

## Введение

Учитывая тот факт, что за рубежом в рамках программ развития летательных средств в последние годы активно проводятся работы по созданию целей с малой эффективной площадью рассеивания (ЭПР), а также малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, которые могут использоваться для выполнения различных задач (постановка помех, разведка и т. д.), современные когерентно-импульсные радиолокационные станции (РЛС) дальнего обнаружения вынуждены наращивать свой потенциал, необходимый для обнаружения на заданных рубежах целей с малой ЭПР. Однако это приводит к увеличению интенсивности мешающих отражений и прежде всего целеподобных, в частности обусловленных отражениями от оптически ненаблюдаемых объектов, известных как «ангелы». Большое количество «ангелов» в зоне ответственности РЛС может служить причиной ухудшения характеристик обнаружения и проводки малоразмерных целей, а также приводить к перегрузке информационных каналов средств вторичной обработки РЛС. Эти обстоятельства определяют актуальность исследований по разработке эффективных методов и алгоритмов выделения скоростных целей с малыми ЭПР на фоне ангел-эхо и уменьшения при этом перегрузки информационных каналов средств вторичной обработки РЛС. Следует подчеркнуть дополнительную сложность этой задачи — она должна решаться в реальном времени в обнаружителе движущихся целей когерентно-импульсных РЛС.

Проведенный анализ показал, что современные РЛС не удовлетворяют в полной мере основным требованиям при работе в интенсивных отражениях от «ангелов».

Одним из возможных путей решения новых задач с ограниченными ресурсами является создание программируемых обнаружителей движущихся целей (ОДЦ), работающих в условиях воздействия дискретных пассивных помех.

Созданию программируемых ОДЦ в настоящее время способствует достигнутый в стране и за рубежом высокий уровень развития радиолокационной техники, элементной базы и большое разнообразие современных технических решений и информационных технологий. Однако не все из этих технических решений и технологий могут обеспечить повышение темпов модернизации РЛС.

Поэтому проблема состоит в выборе таких унифицированных технических решений и технологий, которые бы обеспечили возможность выполнения всего объема возросших требований при минимальных затратах на проектирование программируемых обнаружителей движущихся целей и на оснащение ими РЛС. Выбор рациональных научно-технических решений возможен лишь на основе использования соответствующей научно-методической базы.

В имеющейся обширной литературе приведено множество различных методик оценки и выбора тех или иных параметров средств радиолокационного обнаружения. Научно-методическим проблемам проектирования радиолокационных средств обнаружения воздушных целей посвящены работы отечественных и зарубежных ученых Я.Д. Ширмана, В.М. Свистова, К. Вартона, М. Скольника и др. Цифровая обработка сигналов в обнаружителях движущихся целей рассматривалась в трудах П.А. Вакулева, В.А. Лихарева, В.Я. Плевакина, Д.И. Попова, В.И. Кошелева и др.

Значительный вклад в практику создания радиолокационных средств обнаружения воздушных целей в условиях пассивных помех в том числе и дискретного типа внесли специалисты предприятий ВНИИРТ, ННИИРТ, НИИИП, ПКБ, специалисты КВ «Лира».

В монографии рассмотрены методы повышения устойчивости РЛС обнаружения различного назначения и ведомственной принадлежности к воздействию мешающих отражений разного рода за счет научно-технических решений для создания обнаружителей движущихся целей, использующих как адаптивную фильтрацию, так и классификацию и бланкирование дискретных мешающих отражений и обеспечивающих снижение затрат на их разработку за счет унификации.

Для достижения поставленной цели в исследованиях решался следующий комплекс взаимосвязанных крупных научных и технических задач:

- анализ факторов, обуславливающих необходимость и возможность создания синтеза адаптивных обнаружителей движущихся целей;
- обобщение и формирование научно-методических основ синтеза адаптивных обнаружителей движущихся целей;
- разработка базовых технических решений и информационных технологий создания унифицированных адаптивных обнаружителей движущихся целей;
- технико-экономическая оценка предложенных технических решений и технологий создания адаптивных обнаружителей движущихся целей.

В монографии описаны следующие новые научные результаты.

1. Синтез и модификация алгоритмов обнаружения на основе инвариантных статистических выводов с новыми свойствами, обеспечивающими эффективное обнаружение сигналов при воздействии как протяженных, так и дискретных коррелированных помех в условиях априорной помеховой неопределенности, используя неклассифицированную выборку наблюдений.

