

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*Б. А. НИКОЛЬСКИЙ*

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ЗАЩИТЫ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Часть 2

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Самара  
Издательство СГАУ  
2007

УДК 621.396.6(075)

ББК 39.5

Н64

Рецензенты:     вед. спец. ФГУП «НИИ Экран» В. Г. Белозёров,  
                      канд. техн. наук, доц. А. И. Махов

**Никольский Б. А.**

Н64     **Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов.** Ч. 2 : учеб. пособие / Б. А. Никольский. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 79 с. : ил.

**ISBN 978-5-7883-0545-5**

Вторая часть учебного пособия является продолжением материала, изложенного в первой части, и посвящена методам и средствам создания пассивных помех. Рассмотрены методы создания пассивных помех за счёт отражений зондирующих сигналов подавляемых РЛС от искусственно создаваемых отражателей, изменения свойств среды распространения радиоволн, изменения отражающих свойств объектов защиты и др.

В пособии также рассмотрены вопросы комплексирования активных и пассивных помех, перспективы развития и совершенствования средств радиоэлектронной защиты объектов и ряд других вопросов. Главное внимание в пособии уделено физической стороне рассматриваемых явлений и процессов.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям: 210302 – «Радиотехника»; 210201 – «Проектирование и технология РЭС»; 210305 – «Средства радиоэлектронной борьбы».

Разработано на кафедре «Радиотехнические устройства».

УДК 621.396.6(075)

ББК 39.5

**ISBN 978-5-7883-0545-5**

© Никольский Б. А., 2007

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список условных сокращений.....	4
Введение .....	5
1. Дипольные отражатели .....	7
1.1. Общие положения .....	7
1.2. Формирование облаков дипольных отражателей.....	8
1.3. Формирование полос дипольных отражателей.....	13
2. Ложные цели .....	17
2.1. Общие положения .....	17
2.2. Сбрасываемые ловушки.....	18
2.3. Буксируемые ловушки .....	21
2.4. Дистанционно пилотируемые летательные аппараты.....	26
2.5. Энергетические характеристики ложных целей.....	28
3. Пассивные переизлучатели.....	32
3.1. Общие положения .....	32
3.2. Угловые отражатели.....	33
3.3. Линзы Лüneберга .....	36
3.4. Переизлучающие антенные решетки.....	39
4. Методы снижения эффективной поверхности рассеяния объектов.....	42
4.1. Общие положения .....	42
4.2. Выбор малоотражающих форм объектов.....	43
4.3. Применение противорадиолокационных покрытий.....	46
4.2.1. Поглощающие покрытия.....	47
4.2.2. Интерференционные покрытия .....	49
5. Изменение свойств среды распространения электромагнитных волн.....	52
5.1. Ионизирующие излучения.....	52
5.2. Аэрозольные образования .....	56
6. Комплексирование активных и пассивных методов радиоподавления.....	59
6.1. Общие положения .....	59
6.2. Перенацеливание на подстилающую поверхность.....	60
6.3. Перенацеливание на облака и полосы дипольных отражателей.....	69
7. Перспективы развития средств радиоэлектронного подавления .....	72
Библиографический список .....	78

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВЧЛ – высокочастотная линия  
ГСН – головка самонаведения  
Д – диполь  
ДПЛА – дистанционно пилотируемый летательный аппарат  
КП – командный пункт  
Л – ловушка  
ЛА – летательный аппарат  
ЛЦ – ложная цель  
ОД – облако дипольных отражателей  
ПВО – противовоздушная оборона  
Р – ракета  
РЛС – радиолокационная станция  
РЛС ПЦ – радиолокационная станция подсвета цели  
РС – реактивная струя  
РСН – равноточное направление  
РТВ – расчётная точка встречи  
РТС – радиотехническая система  
РЭБ – радиоэлектронная борьба  
РЭП – радиоэлектронное подавление  
РЭС – радиоэлектронное средство  
СВЧ – сверхвысокая частота  
СДЦ – селекция движущихся целей  
УО – уголкового отражателя  
ФАР – фазированная антенная решётка  
Ц – цель  
Э – экран  
ЭВМ – электронно-вычислительная машина  
ЭД – электродвигатель  
ЭМВ – электромагнитная волна  
ЭПР – эффективная поверхность рассеяния  
ЭЦ – энергетический центр

## ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть учебного пособия «Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов», являющаяся продолжением материала, изложенного в первой части [4], посвящена методам и средствам создания пассивных помех.

Пассивные умышленные помехи создаются за счёт отражений зондирующих сигналов подавляемых РЛС от искусственно создаваемых отражателей, изменения свойств среды распространения радиоволн, изменения отражающих свойств объектов защиты и ряда других способов.

Отражателем электромагнитных волн может быть любой объект с электрическими параметрами, отличными от параметров окружающей среды. Падая на объект, электромагнитные волны наводят в нём электрические токи (в проводниках) или электрические заряды (в диэлектриках). Облучаемый объект в этом случае становится вторичным излучателем волн, создающим пассивные помехи. Интенсивность вторичного излучения зависит от размеров, конфигурации объекта, его ориентации в пространстве, от электрических свойств материала, из которого он изготовлен, и других параметров.

Изменение свойств среды распространения радиоволн можно осуществить созданием искусственных ионизированных областей, изменяющих электродинамические свойства атмосферы. Такие области могут создаваться при высотных ядерных взрывах, вызывающих ионизацию газов атмосферы, а также от действия раскалённых газов, выбрасываемых работающими реактивными двигателями. Плазменные образования могут также возникать при вхождении баллистических ракет в плотные слои атмосферы.

Другим средством, изменяющим свойства среды распространения радиоволн, являются аэрозольные образования.

Они представляют собой взвешенные в газообразной среде мельчайшие частицы различных веществ, которые в зависимости от размеров и агрегатного состояния образуют дым, пыль или туман.

Изменение отражающих свойств объектов защиты осуществляется применением противорадиолокационных покрытий, выбором оптимальной формы защищаемого объекта с малыми радиусами кривизны поверхности и отсутствием резких изломов поверхностей, применением не отражающих конструктивных материалов и другими мерами.

В пособии также рассмотрены вопросы комплексирования активных и пассивных помех, перспективы развития и совершенствования средств радиоэлектронной защиты объектов и ряд других вопросов.

Главное внимание в пособии уделено физической стороне рассматриваемых явлений и процессов.

Автор выражает искреннюю благодарность ведущему специалисту ФГУП «НИИ Экран» В. Г. Белозёрову и кандидату технических наук, доценту А. И. Махову за труд по рецензированию пособия.

# 1. ДИПОЛЬНЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ

## 1.1. Общие положения

При создании пассивных помех в качестве искусственных отражателей широко применяют полуволновые вибраторы (диполи). Изготавливают диполи из металлизированной бумаги, металлизированного стекловолокна, алюминиевой фольги, нейлонового волокна, покрытого серебром, и других материалов. Их длину и толщину выбирают такими, чтобы обеспечить наиболее эффективное отражение радиоволн при наименьших размерах.

Физически всякий отражающий радиоволны объект представляет собой источник вторичного излучения. Свойства объекта как вторичного излучателя характеризуют коэффициентом, называемым эффективной площадью рассеяния.

Эффективной площадью рассеяния (ЭПР) объекта называют площадь поперечного сечения такого воображаемого объекта, который рассеивает всю падающую на него энергию изотропно, т. е. равномерно во всех направлениях, но при этом создаёт на входе приёмника такой же сигнал, как и реальный объект.

Величина ЭПР зависит от длины волны сигналов облучения, физико-химических свойств и геометрических размеров объектов, направления облучения и приёма отражённых сигналов и ряда других факторов.

Максимальное значение ЭПР имеют диполи с длиной, при которой осуществляется резонансное отражение [10]. Длина таких диполей близка к половине длины волны подавляемой РТС  $\lambda$  или кратна нечётному числу полуволн

$$d = (2n + 1) \lambda / 2; n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

Дипольные отражатели успешно применялись во время боевых операций второй мировой войны. Изготавливали диполи из отрезков ленточной алюминиевой фольги размером несколько меньше половины длины волны. Общий вес фольги, сброшенной над Европой, составил несколько десятков тысяч тонн. Эффективность

помех, создаваемых облаками дипольных отражателей, была весьма высокой. В первый период их применения потери авиации союзников антигитлеровской коалиции снизились примерно в четыре раза [7].

