

ОТЧЕТ МСЭ-R М.2076

Факторы, ослабляющие влияние помех, создаваемых радиолокационными радарными и радарными спутниковой службы исследования Земли/службы космических исследований (активной) морским и воздушным радионавигационным радарам в полосах частот 9,0–9,2 ГГц и 9,3–9,5 ГГц, а также помех между радарными спутниковой службы исследования Земли/службы космических исследований (активной) и радиолокационными радарными в полосах частот 9,3–9,5 ГГц и 9,8–10,0 ГГц

(2006)

1 Введение

В соответствии с вопросом МСЭ-R 234/8 предусматривается исследование технических характеристик, критериев качества работы и других факторов, относящихся к радиолокационным и радионавигационным системам в полосах частот 9000–9200 МГц и 9300–9500 МГц, а также критериев помех для этих систем. Кроме того, в Резолюции 747 (ВКР-03) определен пункт 1.3 повестки дня ВКР-07, в соответствии с которым предполагается рассмотреть возможность повышения статуса распределений радиолокационной службе до равного первичного в полосах частот 9000–9200 МГц и 9300–9500 МГц и возможность расширения до 200 МГц полосы непрерывного спектра существующих распределений на первичной основе спутниковой службе исследования Земли (ССИЗ) (активной) и службе космических исследований (СКИ) (активной) в полосе частот 9500–9800 МГц. Характеристики типовых наземных радаров в полосе частот 8500 МГц – 10,5 ГГц содержатся в проекте новой Рекомендации МСЭ-R М.[8В.8-10GHz]. Данный Отчет представляет собой дальнейший вклад в исследования, которые требуется провести в соответствии с Вопросом МСЭ-R 234/8 и Резолюцией 747 (ВКР-03).

В Рекомендации МСЭ-R М.1372-1 – Эффективное использование радиочастотного спектра радарными станциями в службе радиоопределения описываются некоторые из наиболее важных методов подавления помех, которые обычно используются в радаров. Основное внимание в этой Рекомендации уделяется последетекторной обработке сигнала, хотя один из описанных в ней методов может применяться до детектирования. Обсуждаемые в настоящем Отчете факторы включают несколько факторов, о которых говорится в Рекомендации МСЭ-R М.1372, а также несколько дополняющих их факторов.

1.1 Краткие результаты исследования

Основной вид ухудшений вследствие помех, которые обычно вызываются импульсными помехами, заключается в увеличении частоты сигналов ложной тревоги. Влияние этого вида ухудшений естественным образом ослабляется с помощью некоторых общих характеристик радаров, включающих низкий уровень боковых лепестков и асинхронный импульсный режим. Способствуют ослаблению помех отклики на отдельные импульсы, включая малую постоянную времени, воздействие согласованной фильтрации и других мер укорочения длительности импульса. Наибольшие проблемы доставляет связь между главным лепестком и боковым лепестком.

За счет разумной конструкции радара влияние импульсных помех может быть ослаблено многочисленными способами. К ним относятся:

- методы последовательности импульсов, включая обработку с использованием критерия "М" из "N";
- специальное удаление отдельных асинхронных импульсов;
- распознавание воздействия асинхронных импульсов при рассмотрении выходных сигналов после обработки фильтром доплеровских частот;
- нелинейные и динамические режимы, например, ограничение и регулировка чувствительности по времени;
- корреляция между соседними сканированиями.

2 Виды радаров и полосы частот

В полосах частот 9000–9200 МГц и 9300–9500 МГц действуют несколько видов радионавигационных радаров. В полосе частот 9000–9200 МГц действуют воздушные радионавигационные радары наземного базирования; они включают радары точного захода на посадку (PAR) и радары наблюдения за наземным движением в районе аэропорта и подъездных путей (ASDE). Эти радары являются обзорными радарными слежения за групповыми целями. Полоса частот 9300–9500 МГц используется большим количеством морских радионавигационных радаров, подавляющее большинство которых находится на борту судов, а также метеорологических радаров на борту воздушных судов для предупреждения о неблагоприятных погодных условиях. Морские системы представляют собой радары слежения за групповыми целями, в то время как системы на борту воздушного судна являются радарными слежения за распределенными целями.

Радиолокационная служба действует с использованием распределений на вторичной основе в полосах частот 9000–9200 МГц и 9300–9500 МГц. Метеорологические радиолокационные радары сухопутного базирования, действующие в полосе частот 9300–9500 МГц, имеют преимущество перед другими радиолокационными радарными (п. 5.475 Регламента радиосвязи (PP)). Радиолокационные радары также действуют в полосах частот 9500–9800 МГц и 9800 МГц – 10,0 ГГц с использованием распределений на первичной основе.

Бортовые радары с синтезированной апертурой (РСА) ССИЗ/СКИ (активной) действуют в настоящее время в полосе частот 9,5–9,8 ГГц с использованием распределений на равной первичной основе. Предложение расширить это распределение до 200 МГц продиктовано стремлением улучшить разрешение по дальности РСА.

3 Виды потенциальных воздействий помех

Два наиболее известных вида ухудшений качественных показателей обзорных радаров слежения за групповыми целями, например, PAR, ASDE или морских навигационных радаров, к которым могут привести радары ССИЗ/СКИ (активной), делятся на следующие категории:

- потеря обнаруженной цели;
- обнаружение ложной цели или "ложная тревога" и слежение за ложной целью.

Эти два вида воздействий можно рассматривать как уменьшение вероятности обнаружения и увеличение вероятности ложной тревоги, соответственно.

Несмотря на то, что радиолокационные радары и радары ССИЗ/СКИ (активной) вероятно могут привести к снижению чувствительности до некоторой степени (потере обнаруженной цели и т. д.), ожидается, что такое их воздействие будет незначительным, как было продемонстрировано в нескольких программах измерений, поэтому внимание будет сосредоточено на появлении ложных целей.

Импульсные сигналы от других радаров приводят к возможности обнаружений ложной цели, даже если наземный радар обеспечивает работу, отвечающую требованиям "постоянной частоты ложных тревог" (CFAR). Однако в оставшейся части данного Отчета показывается, что эти воздействия можно в значительной степени не допустить за счет хорошей конструкции. Радары слежения за групповыми целями, включая радары сопровождения специальных целей, также подвержены увеличению числа ошибок определения местоположения цели и ошибок классификации цели из-за нежелательных сигналов. Однако более вероятно, что эти воздействия будут вызваны непрерывными шумоподобными помехами, а не импульсными помехами от других радаров.

Ухудшение качественных показателей радаров слежения за распределенными целями, включая метеорологические радары для предупреждения о неблагоприятных погодных условиях и обзорные метеорологические радары, к которому могут привести радиолокационные радары и радары ССИЗ, включает появление отдельных (например, одиночный пиксель) сигналы ложных тревог (которые имеют отношение к метеорологическим радарам, называют спеклами) и внесение погрешности в производные показатели особых явлений погоды. В научно-космическом сообществе ухудшение показателей радаров формирования изображений с синтезированной апертурой, к которому может привести помеха любого вида, выражается через увеличение изменения выходной мощности процессора в каждом пикселе¹.

¹ Проект пересмотренной Рекомендации МСЭ-R RS.1166 "Критерии качества и помех для активных бортовых датчиков".

Воздействия этих помех противоположны воздействию непрерывных шумоподобных помех на радары слежения за групповыми целями, у которых имеется эффективный контроль за частотой сигналов ложной тревоги. В этом случае вероятность сигнала ложной тревоги остается неизменной, но, по мере усиления нежелательного сигнала, кривая вероятности обнаружения как функция от дальности до цели или эффективной площади отражения цели (RCS) неуклонно сдвигается в сторону более коротких расстояний или большей величины RCS. Это обобщенное снижение чувствительности, которое преимущественно затрагивает цели небольших размеров, удаленные или слабо освещенные цели вследствие неблагоприятных условий распространения радиоволн, например, многолучевого распространения или сложного волноводного распространения. Это также вызывает ухудшение других функций, таких как точность сопровождения. Однако исследование непрерывных шумоподобных помех не является целью данного документа.

