



УДК 621.396  
ББК 32.95

## РАДИОЛОКАЦИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А.Ю. Гордеев, В.В. Яцышен*

Рассмотрена классификация пассивных помех и объектов, их создающих. Рассмотрены основные типы таких объектов и их особенности. Кратко описываются наиболее распространенные способы с пассивными коррелированными помехами и причины их недостаточной эффективности. Предлагается новая методика селекции целей на основе анализа рассеянного этими целями поляризованного специальным образом излучения. Приводятся результаты расчетов степени поляризации и сечений рассеяния, экстинкции и обратного рассеяния для двух вытянутых сфероидов одинаковой формы, но с разными комплексными коэффициентами преломления.

*Ключевые слова:* СДЦ, ЭПР-цели, линзовый отражатель, линза Люнеберга, дипольный отражатель, степень поляризации, рассеяние, экстинкция.

Борьба с пассивными помехами стала в ряд первоочередных задач радиолокации с момента появления самой радиолокации. В настоящее время борьба с пассивными помехами является, возможно, самой актуальной проблемой, для решения которой разрабатываются и внедряются в современные РЛС различные методы и технологии. Эти методы и технологии применяются с различной степенью эффективности в зависимости от типов помех и способов их постановки. Имеющийся в РЛС блок анализа помеховой обстановки производит обработку выборки отсчетов принимаемого сигнала, на основе которой делается заключение о текущей помеховой обстановке, о присутствии во входной выборке информации о полезных целях и, соответственно, об эффективности текущего режима зондирования или необходимости его перестройки. Анализ пассивных помех производится на всей рабочей дистанции, как правило, при измерении межпериодного коэффициента корреляции эхо-сигналов.

Классификация всех помех, в том числе и активных, традиционно производится по следующим признакам: по спектральной мощности плотности (прицельная или заградительная), по протяженности (дискретная или протяженная по дальности) и по коэффициенту корреляции (коррелированная или некоррелированная) [1].

Наибольшую сложность при анализе текущей помеховой обстановки создают дискретные коррелированные помехи (ангелы). При большом количестве подобных мешающих сигналов анализатор помеховой обстановки в большинстве современных РЛС классифицирует каждый целеподобный объект по скоростному признаку. При этом наиболее сложная процедура, выполняемая анализатором помех, – это оценка параметров помех.

Однако прежде чем перейти к рассмотрению предлагаемых методов оценивания пассивных помех, следует остановиться на самой природе пассивных помех и на их энергетических особенностях. Пассивные помехи по своему происхождению можно условно разделить на естественные и организованные (умышленные).

К естественным пассивным помехам относятся мешающие отражения от подсти-

лающей поверхности земли, морской поверхности, местных предметов, гидрометеоров и т. д. Организованные пассивные помехи – это мешающие отражения от дипольных отражателей, металлизированных лент и различного рода искусственные отражателей.

Основной характеристикой как реальных радиолокационных целей, так и ложных целей, создающих пассивные помехи, является эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели и закон ее распределения. ЭПР характеризует отражающие свойства цели. Объекты, создающие пассивные помехи, как правило, имеют значительную эффективную площадь рассеяния и соответственно затрудняют обнаружение реальных целей на своем фоне. В дальнейшем для упрощения записи будем считать пассивными организованными помехами не только сами сигналы от искусственных ложных отражателей, но и сами эти объекты (в некоторых работах по радиотехнике встречается такая трактовка пассивных помех, хотя, строго говоря, она не является физически корректной).

При постановке помех условие подавления РЛС может быть записано следующим образом:

$$k_d > \frac{\sigma_{лп}}{\sigma_c},$$

где  $\hat{\sigma}_{лп}$  – среднее значение эффективной площади рассеяния пассивных помех, расположенных в элементарном разрешаемом объеме;  $\hat{\sigma}_c$  – среднее значение эффективной площади рассеяния цели;  $k_d$  – коэффициент подавления системы СДЦ, при котором цель еще может быть обнаружена. Для типичного для

современных РЛС сантиметрового диапазона волн  $\hat{\sigma}_c$  имеет следующие типичные значения: реактивный истребитель – 5–10 м<sup>2</sup>, реактивный бомбардировщик – 15–25 м<sup>2</sup> (у бомбардировщика В-52 – около 100 м<sup>2</sup>), истребитель типа «стелс» – 0,025–0,035 м<sup>2</sup>, пассажирский авиалайнер – 20–25 м<sup>2</sup>, крылатая ракета – 0,3–0,8 м<sup>2</sup>, катер ~ 100 м<sup>2</sup>, рыболовецкое судно – 700–800 м<sup>2</sup>. По сравнению с ЭПР реальных целей ЭПР помех имеет значительно большую величину, сопоставимую разве что с ЭПР судов. В качестве пассивных помех с большими значениями ЭПР в основном применяют уголковые, линзовые отражатели и пачки дипольных отражателей.

