\lambda_1^M(t)$, $\lambda_2^M(t)$ распределены по усеченному гауссовскому закону со следующими параметрами : $m_1 = m_2$, $\sigma_1 \approx \sigma_2$, $(\sigma_1 / m_1) \in (0.10 ; 0.30)$, а фазовый сдвиг $\Delta\varphi_M$ является случайной величиной с равномерным распределением, симметричным относительно $\Delta\varphi_M = 90^\circ$; при этом интервал изменения $\mu_{дм}'$ зависит от параметров распределения $\Delta\varphi_M$, например :

$$\begin{aligned}\mu_{\text{дм}}' & \in (-1.0 ; +1.0) \quad \text{при } \Delta\varphi_{\text{м}} \in (0^\circ ; 180^\circ) , \\ \mu_{\text{дм}}' & \in (-0.8 ; +0.8) \quad \text{при } \Delta\varphi_{\text{м}} \in (20^\circ ; 160^\circ) , \\ \mu_{\text{дм}}' & \in (-0.6 ; +0.6) \quad \text{при } \Delta\varphi_{\text{м}} \in (45^\circ ; 135^\circ) , \\ \mu_{\text{дм}}' & \in (-0.45 ; +0.45) \quad \text{при } \Delta\varphi_{\text{м}} \in (60^\circ ; 120^\circ) ;\end{aligned}$$

2. усеченное гауссовское распределение параметра $\mu_{\text{дм}}'$ наблюдается при условии, когда случайные величины $\lambda_1^{\text{м}}(t)$, $\lambda_2^{\text{м}}(t)$ распределены по усеченному гауссовскому закону с параметрами $(m_1 / m_2) \in (0.4; 2.5)$, $(\sigma_1 / m_1) \in (0.1 ; 0.3)$, а фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{м}}$ также является случайной величиной с усеченным гауссовским распределением ; причем параметры распределения $\mu_{\text{дм}}'$ зависят от соответствующих параметров распределения $\Delta\varphi_{\text{м}}$, например :

$$\begin{aligned}\mu_{\text{дм}}' & : (m_{\mu} = 0 ; \sigma_{\mu} = 0.30) , \quad \text{при } m_{\Delta\varphi} = 90^\circ, \quad \sigma_{\Delta\varphi} = 30^\circ ; \\ \mu_{\text{дм}}' & : (m_{\mu} = 0 ; \sigma_{\mu} = 0.20) , \quad \text{при } m_{\Delta\varphi} = 90^\circ, \quad \sigma_{\Delta\varphi} = 15^\circ ; \\ \mu_{\text{дм}}' & : (m_{\mu} = 0 ; \sigma_{\mu} = 0.10) , \quad \text{при } m_{\Delta\varphi} = 90^\circ, \quad \sigma_{\Delta\varphi} = 6^\circ ; \\ \mu_{\text{дм}}' & : (m_{\mu} = +0.33 ; \sigma_{\mu} = 0.30) , \quad \text{при } m_{\Delta\varphi} = 120^\circ, \quad \sigma_{\Delta\varphi} = 30^\circ ; \\ \mu_{\text{дм}}' & : (m_{\mu} = -0.27 ; \sigma_{\mu} = 0.10) , \quad \text{при } m_{\Delta\varphi} = 70^\circ, \quad \sigma_{\Delta\varphi} = 10^\circ .\end{aligned}$$

Таким образом, статистическое моделирование инвариантов МР "фона", основанное на данных экспериментальных измерений, позволяет сделать следующие предположения о характере одномерных распределений $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\varepsilon_2(t)$ фонового образования :

- 1) $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$ распределены по усеченному гауссовскому закону с параметрами m_1 , σ_1 ($1 = 1, 2$) ;
- 2) $\Delta\varphi''(t)$ распределен по равномерному или гауссовскому закону ;
- 3) $\varepsilon_2(t)$ распределен по равномерному или гауссовскому закону в узкой области со средним значением равным нулю.

Основой для подобных выводов явились результаты поляризационных измерений моноимпульсной обзорной РЛС "Кедр-2" в круговом базисе, инвариантном к величине угла ориентации $\theta(t)$ собственного поляризационного базиса объекта. Поэтому для оценки пределов изменения $\theta_2(t)$

объекта "фон" в первом приближении можно воспользоваться данными измерений модуляционных РЛС. Согласно [16], область изменения величины $\theta_2(t)$, характеризующей МР распределенного объекта, находится вблизи нуля. Естественно, что рассмотренная выше статистическая модель группы инвариантных параметров не является однозначной и не может описать поляризационные свойства всего многообразия распределенных РЛ объектов. Тем не менее, в отсутствие результатов прямого измерения статистики инвариантов МР "фона", рассмотренный эвристический подход к оценке характера одномерных распределений $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$ следует считать обоснованным.

2.4.2. Определение поляризационного контраста по коэффициенту поляризационной анизотропии и РЛ контраста по ЭПР.

Оценив косвенным путем статистические свойства инвариантных параметров $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$, $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$ распределенного образования, рассмотрим особенности поляризационного контраста по μ_H на нескольких примерах. Для этого проведем сравнение W_H и K_H РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" для случая измерения в обзорном локуторе величин полной ЭПР $(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)$ и коэффициента поляризационной анизотропии по мощности $(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) / (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)$. Для рассматриваемого случая контраста объектов "фон" и "фон + цель" фрагмент наблюдаемой поверхности можно графически представить как

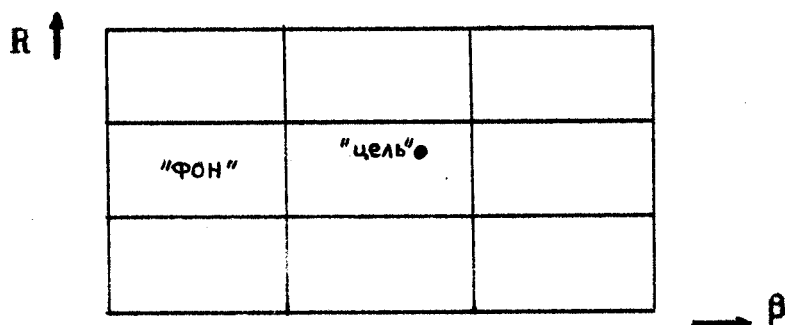


Рис.2.3. Фрагмент наблюдаемой местности.

где R — дальность, β — азимут. При РЛ обзоре облучение соседних участков поверхности разделено интервалом времени ΔT , обусловленным различной дальностью до объектов "фон" и "фон + цель" или(и) сканированием приемо-передающей антенны ОРЛС в азимутальной плоскости. Поэтому выражения для контраста двух объектов по ЭПР (2.90) и поляризационному параметру μ_{Π} (2.89) следует представить в виде

$$K_{\Pi} = \frac{A(t) - A_2(t')}{A(t) + A_2(t')}, \quad (2.98) \quad W_{\Pi} = \left| \frac{\mu_{\Pi}(t) - \mu_{\Pi 2}(t')}{\mu_{\Pi}(t) + \mu_{\Pi 2}(t')} \right|, \quad (2.99)$$

где $A(t)$, $\mu_{\Pi}(t)$ и $A_2(t')$, $\mu_{\Pi 2}(t')$ обозначают измеряемые параметры составного и распределенного РЛ объектов, а $t' = t + \Delta T$.

Пусть подстилающая поверхность является однородной, с близкими статистическими характеристиками инвариантов МР соседних участков "фона". Однако, даже при этом условии случайные изменения инвариантов приводят к временным флуктуациям измеряемых коэффициентов поляризационной анизотропии и полной ЭПР объектов и, соответственно, к случайным флуктуациям величин K_{Π} , W_{Π} . В обзорных РЛС формирование радиолокационного изображения наблюдаемой поверхности происходит с использованием методов усреднения отображаемых параметров, позволяющих уменьшить влияние различных возмущающих факторов на устойчивость РЛИ [90]. Будем рассматривать в качестве оценок измеряемых параметров средние значения случайных реализаций $A_2(t')$, $\mu_{\Pi 2}(t')$, $A(t)$, $\mu_{\Pi}(t)$, характеризующих объекты "фон" и "фон + цель".

Опираясь на значения инвариантных параметров, усредненными за период обзора, определим величину РЛ контраста по ЭПР в виде :

$$K_{\Pi c} = \overline{\alpha_{12}} / (2 + \overline{\alpha_{12}}), \quad (2.100)$$

где $\overline{\alpha_{12}}$ — отношение полной ЭПР сосредоточенной искусственной "цели" к среднему на интервале измерения значению ЭПР "фона" :

$$\alpha_{12} = \frac{(\lambda_1')^2 + (\lambda_2')^2}{(\lambda_1''(t))^2 + (\lambda_2''(t))^2}. \quad (2.101)$$

Для принятой гауссовской модели собственных чисел МР распределенного объекта среднее значение его ЭПР запишется в виде [96] :

$$(\lambda_1''(t))^2 + (\lambda_2''(t))^2 = (\mu_1^2 + \sigma_1^2) + (\mu_2^2 + \sigma_2^2).$$

Известно [1,3,30 и др.], что исследование параметров μ_{Π} , μ_0 , ρ_0 проводят, накладывая ограничение вида $\lambda_1 > \lambda_2$. Однако, для флуктуирующих целей соотношение между величинами λ_1 и λ_2 может быть произвольным, в особенности для поляризационно - изотропных ($\mu_1 = \mu_2$) объектов. Поэтому в общем случае коэффициенты поляризационной анизотропии распределенного и составного РЛ объектов

$$\mu_{\Pi 2}(t) = [(\lambda_1''(t))^2 - (\lambda_2''(t))^2] / [(\lambda_1''(t))^2 + (\lambda_2''(t))^2], \quad (2.103)$$

$$\mu_{\Pi}(t) = \frac{\alpha_{12}}{1 + \alpha_{12}} \cdot \mu_{\Pi 1} \cdot P_1(t) + \frac{1}{1 + \alpha_{12}} \cdot \mu_{\Pi 2}(t) \cdot P_2(t), \quad (2.104)$$

лежат в интервале $(-1 ; +1)$. Для рассматриваемого случая определение величины поляризационного контраста (2.99) через оценки средних значений $\mu_{\Pi}(t)$ и $\mu_{\Pi 2}(t')$ в виде

$$W_H = \left| \frac{\mu_{\Pi}(t) - \mu_{\Pi 2}(t')}{\mu_{\Pi}(t) + \mu_{\Pi 2}(t')} \right|$$

не является корректным. Покажем это. Пусть в результате измерений для объектов "фон" и "фон + цель" получены следующие значения $\mu_{\Pi 2}(t') = -0.3$, $\mu_{\Pi}(t) = +0.4$. Простая подстановка этих величин в (2.104) дает неверный результат $W_H > 1$ из-за двуполярного характера параметра коэффициента анизотропии по мощности. Поэтому определим величину ПК аналогично [93]. В этой работе для оценки меры "разнесения" двух распределений параметра $p(t)$, изменяющегося в интервале $(-a ; +a)$, было предложено использовать отношение вида

$$\left| \frac{[a + \overline{p_1(t)}] - [a + \overline{p_2(t)}]}{[a + \overline{p_1(t)}] + [a + \overline{p_2(t)}]} \right| = \left| \frac{\overline{p_1(t)} - \overline{p_2(t)}}{2a + \overline{p_1(t)} + \overline{p_2(t)}} \right|.$$

Таким образом, в качестве оценки, характеризующей ПК двух объектов

на интервале измерения, будем рассматривать величину

$$W_{\text{нс}} = \left| \frac{\overline{\mu_{\Pi}(t)} - \overline{\mu_{\Pi 2}(t')}}{2 + \overline{\mu_{\Pi}(t)} + \overline{\mu_{\Pi 2}(t')}} \right|. \quad (2.105)$$

Для иллюстрации подставим в (2.105) значения $\overline{\mu_{\Pi 2}(t')} = -0.3$, $\overline{\mu_{\Pi}(t)} = +0.4$, получив при этом величину ПК $W_{\text{нс1}} = 0.33$. Отметим, что оценка (2.105) не только определяет меру разнесения распределений коэффициента анизотропии, но и учитывает смещение выборочных распределений в сторону минимального значения параметра $\mu_{\Pi} = -1$. Пусть $\overline{\mu_{\Pi 2}(t')} = -0.95$, $\overline{\mu_{\Pi}(t)} = -0.25$. Как и в первом примере средние значения коэффициентов анизотропии отличаются на величину $\overline{\mu_{\Pi}(t)} - \overline{\mu_{\Pi 2}(t')} = 0.7$. Однако, полученное в соответствии с (2.105), значение ПК $W_{\text{нс2}} = 0.87$ значительно отличается от $W_{\text{нс1}}$, приближаясь к максимальному значению $W_{\text{нсмакс}} = 1$. Объяснить это можно по аналогии с определением яркостного контраста 2-х элементов изображения [9]

$$K_{\text{я}} = |(B_1 - B_2) / (B_1 + B_2)|,$$

где B_1, B_2 — яркости соседних элементов. Понятно, что при минимальной яркости одного из элементов ($B_1 = 0$) величина параметра $K_{\text{я}}$ максимальна при любом значении B_2 .

2.4.3. ПК радиолокационных объектов для выбранной модели "фона" и конкретных параметров искусственной цели.

Проведем анализ поляризационного контраста распределенного и составного объектов на примере сосредоточенных целей с конкретными величинами инвариантов МР, расположенных на фоне распределенного объекта, поляризационные параметры которого удовлетворяют принятой выше статистической модели. При этом будем считать, что :

— для параметров распределения собственных чисел $\lambda_1''(t)$, $\lambda_2''(t)$

выполняются условия $m_2 \geq m_1$, $\sigma_2 \geq \sigma_1$;

- углы ориентации $\theta_2(t)$ и эллиптичности $\varepsilon_2(t)$ распределены по равномерному (гауссовскому) закону в узкой области вблизи нуля;
- величина $\Delta\varphi''(t)$ распределена по равномерному (0° ; 180°) или гауссовскому ($m_{\Delta\varphi} = 90^\circ$, $\sigma_{\Delta\varphi} = 10^\circ$) закону;
- параметр $\varphi_{02}(t)$ распределен в узкой области вблизи нуля.

Косвенным подтверждением справедливости соотношения $m_2 \geq m_1$ служат данные поляризационных измерений коэффициентов отражаемости фоновых образований на вертикальной (Z_V) и горизонтальной (Z_H) поляризациях. Известно [90], что для некоторых видов распределенных образований величина Z_V превосходит Z_H на 3 – 10 дБ, что позволяет ограничить изменение отношения m_2 / m_1 интервалом (1; 3).

В общем случае анализ поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии проводился по следующей методике:

1. задавались инварианты МР сосредоточенной искусственной цели;
2. задавалась величина $\overline{\alpha}_{12}$ отношения полной ЭПР "цели" к средней на интервале измерения ЭПР фонового образования;
3. согласно принятой статистической модели, генерировались случайные выборки ($N=100$) инвариантов МР распределенного образования:

$\lambda_{1M}''(t)$, $\lambda_{2M}''(t)$, $\theta_{2M}(t)$, $\varepsilon_{2M}(t)$, $\Delta\varphi_M''(t)$, $\varphi_{02M}(t)$, входящего в составной РЛ объект "фон + цель";

4. в соответствии с аналитическим подходом к ПК, сформулированным в (2.64), (2.73)–(2.85), (2.102), (2.103), определялась случайная реализация коэффициента анизотропии μ_{12} составного объекта "фон + цель" и оценивались ее статистические параметры и выборочное распределение;
5. повторно выполнялся п.3, в результате чего генерировались случайные последовательности $\lambda_{1M}''(t')$, $\lambda_{2M}''(t')$, $\theta_{2M}(t')$, $\varepsilon_{2M}(t')$, $\Delta\varphi_M''(t')$, $\varphi_{02M}(t')$, характеризующие "чистое" фоновое образование;
6. в соответствии с формулой (2.102), определялась случайная реализация $\mu_{12}(t')$ и оценивались ее статистические характеристики;

7. по известным оценкам средних значений $\overline{\mu_{\Pi}(t)}$ и $\overline{\mu_{\Pi 2}(t')}$ находилась величина поляризационного контраста $W_{\Pi 2}$ (2.106).

После выполнения п.7 осуществлялся переход к п.2 и т.д., при этом цикл вычислений $W_{\Pi 2} = W_{\Pi 2}(\overline{\alpha_{12}})$ заканчивался по достижению граничной величины $\overline{\alpha_{12}}$, заданной до начала моделирования.

Основные результаты статистического моделирования приведены на рис.2.4 - 2.12. Так, на рис.2.4 приведены типичные выборочные распределения коэффициента поляризационной анизотропии $\mu_{\Pi 2}$ фонового образования при различных соотношениях между m_1 и σ_1 гауссовской модели собственных чисел МР "фона". Рис.2.4 а,б представляет "поляризационно-изотропный фон", для которого $\overline{\mu_{\Pi 2}(t)} = 0$, при этом степень "узости" распределения связана с дисперсией флуктуаций собственных чисел $\lambda_{1M}''(t)$, $\lambda_{2M}''(t)$. Чем значительнее эти флуктуации, тем больше характер распределения $\mu_{\Pi 2}(t)$ приближается к равномерному на интервале $(-1; +1)$. На других фрагментах рис.2.4 изображены гистограммы $\mu_{\Pi 2}(t)$ "анизотропного фона" с различной степенью анизотропии. При этом для большей величины отношения m_2 / m_1 наблюдается большее смещение выборочного распределения в сторону $\mu_{\Pi} = -1$.

Как было показано выше, появление сосредоточенной цели на фоне подстилающей поверхности приводит к изменению поляризационных свойств составного объекта по сравнению с "фоном". В частности, это изменение проявляется в смещении выборочного распределения μ_{Π} объекта "фон + цель" относительно распределения $\mu_{\Pi 2}$ "фона", образуя объективную основу для контрастирования РЛ изображения объектов поляризационными методами. На рис.2.5 приведена последовательность выборочных распределений μ_{Π} составного объекта "фон + цель" для различных отношений ЭПР "цели" к средней ЭПР "фона" - $\overline{\alpha_{12}}$. В качестве сосредоточенной "цели" был выбран "трехгранный уголкового отражатель" (УО), расположенный на "поляризационно-изотропном фоне". Учитывая идентичные поляризационные свойства данного РЛ отражателя ($\lambda_1' =$

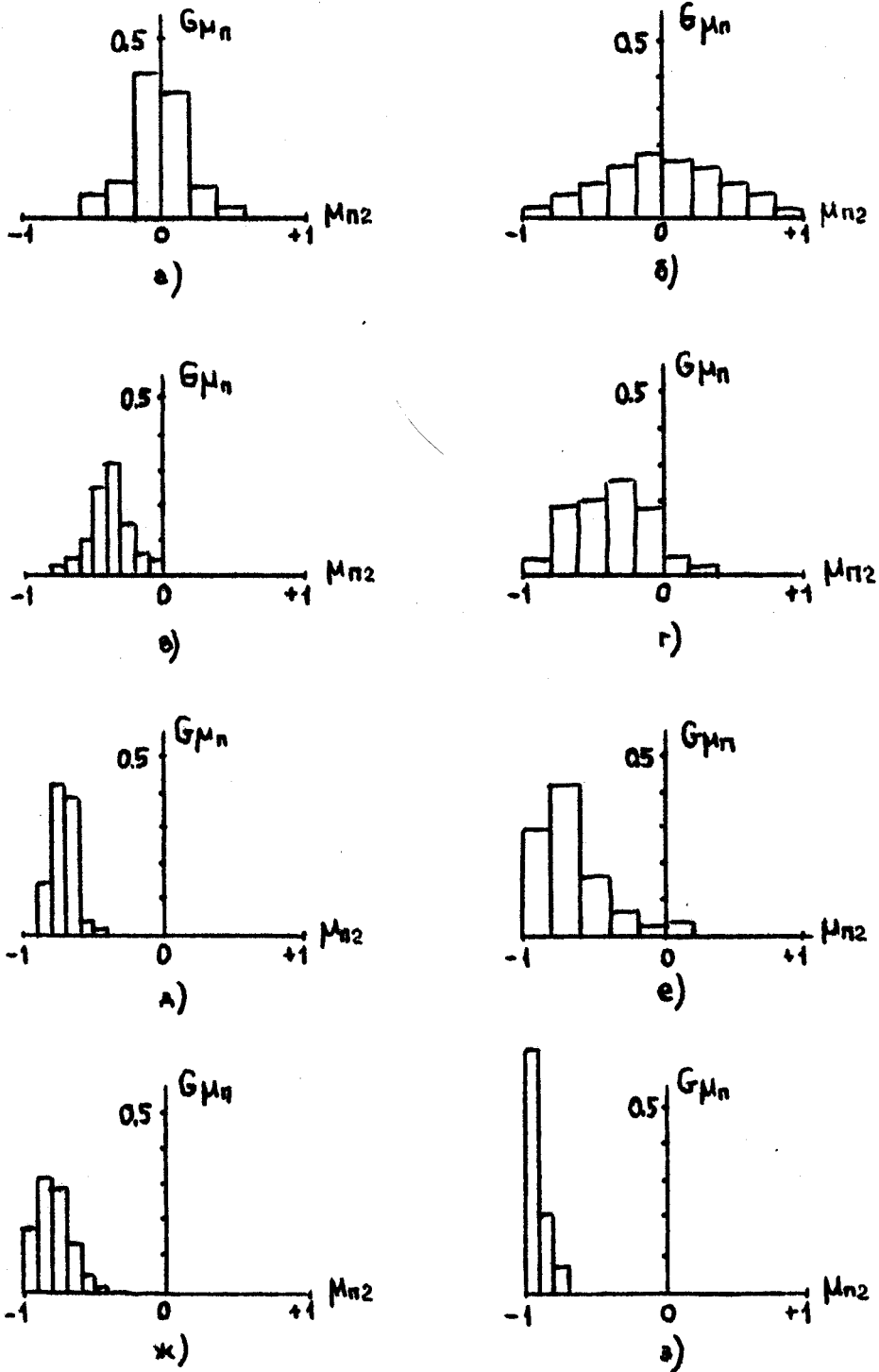


Рис.2.4. Гистограммы коэффициента $\mu_{n2}(t)$ распределенного объекта при различных параметрах модели собственных чисел матрицы рассеяния "фона" ($m_1 = a$) :

- $m_2 = 1.0 \cdot a$: а) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.15 \cdot a$; б) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$;
 $m_2 = 1.5 \cdot a$: в) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.15 \cdot a$; г) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$;
 $m_2 = 2.5 \cdot a$: д) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.15 \cdot a$;
 $m_2 = 2.5 \cdot a$: е) $\sigma_1 \cong 0.30 \cdot a$, $\sigma_2 \cong 0.75 \cdot a$;
 $m_2 = 3.0 \cdot a$: ж) $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$;
 $m_2 = 5.0 \cdot a$: з) $\sigma_1 \cong 0.30 \cdot a$, $\sigma_2 \cong 0.90 \cdot a$.

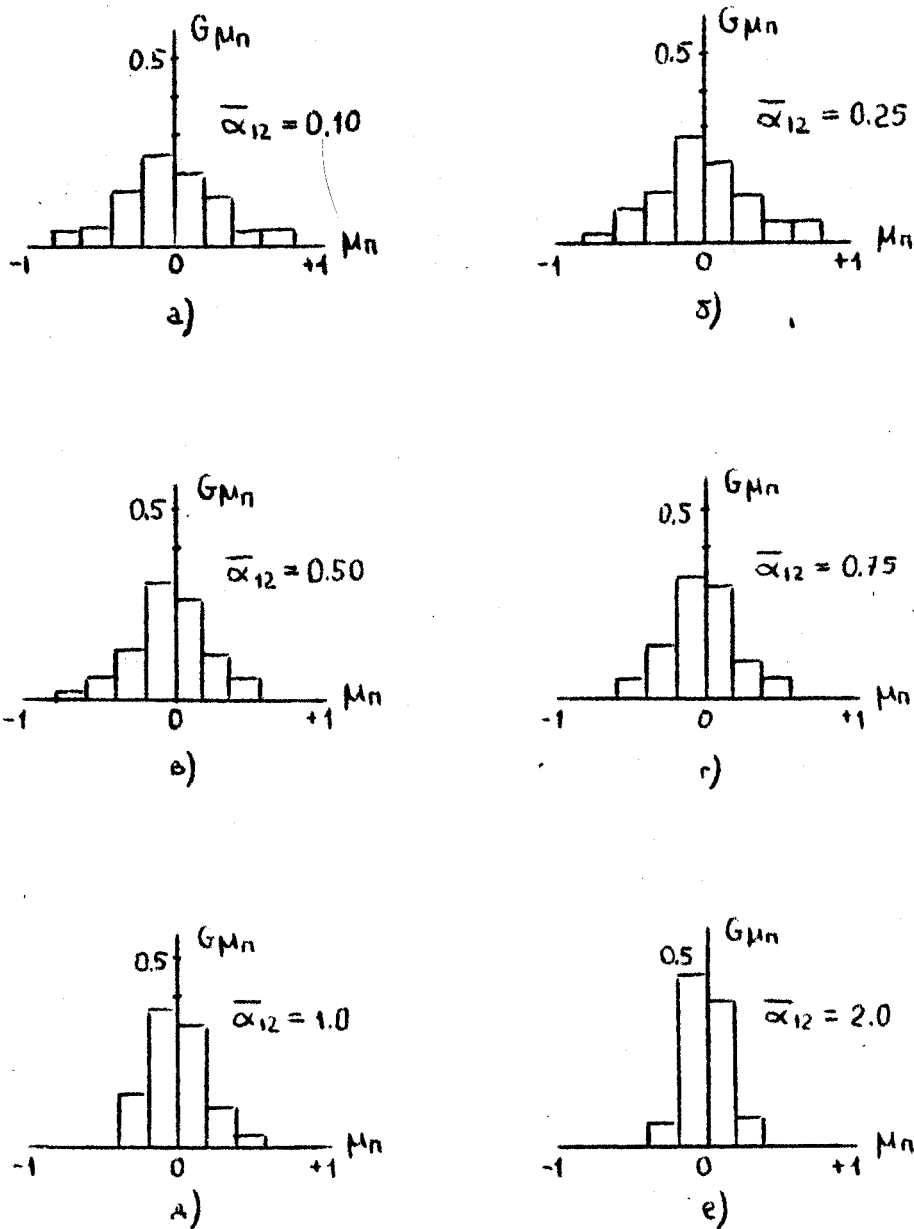


Рис.2.5. Гистограммы коэффициента μ_n составного объекта "фон + цель" при условии поляризационно-изотропного "фона" ($\mu_1 = \mu_2 = a$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.30 \cdot a$; $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$ — распределены по усеченному гауссовскому закону с параметрами $\mu_{\Delta\varphi} = 90^\circ$, $\sigma_{\Delta\varphi} = 10^\circ$, $\mu_\theta = 0^\circ$, $\sigma_\theta = 3^\circ$, $\mu_\varepsilon = 0^\circ$, $\sigma_\varepsilon = 1.5^\circ$) и "цели" в виде трехгранного уголкового отражателя ($\rho_1 = I$, $\theta_1 = \varepsilon_1 = \Delta\varphi' = \varphi_{01} = 0^\circ$), для разных величин $\bar{\alpha}_{12}$.

λ_2'), использование поляризационного метода μ_{Π} в этом случае не дает никакого выигрыша. При любом отношении $\overline{\alpha_{12}}$ поляризационный контраст $W_{\text{нс}}$ (2.105) равен нулю, а увеличение ЭПР "цели" приводит лишь к уменьшению дисперсии флуктуаций параметра $\mu_{\Pi}(t)$.

Однако, при изменении поляризационных свойств "фона" происходит смещение выборочного распределения $\mu_{\Pi}(t)$ (см. рис. 2.6), что приводит к увеличению наблюдаемости "трехгранного УО". Поэтому для распределенного объекта с большей "анизотропией" ПК объектов "фон" и "фон + УО" повышается, увеличивая вероятность обнаружения РЛ объектов типа трехгранного УО (проводящие плоскости, сфера и т.п.).

На рис. 2.7 приведены характерные гистограммы μ_{Π} составного объекта для случая наблюдения РЛ целей типа горизонтально ориентированного диполя (острые грани проводящих плоскостей, тонкие провода и т.п.). Увеличение ЭПР диполя приводит к "отягиванию" выборочного распределения из области $\mu_{\Pi} < 0$ в область положительных значений, снижая одновременно дисперсию флуктуаций коэффициента анизотропии μ_{Π} составного объекта "фон + горизонтальный диполь".

Для сравнения на рис. 2.8 изображены гистограммы параметра μ_{Π} составного объекта, когда в качестве сосредоточенной "цели" выбран объект с произвольными инвариантами его МР ($\rho_1 = 0.63$, $\theta_1 = 38^\circ$, $\varepsilon_1 = -15^\circ$, $\Delta\varphi' = 73^\circ$, $\varphi_{01} = 214^\circ$).

Как уже отмечалось, цель настоящего исследования заключается в оценке потенциальных возможностей использования поляризационных параметров (в частности, на примере μ_{Π}) для повышения контраста формируемого РЛ изображения и улучшения наблюдаемости искусственных объектов на фоне подстилающей поверхности. Пусть в качестве сосредоточенных искусственных целей выступают РЛ объекты типа : а) трехгранный уголкового отражатель (УО), б) двухгранный уголкового отражатель, в) горизонтально ориентированный диполь, г) вертикально ориентированный диполь, д) некоторый произвольный РЛ отражатель. Для

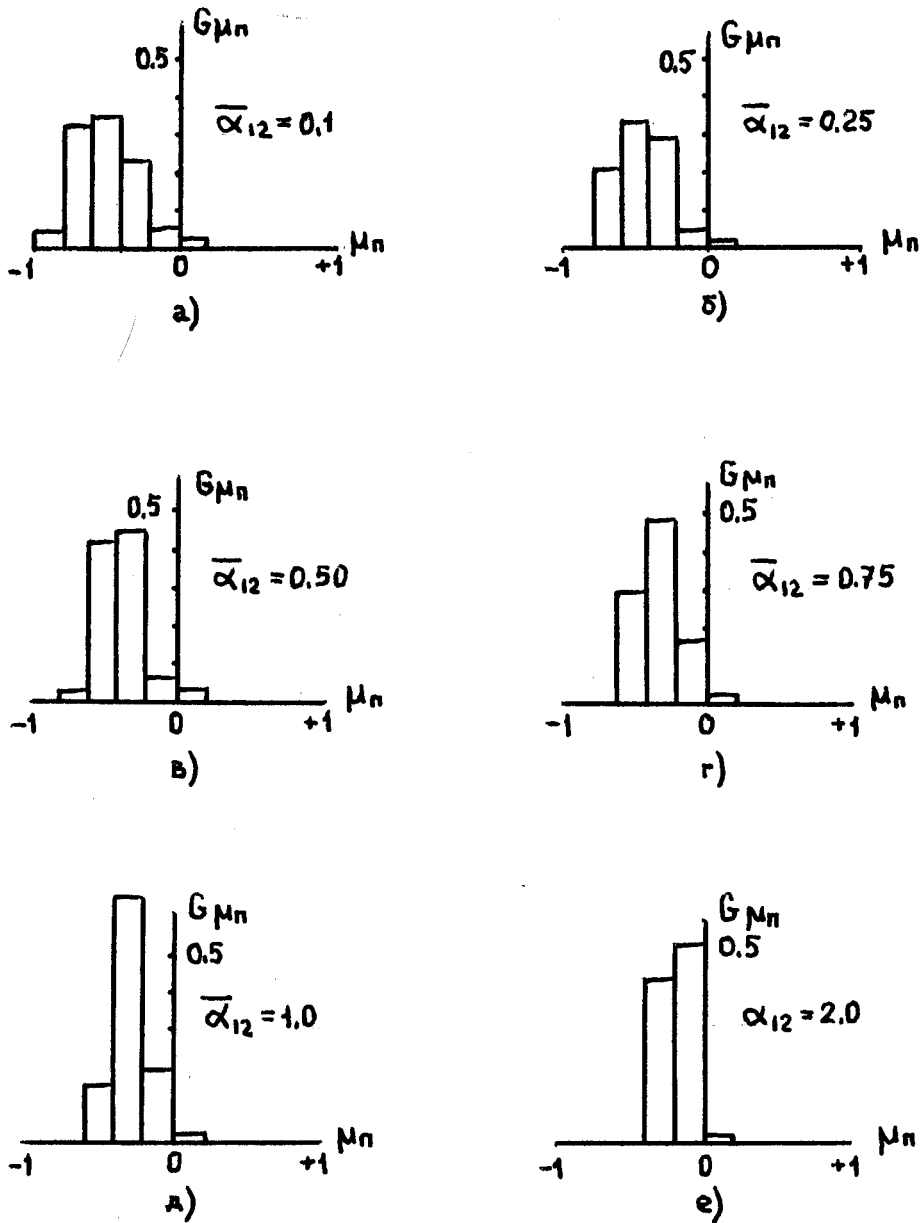


Рис.2.6. Гистограммы коэффициента μ_n составного объекта "фон + цель" при следующих параметрах "фона": $m_1 = a$, $m_2 = 2 \cdot a$, $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$, а величины $\Delta\varphi''(t)$, $\theta_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$, $\varphi_{02}(t)$ распределены по равномерному закону на интервалах $(-10^\circ; +10^\circ)$, $(-5^\circ; +5^\circ)$, $(0^\circ; 180^\circ)$, $(-10^\circ; +10^\circ)$, соответственно, и "цели" в виде трехгранного уголкового отражателя ($\rho_1 = 1$, $\theta_1 = \varepsilon_1 = \Delta\varphi' = \varphi_{01} = 0^\circ$) для разных величин $\overline{\alpha}_{12}$.

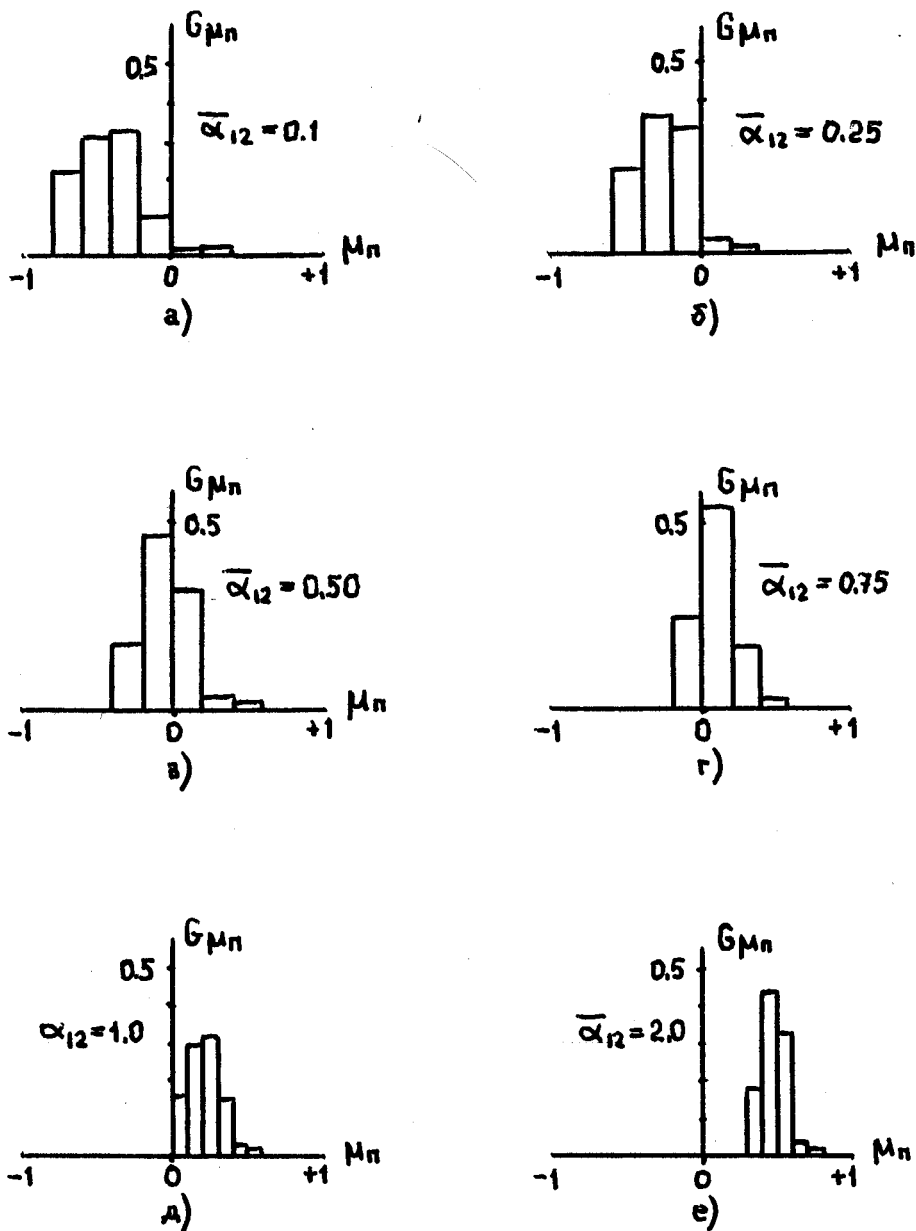


Рис.2.7. Гистограммы коэффициента μ_n составного объекта "фон + цель" при параметрах "фона", указанных на рис.2.6, и "цели" в виде горизонтально ориентированного диполя ($\rho_1 = 0$, $\theta_1 = \varepsilon_1 = \Delta\varphi' = \varphi_{01} = 0^\circ$) для разных величин α_{12} .

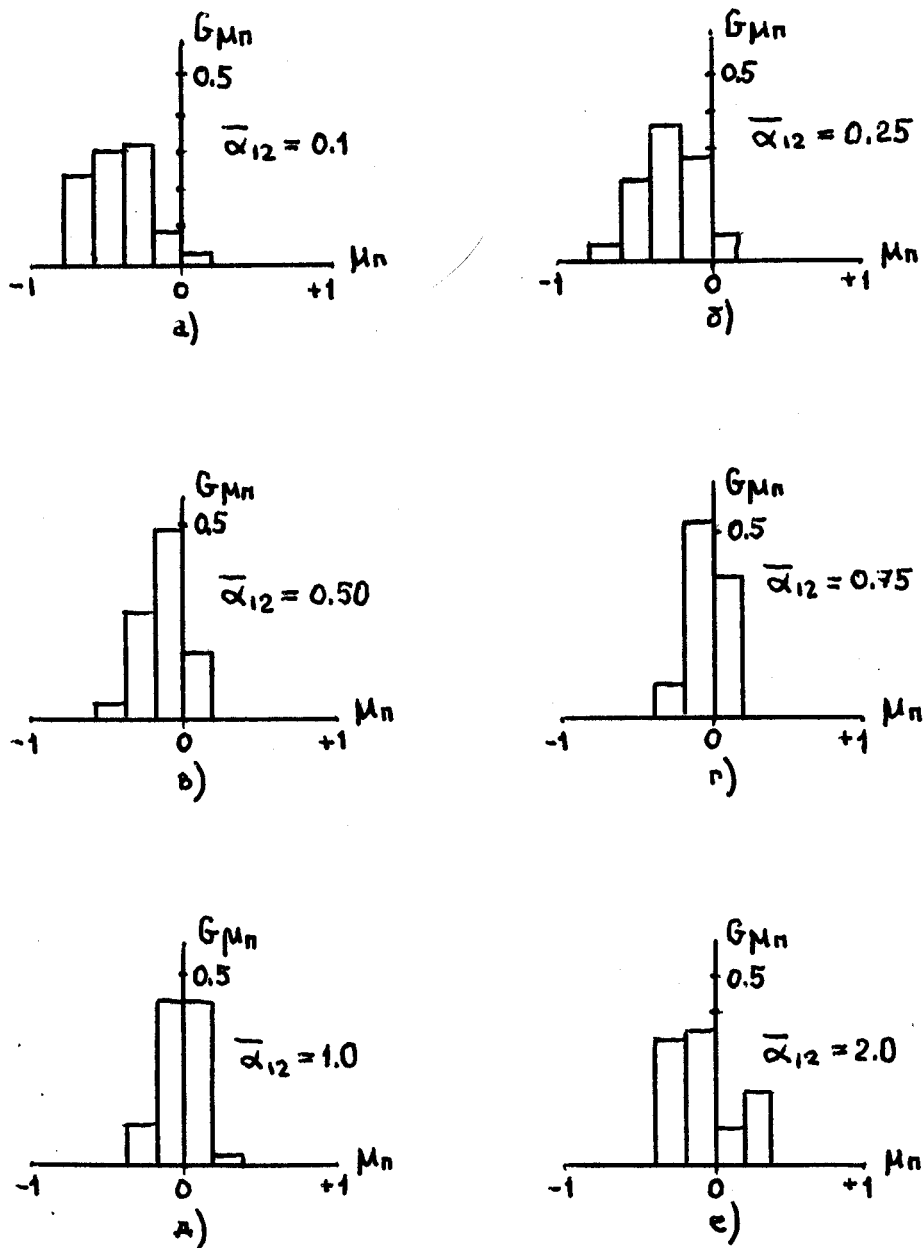


Рис.2.8. Гистограммы коэффициента μ_n составного объекта "фон + цель" при параметрах "фона", указанных на рис.2.6, и "цели" в виде РЛ отражателя с произвольными свойствами ($\rho_1 = 0.63$, $\theta_1 = 38^\circ$, $\varepsilon_1 = -15^\circ$, $\Delta\varphi' = 73^\circ$, $\varphi_{01} = 214^\circ$) для разных величин $\bar{\alpha}_{12}$.

каждой цели были рассчитаны зависимости поляризационного контраста $W_{\text{НС}}$ двух объектов "фон" и "фон + цель", как функции отношения ЭПР искусственной "цели" к средней на интервале измерения ЭПР распределенного фонового образования. Результаты статистического моделирования, приведенные на рис.2.9 - 2.12, получены для соосредоточенных целей (а) - (д) при изменении модели собственных чисел МР "фона": от "изотропной" ($m_1 / m_2 = 1$) на рис. 2.9 до существенно "анизотропной" ($m_1 / m_2 = 3$) на рис. 2.12. Для сравнения величин поляризационного контраста с контрастом по ЭПР на каждом из рисунков 2.9 - 2.12 приведена кривая зависимости $K_{\text{НС}} = K_{\text{НС}}(\overline{\alpha}_{12})$. Следует отметить, что каждая кривая (а) - (д) на рис.2.9 - 2.12 представляет собой результат статистического усреднения 50 зависимостей $W_{\text{НС}}(\overline{\alpha}_{12})$, полученных в соответствии с рассмотренной методикой моделирования.

Из анализа рис.2.9 - 2.12 следует, что метод, связанный с измерением коэффициента поляризационной анизотропии по мощности, не способен разделять в пространстве поляризационного параметра $\mu_{\text{П}}$ РЛ объекты типа трех-и-двухгранного УО, в отличие от метода модуля комплексного коэффициента поляризационной анизотропии [17]. Наиболее неблагоприятной ситуацией при обнаружении таких целей является наблюдение РЛ объектов этого типа на фоне поляризационно-изотропного распределенного образования (рис.2.9), когда $W_{\text{НС}} = 0$. При этом величина дисперсии флуктуаций параметра $\mu_{\text{П}}(t)$ составного объекта "изотропный фон + трех(двух)гранный УО" (см., например, рис. 2.5в) не может служить "индикатором" присутствия изотропной искусственной цели, поскольку близкие по характеру выборочные распределения наблюдаются и для "чистого" фонового образования с другими параметрами модели (ср. с рис.2.4а). Однако, для "фона" с существенно анизотропными свойствами (рис.2.12) наблюдаемость объектов типа трех(двух)гранных УО достаточно высока. В этом случае поляризационный контраст $W_{\text{НС}}$ заметно превышает величину $K_{\text{НС}}$ и, следова-

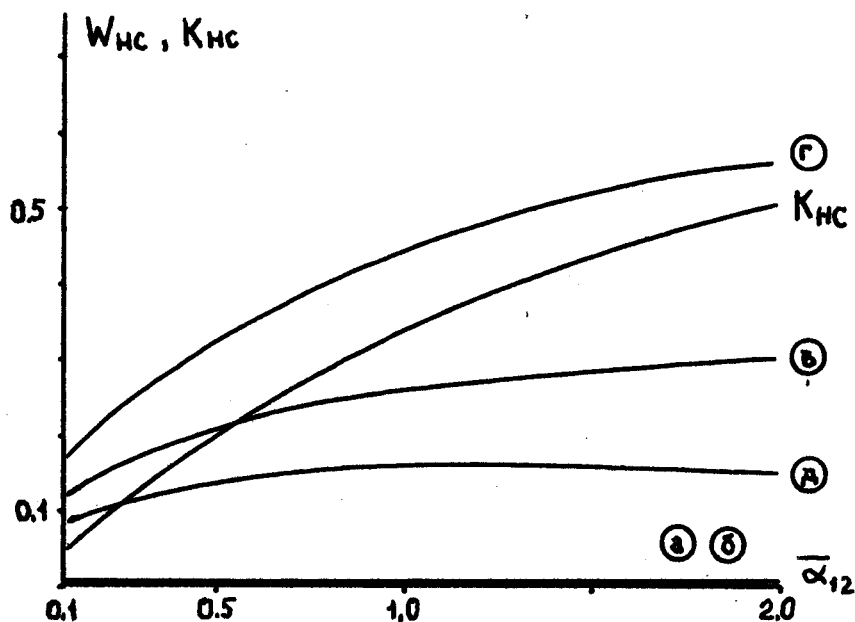


Рис.2.9. Зависимости поляризационного контраста $W_{НС}$ и радиолокационного контраста $K_{НС}$ по ЭПР сосредоточенных объектов (а) – (д) (см. раздел 2.4.3) от отношения $\overline{\alpha}_{12}$ ЭПР "цель/фон" для следующих параметров модели "фона" : $\pi_1 = \pi_2 = a$, $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$.

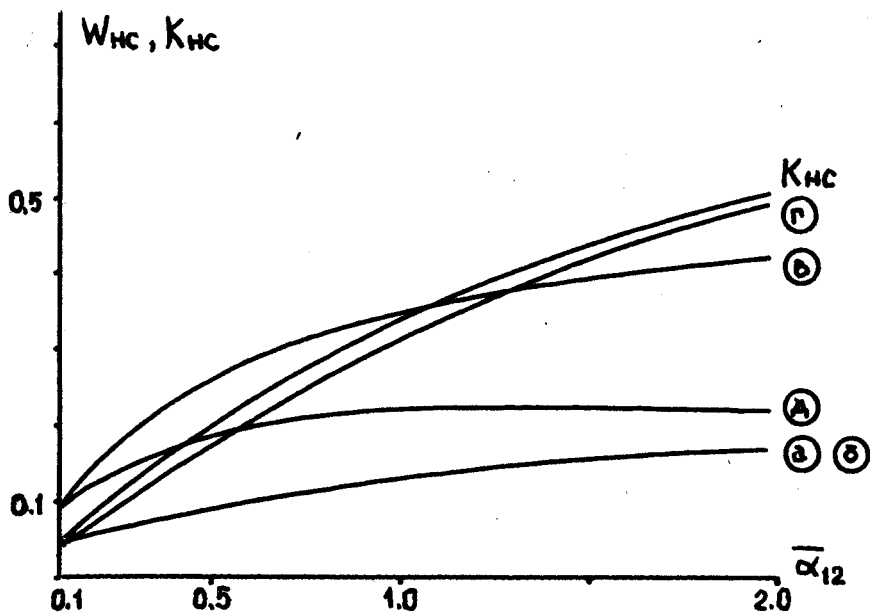


Рис.2.10. Зависимости поляризационного контраста $W_{НС}$ и радиолокационного контраста $K_{НС}$ по ЭПР сосредоточенных объектов (а) – (д) (см. раздел 2.4.3) от отношения $\overline{\alpha}_{12}$ ЭПР "цель/фон" для следующих параметров модели "фона" : $\pi_1 = a$, $\pi_2 = 1.5 \cdot a$, $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$.

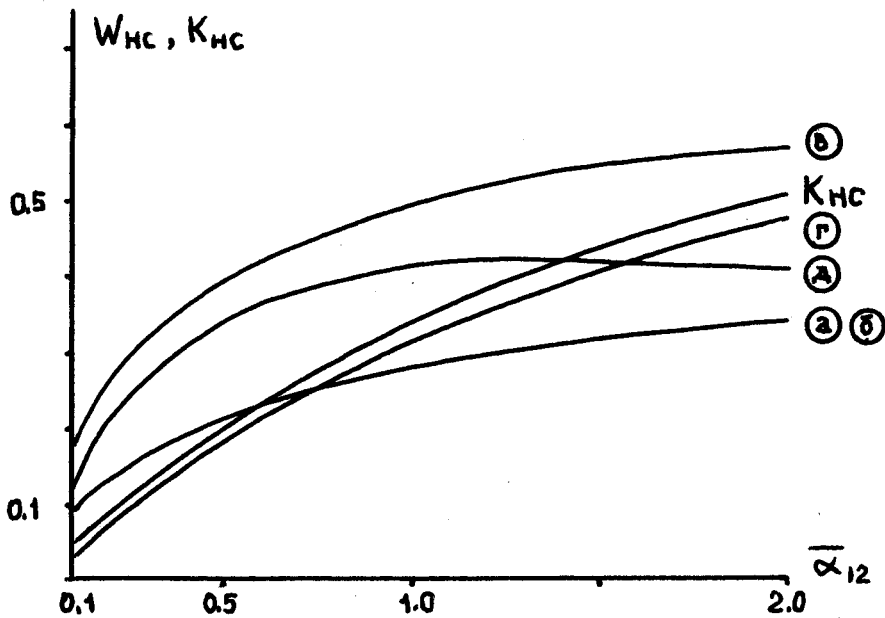


Рис.2.11. Зависимости поляризационного контраста $W_{нс}$ и радиолокационного контраста $K_{нс}$ по ЭПР сосредоточенных объектов (а) – (д) (см. раздел 2.4.3) от отношения $\overline{\alpha}_{12}$ ЭПР "цель/фон" для следующих параметров модели "фона" : $m_1 = a$, $m_2 = 2.0 \cdot a$, $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$.

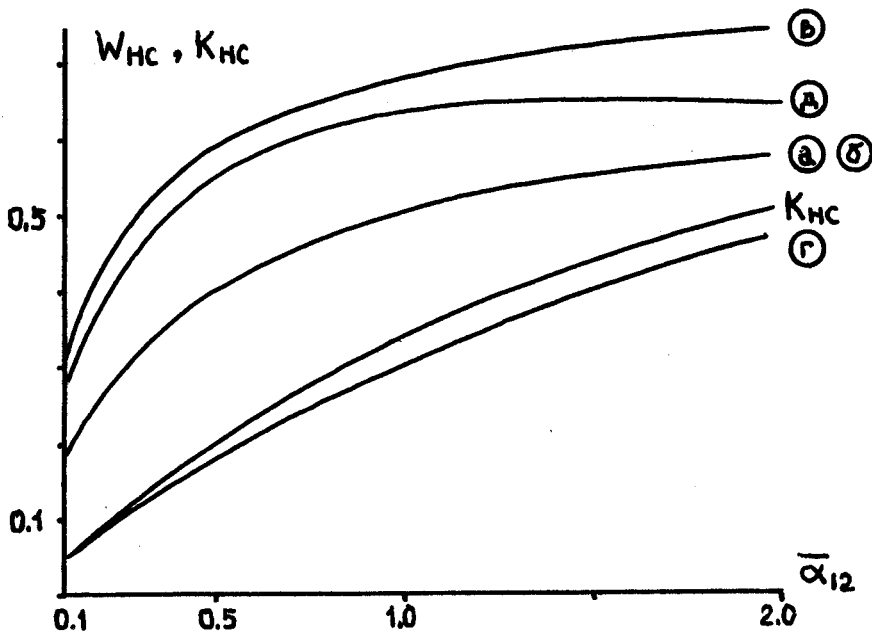


Рис.2.12. Зависимости поляризационного контраста $W_{нс}$ и радиолокационного контраста $K_{нс}$ по ЭПР сосредоточенных объектов (а) – (д) (см. раздел 2.4.3) от отношения $\overline{\alpha}_{12}$ ЭПР "цель/фон" для следующих параметров модели "фона" : $m_1 = a$, $m_2 = 3.0 \cdot a$, $\sigma_1 \cong \sigma_2 \cong 0.30 \cdot a$.

тельно, обеспечивает выигрыш в среднем при наблюдении за малоразмерными ($\overline{\alpha_{12}} = (0.1 ; 1.0)$) изотропными целями.

Для статистической модели изотропного распределенного образования наибольший поляризационный контраст характерен для вертикального диполя (г) (рис.2.9). Изменение свойств "фона" в сторону большей "анизотропии", выраженное в увеличении коэффициента отражаемости Z_V для вертикально поляризованной волны по сравнению с величиной Z_H , приводит к снижению наблюдаемости целей типа вертикально ориентированного диполя. Напротив, горизонтально ориентированный диполь характеризуется высокими значениями ПК при наблюдении такой цели на фоне подстилающей поверхности с ярко выраженной "анизотропией" (см. рис.2.11, 2.12). РЛ объект (д) с произвольными поляризационными свойствами занимает, как и следовало ожидать, промежуточное положение между поляризационно-изотропными объектами (а), (б) и вырожденной целью (в). Отличительной особенностью данного объекта является практически постоянное значение величины поляризационного контраста для $\overline{\alpha_{12}} \geq 1$.

Проведенное с помощью метода статистического моделирования исследование величины поляризационного контраста W_{HC} объектов типа "фон" и "фон + цель" дает возможность сделать следующие выводы :

1. использование информации о неэнергетическом параметре μ_H поляризационной анизотропии позволяет повысить наблюдаемость сосредоточенных искусственных целей на фоне подстилающей поверхности ;
2. величина W_{HC} , характеризующая ПК объектов типа "фон" и "фон + цель", зависит от инвариантов МР искусственной цели, статистических свойств параметров матрицы рассеяния распределенного объекта и отношения полных ЭПР сосредоточенной "цели" и "фона" ;
3. поляризационный метод коэффициента поляризационной анизотропии по мощности не позволяет разделять в поляризационном пространстве μ_H изотропные объекты типа трех(двух)гранных уголкового отражателя;

4. в рамках принятой модели "фона" справедливы утверждения :

- наилучшие условия наблюдения имеют место для РЛ целей типа трех(двух)гранных РЛ отражателей, расположенных на поляризационно-изотропной поверхности ;
- наибольшие преимущества метода μ_{Π} проявляются для случая наблюдения искусственных целей типа изотропного отражателя и горизонтально ориентированного диполя, расположенных на фоне распределенного объекта с выраженной анизотропией, при этом величина поляризационного контраста $W_{\text{нс}}$ существенно превосходит соответствующие значения РЛ контраста $K_{\text{нс}}$ по ЭПР для малоразмерных ($0.1 \leq \overline{\alpha}_{12} \leq 1.0$) целей ;
- при уменьшении ЭПР сосредоточенного искусственного объекта ниже некоторого уровня ($\overline{\alpha}_{12} < 0.1$) наблюдается резкий спад зависимостей $W_{\text{нс}}(\overline{\alpha}_{12})$ так, что величина поляризационного контраста $W_{\text{нс}} \rightarrow 0$.

2.4.4. Оценка влияния движения сосредоточенной искусственной " цели " на измеряемые поляризационные параметры.

Сформулированный в разделах 2.1 - 2.3 аналитический подход к оценке инварианта μ_{Π} составного объекта "фон + цель" позволяет определить влияние движения сосредоточенной "цели" на измеряемый поляризационный параметр. Из формул (2.83 - 2.85) следует, что информация о перемещении искусственной РЛ "цели" содержится в параметре $\Delta\varphi$, зависящем от разности величин φ_{01} и φ_{02} (см.(2.1)) фазовых сдвигов, обусловленных пространственным положением центров рассеяния "цели" и "фона".