4 Характеристики ослабления влияния помех, часто встречающиеся в радарх

Влияние помех может быть ослаблено за счет слабой или неустановившейся связи по мощности, определенной нелинейности характеристик приемника, динамического усиления, обработки сигнала, постобработки и разноса частот несущих. При взаимодействиях радара с радаром не всегда требуется разнос частот для обеспечения совместимости, поскольку высокая степень развязки при связи по мощности и во времени либо возникает естественным образом, либо достигается за счет хорошей конструкции. При некоторых сочетаниях радиолокационных и бортовых радаров, а также навигационных радаров, возникает развязка вследствие рассогласования по поляризации, однако, в общем случае, на нее не стоит полагаться, поскольку в радарх службы с заданным распределением часто используется горизонтальная, вертикальная и/или круговая поляризация.

Конкретные механизмы, способствующие таким факторам ослабления влияния, определены в следующих ниже разделах. Многие из них применяются к импульсам от радиолокационных или бортовых измерительных радаров, которые воздействуют на морские радары, радары на борту воздушных судов и радары управления воздушным движением, в то время как некоторые применяются к радарам только в той или иной из этих категорий.

4.1 Развязка при связи по мощности (воздействие при помощи антенны)

Взаимодействие между двумя радарными разными видами почти всегда включает в себя асинхронность в сканировании двух лучей антенн. Фактически это обеспечивается в том случае, при котором один из радаров является радиолокационным радаром, а второй – радионавигационным радаром, поскольку различия в их назначениях приводят к различиям в их системных характеристиках. Дальнейшее расширение асинхронности в сканировании происходит при взаимодействиях с участием "трехкоординатных" радиолокационных радаров; такие радары используют игольчатые главные лепестки, осуществляющие сканирование по углу места, а также по азимуту, в то время как навигационные радары для поверхностного использования (морские и управления воздушным движением) обычно бывают "двухкоординатными"; т. е. они осуществляют сканирование только по азимуту. У восьми из примерно четырнадцати радиолокационных радаров, описанных в проекте новой Рекомендации МСЭ-R М.[8В.8-10 GHz], имеются игольчатые главные лепестки, которые осуществляют сканирование по углу места, а также по азимуту. Таким образом, игольчатые главные лепестки этих радиолокационных радаров значительную часть времени обследования областей обычно находятся либо выше горизонта, где у них нет сильной связи с наземными радионавигационными радарными, либо, в случае радаров на борту воздушных судов, при переменных углах наклона цели, поэтому они облучают конкретный наземный навигационный радар или радар на борту воздушного судна лишь время от времени. Наиболее мощными являются наземные радиолокационные радары с нулевым излучением в направлении горизонта, поэтому они слабо связаны с наземными радионавигационными радарными. Более того, в радиолокационных радарх часто используется электронное управление положением главного лепестка и сканирование с диаграммами направленности, которые специально делаются псевдослучайными, или с квазислучайными диаграммами направленности, поскольку они адаптируются к условиям цели. В таких случаях главный лепесток радиолокационного радара повторно появляется на направлении на навигационный радар только через неравномерные промежутки времени, а не периодически. Поэтому маловероятно, что радионавигационные радары слежения за групповыми целями будут воспринимать мешающие сигналы радара при пересечении главного лепестка с главным лепестком как реальную цель. Во всяком случае то обстоятельство, что у всех радаров главные лепестки являются узкими, приводит к чрезвычайно малой доле времени, в течение которого происходит пересечение главного лепестка с главным лепестком. Следовательно, ситуации, которые обычно представляют интерес, ограничиваются следующими случаями:

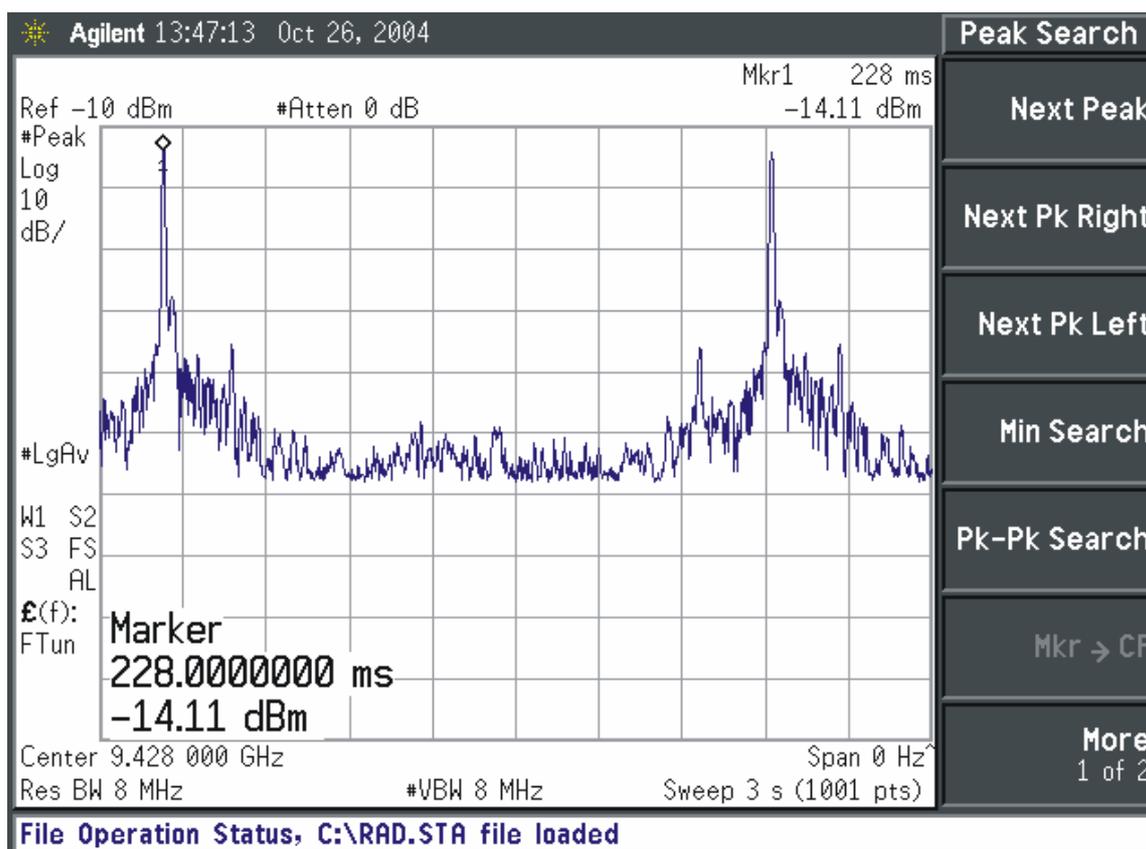
- пересечение боковых лепестков радиолокационного радара с боковыми лепестками радионавигационного радара;
- пересечение главного лепестка радиолокационного радара с боковыми лепестками радионавигационного радара; и
- пересечение боковых лепестков радиолокационного радара с главным лепестком радионавигационного радара.

4.1.1 Связь бокового лепестка с боковым лепестком

У основной части боковых лепестков как радиолокационных, так и радионавигационных радаров усиление по меньшей мере на 30 дБ ниже, чем усиление в направлении главного лепестка. Фактически, средние уровни боковых лепестков таких антенн с высоким усилением обычно бывают приблизительно -10 дБи, то есть среднее значение коэффициентов подавления боковых лепестков составляет обычно порядка 40 дБ. Морские навигационные радары, действующие на частоте порядка 10 ГГц, обычно используют волноводно-щелевые антенные решетки. Следовательно, они обладают достаточно хорошим подавлением боковых лепестков. Кроме того, у них достаточно узкие лучи в азимутальной плоскости. На рис. 1 представлен пример диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости, измеренной у серийного морского навигационного радара, действующего в полосе частот 9,3–9,5 ГГц. Как показано на данном рисунке, подавление бокового лепестка с самым высоким уровнем составляет порядка 25 дБ, при этом средний уровень бокового лепестка по меньшей мере на 47 дБ ниже, чем усиление в направлении главного лепестка.