Уголковый отражатель имеет вид, показанный на рисунке 1 [3].

Его главной особенностью является то, что значительная доля энергии волны, падающей на него с любого направления в пределах достаточно большого угла (около 80°), отражается обратно в сторону облучающей РЛС. Благодаря этому уголковые отражатели даже при небольших размерах имеют значительную эффективную площадь рассеяния. Формула для ЭПР наиболее часто используемого уголкового отражателя, образованного тремя плоскостями:

$$\sigma_m = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4,$$

где  $a$  – размер ребра, а  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения. Аналогичная формула для уголкового отражателя, образованного четырьмя плоскостями имеет вид:

$$\sigma_m = \frac{4\pi}{\lambda^2} (3a^4).$$

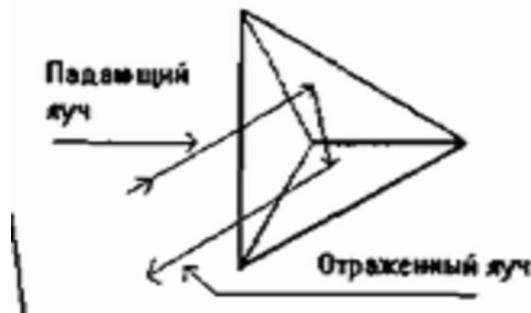


Рис. 1. Уголковый отражатель

В частности, ЭПР одного трехгранного углового отражателя с размерами граней  $a = 0,5$  м и длиной волны РЛС  $\lambda = 3$  см составляет величину  $\hat{\sigma} = 290$  м<sup>2</sup>, что, как видно из приведенных выше значений ЭПР реальных целей, превышает ЭПР не только всех возможных воздушных объектов, но даже соответствующее значение для катера. Для достижения большей эффективности угловые отражатели объединяют в группы по 8 штук. Они образуют объекты, напоминающие по виду октаэдр. При использовании нескольких таких объектов на экране радара создаются большие засвеченные области, в пределах которых может быть спрятана реальная цель, и наведение огневых средств ПВО на нее становится крайне затруднительным или вообще невозможным. Аналогичный эффект создают и линзовые отражатели.

Линзовые отражатели создаются на основе линз Люнеберга. Эта линза представляет собой многослойный шар с различными значениями диэлектрической проницаемости слоев и, соответственно, их коэффициентов преломления. Как правило, коэффициент преломления внутри линзы изменяется по градиентному закону таким образом, что падающие в достаточно большом диапазоне углов параллельные пучки зондирующих лучей РЛС фокусируются в какой-либо одной точке в пределах некоторой области внутренней поверхности шара, покрытой радиоотражательной пленкой-экраном. Принцип действия линзы Люнеберга показан на рисунке 2.

Ширина диаграммы рассеяния линзы зависит от размеров экранирующей поверхности сферы и достигает 140°. ЭПР линзового отражателя с диаметром  $d = 60$  см и мас-

сой  $m = 40$  кг при облучении с длиной волны  $\lambda = 10$  см составляет величину  $\hat{\sigma} > 150$  м<sup>2</sup>, а при  $\lambda = 3$  см –  $\hat{\sigma} \approx 1800$  м<sup>2</sup>, что превосходит ЭПР всех указанных выше воздушных и малых надводных кораблей и сравнима с ЭПР небольшого современного боевого корабля. Максимальная же достижимая ЭПР сферической линзы Люнеберга определяется как

$$\sigma_m = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2},$$

где  $a$  – радиус линзы, а  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения.

Из всего вышесказанного следует, что линзы Люнеберга также создают на экране радара большие области засветки, в которых могут замаскировать даже группу из нескольких крупных боевых самолетов.

Однако чаще всего для маскировки воздушных объектов применяют дипольные радиоотражатели (диполи). Они представляют собой полоски металлизированной бумаги или алюминиевой фольги, металлизированные стеклянные или нейлоновые волокна, разбрасываемые в зоне расположения защищаемого объекта. Длина и толщина диполей выбираются так, чтобы обеспечить эффективное отражение и рассеивание радиоволн в как можно более широком диапазоне частот. Диполи в виде металлизированных стекловолокон имеют обычно длину 35–40 см и толщину 0,025 мм, в случае использования простой медной проволоки она нарезается на куски длиной около 50 см. Как правило, при расчете маскирующей способности дипольных отражателей следует учитывать, что длина диполя  $l$  должна быть согласована с рабочей длиной волны подавляемой РЛС  $\lambda$ :  $l = \xi\lambda/2$ , где  $\xi$  – коэффициент укорочения, обычно равный 0,9.