Будем считать, что перемещение искусственной цели относительно подстилающей поверхности приводит к регулярному изменению величины φ_{01} и, соответственно, параметра $\Delta\varphi \sim \varphi_{01} - \varphi_{02}$. При этом возможное изменение параметра μ_{Π} связано с изменением величин θ_0 , ε_0 ,

входящих в выражение (2.64) для взвешивающих коэффициентов P_1 и P_2 . Так, что выражение для коэффициента анизотропии составного объекта "фон + движущаяся цель" можно представить следующим образом

$$\mu_{\Pi}(t) = \frac{\overline{\alpha_{12}}}{1 + \overline{\alpha_{12}}} \cdot \mu_{\Pi 1} \cdot P_1(t, \varphi_{01}(t)) + \frac{1}{1 + \overline{\alpha_{12}}} \cdot \mu_{\Pi 2}(t) \cdot P_2(t, \varphi_{01}(t)).$$

Оценка влияния движения искусственной "цели" на величину $\mu_{\Pi}(t)$ была выполнена с помощью метода статистического моделирования, в соответствии с рассмотренной в разделе 2.4.3 методикой. Единственное дополнение состояло в задании регулярного изменения параметра φ_{01} "цели" с некоторой частотой. В результате моделирования по п.1 - п.4 методики происходило формирование случайной выборки параметра $\mu_{\Pi}(t)$, после чего производилась оценка амплитудного спектра флуктуаций коэффициента анизотропии методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Степень влияния "перемещения" цели оценивалась по амплитуде спектральной составляющей в выделенной области амплитудного спектра $\mu_{\Pi}(t)$ ($f_S \approx 0.1$), соответствующей заданной предварительно частоте изменения параметра φ_{01} .

В качестве иллюстрации изменения $\mu_{\Pi}(t)$ составного объекта "фон + цель" при "перемещении" сосредоточенной цели относительно подстилающей поверхности, на рис. 2.13 и 2.14 приведены графики усредненного амплитудного спектра $\overline{S_{\mu_{\Pi}}^H}$ флуктуаций коэффициента μ_{Π} . Каждый фрагмент (а)-(г) на рис. 2.13 и 2.14 представляет собой результат статистического усреднения 10 реализаций нормированного амплитудного спектра $\overline{S_{\mu_{\Pi}}^H}$ 1-ой выборки $\mu_{\Pi}(t)$, в логарифмическом масштабе.

Из рис. 2.13а следует, что корреляционные свойства "фона" и отношение ЭПР "цель" / "фон" таковы, что в спектре $\overline{S_{\mu_{\Pi}}^H}(f_S)$ трудно обнаружить присутствие заметной спектральной составляющей, обусловленной "движением" "цели". Однако, при увеличении ЭПР искусственного объекта флуктуации параметра μ_{Π} принимают более регулярный

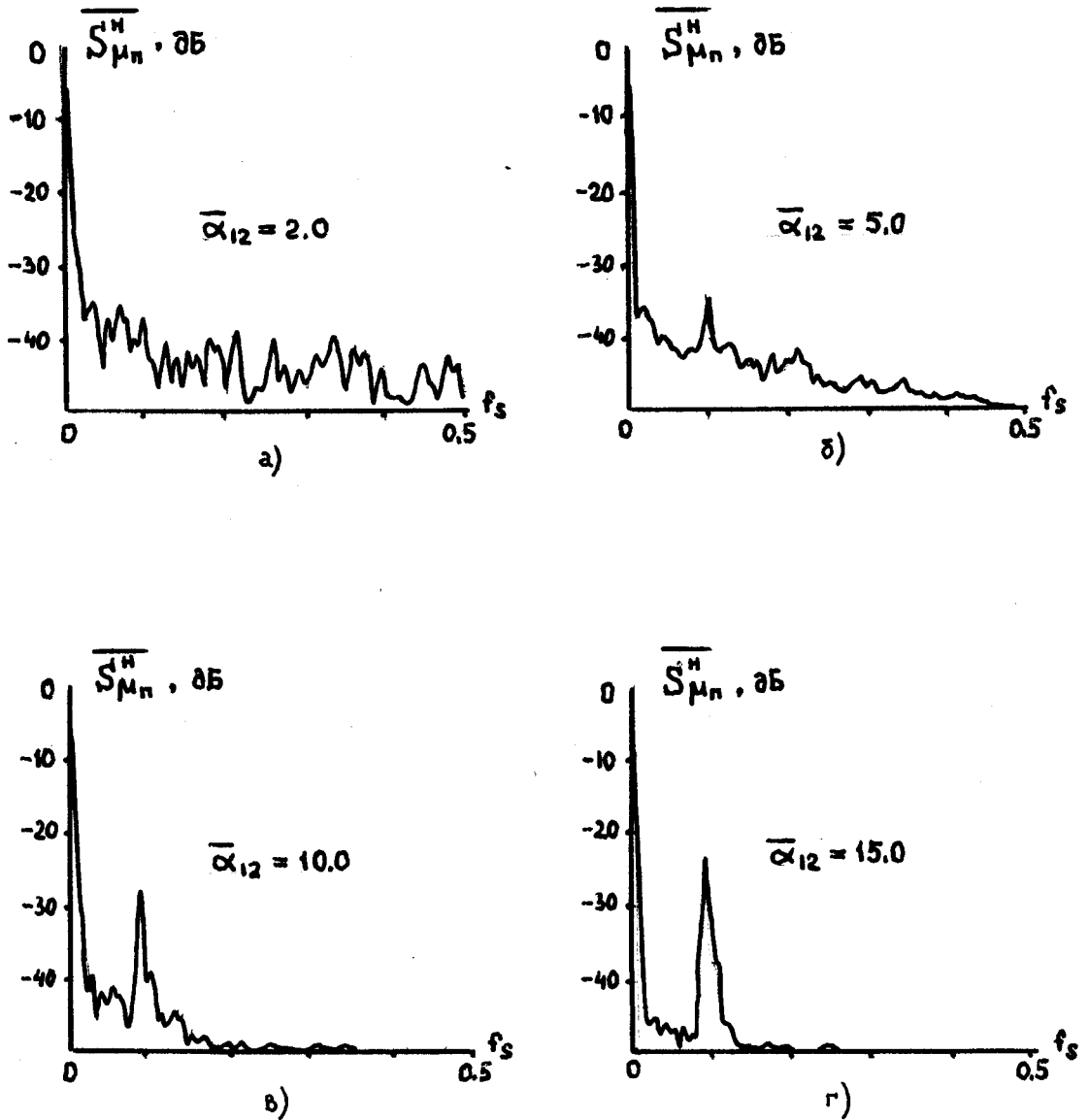


Рис.2.13. Усредненный амплитудный спектр коэффициента μ_{π} поляризационной анизотропии по мощности составного объекта "фон + цель" при моделировании "перемещения" сосредоточенной цели для различных величин $\overline{\alpha}_{12}$. Параметры модели собственных чисел МР "фона" соответствуют данным рис.2.4.г. В качестве сосредоточенной "цели" используется объект с произвольными параметрами ($\rho_1 = 0.63$, $\theta_1 = 38^\circ$, $\varepsilon_1 = -15^\circ$, $\Delta\varphi' = 73^\circ$).

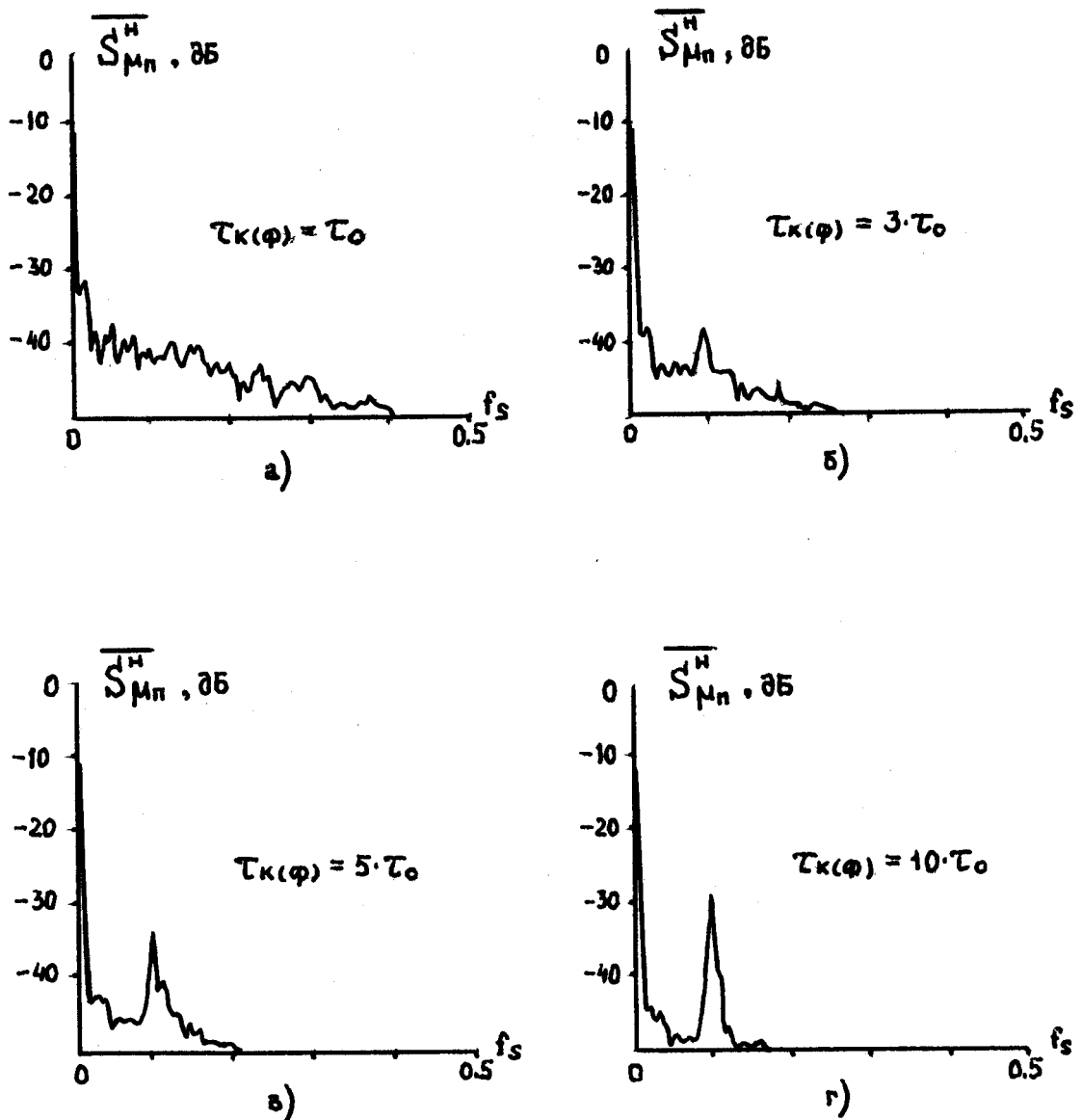


Рис.2.14. Усредненный амплитудный спектр коэффициента μ_{Π} поляризационной анизотропии по мощности составного объекта "фон + цель" при моделировании "перемещения" сосредоточенной цели для различных автокорреляционных свойств модели "фона" и постоянной величины $\overline{\alpha}_{12} = 5$. Параметры модели "фона" и "цели" аналогичны данным рис.2.13.

характер и в области $f_s \approx 0.1$ появляется частотная составляющая вызванная "перемещением" "цели". На рис.2.14 показан пример влияния автокорреляционных свойств "фона" на характер флуктуаций μ_{Π} составного объекта при "перемещении" сосредоточенной искусственной цели. Чем уже оказывается спектр случайных флуктуаций $\mu_{\Pi 2}(t)$ распределенного фонового образования, тем лучше проявляется регулярная составляющая в спектре коэффициента анизотропии составного объекта.

Для сравнения на рис.2.15 приведены спектральные характеристики параметра модуля μ_d' комплексного коэффициента анизотропии объекта, определенные в результате статистического моделирования перемещения искусственной цели (параметры указаны на рис.2.13) относительно подстилающей поверхности. При этом были получены общие выражения для амплитуд сигналов, принятых в ортогональных каналах, когда матрица рассеяния составного объекта $[\dot{S}]$ представляет собой сумму МР "движущейся" цели и фонового образования

$$[\dot{S}] = [\dot{S}_1] \cdot \exp(j\varphi_{01}(t)) + [\dot{S}_2] \cdot \exp(j\varphi_{02}(t)),$$

где $\varphi_{01}(t)$ — фазовый аргумент, обусловленный равномерным "перемещением" искусственной цели, а $\varphi_{02}(t)$ — случайная величина, распределенная по усеченному гауссовскому закону ($m_{\varphi} = 0^\circ$, $\sigma_{\varphi} = 10^\circ$). А затем, в соответствии с (2.93), формировались случайные выборки параметра μ_d' , для которых рассчитывался амплитудный спектр флуктуаций $S_{\mu_d}^H$.

Полученные результаты оценки $S_{\mu_d}^H$ позволяют утверждать, что для тех же самых параметров модели "фона" и выбранных сосредоточенных целей дисперсия флуктуаций параметра μ_d' заметно больше дисперсии μ_{Π} . При этом амплитуда регулярных составляющих в спектре $S_{\mu_d}^H$ из-за "движения" сосредоточенной цели в среднем превосходит амплитуду "доплеровских" компонент в спектре параметра μ_{Π} . Объяснить это можно тем, что метод μ_{Π} , связанный с измерением матрицы коге-

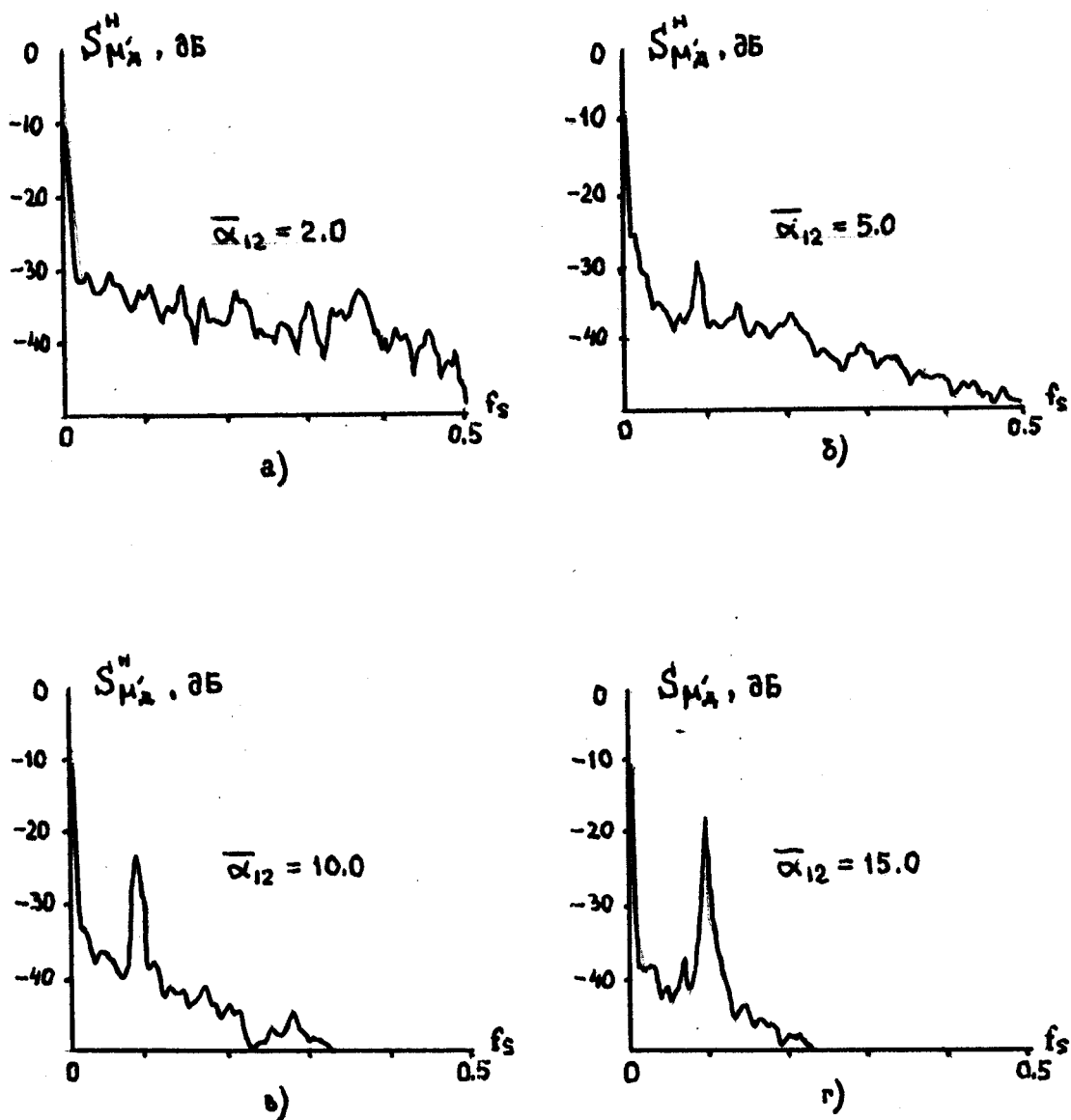


Рис.2.15. Усредненный амплитудный спектр параметра μ_d' (2.93) составного объекта "фон + цель" при моделировании "перемещения" сосредоточенной цели для разных величин $\bar{\alpha}_{12}$. Параметры статистической модели "фона" соответствуют данным рис.2.4.г. В качестве сосредоточенной "цели" используется объект с произвольными параметрами ($\rho_1 = 0.63$, $\theta_1 = 38^\circ$, $\varepsilon_1 = -15^\circ$, $\Delta\varphi' = 73^\circ$).

рентности волны, рассеянной объектом, характеризуется потерей информации об одном из инвариантов матрицы рассеяния — $\Delta\varphi$. В то время, как величина μ_d (1.19) прямо связана с $\Delta\varphi$, что и приводит к увеличению амплитуды спектральной составляющей по сравнению с методом коэффициента поляризационной анизотропии μ_{Π} по мощности.

2.5. Краткие выводы.

На основании проведенного во 2-ой главе теоретического анализа отметим следующее :

- а) разработанная процедура оценки поляризационного контраста РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" по степени поляризационной анизотропии μ_{Π} по мощности справедлива для произвольных поляризационных свойств сосредоточенной искусственной цели и распределенного фонового образования ;
- б) для упрощения анализа проведенное исследование поляризационного контраста выполнено в предположении стабильных на интервале наблюдения поляризационных свойств сосредоточенной цели ; однако, полученные результаты могут быть легко распространены на случай временных флуктуаций инвариантов матрицы рассеяния искусственной цели ;
- в) статистическое моделирование процесса "перемещения" сосредоточенной цели относительно подстилающей поверхности показало, что при определенных условиях в спектре флуктуаций параметров μ_{Π} , μ_d присутствует регулярная частотная составляющая.

Исходя из сказанного, возникает вопрос о практическом измерении поляризационного параметра μ_{Π} или величин, связанных с ним, на интервалах измерения близких к соответствующим интервалам обзорных РЛ систем. Рассмотрению этого вопроса посвящен следующий раздел данной работы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО КОНТРАСТА

Проведенный во 2-ой главе анализ контраста объектов типа "фон" и "фон + цель" выполнен для одного из инвариантов матриц рассеяния — коэффициента поляризационной анизотропии μ_{Π} по мощности. Измерение величины μ_{Π} радиолокационных объектов в реальных условиях представляет собой сложную техническую задачу. В [17] была разработана структура двухчастотной моноимпульсной ОРЛС, позволяющей оценивать параметр μ_{Π} по мощности рассеивающих РЛ объектов в большом динамическом диапазоне амплитуд принимаемых сигналов. При этом было доказано, что оценка величин модуля $\mu_d = | \dot{\mu} |$ (I.19) и реальной части $\tilde{\mu} = \text{Re} \{ \dot{\mu} \}$ (I.22) комплексного коэффициента поляризационной анизотропии, функционально связанных с μ_{Π} , дает возможность измерять их более простыми техническими средствами. Поэтому для оценки поляризационного контраста объектов типа "фон" и "фон + цель" воспользуемся результатами измерений параметров μ_d и $\tilde{\mu}$, выполненных с помощью моноимпульсной ОРЛС "Кедр-2" [17] и модифицированного локатора ИРЛ133 модуляционного типа [99].

3.1. Алгоритм измерения поляризационного параметра в моноимпульсной обзорной РЛС.

По определению (I.18), параметр μ_d является модулем комплексного коэффициента поляризационной анизотропии РЛ объекта :

$$\dot{\mu} = (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) / (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) = \mu_d \cdot \exp(j\Phi) .$$

В [17] доказано, что однозначное определение величины μ связано с формированием псевдополяризованного потока излучения ОРЛС. При этом коэффициент $\dot{\mu}$ с точностью до постоянного множителя совпадает с величиной нормированной взаимной интенсивности круговых ортого-

нальных составляющих рассеянной объектом волны. В общем виде принятый от объекта РЛ сигнал можно представить, как

$$\vec{E}(t) \cdot \exp(j\omega_0 t) = \dot{c} \cdot [\dot{S}] \cdot \vec{E}_0(t - \tau_0) \cdot \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp(j\omega_0 t), \quad (3.1)$$

где

$$\vec{E}_0(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_{01}(t) \\ \dot{E}_{02}(t) \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \vec{E}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1(t) \\ \dot{E}_2(t) \end{bmatrix} \quad - \text{векторы Джонса излучаемого и принятого РЛ сигналов,}$$

$\omega_0 = 2\pi f_0$ — частота зондирующего сигнала,

$[\dot{S}]$ — матрица рассеяния объекта,

\dot{c} — коэффициент передачи радиолокационного канала,

τ_0 — время распространения излученного сигнала до цели и обратно,

f_d — доплеровская частота, обусловленная радиальным перемещением объекта относительно РЛС.

Пусть свойства РЛ канала неизменны за время наблюдения объекта с $f_d = 0$. Тогда, полагая для простоты $\tau_0 = 0$, запишем рассеянный РЛ сигнал следующим образом :

$$\vec{E}(t) \cdot \exp(j\omega_0 t) = [\dot{S}] \cdot \vec{E}_0(t) \cdot \exp(j\omega_0 t). \quad (3.2)$$

Формирование псевдонеполаризованного зондирующего потока в обзорных РЛС с узкополосными ($\Delta\omega \ll \omega_0$) сигналами может быть обеспечено при разное ортогональных составляющих излучаемого сигнала $\vec{E}_0(t)$ во времени (поляризационная манипуляция), либо по частоте (моноимпульсный метод) [17]. Рассмотрим последний случай. При этом вектор Джонса зондирующего потока представим в виде

$$\vec{E}_0(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_{01}(t) \\ \dot{E}_{02}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(t) \cdot \exp(j\Omega_1 t) \\ U_2(t) \cdot \exp(j\Omega_2 t) \end{bmatrix},$$

где $U_1(t)$ и ω_1 — огибающая и несущая частота 1-ой ортогональной составляющей излучаемого сигнала $\vec{E}_0(t)$, а $\Omega_1 = \omega_1 - \omega_0$ ($i = 1, 2$).

В [17] доказано, что при выполнении условий

$$U_1(t) = U_2(t) = U(t), \quad |\Omega_1 - \Omega_2| = |\omega_1 - \omega_2| \gg 2\pi / \tau_H,$$

(τ_H — длительность излучаемого импульса) формируемый РЛ сигнал будет псевдополяризованным на интервале усреднения $T \geq \tau_H$. Для рассматриваемого случая кругового измерительного базиса запишем согласно (1.36) вектор Джонса отраженной волны :

$$\begin{aligned} \vec{E}(t) &= \dot{k} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mu} \cdot \exp(j\phi) & I \\ I & \dot{\mu} \cdot \exp(-j\phi) \end{bmatrix} \cdot U(t) \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\Omega_1 t) \\ \exp(j\Omega_2 t) \end{bmatrix} = \\ &= \dot{k} \cdot U(t) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mu} \cdot \exp(j\phi) \cdot \exp(j\Omega_1 t) + \exp(j\Omega_2 t) \\ \exp(j\Omega_1 t) + \dot{\mu} \cdot \exp(-j\phi) \cdot \exp(j\Omega_1 t) \end{bmatrix}, \quad (3.3) \end{aligned}$$

где $\dot{k} = (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2)/2$, $\phi = 2\theta - \pi/2$, θ — угол ориентации собственного базиса МР объекта. Отсюда следует, что ортогональные компоненты рассеянной объектом волны представляют собой суммы гармонических составляющих с различными частотами. Выделяя эти составляющие, вектор Джонса $\vec{E}(t)$ (3.2) можно представить, как

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_1(t) + \vec{E}_2(t),$$

где

$$\vec{E}_1(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_{11}(t) \\ \dot{E}_{21}(t) \end{bmatrix} = \dot{k} \cdot U(t) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mu} \cdot \exp(j\phi) \\ I \end{bmatrix} \cdot \exp(j\Omega_1 t), \quad (3.4)$$

$$\vec{E}_2(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_{12}(t) \\ \dot{E}_{22}(t) \end{bmatrix} = \dot{k} \cdot U(t) \cdot \begin{bmatrix} I \\ \dot{\mu} \cdot \exp(-j\phi) \end{bmatrix} \cdot \exp(j\Omega_2 t). \quad (3.5)$$

Рассмотрим взаимно-корреляционную функцию $\dot{R}_1(\tau)$ ортогональных компонент принятого сигнала на частоте Ω_1 . По определению [96],

$$\dot{R}_1(\tau) = \overline{\dot{E}_{11}(t) \cdot \dot{E}_{21}^*(t-\tau)} = \frac{I}{T} \int_0^{\tau_H} \dot{E}_{11}(t) \cdot \dot{E}_{21}^*(t-\tau) \cdot dt. \quad (3.6)$$

Учитывая (3.4), получаем, что

$$\dot{R}_1(\tau) = |\dot{k}|^2 \cdot \dot{\mu} \cdot \exp(j\phi) \cdot R(\tau) \cdot \exp(j\Omega_1 \tau),$$

где

$$R(\tau) = \frac{I}{T} \int_0^{\tau_H} U(t) \cdot U(t-\tau) \cdot dt -$$

— автокорреляционная функция огибающей зондирующего сигнала.

Определим взаимную интенсивность ортогональных составляющих $\dot{E}_{11}(t)$, $\dot{E}_{21}(t)$ в круговом базисе, как $\dot{R}_1(\tau)|_{\tau=0} = \dot{R}_1(0)$. При этом

$$R_1(0) = |\dot{k}|^2 \cdot \dot{\mu} \cdot \exp(j\psi) \cdot R(0) .$$

Найдя интенсивность компоненты $\dot{E}_{21}(t)$ на частоте Ω_1

$$\dot{E}_{21}(t) \cdot \dot{E}_{21}^*(t) = |\dot{k}|^2 \cdot R(0) ,$$

и пронормировав $\dot{R}_1(0)$ на эту величину, получаем

$$\dot{R}_1^H(0) = \frac{\dot{R}_1(0)}{\dot{E}_{21}(t) \cdot \dot{E}_{21}^*(t)} = \dot{\mu} \cdot \exp(j\psi) = \mu_d \cdot \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\theta - \pi/2) . \quad (3.7)$$

Аналогично можно найти нормированную взаимную интенсивность ортогональных составляющих $\dot{E}_{12}(t)$ и $\dot{E}_{22}(t)$ на частоте Ω_2 :

$$\dot{R}_2^H(0) = \frac{\dot{R}_2(0)}{\dot{E}_{12}(t) \cdot \dot{E}_{22}^*(t)} = \dot{\mu}^* \cdot \exp(j\psi) = \mu_d \cdot \exp(-j\psi) \cdot \exp(j2\theta - \pi/2) . \quad (3.8)$$

Взятые по отдельности $\dot{R}_1^H(0)$, $\dot{R}_2^H(0)$, не являются однозначной оценкой инварианта МР объекта. Однако, совместное измерение величин (3.7), (3.8) при излучении сигналов с левой и правой круговыми поляризациями на разных частотах позволяют определить коэффициент поляризационной анизотропии $\dot{\mu}$ однозначно. При этом для измерения модуля μ_d комплексного коэффициента оказывается достаточно оценить лишь одну из величин : $\dot{R}_1^H(0)$ или $\dot{R}_2^H(0)$.

При РЛ обзоре земной (водной) поверхности принимаемые сигналы изменяются в большом диапазоне порядка 60–80 дБ. Обзорная РЛС "Кедр-2" обеспечивает измерение $|\dot{R}_1(0)| \sim \mu_d$ в этом диапазоне, благодаря предложенной в [17] процедуре :

— одна из компонент принятого сигнала на ПЧ f_{Π} сдвигается в частотной области на величину Δf , образуя тем самым сигнал вида $\dot{E}_1'(t) = A_1 \cdot \exp(j(2\pi \cdot (f + \Delta f) \cdot t + \varphi))$, где A_1 — амплитуда огибающей ортогональной компоненты $\dot{E}_1(t)$;

— формируется сигнал, представляющий сумму основной $\dot{E}_1(t)$ и ортогональной составляющей $\dot{E}_2(t)$:

$$A_1 \cdot \exp(j(2\pi \cdot (f_{\Pi} + \Delta f) \cdot t + \varphi_1)) + A_2 \cdot \exp(j(2\pi \cdot f_{\Pi} + \varphi_2)) ,$$

где A_2 — амплитуда огибающей компоненты $\dot{E}_2(t)$;

— полученный суммарный сигнал жестко ограничивается по амплитуде ;

— ограниченный сигнал поступает на два полосовых фильтра с частотами настройки $(f_{\Pi} + \Delta f)$ и f_{Π} ;

— на выходе каждого из фильтров сигналы линейно детектируются, после чего определяется разница амплитуд ΔU продетектированных сигналов ; при этом величина ΔU является однозначной функцией отношения амплитуд A_1, A_2 огибающих ортогональных компонент $\dot{E}_1(t), \dot{E}_2(t)$

$$\Delta U \sim A_1 / A_2 = (A_1 \cdot A_2) / A_2^2 ,$$

прямо пропорциональной взаимной интенсивности $\dot{E}_1(t), \dot{E}_2(t)$, нормированной к квадрату большей из величин, т.е. параметру μ_d .

3.2. Описание структурной схемы моноимпульсного поляризационного измерителя.

На основе описанной процедуры была синтезирована структура моноимпульсной обзорной поляризационной РЛС "Кедр-2", реализующей алгоритм оценки модуля μ_d комплексной степени анизотропии объектов. В соответствии со структурной схемой (рис.3.1), работа ОРЛС "Кедр-2" происходит следующим образом. ВЧ импульсные сигналы, вырабатываемые генератором СВЧ стандартного передатчика МРЛС "Гроза", поступают на двухкомпонентную антенну A . В круглом волноводе облучателя антенны размещена $\lambda/4$ -волновая фазовая пластинка, плоскость которой ориентирована под углом 45° к осям плеч поляризационного разделителя. Ее действие заключается в формировании излучаемого сигнала с круговой поляризацией заданного направления вращения и

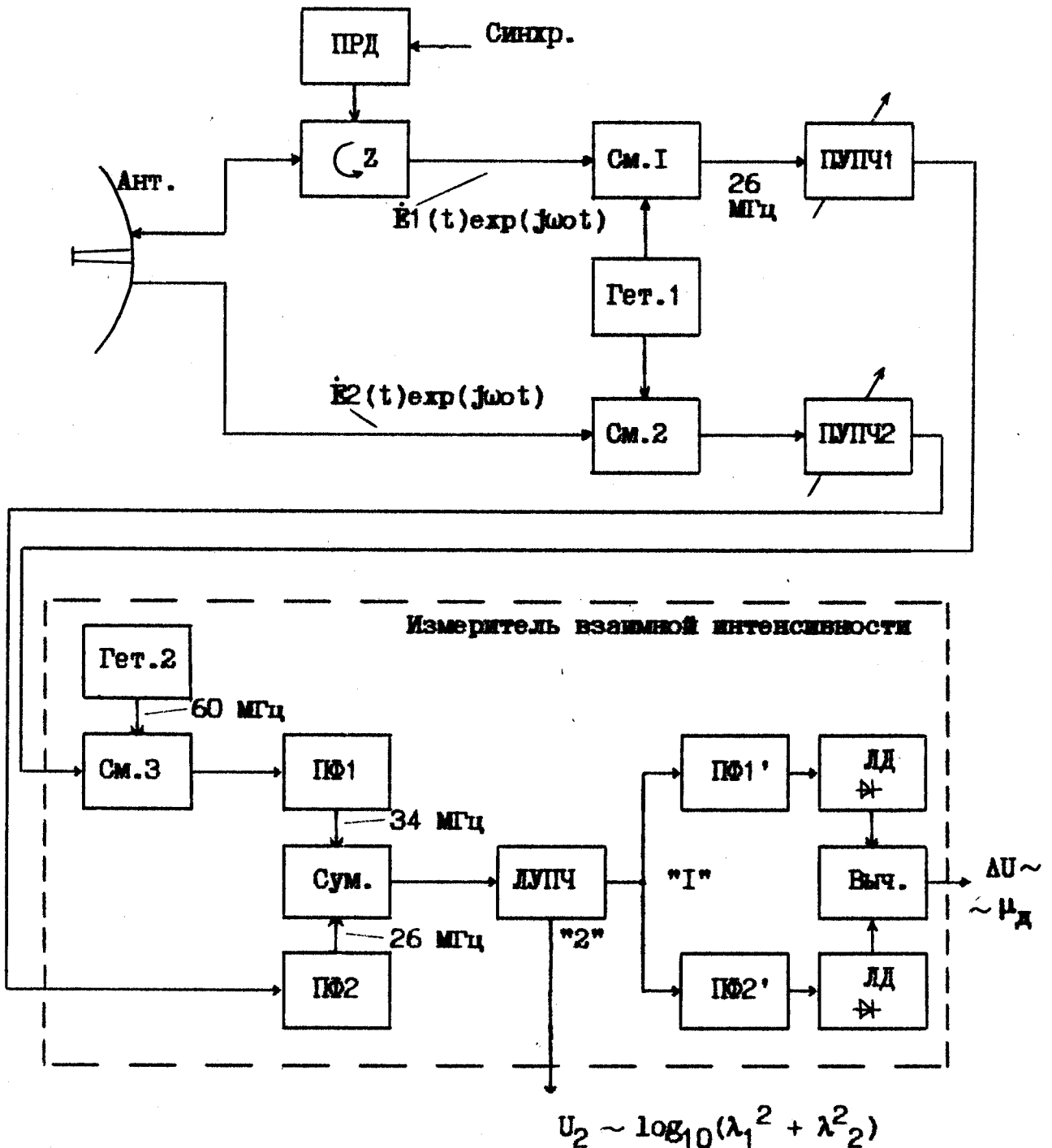


Рис.3.1. Структурная схема моноимпульсной поляризационной РЛС "Кедр-2": ПРД - передатчик, Z - циркулятор, См₁ - смеситель, Гет - гетеродин, ПУПЧ - предварительный УПЧ, ПФ - полосовой фильтр, Сум - сумматор, ЛУПЧ - логарифмический УПЧ, ЛД - линейный детектор, Выч - вычитающее устройство.

разложение рассеянной объектом волны на две ортогональные компоненты в круговом базисе. Принятые сигналы

$$\dot{E}_1(t) \cdot \exp(j\omega_0 t) \text{ и } \dot{E}_2(t) \cdot \exp(j\omega_0 t),$$

соответствующие ортогональным компонентам, преобразуются на промежуточную частоту 26 МГц, усиливаются и поступают на измеритель взаимной интенсивности. При этом один из сигналов ПЧ $\dot{E}_1(t) \cdot \exp(j\omega_H t)$ подается на смеситель, на второй вход которого поступает напряжение гетеродина с частотой 60 МГц. Составляющая с разностной частотой 34 МГц выделяется полосовым фильтром ПФ_1 . Полоса пропускания ПФ_1 ΔF выбрана несколько больше $\Delta F_{\text{луч}}$ (≈ 1.5 МГц) и почти не оказывает влияния на форму сигнала $\dot{E}_1(t)$. Поскольку ПФ_1 вносит задержку, равную $\tau_{\text{ф}} \sim 1/\Delta F$, сигнал $\dot{E}_2(t)$ пропускают через полосовой фильтр ПФ_2 . Частотная характеристика этого фильтра идентична АЧХ ПФ_1 , а частота настройки равна 26 МГц. Затем выходные сигналы 1-го и 2-го ПФ суммируются и поступают на логарифмический усилитель промежуточной частоты (ЛУПЧ), который выполняет функции жесткого ограничения амплитуды суммарного входного сигнала (выход "1") и детектирования огибающей входного сигнала в широком динамическом диапазоне (выход "2"), пропорциональной ЭПР наблюдаемого объекта

$$U_2 \sim \log_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2).$$

При этом средняя частота полосы пропускания для выхода "1" выбрана равной 30 МГц, а ширина ПП Δf по уровню -3 дБ составляет ≈ 15 МГц. Для выхода "2" полоса пропускания согласована с длительностью излучаемого импульса (1 мкс) и равна примерно 1.5 МГц. С выхода "1" ЛУПЧ жестко ограниченный сигнал поступает на входы полосовых фильтров $\text{ПФ}_1'$ с АЧХ, аналогичными характеристикам фильтров ПФ_1 . Выходные сигналы фильтров $\text{ПФ}_1'$ детектируются линейными детекторами и поступают на вычитающее устройство. Напряжение, формируемое на выходе этого устройства, пропорционально отношению амплитуд $\dot{E}_1(t)$, $\dot{E}_2(t)$.

На рис.3.2. приведена экспериментальная нормированная зависимость выходного напряжения ΔU от отношения амплитуд A_1 / A_2 входных сигналов $\dot{E}_1(t)$, $\dot{E}_2(t)$ сумматора на входе ЛУПЧ, определяющего величину модуля μ_D коэффициента поляризационной анизотропии объекта.

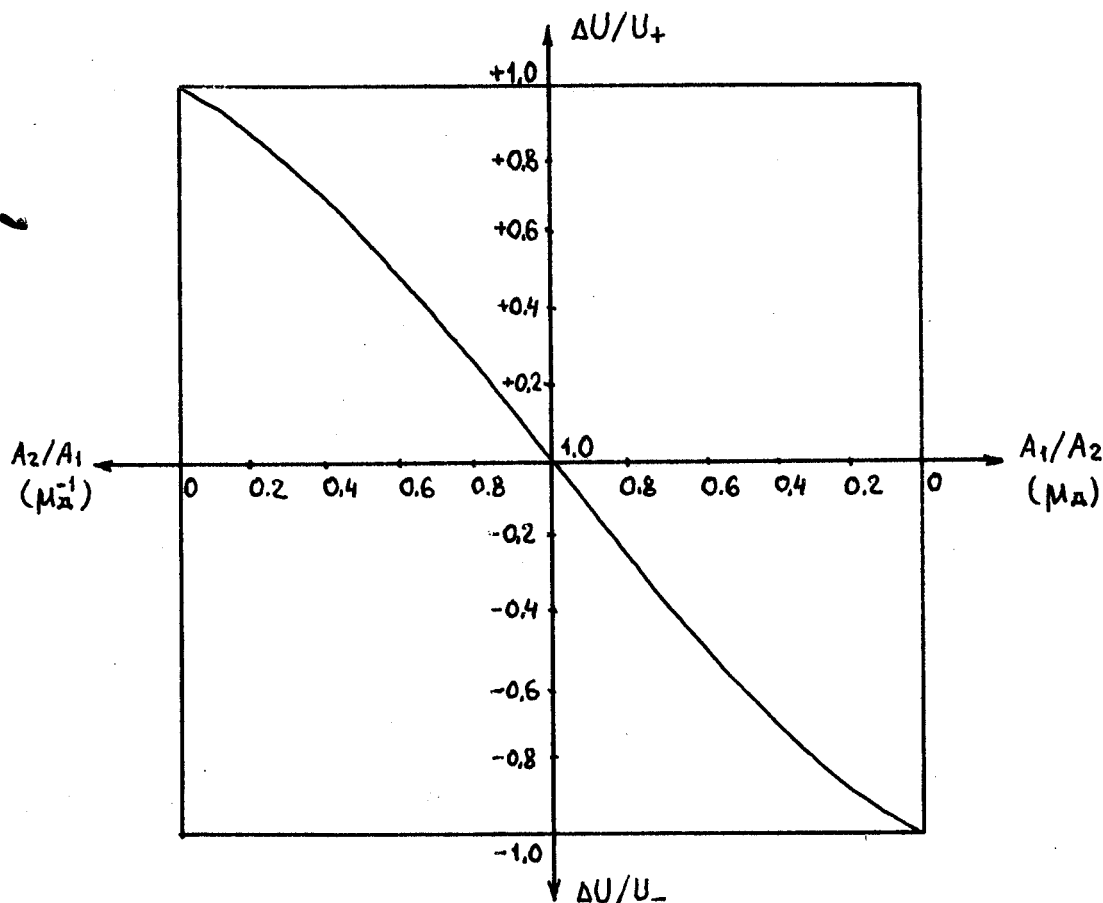


Рис.3.2. Нормированная зависимость устройства вычисления отношения амплитуд принимаемых сигналов.

Во всем диапазоне изменения отношения A_1 / A_2 выходное напряжение ΔU измерителя взаимной интенсивности меняется от U_- до U_+ , однозначно определяя величину μ_D РЛ объекта. Выходное напряжение $\Delta U < 0$ в случае, когда отношение

$$\frac{A_1}{A_2} = \mu_D = \left[\frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 - 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta \varphi}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta \varphi} \right]^{0.5},$$

принадлежит интервалу $(0 ; 1)$. Максимального отрицательного значе-

ния ΔU достигает для поляризационно-изотропных целей с действительными собственными числами матрицы рассеяния (трехгранный УО, сфера, вытянутый цилиндр и др.), для которых

$$\mu_d |_{\Delta\varphi=0} = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) |_{\lambda_1=\lambda_2} = 0.$$

При этом отрицательная ветвь графика рис.3.2 позволяет оценивать величину μ_d непосредственно. При равенстве амплитуд A_1 и A_2 ($\mu_d = 1$), характеризующим вырожденные объекты типа дипольного отражателя, или при $\Delta\varphi = 90^\circ$, величина $\Delta U = 0$. Положительная полярность выходного напряжения ΔU измерителя свидетельствует о наличии фазового сдвига, вносимого целью, большего 90° . Для поляризационно-изотропных объектов типа двухгранного углового отражателя ($\Delta\varphi = 180^\circ$) это напряжение достигает максимума. При этом положительная ветвь графика рис.3.2 отображает совокупность объектов, для которых μ_d изменяется от 1 до ∞ . Таким образом, двуполярный характер изменения выходного напряжения ΔU измерителя взаимной интенсивности позволяет однозначно отобразить величину μ_d объектов во всем диапазоне ее возможных значений.

Регистрация и статистическая обработка измеряемых в ОРЛС "Кедр-2" параметров (ЭПР , μ_d) обеспечивалась вычислительным комплексом на базе мини-ЭВМ. Полученные результаты обработки отображались с помощью двухкоординатного самописца. Калибровка поляризационного канала μ_d локатора "Кедр-2" определяется особенностями измерителя отношения амплитуд A_1 / A_2 входных сигналов. Так, при равенстве $A_2 = 0$ на входе сумматора выходное напряжение измерителя становится максимально положительным: $\Delta U = U_+$, или максимально отрицательным: $\Delta U = U_-$ ($A_1 = 0$). Таким образом, обеспечивая в процессе калибровки выполнение условий:

$$A_2 = \text{const}, A_1 = 0 \quad (\Delta U = U_-); \quad A_1 = \text{const}, A_2 = 0 \quad (\Delta U = U_+);$$

$$A_1 = A_2 = \text{const}, \quad (\Delta U = 0),$$

в ОЗУ мини-ЭВМ формировались соответствующие калибровочные уровни ΔU . Хранение в памяти ЭВМ калибровочной кривой вычислителя отношений (рис.3.2) позволяла по принятой временной реализации напряжения измерителя $\Delta U(t)$ сформировать временную реализацию безразмерной величины модуля $\mu_d(t)$ комплексного коэффициента поляризационной анизотропии наблюдаемого РЛ объекта. Для получения однозначных результатов расчета статистических параметров временных реализаций μ_d использовалась величина μ_d' (2.95), изменяющаяся в интервале $(-1; +1)$. "Энергетический" канал ОРЛС "Кедр-2", в котором дается оценка логарифма полной ЭПР объекта калибровался традиционным способом без каких-либо особенностей. Хранение в памяти мини-ЭВМ нормированной логарифмической АХ канала дает возможность формировать временные реализации $U_2(t) \sim \log_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)$ в единицах дБ/Вт.

3.3. Алгоритм измерения поляризационных параметров в обзорном локуторе модуляционного типа.

В общем случае матрица рассеяния РЛ объекта записывается в поляризационном базисе локутора следующим образом [6] :

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} C_\epsilon & JS_\epsilon \\ JS_\epsilon & C_\epsilon \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_\theta & S_\theta \\ -S_\theta & C_\theta \end{bmatrix} \cdot [\dot{S}_{xy}] \cdot \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta \\ S_\theta & C_\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_\epsilon & JS_\epsilon \\ JS_\epsilon & C_\epsilon \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

где $C_\epsilon = \cos(\epsilon)$, $S_\epsilon = \sin(\epsilon)$, $C_\theta = \cos(\theta)$, $S_\theta = \sin(\theta)$, ϵ и θ — углы эллиптичности и ориентации измерительного базиса РЛС,

$[\dot{S}_{xy}]$ — МР объекта в декартовом поляризационном базисе.

В соответствии с (2.32), матрица $[\dot{S}_{xy}]$ имеет вид :

$$[\dot{S}_{xy}] = [\widetilde{T}] \cdot [\dot{S}_c] \cdot [T],$$

где $[\dot{S}_c]$ — матрица рассеяния объекта в собственном ПБ (СПБ) с углом эллиптичности ϵ_0 и углом ориентации θ_0 ,

$$[\uparrow] = \begin{bmatrix} c_{\epsilon_0} & -j s_{\epsilon_0} \\ -j s_{\epsilon_0} & c_{\epsilon_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_0} & s_{\theta_0} \\ -s_{\theta_0} & c_{\theta_0} \end{bmatrix},$$

(...) — знак транспонирования.

Предположим, что поляризационные базисы объекта и РЛС являются линейными ($\epsilon_0 = \epsilon = 0^\circ$). При этом МР запишется следующим образом :

$$\begin{aligned} [\dot{S}] &= \begin{bmatrix} c_\theta & s_\theta \\ -s_\theta & c_\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_0} & -s_{\theta_0} \\ s_{\theta_0} & c_{\theta_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_0} & s_{\theta_0} \\ -s_{\theta_0} & c_{\theta_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta \\ s_\theta & c_\theta \end{bmatrix} = \\ &= \frac{\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2}{2} \cdot \begin{bmatrix} I + \dot{\mu} \cdot \cos 2(\theta - \theta_0) & -\dot{\mu} \cdot \sin 2(\theta - \theta_0) \\ -\dot{\mu} \cdot \sin 2(\theta - \theta_0) & I - \dot{\mu} \cdot \cos 2(\theta - \theta_0) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Рассмотрим одноканальную РЛС модуляционного типа, в которой формирование псевдонеполаризованного потока излучения происходит с помощью вращающейся полуволновой фазовой пластинки. Запишем вектор Джонса рассеянного объектом поля, по аналогии с (3.2), в виде :

$$\dot{\vec{E}}(t) = [\dot{S}] \cdot \dot{\vec{E}}_0(t). \quad (3.11)$$

Пусть на вход СВЧ — устройства, содержащего указанную пластинку, по "основному" каналу поступает вертикально поляризованная волна

$$\dot{\vec{E}}_0(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

При вращении полуволновой фазовой пластинки с угловой частотой Ω , угол ориентации поляризационного базиса локатора θ изменяется во времени с удвоенной частотой Ω : $\theta(t) = 2 \cdot \Omega \cdot t$ [99]. При этом в выражении (3.10) для МР объекта, записанной в поляризационном базисе РЛС, аргумент 2θ необходимо заменить на $4 \cdot \Omega \cdot t$. Подставляя полученное выражение для матрицы рассеяния и (3.12) в (3.11), запишем вектор Джонса принятого локатором сигнала в следующем виде :

$$\dot{\vec{E}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_1(t) \\ \dot{E}_2(t) \end{bmatrix} = \frac{\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2}{2} \cdot \begin{bmatrix} -\dot{\mu} \cdot \sin(4\Omega t - 2\theta_0 + \pi) \\ I - \dot{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Представим комплексную огибающую ВЧ сигнала в "основном" канале и ее модуль следующим образом :

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{E}}_2(t) &= 0.5 \cdot [(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) - (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0)] , \\ |\dot{\tilde{E}}_2(t)| &= (\dot{\tilde{E}}_2(t) \cdot \dot{\tilde{E}}_2^*(t))^{0.5} = 0.5 \cdot [\Sigma - 2 \cdot (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \cdot \\ &\quad \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + \Delta \cdot \cos^2(4\Omega t - 2\theta_0)]^{0.5} , \quad (3.14)\end{aligned}$$

где $\Sigma = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta\varphi$, $\Delta = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta\varphi$.

Из выражения (3.14) следует, что для РЛ объектов с линейными собственными поляризациями, у которых фазовый сдвиг $\Delta\varphi = 0$ и $\Delta\varphi = 180^\circ$:

$$|\dot{\tilde{E}}_2(t)| = 0.5 \cdot | (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) - (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) | , \quad (3.15)$$

$$|\dot{\tilde{E}}_2(t)| = 0.5 \cdot | (\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2) - (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) | . \quad (3.16)$$

Вынося из подкоренного выражения (3.14) величину Σ и учитывая, что $\cos^2(4\Omega t - 2\theta_0) = 0.5 \cdot (1 + \cos(8\Omega t - 4\theta_0))$, перепишем формулу для модуля огибающей в "основном" канале следующим образом :

$$\begin{aligned}|\dot{\tilde{E}}_2(t)| &= 0.5 \cdot (\Sigma)^{0.5} \cdot [(1 + 0.5 \mu_d^2) - 2 \cdot \tilde{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + \\ &\quad + 0.5 \cdot \mu_d^2 \cdot \cos(8\Omega t - 4\theta_0)]^{0.5} . \quad (3.17)\end{aligned}$$

Здесь выражения для μ_d и $\tilde{\mu}$ определяются (1.19) и (1.22).

Из анализа (3.17) следует, что при излучении РЛ сигнала с вращающейся линейной поляризацией, огибающая принятого сигнала в "основном" канале содержит гармонические составляющие с частотами, кратными частоте Ω вращения $\lambda/2$ -волнового фазового компенсатора.

Для измерения параметров наблюдаемых объектов в большом динамическом диапазоне изменения входных сигналов приемный тракт обзорных РЛС имеет логарифмическую амплитудную характеристику (ЛАХ). Можно показать, что на выходе приемного тракта с такой амплитудной характеристикой огибающая радиолокационного сигнала будет иметь вид

$$k \cdot \log_{10} |\dot{\tilde{E}}_2(t)| = U_0 + 0.5 \cdot k \cdot \log_{10} [(1 + 0.5 \cdot \mu_d^2) -$$

$$- 2 \cdot \tilde{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + 0.5 \cdot \mu_d^2 \cdot \cos(8\Omega t - 4\theta_0)] , \quad (3.18)$$

$$\text{где } U_0 = k \cdot [\log_{10} 0.5 + 0.5 \cdot \log_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta \varphi)] . \quad (3.19)$$

Очевидно, что в спектре огибающей $k \cdot \log_{10} |\dot{E}_2(t)|$ принятого сигнала присутствуют постоянная составляющая U_0 , сумма гармонических составляющих с частотами 4Ω , 8Ω и набор гармоник, обусловленных нелинейностью приемного тракта. При определенных условиях амплитуды 4-ой и 8-ой гармоник частоты Ω вращения фазовой пластинки несут информацию о поляризационных параметрах $\tilde{\mu}$, μ_d^2 объектов.

Представим осциллирующую составляющую в огибающей сигнала, как

$$0.5 \cdot k \cdot \log_{10} (I + F(t)) , \quad (3.20)$$

где $F(t) = 0.5 \cdot \mu_d^2 - 2 \cdot \tilde{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + 0.5 \cdot \mu_d^2 \cdot \cos(8\Omega t - 4\theta_0)$, и воспользуемся степенным разложением логарифмической функции [96]

$$\log_{10}(I + x) \approx 0.434 \cdot \ln(I + x) \approx 0.434 \cdot (x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots) . \quad (3.21)$$

Разложение такого вида определено для величины параметра x , лежащего в интервале $-I < x \leq +I$. Пусть $x = F(t)$. Погрешность представления $\log_{10}(I + F(t))$ будет зависеть от количества слагаемых в (3.21). Ограничимся лишь линейным членом разложения, тогда

$$0.5 \cdot k \cdot \log_{10} (I + F(t)) \approx 0.217 \cdot k \cdot F(t) . \quad (3.22)$$

При этом погрешность представления (3.22) будет изменяться во времени. Определим величину средней, на интервале $T \geq 2\pi/\Omega$, погрешности линейного представления следующим образом :

$$\delta, \% = \left| \frac{\log_{10} (I + \overline{F(t)}) - 0.434 \cdot \overline{F(t)}}{\log_{10} (I + \overline{F(t)})} \right| \cdot 100 \% .$$

Здесь

$$\overline{F(t)} = 0.5 \cdot \mu_d^2 - 2 \cdot \tilde{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + 0.5 \cdot \mu_d^2 \cdot \cos(8\Omega t - 4\theta_0) = 0.5 \cdot \mu_d^2$$

При периодическом изменении аргумента $(4\Omega t - 2\theta_0)$ от 0 до 360° величина $F(t)$ будет изменяться от $(\mu_d^2 - 2 \cdot \tilde{\mu})$ до $(\mu_d^2 + 2 \cdot \tilde{\mu})$. Тогда

при $F(t)_{\text{макс}} = I$ величина средней погрешности линейного представления $0.5 \cdot k \cdot \log_{10}(I + F(t))$ будет лежать в пределах $\pm 22\%$.

Однако, в некоторой области изменения параметров ρ_0 и $\Delta\varphi$, определяющих величину μ_d^2 , значения $F(t)$ могут превосходить I . В двумерном пространстве инвариантных признаков ($\rho_0, \Delta\varphi$) существует область, в которой $\mu_d^2 > 2$, что не позволяет использовать разложение (3.21). На рис.3.3 она обозначена отсутствием штриховки. Тогда, как в заштрихованной области представление огибающей сигнала на выходе логарифмического приемного тракта линейным членом разложения (3.21) вполне допустимо в следующем виде:

$$k \cdot \log_{10} |\dot{E}_2(t)| \approx U_0' + 0.217 \cdot k \cdot [- 2 \cdot \tilde{\mu} \cdot \cos(4\Omega t - 2\theta_0) + 0.5 \cdot \mu_d^2 \cdot \cos(8\Omega t - 4\theta_0)] , \quad (3.23)$$

$$\text{где} \quad U_0' = U_0 + 0.108 \cdot k \cdot \mu_d^2 . \quad (3.24)$$

Подобное представление позволяет утверждать о наличии в спектре огибающей $k \cdot \log_{10} |\dot{E}_2(t)|$ постоянной составляющей U_0' и двух гармонических составляющих с частотами 4Ω и 8Ω , соответственно. Амплитуды этих гармоник несут информацию о действительной части ($\tilde{\mu}$) и квадрате модуля (μ_d^2) комплексного коэффициента анизотропии μ объектов. Поэтому, выделив амплитуды

$$\left. \begin{aligned} A_{4\Omega} &= (0.434 \cdot k) \cdot \tilde{\mu} \approx 0.4 \cdot k \cdot \tilde{\mu} , \\ A_{8\Omega} &= (0.108 \cdot k) \cdot \mu_d^2 \approx 0.1 \cdot k \cdot \mu_d^2 , \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

с помощью линейных детекторов на выходах соответствующих узкополосных фильтров, можно получить оценку $\tilde{\mu}$ и μ_d^2 РЛ объектов.