РИСУНОК 1

Диаграмма усиления антенны морского навигационного радара
в азимутальной плоскости на частоте 10 ГГц



Rap 2076-01

Данный вид качественных показателей не отражен в большинстве опубликованных значений усиления в направлении боковых лепестков, включая те, что представлены в проекте новой Рекомендации МСЭ-R М.[8В.8-10 GHz], поскольку в характеристиках и стандартах обычно устанавливаются только уровни максимальных ближайших боковых лепестков. И это легко понять. Поскольку антенна может только концентрировать энергию, а не усиливать ее, любое усиление в направлении ее главного лепестка может быть достигнуто за счет уменьшения коэффициента

направленного действия в большинстве других направлений ниже усредненного по всем направлениям ($4\pi(sr)$) коэффициента направленного действия, который непременно равен 0 дБи. Установленные значения усиления в направлении главного лепестка представляют собой значения усиления мощности, которые учитывают активные потери; т. е. рассеивание энергии, которую антенна не смогла излучить. Таким образом, эти значения обычно на несколько дБ ниже, чем соответствующие значения коэффициента направленного действия. Усиление мощности по всей диаграмме направленности антенны для всех углов ($4\pi(sr)$) будет во столько же раз меньше, чем соответствующий коэффициент направленного действия, поэтому среднее усиление мощности в области боковых лепестков просто не может превысить значение -3 дБи. За счет хорошей конструкции обеспечивается концентрация большей части излучаемой энергии в области главного лепестка и дополнительное подавление большинства боковых лепестков. Следовательно, в большинстве случаев связь бокового лепестка с боковым лепестком обычно на $66-80$ дБ слабее, чем связь главного лепестка с главным лепестком.

Таким образом, за исключением случаев, при которых расстояния разноса достаточно короткие, импульсы связи боковых лепестков с боковыми лепестками слишком слабые, чтобы вызвать сигнал ложной тревоги.

Случается, что в антеннах с прямоугольными или квази-прямоугольными апертурами происходит концентрация усиления боковых лепестков в виде гребней, которые располагаются в плоскостях, содержащих продольные и поперечные оси апертуры, и в которых значения усиления боковых лепестков могут в среднем быть выше -10 дБи; но в этих случаях боковые лепестки во всех других плоскостях подавляются до уровней, средние значения которых меньше -10 дБи. Кроме того, любые сигналы ложной тревоги, которые возникают за счет связи бокового лепестка с боковым лепестком, будут случайным образом распределены по широкому диапазону азимутальных значений, поэтому они обычно не воспринимаются как цели.

4.1.2 Связь главного лепестка с боковым лепестком

За исключением маломощных ответчиков радиомаяков, величина усиления антенн радиолокационных радаров в этих полосах частот, описанных в предварительном проекте новой Рекомендации МСЭ-R М.[8В.8-10 GHz], обычно составляет $28-42$ дБи, а у метеорологических радаров – до 46 дБи. У первичных радаров узкие азимутальные диаграммы направленности антенн по уровню -3 дБ, ширина которых составляет $1,5-5,75^\circ$, а у метеорологических радаров ширина луча составляет до $0,9^\circ$. Если, как это обычно бывает, обеспечиваемое этими диаграммами направленности покрытие в азимутальной плоскости равномерное на 360° , то их главные лепестки будут облучать другие радары не чаще, чем от $1,5/360*100 = 0,42\%$ до $5,75/360*100 = 1,6\%$ времени, и всего лишь $0,9/360*100 = 0,25\%$ времени для метеорологических радаров, а для многих радаров, осуществляющих сканирование по углу места, главные лепестки радиолокационных радаров будут облучать их еще значительно реже. Малые значения этих процентных соотношений сами по себе не гарантируют совместимости, но они важны в силу нескольких обстоятельств:

- случайные облучения возникают в промежутки времени, отличающиеся от периода сканирования радионавигационных радаров;
- помеха носит импульсный и асинхронный характер;
- любое воздействие помех проявляется в форме сигналов ложной тревоги.

Таким образом, сигналы ложной тревоги, включая очевидные погодные отметки, вызванные влиянием главного лепестка радиолокационного радара с вращающимся лучом, обычно перемещаются по условным азимутам радионавигационных радаров, в основном понижаясь по спиральным орбитам на индикаторе кругового обзора (ИКО). До тех пор пока они не слишком интенсивные, их можно отсеивать визуально или с помощью алгоритмов обработки типа сопровождение в процессе сканирования. Радиолокационные радары с электронным управлением положением главного лепестка часто осуществляют псевдослучайное сканирование, поскольку в них отсутствует ограничение в виде сканирования с постоянной угловой скоростью; при осуществлении такого неравномерного сканирования в той же плоскости, что и сканирование (обычно с постоянной скоростью) радионавигационного радара, сигналы ложной тревоги, вызванные влиянием главного лепестка радиолокационного радара, будут распределены случайным образом в широком азимутальном секторе радионавигационного радара, поэтому связь, приводящая к слежению за ложной целью, возникать не будет.

4.1.3 Подавление бокового лепестка

Одной из необязательных характеристик, которой иногда оснащаются радары, является подавление бокового лепестка [Skolnik, 1990; Maisel, 1968]. При таком устройстве антенна с высоким усилением, характерным для радаров, дополняется вспомогательной антенной с малым усилением, по которой сигнал подводится к отдельному приемнику с таким же усилением, что и у основного приемника. В обоих каналах имеются логарифмические усилители, чтобы с помощью схемы вычитания можно было удобно регулировать отношение мощностей сигналов в двух каналах. Задача таких устройств подавления состоит в том, чтобы не допустить детектирования или другого вида обработки сильных импульсов отраженного сигнала от цели и импульсов помех, попадающих через боковые лепестки антенны радара. Это достигается за счет использования соответствующего отношения усиления вспомогательной антенны к усилению основной антенны и соответствующих значений порога записи для отношения сигналов, принятых двумя антеннами. Данный метод не может обеспечить защиту от непрерывной помехи, поскольку, если такая помеха будет достаточно сильной, чтобы запереть приемник, то она будет делать это большую часть времени, тем самым существенно ухудшая эффективность системы. Пользу от применения подавления бокового лепестка для подавления помех можно извлечь только в случае помехи с низкой скважностью импульсов.

Если бы этот метод использовался в навигационных радарх, он бы еще более ограничил виды взаимодействий, представляющих интерес, теми, при которых помеха принимается в главном лепестке навигационного радара.

4.1.4 Связь бокового лепестка с главным лепестком

Предположим, что радиолокационный радар подвергает радионавигационный радар воздействию энергии нежелательного сигнала, приводя к возможности возникновения сигналов ложной тревоги. Наибольшую неприятность доставляют те сигналы ложной тревоги, которые обнаруживаются почти на одном и том же азимуте при ряде последовательных сканирований луча антенны радионавигационного радара, поскольку далее между ними может быть уловлена взаимосвязь либо путем визуального наблюдения, либо в автоматическом режиме, и они будут приняты за реальную цель. Для того чтобы это произошло, одним из обязательных условий является постоянное возникновение сигнала ложной тревоги при направлении главного лепестка радионавигационного радара на заданный пеленг. При этом внимание сосредоточено на случае связи боковых лепестков радиолокационного радара с главным лепестком радионавигационного радара. В отдельных случаях эта связь может быть достаточно сильной, поскольку у радионавигационных радаров в этих полосах частот в основном достаточно высокое усиление. Требуется, чтобы морские навигационные радары в этой полосе обеспечивали подавление бокового лепестка за пределами сектора в 10° с центром в главном лепестке не менее, чем на 20 дБ, что дает подавление помехи для 97% времени в любом направлении не менее, чем на 20 дБ. (Как показано на рис. 1, реальное подавление бокового лепестка часто оказывается значительно лучше этого значения). Сама по себе такая нерегулярность не предотвратит принятие сигналов ложной тревоги за реальные цели, поскольку она обычно удерживает их в одном узком секторе. Однако асинхронные импульсы приводят к тому, что сигналы ложной тревоги появляются на весьма произвольных направлениях, зачастую разнообразно меняющихся от сканирования к сканированию, что уменьшает вероятность установления взаимосвязи между ними при использовании алгоритмов автоматического сопровождения или путем визуального наблюдения.

4.2 Воздействие при помощи процессора

С помощью процессора для обработки сигналов на воздействие нежелательных сигналов от других радаров можно повлиять с помощью режимов, действующих во временном масштабе отдельных импульсов (именуемом в литературе по РСА "быстрым временем"), а также с помощью режимов, действующих во временном масштабе нескольких импульсов (именуемом в литературе по РСА "медленным временем"). В любых двух радарх различных видов, в особенности, если они предназначены для двух разных целей, например, радиолокации и радионавигации, почти неизменно используются разные интервалы следования импульсов, особенно в заданный момент времени. Это дает возможность использовать эффективные методы ослабления влияния помех между радарными. В связи с тем, что данное подавление происходит в результате отсутствия синхронизма между импульсами, создаваемыми испытывающим помеху радаром, и импульсами, принимаемыми от мешающего радара, оно эквивалентно скорее временной развязке, а не пространственной или радиочастотной. Эти методы включают в себя несколько методов обработки, о которых говорится ниже.