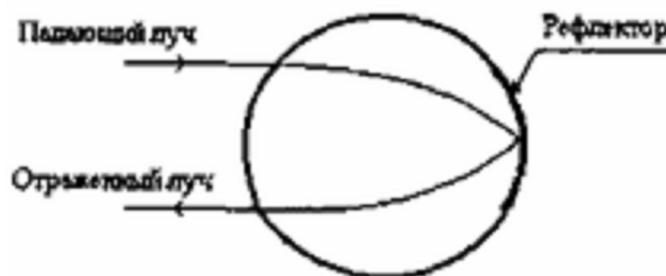


Рис. 2. Ход луча в линзе Люнеберга

Эффективная площадь рассеяния одного отражателя определяется по формулам: максимальное значение:

$$\hat{i}_{max} = 0,86\text{дБ}^2,$$

среднее значение ЭПР одного диполя:

$$\hat{i}_{max} = 0,17\text{дБ}^2.$$

Среднее значение ЭПР любой пассивной помехи (не только диполей и рассмотренных выше отражателей) определяется как сумма средних значений всех элементарных отражателей, попадающих в элемент разрешения РЛС.

Дипольные отражатели обычно упаковываются в пачки из десятков и сотен тысяч штук и при сбрасывании с самолета в воздух создают облако медленно спускающихся отражателей. Отраженные от диполей сигналы наблюдаются на экране индикатора РЛС в виде множества ярких точек, маскирующих отраженный от самолета сигнал. Для формирования непрерывных областей маскирования дипольными отражателями необходимо сбрасывать их с определенной периодичностью. Сброс осуществляется стандартными пачками. Соответственно поэтому интенсивность постановки пассивных помех в виде дипольных отражателей часто характеризуют числом сброшенных пачек диполей на 100 м пути постановщика пассивных помех.

Как уже упоминалось выше, основным средством борьбы с подобными помехами в подавляющем большинстве современных СДЦ являются череспериодные компенсаторы (ЧПК), использующие разность в доплеровских скоростях реальных целей и пассивных помех и подавляющие эхо-сигналы от низкоскоростных объектов (в простейшем случае неподвижных) и объектов, соответствующих слепым скоростям. Тем не менее, в случае большой скорости цели и ее малого маневрирования в первые мгновения постановки помех селекция этой цели на их фоне с использованием традиционных ЧПК является крайне затруднительной или совсем невыполнимой задачей. Для улучшения характеристик современных систем СДЦ по выделению полезных целей на фоне ангелов (ложных эхо-сигналов, напоминающих отклики от реальных целей) в этих системах, как правило, приме-

няются адаптивные компенсаторы, адаптивные фильтры и т. д., использующие разницу в корреляционных и прочих свойствах классифицированных (то есть содержащих только шум и помеховые значения) и неклассифицированных (содержащих еще и значения откликов от реальных целей) выборок наблюдений. Однако даже самые современные адаптивные системы СДЦ не способны подавить множественные дискретные коррелированные помехи и позволить помеховым анализаторам дать верную оценку текущей оперативно-тактической обстановке, не позволяя всей системе ПВО адекватно и четко реагировать на реальные цели. За последние 20–25 лет не было сделано никакого существенного прорыва в развитии систем СДЦ, поскольку основой их работы традиционно является разделение всех целей по доплеровским скоростям, и использование в достаточном количестве даже самых обычных дипольных отражателей очень часто создает для РЛС обнаружения крайне сложную проблему. Это подтверждается как опытом боевых действий на Фолклендских островах в 1982 г., так и результатами испытаний новейших отечественных ЗРК в конце 2000-х годов.

Кроме того, для подавления систем СДЦ, разделяющих цели по скоростному признаку, в США была разработана управляемая ложная цель, напоминающая ракету класса «воздух – земля», которая имитирует радиолокационную сигнатуру и профиль полета боевого самолета. Эта цель называется имитатором типа MALD (MALD-J; см. рис. 3 [4; 5]). В настоящее время неизвестны подробные характеристики объектов этого типа. Однако, по заявлениям американского военного ведомства, имитаторы типа MALD способны при облучении создать радиолокационный портрет, весьма похожий на радиолокационный портрет современного истребителя даже при использовании в РЛС современных адаптивных СДЦ и систем распознавания образов на основе нейросетей и вейвлет-анализаторов.