2. Аналитические выводы на основе распределения Уишарта в виде распределений оценки модуля и аргумента межпериодного коэффициента корреляции помех по конечной выборке наблюдения, а также вероятности попадания оценки модуля коэффициента корреляции в заданный интервал значений. Данные аналитические выражения нашли свое применение при анализе эффективности синтезированных алгоритмов.

3. Адаптивный разностно-фазовый способ обнаружения, который обеспечивает эффективное обнаружение сигналов при воздействии дискретных коррелированных помех в условиях априорной помеховой неопределенности, используя как вобулированную последовательность импульсов, так и двухчастотный режим работы РЛС.

4. Способ обнаружения, классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений в условиях их интенсивного воздействия на когерентно-импульсные РЛС.

Разработанные технические решения и технологии доведены до уровня практических устройств, внедренных в ряде современных РЛС обнаружения.

# 1 Влияние отражений от «ангелов» на работу РЛС

---

В практике работы радиолокационных систем сантиметрового и дециметрового диапазонов волн отражения от «ясного неба» или радиолокационные «ангелы» известны достаточно давно. К «ангелам» относятся все отметки на экранах РЛС, которые могут быть классифицированы как целеподобные отражения от гидрометеоров, неоднородностей и турбулентностей атмосферы или стай птиц и роев насекомых. По своему воздействию на РЛС отражения от «ангелов», имеющие точечную структуру, рассматриваются как дискретные пассивные помехи.

Во Всероссийском НИИ радиотехники впервые столкнулись с отражениями типа «ангелов» летом 1955 года при государственных испытаниях РЛС П-15, проводившихся близ г. Оренбурга. Время существования этих отражений было невелико и существенного влияния на результаты испытаний не оказало. Аналогичные явления имели место на РЛС П-15 в Египте близ Каира летом 1970 г.

Отражения от «ангелов» привели к серьезным трудностям в ходе испытаний ряда мощных высокочувствительных РЛС, обладавших значительно большим потенциалом, чем РЛС П-15. Это РЛС 5Н69, 5Н59, а также РЛС УВД «Утес-М». Характерным для всех случаев было то, что испытания проводились в теплое время года в южных районах (в Астраханской обл. г. Капустин Яр и Венгрии, г. Пюшпекладань).

На экране индикатора кругового обзора (ИКО) РЛС 5Н69 отражения от «ангелов» целеподобны, распределены равномерно по азимуту, с увеличением дальности их число убывает. Наибольшая плотность отметок наблюдалась на расстояниях от 50 до 80 км, где число отметок на элементе площади индикатора размером 10 км × 10 градусов доходило до 20. В 10..15 % случаев сигналы от «ангелов» превышали уровень шума на 30 дБ при уровне полезного сигнала в зоне «ангелов» в 45 дБ выше уровня шума. При подъеме луча диаграммы направленности антенны на 2 градуса над горизонтом число отметок от «ангелов» снижалось на 90 %, а при подъеме на 3 градуса отражения от «ангелов» практически исчезали. Время существования отдельных мешающих отметок колебалось от интервала одного

обзора до нескольких десятков минут. «Ангелы» перемещались со скоростью до 120 км/ч.

При испытаниях РЛС 5Н59 влияние «ангелов» проявилось следующим образом:

- система вторичной обработки информации по автозахвату и автосопровождению (20 скоростных и 64 малоподвижных целей) оказалась практически полностью загруженной точечными отметками «ангелов». Для захвата реальных целей оператор не успевал непрерывно снимать с сопровождения ложные трассы;
- среднее количество ложных трасс, одновременно выдаваемых потребителю, составляло 4–5 и могло достигать 10–11. В пересчете на весь рабочий азимутальный сектор среднее количество ложных трасс увеличивалось до 10–13, а максимальное до 35–36, что в 1,5...2 раза превышало заданную производительность системы вторичной обработки;
- коэффициент автоматической проводки реальных целей снижался до 0,3...0,5 из-за частых переводов реальной трассы в ложную, маневрирующие цели в автоматическом режиме не сопровождалась;
- точностные характеристики сопровождения целей ухудшались в 1,5 раза из-за наличия в зоне сопровождения ложных отметок;
- затруднялось визуальное сопровождение целей оператором на участках дальности 1...45 км, где наблюдался наибольший поток ложных отметок от «ангелов».

В ходе испытаний РЛС «Утес-М» наибольшее количество «ангелов» наблюдалось в утренние часы. Число отметок от них достигало 500–1000 даже при включенных системах временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) и селекторе движущихся целей (СДЦ). Отметки перемещались по экрану со скоростью 60...150 км/ч, периодически обновляясь через 1–5 и более обзоров. При подъеме антенны на 1 градус исчезало около половины ложных отметок, при 2 градусах отметки исчезали полностью. Число ложных отметок, приходящихся на элемент площади ИКО, ограниченной 30 градусами по азимуту и 10 км по дальности на дальности от РЛС 90 км составляло в среднем 30–50.