4.2.1 Режимы с отдельным импульсом

4.2.1.1 Малая постоянная времени

Во многих морских навигационных радарх обеспечивается малая постоянная времени (FTC) или дифференцирование, представляющая собой характеристику, уменьшающую мешающее воздействие помех от атмосферных осадков. Метод FTC применяется в цепях видеосигнала или последетекторных схемах, и он предшествует режимам "межимпульсной корреляции" или некогерентного накопления. По этой причине данный метод может повысить эффективность указанных режимов путем ограничения ширины и скважности нежелательных импульсов, в то время как к ним применяется режим межимпульсной корреляции. Стандартная практика заключается в том, чтобы обеспечить некоторый вид FTC в морских навигационных радарх, действующих на частоте порядка 10 ГГц, а также действующих на частоте порядка 2 ГГц; метод FTC в сочетании с логарифмическим усилителем/детекторами ПЧ, используемыми в этих радарх, обеспечивает подавление мешающих отражений от морских волн. Он также оказывает потрясающее воздействие в виде сокращения более длинных импульсов, которые могут быть приняты от других радаров. Фактически, метод FTC тесно связан с методом селекции импульсов по длительности, который используется в некоторых радарх специально для целей подавления активных помех.

4.2.1.2 Воздействие расстройки на скважность

Независимо от использования FTC, длинные импульсы от радиолокационных радаров, которые расстроены по отношению к радионавигационным радарам, вызовут отклики в тракте ПЧ последних, которые существенно уже, чем импульсы, передаваемые радиолокационными радаром. Передний и задний фронты передаваемого импульса вызовут отклики, похожие на отклики от импульсов радионавигационного радара, длительность которых составляет лишь порядка 1 мс или менее (в зависимости от длительности импульса радионавигационного радара). Во время перерывов между фронтами передаваемых импульсов (время нарастания, время спада и фронты некоторых субимпульсов), уровни откликов будут низкими, приближаясь к тем уровням, которые вызваны немодулированной расстроенной несущей. Подобно использованию FTC, данное воздействие может значительно уменьшить действующую скважность посторонних импульсов и, тем самым, существенно повысить эффективность "межимпульсной корреляции" (о которой говорится выше) в плане снижения вероятности обнаружения ложной цели.

4.2.2 Метод накопления последовательности импульсов

В целом, эти методы включают как "додетекторное" или когерентное накопление и "последетекторное" или некогерентное накопление. Для данного контекста термин "детектирование" относится только к режиму извлечения огибающей сигнала и устранения его несущей, а не к процессу сравнения уровня сигнала с пороговым значением для определения присутствия цели. Когерентное накопление обычно используется для реализации доплеровской обработки сигнала и для максимизации общей чувствительности радара. Когерентное накопление может использоваться в радарх точного захода на посадку. В отличие от когерентного накопления, некогерентное накопление действует только на величину принятых импульсов после устранения "детектором огибающей" фазовой информации. Независимо от того, выполняется ли когерентное детектирование или нет, в большинстве радаров выполняется некоторый вид некогерентного детектирования. Существует ряд методов последетекторного накопления; их обзор приведен в справочнике по радарам Скольника [Trunk, 1990].

4.2.2.1 Линейное накопление

Помимо различий между когерентным и некогерентным накоплениями, существует важное отличие линейного накопления от нелинейного или квантованного накопления. При линейном накоплении принятые последовательности импульсов взвешиваются не только по количеству принятых импульсов в отдельном элементе разрешения по дальности/углу или элементе разрешения по дальности/углу/доплеровской частоте, но также по амплитуде каждого импульса. Поскольку при линейном накоплении используется взвешивание каждого импульса по амплитуде, сильные импульсы дают пропорционально больший вклад на выходе устройства для накопления, нежели слабые импульсы, поэтому одиночные импульсы помех, если они достаточно мощные, могут создавать на выходе относительно сильные сигналы. Однако взвешивание по количеству импульсов для данного элемента разрешения по дальности/углу/доплеровской частоте позволяет существенно ослаблять асинхронные импульсные помехи до такой степени, которая особенно полезна при относительно слабых импульсах помех.

4.2.2.1.1 Характеристики ослабления влияния помех в виде последовательности импульсов, присущие радарам с синтезированной апертурой

В дополнение к преимуществу выигрыша от обработки сигнала, получаемому при отдельных импульсах, в РСА происходит дополнительный выигрыш от обработки за счет накопления многих импульсов, которые формируют синтезированную апертуру. Мощность полезного сигнала увеличивается на множитель N , равный квадрату количества импульсов, накопленных за время синтеза апертуры, которое обычно бывает очень длительным. Однако при воздействии асинхронной импульсной помехи, азимутальный выигрыш от обработки будет близок к единице.

Общий выигрыш от обработки (по дальности и азимуту) для асинхронной импульсной помехи с низкой скважностью импульсов обычно бывает не более нескольких дБ. В отличие от этого, для непрерывного шума (или шумоподобной помехи) азимутальный выигрыш от обработки будет равен N .

4.2.2.2 Подавление асинхронных импульсных помех посредством накопления сигнала двоичного кода

В отличие от линейного накопления, при (нелинейном) накоплении сигнала двоичного кода, которое также рассматривается в Рекомендации МСЭ-R М.1372, устраняются переменные объемы информации об амплитуде импульса; в предельном случае каждый импульс взвешивается одинаково. Следовательно, при нелинейном накоплении происходит выравнивание весовых коэффициентов для отдельных импульсов отраженных сигналов от реальных целей и для сильных импульсов помех, поэтому происходит существенное ослабление одиночных асинхронных импульсов помехи, даже если они очень сильные. Когерентное накопление обычно бывает линейным, в то время как некогерентное накопление может быть либо линейным, либо нелинейным.

"Накопление сигнала двоичного кода", "последовательное детектирование" или "двухпороговое детектирование" является некогерентным и нелинейным режимом. В этом случае "детектирование" относится к выходу порогового компаратора, который располагается после "детектора огибающей". При последовательном детектировании объединяются выходы пороговых компараторов или "первые детектирования" для каждого элемента разрешения по дальности/углу на интервалах следования отдельных импульсов (PRI) или "развертках". Эти режимы часто называются либо интеграторами, либо корреляторами, хотя они редко когда бывают истинно интеграторами или корреляторами в строго математическом смысле. Отдельные детектирования либо ограничиваются, либо квантуются в простые двоичные числа (ноль или единица). В различных конструкциях используются разные компромиссные решения между обнаружением цели или чувствительностью отслеживания, точностью оценки азимута цели ("центрированием"), а также подавлением обнаружений, вызванных асинхронными импульсами. В некоторых случаях оператор имеет определенную свободу коррекции компромиссных решений путем корректировки рабочих настроек. Резюме характеристик подавления асинхронных импульсов в таких режимах приведено в Рекомендации МСЭ-R М.1372.

Особый интерес представляют двухпороговые интеграторы/детекторы двоичного типа, поскольку они являются особенно мощными средствами противодействия определениям целей, вызванным асинхронными импульсами. Различают два типа двоичных двухпороговых интеграторов/детекторов:

- скользящее окно с использованием критерия "М из N";
- счетчик с верхним и нижним порогами с произвольными правилами счета. Его иногда называют аккумулятором, двоичным интегратором или экспоненциальным интегратором.