Толщина диполей зависит от глубины проникновения тока в проводящем слое материала, которая в свою очередь определяется скин-эффектом и зависит от частоты сигналов облучения. Чем выше частота сигналов, тем меньше толщина рабочего поверхностного слоя. Это позволяет выполнять диполи толщиной в несколько микрометров. В табл. 1.1 приведены данные о глубине проникновения тока в алюминиевом проводнике в зависимости от частоты проходящего тока.

Таблица 1.1

Частота (длина волны)	Толщина проводящего слоя
100 кГц; $\lambda = 3000$ м	0,2 мм
1 МГц; $\lambda = 300$ м	0,06 мм
100 МГц; $\lambda = 3$ м	0,006 мм
3 ГГц $\lambda = 0,1$ м	0,001 мм

При более высоких частотах толщина проводящего слоя составляет доли микрометра. Практически толщина дипольных отражателей определяется их прочностью и технологичностью изготовления.

### 1.2. Формирование облаков дипольных отражателей

Диполи комплектуют в пачки, которые сбрасываются с помощью автоматов и рассеиваются в атмосфере. Число диполей в пачке, в зависимости от диапазона длин волн облучающих РЛС, может составлять от нескольких десятков тысяч до миллионов.

Для воздействия на относительно низкочастотные системы отражающее облако формируют из металлизированных полосок стек-



оловолокну в виде лент. Эти длинные, очень лёгкие проводники рассеиваются так, чтобы образовать облако в виде гигантской паутины.

Важной характеристикой таких помех является скорость разворачивания облака дипольных отражателей. Для увеличения этой скорости в пачки иногда закладывают специальные пиропатроны.

Для предотвращения слипания диполей (вследствие образования зарядов статического электричества) на диполи наносят специальные покрытия, например воск. Иногда диполи изготавливают с квазипостоянным зарядом, что приводит к взаимному отталкиванию диполей друг от друга.

Сформированный отражающий объём от отдельной сброшенной пачки называется дипольным образованием. Облаком называют совокупность многих перекрывающихся дипольных образований, а под полосой дипольных отражателей понимают последовательность перекрывающихся облаков, простирающихся на многие километры.

Скорость снижения облака диполей зависит от массы, размеров и формы диполей в пачке, плотности и состояния атмосферы. В спокойной атмосфере средняя скорость снижения отражателей составляет 60–180 м/мин на больших высотах (влияет разреженность воздуха) и 25–70 м/мин на малых высотах. В горизонтальном направлении диполи перемещаются примерно со скоростью ветра. Иногда они могут перемещаться вверх восходящими потоками воздуха и удерживаться в атмосфере в течение нескольких часов.

Помехи, создаваемые с помощью облаков дипольных отражателей, разделяют на маскирующие и имитирующие.

Маскирующий эффект заключается в отражении зондирующих сигналов от облаков и создании яркостных отметок на экранах индикаторах РЛС обзорного типа и целеуказания, затрудняя обнаружение целей, определение их координат и параметров движения. Иностранные специалисты дипольные отражатели называют термином «chaff», что в переводе означает «шелуха, мякина», т. е. «бесполезные отметки (цели)» [9].

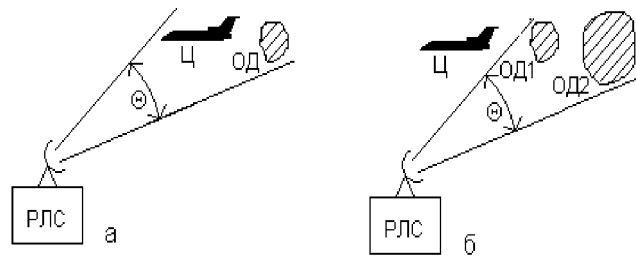


Рис. 1.1. Перенацеливание РЛС на облака дипольных отражателей

Основной целью имитирующих помех, создаваемых облаками дипольных отражателей, является создание условий для перенацеливания контура сопровождения РЛС по угловым координатам на облако, как это показано на рис. 1.1. На начальном этапе разворачивания облака, когда расстояние между облаком ОД и защищаемой целью Ц небольшое (рис. 1.1, а), оба объекта находятся в пределах диаграммы направленности антенны  $\Theta$  следящего пеленгатора и не разрешаются по угловым координатам. Следящий пеленгатор будет осуществлять сопровождение энергетического центра обоих объектов. При движении цели расстояние между целью и облаком увеличивается и наступает момент разрешения целей по угловым координатам. Если мощность отраженного сигнала от облака на входе пеленгатора будет превышать мощность сигнала от цели, то следящая система может переключиться на сопровождение облака дипольных отражателей (рис. 1.1, б).

Эффективная поверхность рассеяния облака дипольных отражателей  $\sigma_o$  одинаковой длины в среднем равна сумме ЭПР каждого диполя

$$\sigma_o = k_d \sum_{i=1}^n \sigma_i = k_d n \sigma_1, \quad (1.2)$$

где  $n$  – количество диполей в пачке;  $k$  – коэффициент действующего числа диполей, учитывающий слипание диполей, их повреждение и т. п.

Интенсивность отражения от диполя зависит от угла падения облучающей электромагнитной волны и от соотношения размеров диполя с длиной волны. Отражённый от диполя сигнал будет максимальным, когда направление падения волны перпендикулярно оси диполя, а вектор напряжённости электрического поля ориентирован параллельно этой оси, т. е. при совпадении поляризаций диполя и падающей волны. На рис. 1.2 показано пространственное положение диполя  $D$  и падающей на него электромагнитной волны ЭМВ и обозначено:  $l$  – длина диполя;  $E$  и  $H$  соответственно напряжённости электрического и магнитного полей ЭМВ;  $p$  – вектор Умова–Пойтинга, определяющий направление движения ЭМВ и количество энергии, переносимой ЭМВ за одну секунду сквозь площадку размером  $1 \text{ м}^2$ , нормальную к направлению распространения волны. Количественно вектор  $p$  определяется как векторное произведение векторов  $E$  и  $H$ . Как известно, все три вектора, характеризующие ЭМВ, взаимно перпендикулярны.

Образно ЭМВ можно представить как комбинацию из трёх пальцев правой руки: большого, указательного и среднего, расположенных перпендикулярно друг относительно друга. Большой палец покажет ориентацию вектора напряжённости электрического поля, указательный – вектора напряжённости магнитного поля, а средний – вектора Умова–Пойтинга. Плоскость ладони будет соответствовать фазовому фронту ЭМВ.

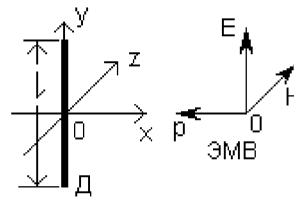


Рис. 1.2. К определению ЭПР диполя

ЭПР настроенного в резонанс диполя равна [7]

$$\sigma_{\text{д. макс}} = 0,86 \lambda^2. \quad (1.3)$$

Вследствие турбулентности атмосферы и аэродинамических свойств диполи в облаке расположены хаотически и при усреднении по всем углам средняя ЭПР одного диполя составляет

$$\sigma_{\text{д.ср}} \approx 0,17 \lambda^2. \quad (1.4)$$

Для того чтобы облако маскировало (или имитировало) цель, необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_o \geq \sigma_{\text{ц}}, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_{\text{ц}}$  – ЭПР защищаемого объекта (цели).

Большинство реальных радиолокационных целей представляют собой сложную комбинацию отражателей различного типа. Сигналы, отражённые от таких целей, являются результатом интерференции нескольких сигналов, отражённых от отдельных элементов цели. Кроме того, при облучении таких объектов, как самолёт, вертолёт, корабль, танк и др., характер отражений от отдельных элементов объекта сильно зависит от их ориентации в пространстве по отношению к фронту облучающей волны. В некоторых положениях определённые части объектов могут давать весьма интенсивные сигналы, а в других положениях интенсивность отражённых сигналов может падать до нуля.

Таким образом, при изменении ракурса облучения возникают сильные флуктуации результирующего сигнала. В связи с указанными обстоятельствами аналитическое определение ЭПР, значение которой необходимо иметь при энергетических расчётах радиосистем, удаётся осуществить только для объектов простейшей конфигурации, к которым относятся плоский лист, шар, цилиндр и ряд других. В случае сложных целей, к которым следует отнести большинство реальных объектов радиолокационного наблюдения, ЭПР определяют экспериментально путём усреднения результатов большого числа измерений.

В табл. 1.2 приведены средние значения ЭПР различных объектов.