Рассмотрим более подробно постоянную составляющую U_0' .

Подставляя (3.19) в (3.24), получим

$$U_0' = k \cdot [\log_{10} 0.5 + 0.5 \cdot \log_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cdot \cos \Delta\varphi) + 0.108 \cdot \mu_d^2] .$$

Представим два последних слагаемых в квадратных скобках в виде

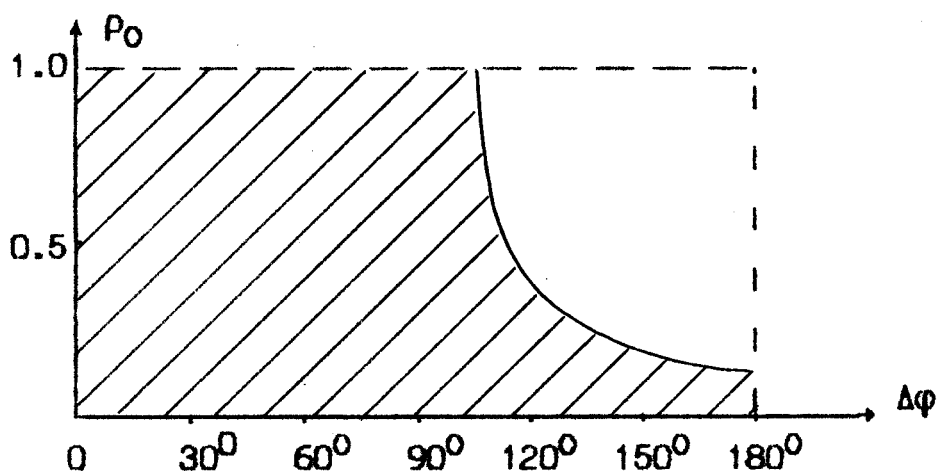




Рис.3.3. Пределы изменения инвариантных параметров матрицы рассеяния РЛ объекта :

-  - область изменения параметров ρ_0 , $\Delta\varphi$, в которой средняя погрешность линейного представления логарифма огибающей принятого сигнала меньше допустимой ;
-  - область изменения параметров ρ_0 , $\Delta\varphi$, в которой средняя погрешность больше заданной.

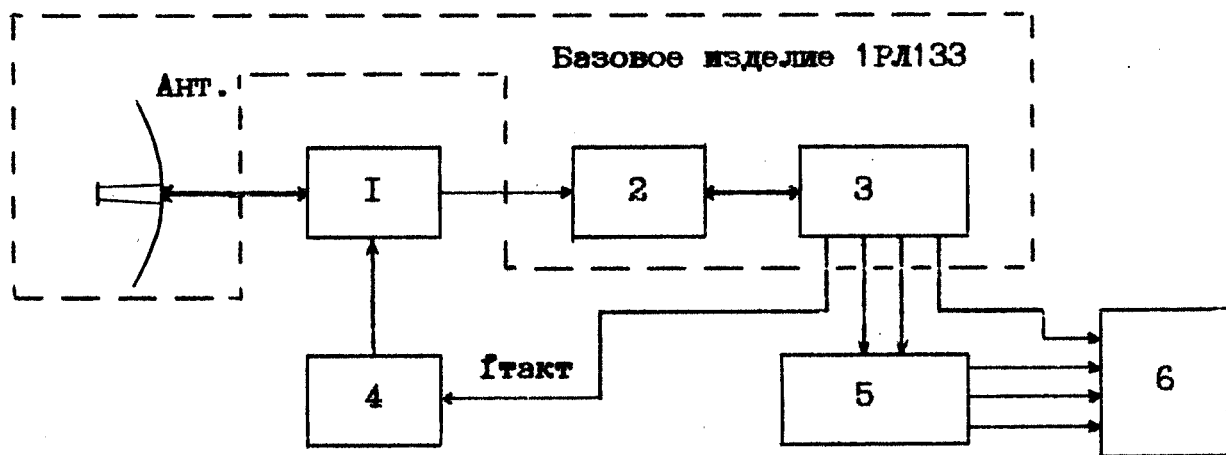


Рис.3.4. Структурная схема поляризационного локатора модуляционного типа на базе изделия 1PL133 : I - поляризационный модулятор с вращающейся полуволновой фазовой пластинкой ; 2 - приемо-передающий блок ; 3 - блок управления и индикации ; 4 - устройство управления модулятором ; 5 - устройство обработки сигналов ; 6 - регистратор.

$$0.5 \cdot \log_{10}(\Sigma) = 0.5 \cdot \log_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + 0.5 \cdot \log_{10}(I + q),$$

$$0.108 \cdot \mu_{\Delta}^2 = 0.108 \cdot (\Delta / \Sigma) = 0.108 \cdot (I - q) / (I + q),$$

где

$$\Sigma = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta \varphi, \quad \Delta = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \cos \Delta \varphi,$$

$$q = 2 \cdot \rho_0 \cdot \cos \Delta \varphi / (I + \rho_0^2).$$

При изменении параметров ρ_0 , $\Delta \varphi$ РЛ объектов с линейными собственными поляризациями в пределах заштрихованной области на рис.3.3, величина $q \in (-0.33 ; +1.0)$. Воспользовавшись разложением (3.21) логарифмической функции, и ограничиваясь тремя его членами, запишем

$$0.5 \cdot \log_{10}(I + q) \approx 0.217 \cdot (q - \frac{q^2}{2} + \frac{q^3}{3}) = 0.217 \cdot m.$$

При этом $U_o' = k \cdot [0.5 \cdot \log_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + D]$, где величина $D = \log_{10} 0.5 + 0.217 \cdot m + 0.108 \cdot (I - q) / (I + q)$. С учетом диапазона изменения величины q в заштрихованной области, параметр $D \in (-0.19 ; -0.12)$. Тогда при условии $(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \gg I$, постоянная составляющая U_o' в огибающей принятого сигнала может служить оценкой логарифма его полной ЭПР

$$U_o' \approx 0.5 \cdot k \cdot \log_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2).$$

3.4. Описание структурной схемы поляризационного измерителя модуляционного типа.

На основе проведенного анализа была синтезирована структура одноканального поляризационного локатора, выполненного на базе РЛС разведки поля боя ИРЛИЗЗ [99]. Данная РЛС оценивает амплитуды рассеянных объектами сигналов для фиксированного азимута на всем интервале дальностей, а также обеспечивает штатный режим селекции движущихся целей. В соответствии с рассмотренным в разделе 3.3 алгоритмом, базовое изделие ИРЛИЗЗ было дополнено поляризационным модулятором и устройством его управления, а также устройством обра-

ботки принятых сигналов. Внесенные в конструкцию изменения, связанные с закреплением на антенне поляризационного модулятора, практически не затронули ИРЛЗЗ и не повлияли на форму огибающей принимаемого сигнала.

Обобщенная структурная схема макета ОРЛС модуляционного типа приведена на рис.3.4. При этом модифицированный локатор работает следующим образом. ВЧ импульсные сигналы, вырабатываемые генератором СВЧ в приеме-передающем блоке, через переход с прямоугольного на круглый волновод поступают на поляризационный модулятор. Действие этого модулятора заключается во вращении плоскости поляризации излучаемого сигнала с частотой равной удвоенной частоте вращения полуволновой фазовой пластинки. Рассеянный РЛ объектом сигнал проходит через модулятор поляризации, усиливается и преобразуется на промежуточную частоту в приеме-передающем блоке. После прохождения логарифмического тракта УПЧ, детектирования и усиления сигналов, происходит выделение огибающей импульсной последовательности со стробируемого кванта дальности. Затем напряжение, пропорциональное огибающей видеоимпульсов, поступает в устройство обработки. В этом блоке производится выделение амплитуд 4-ой (43.4 Гц) и 8-ой (86.8 Гц) гармоник частоты вращения полуволновой фазовой пластинки, несущих информацию о поляризационных параметрах цели, и постоянной составляющей, пропорциональной логарифму ее полной ЭПР.

Для регистрации параметров РЛ объектов использовался многоканальный быстродействующий самописец. При этом осуществлялась запись 4 информативных параметров : "логарифм полной ЭПР объекта" (1 канал), "напряжение с выхода видеоусилителя фазового детектора" (2 канал (штатный) селекции движущихся целей), "амплитуда 4-ой гармоники частоты вращения поляризационного модулятора, пропорциональная параметру $\tilde{\mu} - \text{Re}(\mu)$ объекта " (3 канал), "амплитуда 8-ой гармоники, пропорциональная параметру μ_d^2 объекта " (4 канал).

Основной задачей, поставленной перед одноканальным поляризационным локатором, было обнаружение объектов по поляризационному признаку и сравнение полученных данных с результатами измерения РЛС ИРЛ133 в штатном режиме, не требующее измерения поляризационных параметров объектов с большой точностью. В этом случае точность калибровки поляризационных каналов могла быть не высокой, а калибровочные расчеты и измерения использовались для качественного объяснения поляризационных свойств РЛ целей. При этом канал "полной ЭПР" калибровался традиционным способом, без каких-либо особенностей.

Главная проблема поляризационных РЛС заключается в калибровке каналов измерения поляризационных характеристики РЛ объектов. Для рассмотренного выше алгоритма поляризационная калибровка состоит в определении соотношения между амплитудами $A_{4\Omega}$ и $A_{8\Omega}$ гармонических составляющих в зависимости от инвариантов ρ_0 , $\Delta\varphi$ матрицы рассеяния объектов. Поскольку данная калибровка не может быть выполнена какими-либо внутренними способами, для ее проведения необходимо использовать эталонные РЛ отражатели с известными поляризационными свойствами. В данном случае поляризационная калибровка включала в себя теоретический расчет выходного эффекта каналов и определения пересчетных коэффициентов, измеренных для трех эталонных РЛ объектов с заведомо известными поляризационными свойствами.

На рис.3.5, 3.6 приведены теоретические графики изменения параметров $\tilde{\mu}$ и μ_d^2 в зависимости от величин ρ_0 и $\Delta\varphi$. Эти графики позволяют оценить амплитуды 4-ой (рис.3.5), 8-ой (рис.3.6) гармоник и соотношение между ними, поскольку в соответствии с (3.25) $A_{4\Omega} \sim \tilde{\mu}$, $A_{8\Omega} \sim \mu_d^2$. Как видно из рис.3.5, при фазовом сдвиге до 90° зависимость $A_{4\Omega}(\Delta\varphi)$ выражена достаточно слабо. Начиная со значений фазового сдвига $\Delta\varphi \approx 120^\circ$, происходит рост $A_{4\Omega}$, причем наибольшие значения амплитуды этой гармоники следует ожидать для объектов, близких к поляризационно-изотропным ($\rho_0 \rightarrow 1$). На рис.3.6 изображена

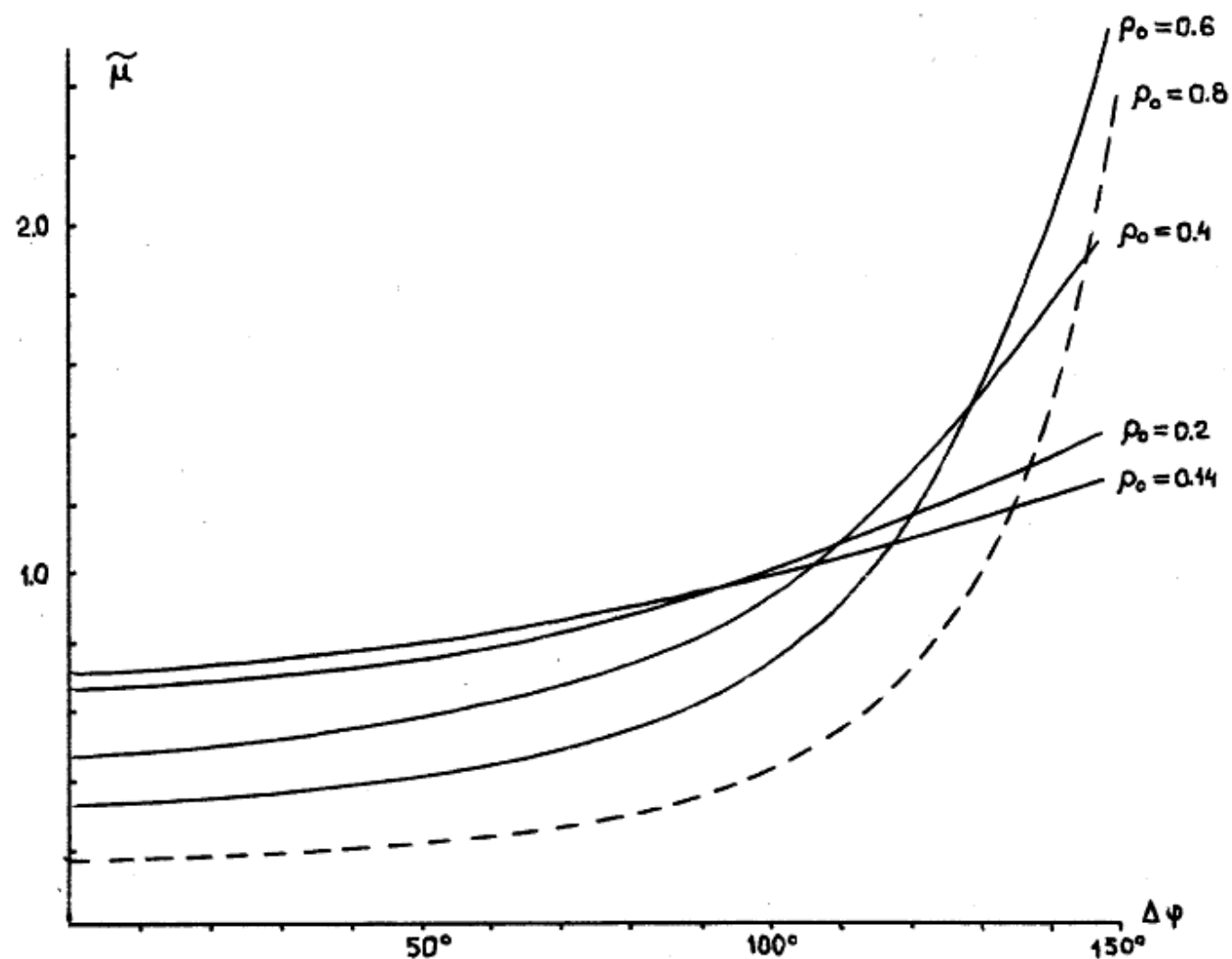


Рис.3.5. Теоретические зависимости реальной части $\tilde{\mu}$ комплексного коэффициента поляризационной анизотропии от инвариантных параметров ($\Delta\varphi$, ρ_0) матрицы рассеяния РЛ объекта.

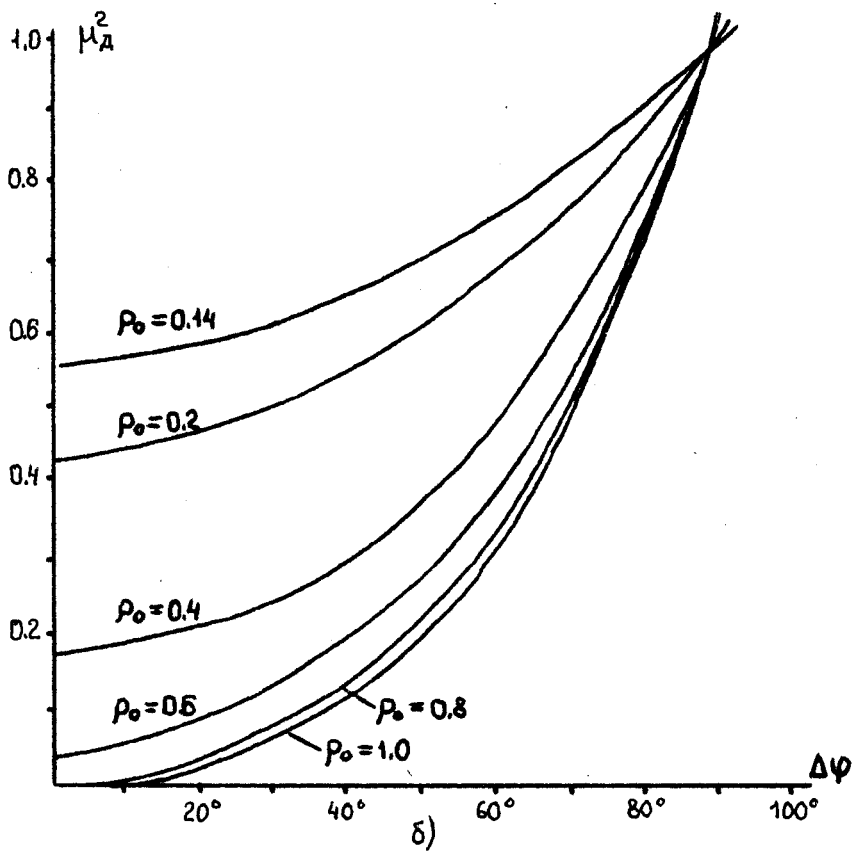
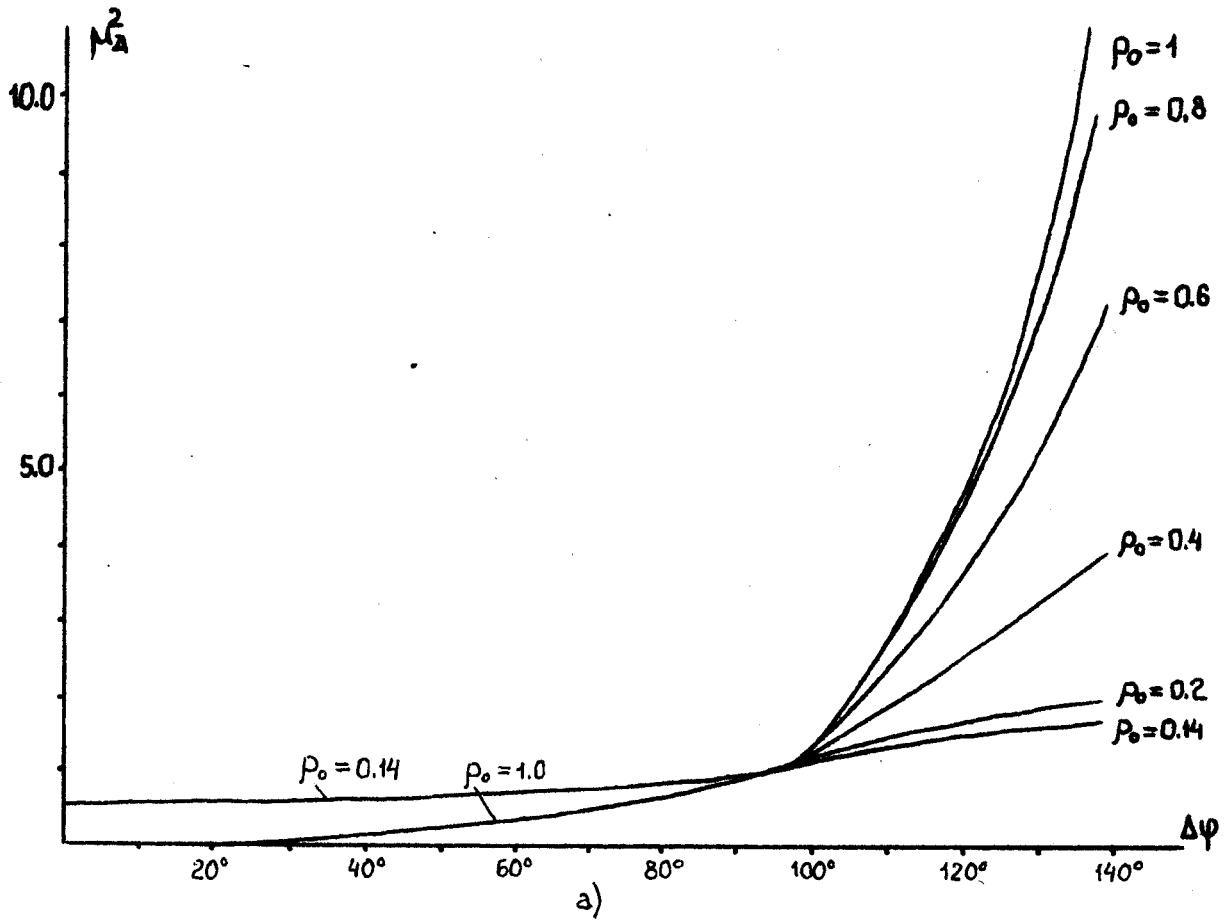


Рис.3.6. Теоретические зависимости квадрата модуля μ_d^2 комплексного коэффициента поляризационной анизотропии от инвариантных параметров ($\Delta\varphi$, ρ_0) матрицы рассеяния РЛ объекта.

теоретическая зависимость квадрата модуля μ_d^2 комплексной степени анизотропии, определяемого по амплитуде 8-ой гармоники. На практике зависимость амплитуды $A_{8\Omega}$ от параметра ρ_0 будет выражено слабее при изменении $\Delta\varphi$ от 0° до 90° , чем это следует из рис.3.6, поскольку при фазовом сдвиге $\Delta\varphi = 0^\circ$ (см.(3.15)) 8-ая гармоника в спектре огибающей принятого сигнала отсутствует, а, в соответствии с представлением $A_{8\Omega} \sim \mu_d^2$ (см.(3.25)), $A_{8\Omega} \neq 0$. Подобное расхождение объясняется тем, что выражение (3.25) получено с учетом логарифмической АХ приемного тракта, ряда приближений и исключения из общего состава огибающей нескольких постоянных. Тем не менее, приведенные на рис.3.5, 3.6 графики позволяют оценить соотношения между 4-ой и 8-ой гармониками с приемлемой точностью.

На втором этапе поляризационной калибровки модифицированного локатора ИРЛ133 были определены соответствующие масштабные коэффициенты. При этом использовались эталонные РЛ объекты в виде трехгранных уголкового отражателей (УО), оборудованных поляризационными трансформаторами и позволяющих имитировать РЛ объект с известными инвариантами фактора формы ρ_0 и фазового сдвига $\Delta\varphi$. Калибровка поляризационных каналов РЛС проводилась в условиях, когда эталонные цели размещались на резиновой надувной лодке, а локатор был расположен вояле уреза воды. Все измерения проводились при отсутствии ветровой ряби на воде для эталонных целей :

1. открытый трехгранный уголкового отражатель ($\rho_0 = 1$, $\Delta\varphi = 0^\circ$) ;
2. УО с поляризационным трансформатором ($\rho_0 = 0.14$, $\Delta\varphi = 0^\circ$) ;
3. УО с поляризационным трансформатором ($\rho_0 = 0.50$, $\Delta\varphi = 90^\circ$).

В результате измерений были получены следующие величины отклонения перьев самописца, регистрирующего амплитуды $A_{4\Omega} \sim \tilde{\mu}$ и $A_{8\Omega} \sim \mu_d^2$:

эталонная цель N1 : $A_{4\Omega} = 0$ мм, $A_{8\Omega} = 0$ мм ;

эталонная цель N2 : $A_{4\Omega} = 10$ мм, $A_{8\Omega} = 0$ мм ;

эталонная цель N3 : $A_{4\Omega} = 6$ мм, $A_{8\Omega} = 8$ мм.

Для изотропной эталонной цели (N1) равенство 4-ой и 8-ой гармоник нулю полностью соответствует соотношению (3.25). Для объекта N2 с ярко выраженной анизотропией при нулевом фазовом сдвиге амплитуды гармоник $A_{4\Omega} \neq 0$, $A_{8\Omega} = 0$, что также соответствует данным анализа. Эталонной цели с промежуточными значениями инвариантов ρ_0 , $\Delta\varphi$ (N3) соответствуют амплитуды 4-ой и 8-ой гармоник отличные от нуля.

Поскольку при теоретическом анализе огибающей принятого сигнала использовался линейный член разложения (3.23) логарифмической АХ, а пиковый детектор огибающей и усилители каналов регистратора линейны, то сквозные тракты поляризационных каналов можно также считать линейными. Это позволило, вводя масштабные коэффициенты, основанные на измерении параметров эталонных РЛ объектов, пользоваться при интерпретации данных измерений графиками на рис.3.5, 3.6.

Проведенный в разделах 3.1–3.4 анализ двух типов поляризационных локаторов показал, что при определенных условиях измеряемые параметры поляризационной анизотропии μ_d , $\tilde{\mu}$, μ_d^2 описывают инварианты матрицы рассеяния объектов с достаточной точностью. При этом использование моноимпульсного метода μ_d' позволяет оценивать рассеивающие свойства объектов с быстроизменяющимися параметрами или наблюдать изменение свойств сосредоточенных целей, находящихся в движении. В свою очередь локатор модуляционного типа дает "интегральную" оценку поляризационных параметров РЛ объектов.

Таким образом, рассмотренные РЛ поляризационные системы могут быть использованы для экспериментальной проверки наблюдаемости различных сосредоточенных целей на фоне подстилающей поверхности и оценки величин поляризационного контраста реальных искусственных целей, а также для определения "чувствительности" измеряемых поляризационных параметров к перемещению сосредоточенных РЛ объектов на пересеченной местности. Рассмотрению этих вопросов посвящен следующий раздел.

3.5. Оценка величины поляризационного контраста РЛ целей по результатам экспериментальных измерений параметров поляризационной анизотропии и ЭПР.

3.5.1. Краткое описание условий проведения поляризационных измерений.

Для проверки и подтверждения выводов теоретического анализа поляризационного контраста объектов типа "фон + цель" и "фон", проведенного во 2 главе, воспользуемся данными поляризационных измерений лаборатории НИЧ кафедры КИПР ТИАСУР. За период 1986 – 1992 г.г. сотрудниками лаборатории НИЧ был создан ряд макетов поляризационных обзорных РЛС ("Кедр-2", "Кедр-4", "Полярис", модифицированное изделие ИРЛ133), позволяющих проводить измерения поляризационных параметров (μ_d , $\tilde{\mu}$) наблюдаемых РЛ объектов, а также величин, пропорциональных их ЭПР.

При непосредственном участии автора была разработана и создана автоматизированная система регистрации, накопления и обработки данных ОРЛС "Кедр-2", сформулированы алгоритмы статистической обработки результатов поляризационной системы "Кедр-4", проведен теоретический анализ экспериментальных результатов моноимпульсной оценки поляризационных параметров искусственных и природных объектов, осуществлялась подготовка и проведение экспериментов по изучению рассеивающих свойств транспортных средств в полевых условиях и т.п.

В течение 1986 – 1992 г.г. исследовательский коллектив лаборатории НИЧ(Хлусов В.А., Карнышев В.И., Кокташев С.И., Кунтиков С.И. Русин А.Н., Хребтов В.Д.) регулярно проводил совместные поимпульсные измерения ЭПР и μ_d объектов типа "фон" и "фон + цель". В первую группу были включены естественные природные образования различной структуры (см., например, табл.2.1), а во вторую – цели искусственного происхождения на фоне подстилающей поверхности. В это

же время в группе сотрудников, возглавляемых Масаловым Е.В., проводились измерения поляризационных параметров с помощью модуляционных методов. Целью подобных измерений было изучение характера временных флуктуаций величин ЭПР, μ_d , $\bar{\mu}$, определение их статистических характеристик, а также оценка степени информативности каждого из указанных параметров в отдельности и совместно. При этом для выявления общих закономерностей в поведении этих параметров одни и те же РЛ объекты наблюдались в равное время года, при различных погодных условиях (см.табл.2.1, 3.1, 3.2 , рис.3.9).

Для проведения экспериментов макет поляризационной ОРЛС устанавливался в радиопрозрачном коке в верхней угловой точке 5-этажного здания на высоте около 20 м от его основания. Само здание расположено на обрывистом правом берегу р.Томи на расстоянии 20-30 м от края обрыва. Так, что перепад высот от точки установки макета РЛС до уровня основной площади обзора составляет величину порядка 65-70 м (рис.3.7). Подобное расположение макета позволяет пренебречь влиянием подстилающей поверхности вблизи здания, имитируя ситуацию размещения ОРЛС на борту ЛА в режиме маловысотного полета. В ходе измерений наклонная дальность до объектов изменялась от 1 до 10 км, а угловой сектор обзора РЛС ограничивался следующими значениями :

- $\pm 70^\circ$ в азимутальной плоскости относительно направления на юг,
- $\pm 5^\circ$ в угломестной плоскости относительно горизонта.

На рис.3.8 схематически изображен участок местности, прилегающей к точке расположения обзорной РЛС. При этом в зону обзора вошли :

- часть русла р.Томи,
- высокий (15-20 м) крутой (правый) и низкий (левый) берега,
- смешанные лесные массивы на правом берегу р.Томи и в юго-западном направлении за автомобильной трассой на левом берегу,
- обширная, слабо пересеченная местность на левом берегу, занятая в основном сельскохозяйственными угодьями.



Рис.3.7. Схематическое изображение рельефа местности, прилегающей к зданию ($h = 15 \text{ м}$), в котором размещался макет поляризационной обзорной РЛС.

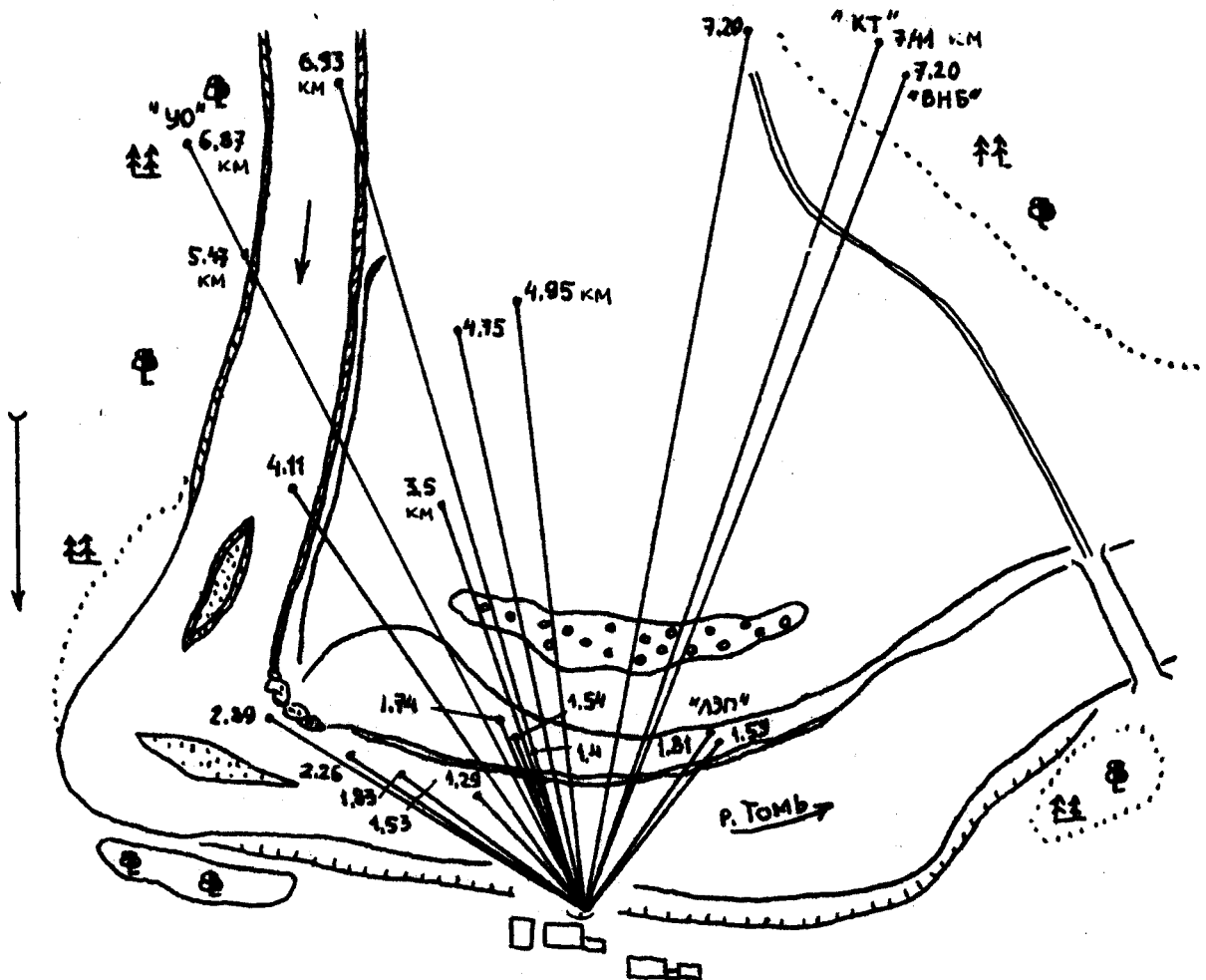


Рис.3.8. Схематическое изображение местности с указанием направления и дальности до характерных наблюдаемых РЛ объектов.

Кроме того, в зоне обзора находились воздушная трасса местных авиалиний, асфальтированные и грунтовые дороги, открытые гравийные разработки на левом берегу, многочисленные опоры и линии электропередач, разнообразные строения, различные виды растительности и т.д.

В качестве поляризационных локаторов использовались РЛС моноимпульсного и модуляционного типов, позволяющие определять поляризационные параметры объектов на малых временных интервалах, а также дающие усредненные оценки поляризационных характеристик целей. Алгоритм функционирования РЛС, позволяющей производить оценку поляризационных параметров ЭПР и μ_d' , рассмотрен в разделах 2.4.1, 3.1, 3.2. Для того, чтобы отличать обозначение параметра A_0 (2.92) в логарифмическом масштабе дБ/Вт от используемого при вычислениях нормированного параметра $A_0 / A_{\text{макс}}$ (где $A_{\text{макс}} = 55 \text{ дБ / Вт}$), примем для него обозначение σ_H . При этом всему диапазону ($0 \div 55 \text{ дБ/Вт}$) изменения величины A_0 , характеризующей ЭПР объекта, будет соответствовать диапазон ($0 \div 1$) параметра σ_H .

В ходе экспериментов по изучению поляризационного контраста наблюдаемых объектов с помощью РЛС "Кедр-2(4)" устанавливались требуемые значения азимута и угла места, а также выставлялся соответствующий отруб дальности до РЛ объекта. Затем проводились измерения величин энергетического и поляризационного параметров цели и ввод в память ЭВМ. С учетом калибровки в ЭВМ формировались массивы, соответствующие временным реализациям $\sigma_H(t)$ и $\mu_d'(t)$, с последующей статистической обработкой и графическим выводом полученных данных.

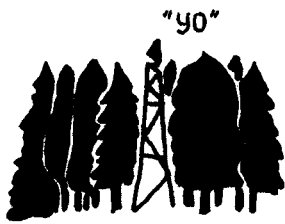
Расположение поляризационных РЛС над поймой р.Томи позволяло наблюдать перемещение судов под различными углами: от 0° при облучении с кормы (носовой части) до 90° при облучении с борта. Сильное течение на судоходном участке вблизи левого берега, приводящее к снижению окорости и относительной равномерности перемещения судов, давало возможность исследовать влияние параметров движения объектов

(рис.3.9 д-ж) на измеряемые величины. С помощью моноимпульсных РЛС были получены результаты измерения ЭПР и поляризационной анизотропии $\mu_d'(t)$ для летящего вертолета. На примере бронированных транспортных средств (рис.3.9 в,и) оценивалась наблюдаемость подобных РЛ целей на пересеченной местности с различным состоянием поверхности, при изменении дальности до объекта от 1.4 до 4.94 км. При этом объекты находились в неподвижном состоянии с определенными ракурсами или совершали различные эволюции в разрешаемом объеме. В этом же цикле экспериментов определялась "чувствительность" величины ЭПР и $\mu_d'(t)$ к перемещению объектов с малой ЭПР (человек, металлическая поверхность и т.п.). В одном из экспериментов были получены данные измерения ЭПР и поляризационной анизотропии $\mu_d'(t)$ для вертикального металлического цилиндра на фоне возмущенной водной поверхности. Для указанных выше РЛ объектов оценка соответствующих параметров проводилась с помощью моноимпульсного метода на малых интервалах времени ($F_{\Pi} - 100 (400) \text{ Гц}$). Каждый эксперимент сопровождался проведением калибровки по энергетическому (σ_H) и поляризационному (μ_d') параметрам. Объем обрабатываемых временных реализаций составлял 1000 отсчетов и позволял проводить любые вычисления.

Аналогичные эксперименты в отношении транспортных средств и других РЛ объектов были проведены с помощью поляризационной РЛС модуляционного типа (модифицированное изделие IRL33). Кроме оценки величины ЭПР и амплитуд 4-ой и 8-ой гармоник частоты вращения полуволнового фазового компенсатора, несущих информацию о поляризационной анизотропии объектов, данный локатор позволял измерять в штатном режиме величину, пропорциональную радиальной скорости цели.

Рассмотрим поляризационный контраст объектов типа "фон" и "фон + цель" на примере целей, представляющих практический интерес :

— наблюдаемые на фоне местности стационарные искусственные сооружения с вертикальными размерами H порядка 15 - 30 м (рис.3.9 а-г);

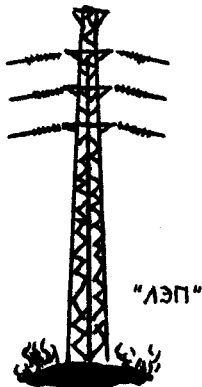


а) Деревянная триангуляционная вышка с трех-
гранным уголковым отражателем (УО), уста-
новленная в лесу.



б) Высокая кирпичная дымовая труба (КТ) над
лесом.

в) Металлическая водонапорная башня (ВНБ)
над лесом.



г) Высокая ($h \approx 35$ м) металлическая опора
ЛЭП на левом берегу р.Томи.



д) Судно-толкач с баржей (ТБ).

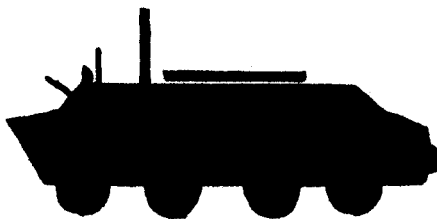


10 м

е) " Средний " катер (СК).



ж) Маломерное судно (МС).



з) Бронированное колес-
ное транспортное
1 м
средство (КТС).



и) Бронированное гусе-
ничное транспортное
средство (ГТС).

Рис.3.9. Примеры характерных искусственных РЛ объектов, в отношении которых исследовался поляризационный контраст и радиолокационный контраст по ЭПР.

- перемещающиеся по водной поверхности суда с горизонтальными размерами L порядка 10 - 100 м (рис.3.9 д-ж) ;
- находящийся в полете вертолет ;
- бронированные транспортные средства с $L \sim 5 - 8$ м (рис.3.9 в-и) на открытой пересеченной местности ;
- металлическая труба диаметром 0.05 м и высотой 1.5 м над вавольнованной водной поверхностью ;
- перемещающийся на открытой пересеченной местности человек.

3.5.2. Оценка поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР стационарных искусственных сооружений.

Рассмотрим экспериментальные результаты наблюдаемости искусственных объектов на примере стационарных сооружений (рис.3.9 а-г). Краткое описание объектов и местности, на фоне которой они расположены, приведено в Табл.3.1. Диапазон дальностей искусственных "целей" составлял 1.81 - 7.41 км. В качестве фоновых образований были выбраны участки местности, соответствующие соседним с "целью" элементам разрешения РЛС. Для каждого из стационарных сооружений и участков "фона" проводились поимпульсные измерения величин ЭПР σ_H и модуля поляризационной анизотропии μ'_d . Длительность непрерывных временных реализаций $\sigma_H(t)$ и $\mu'_d(t)$ была равна 10 сек (число отсчетов $N = 1000$). Для статистической обработки эти реализации разбивались на десять 1-секундных выборок, по которым определялись статистические характеристики, автокорреляционные функции, выборочные распределения и т.д. Использование критерия инверсий и критерия Смирнова [97] позволяло оценивать стационарность основных статистических характеристик - среднего значения, дисперсии, коэффициентов асимметрии и эксцесса, а также выборочных распределений.

Табл.3.1. Наблюдаемые стационарные искусственные сооружения
и прилегающая к ним местность.

| Тип | №/п | Наименование РЛ объекта (обозначение) | Дальность (км) | Эксперимент | | Примечание |
|--------------|-----|--|-------------------|-------------|----------|------------------------------|
| | | | | N | Дата | |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
| "ФОН + ЦЕЛЬ" | 1. | Деревянная вышка с трехгранным уголковым отра- телем, установ- ленная в лесу (УО) | 6.87 | 1.1 | 15.10.87 | Диаметр антенны 560 мм |
| | | | | 1.2 | 29.10.87 | |
| | | | | 1.3 | 30.10.87 | |
| | | | | 1.4 | 10.11.87 | |
| | 2. | Высокая металли- ческая опора ЛЭП на левом берегу р.Томи (ЛЭП) | 1.81 | 2.1 | 30.10.87 | |
| | | | | 2.2 | 31.10.87 | |
| | | | | 2.3 | 10.11.87 | |
| | | | | 2.4 | 12.06.89 | |
| | 3. | Металлическая водонапорная башня над лесом (ВНБ) | 7.20 | 3.1 | 27.10.87 | |
| | | | | 3.2 | 30.10.87 | |
| | | | | 3.3 | 23.06.89 | |
| | 4. | Высокая кирпич- ная труба над лесом (КТ) | 1.81 | 4.1 | 27.10.87 | |
| | | | | 4.2 | 30.10.87 | |
| | | | | 4.3 | 31.10.87 | |
| | | | | 4.4 | 10.11.87 | |
| | | | | 4.5 | 11.06.89 | |
| | | | | 4.6 | 17.06.89 | |
| | | | | 4.7 | 23.06.87 | |

продолжение Табл.3.1

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
|-------|-----|--|--|---|---|---|
| "ФОН" | 5. | Участок правого берега р.Томи,покрытый лесом, в окрестности (УО) | 5.47 | 5.1 5.2 5.2 5.4 | п.1.1 п.1.2 п.1.3 п.1.4 | Азимут (УО) |
| | 6. | Местность на левом берегу, покрытом кустарником, в окрестности опоры ЛЭП | 1.80 1.80 2.20 1.59 | 6.1 6.2 6.3 6.4 | п.2.1 п.2.2 п.2.3 п.2.4 | Отворот ДН Ант Азимут ЛЭП |
| | 7. | Местность, покрытая лесом, в окрестности ВНЕ | 6.90 7.20 7.20 | 7.1 7.2 7.3 | п.3.1 п.3.2 п.3.3 | Азимут ВНЕ Отворот ДН Ант |
| | 8. | Местность, покрытая лесом, в окрестности КТ | 6.90 6.30 6.40 5.85 7.00 7.40 7.00 5.90 | 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 | п.4.1 п.4.2 п.4.3 п.4.4 п.4.5 п.8.6 п.8.7 | Азимут КТ Азимут КТ Отворот ДН |

Экспериментальные результаты показывают, что присутствие в разрешаемом объеме РЛС стационарного сооружения приводит к смещению среднего значения и уменьшению дисперсии флуктуаций анализируемого параметра по сравнению с "чистым фоном". На рис.3.10 – 3.13 в виде прямоугольников условно изображены области изменения нормированных параметров эффективной поверхности рассеяния σ_H и модуля μ_D' комплексного коэффициента поляризационной анизотропии объектов типа "фон" и "фон + стационарный объект". Середина каждого прямоугольника в системе координат (μ_D', σ_H) представляет собой точку с координатами $(\overline{\mu_D'}, \overline{\sigma_H})$, полученными при усреднении десяти выборочных оценок среднего значения 1-секундных временных реализаций.

Среди рассматриваемых объектов наиболее неблагоприятные условия наблюдения относятся к трехгранному уголкового отражателя (УО) (рис.3.9а), расположенному на одном уровне с верхушками деревьев. Это приводит к перекрытию областей изменения параметров для объектов "фон" и "фон + стационарный объект" (рис.3.10) и снижает наблюдаемость данного УО. Наилучшие условия наблюдения относятся к объекту "фон + опора ЛЭП" на левом берегу р.Томи (рис.3.9г). Большая ЭПР данного сооружения и меньшая по сравнению с УО дальность ($R = 1.81$ км) приводят к резкому уменьшению дисперсии флуктуаций параметров σ_H , μ_D' составной цели так, что соответствующие области их изменения для объектов "фон" и "фон + опора ЛЭП" не перекрываются (рис.3.11). Наблюдение за объектами "водонапорная башня" (ВНБ) и "кирпичная труба" (КТ) (рис.3.9 б, в) в различных погодных условиях и в разное время года подтвердило устойчивость поляризационных свойств данной группы РЛ объектов (рис.3.12, 3.13). Так, отрицательные значения величины μ_D' ("УО", "ВНБ", "КТ") говорят о приближении свойств этих объектов к поляризационно – изотропным целям типа трехгранного уголкового отражателя, а положительные, близкие к +1 значения μ_D' для "опоры ЛЭП на левом берегу" свидетельствуют о

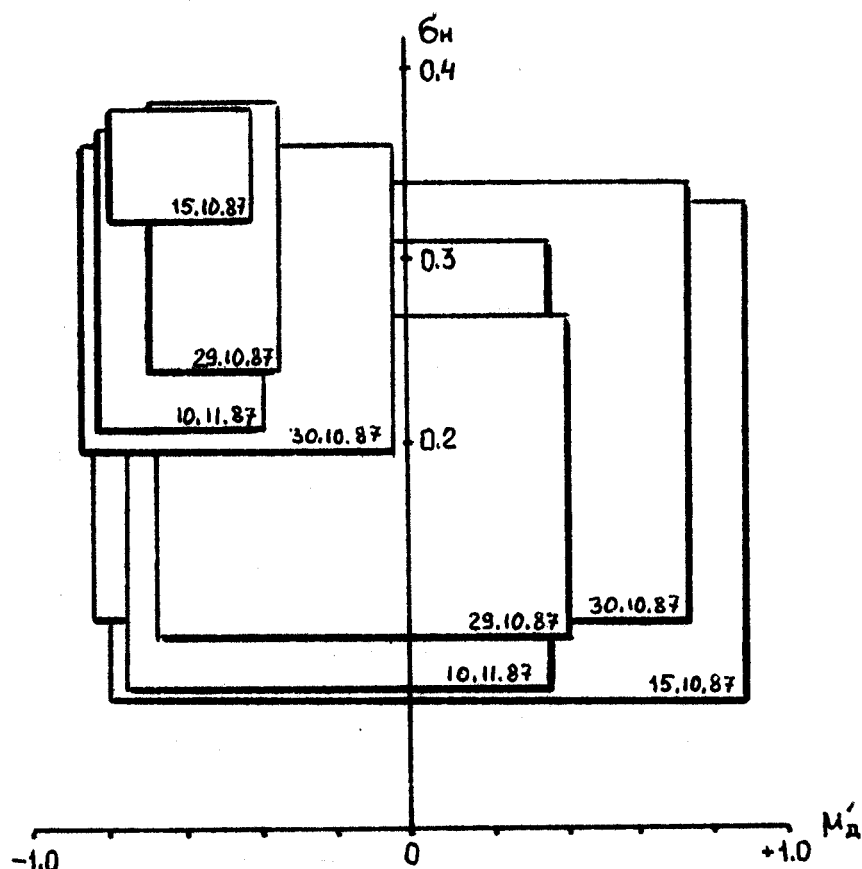


Рис.3.10. Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭП σ_n и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' объектов типа "фон + цель" и "фон" :

□ - средние пределы изменения (σ_n, μ_d') для объекта "Деревянная триангуляционная вышка с трехгранным уголковым отражателем (УО), установленная в лесу" ;

□ - средние пределы изменения (σ_n, μ_d') для объекта "Участок правого берега р.Томи, покрытый лесом, в окрестности УО".

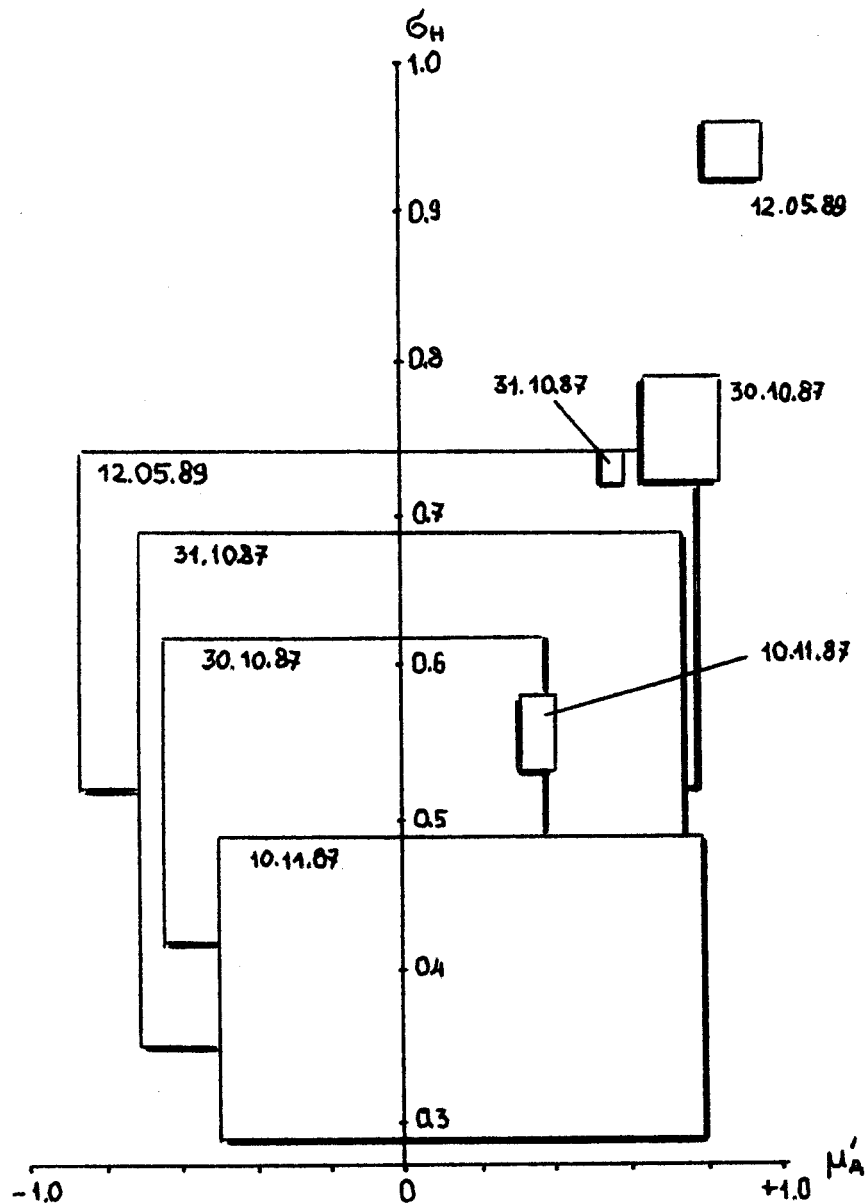




Рис.3.II. Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭПР σ_H и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ'_A объектов типа "фон + цель" и "фон" :

 — средние пределы изменения (σ_H, μ'_A) для объекта "Высокая металлическая опора ЛЭП на левом берегу р.Томи" ;

 — средние пределы изменения (σ_H, μ'_A) для объекта "Местность на левом берегу р.Томи, покрытом кустарником в окрестности опоры ЛЭП ".

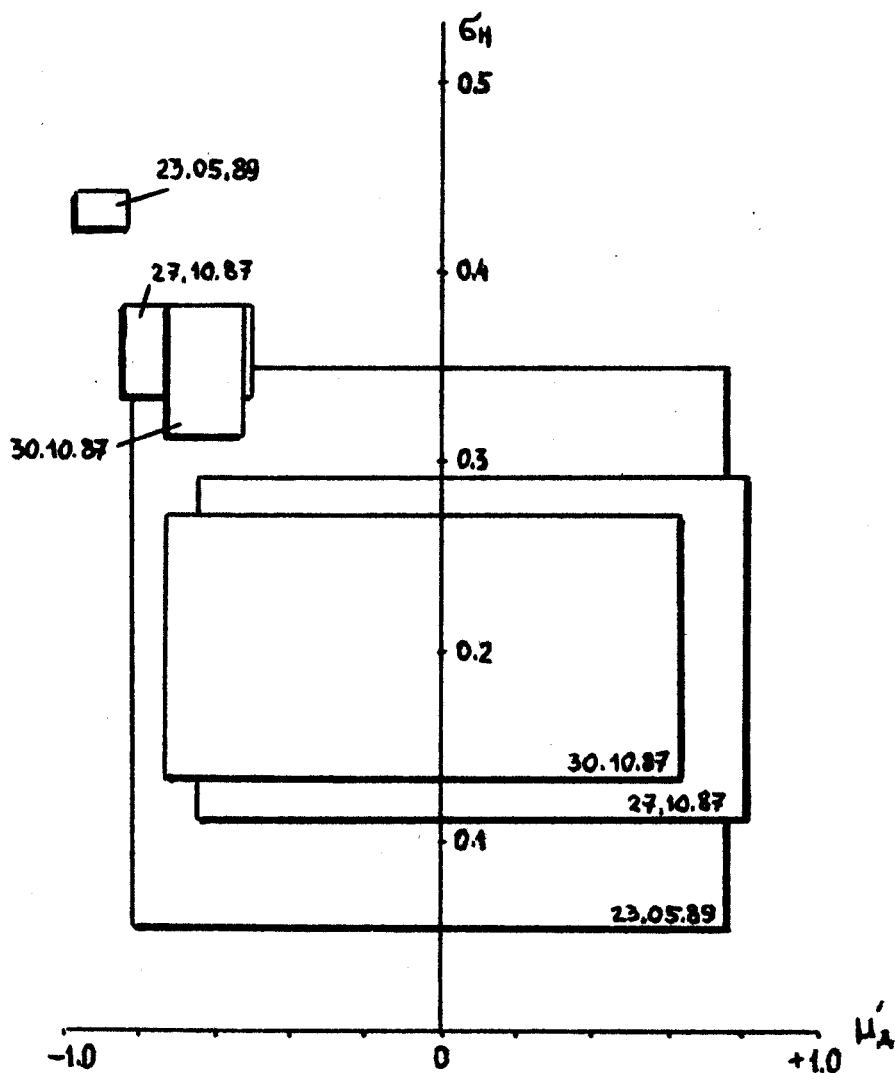



Рис.3.12. Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭП σ_H и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ'_d объектов типа "фон + цель" и "фон" :

 - средние пределы изменения (σ_H, μ'_d) для объекта "Металлическая водонапорная башня (ВНБ) над лесом" ;

 - средние пределы изменения (σ_H, μ'_d) для объекта "Местность, покрытая лесом, в окрестности ВНБ".