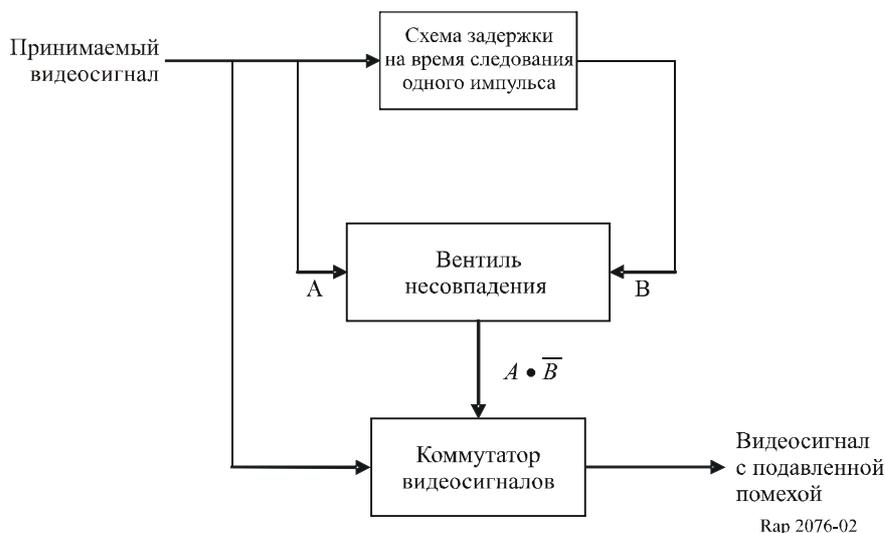
Оба этих метода иногда называют марковскими процессами. Они рассмотрены в Рекомендации МСЭ-R М.1372.

4.2.3 Методы удаления и замены асинхронных импульсов

Возможность удаления одиночных асинхронных импульсов получила признание на протяжении десятилетий, предшествовавших появлению цифровой обработки сигналов. Ранние версии (а также более простые версии, используемые в настоящее время) работают только с амплитудой, не используя фазовую информацию. Простейшей формой, в основном, является двоичный интегратор с использованием критерия "два из двух", как показано на рис. 2. Такие схемы эффективно работают с "нормальным" видеосигналом; т. е. при отсутствии схем селекции движущихся целей (СДЦ).

РИСУНОК 2

Простейшее устройство удаления асинхронных видеоимпульсов



При выполнении обработки методом СДЦ возникает проблема, связанная с тем, что каждый одиночный асинхронный импульс создает несколько синхронных импульсов, и еще больше синхронных импульсов создается при использовании рекурсивных шумоподавителей или подавителей обратной связи, нежели только подавителей прямой связи. Даже при отсутствии обработки методом СДЦ интегратор с обратной связью может привести к той же самой проблеме. Здесь, естественно, представляется возможным использовать два средства:

- удалить асинхронные импульсы до того, как сигнал поступит в схему СДЦ;
- использовать только подавители и интеграторы прямой связи или с конечной импульсной характеристикой.

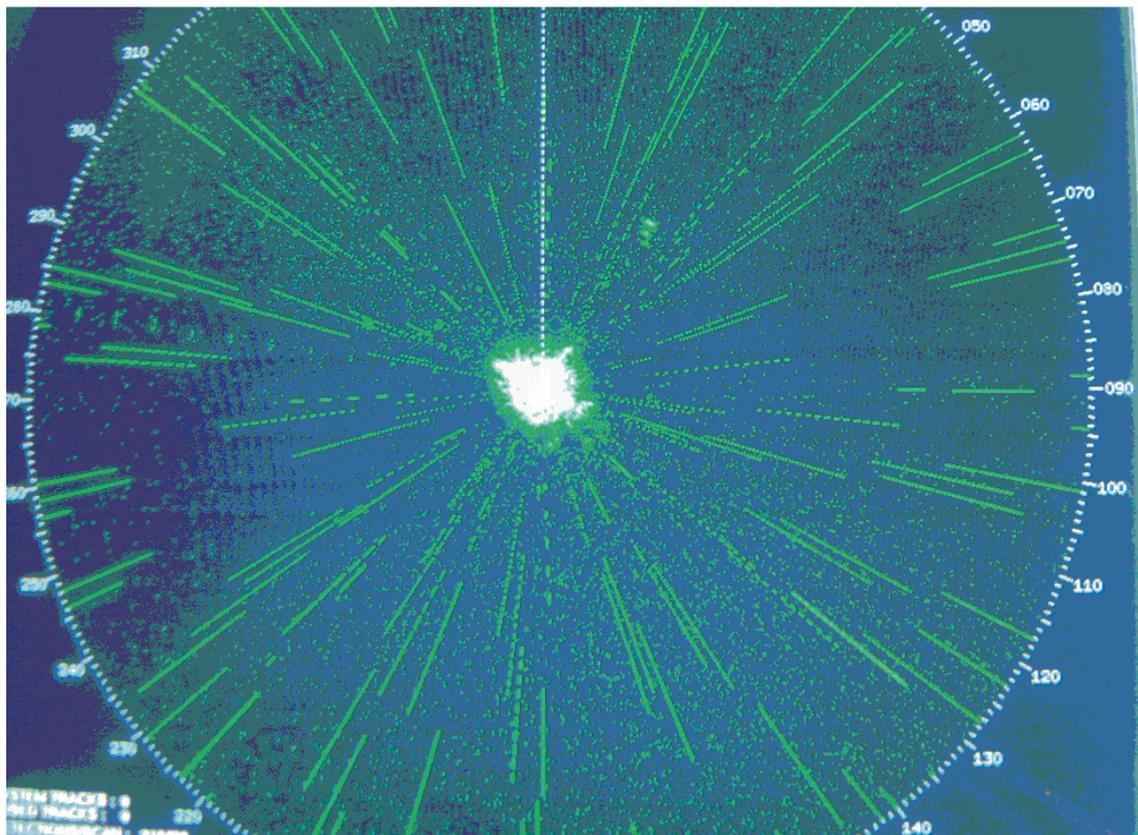
Благодаря развитию возможностей цифровой обработки сигнала, радары научились распознавать в качестве помех отдельные импульсные отсчеты, на основании их несоответствия импульсным отсчетам, принятым до или после них, либо по величине (т. е. мощности), либо по фазе. Это распознавание может быть выполнено до когерентной обработки, такой как фильтрация доплеровских частот или автокорреляция. В этих режимах используется принцип скользящего окна из последовательных отсчетов в одном и том же элементе разрешения по дальности, но при различных PRI, обеспечивающий аппроксимацию значения отсчета, которое должно быть при испытываемом PRI. Ширина окна может составлять приблизительно 8–16 PRI или просто охватывать несколько PRI, при этом точность при оценивании отраженного сигнала от реальной цели будет выше при большей длительности окон опорных данных. В этих режимах происходит сравнение величины или квадрата величины ($I^2 + Q^2$) или отдельных значений отсчетов I и Q для испытываемого PRI ("текущего" PRI) с их аналогами в окне опорных данных. Таким образом, эти методы могут применяться к принимаемым импульсам либо до детектирования (когерентный сигнал), либо после детектирования (некогерентный сигнал). Если отличие достаточно велико, текущее значение отсчета заменяется на получаемое из опорных значений. Поскольку обработка производится с использованием отсчетов "когерентных видеосигналов" I и Q, она может применяться независимо от рабочей полосы. Данные методы используются в некоторых радарх как военного, так и гражданского назначения. Поскольку эти режимы обязательно выполняются до накопления последовательности импульсов, оценки, формируемые на основе опорных отсчетов, а также испытываемый отсчет подвержены изменениям шумов, когда они близки к порогу детектирования, поэтому слабые импульсы помех обычно пропускаются. С другой стороны, эффективность удаления помех постепенно улучшается с увеличением отношения помехи к шуму, поэтому удаление сильных помех становится почти безусловным. Благодаря этому свойству, такие режимы становятся прекрасным дополнением к подавлению слабых асинхронных помех, которое получается за счет линейного накопления последовательности импульсов, например, фильтрации доплеровских частот и последетекторного (некогерентного) накопления.

У одного морского навигационного радара, который может работать в полосе частот 9,3–9,5 ГГц, имеется последетекторный режим, подобный только что описанному. Для каждого элемента

разрешения по дальности в этом режиме устанавливается скользящее окно размером лишь три PRI. Если один из импульсов в этом окне оказывается непропорционально сильным по отношению к двум другим импульсам, то импульс выброса заменяется взвешенным средним значением двух других импульсов. Оператор радара может включать или выключать этот режим подавления помех. Испытания, проведенные на этом радаре, включали применение последовательности импульсов длительностью 10 мс со скважностью 1% без стробирования для имитации модуляции, возникающей при сканировании антенны. На рис. 3 показано, как выглядит индикатор кругового обзора (ИКО) радара при отключенном параметре подавления помех. Каждый импульс помехи создает длинную радиальную линию, соответствующую длительности импульса помехи в 10 мс.