Количество диполей в пачке для выполнения условия (1.5) должно быть не менее

$$N_{\text{д.мин}} = \sigma_{\text{ц}}/\sigma_o = \sigma_{\text{ц}}/0,17\lambda^2 \quad (1.6)$$

Один килограмм диполей позволяет получить усреднённую ЭПР облака равную

$$\sigma_0 \approx (2-3) 10^3 \text{ м}^2. \quad (1.7)$$

Таблица 1.2

Тип объекта	ЭПР, м <sup>2</sup>
Истребитель	5–8
Бомбардировщик	15–20
Транспортный самолёт	30–50
Крылатая ракета	0,3–0,8
Головная часть баллистической ракеты	10 <sup>-3</sup> –1,0
Катер	100
Транспорт малого тоннажа (50–200 т)	50–250
Транспорт среднего тоннажа (500–7000 т)	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>
Транспорт большого тоннажа (свыше 7500 т)	> 10 <sup>4</sup>
Рубка подводной лодки	1,0
Автомобиль, танк	7–10
Человек	0,5–1,2

### 1.3. Формирование полос дипольных отражателей

Если пачки сбрасываются достаточно часто, то формируемые ими облака сливаются друг с другом, в результате чего образуются широкие и протяженные области пространства, заполненные дипольными отражателями (полосы дипольных отражателей). На экранах РЛС кругового обзора появляются сильно засвеченные полосы, соответствующие пространственному положению отражателей. Это маскирует отметки от целей, идущих в полосе отражателей или над этой полосой, значительно затрудняя определение координат и параметров движения целей.

Программа формирования полос дипольных отражателей составляется так, чтобы расход диполей был минимальным, но характеристики полосы отвечали бы поставленным требованиям. Если пачки диполей выбрасываются слишком редко, то полоса не будет сплошной, а если слишком часто, то запас диполей может быть израсходован быстрее, чем будет заполнен требуемый объём про-

странства диполями. Частота сбрасывания пачек зависит от длительности импульсов облучения. После раскрытия пачек диполи медленно опускаются, и расстояния между облаками уменьшаются по сравнению с расстояниями в моменты сброса.

Известно, что время между излучением импульса и приёмом отражённого от цели сигнала составляет одну микросекунду на каждые 150 м измеряемого РЛС расстояния. Следовательно, разрешающая способность РЛС по дальности  $\Delta R_{\text{рлс}}$  равна длительности импульса  $\tau_{\text{и}}$ , умноженной на 150 м. Если разрешающую способность РЛС разделить на скорость постановщика помех  $V_{\text{пп}}$ , сбрасывающего пачки дипольных отражателей, то можно определить интервал сбрасывания пачек  $\Delta t_{\text{об}}$ , обеспечивающий такое расстояние между элементарными облаками, которое РЛС не сможет различить.

$$\Delta t_{\text{об}} = \frac{\Delta R_{\text{рлс}}}{V_{\text{пп}}} = \frac{150\tau_{\text{и}}}{V_{\text{пп}}} \quad (1.8)$$

В выражении (1.8)  $\Delta t_{\text{об}}$  – в сек,  $V_{\text{пп}}$  – в м/сек,  $\tau_{\text{и}}$  – в микросек.

При сбрасывании пачек с летательного аппарата, движущегося в каком-либо направлении, отличном от радиального, с интервалом, вычисленным по (1.8), расстояние между пачками в радиальном направлении, очевидно, будет меньше.

Процесс формирования облака дипольных отражателей зависит от многих геофизических и погодных факторов, не подвластных контролю человека. Поэтому результат расчёта, ориентированного на определение минимального расхода диполей при постановке полосы, в реальных условиях должен быть взят с запасом. Коэффициент запаса выбирается в зависимости от конкретных условий. Чаще всего он равен 2.

Серьёзным недостатком дипольных отражателей, как средства РЭП, является их относительная малая частотная диапазонность. Это объясняется зависимостью отражающих свойств диполей от длины волны, показанной на рис. 1.3, где обозначено  $l$  – длина диполей. Чтобы сделать облако дипольных отражателей более широкополос-

ным, пачки комплектуют из диполей различной длины. Однако это увеличивает расход диполей и, соответственно, их массу.

Различие в скоростях движения цели и диполей в атмосфере позволяет в ряде случаев снизить эффективность таких помех за счёт использования систем селекции движущихся целей (СДЦ). Однако, если полоса дипольных отражателей расположена между защищаемым объектом и подавляемой РЛС, необходимо учитывать ослабление сигналов облучения в облаках диполей ОД (рис. 1.4). Электромагнитные волны, проходя через облака диполей, испытывают ослабление из-за рассеяния энергии диполями (эффект экрана).

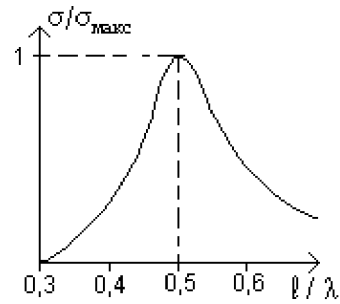


Рис. 1.3. Зависимость ЭПР диполя от длины волны

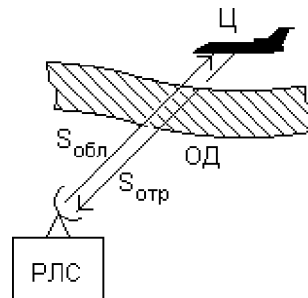


Рис. 1.4. Эффект экрана, создаваемого дипольными отражателями

Экспериментальные данные показывают, что при средней концентрации диполей

$$\bar{n} \approx 30 \text{ дип/м}^3 \quad (1.9)$$

потери мощности при поглощении радиоволн облаком составляют для  $\lambda = 3 \text{ см}$   $\Delta P \approx 40 \text{ дБ}$ , что соответствует сокращению дальности действия РЛС примерно в 10 раз.

Для увеличения экранирующего действия, облака или полосы в ряде случаев формируют из поглощающих диполей, которые представляют собой тонкие нити из графита или других поглощающих материалов. Такие диполи называют «чёрные диполи». Так как поглощающий материал не может быть идеальным, облако из «чёрных диполей» само отражает электромагнитные волны в направлении подавляемой РЛС, но это отражение значительно меньше, чем то, которое создаётся обычными типовыми диполями.

Кроме того, созданные заранее облака и полосы дипольных отражателей могут использоваться для формирования перенацеливающих помех, методы создания которых рассмотрены ниже.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Из каких материалов изготавливают современные дипольные отражатели?
2. Дайте определение эффективной поверхности рассеяния объектов (ЭПР).
3. Какие критерии определяют длину и толщину дипольных отражателей?
4. Почему на больших высотах скорость снижения диполей больше, чем на малых высотах?
5. В чём заключается маскирующий эффект помех, создаваемых дипольными отражателями?
6. Какова основная цель имитирующих помех, создаваемых облаками дипольных отражателей?
7. Как определяется эффективная поверхность рассеяния реальных целей?
8. Вспомните наиболее серьёзный недостаток дипольных отражателей, как средства радиоподавления.
9. Какие меры принимают для ослабления недостатка, упомянутого в п. 7?
10. Что из себя представляют «чёрные диполи»?



## 2. ЛОЖНЫЕ ЦЕЛИ

### 2.1. Общие положения

Ложные цели относятся к классу имитирующих помех и представляют собой различного вида отражатели, обладающие большой ЭПР. Основной задачей ложных целей является замыкание на себя контура управления оружием, а также создание на экранах РЛС обзорного типа отметок целей, координаты которых не совпадают с координатами защищаемых объектов.

Ложные цели классифицируют по следующим признакам:

- по виду излучения – радиолокационные, тепловые, оптические, акустические;
- по способу применения – неподвижные, буксируемые, сбрасываемые, выстреливаемые;
- по живучести – однократного и многократного применения;
- по способу управления – автономные, дистанционно управляемые.

Для имитации движущихся объектов ложные цели часто выполняют в виде буксируемых или сбрасываемых летательных аппаратов простейшей конструкции. Геометрические размеры таких летательных аппаратов значительно меньше защищаемых объектов, однако сигналы от ложных целей на входе подавляемого приёмника должны превышать сигналы, отраженные от объекта защиты. Для этого ЭПР ложных целей искусственно увеличивают путём установки на них усилителей – ретрансляторов сигналов или пассивных переизлучателей. Такие ложные цели часто называют ловушками.