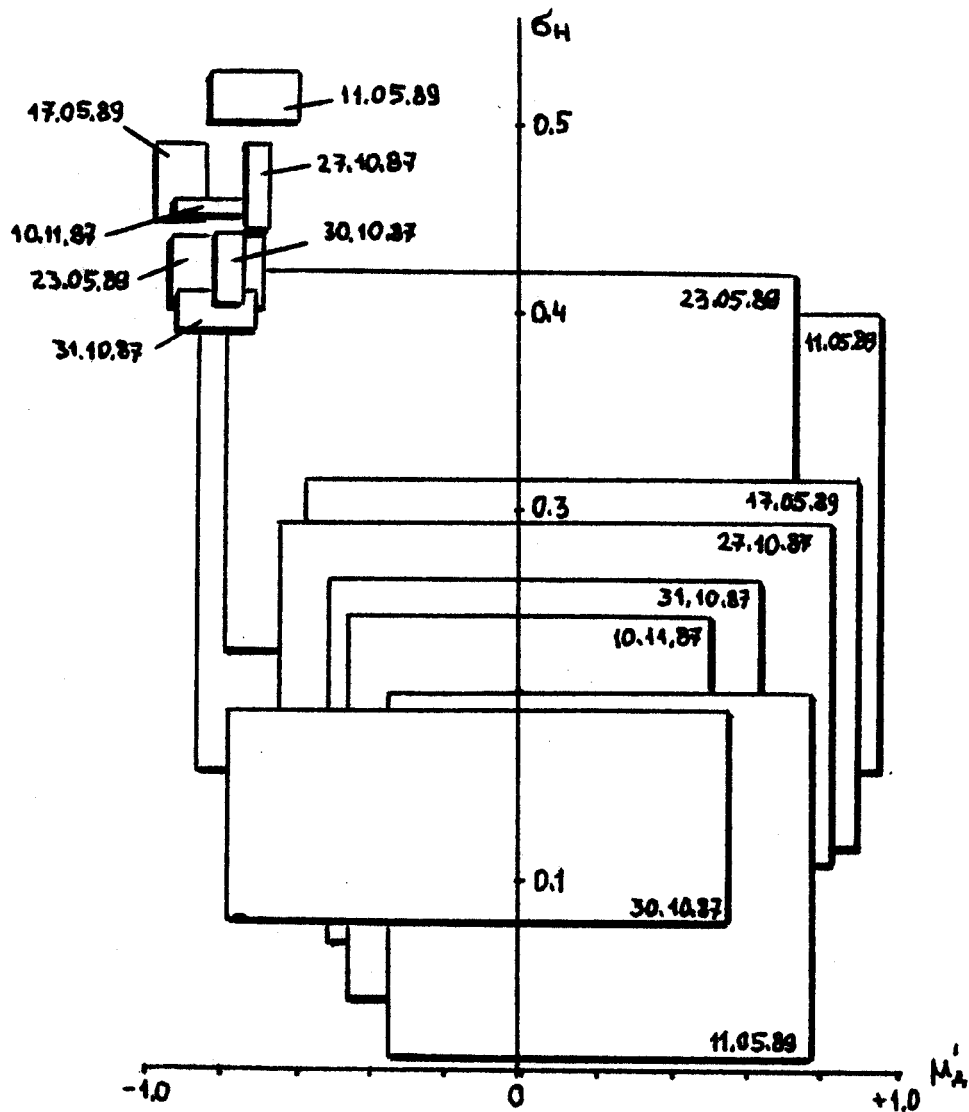




Рис.3.13. Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭПР σ_H и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ'_D объектов типа "фон + цель" и "фон" :

 — средние пределы изменения (σ_H, μ'_D) для объекта "Высокая кирпичная труба над лесом" ;

 — средние пределы изменения (σ_H, μ'_D) для объекта "Местность, покрытая лесом, в окрестности КТ".

возможности ее представления целью типа двухгранного УО. В отличие от составных РЛ объектов "фон + искусственное сооружение", распределенные фоновые образования характеризуются средними значениями параметра поляризационной анизотропии близкими к нулю.

Для иллюстрации того, каким образом величины σ_H и μ_D' распределены внутри соответствующих двумерных областей (σ_H, μ_D'), на рис. 3.14 – 3.17 приведены усредненные выборочные гистограммы ЭПР и модуля коэффициента поляризационной анизотропии. Усреднение такого рода вполне допустимо, поскольку интервал корреляции отдельных выборок много меньше длительности самой выборки. На примере трехгранного УО на фоне леса (рис.3.14) видно, что возможности параметра ЭПР для выделения этого объекта невелики, поскольку выборочные распределения G_{σ} объектов "правый берег" и "трехгранный УО над лесом" практически полностью перекрываются. Тогда как различия гистограмм величины μ_D' для фонового образования и составного объекта создают реальные предпосылки повышения контраста этого объекта. Большая ЭПР, характерная для объекта "металлическая опора ЛЭП" (рис.3.15), позволяет надежно выделять соответствующую отметку при радиолокационном отображении параметра ЭПР без использования поляризационной информации (μ_D'). Однако, при снижении ЭПР искусственных сооружений (см.рис.3.16) использование μ_D' для формирования РЛ изображения становится оправданным, благодаря возможности разделять РЛ объекты "фон" и "фон + стационарное сооружение" в двумерном пространстве (σ_H, μ_D'). В меньшей степени этот вывод относится к другому сосредоточенному объекту этой группы (рис.3.17).

На рис.3.18 приведены состоятельные оценки нормированных амплитудных спектров параметров ЭПР и поляризационной анизотропии РЛ объектов "фон" и "фон + искусственное сооружение". Из них видно, как распределена энергия флуктуаций нормированных параметров σ_H, μ_D' этих объектов в частотном диапазоне 0 – 50 Гц. Величина этого

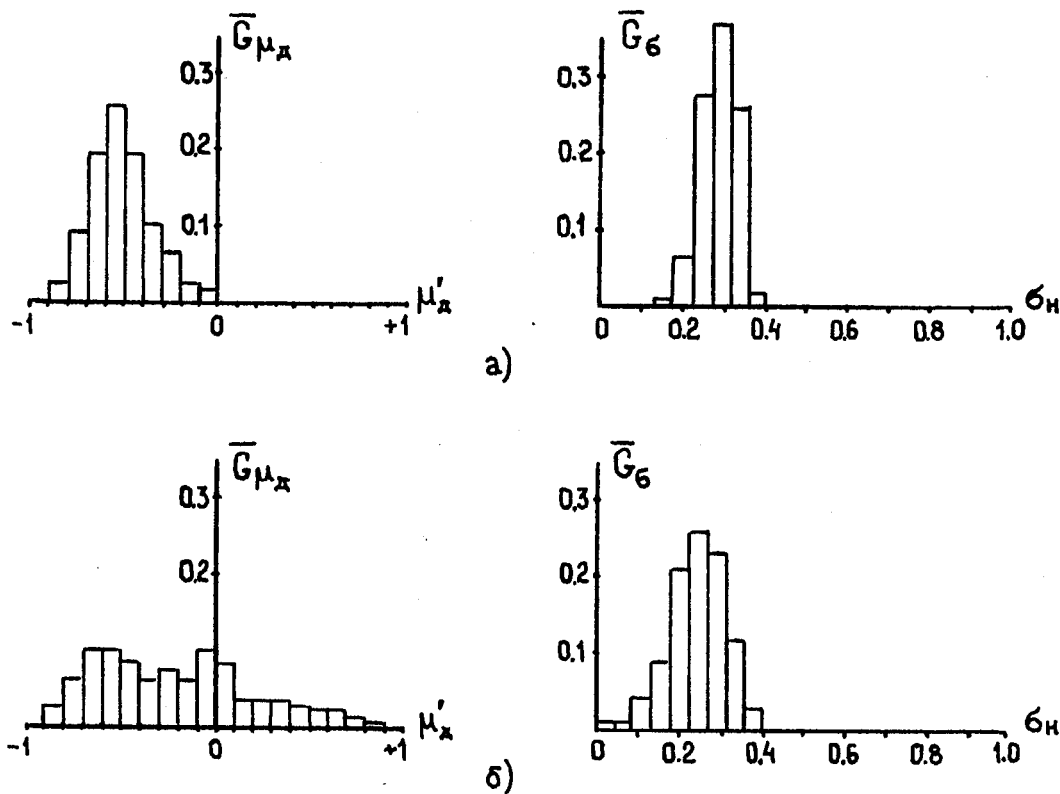


Рис.3.14. Гистограммы нормированных параметров ЭПР $\sigma_{\text{н}}$ (G_{σ}) и модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu'_{\text{д}}$ (G_{μ}) объектов типа "фон + цель" и "фон", полученные усреднением десяти гистограмм 1-секундных реализаций $\sigma_{\text{н}}(t)$ и $\mu'_{\text{д}}(t)$:

а) "УО" (эксперимент N 1.3 в табл.3.1);

б) "Правый берег" (эксперимент N 5.3 в табл.3.1).

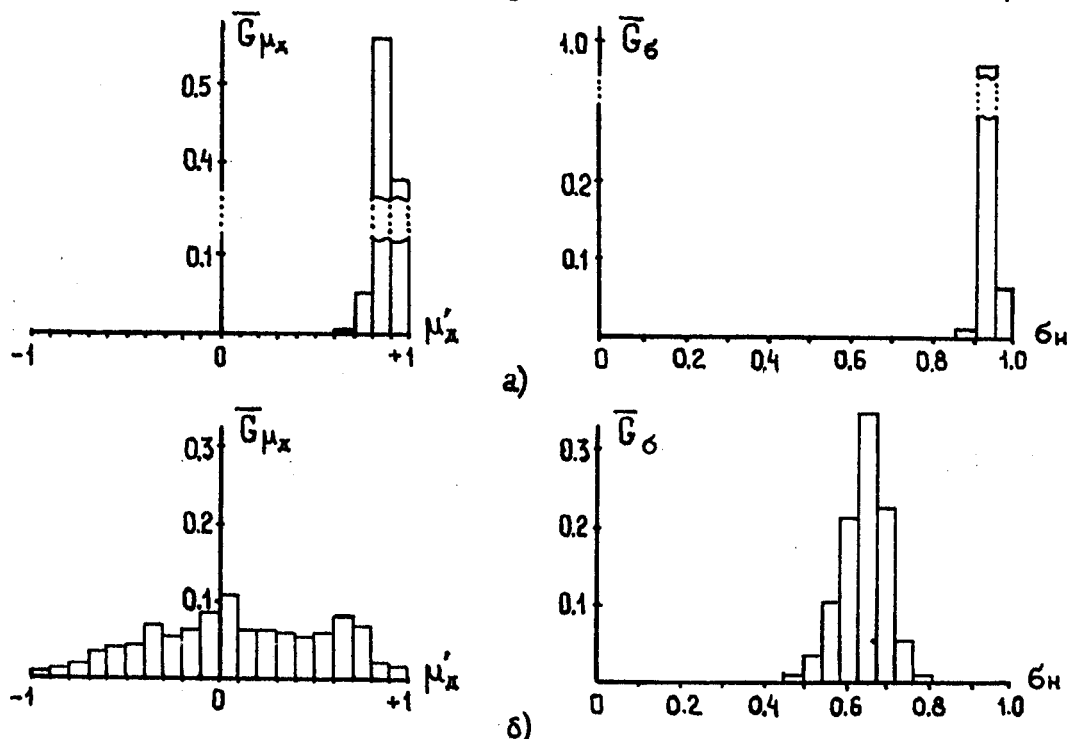


Рис.3.15. Усредненные гистограммы G_{σ} и G_{μ} .

а) "ЛЭП" (эксперимент N 2.4 в табл.3.1);

б) "Левый берег" (эксперимент N 6.4 в табл.3.1).

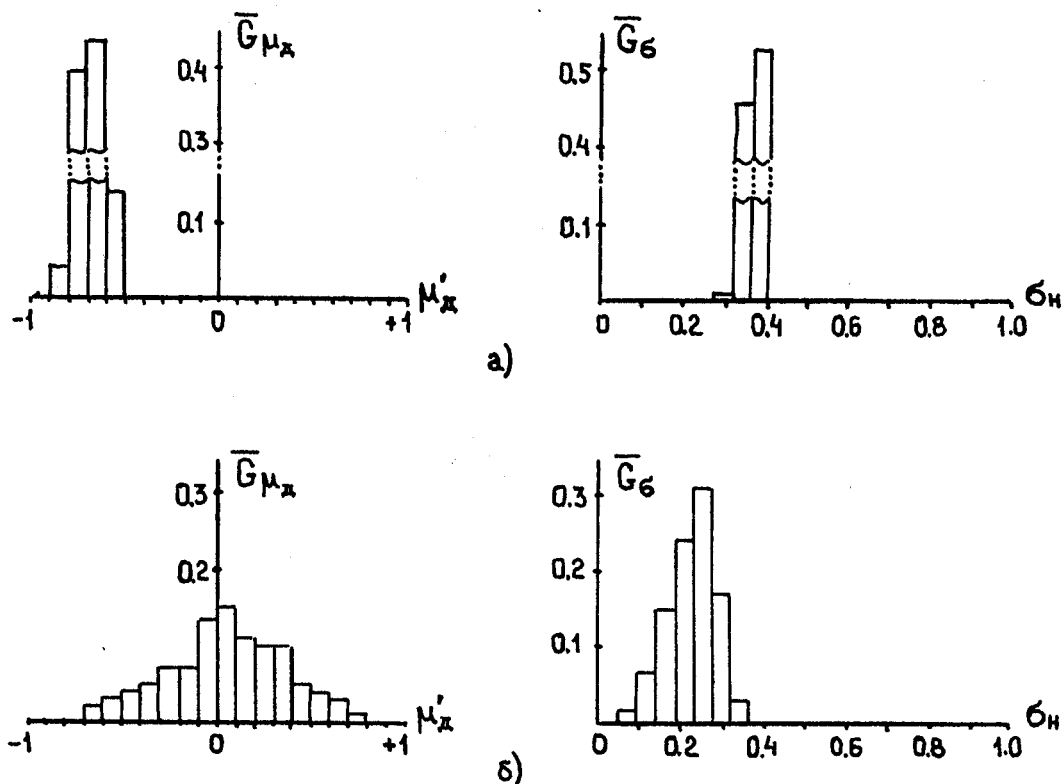


Рис.3.16. Гистограммы нормированных параметров ЭПР σ_H (G_σ) и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ'_d (G_μ) объектов типа "фон + цель" и "фон", полученные усреднением десяти гистограмм I-секундных реализаций $\sigma_H(t)$ и $\mu'_d(t)$:

а) "ВНБ" (эксперимент N 3.1 в табл.3.1);

б) "Лес" (эксперимент N 7.1 в табл.3.1).

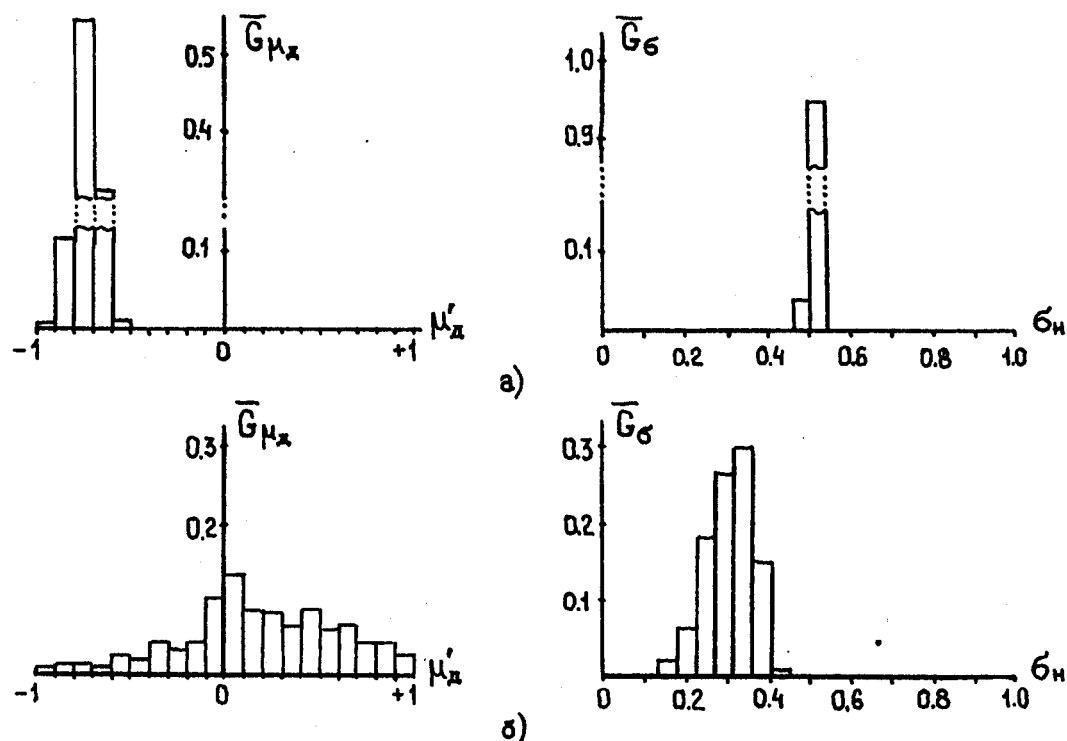


Рис.3.17. Усредненные гистограммы G_σ и G_μ .

а) "КТ" (эксперимента N 4.5 в табл.3.1);

б) "Лес" (эксперимента N 8.5 в табл.3.1).

диапазона определялась частотой повторения $F_{\Pi} = 100$ Гц зондирующих импульсов поляризационной РЛС "Кедр-2". Очевидно, что флуктуации параметра модуля $\mu_{\text{д}}'$ комплексного коэффициента поляризационной анизотропии носят более случайный характер и имеют большую дисперсию по сравнению с параметром ЭПР. При этом наибольший частотный интервал занимают флуктуации параметров $\sigma_{\text{н}}$, $\mu_{\text{д}}'$, характеризующие "угловой отражатель на фоне леса" а наименьший — параметры "опоры ЛЭП на левом берегу".

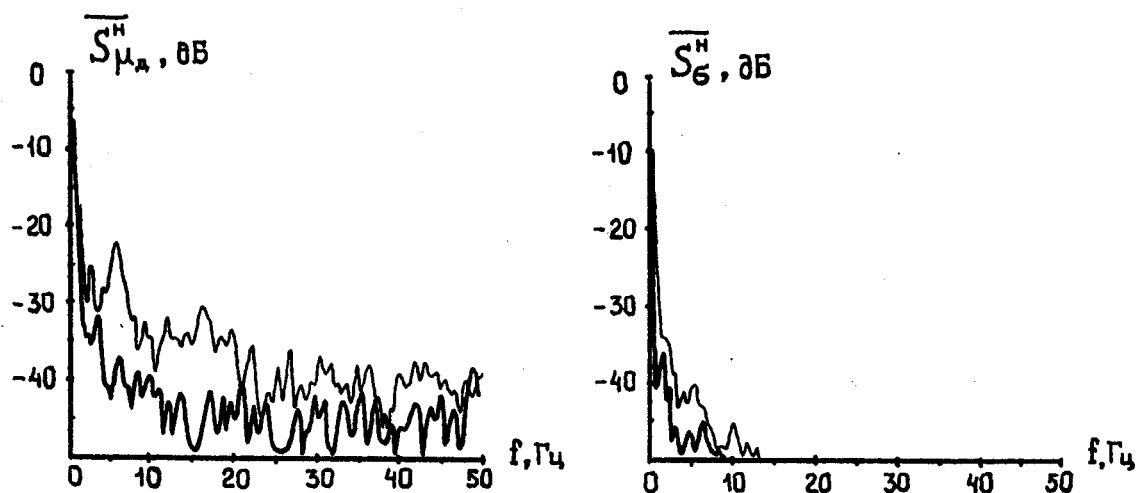
В заключении, для искусственных сооружений, описанных в табл. 3.1, и соответствующих им фоновых образований, были рассчитаны величины РЛ контраста по ЭПР

$$K_{\text{н}} = \frac{\overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi+\Psi)} - \overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi)}}{\overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi+\Psi)} + \overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi)}} \quad (3.26)$$

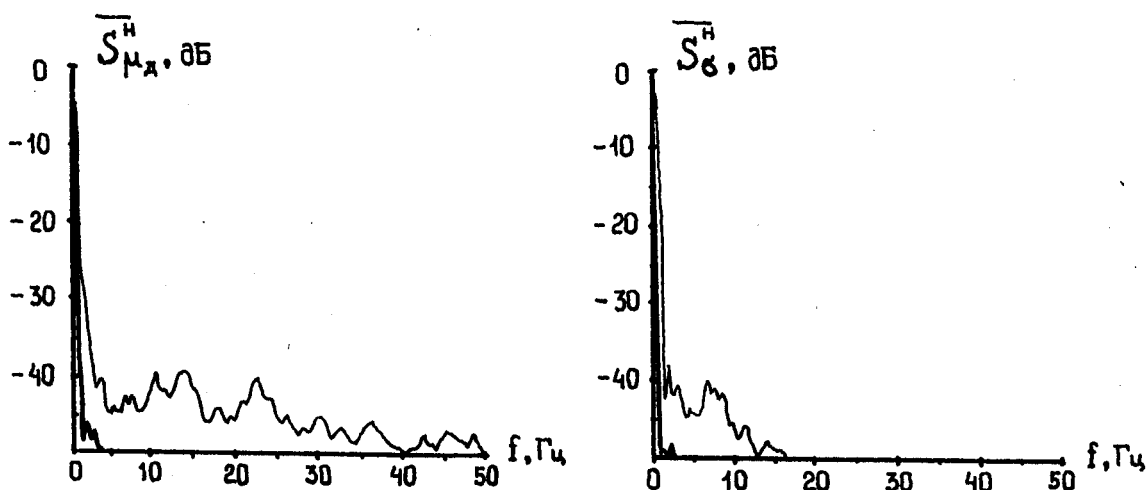
и поляризационного контраста по параметру модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu_{\text{д}}'$, по аналогии с (2.105),

$$W_{\mu_{\text{д}}} = \left| \frac{\overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi+\Psi)} - \overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi)}}{2 + \overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi+\Psi)} + \overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi)}} \right|, \quad (3.27)$$

а также определены возможные пределы их изменения. В этих формулах величины $\overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi+\Psi)}$, $\overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi+\Psi)}$ и $\overline{\sigma_{\text{н}}(\Phi)}$, $\overline{\mu_{\text{д}}'(\Phi)}$ представляют результат усреднения на $T_{\text{изм}}$ параметров ЭПР и поляризационной анизотропии для объектов типа "фон + цель" и "фон". На рис.3.19 приведены графики, отображающие особенности изменения величин $W_{\mu_{\text{д}}}$ и $K_{\text{н}}$ для искусственных сооружений, полученные в различных условиях. Оценки контраста $W_{\mu_{\text{д}}}$ и $K_{\text{н}}$ для трехгранного УО на фоне леса свидетельствуют о превышении величин $W_{\mu_{\text{д}}}$ над РЛ контрастом по ЭПР. При этом интервал изменения этих величин примерно одинаков. Близкие значения поляризационного контраста $W_{\mu_{\text{д}}}$ и $K_{\text{н}}$ характерны для объекта "опора ЛЭП", но максимально возможные значения $W_{\mu_{\text{д}}}$ заметно превосходят



а)



б)

Рис.3.18. Усредненные оценки амплитудных спектров 2.5 - секундных реализаций нормированных параметров модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d и ЭПР σ_H , в логарифмическом масштабе :

— спектр временных реализаций, соответствующих составному РЛ объекту типа "фон + цель",

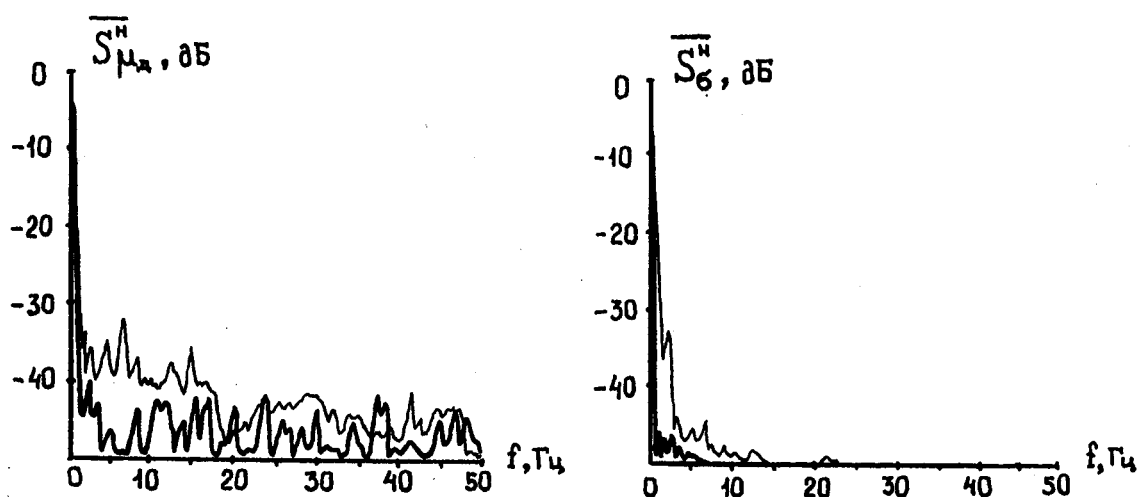
— спектр временных реализаций, соответствующих распределенному РЛ объекту типа "фон".

а) "УО" (эксперимент N 1.3 в табл.3.1),

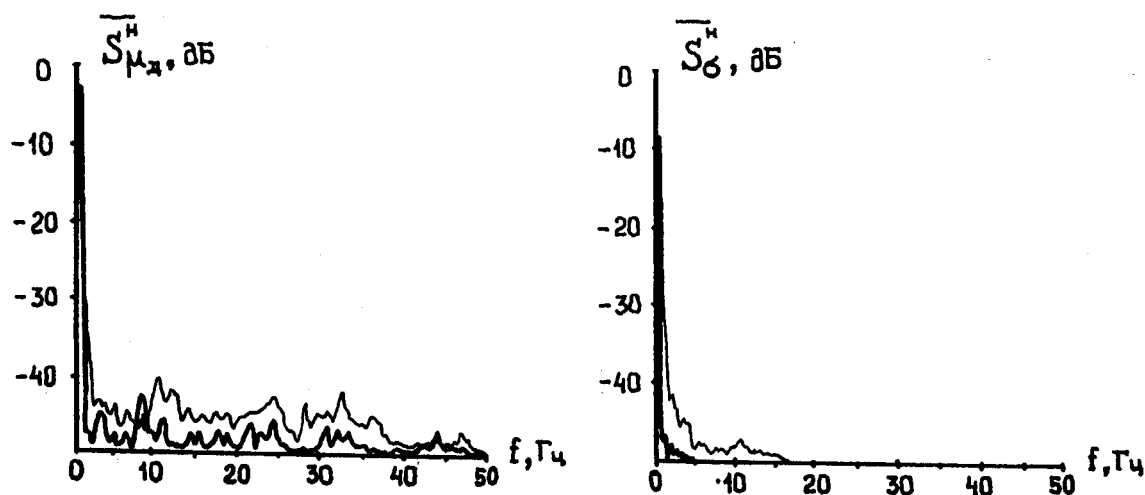
"Правый берег" (эксперимент N 5.3 в табл.3.1);

б) "ЛЭП" (эксперимент N 2.4 в табл.3.1),

"Левый берег" (эксперимент N 6.4 в табл.3.1);



в)



г)

Рис.3.18. Усредненные оценки амплитудных спектров 2.5 - секундных реализаций нормированных параметров модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d и ЭПР σ_H , в логарифмическом масштабе :

——— - спектр временных реализаций, соответствующих составному РЛ объекту типа "фон + цель",

——— - спектр временных реализаций, соответствующих распределенному РЛ объекту типа "фон".

в) "ВНБ" (эксперимент N 3.1 в табл.3.1),

"Лес рядом с ВНБ" (эксперимент N 7.1 в табл.3.1);

г) "КТ" (эксперимент N 4.5 в табл.3.1),

"Лес рядом с КТ" (эксперимент N 8.5 в табл.3.1).

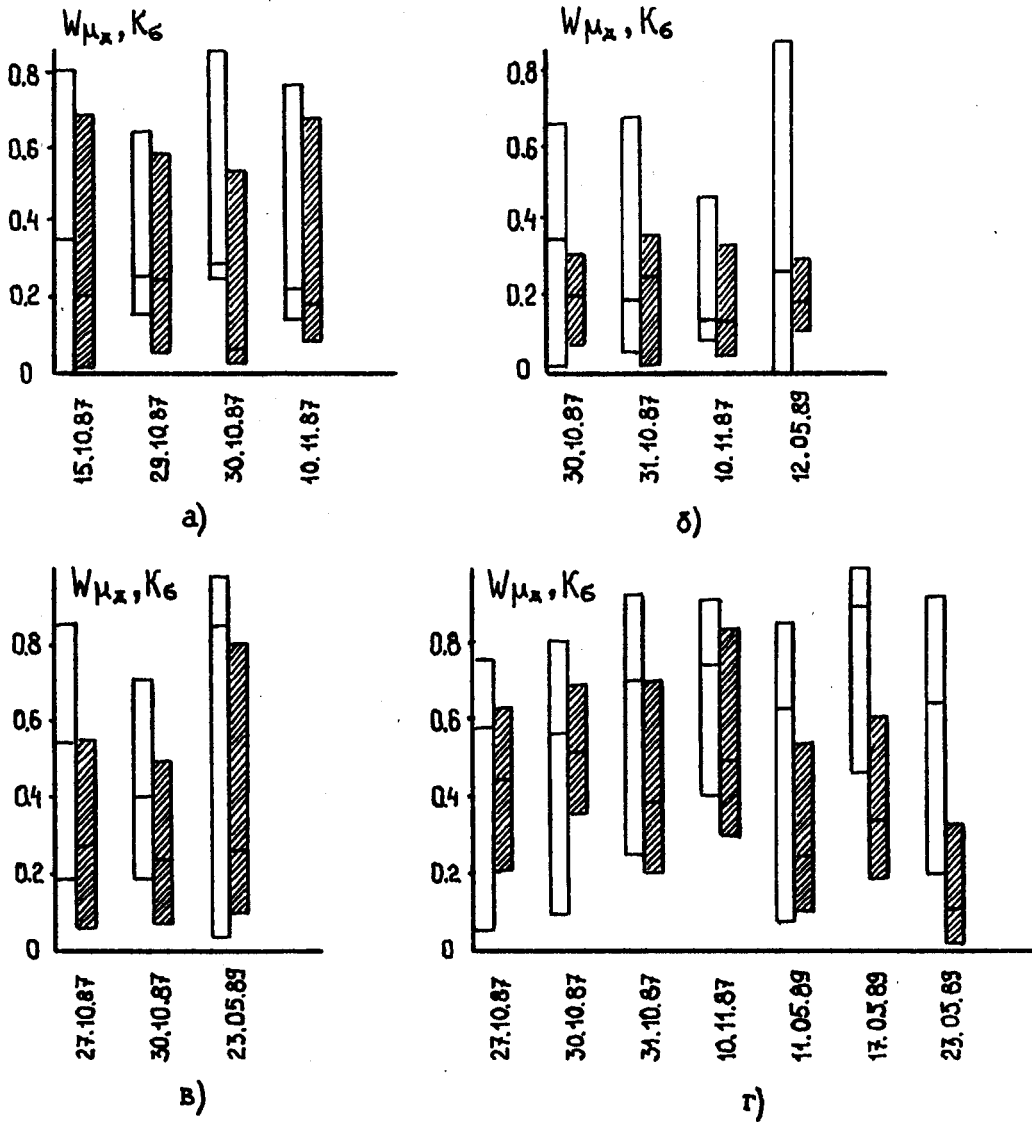
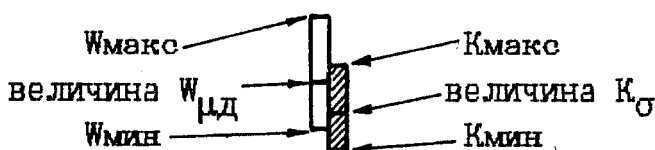


Рис.3.19. Средние значения величин поляризационного контраста W_{μ_d} (3.27) и радиолокационного контраста K_{σ} (3.26) по параметру ЭПР а также верхнего и нижнего пределов их изменения $W_{\max}(\min)$, $K_{\max}(\min)$, для стационарных искусственных сооружений на фоне местности (см. табл.3.1). Отображенные величины получены в результате усреднения десяти оценок соответствующих величин, характеризующих 1-секундные временные реализации $\mu_d'(\Phi+\Psi)(t)$ и $\sigma_H(\Phi+\Psi)(t)$ РЛ объекта " фон + цель " и временные реализации $\mu_d'(\Phi)(t')$ и $\sigma_H(\Phi)(t')$ распределенного объекта " фон ".

- а) "УО" (цель N1 в табл.3.1) и "Правый берег" (цель N5) ;
- б) "ЛЭП" (цель N2) и "Левый берег" (цель N6) ;
- в) "ВНБ" (цель N3) и "Лес рядом с ВНБ" (цель N7) ;
- г) "КТ" (цель N4) и "Лес рядом с КТ" (цель N8) .



соответствующие величины K_0 . Весьма значительно изменяются оценки контраста для случая наблюдения РЛ объектов "водонапорная башня над лесом" и "кирпичная труба над лесом" (рис.3.19 в,г), что объясняется изменением свойств фоновых образований и различием условий наблюдения. Причем стабильно высокие значения поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии характерны для объекта "кирпичная труба" : $W_{\mu_d} = (0.57 ; 0.90)$.

Анализ полученных данных измерения поляризационных и энергетических параметров РЛ объектов позволяет сделать следующие выводы :

- а) для рассмотренной группы искусственных сооружений, наблюдаемых в различных условиях, величина поляризационного контраста W_{μ_d} превосходит соответствующее значение РЛ контраста K_0 по ЭПР ;
- б) разброс значений поляризационного контраста по параметру поляризационной анизотропии μ_d определяется погодными условиями и состоянием подстилающей поверхности ;
- в) интервал изменения поляризационного контраста W_{μ_d} , как правило, превышает пределы изменения величины контраста K_0 по ЭПР.

3.5.3. Особенности поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР движущихся судов.

Отличительной особенностью РЛ обстановки (рис.3.8), в которой происходили экспериментальные измерения, является наличие р.Томи. В период навигации по реке осуществляется интенсивное движение судов, перевозящих грузов или обеспечивающих промер глубин, установку бакенов и т.д. Большие габариты судов, стабильная скорость их перемещения против течения и свобода выбора углов облучения движущихся объектов, позволили получить данные с четко выраженной модуляцией измеряемых параметров. Обозначенный бакенами судоходный фарватер ограничивал перемещение судов в произвольном направлении по водной

поверхности. Это давало возможность точно наводить антенну и устанавливать строб дальности в месте ожидаемого прохода судна. После вхождения движущегося объекта в объем разрешения производилась запись временных реализаций энергетического (σ_H) и поляризационного (μ_d') параметров. При измерении величин σ_H и μ_d' для судов, движущихся на расстоянии от 1.5 до 7 км, элементарный объем разрешения РЛС "Кедр-2" лежал в пределах от $100 \times 100 \times 150 \text{ м}^3$ до $500 \times 500 \times 150 \text{ м}^3$. При этом даже в случае наведения антенны на судно, перемещающееся по середине реки, в разрешаемый объем помимо водной поверхности попадали участки берега или гравийные насыпи. Так, что рассеянное электромагнитное поле в месте приема формировалось за счет отражения от движущегося объекта и фонового образования.

Среди записей временных реализаций $\sigma_H(t)$ и $\mu_d'(t)$, относящихся к движущимся судам, примерно 30% содержали результаты, интерпретируемые как проявление доплеровского эффекта. Конкретно его наличие выражается в периодическом изменении величин ЭПР и модуля комплексного коэффициента поляризационной анизотропии с некоторой частотой. Однако, повторяемость результатов даже для объектов с большой ЭПР оказалась недостаточно высокой. Для средних скоростей перемещения судов против течения 20–30 км/час и азимутальных углов облучения объектов $\alpha = 10^\circ - 70^\circ$ следовало ожидать модуляции параметров σ_H и μ_d' в пределах 130 – 550 Гц. Однако, использование частоты повторения зондирующих импульсов 100 Гц позволяло однозначно оценивать частоту изменения параметров в интервале 0 – 50 Гц. Любое превышение частоты > 50 Гц вызывало появление т.н. "наложения частот", в результате чего истинное значение частоты модуляции приводилось к диапазону 0 – 50 Гц. Поэтому относительно устойчивая картина проявления доплеровского эффекта наблюдалась лишь для равномерно движущихся судов при неизменном во время измерения азимутальном угле визирования объекта.

Рассмотрим результаты измерения параметров ЭПР и поляризационной анизотропии судов, перемещающихся вверх по течению р.Томи. Некоторые сведения о РЛ целях этого типа приведены в Табл.3.2.

Табл.3.2. Наблюдаемые на водной поверхности движущиеся суда.

| N | Наименование объекта | Дата | Время (местн) | V ветра (м/сек) | Дальность (км) |
|----|---|----------|------------------|--------------------|-------------------|
| 1. | Судно-толкач с ненагруженной баржей (рис. 3.9 д) | 15.06.87 | 14.10 | 1-3 | 4.11 |
| 2. | Маломерное судно (рис.3.9 ж) | 16.10.87 | 17.50 | 5-7 | 6.93 |
| 3. | Средний катер (рис.3.9 е) | 23.05.89 | 19.29 | 5-10 | 2.20 |
| 4. | Средний катер + судно-толкач с ненагруженной баржей | 23.05.89 | 19.31 | 5-10 | 2.20 |
| 5. | Средний катер (рис.3.9 е) | 29.05.89 | 13.02 | 1-3 | 6.43 |

При этом измерение параметров объекта N1 проводилось для случая параболической приемо-передающей антенны диаметром 760 мм, а объектов N2-5 - для случая антенны диаметром 560 мм. Профили судов изображены на рис.3.9 д-ж, а условная схема перемещения судов по фарватеру показана на рис.3.8.

Как следует из табл.3.2, измерение параметров σ_H и μ'_D движущихся судов проводилось в разное время года (июнь, октябрь, май) при различных погодных условиях и состоянии водной поверхности, обусловленной скоростью ветра. Это позволяет говорить о некоторых общих закономерностях в поведении величин ЭПР и поляризационной анизотропии. На рис.3.20, 3.23, 3.26, 3.28, 3.30 приведены записи 10-секундных временных реализаций $\sigma_H(t)$ и $\mu'_D(t)$ объектов N1-5.

Величина интервала измерения 10 сек была выбрана из условия гарантированного прохождения объекта внутри объема разрешения, сохранения угла облучения цели и возможности получения устойчивых статистических выводов.

Для объекта NI (рис.3.20) на интервале измерения характерно плавное изменение среднего значения величины σ_H в пределах 0.45 – 0.76 при слабом проявлении доплеровского эффекта. Кроме того, в изменении ЭПР наблюдается положительный линейный тренд порядка 0.02 ед/сек. В отличие от энергетического параметра σ_H , величина поляризационной анизотропии μ_D' подвержена доплеровской модуляции, отчетливо проявившейся в середине интервала измерения ($t = 4-7$ сек). Интересным представляется временной участок реализации $t = 4-5$ сек, на котором наблюдается почти гармоническое изменение параметра μ_D' при практически неизменной величине σ_H . Отметим также знакопеременный характер изменения μ_D' на $T_{изм}$, при этом разброс значений величины μ_D' лежит в диапазоне от -0.4 до +0.5. Для иллюстрации эффекта доплеровской модуляции измеряемых параметров на рис.3.21 приведены оценки амплитудных спектров флуктуаций σ_H и μ_D' для 5-секундных интервалов. Совершенно очевидно проявление доплеровской частоты $\Delta f \approx 27$ Гц в изменении модуля коэффициента поляризационной анизотропии на всем 10-секундном интервале и исчезающе малой компоненты этой частоты в спектре параметра ЭПР. Для примера на рис.3.22 показаны результаты статистического анализа для 1-сек интервала, содержащие автоковариационные функции и выборочные распределения соответствующих величин. Сравнивая между собой гистограммы μ_D' (рис.3.22 в) для движущегося судна с аналогичной гистограммой для участка водной поверхности перед его проходом (рис.2.2 ①), нетрудно заметить сходство между этими выборочными распределениями. Однако, корреляционная структура этих 1-сек реализаций совершенно различна: от практически некоррелированной ($\tau_K \approx 0.03$ сек) для

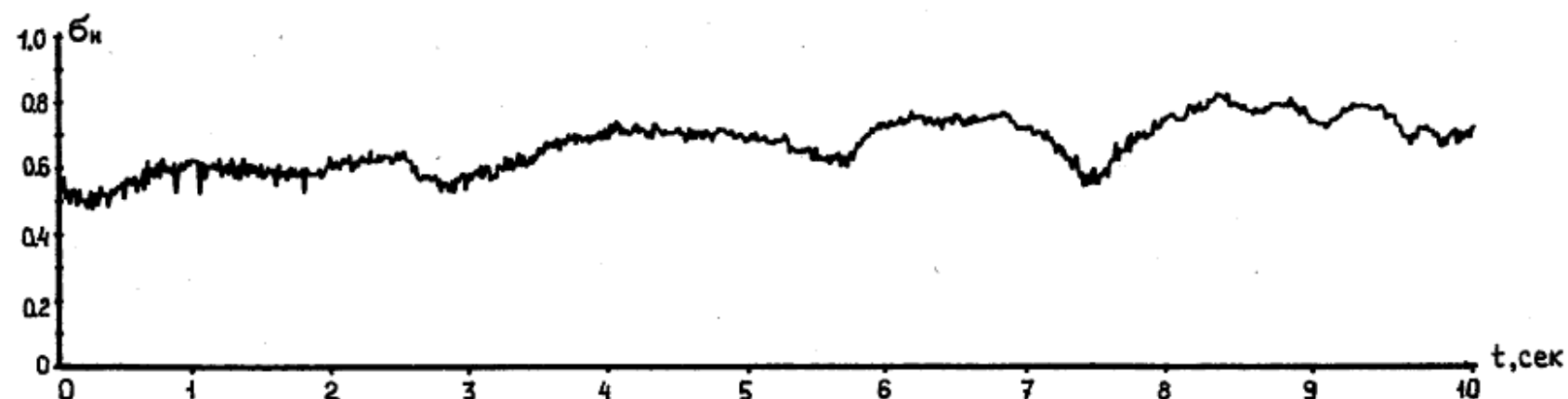


Рис.3.20. Временные зависимости параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_A(t)$ для составного РЛ объекта " вода + движущееся судно-толкач с ненагруженной баржей " (рис.3.9.д).
15.06.87. R = 4.11 км ; Ант = 760 мм ; Vветра = 1 - 3 м/сек.

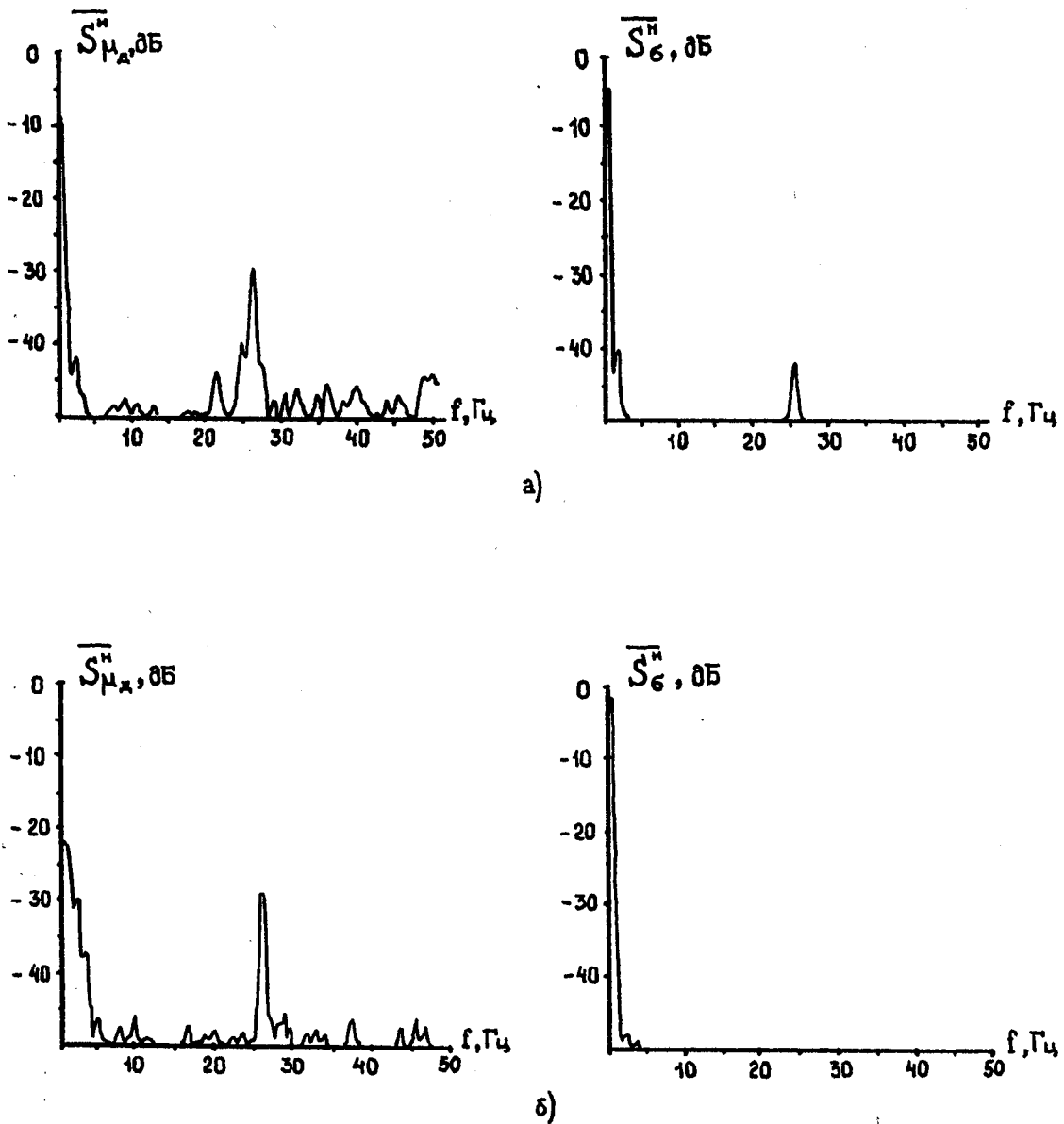
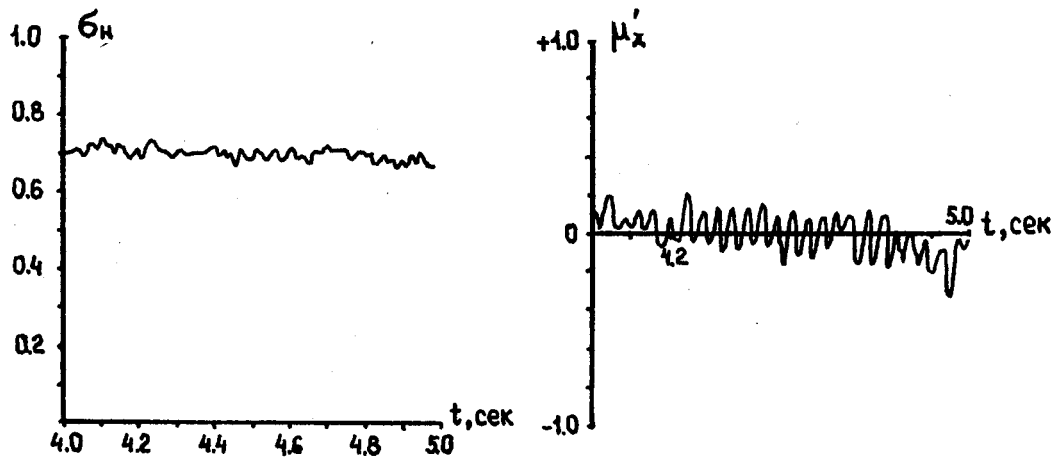


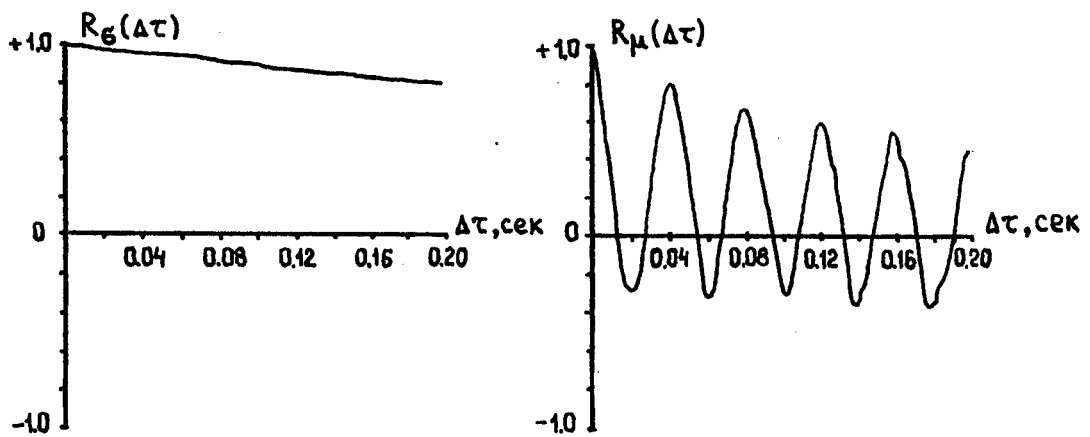
Рис.3.21. Статистически состоятельные оценки амплитудных спектров нормированных параметров модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' и ЭПР σ_H в логарифмическом масштабе, полученные по 2.5 - секундным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущееся судно - толкач с ненагруженной баржей " (рис.3.9.д).

а) оценки $\overline{S_{\mu_d}^H}$ и $\overline{S_{\sigma_H}^H}$ получены по временным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ для интервала $t = 0 \div 5$ сек десятисекундных реализаций на рис.3.20 ;

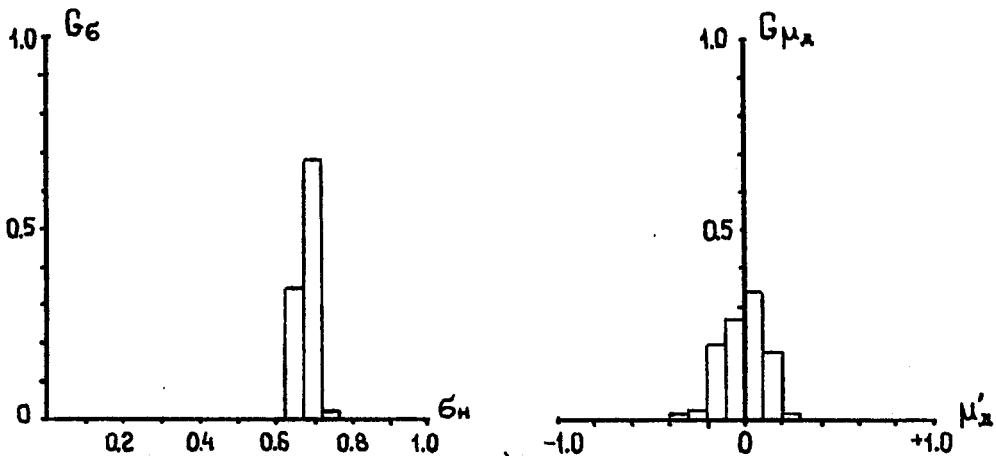
б) оценки $\overline{S_{\mu_d}^H}$ и $\overline{S_{\sigma_H}^H}$ получены по временным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ для интервала $t = 5 \div 10$ сек десятисекундных реализаций на рис.3.20 .



а)



б)



в)

Рис.3.22. Результаты статистической обработки I-сек временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_D(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущееся судно-толкач с ненагруженной баржей " (рис.3.9.д).

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_H(t)$, $\mu'_D(t)$;
- б) нормированные автоковариационные функции параметров ;
- в) выборочные гистограммы параметров.

поверхности воды до практически регулярного изменения величины μ_d' составного объекта "поверхность воды + движущееся судно".

В отличие от "толкача с баржей" (N1), "маломерное судно" (N2) рис.3.9 характеризуется более низким значением среднего уровня параметра σ_H . Это объясняется существенным, 5-6 - кратным уменьшением линейных размеров объекта N2. За время прохода в объеме разрешения РЛС изменение величины σ_H носит стационарный характер и незначительно колеблется относительно уровня 0.22. Напротив, дисперсия ЭПР изменяется на $T_{изм}$ весьма заметно. Несмотря на существенно меньшие по сравнению с объектом N1 размеры, размах флуктуаций μ_d' маломерного судна в 1.5 - 2.0 раза превышает наибольший размах μ_d' , обусловленный движением "толкача с баржей". Причем устойчивое близкое к гармоническому изменение поляризационной анизотропии объекта N2 характерно для всего интервала измерения. Более подробно явление доплеровской модуляции иллюстрируется рис.3.24 и 3.25. В частности, из рис.3.24 следует, что скорость перемещения "маломерного судна" изменялась на интервале $T_{изм}$. Так, на рис.3.24а ярко выражены гармоники 21 и 42 Гц, а на рис.3.24б выделяется спектральная область со средней частотой порядка 32 Гц. Эффект регулярного изменения модуля коэффициента поляризационной анизотропии объекта N2 виден также из рис.3.25б.

Измерение параметров σ_H и μ_d' для одиночных судов N1 и N2 проводилось на расстояниях 4.11 и 6.93 км, соответственно. Аналогичные измерения для объектов N3 и N4 (см. табл.3.2.) велись на дальности 2.20 км. При этом в элементарный объем локатора попадал участок водной поверхности и часть насыпей гравия. Приведенные на рис.3.26 реализации ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационной анизотропии $\mu_d'(t)$ соответствующие "среднему катеру" (рис.3.9 в), были получены во время его прохода рядом с насыпями гравия. Через 1.5 мин "средний катер" догнал "толкач с баржей", идущий вверх по течению с большей,



Рис.3.23. Временные зависимости параметра ЭП $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_H(t)$ для составного РЛ объекта "вода + движущееся маломерное судно" (рис.3.9.ж).

16.10.87. $R = 6.93$ км ; Ант = 560 мм ; $V_{\text{ветра}} = 5 - 7$ м/сек.

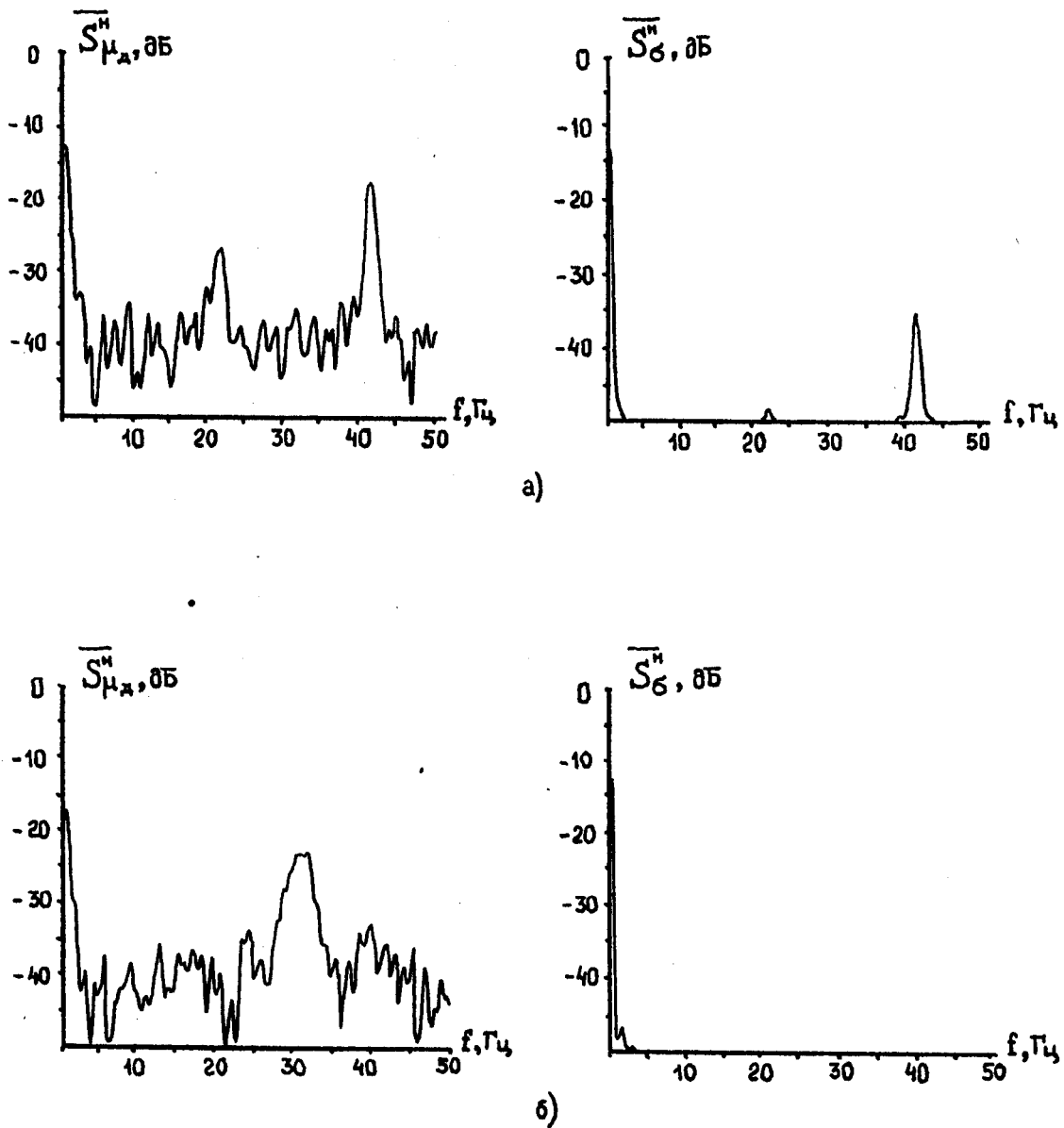


Рис.3.24. Статистически состоятельные оценки амплитудных спектров нормированных параметров модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' и ЭПР σ_H в логарифмическом масштабе, полученные по 2.5 – секундным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущееся маломерное судно " (рис.3.9.ж).