Ввиду значительного разнообразия сигналов, отраженных от «ангелов», регистрируемых при различных режимах работы разных РЛС и эпизодического проведения их наблюдения (при проведении научно-исследовательских работ или приемо-сдаточных испытаний), в настоящее время можно дать лишь качественную и, в известной мере, фрагментарную характеристику пространственно-временного и территориального распределения сигналов от «анге-

лов». В частности, наблюдения показывают, что наиболее часто «ангелы» проявляют себя в горно-пустынной местности в основном в теплое время года. С высотой количество «ангелов» убывает, особенно резко выше 1...2 км. Проведенные измерения показали, что эффективная площадь рассеивания (ЭПР) «ангелов» заключена в интервале 0,001...0,1 м<sup>2</sup>. Наибольший интерес с точки зрения методов и средств селекции целей на фоне отражений от «ангелов» вызывают их флюктуационные характеристики. Имеются сведения о высокой когерентности отражений от «ангелов». Считается, что доплеровский спектр флюктуаций обычно узок и его ширина в сантиметровом диапазоне не превышает 20...50 Гц, а средняя частота спектра флюктуаций меняется в диапазоне 250...400 Гц. В частности, цифровая регистрация сигналов от «ангелов» на РЛС 5Н59 позволяет утверждать:

- «ангелы» распределены равномерно по азимуту и дальности в пределах строба регистрации;
- сигналы от «ангелов» не режектируются традиционными системами СДЦ (череспериодными схемами вычитания);
- спектры флюктуаций «ангелов» отличаются наличием нескольких спектральных составляющих (мод).

Спектрограмма отраженных от «ангелов» сигналов представлена на рис. 1.1 (по оси  $x$  — доплеровская частота, по оси  $y$  — время).

Данные выводы находят подтверждение в результатах испытаний РЛС 67Н6. Анализ доплеровских спектров, вычисленных по материалам регистрации, показывает, что они имеют многомодовую структуру с шириной отдельной моды не более единиц-десятка герц. Число мод спектра меняется от 1 до 3. Причем анализ распределения количества мод показывает, что из всей совокупности зарегистрированных «ангелов» 25 % были двухмодовыми, 5 % — трехмодовыми.

Для повышения помехоустойчивости РЛС к воздействию «ангел-эхо» в настоящее время используются следующие методы:

- методы, базирующиеся на формировании специальной диаграммы направленности, приподнятой над земной поверхностью. Эти методы могут приводить к потерям обнаружения низколетящих целей и не решают проблемы защиты от «ангел-эхо» на больших высотах, что делает их малоэффективными;
- методы, основанные на регулировке усиления приемного тракта РЛС по специальному закону или добавлении шума в тракт обработки, или регулировке порога обнаружения (АРУ, ВАРУ, ШВАРУ). Данные методы предполагают снижение чувстви-

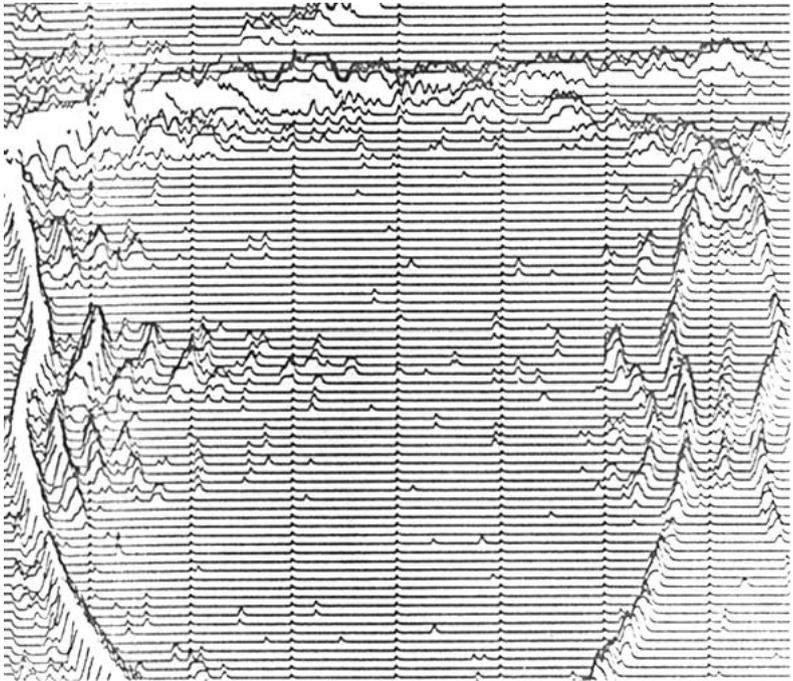


Рис. 1.1

тельности приемного тракта, что приводит к ухудшению характеристик обнаружения целей особенно с малой ЭПР;