Эффективность ложных целей зависит от их количества и возможностей средств поражения. Вероятность поражения объекта, защищаемого ложными целями, равна

$$P_m(n_{\text{лц}}) = 1 \left[ 1 - (P_1 \frac{n_{\text{иц}}}{n_{\text{иц}} + n_{\text{лц}}}) \right]^m, \quad (2.1)$$

где  $m$  – число боеприпасов (ракет, снарядов, авиабомб), применяемых по защищаемому объекту;  $n_{\text{ист}}$  – число истинных целей;  $n_{\text{лож}}$  – число ложных целей;  $P_1$  – вероятность поражения объекта или ложной цели одним боеприпасом.

Значения вероятности поражения  $P_m(n_{\text{лож}})$  объектов в зависимости от числа ложных целей  $n_{\text{лож}}$  и расхода боеприпасов (при  $P_1 = 0,5$ ), рассчитанные по приведённой формуле, показаны в табл. 2.1 [3].

Таблица 2.1

Число ложных целей, шт.	Вероятность поражения цели при расходе от 1 до 4 боеприпасов			
	1	2	3	4
0	0,50	0,75	0,97	0,99
1	0,25	0,44	0,76	0,94
2	0,17	0,30	0,60	0,83
3	0,12	0,23	0,49	0,73
4	0,10	0,19	0,41	0,65
5	0,08	0,16	0,35	0,58
10	0,04	0,09	0,20	0,37

## 2.2. Сбрасываемые ловушки

Для получения большой ЭПР на сбрасываемых ловушках размещают активные излучатели или пассивные переизлучатели радиосигналов. В качестве активных излучателей применяют высокочастотные генераторы одноразового действия, усилители – ретрансляторы сигналов облучения. Пассивные ловушки оборудуют уголковыми отражателями, линзами Люнеберга, переизлучающими антенными решетками.

Захват на сопровождение следящей системой подавляемой РЛС сбрасываемых ловушек будет происходить при условии, чтобы время воздействия сигналов ложной цели было больше или равно постоянной времени следящих систем по направлению, ско-

рости или дальности. Это условие накладывает довольно жесткие требования на конструкцию сбрасываемых ловушек.

Продолжительность воздействия сигналов от ловушки на систему самонаведения с импульсным излучением определяется временем пребывания ловушки в импульсном объеме, а для непрерывных РЛС – временем пребывания сигналов от ловушки в пределах полосы пропускания следящей системы по скорости. В обоих случаях ловушка должна находиться в пределах диаграммы направленности приёмной антенны подавляемой РЛС.

Чтобы определить время пребывания ловушки и цели в одном и том же импульсном объеме, необходимо произвести расчёт траектории ложной цели, сбрасываемой с защищаемого объекта, при её свободном падении. Из курса баллистики известно, что траектория свободного падения определяется характеристическим временем  $T_x$ , высотой и скоростью полёта объекта, с которого сбрасываются ловушки.

Характеристическое время – это время падения тела с высоты 2000 м в условиях стандартной атмосферы.

$$T_x = \frac{k A d^2}{G}, \quad (2.2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $A$  – аэродинамический коэффициент;  $d$  – диаметр ловушки;  $G$  – масса ловушки.

На рис. 2.1 показаны примерные траектории свободного падения ловушки для различных значений  $T_x$ . Радиус  $R_n$  определяет импульсный объём системы, влияющий на разрешающую способность.

Из формулы (2.2) и рис. 2.1 следует, что для увеличения времени пребывания ловушки в импульсном объеме нужно стремиться уменьшать её характеристическое время  $T_x$ . В связи с тем, что габариты ловушки в основном определяются размерами устанавливаемых на ней переизлучателей, уменьшение  $T_x$  достигается увеличением массы ловушки.

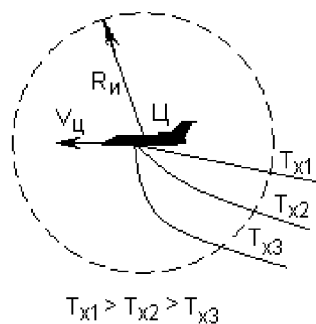


Рис. 2.1. Свободное падение ловушки  
для различных значений характеристического времени

Другим способом увеличения времени пребывания сбрасываемой ловушки в импульсном объёме (при её малом весе) заключается в задании ей начальной скорости в направлении движения защищаемого летательного аппарата. Это можно сделать оборудовав ловушку стартовым двигателем. На рис. 2.2 приведены траектории движения ловушки без стартового двигателя ① и с двигателем ②.

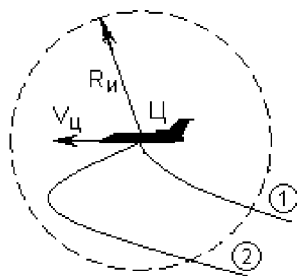


Рис. 2.2. Траектории ловушки без стартового двигателя ① и с двигателем ②

От защищаемого объекта ловушка должна удаляться с такой скоростью, чтобы обеспечивалось её надёжное сопровождение автоматическими следящими системами РЛС по скорости, дальности, угловым координатам.

### 2.3. Буксируемые ловушки

Впервые буксируемые ловушки применяли во время второй мировой войны, когда с целью снижения эффективности немецкой ПВО авиация союзников использовала в качестве ложных целей буксируемые металлические сети. Эти сети, создавая мощные отражённые сигналы, отвлекали на себя станции орудийной наводки.

Современные ловушки в виде простейших летательных аппаратов буксируются защищаемым объектом (целью) на тонком канате, длина которого может достигать нескольких сот метров (рис. 2.3). Как правило, буксируемые ловушки используются для срыва ракетных атак на последнем этапе самонаведения. В исходном положении ловушка находится в специальном отсеке. К моменту преодоления наиболее опасных зон ПВО она выпускается с помощью стартового приспособления.

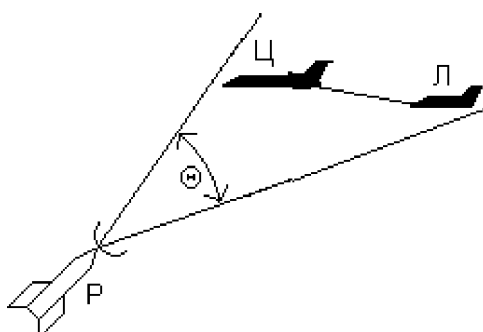


Рис. 2.3. Цель и ловушка в пределах диаграммы направленности антенны ГСН ракеты

В начальный момент наведения атакующей ракеты Р на защищаемый объект цель Ц и ловушка Л не должны разрешаться по дальности, по скорости и по угловым координатам, т. е. должны представляться как одна цель. ГСН ракеты в этом случае наводится на энергетический центр двух источников сигнала (рис. 2.3). Поскольку мощность сигнала ловушки должна существенно превосходить мощность сигнала, отражённого от защищаемого объекта, ракета практически наводится на ловушку, в результате чего про-

исходит перенацеливание ракеты на ловушку и поражение объекта исключается (рис. 2.4).

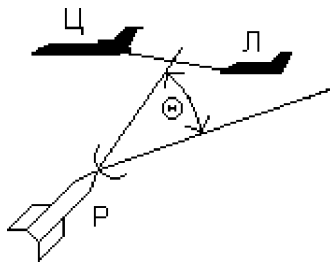


Рис. 2.4. Перенацеливание ГСН ракеты на буксируемую ловушку

Максимальное удаление буксируемой ловушки Л от защищаемого объекта Ц определяется разрешающей способностью подавляемой системы по указанным навигационным параметрам (рис. 2.5).

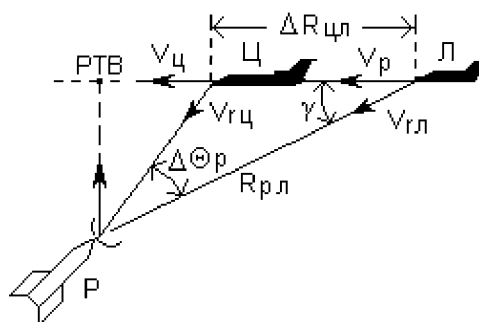


Рис. 2.5. К расчёту максимального удаления буксируемой ловушки от цели

Условие не разрешения объекта и ловушки  $\Delta R_{цл}$  можно записать следующим образом

$$\Delta R_{цл} \leq \frac{\Delta \Theta_p R_{пл}}{\sin \gamma}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta \Theta_p$  – разрешающая способность ГСН ракеты по угловым координатам;  $R_{пл}$  – расстояние от ракеты до ловушки;  $\gamma$  – ракурс визирования ракеты из точки расположения ловушки.