- а) оценки $\overline{S_{\mu_d}^H}$ и $\overline{S_{\sigma_H}^H}$ получены по временным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ для интервала $t = 0 \div 5$ сек десятисекундных реализаций на рис.3.23 ;
- б) оценки $\overline{S_{\mu_d}^H}$ и $\overline{S_{\sigma_H}^H}$ получены по временным реализациям $\mu_d'(t)$ и $\sigma_H(t)$ для интервала $t = 5 \div 10$ сек десятисекундных реализаций на рис.3.23 .

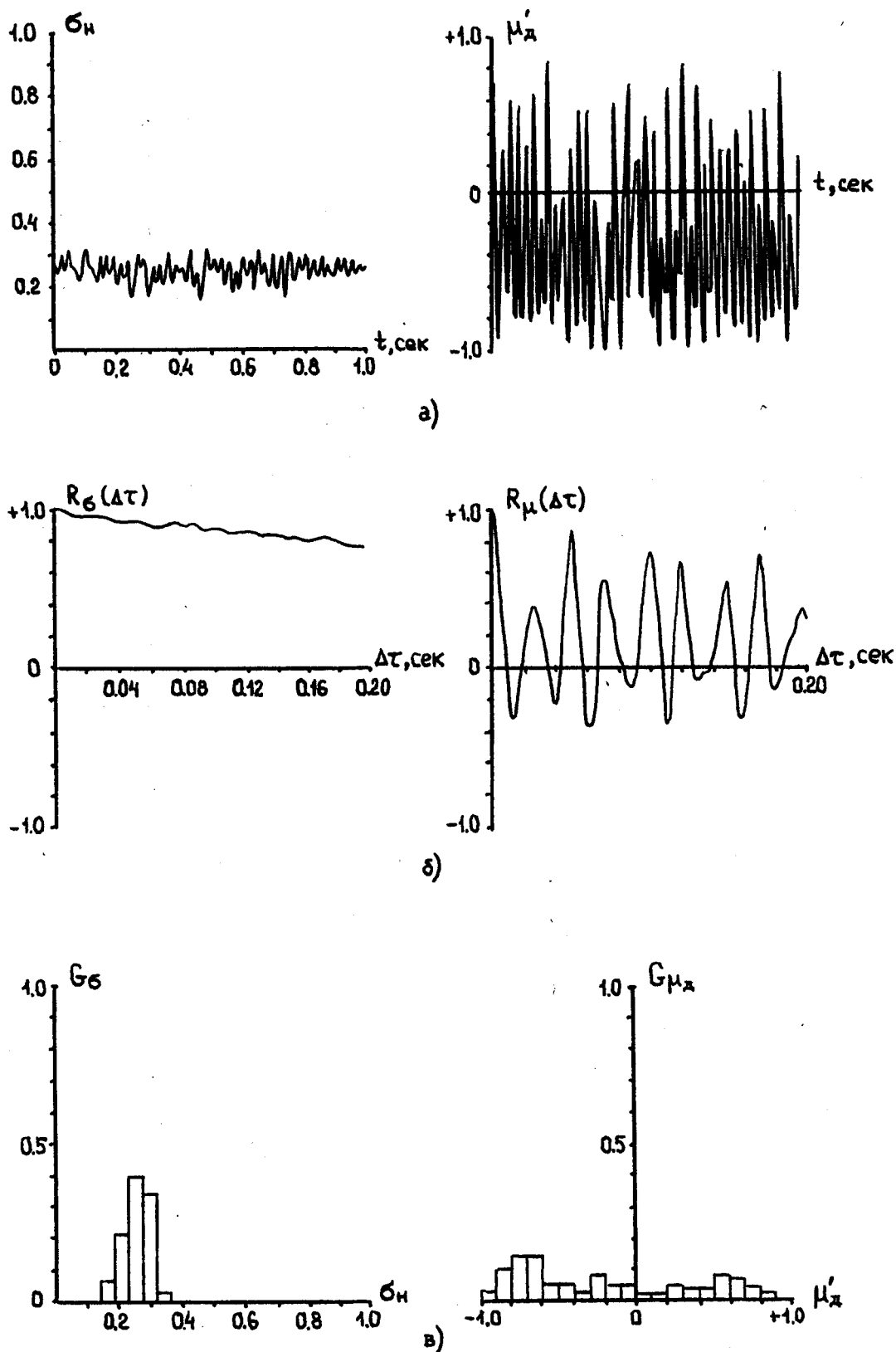


Рис.3.25. Результаты статистической обработки I-сек временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_D(t)$ составного РЛ объекта "вода + движущееся маломерное судно" (рис. 3.9.ж).

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_H(t)$, $\mu'_D(t)$;
- б) нормированные автоковариационные функции параметров ;
- в) выборочные гистограммы параметров.

чем у катера скоростью. Таким образом, реализации $\sigma_H(t)$, $\mu_D'(t)$ (рис.3.28) описывают поведение энергетического и поляризационного параметров для совокупности двух судов, перемещающихся в элементарном объеме разрешения с различными скоростями. Анализируя изменение ЭПР объекта №3 (рис.3.26) во времени, нетрудно видеть, что, за исключением отрицательного тренда, изменения σ_H практически стационарны. При этом, в отличие от энергетического параметра "маломерного судна" (рис.3.23), модуляция σ_H объекта №3 носит более регулярный низкочастотный характер. Что касается μ_D' "среднего катера" (рис.3.26), то для модуля коэффициента поляризационной анизотропии этого объекта характерна явная нестационарность как по среднему значению, так и по дисперсии. При этом какого-либо определенного соответствия между размахом колебаний $\sigma_H(t)$ и $\mu_D'(t)$ объекта №3 не наблюдается: меньшему значению ($\mu_{D' \text{ макс}} - \mu_{D' \text{ мин}}$) может соответствовать как больший, так и меньший размах ($\sigma_{H \text{ макс}} - \sigma_{H \text{ мин}}$). Сделанные выше замечания о характере $\sigma_H(t)$ и $\mu_D'(t)$ "среднего катера" почти полностью (за исключением более высокой частоты флуктуаций) относятся к временным реализациям параметров ЭПР и поляризационной анизотропии, приведенным на рис.3.28. "Двойная" модуляция энергетического (см.рис.3.28, $t=6.5 - 8.5$ сек) и поляризационного (см.рис.3.29 а,б, $t=4 - 5$ сек) параметров объясняется различием скоростей "среднего катера" и "толкача с баржей".

Другим примером проявления доплеровского эффекта во временных реализациях измеряемых параметров $\sigma_H(t)$, $\mu_D'(t)$ является объект №5 (рис.3.30, 3.31). Отличия в поведении величин ЭПР и поляризационной анизотропии "среднего катера" (рис.3.30) от $\sigma_H(t)$, $\mu_D'(t)$ для того же объекта на меньшей дальности (рис.3.26) заключаются в более широком спектре флуктуаций.

Таким образом, перемещение судов в элементарном объеме разрешения РЛС "Кедр-2" приводит к флуктуациям измеряемых величин ЭПР σ_H

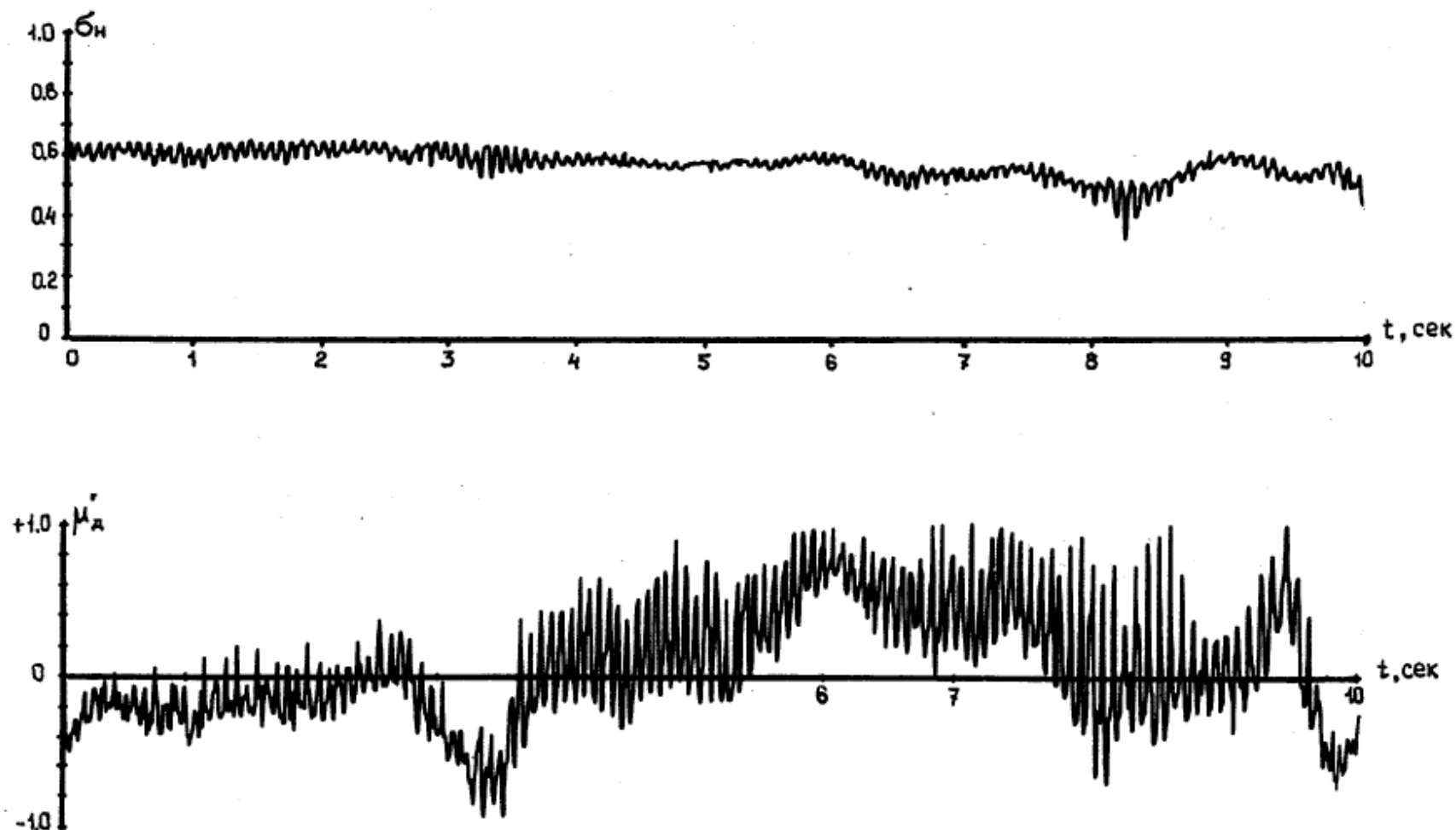


Рис.3.26. Временные зависимости параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ для составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер " (рис.3.9.е).

23.05.89. R = 2.20 км ; Ант = 560 мм ; Vветра = 5 - 10 м/сек.

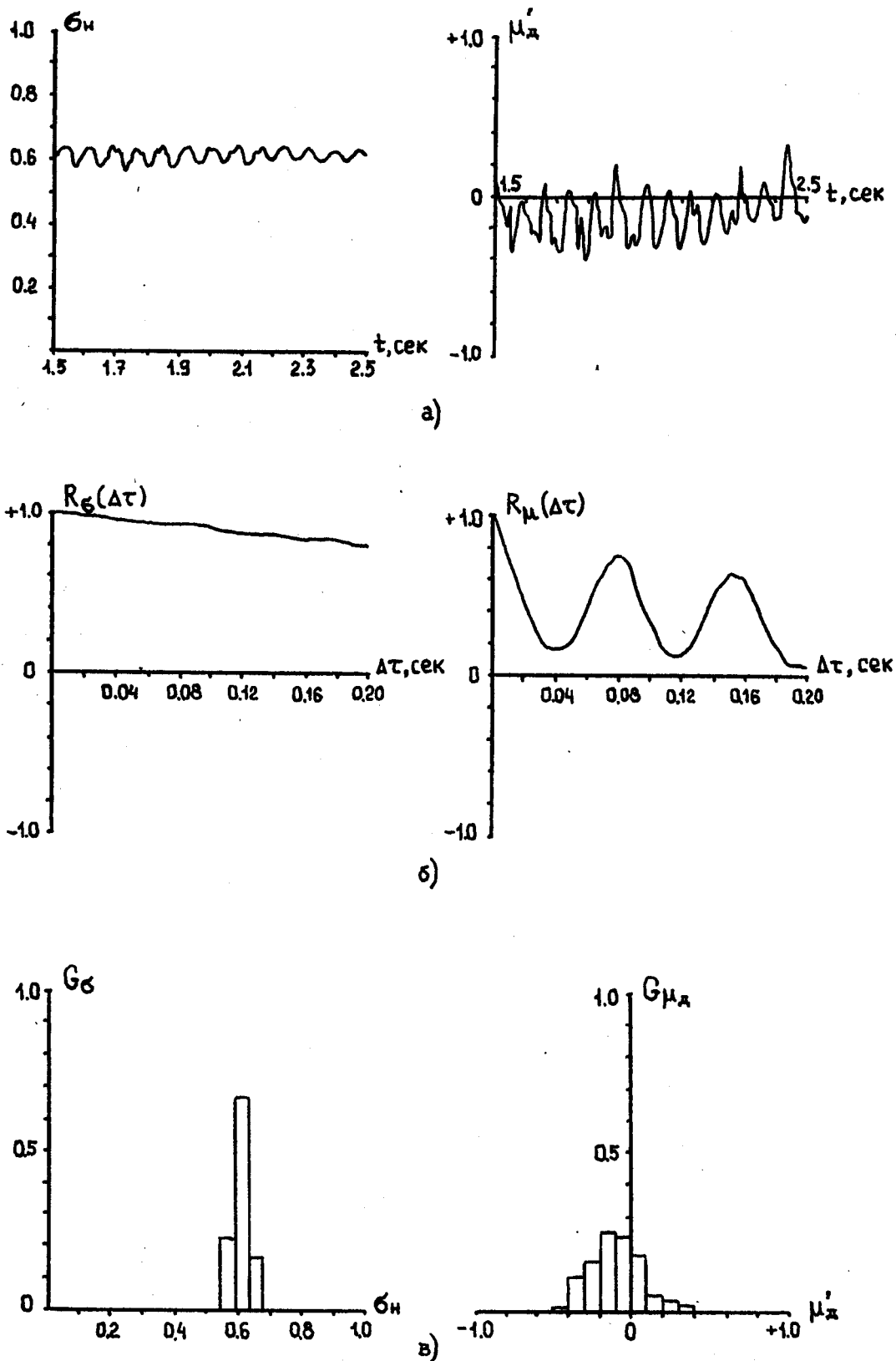


Рис.3.27. Результаты статистической обработки I-сек временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_D(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер " (рис. 3.9.е).

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_H(t)$, $\mu'_D(t)$;
- б) нормированные автоковариационные функции параметров ;
- в) выборочные гистограммы параметров.

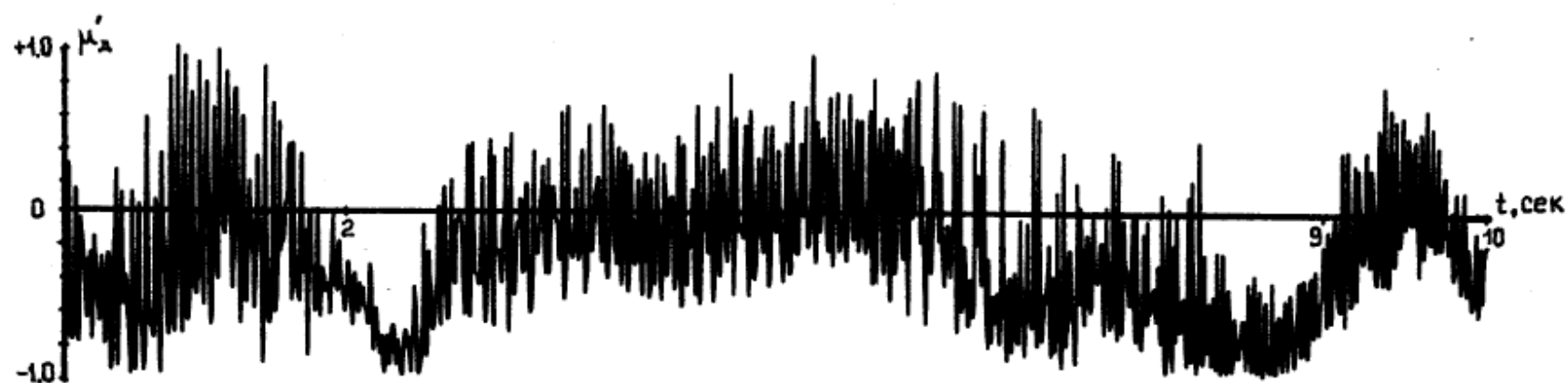


Рис.3.28. Временные зависимости параметра ЭР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ для составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер (рис.3.9.е) + движущийся с большей скоростью толкач с баржей (рис.3.9.д) "

23.05.89. R = 2.20 км ; Ант = 560 мм ; Vветра = 5 - 10 м/сек.

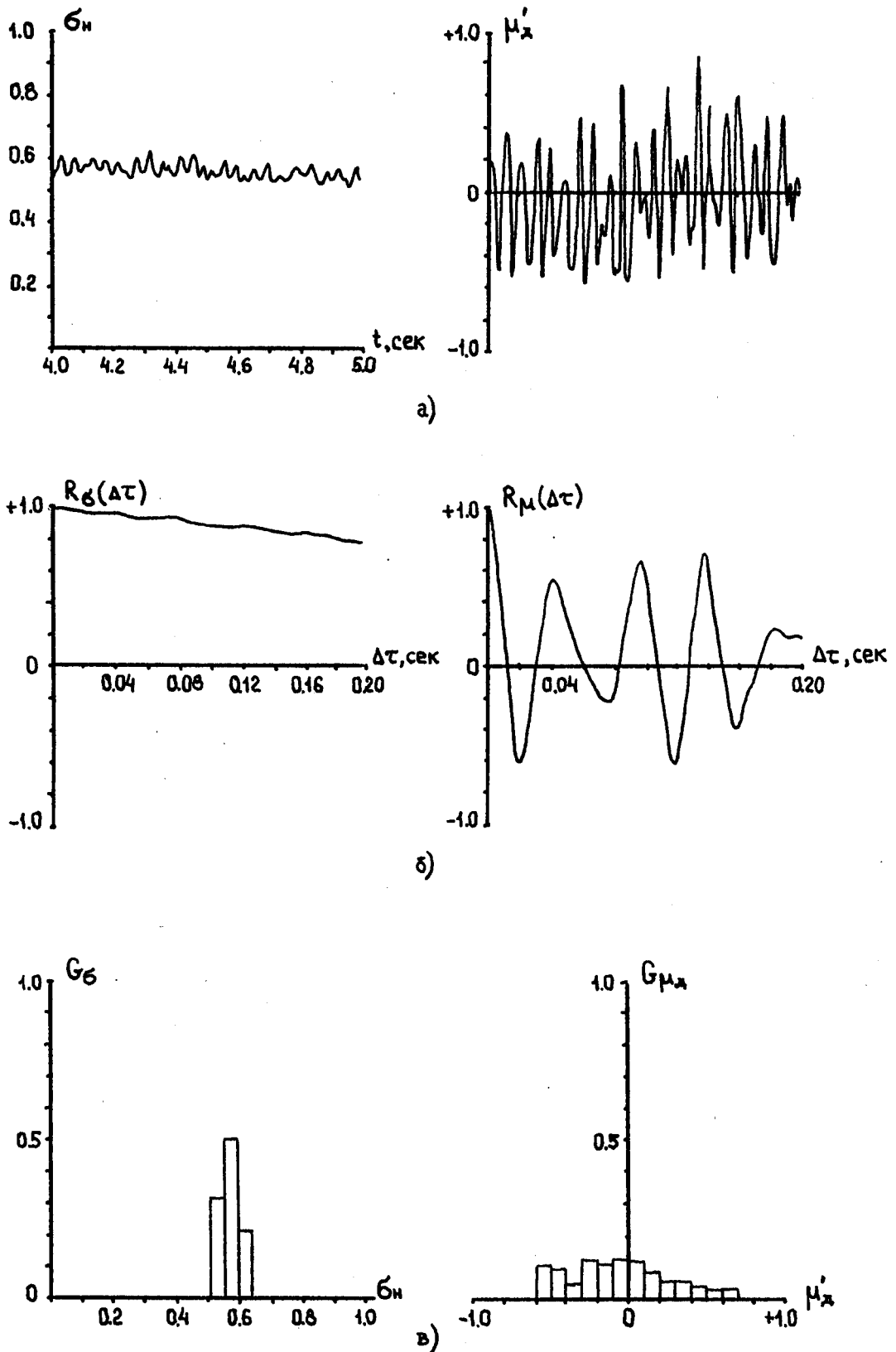


Рис.3.29. Результаты статистической обработки I-сек временной реализации параметра ЭПР $\sigma_n(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер + движущийся с большей скоростью толкач с баржей " (рис.3.9.д).

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_n(t)$, $\mu'_d(t)$;
- б) нормированные автоковариационные функции параметров ;
- в) выборочные гистограммы параметров.

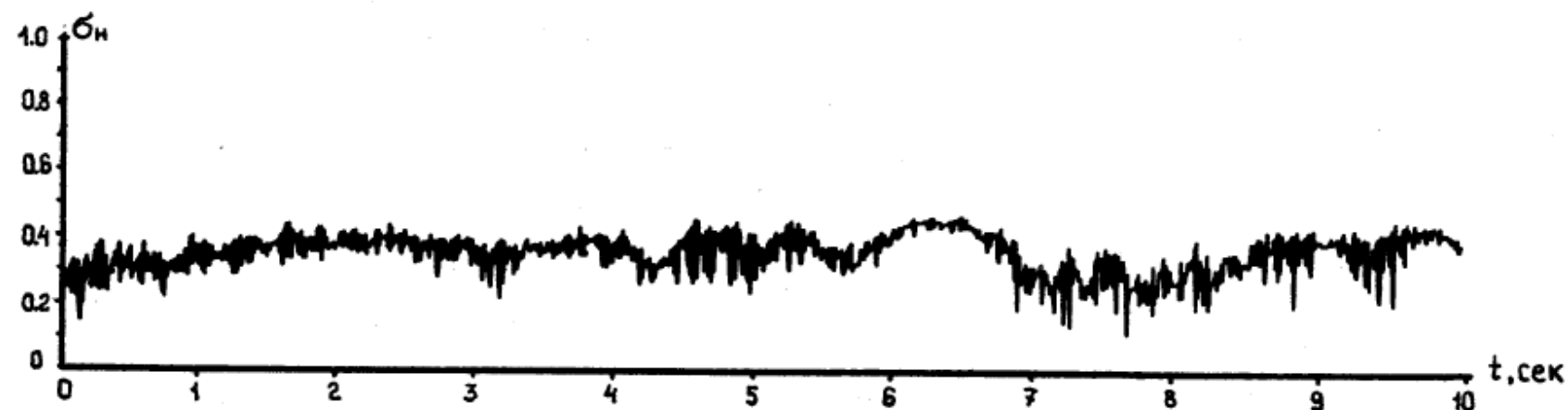


Рис.3.30. Временные зависимости параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ для составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер " (рис.3.9.е).

29.05.89. R = 6.43 км ; Ант = 560 мм ; Vветра = I - 3 м/сек.

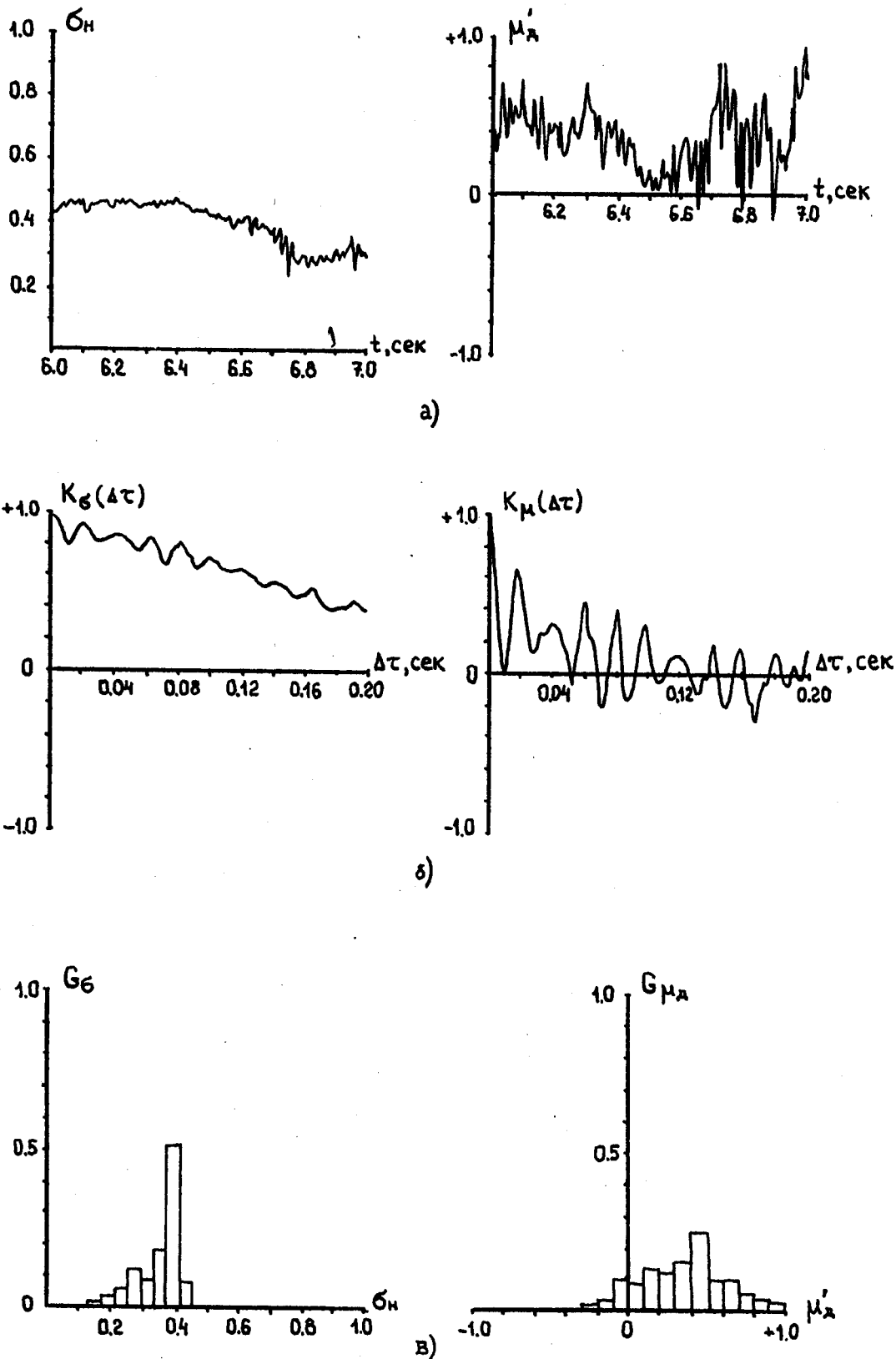


Рис.3.31. Результаты статистической обработки I-сек временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ составного РЛ объекта " вода + движущийся средний катер " (рис. 3.9.е).

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_H(t)$, $\mu'_d(t)$;
- б) нормированные автокорреляционные функции параметров ;
- в) выборочные гистограммы параметров.

и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' , вызываемым движением этих объектов по водной поверхности. При определенных условиях наблюдения судов эти флуктуации принимают регулярный характер, что показано на рис.3.20 – 3.31. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы об особенностях поляризационного контраста движущихся судов, как объектов РЛ наблюдения :

- а) при РЛ наблюдении судов с помощью моноимпульсной поляризационной РЛС "Кедр-2(4)" изменения параметров ЭПР и модуля коэффициента поляризационной анизотропии могут носить регулярный характер, обусловленный радиальной составляющей скорости перемещения объектов ;
- б) параметр модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' является более чувствительным к перемещению судна, чем величина эффективной поверхности рассеяния объекта ;
- в) величина размаха доплеровских флуктуаций параметра модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' непосредственно не связана с интенсивностью колебаний ЭПР σ_H из-за движения судна ;
- г) абсолютное значение ЭПР судна слабо влияет на регулярное изменение параметров $\sigma_H(t)$ и $\mu_d'(t)$;
- д) среднее значение параметра модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' носит нестационарный, знакопеременный характер.

3.5.4. Результаты измерения параметров ЭПР и поляризационной анизотропии при РЛ наблюдении за летящим вертолетом.

Среди экспериментальных результатов измерения величин ЭПР σ_H и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' различных РЛ целей, полученных с помощью РЛС "Кедр-2(4)", имеются данные наблюдения за летящим в элементарном объеме разрешения вертолетом (рис. 3.32, 3.33). Судя по временным реализациям $\sigma_H(t)$, $\mu_d'(t)$, эти па-

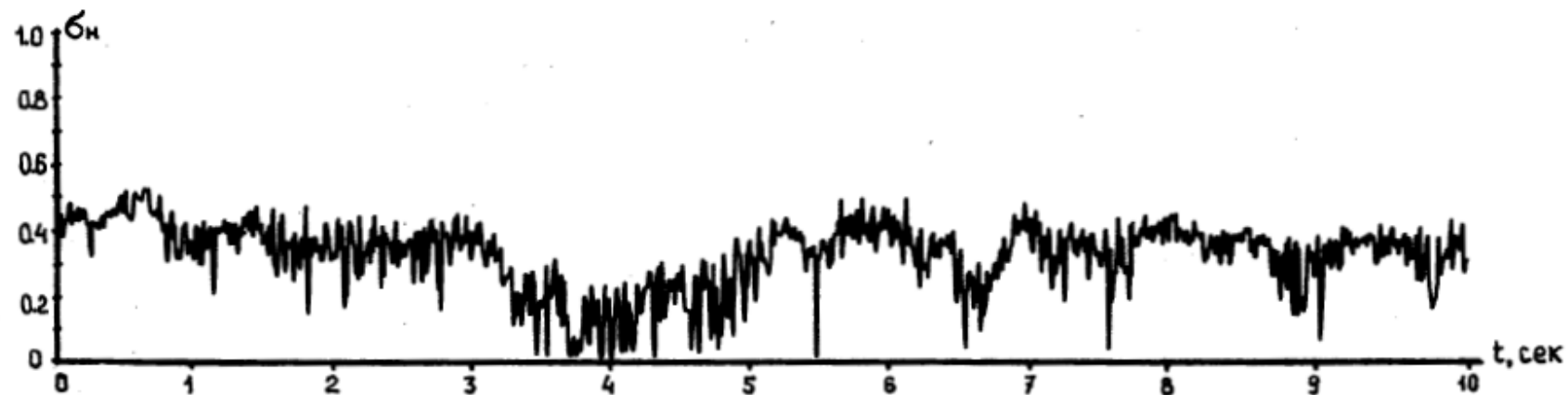


Рис.3.32. Временные зависимости параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ для РЛ объекта "находящийся в полете вертолет".

14.II.87. R = 2.50 км ; Ант = 560 мм .

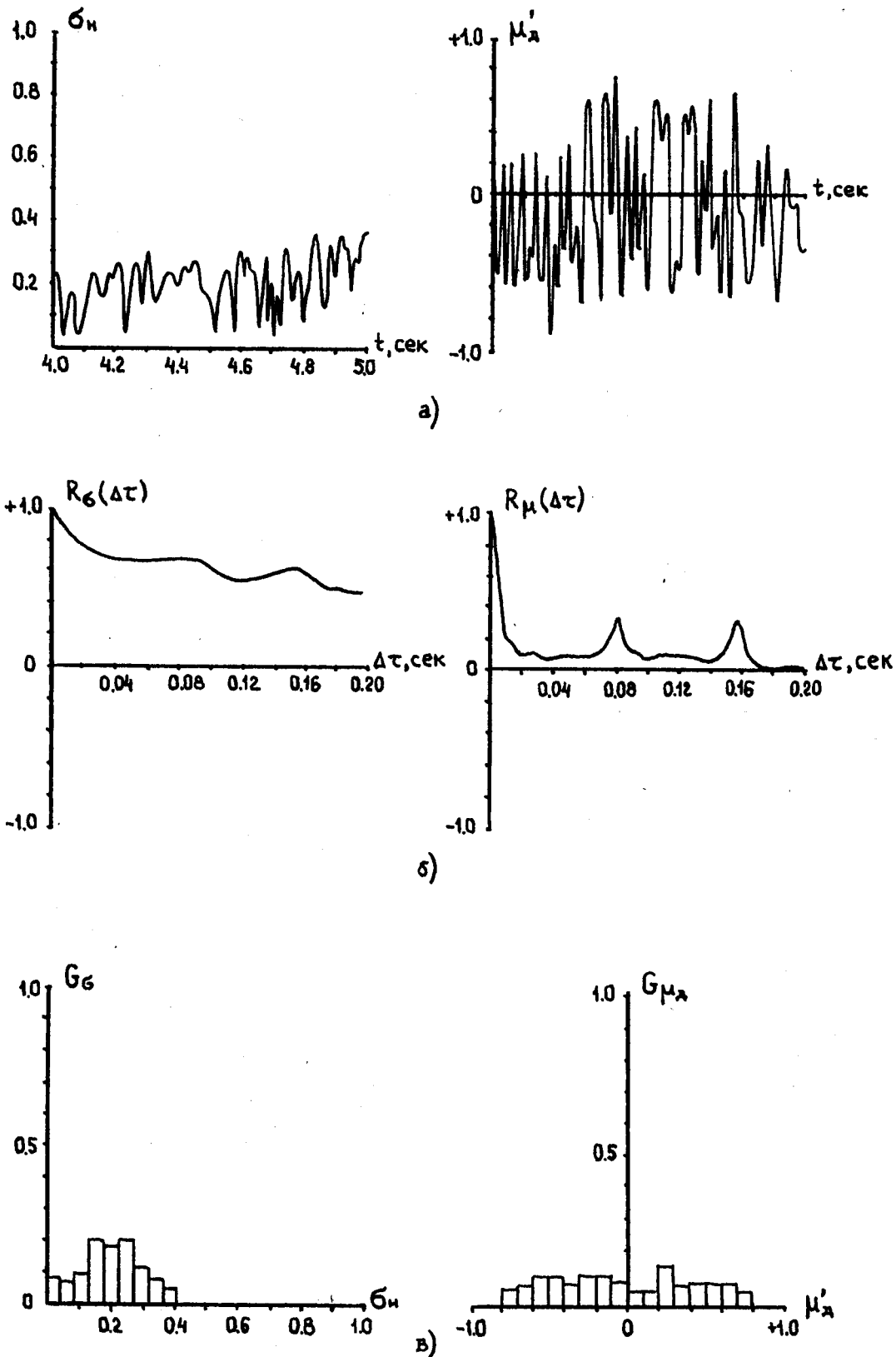


Рис.3.33. Результаты статистической обработки I-сек временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_H(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_d(t)$ РЛ объекта "находящийся в полете вертолет".

- а) I-сек временные реализации параметров $\sigma_H(t)$, $\mu'_d(t)$;
- б) нормированные автоковариационные функции параметров;
- в) выборочные гистограммы параметров.

параметры нестационарны по среднему и дисперсии. В качестве примера на рис.3.33 приведены результаты статистического анализа односекундной ($t = 4 - 5$ сек) временной реализации. Автокорреляционная функция величины μ_d' показывает на присутствие в спектре флуктуаций $\mu_d'(t)$ регулярной гармонической составляющей с частотой порядка 12 Гц. Объяснить это можно тем, что рассеянная волна представляет собой сумму потоков, обусловленных отражением от корпуса вертолета и вращающихся лопастей винта, что приводит к появлению регулярных составляющих в спектре флуктуаций модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' . В свою очередь проявление доплеровской модуляции в изменении параметра ЭПР имеет слабовыраженный характер. Перемещение вертолета в элементарном объеме разрешения РЛС приводит к флуктуациям измеряемых величин. Тем не менее, чувствительность поляризационного параметра к перемещению РЛ объекта "вертолет" оказывается выше, чем у энергетического параметра σ_n .

3.5.5. Оценка поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР транспортных средств.

При решении ряда задач военного характера необходимо выделять бронированные транспортные средства на фоне подстилающей поверхности. В ходе экспериментов по изучению поляризационного контраста объектов были проведены измерения параметров ЭПР и модуля коэффициента поляризационной анизотропии в отношении сосредоточенных целей подобного типа (см.рис.3.9 а, и). Измерения проводились с помощью моноимпульсной обзорной РЛС "Кедр-4", позволяющей оценивать эти параметры на двух различных несущих частотах зондирующего сигнала. Обозначим величины ЭПР и поляризационной анизотропии, оцениваемые в 1-ом и 2-ом частотных каналах, как σ_1, μ_{d1}' и σ_2, μ_{d2}' . Кроме этого, в РЛС "Кедр-4" определялись величины :

$$\left. \begin{aligned} \mu_{дс}' &= 0.5 \cdot (\mu_{д1}' + \mu_{д2}') , \\ \sigma_{нс} \text{ (или } \sigma_c) &= 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) . \end{aligned} \right\} . \quad (3.28)$$

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем : измерялись поляризационный и энергетический параметры участка местности, на котором исследовался поляризационный контраст составного РЛ объекта "фон + бронированное транспортное средство" ; затем на этом участке бронированная цель занимала положения, соответствующие фиксированным значениям ракурса β , для которых производилось измерение и накопление величин σ_n , μ_d' ; аналогичные измерения проводились при циркуляции объекта, его движении через разрешаемый объем под различными углами, совместном движении с другими объектами и т.п. Для зондирующих РЛ сигналов в 3-см диапазоне волн бронированные ТС (рис.3.9 в,и) представляют собой сложные переотражающие объекты. Корпуса обоих объектов состоят из металлических плоскостей, состыкованных под различными углами и образующих равнообразные многогранные поверхности. Кроме того, дополнительный вклад в рассеяние сигнала вносят конструкции сложной формы на их бортах.

Рассмотрим результаты измерения энергетического и поляризационного параметров, а также оценки соответствующих величин контраста, для объектов "колесное (КТС)" и "гусеничное (ГТС) бронированное транспортное средство" при фиксированных ракурсах β в неподвижном состоянии. Изменение ракурса объекта происходило с интервалом 45° относительно линии визирования "объект - РЛС". Точность углового положения КТС (ГТС) выдерживалась в пределах $\pm 15^\circ$. Сами измерения происходили зимой и весной при различном состоянии подстилающей поверхности и различных дальностях до объекта : от 1.4 до 4.94 км. Проведенные эксперименты позволили оценить степень изменчивости величин ЭПР и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' неподвижных транспортных средств, расположенных на пересеченной

местности. Сравнение двухсекундных реализаций $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ в обоих частотных каналах показало, что при фиксированных ракурсах β транспортных средств процессы $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$ стационарны на интервале 10 секунд. При этом средний размах $r = \max\{\sigma_1(t)\} - \min\{\sigma_1(t)\}$ для $\sigma_1(t)$ лежит в интервале $0.03 \div 0.05$ (см.рис.3.34 - 3.37). Анализ временных реализаций модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu_{d1}'(t)$ выявил более сложный характер флуктуаций этого параметра по сравнению с величиной ЭПР $\sigma_1(t)$. При этом наблюдаются ситуации, когда оба параметра μ_{d1}' и μ_{d2}' нестационарны на 1-сек интервалах, либо когда нестационарный характер носит изменение лишь одного из них. Другой характерной особенностью в изменении величин поляризационной анизотропии $\mu_{d1}'(t)$ является гораздо большая дисперсия флуктуаций, чем у параметра нормированной ЭПР. Кроме того, как для гусеничного, так и для колесного транспортных средств, существуют ракурсы β , при которых дисперсия флуктуаций по одному из поляризационных параметров μ_d значительно превосходит аналогичную величину для другого (рис.3.34 - 3.37). Для того, чтобы уменьшить влияние этих факторов было предложено использовать в качестве оцениваемых параметров величины (3.28). Рассмотрим особенности поляризационного контраста для обоих типов транспортных средств на примере величины поляризационной анизотропии μ_{dc}' в "суммарном" канале и сравним полученные результаты с РЛ контрастом по ЭПР для параметра σ_{nc} . Некоторые результаты исследований представлены в сжатой форме на рис. 3.38 - 3.51. На каждом из этих рисунков изображена система координат (μ_{dc}', σ_{nc}) , на которой условно показаны области изменения измеряемых параметров для фиксированного ракурса транспортного средства. Центр изображенного прямоугольника представляет собой точку с координатами $(\overline{\mu_{dc}'}, \overline{\sigma_{nc}})$, отвечающими средним значениям поляризационного и энергетического параметров на интервале измерения $T_{изм} = 2$ сек. Заштрихованный прямоугольник соответствует области, зани-

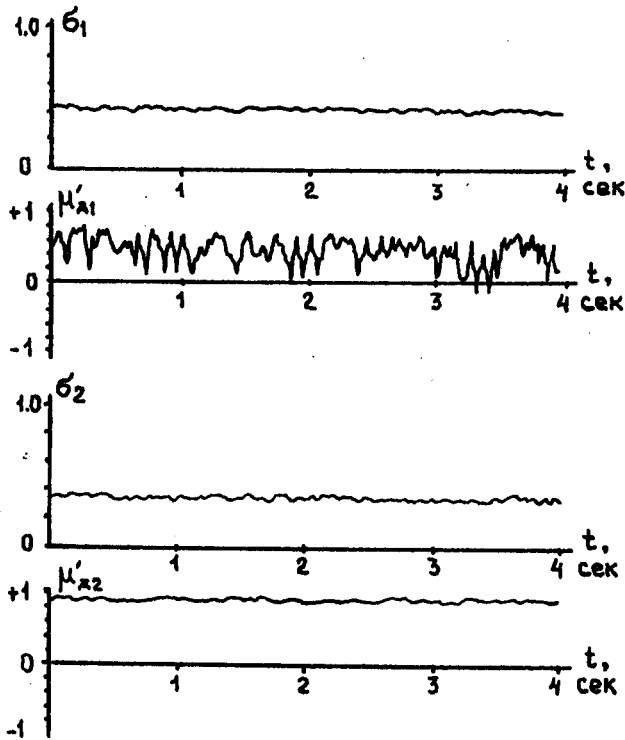


Рис.3.34. Временные реализации параметров σ_1 и μ_{d1} I-го и 2-го каналов для неподвижного ГТС ($\beta = 0^\circ$). 23.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом; $R = 1.7$ км.

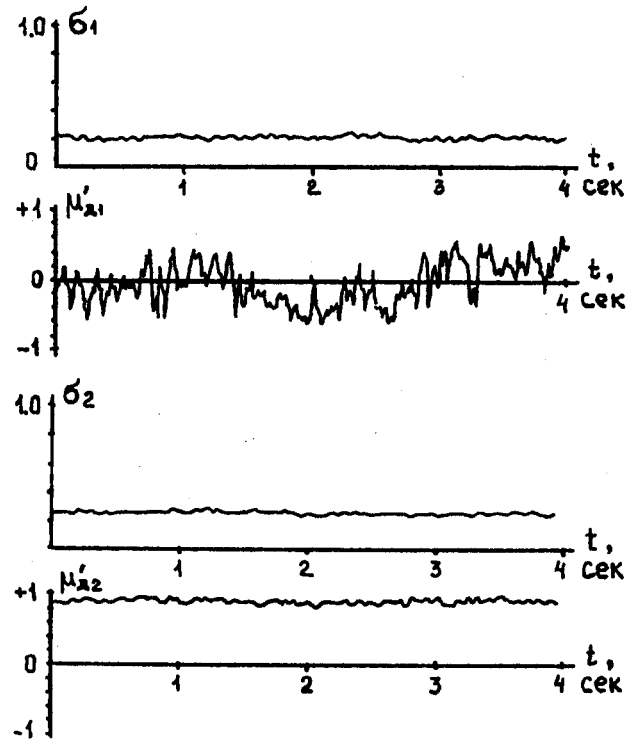


Рис.3.35. Временные реализации параметров σ_1 и μ_{d1} I-го и 2-го каналов для неподвижного ГТС ($\beta = 225^\circ$). 25.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом; $R = 4.94$ км.

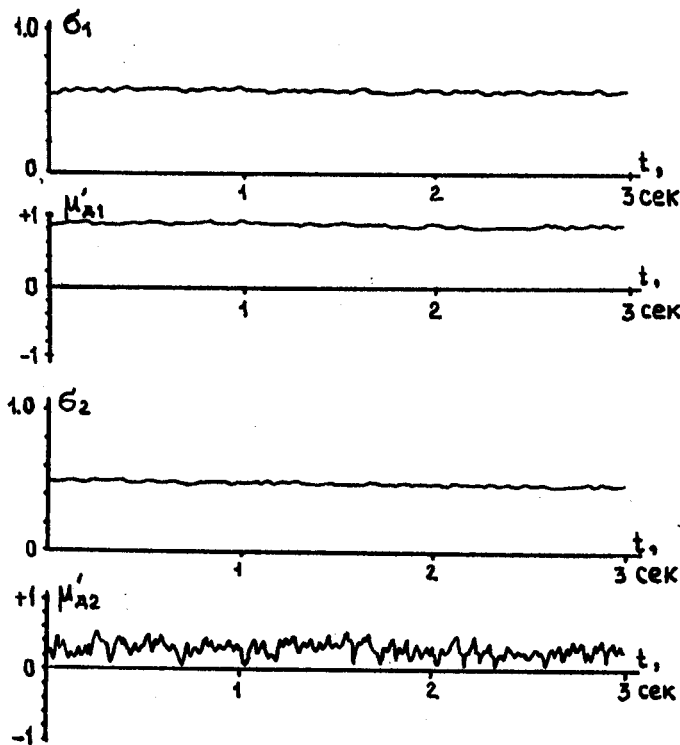


Рис.3.36. Зависимости $\sigma_1(t)$ и $\mu_{d1}(t)$ для неподвижного ГТС ($\beta = 0^\circ$) на "пашне". 18.04.90. $R = 1.4$ км; АНТ = 760 мм.

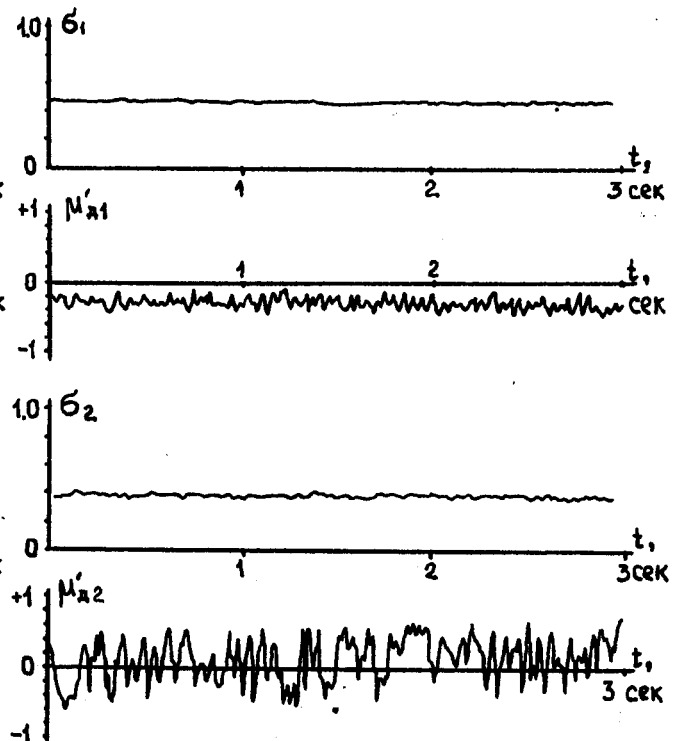


Рис.3.37. Зависимости $\sigma_1(t)$ и $\mu_{d1}(t)$ для неподвижного ГТС ($\beta = 135^\circ$) на "пашне". 18.04.90. $R = 1.4$ км; АНТ = 760 мм.

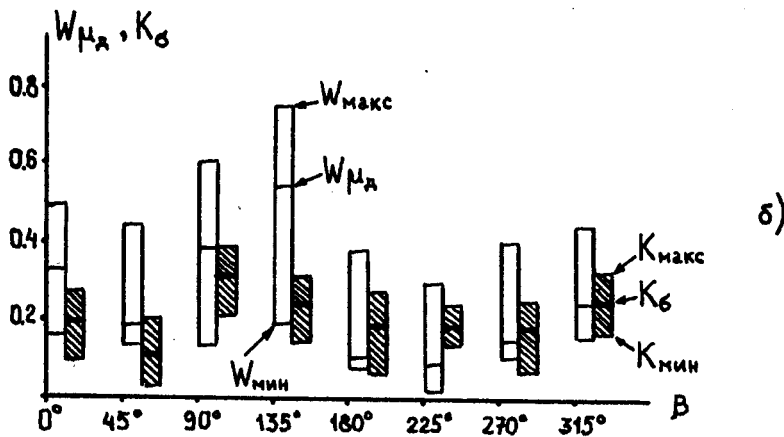
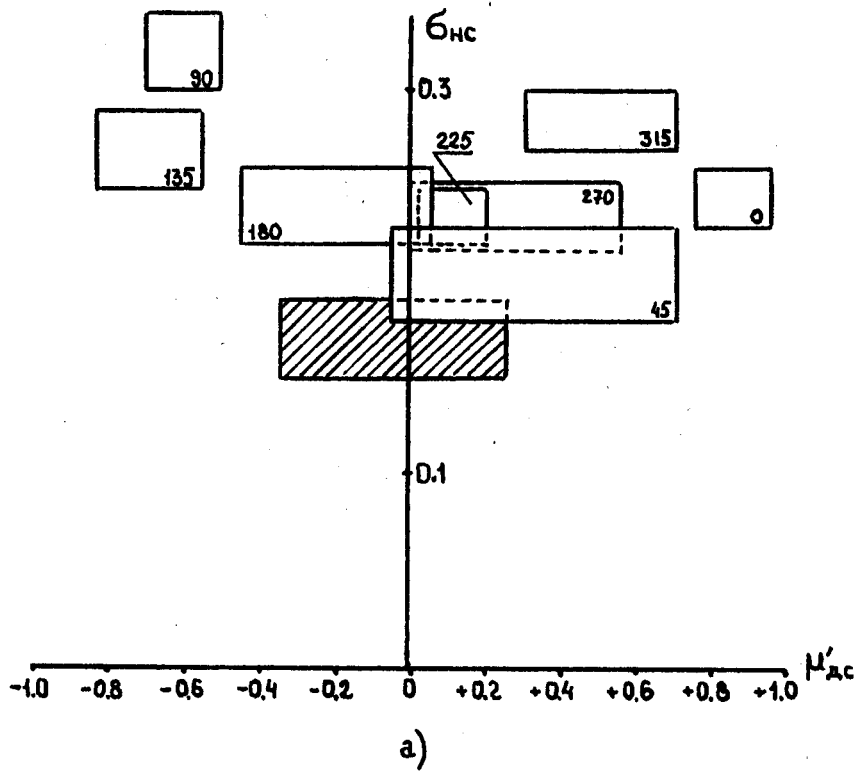




Рис.3.38. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .
(22.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом . $R = 1.7$ км; Ант = 560мм.)

а) Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭПР σ_{nc} и модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ'_{dc} в суммарном канале для составного РЛ объекта типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

 - средние пределы изменения (σ_{nc}, μ'_{dc}) для неподвижного бронированного объекта (ГТС) при фиксированных ракурсах $\beta = const$;
 - средние пределы изменения (σ_{nc}, μ'_{dc}) для фонового образования "поле покрытое снегом" .

б) Средние величины поляризационного контраста W_{μ_d} (3.27) и радиолокационного контраста K_{σ} (3.26) по параметру ЭПР , а также верхний и нижний пределы их изменения в зависимости от ракурса β .

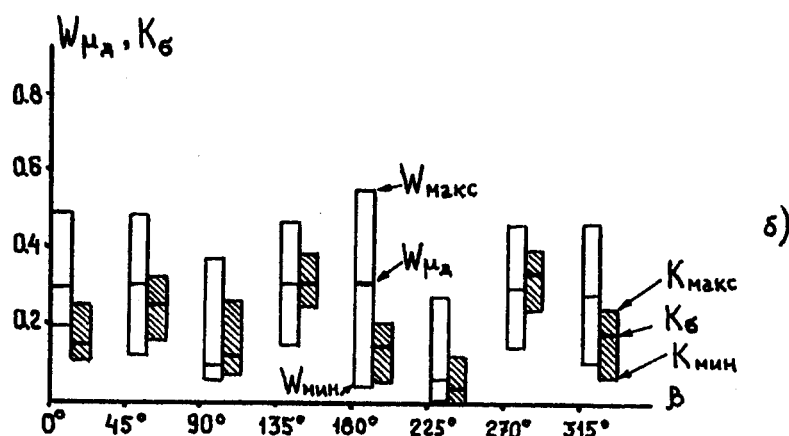
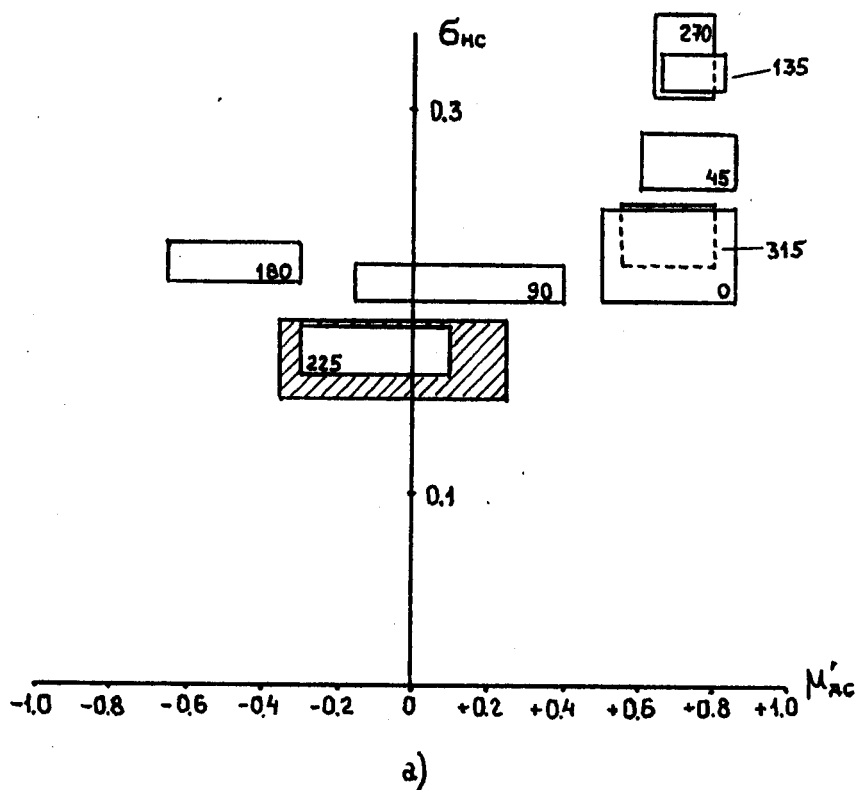




Рис.3.39. Результаты оценки контраста колесного ТС .