Таким образом, исходя из всего сказанного, можно сделать вывод, что выделение реальных целей на фоне большого количества пассивных помех на основе анализа частотно-временных характеристик принимаемых эхо-сигналов и их корреляционных свойств при



Рис. 3. Имитатор цели типа MALD (MALD-J)

почти 180-градусном рассеянии зачастую неэффективно. Поскольку все отражатели, как уголковые, так и линзовые, и дипольные, и даже имитаторы типа MALD, предназначены для создания значительных помех в направлении облучения, логичным решением задачи селекции целей может служить исследование не отраженных, а рассеянных эхосигналов. Это требование, правда, создает некоторые технические сложности, так как возникает необходимость в существенном пространственном разнесении излучающей и приемной антенн. Однако при организации дивизионной, армейской ПВО, ПВО страны и в прочих случаях это вполне решаемая задача. Поскольку в основе принципов работы всех видов пассивных помех лежат принципы геометрической оптики, то исследование электрических характеристик рассеянных различными объектами зондирующих радиоволн, в частности поляризации, и, соответственно, анализ матриц рассеяния всех идентифицируемых объектов позволят получить не меньше информации о реальных целях, чем при изучении радиолокационных портретов этих объектов.

Для оценки преимущества использования поляризованных электромагнитных волн в радиолокации объектов, создающих пассивные помехи, мы провели расчет характеристик рассеянного электромагнитного излучения для вытянутого сфероида со следующими параметрами:

-  $a$  – длина полуоси сфероида в горизонтальной плоскости;

-  $e = b/a$  – отношение полуосей сфероида;

-  $N = n + jk$  – комплексный показатель преломления частицы.

Расчет проводился для частиц при двух различных значениях комплексного показателя преломления вещества  $N_1$  и  $N_2$ , соответственно мнимые и действительные части их были  $n_1 = 1,394$ ,  $\kappa_1 = 2,5$  и  $n_2 = 1,394$ ,  $\kappa_2 = 2,5$ . Рассчитывались степень поляризации рассеянного поля как функция угла рассеяния  $\tilde{\gamma}$  и сечения рассеяния  $Q_s$ , экстинкции  $Q_e$  и обратного рассеяния  $Q_b$ . Степень поляризации рассеянного поля вычислялась по классической формуле:

$$p = \frac{I_{\tilde{\alpha}} - I_{\parallel}}{I_{\tilde{\alpha}} + I_{\parallel}},$$

где  $I_{\tilde{\alpha}}$  – интенсивность рассеянного поля при вертикальной поляризации падающего поля,  $I_{\parallel}$  – интенсивность рассеянного поля при горизонтальной поляризации падающего поля. Результаты расчетов  $p$  и  $Q$  для обоих комплексных коэффициентов преломления показаны на рисунках 4 и 5 соответственно.

Значения длины волны излучения  $\tilde{\gamma}$  и радиуса частицы  $a$  были выбраны нами таким образом, чтобы дифракционные явления были особенно выражены (то есть  $\tilde{\gamma} \sim a$ ):  $\tilde{\gamma} = 2,5 \mu$ ,  $a = 3,5 \mu$ ,  $e = 5$ . Из приведенных графиков видно, что поляризация является весьма чувствительным параметром, позволяющим более глубоко описывать характер рассеянного поля в области сильного проявления дифракционных эффектов. Это будет положено в основу разра-

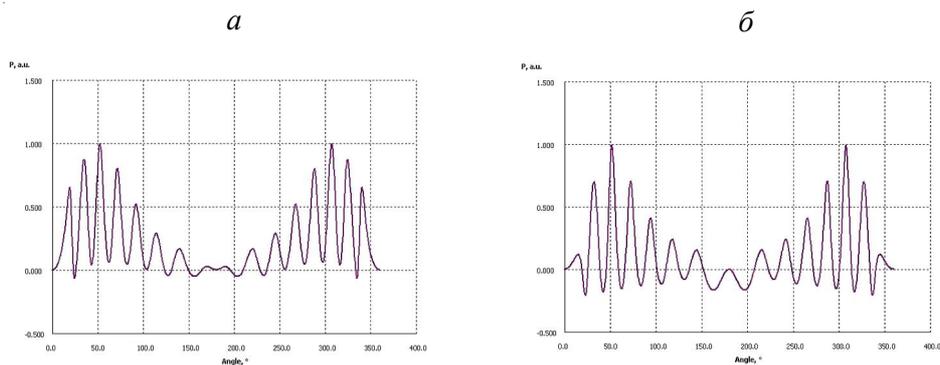


Рис. 4. Степень поляризации  $p$ , рассчитанная для сферидов с показателями преломления  $N_1$  (а) и  $N_2$  (б)