- методы межобзорной обработки, которые не полностью решают проблему защиты РЛС от воздействия «ангел-эхо» в силу того, что:
  - имеют ограниченные возможности по производительности;
  - большое количество ангелов имеют малое время жизни по сравнению со временем одного обзора РЛС и не подавляются подобными системами;
- методы на основе селекции движущихся целей. Указанные методы являются в настоящее время наиболее перспективными, так как реализуются в реальном времени «на проходе». Однако дискретный целеподобный характер «ангелов» и медленное их перемещение требуют поиска новых алгоритмов селекции движущихся целей, учитывающих эту специфику «ангел-эхо».
- методы классификации дискретных мешающих отражений, основанные на использовании сигнальных или траекторных признаков.

Однако ни один из известных методов распознавания классов

целей не реализуется в реальном времени.

### **Выводы**

По мере дальнейшего расширения практического использования более совершенных радиолокационных средств, улучшения характеристик приемных трактов, применения цифровой обработки сигналов, увеличения коэффициента усиления антенн, повышения мощности передатчиков, а также в связи с широким внедрением автоматизированных систем управления проблема защиты РЛС от «ангелов» приобретает все большее значение. Как показывает опыт эксплуатации современных РЛС, используемые в настоящее время методы помехозащиты не позволяют полностью избавиться от «ангелов». Это связано с тем, что сигналы от «ангелов» воспринимаются как целеподобные, число «ангелов» в зоне обзора РЛС может достигать несколько тысяч, «ангелы» перемещаются в пространстве со скоростью до 80 км/ч, а интенсивность сигналов от «ангелов» может достигать 20 дБ над собственным шумом приемника. Целеподобный характер отраженных сигналов от дискретных помех исключает применение для защиты РЛС от них адаптивных фильтровых систем СДЦ как режекторных, так и многоканальных доплеровских.

Таким образом, для эффективного обнаружения полезных целей на фоне «ангел-эхо» необходимо разработать алгоритмы, которые бы базировались на новых принципах адаптивных СДЦ и методах классификации дискретных мешающих отражений, но работающих в реальном времени («на проходе»).

## 2 Синтез обнаружителей движущихся целей на фоне отражений от «ангелов»

---

При синтезе алгоритмов обнаружения целей в условиях воздействия отражений от «ангелов» следует учитывать большое разнообразие свойств и характеристик этих еще не до конца изученных природных явлений. Поэтому синтез обнаружителей должен проводиться в условиях априорной помеховой неопределенности. При этом следует выделить две тактические ситуации, которые определяют подход к синтезу обнаружителей.

1. Цель и «ангел» находятся в одном импульсном объеме. В этом случае синтез и построение обнаружителей будет рассматриваться применительно к межпериодной обработке когерентной последовательности импульсов с использованием адаптивных фильтровых систем.

2. Цели и множество «ангелов» распределены по разным элементам дальности. Синтез и построение обнаружителей в этом случае будет строиться с использованием классификации мешающих отражений по сигнальным признакам с последующим их бланкированием.

В реальности эти две ситуации могут иметь место одновременно, поэтому в дальнейшем предполагается комплексное использование синтезированных алгоритмов как в первом, так и втором случае.

### 2.1. Постановка задачи синтеза обнаружителя движущихся целей на фоне отражений от «ангелов»

Классическое решение задачи построения оптимальных обнаружителей движущихся целей при гауссовом представлении пассивной помехи хорошо известно [1–10]. Оно базируется на априорных сведениях о параметрах пассивной помехи. В [13–19] представлен широкий класс адаптивных приемов построения обнаружителей для указанной проблемы при априорной неопределенности в отношении параметров пассивной помехи. В частности, первым шагом на пути к построению адаптивных устройств помехозащиты на фоне коррелированных помех можно назвать метод корреляционной автокомпенсации. Известны два способа построения автокомпенсатора с корреляционными обратными связями: с использованием квадратурных

каналов на видеочастоте и гетеродинного типа на промежуточной частоте. Аналогичные устройства были предложены и в США.