(22.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом . R = 1.7 км; Ант = 560мм.)

а) Условное обозначение областей изменения нормированных параметров ЭПР $\sigma_{нс}$ и модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu'_{дс}$ в суммарном канале для составного РЛ объекта типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

 В — средние пределы изменения ($\sigma_{нс}, \mu'_{дс}$) для неподвижного бронированного объекта (КТС) при фиксированных ракурсах $\beta = \text{const}$;

 — средние пределы изменения ($\sigma_{нс}, \mu'_{дс}$) для фонового образования "поле покрытое снегом" .

б) Средние величины поляризационного контраста $W_{\mu д}$ (3.27) и радиолокационного контраста $K_{с}$ (3.26) по параметру ЭПР, а также верхний и нижний пределы их изменения в зависимости от ракурса β .

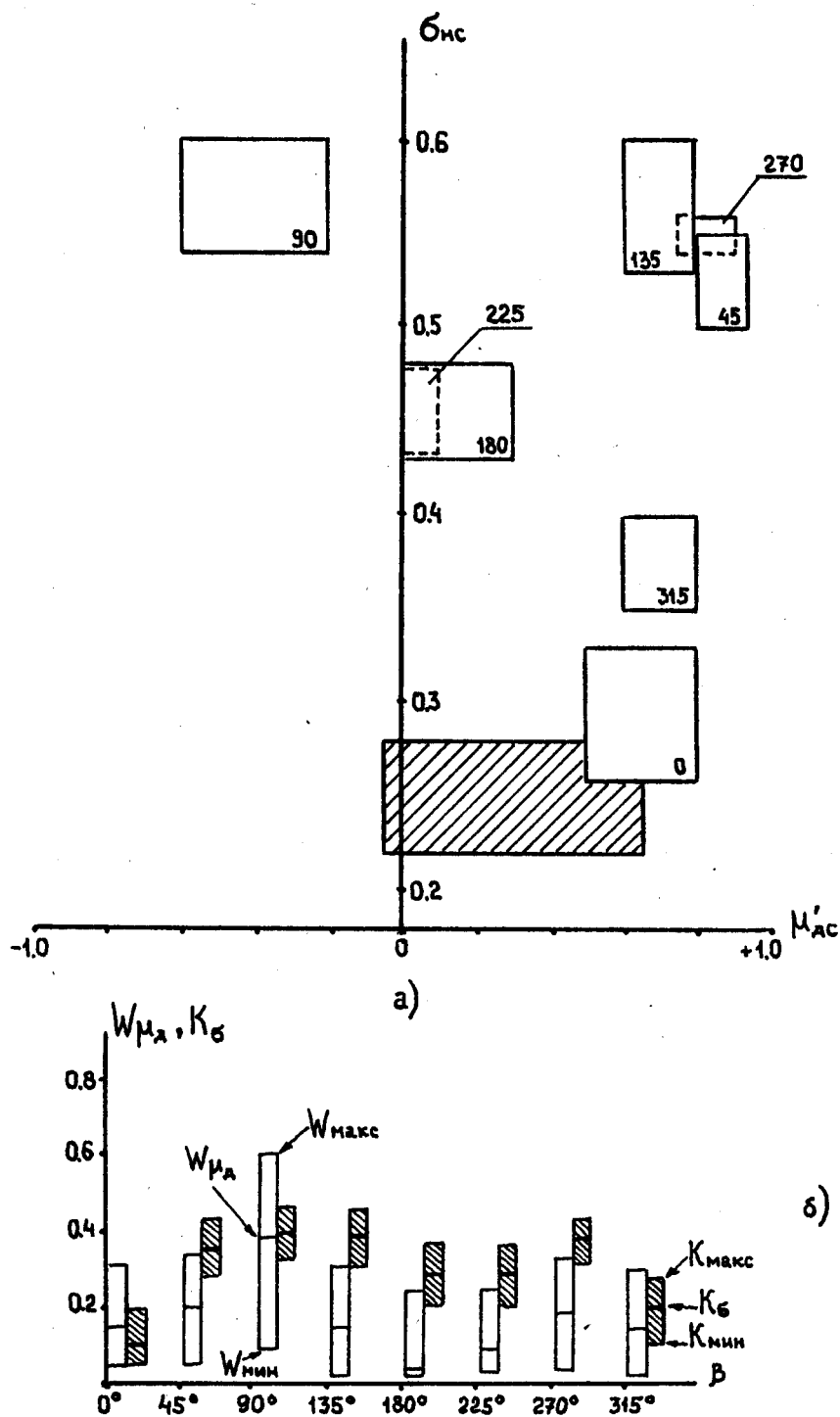




Рис.3.40. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .
(23.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом .R = 1.74 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

-  — неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = \text{const}$;
-  — " поле покрытое снегом ".

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_σ контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

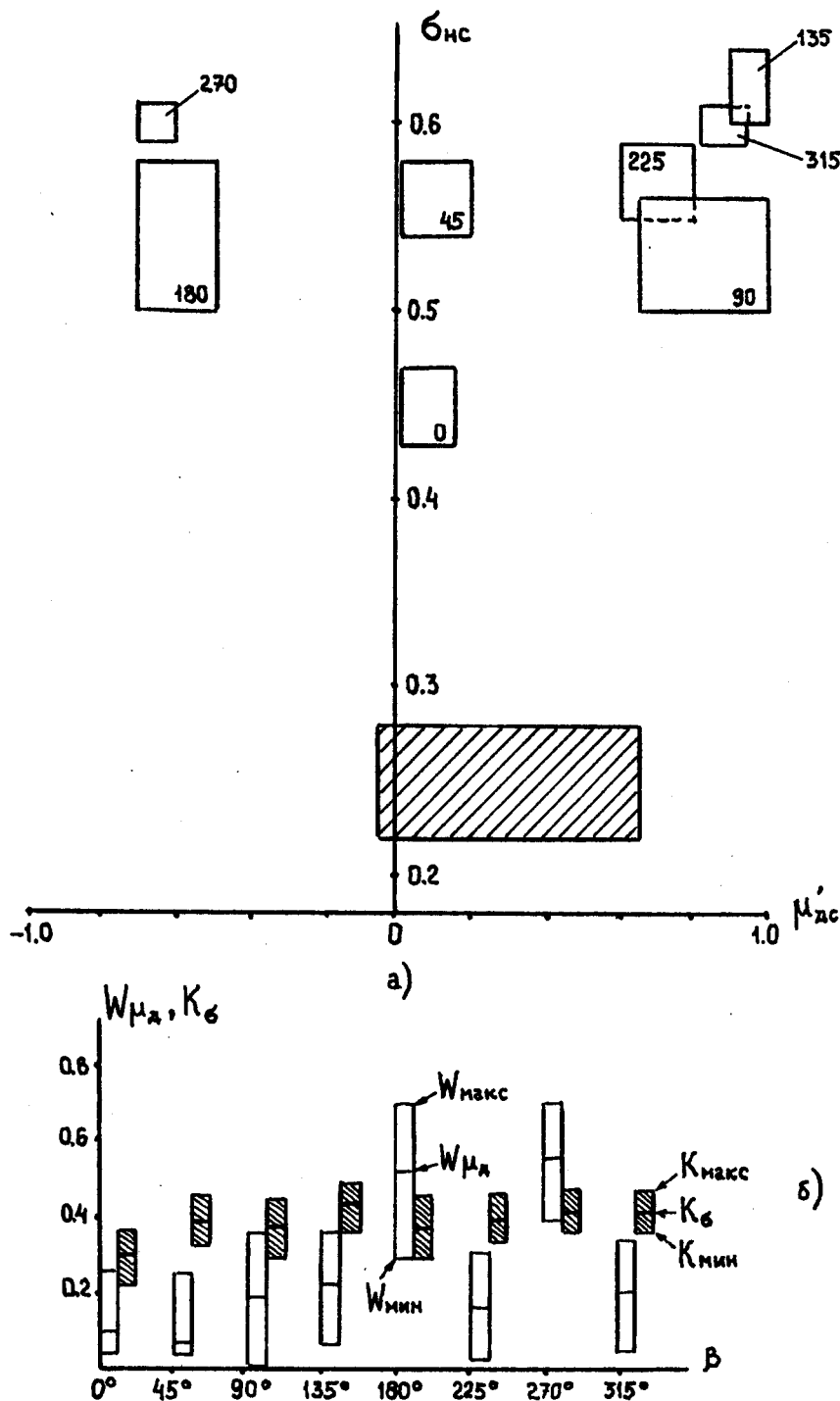




Рис.3.41. Результаты оценки контраста колесного ТС .
(23.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом. $R = 1.74$ км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

-  β - неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = \text{const}$;
-  - " поле покрытое снегом ".

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_σ контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

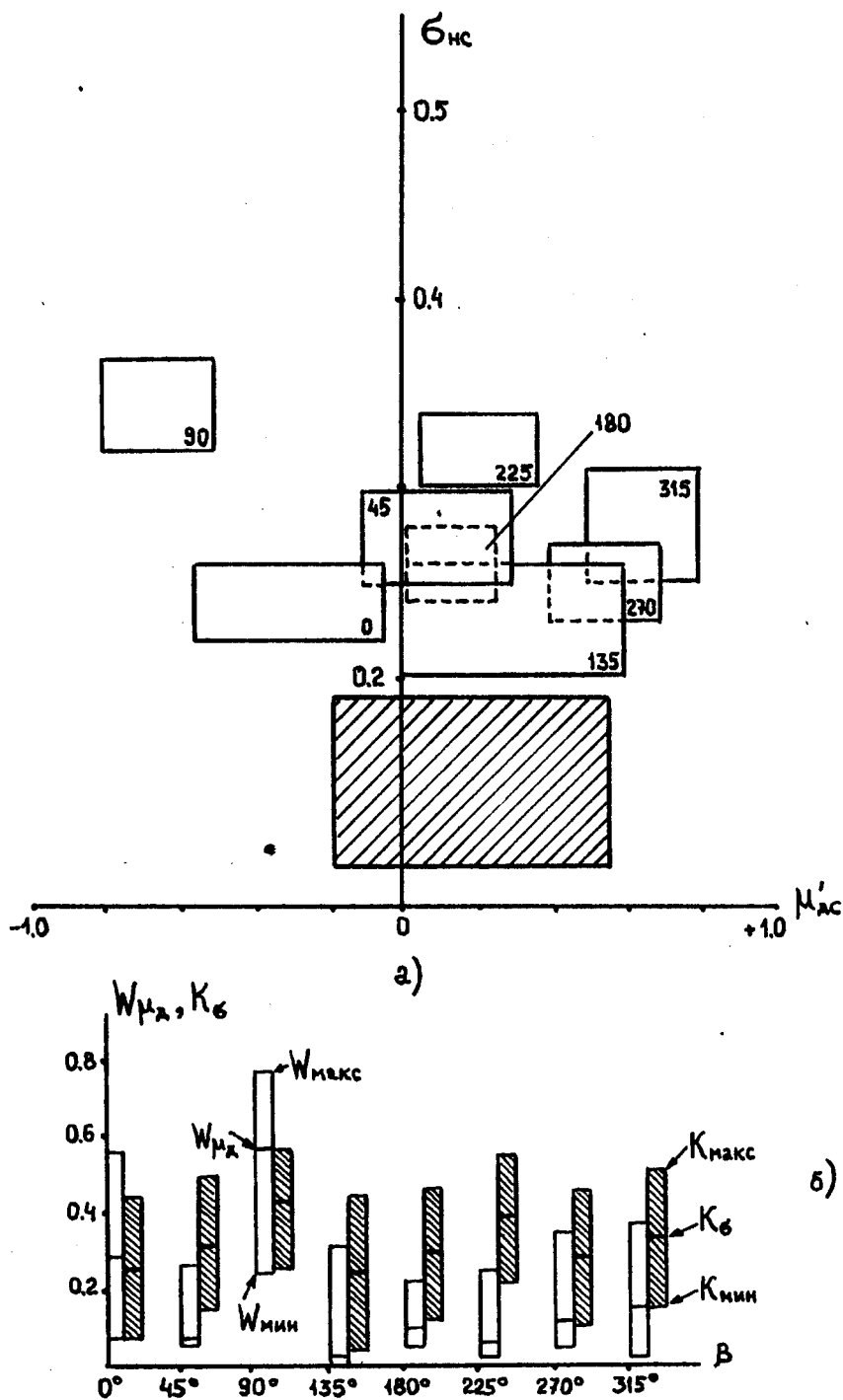


Рис.3.42. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .

(23.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом. $R = 3.5$ км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения $\sigma_{нс}$ и $\mu'_{дс}$ в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" .:

- β — неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = \text{созвт}$;
- " поле покрытое снегом ".

б) Средние величины поляризационного $W_{\mu д}$ и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

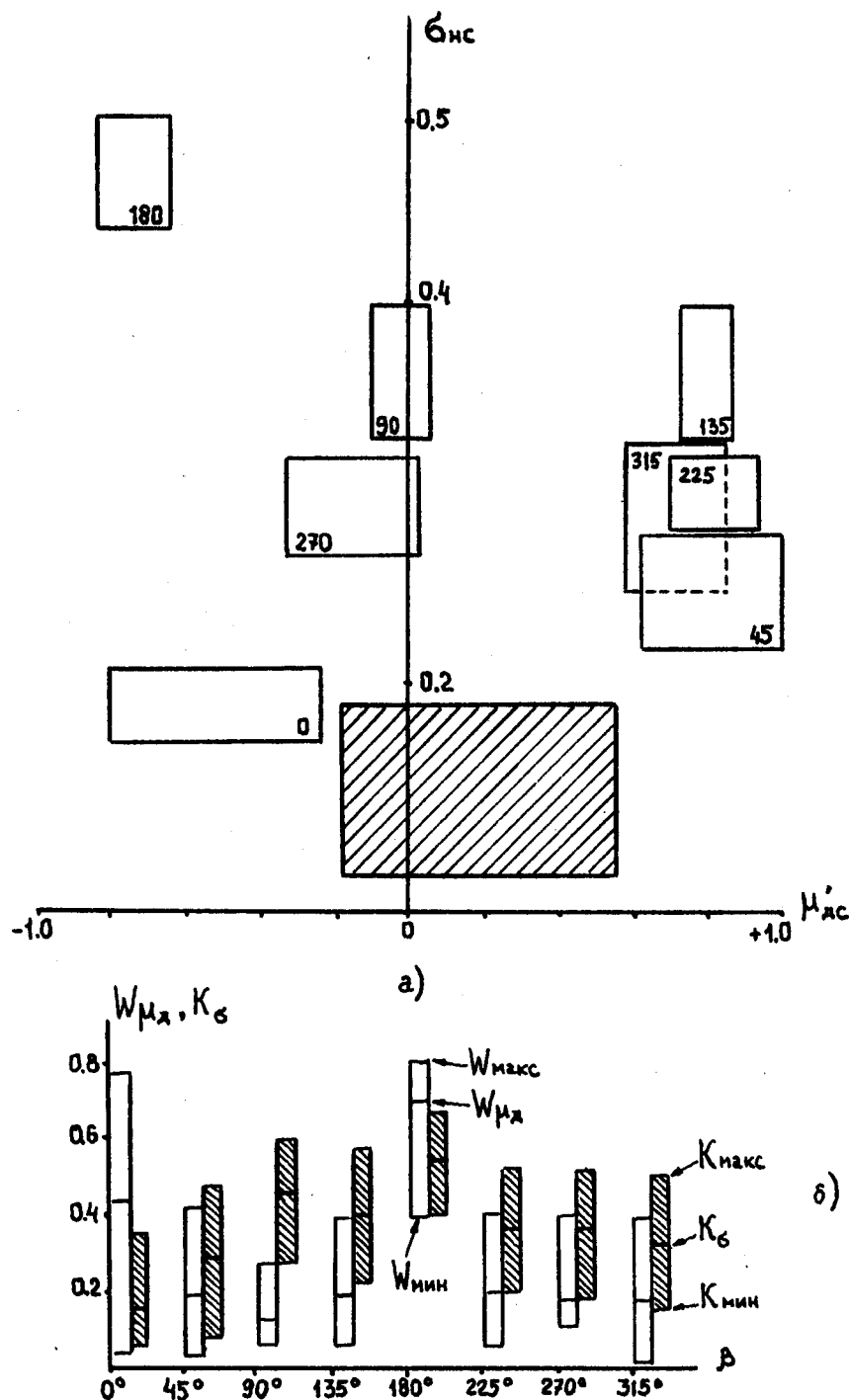


Рис.3.43. Результаты оценки контраста колесного ТС .

(23.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом. $R = 3.5$ км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон":

- β - неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = \text{const}$;
- " поле покрытое снегом ".

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

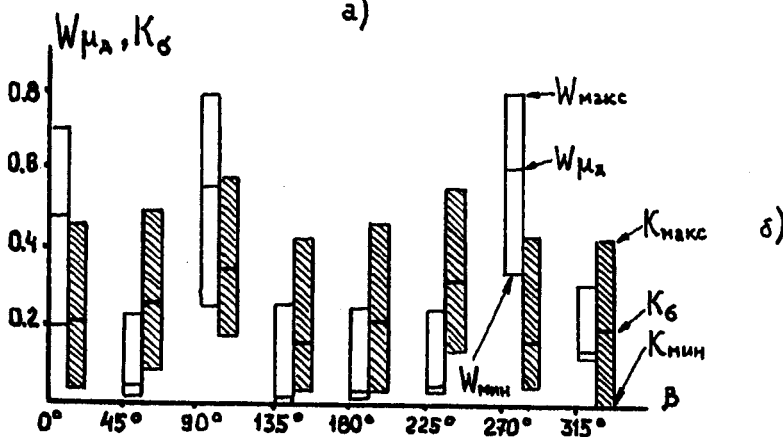
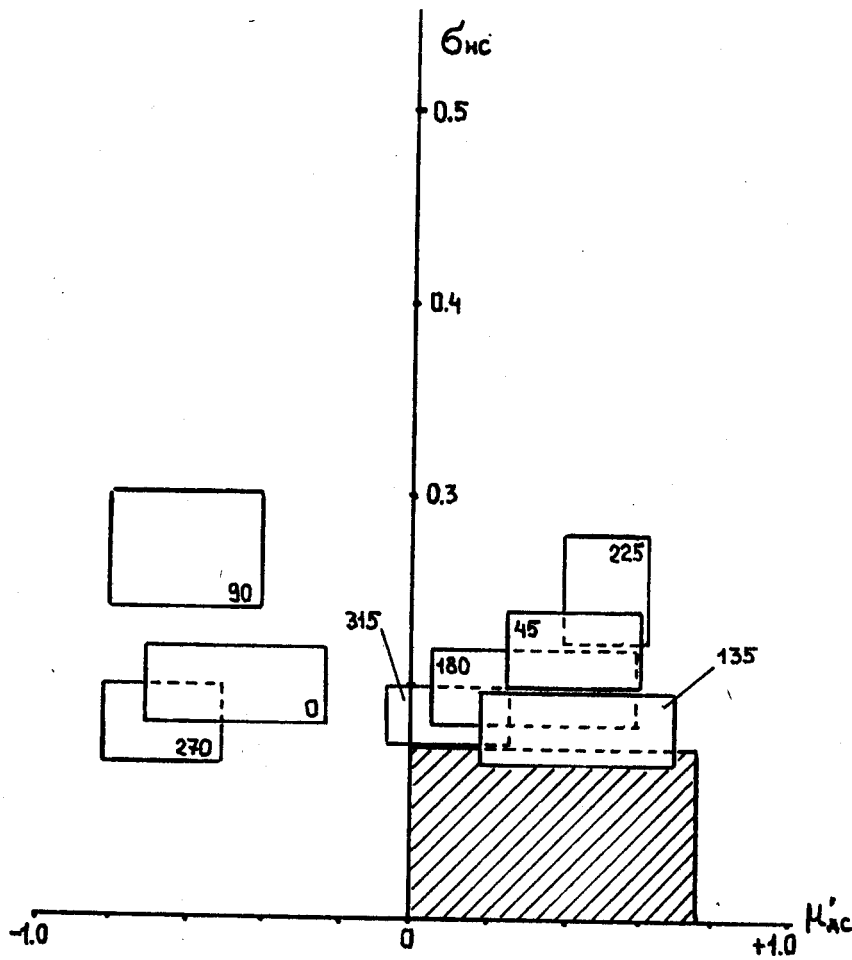


Рис.3.44. Результаты оценки контраста гусеничного ТС.
(25.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом .R = 4.94 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- б - неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = const$;
- " поле покрытое снегом " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

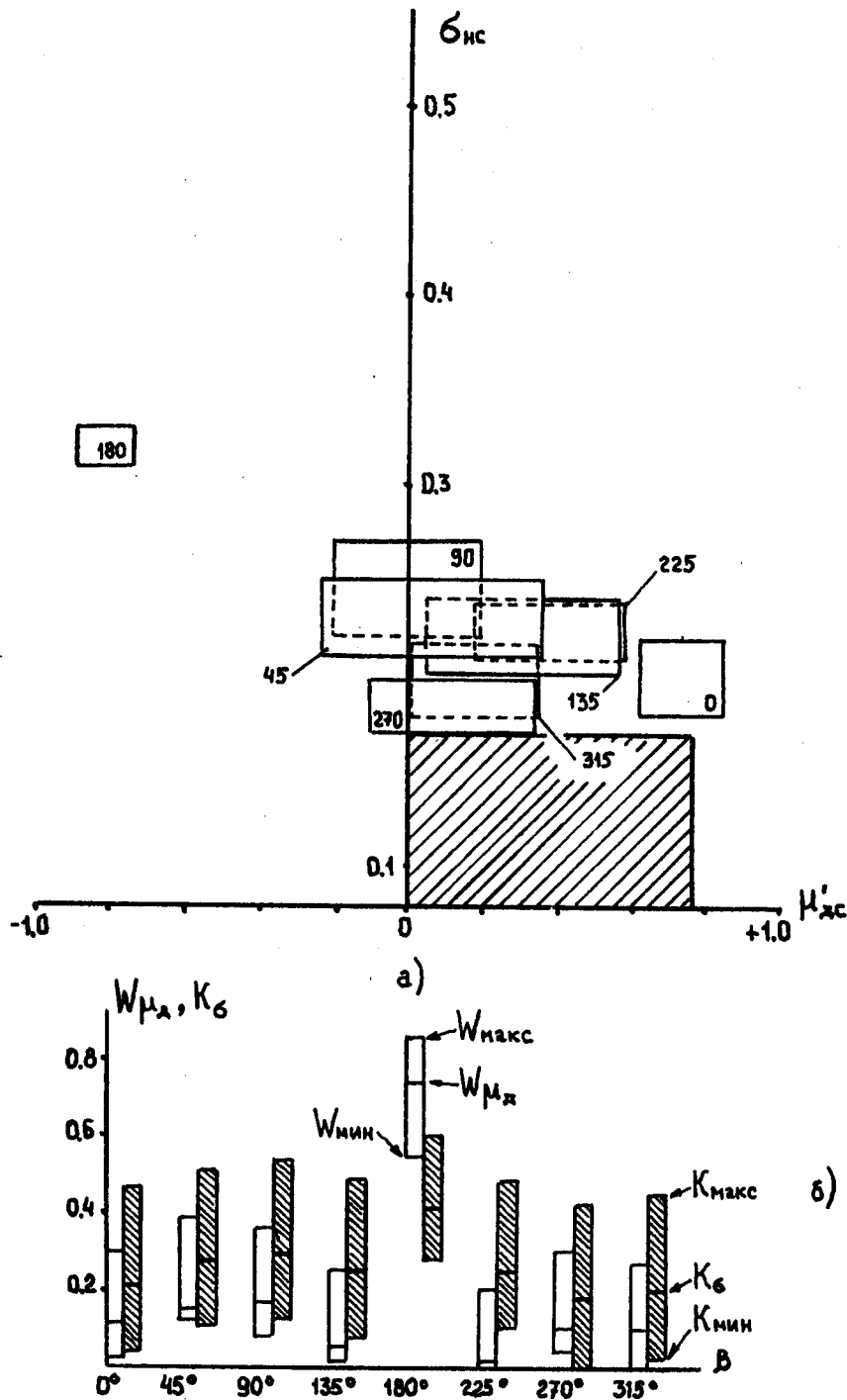


Рис.3.45. Результаты оценки контраста колесного ТС .

(25.01.90. "Фон" : поле покрытое снегом .R = 4.94 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- β — неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = \text{const}$;
- " поле покрытое снегом ".

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_σ контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

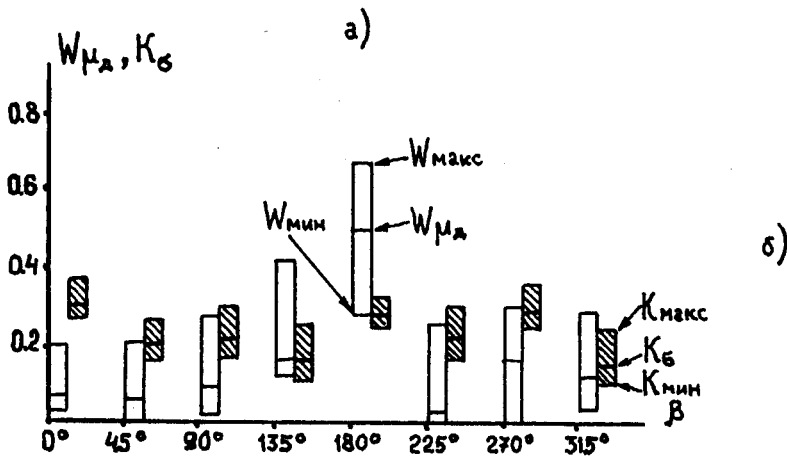
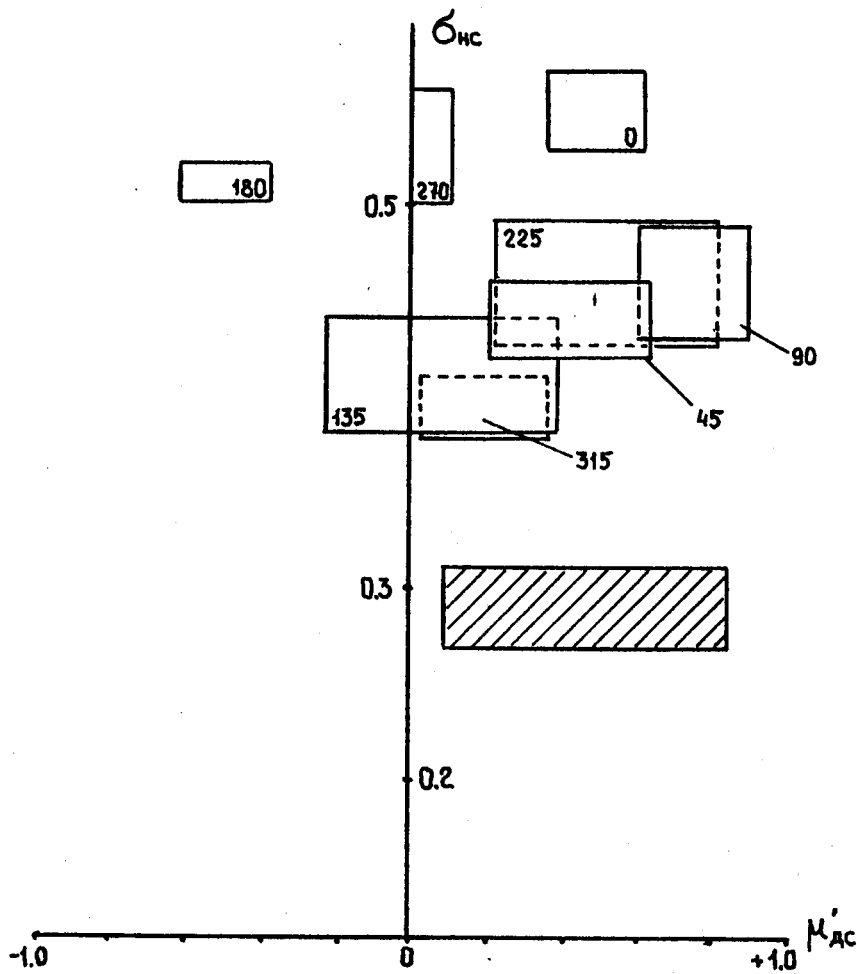


Рис.3.46. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .
(18.04.90. "Фон" : пашня . R = 1.4 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = const$;
- " пашня " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

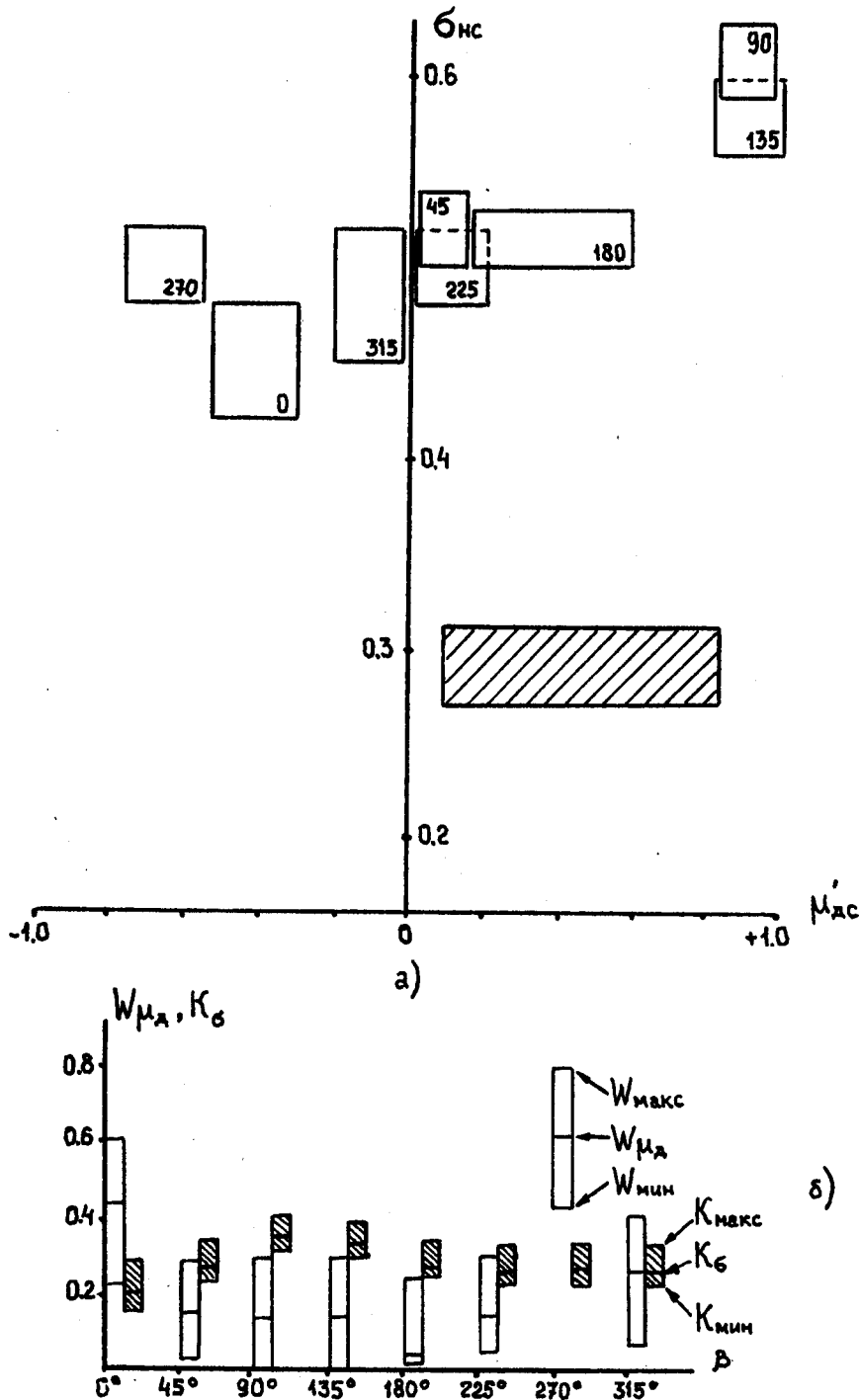


Рис.3.47. Результаты оценки контраста колесного ТС .
(18.04.90. "Фон" : пашня . R = 1.4 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- β - неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = const$;
- " пашня " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

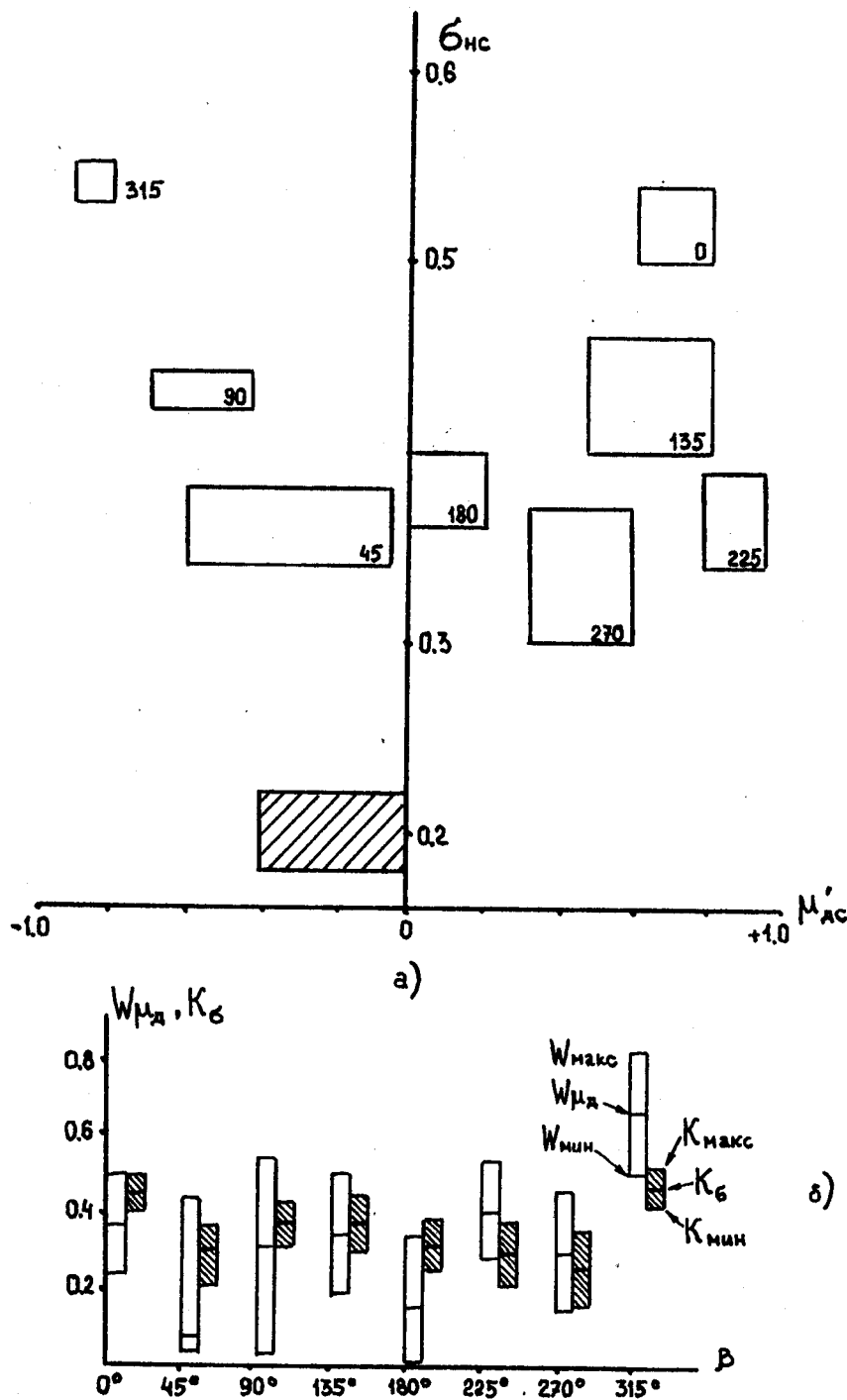


Рис.3.48. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .
(20.04.90. "Фон" : пашня . R = 1.54 км; Ант = 560мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- β - неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = const$;
- " пашня " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

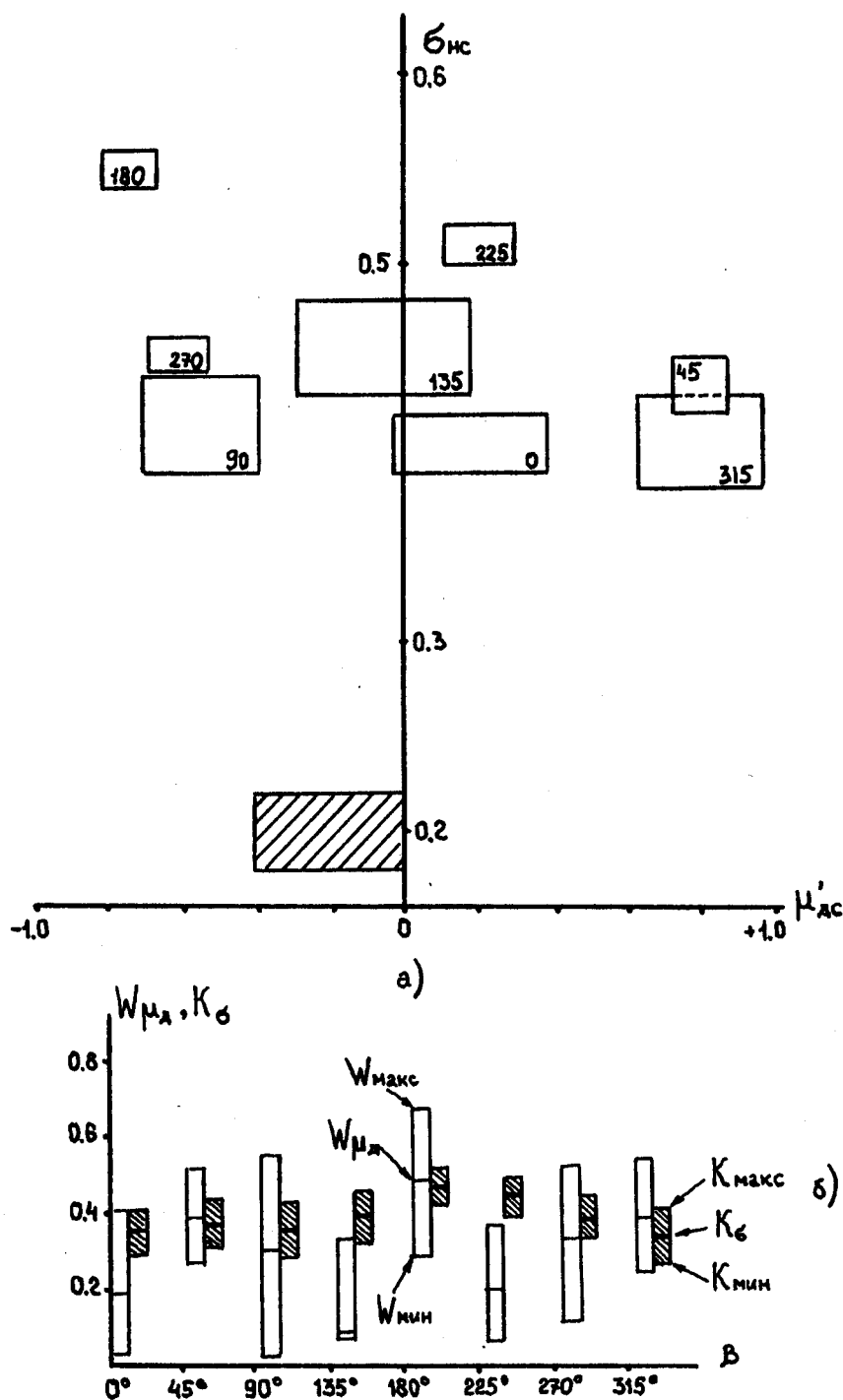


Рис.3.49. Результаты оценки контраста колесного ТС .
(20.04.90. "Фон" : пашня . R = 1.54 км; Ант = 560мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон":

- неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = const$;
- " пашня " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

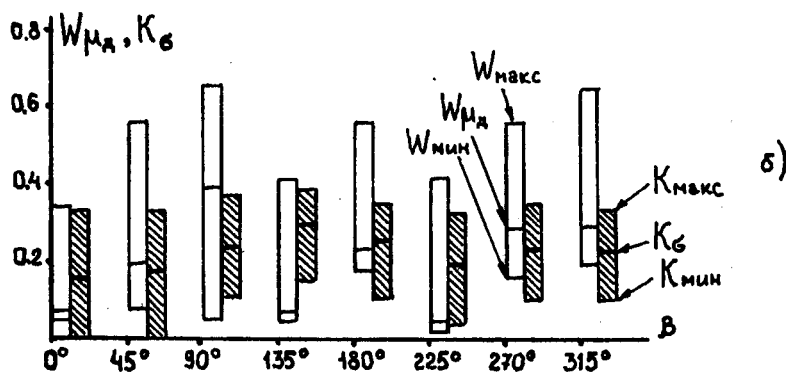
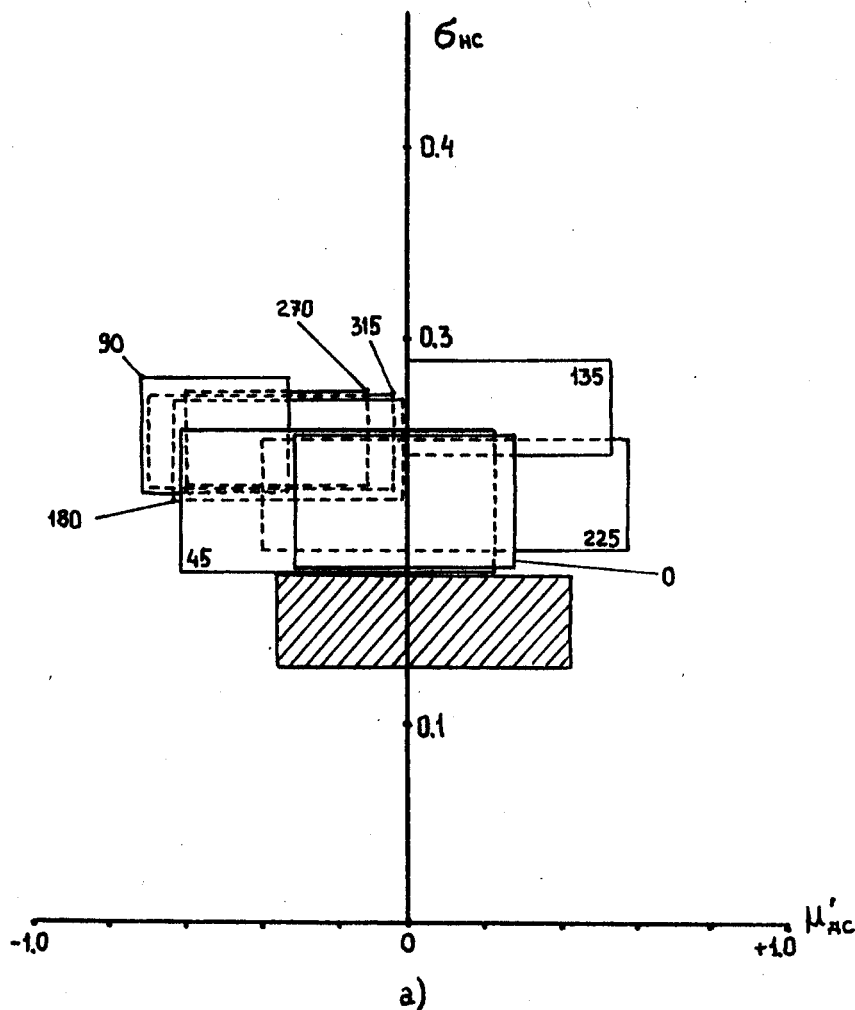


Рис.3.50. Результаты оценки контраста гусеничного ТС .

(20.04.90. "Фон" : поле покрытое сухой травой . R = 4.75 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{nc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

- а - неподвижный бронированный объект (ГТС) при $\beta = const$;
- " поле " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β ГТС.

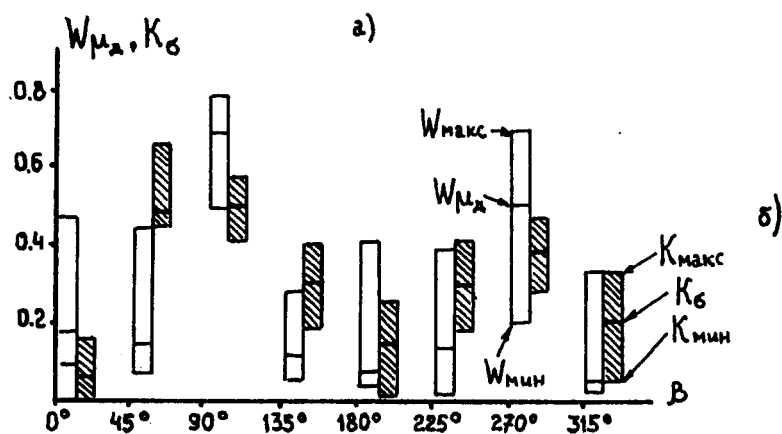
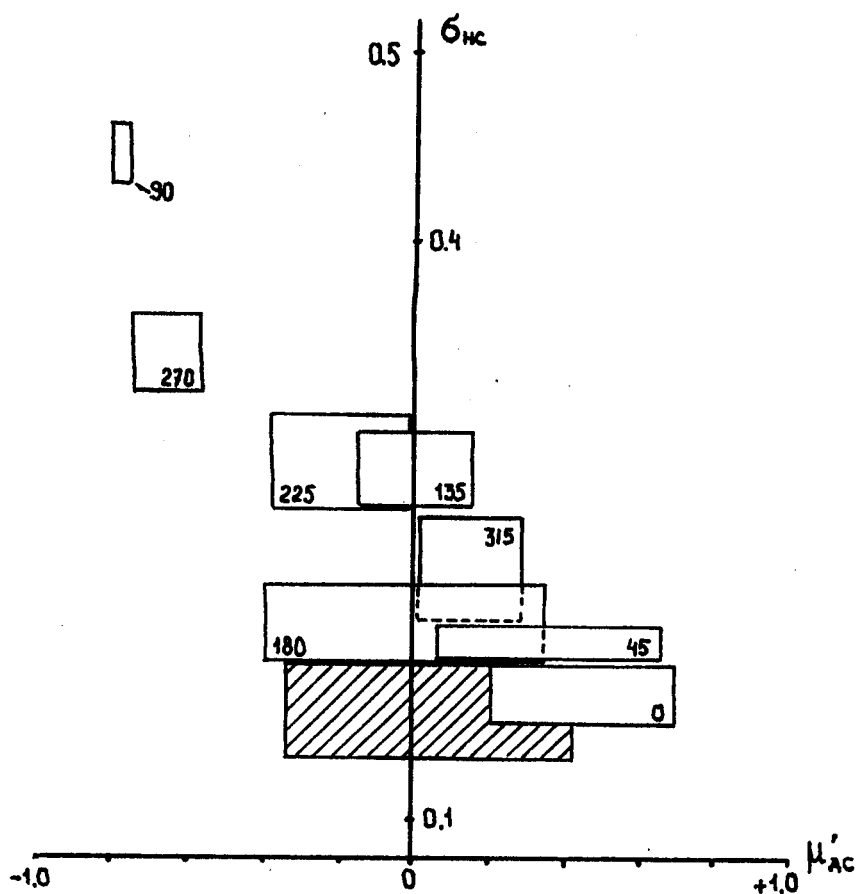


Рис.3.51. Результаты оценки контраста колесного ТС .

(20.04.90. "Фон" : поле покрытое сухой травой . R = 4.75 км; Ант = 760мм.)

а) Области изменения σ_{nc} и μ'_{dc} в суммарном канале для объектов типа "фон + бронированная цель" и "фон" :

□ — неподвижный бронированный объект (КТС) при $\beta = const$;
 ▨ — " поле " .

б) Средние величины поляризационного W_{μ_d} и РЛ K_{σ} контраста, и пределы их изменения в зависимости от ракурса β КТС.

маемой фоновым образованием в отсутствие "цели". Данные результаты для $\beta_1 = (0^\circ ; 315^\circ)$ позволили определить, согласно (3.26, 3.27), величины поляризационного и радиолокационного контраста и возможные пределы их изменения.

Анализ большого экспериментального материала, связанного с наблюдаемостью бронированных транспортных средств на фоне подстилающей поверхности, показывает, что для объектов такого типа трудно определить общие закономерности в изменении параметров $\sigma_{\text{нс}}$, $\mu_{\text{дс}}$ на малых временных интервалах. Кроме того, полученные данные не позволяют говорить о наличии определенного соотношения между величинами поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР. Для одних ракурсов β контраст по степени поляризационной анизотропии выше, чем $K_{\text{ос}}$, а для других — нет. Некоторые выводы о величинах $W_{\mu_{\text{дс}}}$ и $K_{\text{ос}}$ сведены в Табл.3.3, Табл.3.4.

В частности, из табл.3.3 следует, что независимо от условий наблюдения и дальности до ГТС (КТС) всегда существуют ракурсы β этих объектов, для которых величины поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии $\mu_{\text{дс}}$ превосходят соответствующие значения $K_{\text{ос}}$ контраста по ЭПР.

Анализируя данные табл.3.4, можно сделать вывод, что для гусеничного транспортного средства (ГТС) максимальные значения поляризационного контраста и РЛ контраста по ЭПР, не совпадая друг с другом наблюдаются при ориентации этого объекта преимущественно бортом к направлению облучения. Для колесного ТС соответствующие величины $W_{\mu_{\text{дс}}}$ и $K_{\text{ос}}$ имеют место при его облучении как с " кормы ", так и с бортов.

Для исследования особенностей изменения энергетического и поляризационного параметров бронированных транспортных средств в ходе экспериментов рассматривались ситуации, связанные с перемещением этих объектов. В частности, на рис.3.52 – 3.55 приведены зависимости

Табл.3.3. Значения ракурсов β (град) транспортных средств, при которых поляризационный контраст превышает РЛ контраст по ЭПР.

| | Дата (дальность до объекта ,км) | | | | | | |
|-----|-----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------------------|
| | 22.01.90 (1.7) | 23.01 (1.74) | 24.01 (3.5) | 25.01 (4.94) | 18.04 (1.4) | 20.04 (1.54) | 20.04. (4.75) |
| ГТС | 0°,45°, 90°,135° | 0° | 0°,90° | 0°,90° 270° | 180° | 225°, 270°, 315° | 45°,90° 270° 315° |
| КТС | 0°,45°, 180°, 225°, 315° | 180°, 270° | 0°, 180° | 180° | 0°, 270° | 45°, 180° | 0°,90°, 270° |

Табл.3.4. Значения ракурсов β (град) транспортных средств, при которых достигается максимальное значение контраста по степени поляризационной анизотропии (по ЭПР).

| | Дата (дальность до объекта (км)) | | | | | | |
|-----|------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
| | 22.01.90 (1.7) | 23.01 (1.74) | 24.01 (3.5) | 25.01 (4.94) | 18.04 (1.4) | 20.04 (1.54) | 20.04. (4.75) |
| ГТС | 135° (90°) | 90° (90°) | 90° (90°) | 270° (90°) | 180° (0°) | 315° (315°) | 90° (135°) |
| КТС | 180° (270°) | 270° (135°) | 180° (180°) | 180° (180°) | 270° (90°) | 180° (180°) | 90° (90°) |

ти усредненных параметров ЭПР и степени поляризационной анизотропии при непрерывном изменении азимута β гусеничного (колесного) транспортных средств в результате циркуляции объектов по кругу диаметром 8 - 12 (20 - 25 м). Перемещение бронированных целей по кругу приводило к значительным флуктуациям параметров $\sigma_{нс}$ и $\mu_{дс}'$, поэтому изображенные на рис.3.52 - 3.55 зависимости представляют собой результат усреднения с постоянной времени $T_{уср}$. На рис.3.56 приведены временные реализации параметров $\mu_{д1}'$, $\mu_{д2}'$, $\mu_{дс}'$ и σ_c , полученные при исследовании влияния перемещения объекта сложной формы - колесного ТС, на величину флуктуаций измеряемых параметров. Для этого на борту колесной бронированной цели был установлен трехгранный угловой отражатель, перемещаемый в направлении РЛС, что имитировало продольные (поперечные) колебания корпуса транспортного средства во время движения по пересеченной местности. Из рис.3.54 следует, что даже незначительные (10-30 см) перемещения отражателя вызывают существенные флуктуации измеряемых параметров. В еще большей степени картина флуктуаций усложняется при непрерывном изменении ракурса КТС во время движения.

Полученные данные наблюдаемости бронированных транспортных средств при их круговом перемещении в целом подтверждают выводы, сделанные для фиксированных ракурсов β : максимальные значения поляризационного и РЛ контраста объектов этого типа следует ожидать при ориентации гусеничной и колесной целей бортом ($\beta = 90^\circ$ (270°)) или "кормой" ($\beta = 180^\circ$) относительно направления облучения.