РИСУНОК 3

Импульсная помеха на ИКО морского навигационного радара при отключенном параметре подавления помех

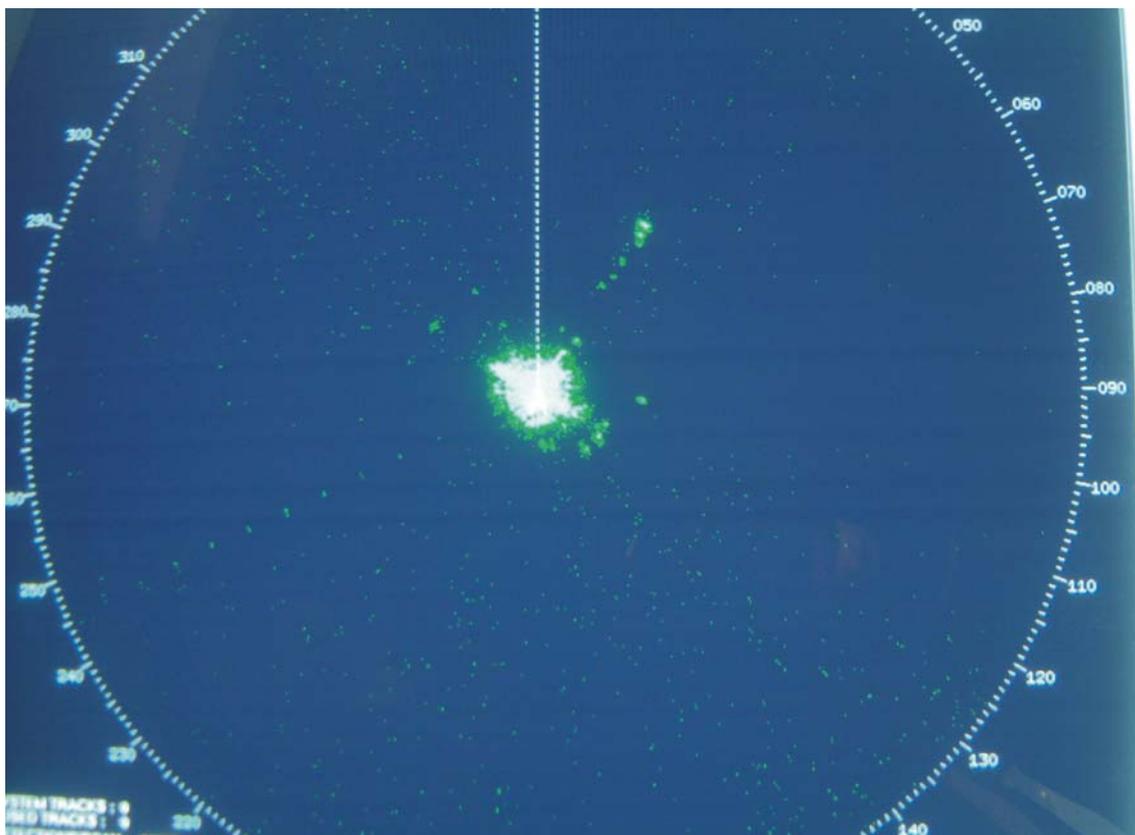


Rap 2076-03

На рис. 4 показано, как выглядит индикатор кругового обзора (ИКО) радара при включенном параметре подавления помех. Отметки помех полностью удалены. За исключением нескольких спеклов, находящихся на большом расстоянии друг от друга, единственными отметками на ИКО являются отраженные сигналы от неподвижных предметов возле испытываемой станции, а также линия отраженных сигналов от цели, специально использованной для имитации, на пеленге порядка 280°.

РИСУНОК 4

Импульсная помеха на ИКО морского навигационного радара при включенном параметре подавления помех



Rap 2076-04

4.2.4 Требования к подавлению асинхронных импульсов и его практическое применение

В Резолюции ИМО установлено, что морские навигационные радары должны предоставлять средства для надлежащего подавления помех от других радаров (а также нежелательных эхосигналов от различных видов мешающих отражений) (Раздел 5.3.2.1 Резолюции ИМО MSC.192(79)). Это положение в точности отражает рекомендации, содержащиеся в стандартах МЭК как для радаров, соответствующих требованиям СОЛАС, так и для радаров, не соответствующих требованиям СОЛАС (IEC 60936 и IEC 62252). Несмотря на то, что все вышеупомянутые факторы вносят вклад в уменьшение помех, даже если это только побочное воздействие, морские навигационные радары обычно оснащаются параметром, предназначенным исключительно для этих целей. Они выполняют то, что в этом сообществе называется "межимпульсной корреляцией", "межразверточной корреляцией" или "межстрочной корреляцией"². В этом параметре обычно используется скользящее окно размером в N последовательных PRI или "разверток" и применяется критерий "М из N" для второго детектирования.

В процессоре для обработки сигнала, продвигаемом на рынке ведущей отраслевой компанией, который предназначен для использования в наземных метеорологических радарах, некоторые из которых могут работать в полосе частот 9,3–9,5 ГГц, имеется додетекторный режим, аналогичный последдетекторному режиму, используемому в морских навигационных радарах. Для каждого элемента разрешения по дальности он устанавливает скользящее окно размером лишь три PRI. При выполнении определенного условия в отношении мощностей этих трех импульсов, векторное значение самого последнего импульса заменяется значением импульса, непосредственно предшествовавшего ему. Разработчик или пользователь радара может выбирать из нескольких различных условий для замены импульса, но основной принцип заключается в том, что помеха, которая появляется в данном элементе разрешения по дальности только один раз из трех PRI может быть заменена на нормальное значение. В связи с тем, что в этом режиме охватывается только три

² В Рекомендации МСЭ-R М.1372 режим скользящего окна на основе критерия "два из двух" называется "дискриминатором ЧСИ".

PRI, он способен заменить помеху при скважности $33^{1/3}\%$, однако этого можно достичь только тогда, когда между частотами следования импульсов помехи и импульсов основного радара существуют совершенно особые отношения. При уменьшении скважности импульсов помехи, допуск на отношения частоты следования импульсов (ЧСИ) источника помех и испытывающего помеху радара становится менее специфическим и более устойчивым.

В метеорологических радарх на борту воздушного судна для предупреждения о неблагоприятных погодных условиях также могут иметься режимы подавления асинхронных импульсов. В стандарте Радиотехнической комиссии по авиации (RTCA) содержится требование к таким радарам подавлять помехи между радарными. Правило гласит, что "при передаче, осуществляемой идентичным радаром, действующим на воздушном судне, которое параллельно сближается с расположенной рядом взлетно-посадочной полосой или следует за оборудованным воздушным судном на расстоянии не более двух морских миль, не должно возникать ложных сигналов тревоги, потери цели или других заметных помех"³.

4.3 Нелинейные и динамические воздействия

4.3.1 Ограничение

Ограничение может выполняться в различных точках приемника/режима. Оно может реализовываться с помощью различных средств и быть либо специальным, либо произвольным. Произвольное ограничение происходит при выходе тракта РЧ и/или ПЧ приемника за пределы линейного режима. В радарх, в которых используется цифровая обработка сигнала, эти схемы включают аналого-цифровой преобразователь.

При ограничении, независимо от его конкретной реализации, наглядно выравниваются амплитуды нежелательных импульсов и импульсов отраженных сигналов от реальных целей, когда один либо оба вида импульсов являются сильными. При этом происходит увеличение способности других режимов, упомянутых в этом документе, существенно ослаблять асинхронные импульсы, которые могут приниматься от радиолокационных радаров.

Ограничители иногда включаются в цепи приемника/процессора для того, чтобы предотвращать обнаружения от сильных мешающих отражений. Раньше было общепринято, что схемы селекции движущихся целей (СДЦ) использовались без надлежащих эффективных режимов CFAR с усреднением по элементам разрешения или карт распределения мешающих отражений, при этом операторам приходилось регулировать уровень ограничения, чтобы предотвращать почти все сигналы ложной тревоги из-за остаточных мешающих отражений. По мере того, как аналого-цифровые преобразователи с широким динамическим диапазоном, а также цифровая обработка сигналов, становятся более доступными, такое использование ограничения сокращается.