На рис. 2.5 обозначены также расчётная точка встречи ракеты с целью РТВ, скорости движения ракеты  $V_p$ , цели  $V_c$  и ловушки  $V_l$ , радиальные составляющие скоростей сближения атакующей ракеты с целью  $V_{rc}$  и ловушкой  $V_{rl}$ .

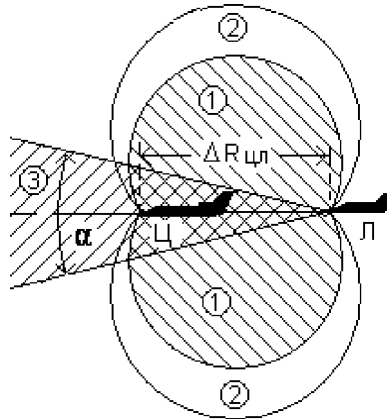


Рис. 2.6. Зона разрешения цели и ловушки по угловой координате ①, зона разности радиальных скоростей ②, зона затенения ловушки целью ③

В системах наведения, использующих непрерывный режим излучения, селекцию целей, как правило, осуществляют по скорости движения сопровождаемого объекта, используя для этого доплеровское приращение частоты отражённых от объекта сигналов и принимаемых ГСН ракеты [4]. Условие не разрешения цели и ловушки в этом случае определяется шириной полосы пропускания следящей системы (строба скорости)  $\Delta F$  и разностью доплеровских приращений частоты сигналов, отражённых от цели и ловушки  $\Delta f$ ,

$$\Delta f \leq \Delta F, \quad (2.4)$$

где  $\Delta f = \frac{2\Delta V}{\lambda}$ ;  $\Delta V = V_{rc} - V_{rl}$ ;

Условия (2.3) и (2.4) определяют максимально допустимое удаление ловушки от защищаемого летательного аппарата. На рис. 2.6 показаны зоны разрешения буксируемой ловушки и цели по угловой координате ① и разности радиальных скоростей (допле-

ровских приращений частоты) ②. На этом же рисунке показана зона затенения ловушки целью ③. Цель затеняет ловушку, если ракета находится внутри конуса, угол при вершине которого равен

$$\alpha = \arcsin \frac{k r_p}{\Delta R_{\text{цл}}}, \quad (2.5)$$

где  $r_p$  – эффективный радиус поражения боевой части ракеты;  $\Delta R_{\text{цл}}$  – расстояние между целью и ловушкой;  $k$  – коэффициент запаса.

Величина зоны затенения имеет существенное значение при атаках в передней полусфере.

Буксируемые ловушки могут быть пассивными или активными. Отличительной особенностью пассивной ловушки состоит в отсутствии в ней активных элементов, формирующих её сигнал. Формирование сигнала происходит за счёт отражения от неё сигналов облучения. Необходимый уровень мощности отражённого сигнала в этом случае определяет ЭПР ловушки, величина которой обеспечивается соответствующими конструкциями ловушки. В качестве пассивной ловушки могут использоваться надувные баллоны, покрытые отражающим радиоволны материалом, линзы Люнеберга, уголковые отражатели, решётки Ван–Атта и др.

В активных ловушках излучаемый сигнал определённой мощности формируется с помощью внутренних энергетических устройств. Таким устройством может быть ретранслятор, переизлучающий и усиливающий сигналы облучения, или ответчик. В этом случае ЭПР ловушки не играет существенной роли и может быть сколь угодно малой. С целью упрощения конструкции активной ловушки на ней могут размещаться только передающая антенна и высокочастотный усилитель, а задающий высокочастотный сигнал и питание поступают по кабелю с защищаемого летательного аппарата. Бортовые источники высокочастотной мощности позволяют не только переизлучать радиолокационные сигналы ловушкой, но и



модулировать их для повышения эффективности помехового воздействия.

Для передачи с борта защищаемого объекта на ловушку задающего сигнала возможно использование оптоволоконного кабеля, проложенного совместно с буксирным тросом. Такая линия передачи сигналов в совокупности с бортовой аппаратурой анализа угрозы и формирования сигнала, излучаемого ловушкой, расширяет функциональные возможности индивидуальной защиты летательного аппарата.

Промак ракеты пропорционален удалению ловушки от защищаемого объекта. Однако это не означает, что чем больше длина буксирного троса, тем эффективней защита. При длине буксира, превышающей максимально допустимую, может наступить разрешение ловушки по какому-либо параметру её движения. В этом случае защищаемый объект и ловушка могут быть отдельно атакованы ракетами, и защита окажется неэффективной. Такая ситуация особенно недопустима при использовании пассивной ловушки, когда отсутствуют возможности влияния на разрешение целей РЛС.

При использовании активной ловушки разрешение ловушки и объекта менее опасно. В этом случае бортовая аппаратура может использовать уводящую помеху по дальности или по скорости для перенацеливания подавляемой РЛС на ловушку [9].

Применение буксируемых ловушек в боевых операциях НАТО в Югославии показало высокую их эффективность. Ловушки применялись для самозащиты самолётов F-16 и B-1B. Отмечались промахи зенитных ракет за счёт их перенацеливания на ловушки, а также и случаи прямых попаданий ракеты в ловушку, после чего от ловушки оставался лишь буксирный трос [8].

Буксируемые ловушки более «живучие», чем сбрасываемые, и поэтому их расход, требуемый для защиты, гораздо меньше. Однако они влияют на аэродинамические характеристики защищаемого объекта, снижают маневренность и скорость движения.

## 2.4. Дистанционно пилотируемые летательные аппараты

Более сложным видом ложных целей являются дистанционно пилотируемые летательные аппараты ДПЛА (беспилотные самолёты, управляемые ракеты, планеры и т. п.). Такие летательные аппараты, как правило, включают в группу поддержки боевой операции для создания активных помех, постановки облаков и полос дипольных отражателей, сбрасывания передатчиков помех одноразового действия, ловушек и т. д. Это в сочетании с другими элементами поддержки (групповая защита, «закордонная» помеха и др.) повышает вероятность успешного проникновения ударных боевых единиц в зону ПВО цели, увеличивает эффективность боевой операции, снижает потери человеческих жизней, боевой техники. Кроме того, ДПЛА сами могут выполнять роль ложных целей, ловушек. После выполнения задания ДПЛА может быть возвращён и использован ещё раз.

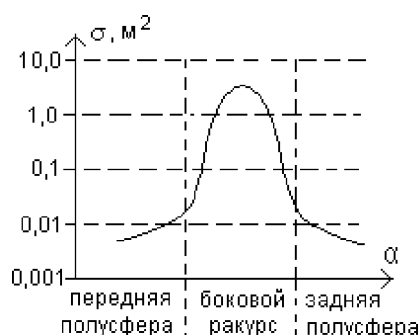


Рис. 2.7. Типовая диаграмма ЭПР реактивного ДПЛА

Размеры ДПЛА значительно меньше размеров пилотируемого ударного летательного аппарата и сравнимы с размерами небольшой зенитной ракеты. Типовая диаграмма изменения ЭПР реактивного ДПЛА в зависимости от ракурса наблюдения  $\alpha$  приведена на рис. 2.7 [9]. Диаграмма показывает, что большая часть времени полёта в направлении цели на относительно малых высотах ЭПР ДПЛА будет меньше 0,1 м². Это увеличивает скрытность подхода

ДПЛА к дислокации ПВО цели, уменьшает вероятность своевременного его обнаружения. Использование противорадиолокационных покрытий в определённых местах ДПЛА могут в большей степени снизить его ЭПР.

Многие специалисты по тактике задают вопрос: зачем посылать ДПЛА в обороняемый район цели с грузом только лишь средств РЭП? Если ДПЛА может безнаказанно приблизиться к району цели, то пусть он несёт ракеты, бомбы, или, будучи начинённым взрывчатыми веществами, сам наводится на цель. Однако оснащение ДПЛА системой наведения и превращение его, фактически, в крылатую ракету значительно увеличит его стоимость и может превысить стоимость самой ракеты, которую он должен заменить.

Если ДПЛА в качестве носителя ракетного и бомбового груза заменяет пилотируемый боевой летательный аппарат, то они должны поменяться местами в программе боевой операции, т. е. пилотируемый аппарат должен использоваться в качестве средства успешного обеспечения операции, например предварительного формирования полос дипольных отражателей, рассеиваемых в районе цели. Это должно неминуемо привести к неоправданной потере человеческих жизней и дорогой техники.