В рамках эксперимента по изучению поляризационного контраста транспортных средств на фоне подстилающей поверхности проводились исследования, связанные с выявлением доплеровского эффекта. Однако, следует отметить, что неблагоприятное для перемещения объектов состояние поверхности (глубокий снежный покров или увлажненная после таяния снега пашня), обусловившее невозможность обеспечить равно-

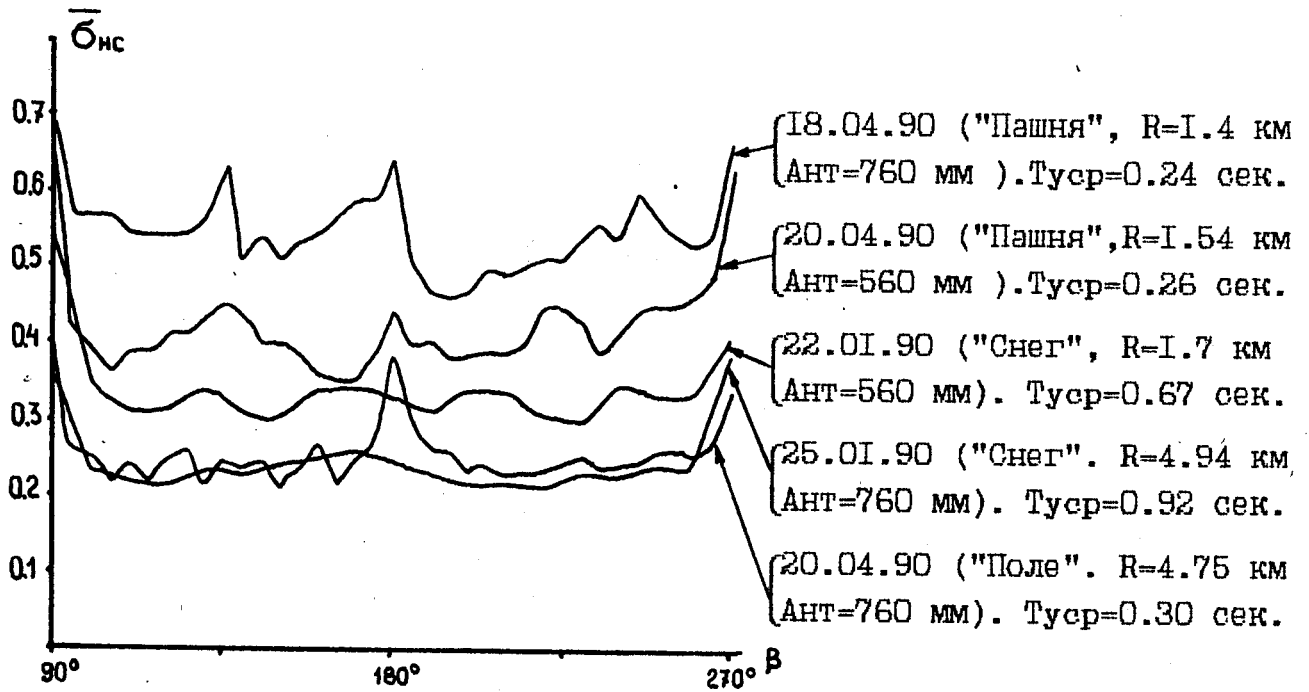


Рис.3.52. Зависимость усредненного параметра ЭПР $\bar{\sigma}_{нс}$ в суммарном канале при непрерывном изменении ракурса β колесного ТС при его движении по кругу диаметром 20 + 25 м.

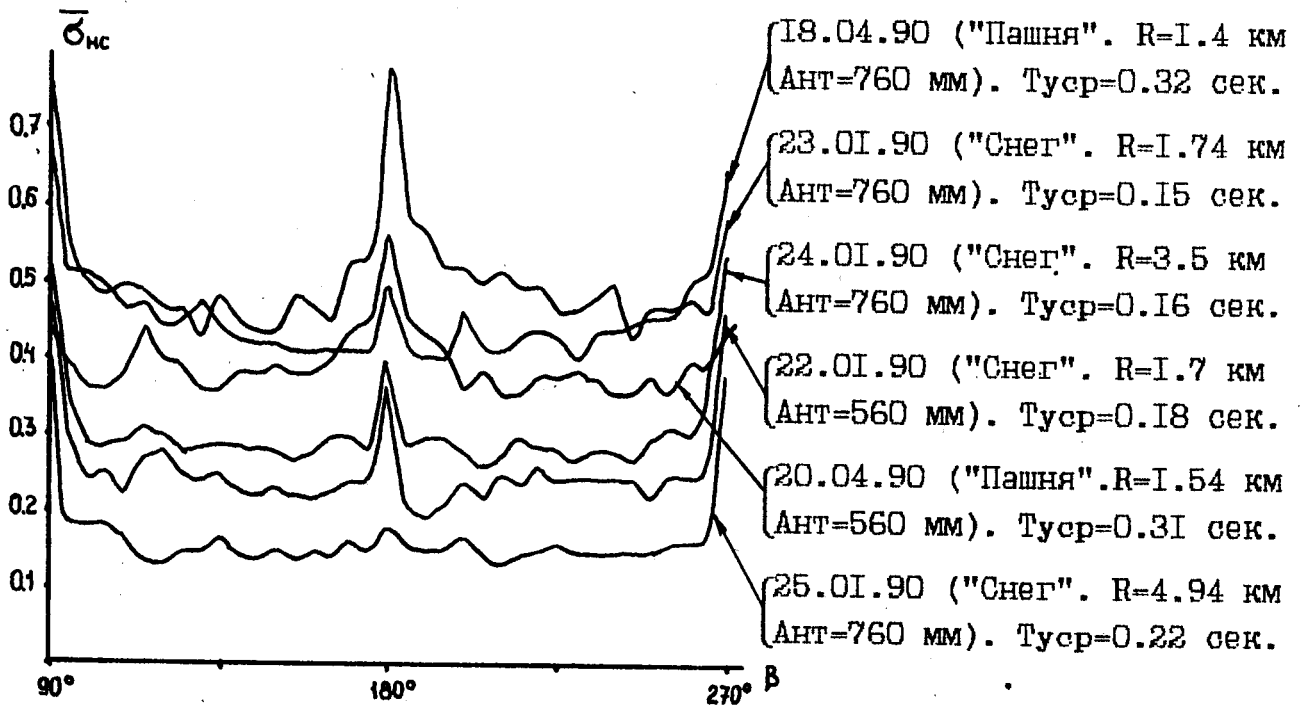
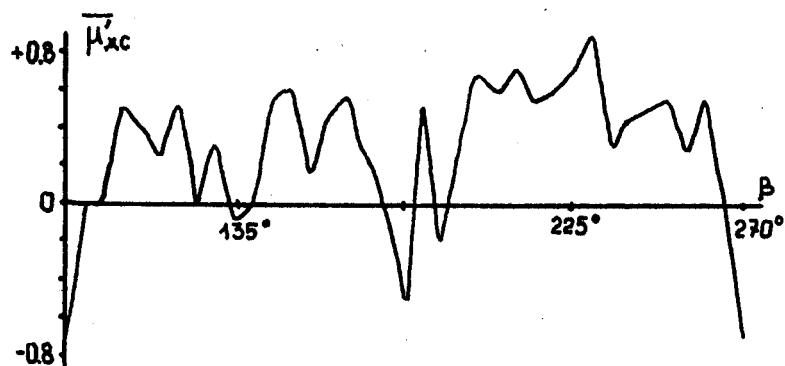
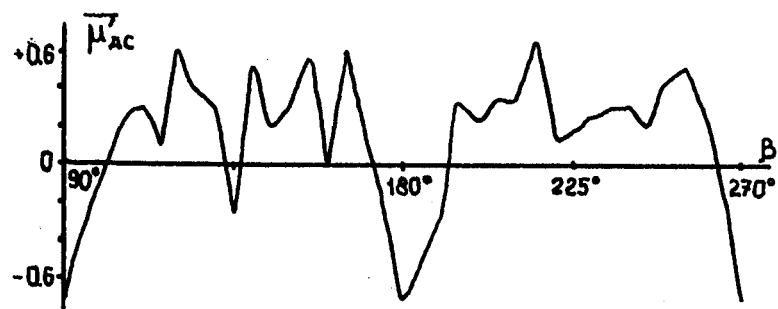


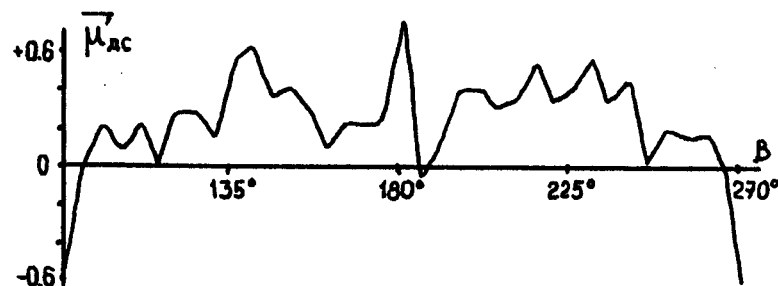
Рис.3.53. Зависимость усредненного параметра ЭПР $\bar{\sigma}_{нс}$ в суммарном канале при непрерывном изменении ракурса β гусеничного ТС при его движении по кругу диаметром 8 + 12 м.



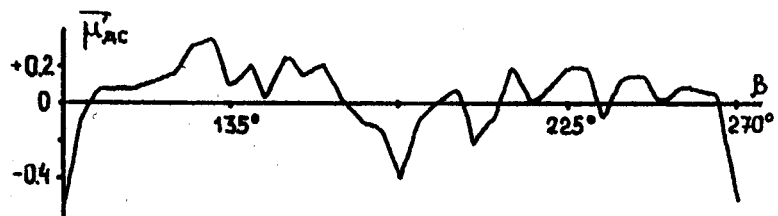
22.01.90 ("Снег", R=1.7 км
АНТ=560 мм). Туср=0.18 сек



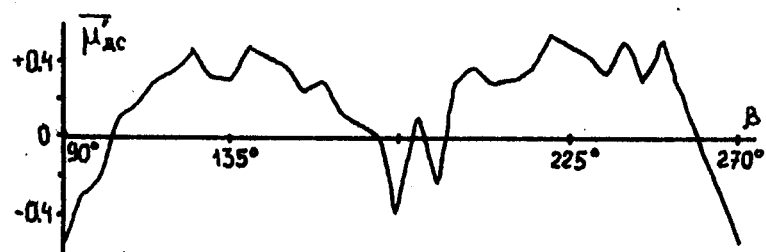
23.01.90 ("Снег", R=1.74 км
АНТ=760 мм). Туср=0.15 сек



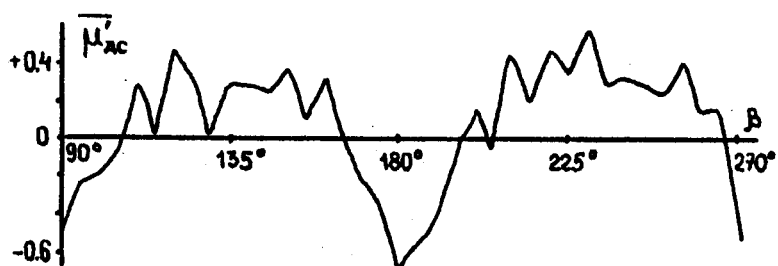
24.01.90 ("Снег", R=3.5 км
АНТ=760 мм). Туср=0.16 сек



25.01.90 ("Снег", R=4.94 км
АНТ=760 мм). Туср=0.22 сек

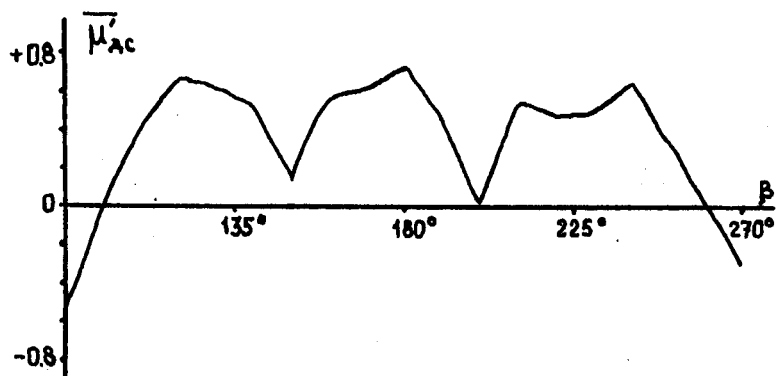


18.04.90 ("Пашня", R=1.4 км
АНТ=760 мм). Туср=0.32 сек

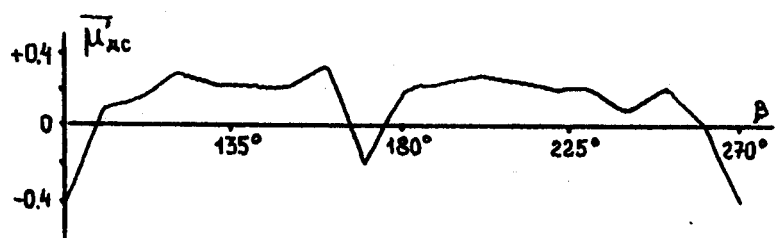


20.04.90 ("Пашня", R=1.54 км
АНТ=560 мм). Туср=0.31 сек

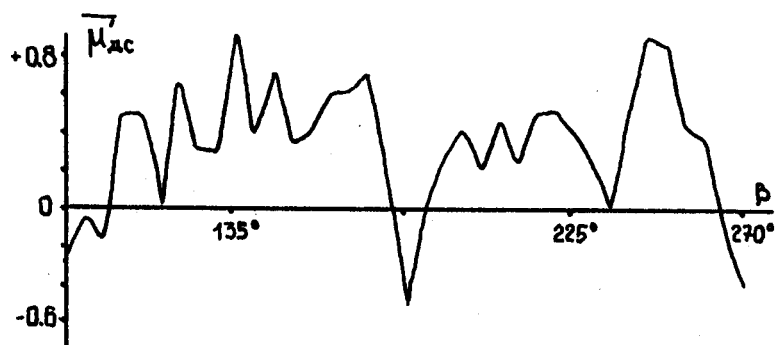
Рис.3.54. Зависимость усредненного параметра $\overline{\mu_{дс}}$ в суммарном канале при непрерывном изменении ракурса β гусеничного ТС, вызванном движением объекта по кругу диаметром $8 \div 12$ м.



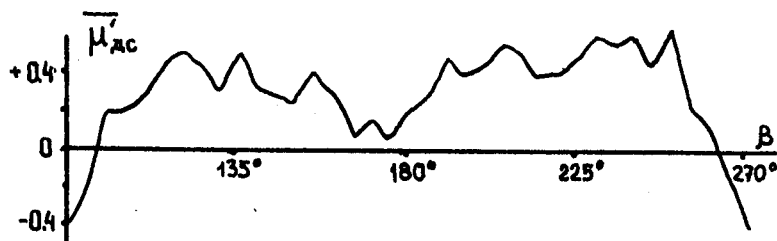
22.01.90 ("Снег", $R=1.7$ км
Ант=560 мм). $T_{\text{уср}}=0.67$ сек



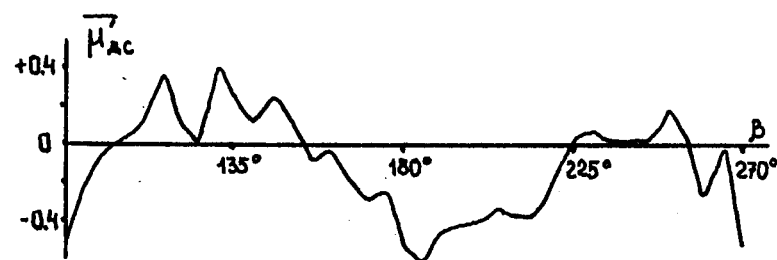
25.01.90 ("Снег", $R=4.94$ км
Ант=760 мм). $T_{\text{уср}}=0.92$ сек



18.04.90 ("Пашня", $R=1.4$ км
Ант=760 мм). $T_{\text{уср}}=0.24$ сек



20.04.90 ("Пашня", $R=1.54$ км
Ант=560 мм). $T_{\text{уср}}=0.26$ сек



20.04.90 ("Пашня", $R=4.75$ км
Ант=760 мм). $T_{\text{уср}}=0.30$ сек

Рис.3.55. Зависимость усредненного параметра $\overline{\mu}_{\text{дс}}$ в суммарном канале при непрерывном изменении ракурса β колесного ТС, вызванном движением объекта по кругу диаметром $20 \div 25$ м.

мерное перемещение объектов с малой скоростью, а также недостаточно высокая частота повторения (100 Гц) зондирующих импульсов приводили, как правило, к "разрушению" регулярной модуляции измеряемых параметров. Тем не менее, для случаев наблюдения объектов с близкой к нулю радиальной составляющей скорости (ракурс $\beta \rightarrow 90^\circ$) были получены результаты, свидетельствующие о появлении в спектре флуктуаций параметров движущихся целей стабильных частотных компонент.

Так, на рис.3.57 показаны временные зависимости параметров σ_1 , $\mu_{д1}'$ в I-ом и 2-ом частотных каналах для колесного транспортного средства (КТС), перемещающегося бортом относительно направления облучения ($\beta \rightarrow 90^\circ$). Результаты измерения параметра σ_1 в I-ом канале говорят о практическом отсутствии регулярной модуляции. В то же время перемещение сложной РЛ цели, каким является КТС, привело к почти гармоническому закону изменения величины модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu_{д1}'$ в том же канале в интервале (-0.8; +0.9). Результаты измерения во 2-ом канале показывают, что флуктуации параметра $\mu_{д2}'$ носят более случайный характер, чем $\mu_{д1}'$, тогда, как изменения энергетического параметра σ_2 содержат регулярную составляющую, обусловленную движением КТС. Полученные данные позволяют говорить о возможности совместного использования модуля коэффициента поляризационной анизотропии $\mu_{д1}'$ и параметра ЭПР σ_1 для обнаружения движущихся объектов. Это особенно важно для случаев РЛ наблюдения, когда радиальная составляющая скорости РЛ целей оказывается близка к нулю, и традиционные доплеровские РЛС, не использующие векторные свойства рассеянной волны, малоэффективны.

Исследование рассеивающих свойств транспортных средств на малых временных интервалах с помощью моноимпульсной ОРЛС "Кедр-4" было дополнено экспериментальными измерениями, проведенными при использовании модифицированного лоатора IРЛ133 модуляционного типа. Алгоритм функционирования и структурная схема данного лоатора

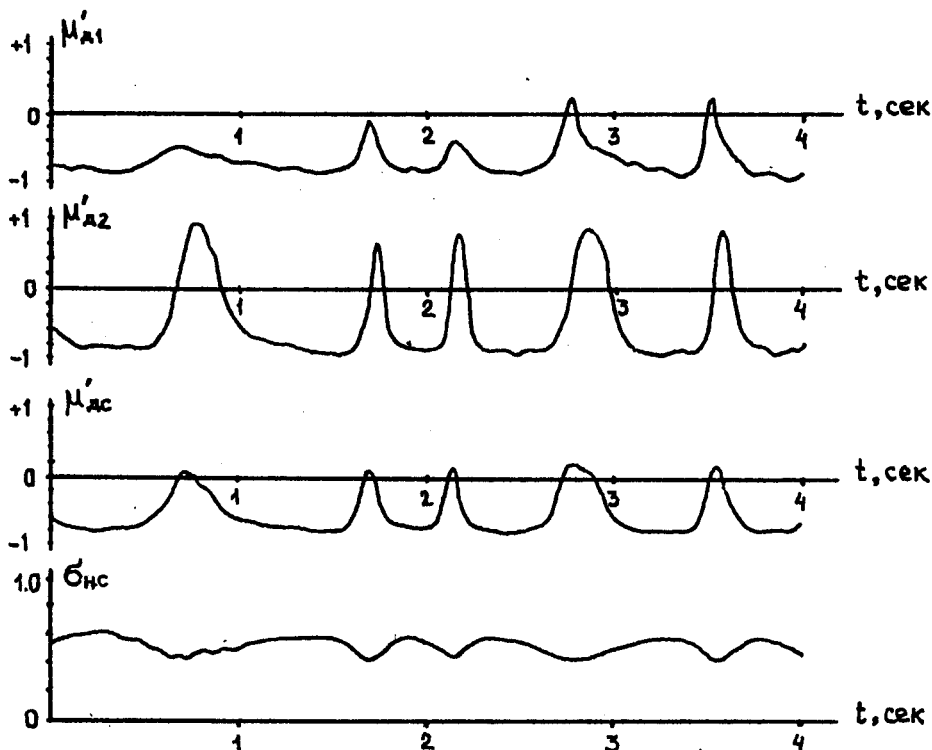


Рис.3.56. Временные зависимости поляризационных параметров в I-ом и 2-ом $\mu'_{д1}$ и суммарном $\mu'_{дс}$ каналах, а также параметра ЭПР $\sigma_{нс}$, для случая перемещения ($V = 0.01 \pm 0.03$ м/сек) в направлении РЛС трёхгранного УО. Отражатель установлен на борту колесного ТС на высоте 4 м. ("Фон" : пашня ; $R = 1.4$ км ; Ант = 760 мм).

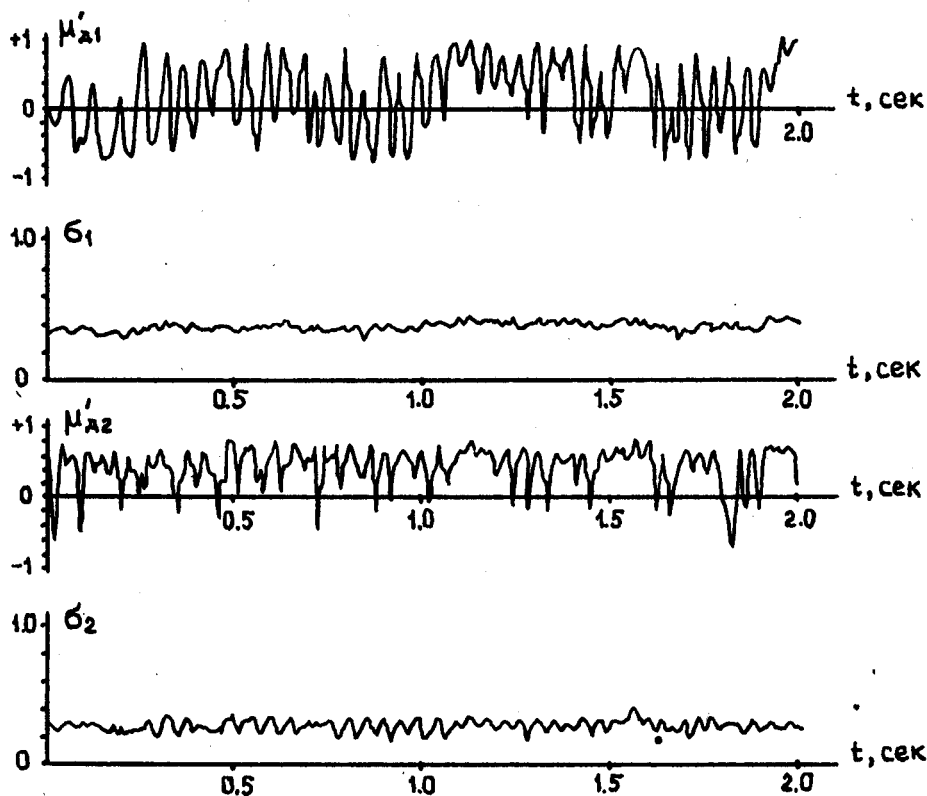


Рис.3.57. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для случая движения колесного ТС бортом ($\beta \approx 90^\circ$) к направлению облучения. ("Фон" : пашня ; $R = 1.5$ км ; Ант = 760 мм).

рассмотрены в разделах 3.3 и 3.4. В качестве исследуемых целей выступали бронированные транспортные средства (рис.3. 9 а,и), а также грузовой автомобиль "КАМАЗ" с прямоугольным кузовом. Сама методика проведения эксперимента аналогична рассмотренной выше и особенностей не имела.

Наиболее характерные результаты поляризационных измерений бронированных целей и грузового автомобиля на заснеженном поле показаны на рис.3.58 – 3.61. Эти данные относятся к исследованию величины логарифма ЭПР, амплитуд 4-ой и 8-ой гармоник и параметра, пропорционального радиальной скорости перемещения РЛ объекта при его циркуляции на пересеченной местности. На рис.3.58 приведены временные реализации сигналов, формируемых в модифицированном локаторе ИРЛ133, при вращении гусеничного транспортного средства на поле, покрытом снегом. Нетрудно видеть, что наибольшая отражательная способность ГТС, определяемая величиной логарифма ЭПР $U_{впр}$, наблюдается при его ориентации бортом ($\beta = 90^\circ (270^\circ)$) к направлению облучения. Такой же характер носят изменения амплитуды 4-ой гармоники $U_{4\Omega}$, пропорциональной реальной части комплексного коэффициента поляризационной анизотропии $\tilde{\mu}$ (3.25). Более сложный характер временных флуктуаций и менее очевидная зависимость от ракурса β объекта наблюдается для амплитуды 8-ой гармоники $U_{8\Omega} \sim \mu_d^2$ (3.25). Зависимость напряжения $U_{допл}$ на выходе штатного доплеровского канала изделия ИРЛ133 показывает, что максимальное значение $U_{допл}$ достигается в моменты радиального ($\beta = 0^\circ (180^\circ)$) перемещения ГТС, что и следовало ожидать. Приведенные на рис.3.58 результаты измерения указывают на принципиальную возможность повышения эффективности некогерентных доплеровских РЛС путем совместного использования поляризационной информации ($U_{4\Omega}$, $U_{8\Omega}$) и $U_{допл}$.

В ходе экспериментов были получены ракурсные зависимости $U_{впр}(\beta)$, $U_{4\Omega}(\beta)$, $U_{8\Omega}(\beta)$ для колесной бронированной цели (КТС). На

рис.3.59 приведены ракурсные зависимости усредненных параметров ЭПР и амплитуды 8-ой гармоники. Очевидно, что для КТС также существуют преимущественные секторы облучения β вблизи 90° и 270° , где измеряемые поляризационные и энергетический параметры максимальны. При этом интервал углов β , в котором значение логарифма ЭПР объекта велико, в несколько раз меньше такого же интервала для амплитуды 8-ой гармоники. Полученные ракурсные зависимости дали возможность оценить поляризационный контраст по величинам $U_{4\Omega}$ (рис.3.60 в), $U_{8\Omega}$ (рис.3.60 б) за один полный оборот КТС и сравнить его с РЛ контрастом по ЭПР (рис.3.60 а). Анализируя графики на рис.3.60, можно сделать следующие выводы:

- а) при облучении колесной бронированной цели с борта ($\beta = 90^\circ, 270^\circ$) величины поляризационного контраста $W_{4\Omega}$, $W_{8\Omega}$ и радиолокационного контраста по ЭПР $W_{\text{ЭПР}}$ близки друг к другу;
- б) высокая наблюдаемость КТС для случая, когда в качестве измеряемого параметра выступает логарифм ЭПР, имеет место в узкой ($\pm 10^\circ$) области относительно углов $\beta = 90^\circ$ (270°);
- в) высокая наблюдаемость КТС для случая, когда в качестве измеряемых параметров выступают амплитуды 4-ой $U_{4\Omega}$ и 8-ой $U_{8\Omega}$ гармоник, сохраняется в пределах $\pm 45^\circ$ относительно ракурсов колесной бронированной цели $\beta = 90^\circ$ (270°).

Полученные ракурсные зависимости поляризационного контраста $W_{4\Omega}$, $W_{8\Omega}$ и РЛ контраста по ЭПР $W_{\text{ЭПР}}$ для всех трех объектов были использованы для определения выборочных гистограмм (рис.3.61), позволяющих количественно оценить наблюдаемость РЛ объекта в среднем за один полный оборот циркуляции, а также сравнить между собой информативность измеряемых модуляционным методом параметров. С этой целью были рассчитаны характеристики вероятности превышения заданного уровня величины контраста для колесной и гусеничной бронированных целей и автомобиля "КАМАЗ" (рис.3.62 а-в). Полученные харак-

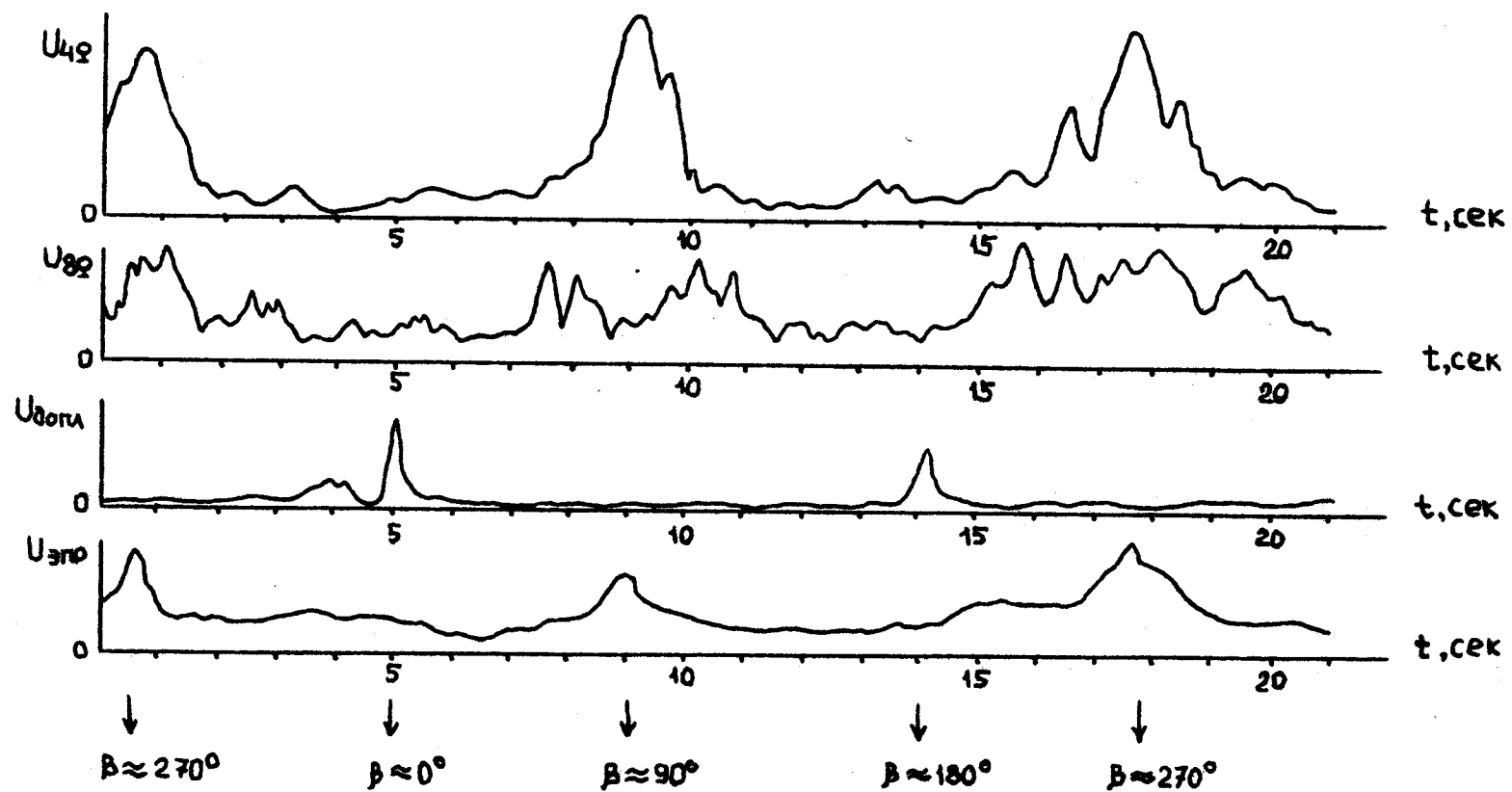


Рис.3.58. Временные реализации сигналов в 4-х каналах модифицированного изделия ИРЛ133 для случая вращения гусеничного транспортного средства на поле покрытом снегом по кругу диаметром 8 - 12 м.

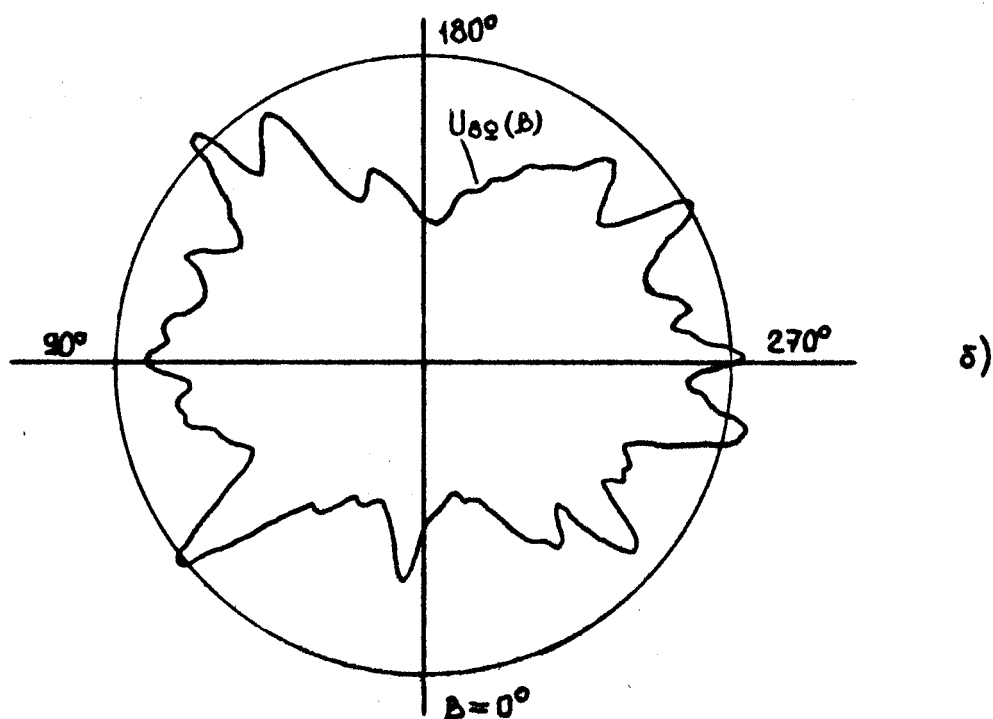
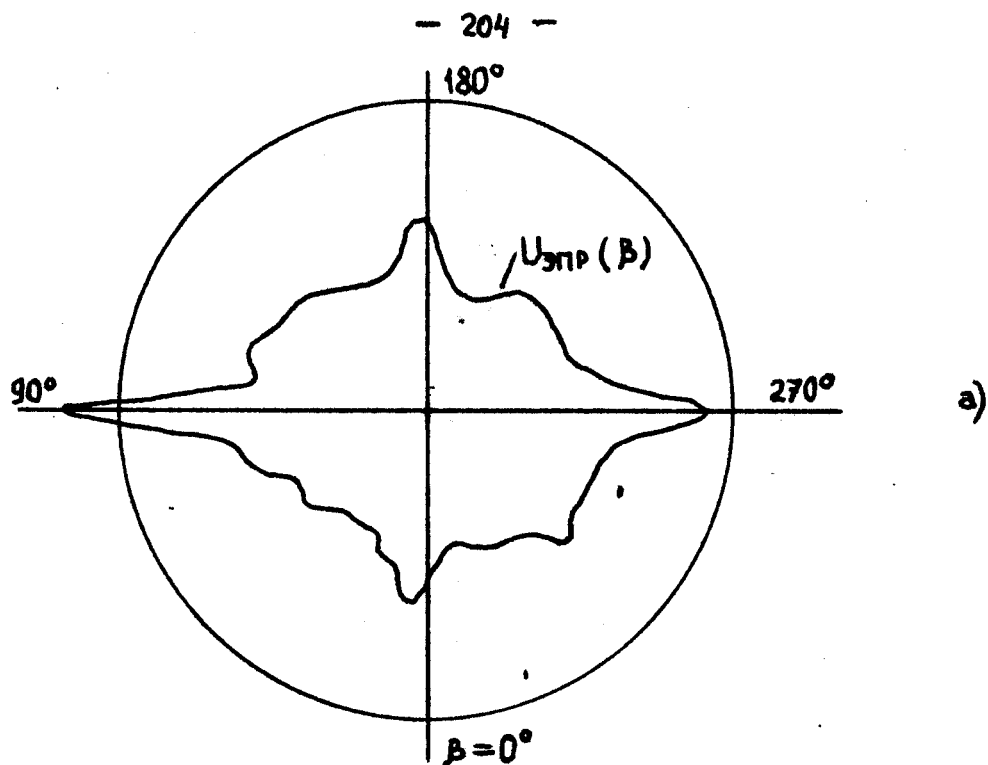


Рис.3.59. Ракурсные зависимости параметра $U_{\text{ЭПР}}$ (а), пропорционального ЭПР наблюдаемого объекта, и амплитуды $U_{8\Omega}$ (б) восьмой гармоники частоты вращения Ω полуволновой фазовой пластинки, пропорциональной поляризационному параметру μ_d^2 составного РЛ объекта "фон + ТС", при циркуляции колесного транспортного средства на заснеженном поле. (Значения угла $\beta = 90^\circ (270^\circ)$ соответствуют облучению наблюдаемого объекта с бортов, $\beta = 0^\circ (180^\circ)$ – с "носа" ("кормы")).

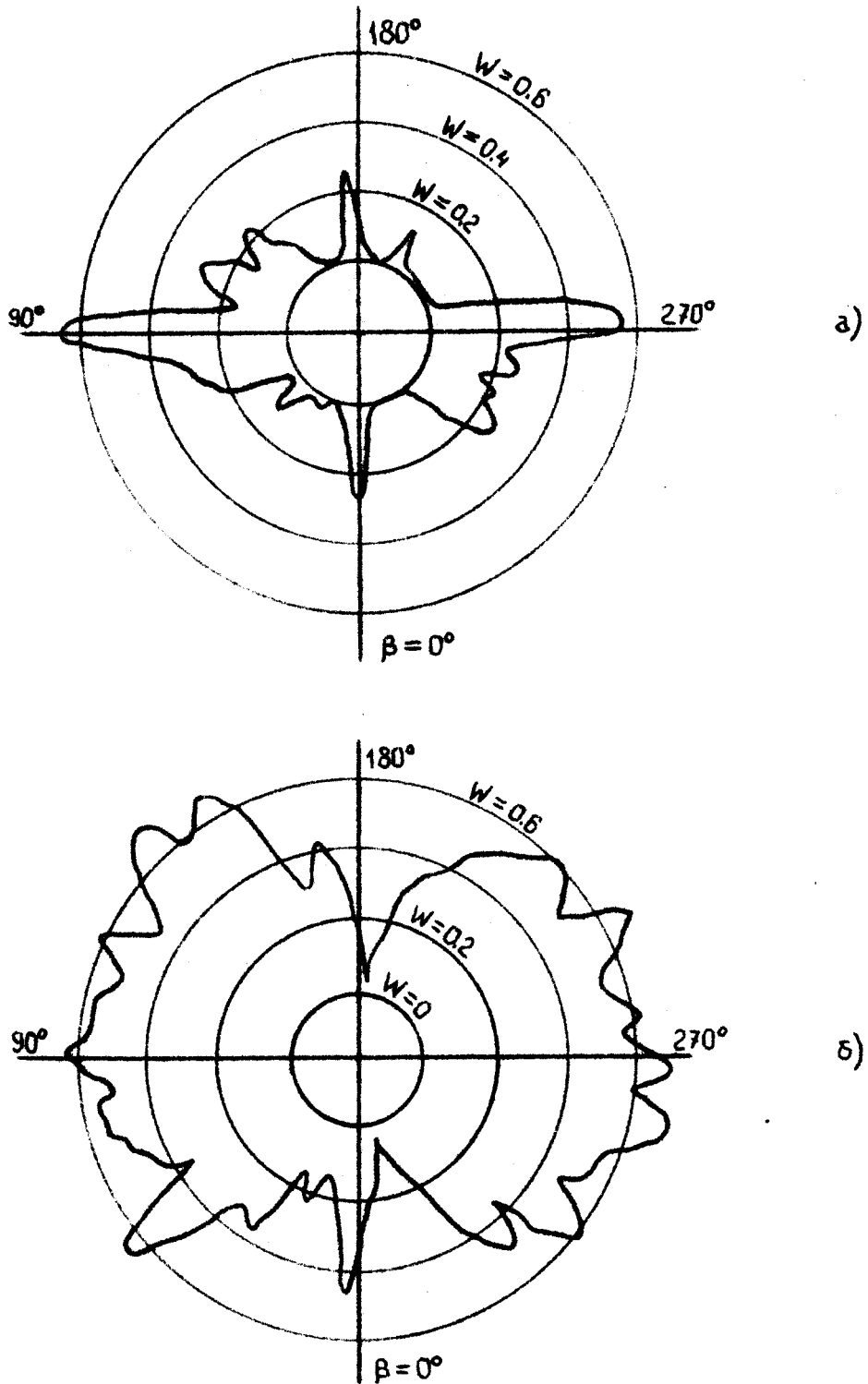


Рис.3.60. Ракурсные зависимости радиолокационного контраста по ЭПР $W_{ЭПР}$ (а) и поляризационного контраста $W_{8\Omega}$ (б) по амплитуде восьмой гармоники частоты вращения Ω полуволновой фазовой пластинки, пропорциональной поляризационному параметру μ_d^2 составного РЛ объекта "фон + ТС", при циркуляции колесного транспортного средства на заснеженном поле. (Значения угла $\beta = 90^\circ$ (270°) соответствуют облучению наблюдаемого объекта с бортов, $\beta = 0^\circ$ (180°) – с "носа" ("кормы")).

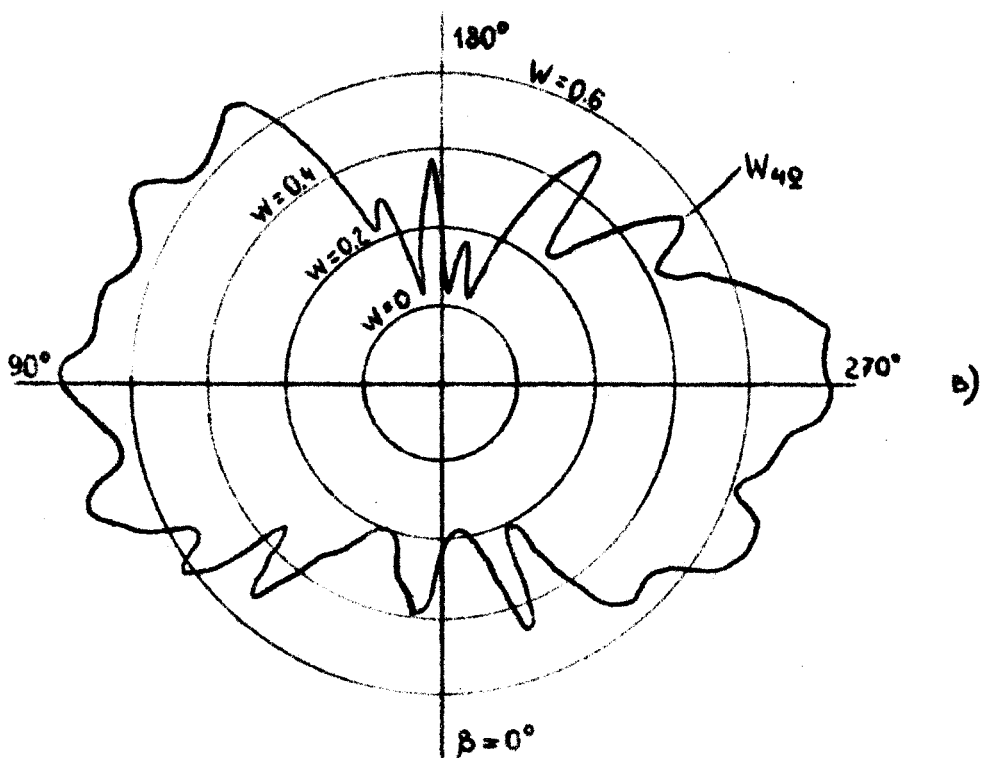


Рис.3.60. Ракурсные зависимости поляризационного контраста $W_{4\Omega}$ (в) по амплитуде четвертой гармоники частоты вращения Ω полуволновой фазовой пластинки, пропорциональной поляризационному параметру $\text{Re}\{\mu\}$ составного РЛ объекта "фон + ТС", при циркуляции колесного транспортного средства на вращающемся поле. (Значения угла $\beta = 90^\circ (270^\circ)$ соответствуют облучению наблюдаемого объекта с бортов, $\beta = 0^\circ (180^\circ)$ - с "носа" ("кормы").

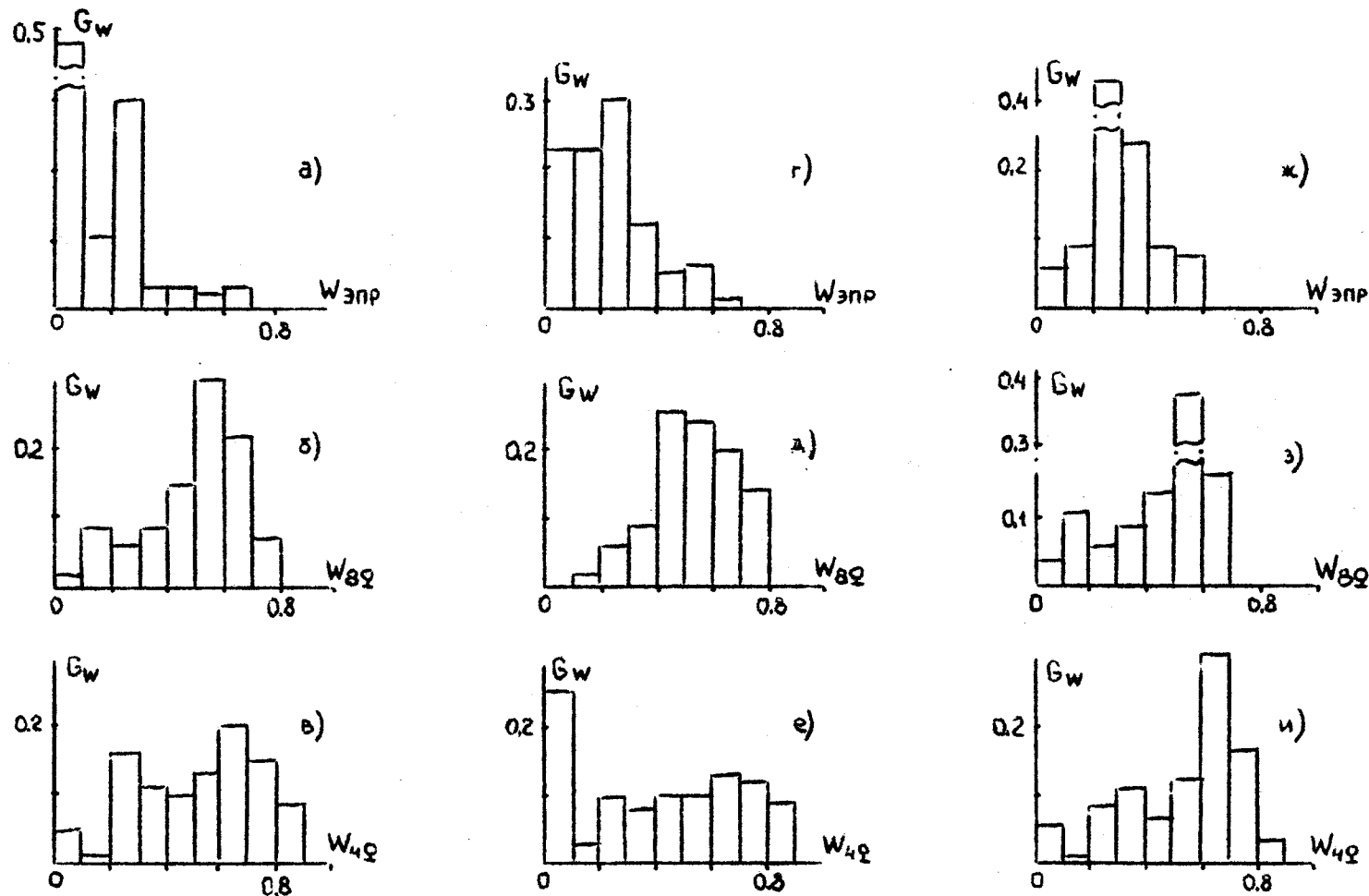


Рис.3.61. Выборочные распределения величин РЛ контраста $W_{ЭПР}$ по ЭПР и поляризационного контраста $W_{8\Omega}$, $W_{4\Omega}$ по амплитудам 8-ой и 4-ой гармоник частоты вращения Ω полуволновой фазовой пластинки, пропорциональным поляризационным параметрам $\text{Re}(\mu)$, μ_d^2 составного РЛ объекта "фон + ТС", при циркуляции транспортных средств.

(а)-(в) : колесное ТС ; (г)-(е) : гусеничное ТС ; (ж)-(и) : "КАМАЗ" .

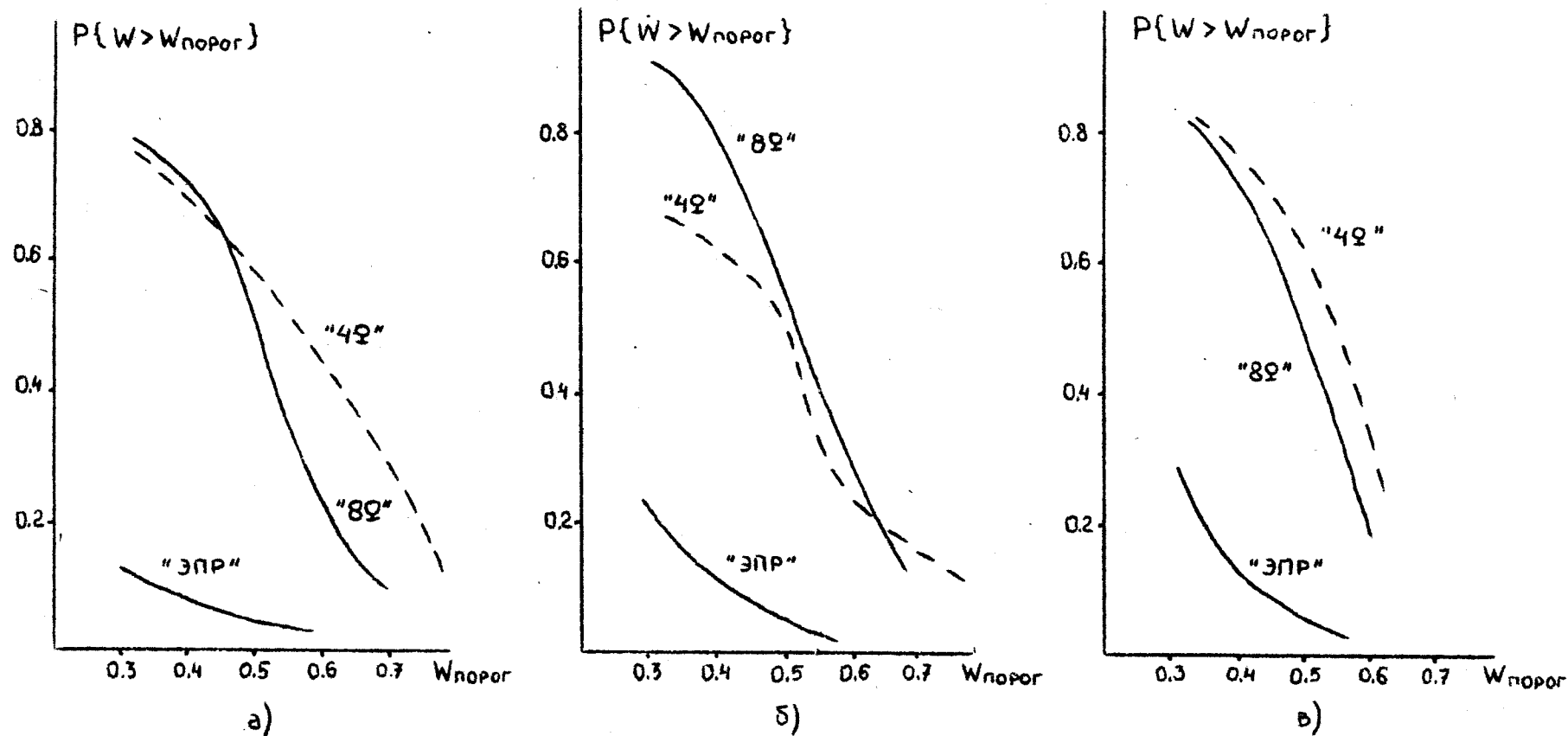


Рис.3.62. Характеристики вероятности превышения заданного уровня РЛ контраста $W_{\text{порог}}$ по ЭПР ("ЭПР") и поляризационного контраста $W_{4\Omega}$ ("4Ω"), $W_{8\Omega}$ ("8Ω") по амплитудам 4-ой и 8-ой гармоник, за один полный оборот циркуляции транспортных средств на поле покрытом снегом :

а) колесное ТС ; б) гусеничное ТС ; в) автомобиль "КАМАЗ".

теристики однозначно свидетельствуют о большей информативности поляризационных параметров $U_{4\Omega}$, $U_{8\Omega}$ по сравнению с величиной ЭПР $U_{\text{эпр}}$, оцениваемой в модифицированном локации РЛ133. При этом выигрыш в наблюдаемости транспортных средств на фоне подстилающей поверхности при использовании амплитуд 4-ой и 8-ой гармоник, несущих информацию о реальной части $\text{Re}\{\mu\}$ и квадрате модуля μ_d^2 комплексного коэффициента поляризационной анизотропии, зависит от типа транспортного средства.

3.5.6. Особенности поляризационного контраста объектов с малой ЭПР по результатам измерения ЭПР и поляризационной анизотропии.

Среди РЛ объектов, в отношении которых проводились измерения параметров ЭПР и поляризационной анизотропии, следует выделить цели с малой эффективной поверхностью рассеяния, что представляет большой интерес для обзорных РЛС, препятствующих несанкционированному доступу в охранную зону. Рассмотрим некоторые результаты измерения объектов такого класса, полученные с помощью моноимпульсной обзорной РЛС "Кедр-4". В качестве РЛ целей с малой ЭПР выступали: металлический лист площадью 0.18 м^2 , расположенный на высоте 1.8 м над землей; неподвижный (или находящийся в движении) человек на пересеченной местности; вертикальная металлическая труба диаметром 0.05 м и высотой 1.5 м над взволнованной водной поверхностью. Для первых двух целей измерения проводились на участке земли после таяния снега.

Методика измерения состояла в том, что сначала измерялись величины ЭПР $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ и модулей $\mu_{d1}'(t)$, $\mu_{d2}'(t)$ коэффициента поляризационной анизотропии "чистого" фонового образования в отсутствии каких-либо дополнительных объектов, а затем — в присутствии РЛ

цели с малой ЭПР. На рис.3.63, 3.65, 3.68 приведены временные реализации параметров ЭПР и поляризационной анизотропии различных участков пересеченной местности, на которых размещались исследуемые объекты. Нетрудно видеть, что параметры ЭПР $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ (или $\sigma_0(t)$) "фона" представляют собой стационарные случайные процессы с малой дисперсией, тогда как величины $\mu_{d1}'(t)$, $\mu_{d2}'(t)$ или $\mu_{dc}'(t)$ характеризуются большим разбросом оценок средних значений и дисперсий флуктуаций.

Наряду с исследованием влияния присутствия неподвижных малоразмерных целей на подстилающей поверхности на параметры, измеряемые в локации "Кедр-4", в данных экспериментах определялась "чувствительность" параметров σ_1 , μ_{d1}' к перемещению целей с малой ЭПР. На рис.3.64, 3.66, 3.69, 3.70 приведены некоторые результаты с ярко выраженным эффектом регулярной модуляции параметров составного объекта "фон + движущаяся цель". В ходе экспериментов можно было добиться достаточно равномерного перемещения исследуемых целей относительно РЛС. При этом скорость перемещения удовлетворяла диапазону доплеровских частот, которые могли быть однозначно оценены в РЛС "Кедр-4" с частотой повторения зондирующих импульсов 100 (400) Гц.

Сравнивая между собой реализации параметров $\sigma(t)$ и $\mu_d'(t)$ объектов типа "фон" и "фон + цель с малой ЭПР" на рис.3.63-3.70, нетрудно отметить, что появление малоразмерной цели лишь незначительно увеличивало средний уровень величины ЭПР составного объекта. И, напротив, появление в разрешаемом объеме локации человека или металлического листа, ориентированного в направлении на РЛС, существенно влияло на поведение нормированного параметра модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' во времени.