Широкое теоретическое обобщение подобных адаптивных систем, синтезированных по критерию минимума среднеквадратической ошибки дано в работах Я.Д. Ширмана [12]. Поскольку эти устройства основаны на винеровской теории фильтрации, которая допускает только стационарные случайные процессы, естественным требованием, налагаемым на помеху, является наличие ее стационарной выборки по дальности. Для «ангела» из-за его дискретной природы такой выборки не существует и значит применение адаптивных автокомпенсаторов с корреляционными обратными связями для выделения целей на фоне «ангелов» невозможно.

Известны и другие адаптивные алгоритмы [16, 17]. В частности, предлагалось использовать оптимальный алгоритм обнаружения импульсных сигналов на фоне коррелированных помех с известной корреляционной матрицей, заменяя ее выборочным эквивалентом, полученным, например, методом максимального правдоподобия [18]. К сожалению, подобные адаптивные алгоритмы, которые получаются из оптимальных подстановкой вместо неизвестных параметров соответствующим образом подобранных оценок, вычисленных при помощи обучающих выборок, эффективно применимы в случае коррелированных помех при большом времени наблюдения. Синтез адаптивных байесовских алгоритмов требует знания априорного распределения неизвестных параметров. Кроме того, класс оценок, в котором отыскиваются оптимальная оценка, зависит от априорных ограничений на структуру оцениваемых параметров. В частности, для оцениваемой корреляционной матрицы важно знать ее структуру (диагональная, скалярная и т. д.). Все перечисленные трудности: выбор априорного распределения, класса оценок и т. д. — преодолеваются вполне удовлетворительно, если использовать соображения симметрии (инвариантности), которой может обладать рассматриваемая задача [20]. Существуют принципы математической статистики, позволяющие синтезировать алгоритмы обнаружения сигналов на фоне коррелированных помех, обладающие оптимальными свойствами при конечной выборке наблюдения, причем вид критерия априорного распределения оценки определяются из условий их инвариантности относительно группы преобразований, описывающих симметрию задачи [22]. Если существует группа  $G$  преобразований  $g$  выборочного пространства  $X$ , такая, что индуцированная группа  $\tilde{G}$  преобразований  $\tilde{g}$  пространства параметров  $\Omega$  оставляет инвариантной область  $\Omega_k$ , контролируемую при оптимизации, то задача обнаружения является симметричной по отноше-

нию к тем параметрам  $\omega$ , которые могут быть переведены друг в друга преобразованием группы  $\check{G}$ .

Для того чтобы представить себе возможность применения данных принципов, сформулируем решаемую задачу в самом общем виде. Рассматриваемая задача относится к сложному двоичному обнаружению сигнала, т. е. к выбору решения о его присутствии или отсутствии по дискретной выборке  $X$  заданного объема  $N$ . Под дискретной выборкой  $X$  мы будем понимать импульсную последовательность, отраженную от элемента дальности при зондировании  $N$ -частотным сигналом. Выбор разноса частот сделан таким, чтобы отсчеты выборки наблюдений были независимы. Многомерность выборки наблюдений определяется количеством импульсов в пачке. Помеху («ангел-эхо») мы будем рассматривать как помеху нормального (гауссова) типа со средним значением, равным нулю, и неизвестной ковариационной матрицей. В нашей задаче полезный сигнал может либо присутствовать, либо отсутствовать. Неизвестный параметр сигнала — начальная фаза, равномерно распределенная в интервале  $0 \dots 2\pi$ . Задача обнаружения соответствует проверке сложной гипотезы о том, что плотность распределения входной выборки принадлежит распределению выборки одной помехи при сложной альтернативе, т. е. что это распределение сигнала и помехи. Из теории проверки сложных статистических гипотез следует, что при наличии симметрии выборочного и параметрических пространств, выраженной группами  $G$  и  $\check{G}$  задача сложного обнаружения может быть сведена к простой задаче отыскания инвариантных решающих правил, для которых решающая область остается инвариантной относительно преобразования  $g \in G$ . Поиск такого оптимального решающего правила значительно облегчится, если обратиться к некоторым результатам математической статистики, точнее к теории проверки статистических гипотез для многомерного нормального распределения выборки наблюдений.

Пусть выполняются  $N$  независимых векторных наблюдений из  $p$ -мерной нормальной совокупности с неизвестной ковариационной матрицей и неизвестным вектором среднего. Выборку из  $N$  независимых векторов можно представить в виде матрицы размером  $N \times p$

$$(X_1 \ X_2 \ \dots \ X_N) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{N1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1p} & x_{2p} & \dots & x_{Np} \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Матричные наблюдения зависимы по столбцам и независимы по строкам. Требуется проверить сложную гипотезу о том, что выборка принадлежит нормальному распределению с вектором среднего