Как указано выше, в режимах с сохранением амплитуды чувствительность детектирования увеличивается до максимума, а в режимах с ограничением амплитуды или квантованием происходит динамическая потеря чувствительности при обеспечении существенного ослабления асинхронных импульсов. При наличии ограничителя оператор может иногда менять компромиссное решение, выбирая между оптимизацией чувствительности и защитой от сигналов ложной тревоги, вызванных помехами, за счет снижения уровня ограничения; т. е. за счет более сильного ограничения. Это особенно важно при использовании интегратора с обратной связью, поскольку в режимах с обратной связью из одиночных асинхронных импульсов возникают синхронные импульсы, и поэтому в этих режимах слабые отклики на асинхронные импульсы.

В прошлом в качестве недорогого вида CFAR использовался метод сильного ограничения на большой ширине полосы (Dickie Fix) до фильтрации согласованным фильтром до более узкой ширины полосы. Сильное ограничение также полезно для ослабления воздействия узкополосных импульсов помех, и иногда используется как метод электронного контр-противодействия шумовым ЧМ помехам с качающейся частотой. Однако есть риск, что, если ограничение является обязательным, то, поскольку оно допускает сильные и умеренно сильные сигналы помех, пусть даже расстроенных относительно полезного сигнала, оно приведет к подавлению слабого сигнала. Двоичное накопление, о котором говорилось в п. 4.2.2.2, можно считать видом ограничения, но оно

³ Стандарты на минимальные качественные показатели работы метеорологического радара на борту воздушного судна с возможностью прогнозирования сдвига ветра, Документ № RTCA/DO-220 от 21 сентября 1993 года, RTCA, Inc.

реализуется гораздо дальше в приемнике/процессоре, и, следовательно, не вызывает подавления слабых сигналов.

4.3.2 Логарифмические усилители

Начиная с середины 70-х годов прошлого века почти во всех морских навигационных радарх использовались логарифмические усилители. Использование логарифмических усилителей оказывает воздействие, аналогичное воздействию сильного ограничения, хотя и не такое полное, выражающееся в уменьшении влияния высокой амплитуды отдельного импульса как источника ухудшения качественных показателей. Конечно, эти усилители уменьшают вероятность насыщения приемника сильными импульсами помех. Более того, эти усилители неизбежно являются линейными или квазилинейными при низких уровнях сигнала, однако для достижения наибольшей эффективности при использовании в сочетании со связью по переменному току (или FTS; см. п. 4.2.1.1) для ослабления влияния мешающих отражений от морских волн, переход из области линейного усиления в область логарифмического усиления происходит при уровне примерно на 20 дБ ниже среднего уровня шума [Крони, 1956 г.].

4.3.3 Регулировка чувствительности по времени (STC)

STC представляет собой вид динамического усиления. Это вид специального ослабления чувствительности, которое меняется в пределах каждого PRI или каждой "развертки". Чувствительность приемника или процессора снижается только на время присутствия отраженных сигналов от ближних целей, поскольку эти цели приводят к появлению таких сильных отраженных сигналов, что для их детектирования не требуется максимальная чувствительность приемника. При данной эффективной площади отражения цели STC обычно такова, что при дальностях меньше выбранного значения порог детектирования для отраженного сигнала радара, передаваемого на антенный порт, изменяется со скоростью, вводящей поправку на зависимость между мощностью отраженного сигнала и дальностью цели, имеющую приблизительно обратный биквадратичный характер. (В действительности, выходные сигналы некоторых приемников в основном пропорциональны логарифму амплитуды или мощности принимаемого сигнала. Схема STC, реализованная в секции видеосигнала, осуществляет взвешивание этих откликов с использованием функции усиления, получаемой из экспоненциального затухания). STC помогает подавлять отражение, которое обычно более сильное для ближних мешающих отражений, чем для более дальних отражений, и которое иначе может привести к выходу приемника/процессора за пределы линейной области. Оно также позволяет подавлять обнаружения из-за "ангелов" (вызванных обычно отражениями от птиц) при малой дальности.

Разумеется, STC помогает сократить число обнаружений и их амплитуды, которые также могут быть вызваны импульсами радиолокационных радаров, настолько, что обнаружения будут сводиться к ближним ложным целям. Во многих ситуациях более важным является устранение ближних ложных целей, чем устранение ложных целей, появляющихся при больших дальностях, поскольку ближние цели, в основном, требуют принятия более срочных мер, для того чтобы не допустить столкновений, нежели дальние цели. В морских навигационных радарх STC, реализованная в видеотракте, используется в качестве средства подавления мешающих отражения от морских волн. Радары управления воздушным движением в этой полосе частот также обладают параметром STC.

4.4 Обработка с использованием CFAR

Обзорным радарам слежения за групповыми целями требуется некоторый механизм поддержания частоты обнаружений в разумных границах. Поскольку большинство обнаружений обычно вызваны шумом или отражением, и следовательно, являются сигналами ложной тревоги, такие механизмы называются режимами CFAR. В простейших системах, этот режим может быть в форме ручного управления усилением или порога детектирования. Однако в основном регулировка осуществляется автоматически. Это может быть сделано практически на всеобщей основе; т. е. путем воздействия на широкие сектора углов и большую долю всех дальностей, или же это может быть реализовано при помощи локально адаптивной регулировки порога. В последней категории, методы могут включать автоматическую регулировку усиления, которая усредняется почти по всем дальностям, Dickie Fix, STC и/или комбинацию логарифмического усилителя с FTS или различием импульсов. Локально адаптивные виды CFAR включают составление карт распределения мешающих отражений и особенно местных усредненных и пороговых схем. Карта распределения мешающих отражений представляет собой матрицу уровней сигналов, усредненных по многим сканированиям антенны, для каждого из многих элементов разрешения по дальности/азимуту. Местные усредненные и пороговые схемы, или схемы CFAR с усреднением по элементам разрешения, обеспечивают порог

детектирования, который адаптируется к уровню мешающего отражения (и помехи) в непосредственной близости от каждого элемента разрешения по дальности/доплеровской частоте/азимуту, который испытывается на присутствие цели. Режимы CFAR с местными усредненными и пороговыми схемами действуют путем создания окна, которое сдвигается по дальности (для каждого доплеровского канала, в случае доплеровских радаров) во время каждого PRI. Каждое такое окно накрывает элемент разрешения по дальности, для которого должно приниматься решение об обнаружении, плюс примерно 10–30 соседних элементов разрешения по дальности (обычно половина из них более ближние, а половина – более дальние). В основном, амплитуды сигналов в этих соседних элементах разрешения усреднены, и усредненное значение умножается на коэффициент, равный четырем или восьми, для установления локального порога детектирования. Однако часто используются различные отклонения от этой базовой схемы проекта. Например, элементы разрешения перед испытываемым элементом разрешения могут усредняться отдельно от тех, которые расположены за испытываемым элементом разрешения, и при установлении порога может использоваться большее из двух усредненных значений.

В режимах CFAR с усреднением по элементу разрешения, отдельные элементы разрешения, которые содержат самые сильные сигналы среди соседних элементов разрешения, обычно исключаются при усреднении. Скорее всего это делается отчасти с целью не допустить, чтобы остаточные отраженные сигналы в виде мешающих точечных отражателей чрезмерно поднимали порог детектирования. Однако это также не дает одиночным асинхронным импульсам искажать пороговое значение и создавать неприемлемо высокие пороговые уровни. Этот режим не способствует подавлению ложных целей, вызванных нежелательными импульсами, однако он ослабляет влияние нежелательных импульсов, заключающееся в снижении чувствительности испытываемого помеху радара.

4.5 Воздействие с помощью программного обеспечения (постобработка)

При рассмотрении группирования обнаружений цели по дальности/азимуту также могут использоваться различные алгоритмы с целью принятия решения в отношении того, представляет ли данный кластер или обнаружение реальную цель или нет. (Такие режимы также существенно ослабляют т. н. "ангелов", представляющих в большинстве своем отражения от птиц).