Во многих случаях ДПЛА требуют линии связи между центром управления и управляемым объектом. Особенно важно обеспечение скрытности этих линий связи. Подавление противником приёмника такой линии, расположенного на пункте управления, может исключить эффективное применение многих ДПЛА. В связи с этим, проектирование помехозащищённой линии связи должно быть частью проектирования всей системы с использованием дистанционно – пилотируемых объектов.

## 2.5. Энергетические характеристики ложных целей

Одним из основных требований, предъявляемых к ложным целям, является обеспечение энергетического превышения сигналов, переизлучаемых ложной целью, над сигналами, отражёнными от защищаемого объекта.

В качестве примера определим основные энергетические характеристики дистанционно управляемой ловушки, используемой для радиоподавления системы полуактивного самонаведения ракеты. Расположение объектов, участвующих в указанной ситуации, приведено на рис. 2.8.

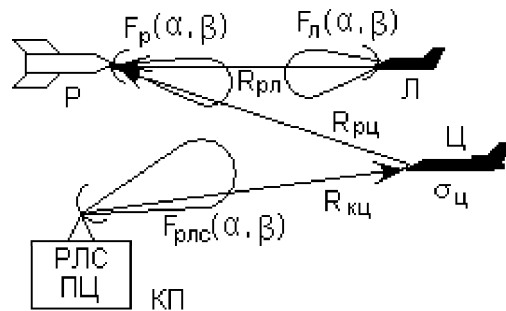


Рис. 2.8. К определению энергетических характеристик активной ловушки

Станция подсвета цели РЛС ПЦ облучает цель Ц, и сигналы, отраженные от цели, принимаются головкой самонаведения (ГСН) ракеты Р. Для срыва наведения ракеты защищаемый объект Ц производит запуск ловушки с активным ретранслятором сигналов РЛС подсвета. Мощность отражённого сигнала на входе приёмника ГСН  $P_{с\text{ вх}}$  равна

$$P_{с\text{ вх}} = \frac{P_{\text{рлс}} G_{\text{рлс}} F_{\text{рлс}}^2(\alpha_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}) \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi R_{\text{кц}} R_{\text{рц}})^2} S_{\text{р}} F_{\text{р}}^2(\alpha_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}) \gamma_{\text{с}}, \quad (2.6)$$

где  $P_{\text{рлс}}$  – мощность передатчика РЛС ПЦ;  $G_{\text{рлс}}$  – коэффициент усиления передающей антенны РЛС ПЦ;  $F_{\text{рлс}}(\alpha, \beta)$  – нормированная диаграмма направленности передающей антенны РЛС ПЦ;  $\sigma_{\text{ц}}$  –

ЭПР цели;  $S_p$  – эффективная площадь раскрытия приёмной антенны ГСН ракеты;  $F_p(\alpha, \beta)$  – нормированная диаграмма направленности приёмной антенны ГСН ракеты;  $R_{кц}$  – расстояние между командным пунктом КП, где расположена РЛС ПЦ, и целью;  $R_{рц}$  – расстояние между ракетой и целью;  $\alpha_c$  и  $\beta_c$  – угловые координаты цели в азимутальной и угломестной плоскостях, отсчитываемые от максимума диаграммы направленности соответствующей антенны;  $\gamma_c$  – суммарный коэффициент потерь сигналов при распространении в атмосфере от РЛС ПЦ до цели и от цели до ракеты.

Мощность помехового сигнала на входе приёмника ГСН ракеты  $P_{п.вх}$  определяется соотношением

$$P_{п.вх} = \frac{P_{п} G_{п}}{4\pi R_{рл}} S_p F_{л}^2(\alpha_p, \beta_p) F_p^2(\alpha_{л}, \beta_{л}) \gamma_{п} \frac{\Delta f_{пр}}{\Delta F_{п}}, \quad (2.7)$$

где  $P_{п}$  – выходная мощность передатчика ретранслятора, установленного на ловушке;  $G_{п}$  – коэффициент усиления передающей антенны ретранслятора ловушки;  $R_{рл}$  – расстояние между ракетой и ловушкой;  $F_{л}(\alpha, \beta)$  – нормированная диаграмма направленности передающей антенны ретранслятора ловушки;  $\alpha_p, \beta_p$  и  $\alpha_{л}, \beta_{л}$  – угловые координаты ракеты и ловушки в азимутальной и угломестной плоскостях, отсчитываемые от максимума диаграммы направленности соответствующей антенны;  $\gamma_{п}$  – суммарный коэффициент потерь помеховых сигналов при распространении в атмосфере от ловушки до ракеты;  $\Delta f_{пр}$  – полоса пропускания приёмника ГСН ракеты;  $\Delta F_{п}$  – ширина спектра помехового сигнала.

Используя уравнения (2.6) и (2.7), получим уравнение радиопротиводействия для случая применения дистанционно управляемых ловушек

$$k = \left( \frac{P_{п}}{P_{с}} \right)_{вх} = \frac{4\pi P_{п} G_{п} R_{кц}^2 R_{рц}^2 F_{л}^2(\alpha_p, \beta_p) F_p^2(\alpha_{л}, \beta_{л}) \gamma_{п} \Delta f_{пр}}{P_{рлс} G_{рлс} R_{рл}^2 \sigma_{ц} F_{рлс}^2(\alpha_{ц}, \beta_{ц}) F_p^2(\alpha_{ц}, \beta_{ц}) \gamma_{с} \Delta F_{п}}. \quad (2.8)$$

При ретрансляции сигналов ловушкой можно принять

$$\frac{\Delta f_{\text{пр}}}{\Delta F_{\text{п}}} = 1. \quad (2.9)$$

Необходимое значение выходной мощности активного или пассивного переизлучателя ловушки при воздействии по основному лепестку диаграммы направленности антенны ГСН может быть получено из уравнения (2.8) при подстановке в него вместо  $k$  величины коэффициента подавления  $K_{\text{п}}$ . Напомним, что коэффициент подавления  $K_{\text{п}}$  равен минимальному отношению мощности помехи  $P_{\text{п}}$  к мощности полезного сигнала  $P_{\text{с}}$  на входе подавляемой РЛС, при котором вероятность выполнения возложенных на систему задач снижается до заданной величины [4].

$$K_{\text{п}} = \left( \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}} \right)_{\text{вх мин}}. \quad (2.10)$$

Выполняемые РЛС задачи зависят от её назначения, поэтому эффект воздействия помеховых сигналов может заключаться в снижении дальности обнаружения целей, дальности захвата целей на сопровождение, увеличении ошибок сопровождения целей по угловым координатам, по дальности, по скорости и т. д.

Найдём мощность переизлучаемого сигнала  $P_{\text{п}}$ , необходимую для перенацеливания атакующей ракеты на ловушку в момент пуска. Будем считать, что

$$F_{\text{рлс}}(\alpha_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}) = F_{\text{р}}(\alpha_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}) = F_{\text{р}}(\alpha_{\text{л}}, \beta_{\text{л}}) = F_{\text{л}}(\alpha_{\text{р}}, \beta_{\text{р}}) = 1; \quad (2.11)$$

$$R_{\text{рц}} = R_{\text{рл}}. \quad (2.12)$$

С учётом принятого условия получим из (2.8)

$$P_{\text{п}} = \frac{P_{\text{рлс}} G_{\text{рлс}} \sigma_{\text{ц}}}{4\pi R_{\text{кц}}^2 G_{\text{п}}} K_{\text{п}}. \quad (2.13)$$

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какую основную задачу выполняют ложные цели в процессе радиоподавления?
2. По каким признакам классифицируют ложные цели?
3. Какие ложные цели называют ловушками?
4. Перечислите основные требования, предъявляемые к конструкции сбрасываемых ловушек.
5. Какие меры принимают для увеличения времени пребывания сбрасываемых ловушек в импульсном объёме РЛС?
6. Какими факторами определяется максимальное удаление буксируемой ловушки от защищаемого объекта?
7. Назовите основные различия буксируемых ловушек активного и пассивного типов.
8. В чём заключаются особенности дистанционно пилотируемых летательных аппаратов при использовании их в качестве средств радиоэлектронной борьбы?

### 3. ПАССИВНЫЕ ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛИ

#### 3.1. Общие положения

Возможность увеличения ЭПР ловушек с помощью пассивных переизлучателей основана на особенностях рассеяния падающей плоской волны проводящими телами.