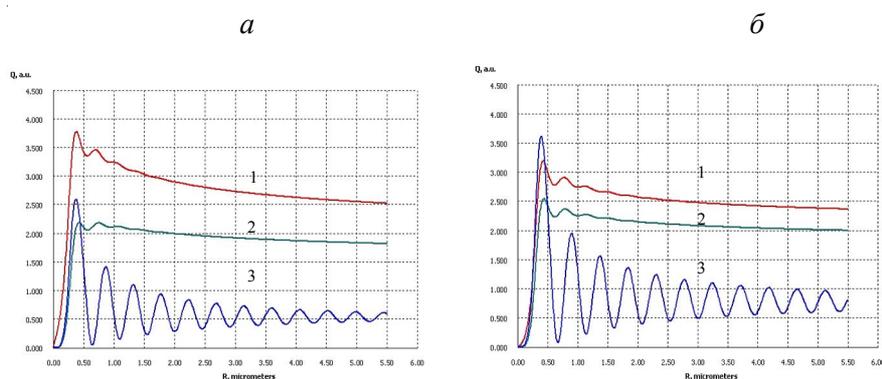


Рис. 5. Сечения рассеяния  $Q_s$  (кривая 2), экстинкции  $Q_e$  (кривая 1) и обратного рассеяния  $Q_b$  (кривая 3) для сферидов с показателями преломления  $N_1$  (а) и  $N_2$  (б)

батываемого метода поляризационной радиолокации объектов, создающих пассивные помехи, с использованием рассеянного излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартнев, В. Г. Радиотехнические системы управления РЛС / В. Г. Бартнев, А. А. Таныгин. – М. : Изд-во МИРЭА, 2011. – 182 с.
2. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами : пер. с англ. / К. Борен, Д. Хафмен. – М. : Мир, 1986. – 664 с.
3. Средства противодействия радиолокационному и гидроакустическому наблюдению

[Electronic resource] // Информационная безопасность. – Mode of access: [http://simetronn.net78.net/?Razdel\\_III\\_Tehnicheskie\\_osnovy:Glava\\_22\\_Sredstva\\_protivodeistviya\\_nablyudeniyu:22.2.\\_Sredstva\\_protivodeistviya.html](http://simetronn.net78.net/?Razdel_III_Tehnicheskie_osnovy:Glava_22_Sredstva_protivodeistviya_nablyudeniyu:22.2._Sredstva_protivodeistviya.html) (date of access: 15.03.2012).

4. MALD-J – новая защита боевых самолетов США // Военное обозрение : сетевой журн., 2011 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://topwar.ru/6752-mald-j-novaya-zaschita-boevyh-samoletov-ssha.html> (date of access: 15.03.2012).

5. MALD-J Radar-Jamming Decoy Missile Launched // Armed Forces International News, 2011 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.armedforces-int.com/news/mald-j-radar-jamming-decoy-missile-launched.html> (date of access: 15.03.2012).

## **RADAR IN THE PRESENCE OF PASSIVE INTERFERENCE WITH POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVES AND ANALYSIS OF SCATTERED RADIATION**

*A. Yu. Gordeev, V.V. Yatsyshen*

The overview of the existing types of objects for discrete correlated interference creation is provided in the present paper. It discusses not only every object features and efficiency of angel clutter making, but considers the generally accepted classification of such clutter and terms for the modern radars' MTI systems suppression. At the same time the conventional objects for the correlative interference creation such as angle reflectors, Luneberg lenses and dipole scatterers as well as latest target simulators MALD-J are described in the paper. The legacy and the most widespread correlated interference suppression and moving targets selection devices and techniques are also referred to in the article and in addition their insufficient effectiveness are pointed for the filtering of the interference in same range discrete as the signal from real target. As an alternative the target selection technology based on the analysis of the scattered by these targets probing radiation and first of all its polarization characteristics is proposed. As an example confirming such approach implementation relevance the results of theoretical calculations of scattered electromagnetic radiation polarization degrees and scattering cross-sections for the simulating interfering objects prolate spheroids with two different complex refraction indexes are provided.

**Key words:** *moving target selection, scattering cross section, lens reflector, Luneberg lens, dipole reflector, polarization index, scattering, extinction.*