В результате экспериментов были получены данные (рис.3.64, 3.66, 3.67) с ярко выраженной регулярной модуляцией измеряемых параметров ЭПР и поляризационной анизотропии малоразмерных целей. При

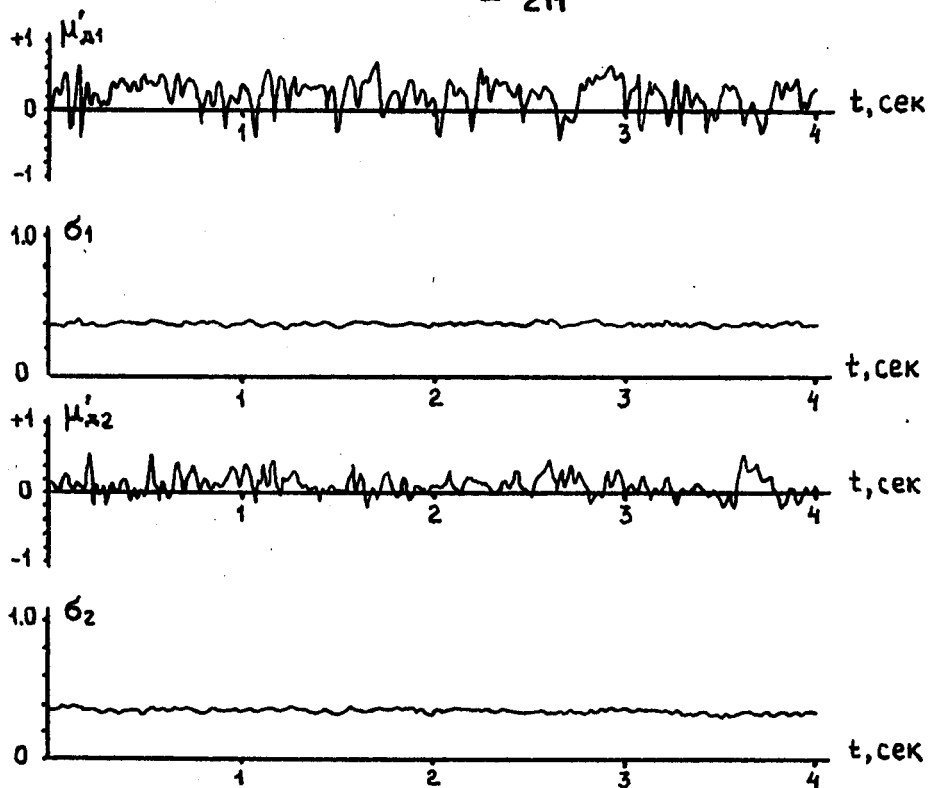


Рис.3.63. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для участка поля, где проводился эксперимент, в отсутствие каких-либо объектов. (13.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.5$ км ; Ант = 760 мм).

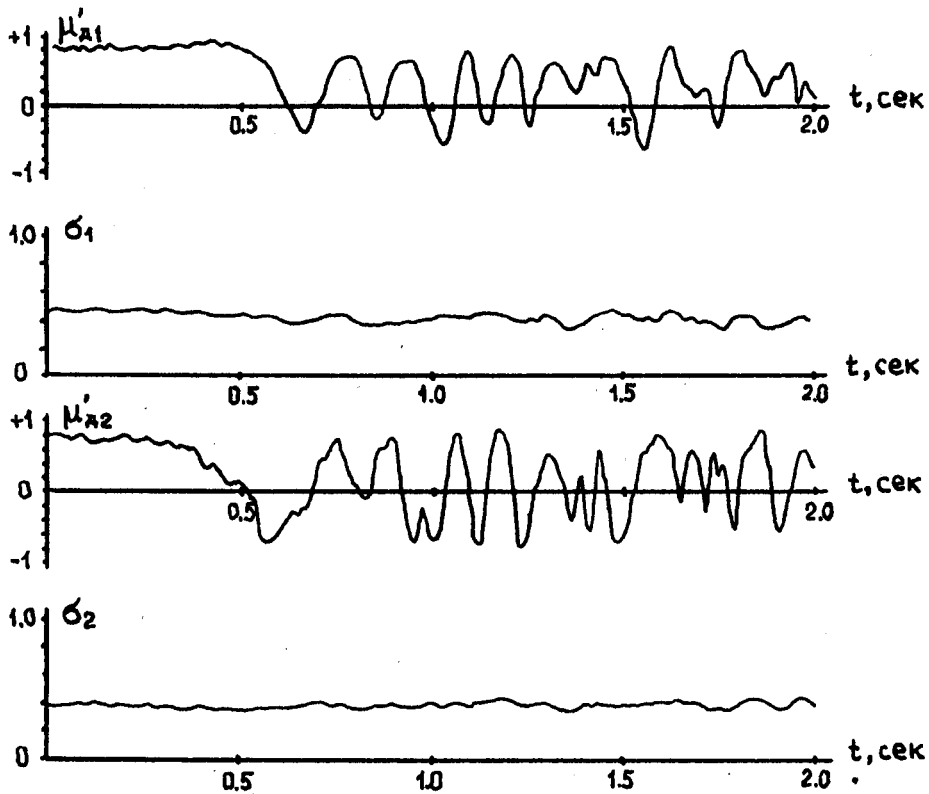


Рис.3.64. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для случая перемещения ($V = 0.05 \pm 0.10$ м/сек) металлической поверхности с малой ЭПР ($S \approx 0.18 \text{ м}^2$) на высоте 1.8 м в направлении РЛС. (13.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.5$ км ; Ант = 760 мм).

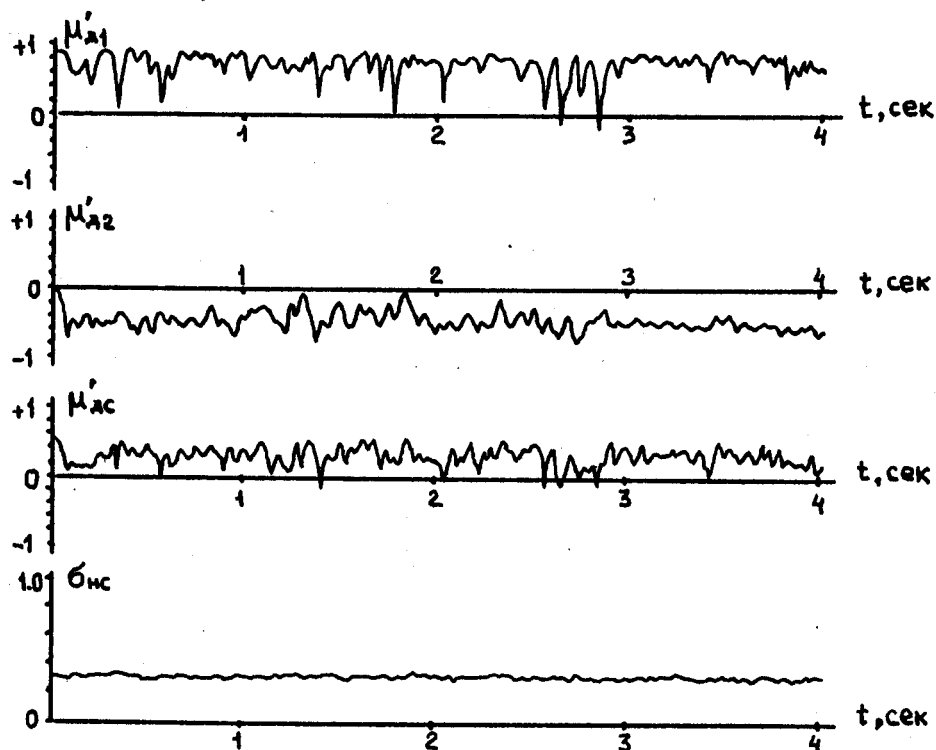


Рис.3.65. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$ 1-го канала обработки, а также $\mu'_{дс}(t)$ и $\sigma_{нс}(t)$ суммарного канала для участка поля, где проводился эксперимент, в отсутствие каких-либо объектов.

(18.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.4$ км ; Ант = 760 мм).

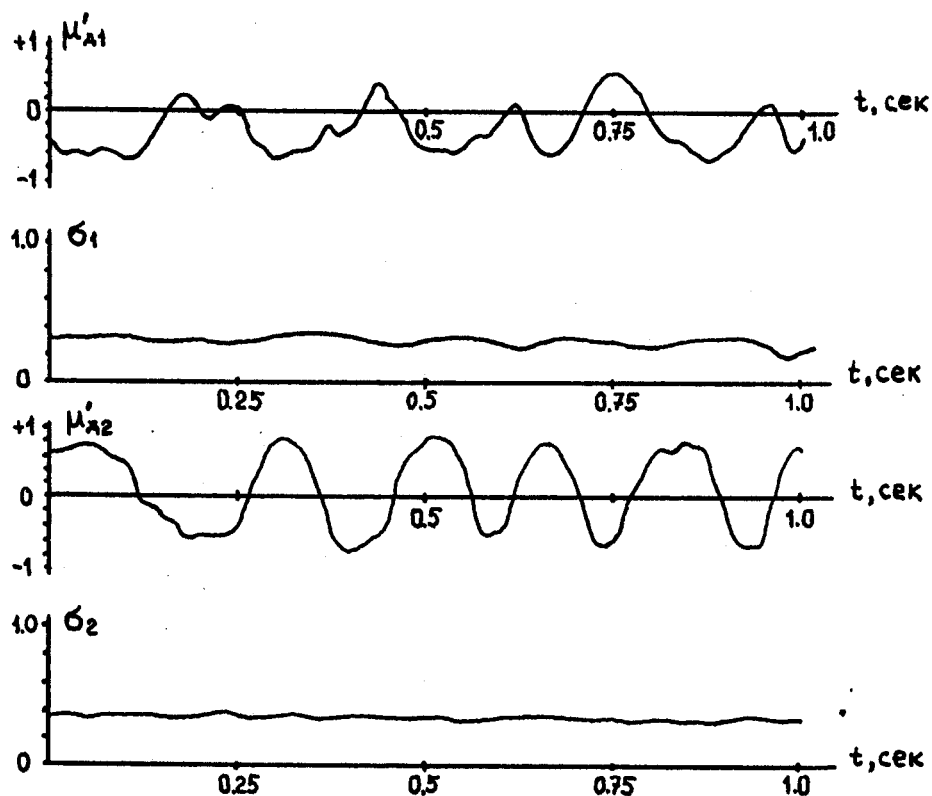


Рис.3.66. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для движущегося в направлении РЛС человека.

(18.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.4$ км ; Ант = 760 мм ; $F_{\Pi} = 400$ Гц).

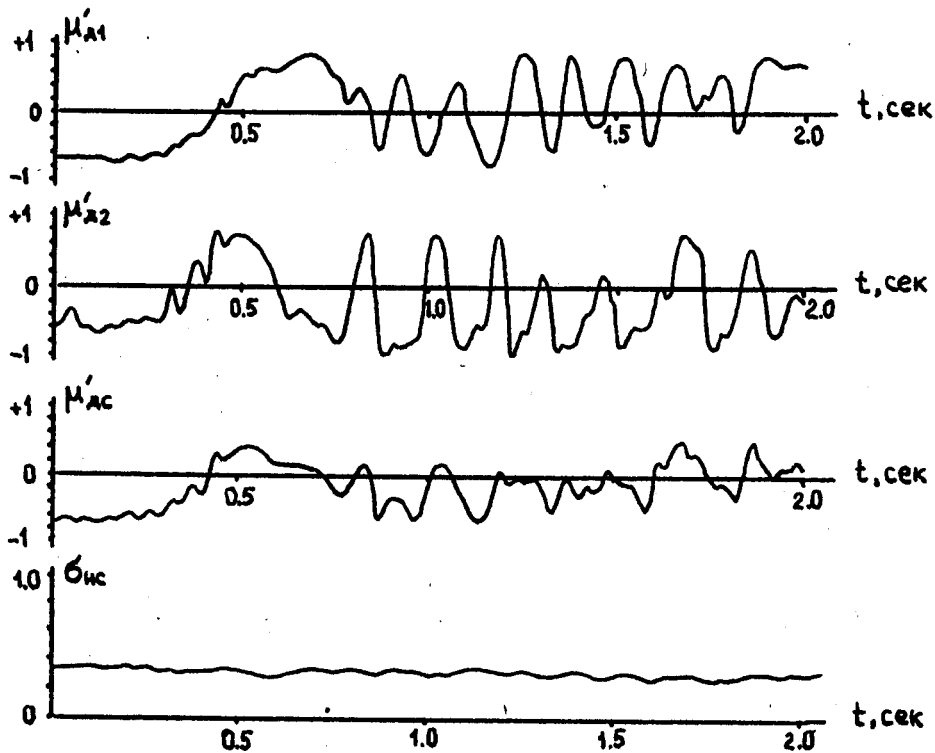


Рис.3.67. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$ 1-го канала обработки, а также $\mu'_{дс}(t)$ и $\sigma_{нс}(t)$ суммарного канала для начинающего движение в направлении РЛС человека. (18.04.90. "Фон": пашня; $R = 1.4$ км; Ант = 760 мм).

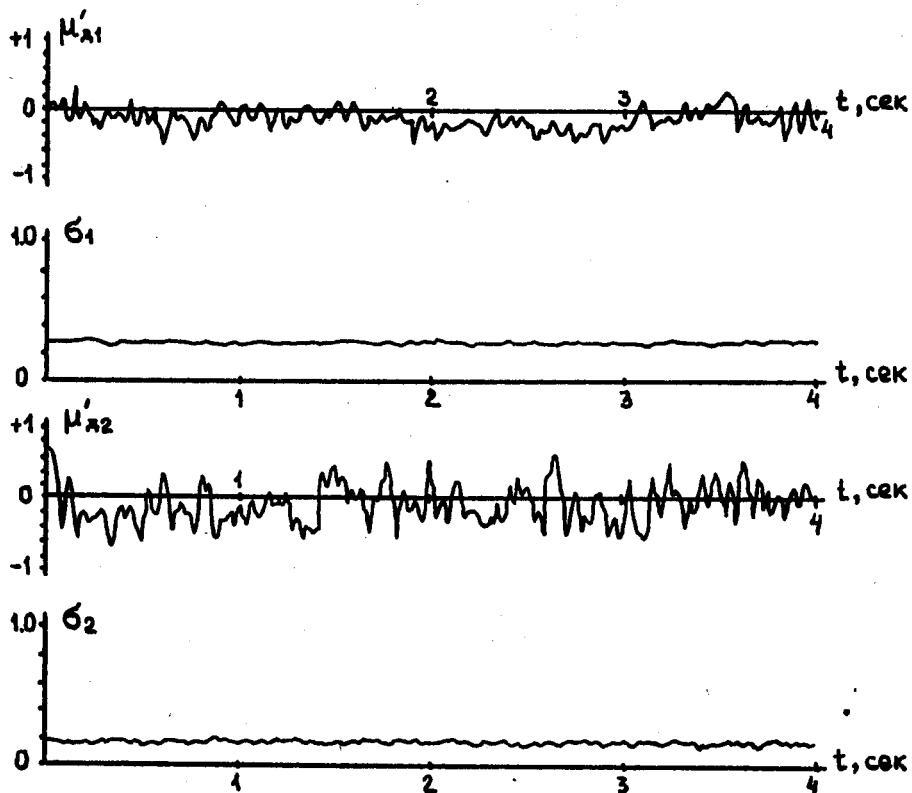


Рис.3.68. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$ и $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для участка поля, где проводился эксперимент, в отсутствие каких-либо объектов. (20.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.54$ км ; Ант = 560 мм).

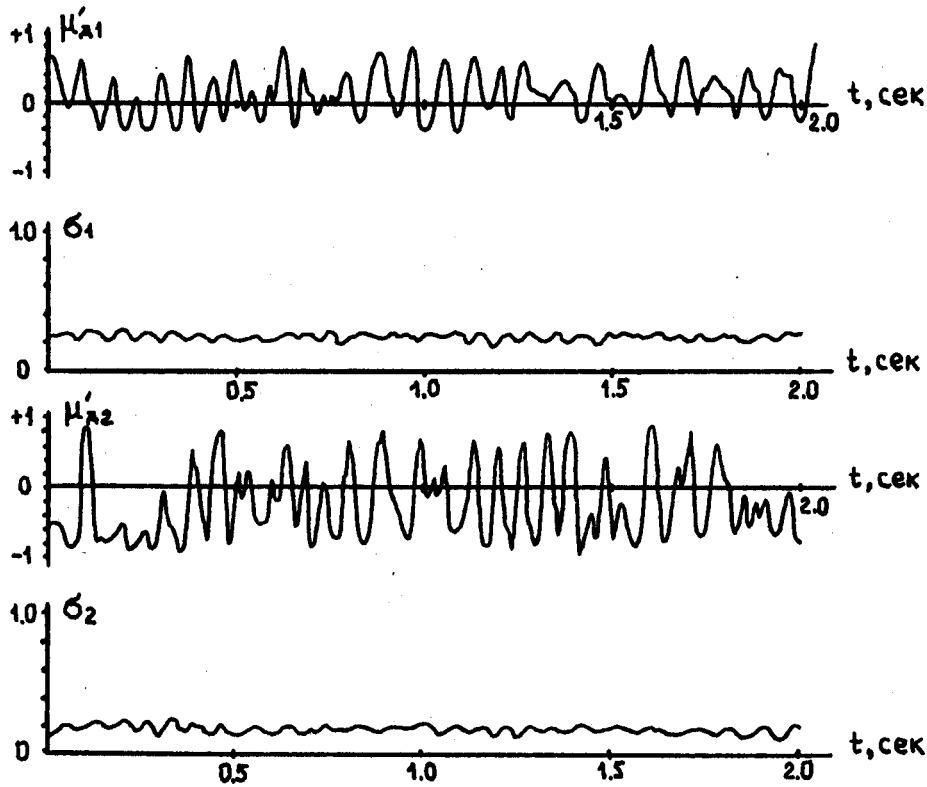


Рис.3.69. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для случая перемещения ($V = 0.10 \pm 0.20$ м/сек) металлической поверхности с малой ЭПР ($S \approx 0.18$ м²) на высоте 1.8 м в направлении РЛС. (20.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.54$ км ; Ант = 560 мм).

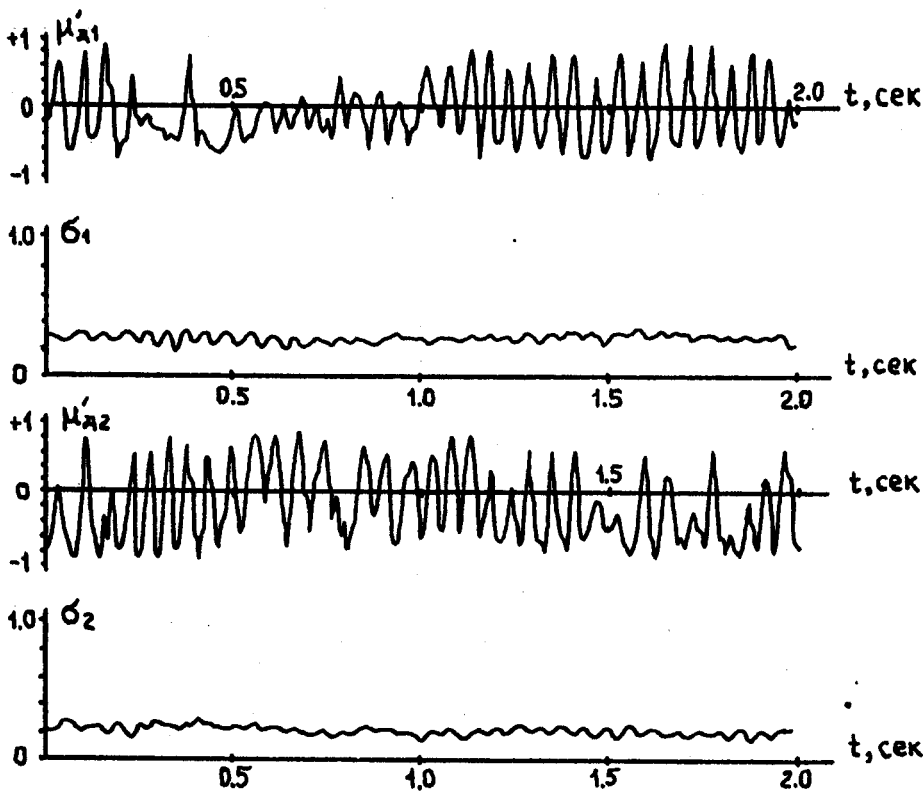


Рис.3.70. Зависимости $\mu'_{д1}(t)$, $\sigma_1(t)$ 1-го канала обработки для движущегося в направлении РЛС человека. (20.04.90. "Фон" : пашня ; $R = 1.54$ км ; Ант = 560 мм).

этом, модуляция величины μ_d' может наблюдаться при полном отсутствии таковой у параметра ЭПР (см., например, μ_{d2}' и σ_2 на рис.3.66). Во всяком случае амплитуда регулярного колебания нормированной величины ЭПР остается намного меньше размаха колебаний нормированного параметра μ_d' при движении малоразмерной РЛ цели относительно подстилающей поверхности (см. рис.3.69, 3.71). Анализ временных реализаций (см. рис.3.67) показывает, что обусловленные перемещением цели регулярные изменения параметров модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_{d1}' и μ_{d2}' в I-ом и 2-ом частотных каналах несинфазны, поэтому величина $\mu_{dc}'(t)$ в "суммарном" канале (3.28) носит более случайный характер. Следовательно, обнаружение движущейся цели с малой ЭПР по факту доплеровской модуляции измеряемых поляризационных параметров μ_d' в РЛС типа "Кедр-4" необходимо проводить параллельно, в отдельных каналах. Тем более, что в результате экспериментов получены данные о ярко выраженной регулярной модуляцией величины μ_d' лишь в одном из каналов (см., например, интервал $t = 0.2 - 0.6$ сек на рис.3.70).

В целом, эксперименты по наблюдаемости РЛ объектов с малой ЭПР показали более высокую чувствительность величины модуля коэффициента поляризационной анизотропии μ_d' к перемещению объектов на пересеченной местности по сравнению с энергетическим параметром σ_n .

Среди экспериментов, связанных с измерением параметров ЭПР и поляризационной анизотропии μ_d' , проводились исследования характеристик рассеяния объекта "металлическая труба над водой". Условия проведения эксперимента и способ крепления этого объекта сводили к минимуму влияние устройства, поддерживающего преимущественно вертикальную ориентацию "трубы", на рассеянный сигнал. В качестве примера на рис.3.71, 3.72 приведены временные реализации, автоковариационные функции и выборочные распределения параметров ЭПР и поляризационной анизотропии для объектов "взволнованная водная поверхность"

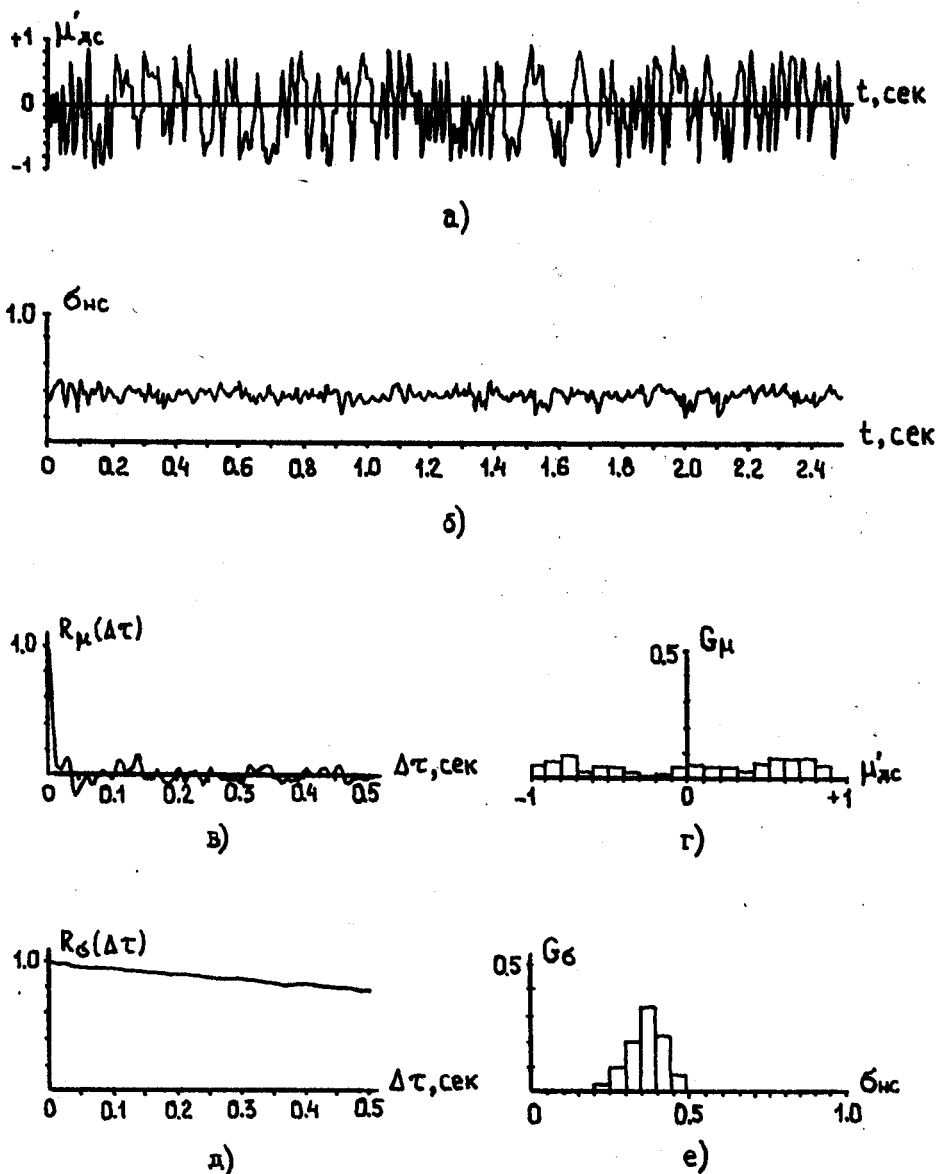


Рис.3.7I. Временные 2.5-секундные реализации поляризационного параметра $\mu'_{дс}(t)$ (а) и параметра ЭПР $\sigma_{нс}(t)$ (б) в суммарном канале для распределенного фонового образования " взволнованная водная поверхность " ($R = 1.60 \text{ км}$; $\text{Ант} = 560 \text{ мм}$; высота волн 1 м).

Результаты статистической обработки временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_{нс}(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_{дс}(t)$ объекта " взволнованная водная поверхность " :

(в), (д) - нормированные автоковариационные функции 2-сек реализаций соответствующих параметров ;

(г), (е) - гистограммы соответствующих параметров, характеризующие временной интервал $t = 1.70 \div 1.95 \text{ сек}$ реализаций (а), (б).

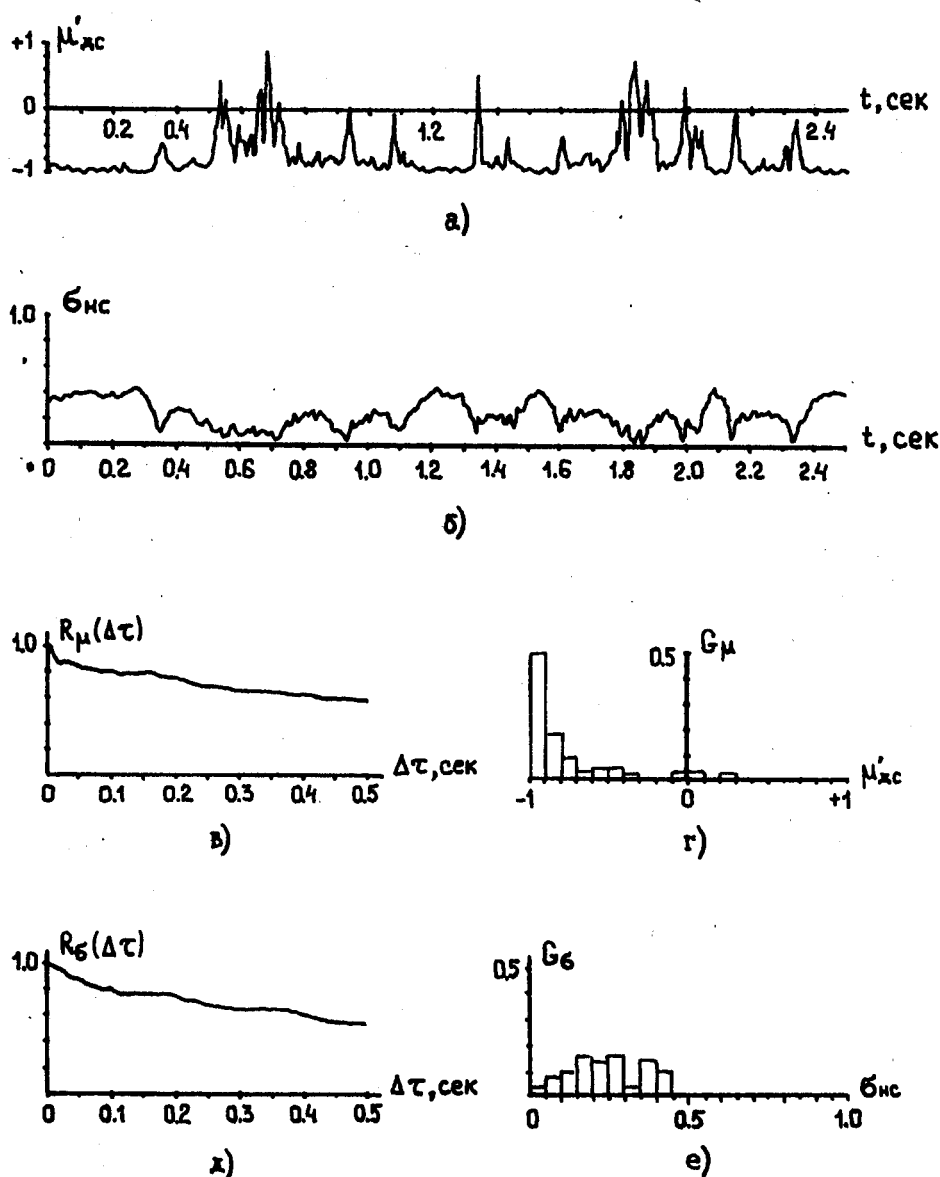


Рис.3.72. Временные 2.5-секундные реализации поляризационного параметра $\mu'_{дс}(t)$ (а) и параметра ЭПР $\sigma_{нс}(t)$ (б) в суммарном канале для составного РЛ объекта "взволнованная водная поверхность + вертикальная металлическая труба ($\phi = 0.05 \text{ м}$, $h = 1.5 \text{ м}$)".

($R = 1.60 \text{ км}$; Ант = 560 мм ; высота волн 1 м).

Результаты статистической обработки временных реализаций параметра ЭПР $\sigma_{нс}(t)$ и поляризационного параметра $\mu'_{дс}(t)$ объекта "вода + металлическая труба" :

(в), (д) — нормированные автоковариационные функции 2-сек реализаций соответствующих параметров ;

(г), (е) — гистограммы соответствующих параметров, характеризующие временной интервал $t = 1.20 \div 1.45 \text{ сек}$ реализаций (а), (б).

и "металлическая труба над водой". Очевидно, что появление сосредоточенной цели привело к заметному изменению свойств составного объекта "вода + металлическая труба" по сравнению с "чистой водой". Неустраняемые колебания "трубы", вызванные волнением, обусловили существенные изменения величины эффективной поверхности рассеяния σ_c (рис.3.72) и, соответственно, случайные флуктуации поляризационного параметра μ_{dc} . Свойства вертикальной металлической трубы диаметром 0.06 м и высотой 1.5 м обусловили смещение выборочного распределения составного РЛ объекта в область отрицательных значений поляризационной анизотропии. Несмотря на малую ЭПР искусственной цели, поляризационный контраст ($W_{\mu_{dc}} = 0.6$) объекта "вода + металлическая труба" в среднем заметно превосходит радиолокационный контраст ($K_{\sigma_c} = 0.2$) по ЭПР.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в настоящей диссертации, можно сделать следующие выводы.

1. Обоснована процедура количественной оценки поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии распределенного флуктуирующего объекта ("фон") и составного объекта "фон + искусственная сосредоточенная цель" при произвольных значениях инвариантов матриц рассеяния "фона" и "цели" для взаимного случая активной однопозиционной радиолокации.

2. Предложена статистическая модель временных флуктуаций поляризационных инвариантов матрицы рассеяния распределенного объекта, полученная на основе экспериментальных данных измерения параметров ЭПР и модуля коэффициента поляризационной анизотропии различных фоновых образований.

3. Определены потенциальные возможности выделения целей типа трехгранного (двухгранного) РЛ отражателей и вырожденных целей типа вертикально и горизонтально ориентированных диполей на фоне распределенных объектов с конкретными параметрами статистической модели поляризационных инвариантов матрицы рассеяния.

4. Рассмотренная процедура оценки поляризационного контраста искусственной цели со стабильными поляризационными свойствами, расположенной на фоне распределенного объекта, легко модифицируется для случая временных флуктуаций инвариантов МР "цели".

5. Статистическое моделирование процесса перемещения сосредоточенной РЛ цели относительно подстилающей поверхности выявило, что при определенных свойствах "фона" и "цели" в спектре флуктуаций составного объекта "фон + цель" появляется регулярная гармоническая составляющая, обусловленная движением "цели".

6. Результаты экспериментальных измерений величин ЭПР, а также модуля и реальной части коэффициента поляризационной анизотропии, широкого круга распределенных ("фон") и составных ("фон + цель") РЛ объектов позволили дать количественную оценку поляризационного контраста по степени поляризационной анизотропии и РЛ контраста по ЭПР для этих объектов.

7. Контраст по параметру поляризационной анизотропии РЛ объектов типа "фон" и "фон + цель" для искусственной "цели" с ЭПР, сравнимой или меньшей поверхности рассеяния "фона", превосходит радиолокационный контраст по ЭПР для этих объектов.

8. Результаты экспериментальных измерений величин ЭПР, а также модуля и реальной части коэффициента поляризационной анизотропии, искусственных РЛ целей, движущихся на фоне подстилающей поверхности, подтвердили высокую чувствительность измеряемых поляризационных характеристик составного РЛ объекта "фон + цель" к параметрам движения "цели" с составляющей радиальной скорости близкой к нулю.

Выводы I – V подтверждают выносимые на публичную защиту положения в части научной новизны диссертационной работы.

Выводы 6 – 8 подтверждают достоверность проведенного анализа поляризационного контраста РЛ объектов и свидетельствуют о возможности использования полученных результатов на этапе системного проектирования высокоинформативных обзорных РЛС.

В заключении автор хотел бы выразить глубокую благодарность своему Учителю, научному руководителю д.т.н. профессору Виктору Николаевичу Татарину за постоянное внимание и поддержку при ее написании, а также другу и коллеге – к.т.н. Валерию Александровичу Хлусову, у которых автор научился многому, чего не смог бы узнать от других.

Настоящая диссертация отражает конкретный личный вклад автора в научно-исследовательские работы, связанные с изучением поляриза-

ционных свойств радиолокационных объектов в обзорных РЛС. Однако, изготовление высокоинформативных поляризационных локаторов и выполнение большого объема экспериментальных измерений может быть осуществлено только коллективными усилиями. В данном случае основные работы по изготовлению макетов ОРЛС и проведению экспериментов осуществлялись группой сотрудников в следующем составе : Хлусов В.А., Кокташев С.И., Хребтов В.Д., Русин А.Н., Кунтиков С.И. Всем им автор выражает свою искреннюю благодарность за всестороннюю помощь. Большую признательность автор хотел бы выразить Копилевичу Л.С. и Игнатову М.В. за неоценимую помощь в организации и проведении цикла экспериментов по изучению рассеивающих свойств транспортных средств в сложных условиях. Автор благодарит Коренькова О.С. и Татаринова С.В. за предоставленные экспериментальные данные, полученные РЛС модуляционного типа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. — М.: Советское радио, 1966.—440с.
2. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. — Л.: Судостроение, 1968.—328с.
3. Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Коалов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.—279с.
4. Потехин В.А., Татаринцов В.Н. Теория когерентности электромагнитного поля. — М.: Связь, 1978.—208с.
5. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное рассеяние неферическими частицами. — Труды ЦАО, 1969, вып.30, с.39-48.
6. Татаринцов В.Н., Хлусов В.А., Масалов Е.В. Основы поляризационной радиолокации. — (готовится к публикации).
7. Поедник С.И. Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. — М.: Советское радио, 1974.—480с.
8. Корнблит С. СВЧ — оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн. — М.: Связь, 1980.—360с.
9. Романов Г.М., Туркина Н.В., Колпашиков Л.С. Человек и дисплей. — Л.: Машиностроение, 1986.—255с.
10. Масалов Е.В., Потехин В.А., Татаринцов В.Н. Представление матрицы рассеяния метеоцели. — Изв.вузов, Физика, N 7, 1983. (Рег. N 207-83, деп. ВИНТИ).
11. Коалов А.И. Радиолокационный контраст двух объектов. — Изв.вузов, Радиоэлектроника, N 7, 1979, с.63-67.
12. Джули Д. Поляризационное разнесение в радиолокации. — ТИИЭР, 1986, т.74, N 2, с.6-35.
13. A.Parina, G.Galatì. Surveillance radars: state of the art, research and perspectives. — Alta Frequenza, Jul.-Aug. 1985, v.54,

№ 4, pp.243-260.

14. Бацула А.П. Использование сигналов с динамической поляризационной структурой в одноканальных метеорологических радиолокаторах.- Кандидатская диссертация, Томск, ТИАСУР, 1983.
15. Масалов Е.В. Использование динамических поляризационных фильтров в задачах селекции и идентификации радиолокационных объектов.- Кандидатская диссертация, Томск, ТИАСУР, 1984.
16. Лукьянов С.П. Режекторная гребенчатая фильтрация в задачах обработки поляризационно-модулированных сигналов.- Кандидатская диссертация, Томск, ТИАСУР, 1987.
17. Хлусов В.А. Моноимпульсные измерители поляризационных параметров радиолокационных объектов.- Кандидатская диссертация, Томск, ТИАСУР, 1989.
18. Масалов Е.В., Татаринцов В.Н. Поляризационные измерения в задачах радиолокационной метеорологии.- Зарубежная радиоэлектроника, 1987, № 4, с.44-52.
19. Хойнен Я. Измерение матрицы рассеяния цели.- ТИИЭР, 1965, т.53, 8, с.1074-1085.
20. J.R.Huynen. Phenomenological theory of radar targets.- Ph.D. Dissertation.- Rotterdam, The Netherland. Drukkerij Bronder - Offset, N.Y., 1970.
21. J.R.Huynen. Towards a theory of perception for radar targets with application to the analysis of their data base structure and presentations : in Inverse Methods in Electromagnetic Imaging, W.-M.Boerner et al., Eds.Hingham, M.A. : Reidel Pub., 1985, Part 2, pp. 797-822.
22. A.J.Poelman. Virtual polarization adaptation : A method of increasing the detection capability of a radar system through polarization - vector processing.- Proc. Inst. Elec. Eng., pt.F Oct. 1981, v.128, pp. 261-270.

23. A.J.Poelman. Study of controllable polarization applied to radar : in Military Microwaves'80 Cont.Rec. (London, U.K., Oct. 1980), pp.389-404.
24. A.J.Poelman. Polarization vector translation in radar systems. A method of increasing the detection capability of a radar system through polarization - vector processing.- Proc. Inst. Elec. Eng., pt.F, Mar. 1983, v.130, pp. 161-165.
25. W.-M.Boerner. Use of polarization in electromagnetic inverse scattering.- Radio Sci., Nov.-Dec. 1981, v.16, pp. 1037-1045.
26. A.C.Manson and W.-M.Boerner. Interpretation of high-resolution polarimetric radar target down-range signatures using Kennan's and Huynen's target characteristic operator theories : in Inverse Methods in Electromagnetic Imaging, W.-M.Boerner et al., Eds. Hingham, M.A. : Reidel Pub., 1985, pt.2, pp. 695-720.
27. J.D.Nespor, A.P.Agrawal and W.-M.Boerner. Development of a Model - Free Clutter Description Based on a Coherency Matrix Formulation.- IEEE Int. Symp., APS-2-1, Jun. 1984, Boston, M.A., v.1.
28. Hyo J.Bom, A.P.Agrawal and W.-M.Boerner. Optimum polarization concept for polarimetric clutter suppression.- Proc. Int. Symp. Antennas and Propag., Kyoto, Aug.20-22, 1985 ; v.2, Tokyo, 1985, pp. 707-710.
29. W.-M.Boerner, A.B.Kostinsky and B.D.James. On the concept of the Polarimetric Matched Filter in High-Resolution Radar Imaging : an Alternative for Speckle Reduction.- IGARSS'88 Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. " Remote Sens.: Moving Towards 21st Century, Edinburgh, Sept. 12-16, 1988 ", Paris, 1988, v.1, pp. 69-72.
30. W.-M.Boerner, A.B.Kostinsky, B.D.James and M.Walter. Applications of the Polarimetric Matched Filter Technique to Clutter Removal in POL-SAR Images of the Ocean Environment.- Oceans'88,

- Proc.: Partnership Mar. Interests, Baltimore, Md., Oct.31 - Nov.2, 1988. New York, 1988, v.2, pp.454-461.
31. W.-M.Boerner and Y.Jamaguchi. A State-of-the-Art Review in Radar Polarimetry and its Applications in Remote Sensing.- IEEE Aerosp. and Electron. Syst. Mag., 1990, N 5, pp.3-6.
32. Хлусов В.А., Татаринов В.Н., Карнышев В.И. Использование поляризационных свойств рассеивающих объектов.- Депон. ЦНТИ ГА 10.08.87 N 558 / рег. N II, 1987.
33. Хлусов В.А., Татаринов В.Н., Карнышев В.И. Корреляционная обработка сигналов в задачах поляриметрии.- Изв.вузов, Радиоэлектроника, 1989, т.32, N 7, с.55-57.
34. Карнышев В.И., Кокташев С.И., Татаринов В.Н., Хлусов В.А. Статистические характеристики величины кругового деполаризационного отношения наземных рассеивающих объектов.- Тез. докл. XVI Всесоюзной конф. по распространению радиоволн, Харьков, 1990, ч.2, с.247.
35. Кокташев С.И., Кунтиков С.И., Татаринов В.Н., Хлусов В.А. Экспериментальные измерения поляризационных характеристик рассеивающих объектов, расположенных на фоне взволнованной водной поверхности.-Тез. докл. XVI Всесоюзной конф. по распространению радиоволн, Харьков, 1990, ч.2, с.29.
36. Татаринов В.Н., Хлусов В.А., Кокташев С.И., Карнышев В.И. и др. Результаты натурных испытаний панорамного измерителя поляризационных параметров земле-метеороbjectов.- Тез. докл. Всесоюзной конф. " Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации ", Киев, 1991.
37. Хлусов В.А., Татаринов В.Н., Кокташев С.И. Измерение инвариантных поляризационных параметров рассеяния взаимных сред.- Тез. докл. Всесоюзной конф. " Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации ", Киев, 1991.
38. Хлусов В.А., Татаринов В.Н. Полная модель обратного рассеяния

взаимных сред.— Тез. докл. Всесоюзной конф. " Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации ", Киев, 1991.

39. Иванов А.А., Колосков Б.П. Методы индикации деполяризованных зон в облаках и осадках.— Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии, 1975. М., 1978, с.70-78.
40. Коалов А.И., Демидов Ю.М., Устинович В.Б. О поляризационной селекции флуктуирующих отраженных сигналов.— Радиотехника и радиоэлектроника, 1975, N 5, с.1099-1100.
41. Козлов А.И. Отражение частично поляризованных радиоволн от радиолокационной цели.— Изв.вузов, Радиоэлектроника, 1981, N 9, с.47-52.
42. Атаянц Б.А., Езерский В.В. Определение инвариантных поляризационных параметров РЛ цели косвенным методом.— Радиоэлектроника, Киев, 1982, N 6 (Рег. N 4272-82, деп. ВИНТИ).
43. Драбкин М.О. Информативность поляризационных параметров РЛ сигналов от природных объектов.— Труды НИ центра изучения природных ресурсов, 1984, N 18, с.3-11.
44. Хайкин М.Н. Радиолокационные исследования облаков и осадков в Московской области с помощью 3-ом поляриметра.— Труды ЦАО, 1984, N 154, с.45-52.
45. Рыжков А.В. Инвариантные поляризационные характеристики метеорологических радиолокационных целей.— Труды ГГО, 1985, N 490, с. 11-16.
46. Мельник Ю.А., Рыжков А.В. Представление элементарных отражателей метеорологических объектов на сфере Пуанкаре.— Труды ГГО, 1985, N 490, с.3-10.
47. Мельник Ю.А., Рыжков А.В. Отображение метеорологических РЛ целей различного фазового состава на сфере Пуанкаре.— Труды ГГО, 1985, N 490, с.17-21.

48. Королева Т.Л. О взаимозависимости элементов поляризационной матрицы рассеяния РЛ целей.— В кн. : Теория и практика применения и совершенствования радиоэлектронных систем ГА.— М., 1985, с.38-43.
49. Козлов А.И., Крымов В.А., Суслив Р.М., Троицкий В.И. Информативные параметры μ -волнового излучения и их использование в задачах дистанционного зондирования земных покровов.— Тез. докл. Всесоюзной конференции по статистическим методам обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды, Рига, октябрь 1986,— Рига, 1986, с.113.
50. Степаненко В.Д., Канарейкин Д.Б., Завируха В.К. Оптимизация параметров метеорологических РЛС с поляризационной модуляцией при дистанционном зондировании облаков и осадков.— Тез. докл. Всесоюзной конференции по статистическим методам обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды, Рига, октябрь 1986,— Рига, 1986, с.126.
51. Пытьев Ю.П., Толмачев В.В., Стрельцов Ю.П., Пашкевич М.Ю., Богомолов О.С. Об использовании поляризационных свойств метеорадиолуча для увеличения информативности радиолокатора.— Тез. докл. 7 Всесоюзного совещания по радиометеорологии, Суздаль, октябрь 1986 — М., 1986.
52. Бадулин Н.Н., Гулько В.Л. Спектральные характеристики эхо-сигналов при поляризационной модуляции излучения РЛС.— Изв.вузов, Радиоэлектроника, 1988, т.31, N 4, с.74-76.
53. G.C.McCormic and A.Hendry. Principles for the radar determination of the polarization properties of precipitation.— Radio Sci., 1975, v.10, pp.421-434.
54. G.C.McCormic and A.Hendry. Techniques for the determination of the polarization properties of precipitation.— Radio Sci., 1979, v.14, pp.1027-1040.
55. Шупяцкий А.Б., Диневич Л.А., Тычина Р.П. Дистанционная индикация

града в облаках по поляризационным характеристикам РЛ сигнала.- Труды ЦАО, 1975, вып.121, с.18-27.

56. Диневич Л.А., Шупяцкий А.Б. Поляризационные исследования градовых облаков в Молдавии.- Труды ЦАО, 1977, вып.126, с.14-23.
57. T.A.Seliga, V.N.Bringi. Potential use of radar difference reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation.- J.Appl.Meteorol., 1976, v.15, N 1, pp.69-76.
58. T.A.Seliga, V.N.Bringi. Applications of the differential reflectivity radar technique in cloud physics.- Commun. 8-eme Conf. int. phys. mag., Clermond-Ferrand, 1980, v.2.
59. B.L.Barge, R.G.Humphris. Identification of rain and hail with polarization and dual-wavelength radar.- Prepr. 19-th Conf. Radar Meteorol. Amer. Meteorol. Soc., Miami Beach, Flo., 1980. Boston, Mass., 1980, pp.507-516.
60. M.N.Cohen, E.S.Sioberg. Intrapulse polarization agile radar.- Radar-82 : Int. Conf., 18-20 Oct. 1982. London, 1982, IEE Conf. Publication, N 216, pp.7-11.
61. J.H.Andrews, T.Pratt, R.E.Porter, D.M.Imrich. The VPI & SU multiple polarization plane Z_{DR} radar - the "Octopod" radar.- 21-st Conf. Radar Meteorol., Prepr., Edmonton, Canada, 19-23 Sept. 1983. Boston, Mass., 1983, pp.364-368.
62. M.P.M.Hall, S.M.Cherry, J.W.F.Goddard. The use of multiple-parameter radars in radio science and cloud physics : a review.- Prepr. 3rd Int. Conf. Antennas and Propag. : ICAP 83, Norwich, 12-15 Apr., 1983, London. New York, 1983, pp. 45-50.
63. M.P.M.Hall, J.W.F.Goddard, S.M.Cherry. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.132-140.

64. R.A.Kropfli, W.R.Moninger, P.Pasqualucci. Circular depolarization ratio and Doppler velocity measurements with a 35-GHz radar during the CCOPE.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.141-147.
65. T.A.Seliga, K.Aydin, V.N.Bringi. Differential reflectivity and circular depolarization ratio radar signals and related drop oscillation and propagation effects in rainfall.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.81-89.
66. A.Hendry, Y.M.M.Antar. Precipitation particle identification with centimeter wavelength dual-polarization radars.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.115-122.
67. M.P.M.Hall. A review of the application of multiple-parameter radar measurement of precipitation.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1 pp.37-43.
68. W.A.Holm. Polarization scattering matrix approach to stationary target / clutter discrimination.- Colloque International sur le Radar, Paris, 21-24 mai. Paris, 1984, pp.461-465.
69. P.S.P.Wei, J.R.Huynen, T.C.Bradley. Transformation of polarization bases for radar target scattering matrix.- Electron. Lett., 1986, v.22, N 1, pp.13-14.
70. D.Giuli, M.Fossi, M.Gherardelli. Doppler polarization spectral resolution of radar signals.- Electron. Lett., 1984, v.20, pp. 650-651.
71. D.Giuli, M.Gherardelli, M.Fossi. Using polarization discriminants for target classification and identification.- Rec. CIE Int. Conf. Radar, Nanjing, Nov.4-7, 1986. Beijing, 1986, pp.675-681.
72. A.Kozma, A.D.Nichols, R.P.Rawson, S.J.Shackman, C.W.Haney, J.J. Jr.Schanne. Multifrequency-polarimetric SAR for remote sensing.- IGARSS'86 : Remote Sens. Today's Solut. Tomorrow's Inf.Needs. Proc. Symp., Zurich, 8-11 Sept., 1986, v.1. Paris, 1986, pp.715-

719.

73. A.Hendry, Y.M.M.Antar, G.C.McCormic. On the relationship between the degree of preferred orientation in precipitation and dual-polarization radar echo characteristics.- Radio Sci., 1987, v.22, N 1, pp.37-50.
74. R.Sullivan, A.Nichols, R.Rawson, C.Haney, F.Darreff, J.J.Jr. Schanne. Polarimetric X/L/C - band SAR.- Proc. IEEE Nat. Radar Conf., Ann Arbor, Mich., Apr.20-21, 1988. N.Y., 1988, pp.9-14.
75. D.N.Held, W.E.Brown, T.W.Miller. Preliminary results from NASA/JPL multifrequency, multipolarization SAR.- Proc. IEEE Nat. Radar Conf., Ann Arbor, Mich., Apr.20-21, 1988. N.Y., 1988, pp.7-8.
76. C.E.Livingstone, A.L.Gray, R.K.Hawkins, R.B.Olsen. CCRS C/X-airborne SAR : an R and D tool for the ERS-1 time frame.- Proc. IEEE Nat. Radar Conf., Ann Arbor, Mich., Apr.20-21, 1988. N.Y., 1988, pp.15-21.
77. M.Tanaka. Polarimetric contrast optimization for partially polarized waves.- Antennas and Propag. : AP-S Int. Symp. San Jose, Calif., Jun. 26-30, 1989. N.Y., Dig.-v.2, 1989, pp.784-787.
78. S.P.Brookshire, J.L.Eaves. High resolution 95-GHz FM-CW solid state radar.- Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1985, N 544, pp.142-149.
79. H.A.Zebker, J.J.Van Zyl, D.N.Held. Imaging radar polarimetry from wave synthesis.- J. Geophys. Res., 1987, v.892, N 1, pp.683-701.
80. Пат. N 4106014 (США). МКИ G01S 9/02.
81. Пат. N 1510625 (Великобритания). МКИ G01S 9/02.
82. Пат. N 4107678 (США). МКИ G01S 9/02.
83. Пат. N 4035797 (США). МКИ G01S 9/02.
84. R.R.Rogers. A review of multiparameter radar observations of precipitation.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.23-36.

85. A.Hendry, Y.M.M.Antar. Comparison of circular and linear polarization radar measurements of the melting layer.- Electron.Lett., 1984, v.20, N 10, pp.419-420.
86. E.Torlaschi, R.G.Humphries, B.L.Barge. Circular polarization for precipitation measurement.- Radio Sci., 1984, v.19, N 1, pp.193-200.
87. W.-M.Boerner and M.B.El-Arini et.al. Polarization dependence in electromagnetic inverse problems.- IEEE Trans. Antennas and Propag., 1981, v.AP-29, pp.262-271.
88. M Davidovitz and W.-M.Boerner. Extension of Kennaugh's optimal polarization concept to the asymmetric matrix case.- IEEE Trans. Antennas and Propag., 1986, v.AP-34, N 4, pp.569-574.
89. A.P.Agrawal and W.-M.Boerner. Redevelopment of Kennaugh's target characteristic polarization state theory using the polarization transformation ratio formalism for the coherent case.- IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens., 1989, v.27, N 1, pp.2-14.
90. Радиолокационные станции обзора Земли. Под ред. Кондратенкова Г. С.- М.: Радио и связь, 1983.-272с.
91. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. Под ред. Тучкова Л.Т.- М.: Радио и связь, 1985.-236с.
92. Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания.- М.: Радио и связь, 1984.-152с.
93. Селекция и распознавание на основе локационной информации. Под ред. Горелика А.Л.- М.: Радио и связь, 1990.-240с.
94. M.Possi, N.Cherardelli, D.Giuli, P.Pizzi and G.Ponziani. Experimental results on a double polarization radar.- Proc. of Colloque Int. sur le Radar. Versailles, France, 1984, pp.419-424.
95. У.Шерклиф. Поляризованный свет. Получение и использование.- М.: Мир, 1965.-264с.
96. Завядин А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике.-

М.: Связь, 1969.—448с.

97. Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов.— М.: Энергия, 1979.—112с.
98. А.Афифи, С.Эйзен. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. Пер. с англ. под ред. Башарина Г.П.— М.: Мир, 1982.—488с.
99. Отчет о НИР "Перспектива" / Томский институт АСУ и радиоволноводов, 1991 : Руководитель В.Н.Татаринов.
100. Способ измерения коэффициента поляризационной анизотропии радиолокационной сосредоточенной цели и устройство для его осуществления.— Авторское свид. N 1729216, МКИ G01S, 1991. Авторы : Хлусов В.А., Карнышев В.И., Татаринов В.Н.
101. Устройство для определения косинуса отношения амплитуд двух сигналов с разными частотами.— Авторское свид. N 1532952, МКИ G01S, 1989. Авторы : Хлусов В.А., Карнышев В.И., Кокташев С.И., Масалов Е.В., Татаринов В.Н.
102. Способ измерения коэффициента анизотропии радиолокационной цели.— Авторское свид. N 1309758, МКИ G01S, 1987. Авторы : Хлусов В.А., Карнышев В.И., Татаринов В.Н., Масалов Е.В., Потехин В.А., Деревянченко С.С., Рудман Э.А.
103. Устройство определения поляризационных характеристик радиолокационной цели.— Авторское свид. N 1412466, МКИ G01S, 1988. Авторы : Карнышев В.И., Масалов Е.В., Хлусов В.А., Татаринов В.Н.
104. Способ поляризационной селекции радиолокационной цели и устройство для его осуществления.— Авторское свид. N 1478840, МКИ G01S, 1989. Авторы : Хлусов В.А., Кокташев С.И., Карнышев В.И., Татаринов В.Н., Потехин В.А., Линецкий Г.М.
105. Радиолокационный отражатель с управляемыми поляризационными свойствами. А.с.СССР. Решение о выдаче а.с. по заявке N 4822134 /09, от 04.04.1990 г. Авторы : Хлусов В.А., Кокташев С.И., Карнышев В.И., Татаринов В.Н.