ЭПР любого тела для данного направления можно определить так

$$\sigma = D G, \quad (3.1)$$

где  $D = P_2/P_1$  – отношение мощности, рассеянной данным телом  $P_2$ , к плотности потока мощности электромагнитной энергии, падающей на переизлучатель  $P_1$ ;  $G$  – коэффициент направленного действия переизлучателя в данном направлении, т. е. в направлении на точку наблюдения.

Для плоских тел, а также для некоторых других объектов, близких по своим переизлучающим свойствам к плоским, величина  $D$  эквивалентна площади поглощения некоторой антенны  $S_A$ :

$$D \sim S_A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}. \quad (3.2)$$

Решая (3.2) относительно  $G$

$$G = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

и подставляя (3.3) в (3.1), получим значение ЭПР для идеально проводящей плоской пластины, размеры которой намного больше длины волны и в случае нормальной её ориентации к направлению падающей электромагнитной волны:

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}, \quad (3.4)$$

где  $S$  – площадь пластины.



На рис. 3.1 приведена типовая диаграмма переизлучения такой пластины. Как видно из рисунка, диаграмма получается достаточно узкой, и по мере изменения ориентации пластины по отношению к точке наблюдения величина переотраженной энергии будет резко уменьшаться. Поэтому переизлучатели такого типа не используются для повышения ЭПР ловушек.

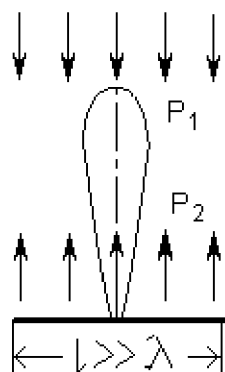


Рис. 3.1. Диаграмма переизлучения плоской проводящей пластины

Переизлучатели, устанавливаемые на ловушках, должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь большую ЭПР при возможно меньших габаритах и массе;
- обладать широкой пространственной диаграммой переизлучения.

Таким требованиям в известной мере отвечают угловые отражатели, линзы Люнеберга, переизлучающие антенные решетки.

### 3.2. Угловые отражатели

Угловые отражатели представляют собой жесткую конструкцию, состоящую из взаимно перпендикулярных проводящих граней, механически и электрически соединённых между собой, размеры которых значительно превышают длину падающей радиоволны. Важнейшим свойством угловых отражателей является то, что значительная доля высокочастотной энергии, падающей на них с любого направления в пределах внутреннего угла, отражается обратно в сторону источника облучения. Благодаря этому угловые отражатели даже небольших размеров обладают значительными ЭПР. Интенсивность рассеяния падающих радиоволн зависит от размеров и формы граней отражателя, материала, из которого он изготовлен, и от направления падения волны.

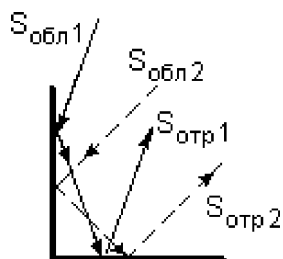


Рис. 3.2. Отражение радиоволн в двухгранном уголко-вом отражателе

Простейший уголко-вый отража- тель представляет собой двугранный угол (рис. 3.2). Особенность такого от- ражателя состоит в том, что он после двукратного отражения от граней рас- сеивает основную часть энергии в сто- рону источника облучения, если она приходит с направления, лежащего в плоскости перпендикулярной ребру. Любые отклонения падающей волны от этой плоскости приводят к резкому

снижению уровня обратно отражённого сигнала. Это является зна- чительным недостатком двугранных отражателей. Для расширения диаграммы обратного рассеяния падающей волны применяют трех- гранные уголко-вые отражатели, внутренние поверхности которых образуют систему из трёх отражающих граней. При падении на них радиоволн после трехкратного отражения от граней формируется достаточно широкая диаграмма вторичного излучения в двух орто- гональных плоскостях.

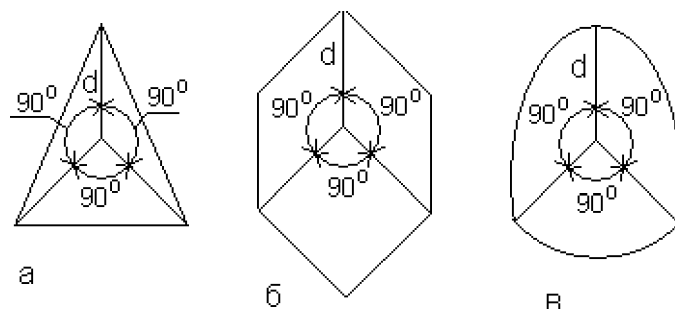


Рис. 3.3. Формы уголко-вых отражателей: а – треугольный, б – прямоугольный, в – круглый

В зависимости от формы граней различают треугольные, пря- моугольные и круглые уголко-вые отражатели (рис. 3.3). Макси- мальные ЭПР таких отражателей соответственно равны [3]:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}; \sigma_{\square} = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2}; \sigma_{\circ} = 2\pi \frac{a^4}{\lambda^2}; \quad (3.5)$$

где  $a$  – длина ребра отражателя.

Расчёты показывают, что для  $\lambda = 3$  см и  $a = 0,5$  м можно получить следующие значения ЭПР:

$$\sigma_{\Delta} \approx 300 \text{ м}^2; \sigma_{\square} \approx 2400 \text{ м}^2; \sigma_{\circ} \approx 400 \text{ м}^2.$$

Ширина диаграммы переизлучения угловых отражателей на уровне половинной мощности составляет примерно  $40\text{--}50^\circ$ . Для того чтобы увеличить сектор переизлучения, применяют несколько угловых отражателей, соединённых между собой и по разному ориентированных в пространстве, как это показано на рис. 3.4.

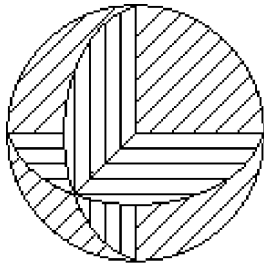


Рис. 3.4. Комбинированный многосекторный угловой отражатель

Характеристики комбинированных угловых отражателей имеют особенности, которые необходимо учитывать при их практическом применении. Так при облучении сигналами с круговой поляризацией каждая грань изменяет направление вращения поляризации волны отражённого сигнала на обратное. Поэтому трехгранный угловой отражатель, имеющий нечётное число граней,

также изменит вращение вектора электрического поля отражённой волны на обратное и противодействие в этом случае может быть не эффективным.

Для устранения этого явления одну из граней углового отражателя покрывают слоем фазосдвигающего диэлектрика [1]. Это приводит к разложению отражённой волны на две составляющие с круговой поляризацией разных направлений, одно из которых может совпадать с поляризацией падающей волны. Иногда перед угловым отражателем устанавливают поляризационный фильтр, чтобы выделить только одну из составляющих поля.

Другая особенность состоит в том, что в суммарной диаграмме вторичного излучения комбинированного отражателя будут иметь место глубокие провалы на стыках диаграмм отдельных отражателей. Уменьшить такие провалы можно круговым вращением или качанием в пределах небольшого сектора всей конструкции комбинированного отражателя, вследствие чего образуется результирующая диаграмма вторичного излучения, соответствующая усреднённой ЭПР. Один из вариантов комбинированного уголкового отражателя УО, вращаемого электродвигателем ЭД, показан на рис. 3.5.

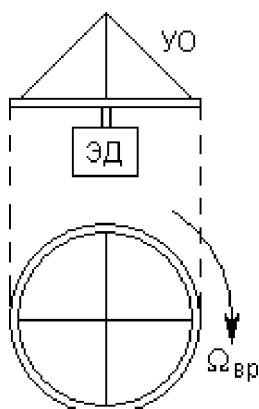


Рис. 3.5. Вращение уголкового отражателя

Отражённый сигнал при вращении оказывается промодулирован по амплитуде с частотой  $\Omega_{\text{вр}}$ .

При изготовлении уголкового отражателя необходимо весьма тщательно выдерживать перпендикулярность граней. При отклонении от прямого угла всего на один градус ЭПР отражателя уменьшается примерно в пять раз [7]. Менее чувствительны к погрешностям изготовления уголкового отражателя с треугольными гранями, имеющими большую жесткость граней. Поэтому такие отражатели применяются чаще, несмотря на то, что для получения одной и той же ЭПР требуется материала несколько больше,

чем на отражатель с квадратными гранями.