Любой режим обработки типа "сопровождение в процессе сканирования", который соединяет донесения о цели от последовательных сканирований луча антенны и оценивает положения и вектор скоростей целей, также обладает возможностью подавления ложных целей. Такая постобработка является стандартом в радарх управления воздушным движением, и многие морские навигационные радары также обладают параметром корреляции между соседними сканированиями для подавления мешающих отражений от морских волн. Этот параметр обычно связывают с использованием индикаторов с растровой разверткой в отличие от традиционных индикаторов с радиальной разверткой. Изначальное преимущество индикаторов с растровой разверткой заключалось в том, что они гораздо ярче, чем индикаторы с радиальной разверткой, поскольку изображение на их экраны выводится многократно, а не однажды, во время каждого сканирования антенны. Их реализация требует, чтобы данные обнаружения цели от всех элементов разрешения по дальности и азимуту по меньшей мере за одно сканирование антенны удерживались в памяти, прежде чем они будут показаны. В последние годы большие усовершенствования в цифровых схемах памяти сделали использование индикаторов с растровой разверткой экономически целесообразным. Возможности памяти также позволяют хранить данные нескольких сканирований отраженного сигнала радара для всех обнаружений отдельных сканирований и сравнивать данные обнаружения в каждом элементе разрешения по дальности и азимуту с данными обнаружения цели в том же самом элементе разрешения по дальности и азимуту за одно или два предшествующих сканирования, прежде чем выводить их на экран. Если отраженные сигналы классифицируются в двоичной форме (присутствует или отсутствует) или в терминах нескольких уровней, могут применяться привила для получения любого соответствующего уровня яркости, с которым должен выводиться на экран каждый элемент разрешения по дальности и азимуту, в зависимости от сочетания уровней отраженных сигналов в отдельных сканированиях. Такой параметр позволит подсвечивать пиксели, для которых отраженные сигналы появляются постоянно в течение двух или более сканирований. Еще более важным для целей совместимости между радиолокационными радарными и радионавигационными радарными является то, что такой параметр позволяет делать тусклыми или гасить пиксели, в которых видимый отраженный сигнал появляется во время одного сканирования, но отсутствует в последующих одном или двух сканированиях. Даже в навигационных радарх, в которых этот параметр отсутствует, оператор может сделать вывод, представляют ли отклики на дисплее отраженные сигналы реальных целей или нет, путем визуального наблюдения за стабильностью яркости пикселей. При попадании помехи от другого радара через связь бокового лепестка с главным лепестком, обнаружения могут

возникнуть повторно на том же самом пеленге. Однако асинхронные импульсы двух радаров не дадут этим обнаружениям повториться в том же самом элементе разрешения по дальности. Обработка с многократными сканированиями позволит избежать показа таких обнаружений на экране.

4.6 Спектральное воздействие

Среди особых явлений, относящихся к частотам, избирательность приемника и подавление побочного канала приема относятся к числу факторов, способствующих подавлению помехи между радарными, точно также, как при любом другом помеховом взаимодействии. Ожидается, что избирательность приемника позволяет подавлять не менее чем на 60 дБ спектральные компоненты, которые достаточно выходят за пределы полосы пропускания испытывающего помехи приемника. Преимущество от подавления в полосе затухания радионавигационного радара наблюдается в полном объеме только в том случае, если нежелательные компоненты спектра излучения радиолокационных и бортовых измерительных радаров подавляются сопоставимо. В полосах частот 9000–9200 МГц и 9300–9500 МГц, в большинстве радиолокационных радаров будут использоваться передатчики, отличные от электронных СВЧ-приборов М-типа, поэтому шумовые компоненты нежелательных излучений будут относительно малы.

Аналогично, во всех бортовых измерительных радарных, которые предлагается частично использовать в полосах частот 9300–9500 МГц или 9800–10 000 МГц, также будут использоваться передающие устройства, отличные от электронных СВЧ-приборов М-типа. Уровни нежелательных излучений радиолокационных и бортовых измерительных радаров в рассматриваемых полосах частот будут определяться в большей степени фронтами нарастания, спада и элемента перехода с соответствующей паразитной угловой модуляцией, нежели шумами устройства. Спектральная эффективность нескольких выходных устройств передатчика радара описана в Рекомендации МСЭ-R М.1314 "Уменьшение нежелательных излучений радиолокационных систем, работающих в диапазоне выше 400 МГц".

Кроме того, интермодуляция между двумя сигналами обычно бывает менее значимой по отношению к взаимодействию между радарными, чем по отношению к помехе между системами связи, поскольку сигналы передач радара обычно имеют сравнительно низкую скважность. Пересечения между импульсами двух радаров по времени обычно бывают редкими, поскольку мало вероятно, что каждый радар будет излучать импульс, который придет на испытывающий помехи радар одновременно с импульсом другого радара.

В некоторых радиолокационных радарных осуществляется передача длинных импульсов со скважностями, которые низки для систем связи, но высоки для радионавигационных радаров. Однако самые длинные импульсы обычно модулируются сигналами качающейся частоты или с линейной частотной модуляцией, для обеспечения сжатия импульсов в приемнике радиолокационного радара, и качание частоты в таких длинных импульсах обычно гораздо шире, чем полоса пропускания радионавигационных радаров. Даже если качание частоты полностью охватывает полосу пропускания радионавигационного радара, должно иметь место значительное частотнозависимое подавление, при этом мгновенная частота будет качаться между точками, расположенными выше и ниже полосы пропускания. Этот эффект был подтвержден эмпирически на морском навигационном радаре, действующем в полосе частот 9,3–9,5 ГГц, а о результатах было сообщено отдельно. Это уменьшение доли настроенной энергии можно наблюдать несколькими различными способами. Очевидно, средняя спектральная плотность мощности уменьшается за счет расширения полосы частоты. Более практичный способ оценки эффекта уменьшения доли настроенной энергии заключается в понимании того, что эффективная ширина импульса, т. е. ширина импульсов, которые возникают в секции ПЧ радионавигационного радара, часто гораздо меньше, чем ширина передаваемого импульса радиолокационного радара. Это сокращение ширины импульса может быть обеспечено за счет хорошей конструкции радиолокационных радаров и радаров ССИЗ/СКИ. Таким образом, обрезание по частоте в приемнике радионавигационной системы преобразуется в обрезание по времени. Если скорость качания частоты превышает квадрат ширины полосы пропускания по ПЧ радара, испытывающего помеху, то эффективная ширина импульса (на выходе усилителя ПЧ) определяется длительностью импульсной характеристики, однако амплитуда принимаемого импульса ослабляется относительно амплитуды импульса, принятого антенной, испытывающей помеху. В этом случае, мощность, соответствующая пиковой чувствительности, становится обратно пропорциональной скорости качания. Это, безусловно, также способствует ослаблению влияния помехи.

Частотное разнесение и быстрая перестройка частоты используются во многих радарх, особенно в воздушных радионавигационных радарх. Использование быстрой перестройки частоты снижает риск того, что излучения одного радара будут постоянно перекрывать полосу пропускания по приему другого радара.

5 Выводы

Взаимной совместимости между радиолокационными радарми и радионавигационными радарми способствует, прежде всего, сканирование между лучами их антенн, потому что нежелательная энергия редко принимается за счет связи главного лепестка с боковым лепестком, и еще реже за счет связи главного лепестка с главным лепестком.

Более важно, что различия между скоростями сканирования радиолокационных радаров и радионавигационных радаров предотвращают повторения помех через главный лепесток источника на одном и том же пеленге, испытывающем помехи, тем самым уменьшая любой риск корреляции между сканированиями для мешающих сигналов ложной тревоги, которые могут возникать. Существенное дополнительное ослабление влияния обеспечивается за счет различий между формами сигналов этих двух типов радаров и соответствующего подавления нежелательных импульсов за счет фильтрации и обработки сигналов в приемнике. В некоторых радарх, последнее включает когерентную (додетекторную) обработку, а также некогерентную (последетекторную) обработку. В других навигационных радарх, когерентная обработка практически или полностью отсутствует, однако некогерентная обработка потенциально весьма эффективна для улучшения совместимости между радиолокационными и радионавигационными радарми.

К помехам, создаваемых радаром любых типов, от несканирующих связных передатчиков с непрерывным излучением, использующих шумоподобные сигналы, практически никакие из этих механизмов не применяются.

Справочные документы

SKOLNIK, M.I. (Ed.) [1990] *Radar Handbook*, McGraw-Hill.

MAISEL, L. [March 1968] Performance of sidelobe blanking systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Systems*, Vol. AES-4, 2, p. 174-180.

TRUNK, G.V. [1990] *Automatic detection, tracking and sensor integration*, Chapter 8 in M.I/ Skolnik (Ed.) *Radar Handbook*, 2nd edition, McGraw-Hill.

CRONEY, J. [April 1956] Clutter on radar displays. *Wireless Engineer*, Vol. 33, p. 83-96.