### 3.3. Линзы Люнеберга

Линзы Люнеберга представляют собой диэлектрический шар с переменным коэффициентом преломления, выполненный из нескольких слоёв диэлектрика (рис. 3.6). Диэлектрическая проницаемость наружного слоя шара близка к диэлектрической проницаемости воздуха. В последующих слоях она постепенно возрастает.

Центральный луч АВ падающей электромагнитной волны не испытывает преломления в линзе, в то время как траектории остальных лучей искривляются. В результате все лучи фокусируются в одной точке на внутренней стороне сферы, покрытой металлической плёнкой, выполняющей роль рефлектора радиоволн. Отражаясь от плёнки и опять пройдя шар, радиоволны переизлучаются в обратном направлении. Максимум диаграммы переизлучения будет совпадать с направлением прихода падающей волны.

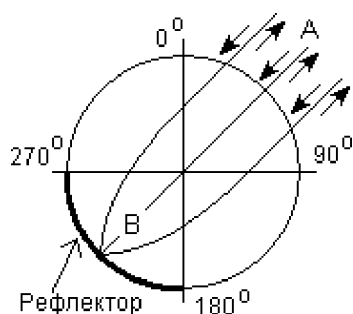


Рис. 3.6. Принцип действия линзы Лунеберга

Максимальное значение ЭПР линзы определяет следующее выражение:

$$\sigma_{p \text{ макс}} = \frac{4\pi R^3}{\lambda^2}, \quad (3.6)$$

где  $R$  – радиус линзы.

Практически ЭПР линзы получается несколько меньше расчётной, вследствие потерь в диэлектрическом материале, од-

нако с помощью таких линз можно имитировать достаточно большие ЭПР при сравнительно малых размерах. Так, с помощью линзы диаметром 60 см можно получить ЭПР, превышающую  $150 \text{ м}^2$  на волне  $\lambda = 10 \text{ см}$ , свыше  $1800 \text{ м}^2$  на волне  $\lambda = 3 \text{ см}$  и около  $7200 \text{ м}^2$  на волне  $\lambda = 1,5 \text{ см}$  [3].

Ширина диаграммы переизлучения зависит от размеров рефлектора. Так, для рефлектора, показанного на рис. 3.6, занимающего четверть поверхности сферы, ширина диаграммы переизлучения на уровне половинной мощности составляет примерно  $90^\circ$ . На рис. 3.7 приведена диаграмма переизлучения такой линзы.

Для получения всенаправленного переизлучения в какой-либо заданной плоскости (например, в азимутальной) применяют рефлекторы в виде металлизированного кольца, как это показано на рис. 3.8. Положение кольца относительно экваториальной плоско-

сти определяет направление максимума переизлучения. Изменяя положение и ширину кольца, можно формировать различные диаграммы переизлучения. Максимальная ЭПР в этом случае определяется следующим выражением

$$\sigma_{\text{к. макс}} = 4\pi \frac{(\pi R^2 - L R)^2}{\lambda^2}, \quad (3.7)$$

где  $L$  – ширина металлизированного кольца.

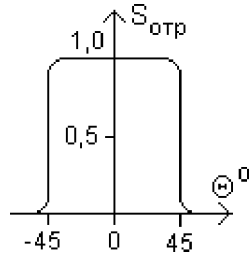


Рис. 3.7. Диаграмма переизлучения линзы Лüneберга

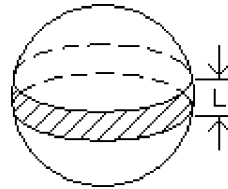


Рис. 3.8. Линза Лüneберга с металлизированным кольцом

Линза с металлизированным кольцом имеет несколько меньшую эффективность, чем линза с секториальным рефлектором. Сравнение выражений (3.6) и (3.7) даёт следующий результат

$$n = \frac{\sigma_{\text{к макс}}}{\sigma_{\text{р макс}}} = \left(1 - \frac{2L}{\pi R}\right). \quad (3.8)$$

Например, если  $L/R = 2$ , то  $n \approx 0,9$ . Следовательно, уменьшение ЭПР линзы с кольцом незначительно.

Ослабление переизлучённого сигнала можно уменьшить, если сплошной металлизированный слой кольца заменить отдельными полосками, наложенными на сферу с небольшим интервалом друг относительно друга под углом  $45^\circ$  к экваториальной плоскости. Поляризационные потери мощности в этом случае при ретрансляции сигналов с различными видами поляризации будут составлять

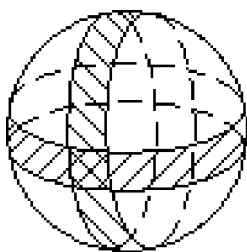


Рис. 3.9. Линза Лунеберга с изотропной диаграммой вторичного излучения

не более шести децибел и могут быть скомпенсированы увеличением размеров линзы.

Для получения изотропной диаграммы вторичного излучения применяют линзы с двумя ортогональными решетчатыми кольцами, как это показано на рис. 3.9.

### 3.4. Переизлучающие антенные решетки

По устройству переизлучающие антенные решетки аналогичны обычным антеннам, применяемым в различных радиоэлектронных системах, но используются в режиме переизлучения принимаемых сигналов (рис. 3.10). Такой режим получается при попарном соединении элементарных излучателей (1-6; 2-5; 3-4) с помощью линий передачи высокочастотной энергии ВЧЛ. Если оба элемента в такой паре ориентированы одинаково, то радиосигналы, принятые одним излучателем, переизлучаются в обратном направлении другим излучателем, и наоборот. Из нескольких аналогичных пар, соединённых линиями ВЧЛ одинаковой электрической длины и закреплённых на экране Э, составляется антенная решетка Ван-Атта.

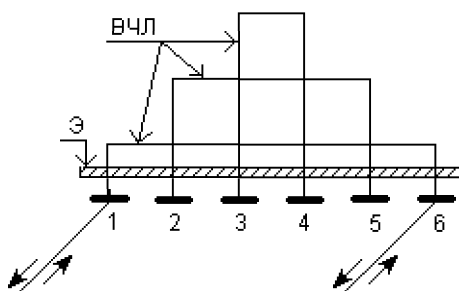


Рис. 3.10. Антенная решётка Ван-Атта

В качестве излучателей в решетках Ван–Атта применяют полуволновые диполи, рупорные, диэлектрические и другие антенны. Падающие и переизлучённые волны проходят одинаковый путь, поэтому максимум диаграммы переизлучения совпадает с направлением прихода волны. По способности фокусировать энергию радиоволн такие решетки подобны трехгранным уголкового радиоотражателям. Максимальная ЭПР такой решетки, составленной из полуволновых диполей, зависит от длины волны  $\lambda$  и количества диполей  $n$  [1]:

$$\sigma_{\text{макс}} = \pi n^2 \frac{\lambda^2}{4}. \quad (3.9)$$

Переизлучаемый сигнал может быть промодулирован по амплитуде фазовращателями, включёнными в фидерные линии, соединяющие диполи. Сигналы в антенной решетке переизлучаются в обратном направлении, если оси диполей совпадают с поляризацией падающей волны. Выбирая излучатели с определённой поляризацией, можно получить решетку с различными поляризационными свойствами. Чаще всего для средств радиопротиводействия решетки рассчитывают на переизлучение радиоволн с любой поляризацией. Для этого диполи располагают на металлическом экране под различными углами. Как правило, каждая пара ориентирована под углом  $90^\circ$  по отношению к соседней паре.

Практически вместо выступающих диполей в таких решетках применяют плоские спирали, нанесённые на диэлектрик методом печати. В этом случае повышается диапазонность решетки, обеспечивается отражение сигналов с любой поляризацией, упрощается технология изготовления, уменьшаются масса и габаритные размеры. Такие решетки имеют более широкую диаграмму рассеяния, чем уголкового радиоотражатели.

Для увеличения интенсивности переизлучаемых сигналов в решетках могут применяться малогабаритные усилители, которые кроме основного назначения используются для формирования сигналов с заданными параметрами с помощью модуляции по амплитуде, фазе или частоте.



Количество излучателей в решетке  $n$ , необходимое для имитации реальных объектов, зависит от габаритных размеров этих объектов и разрешающей способности подавляемой РЛС. Например, для имитации объекта с максимальным линейным размером  $L$  и разрешающей способностью РЛС равной  $\Delta R$

$$n = L/\Delta R. \quad (3.10)$$

При этом средние ЭПР имитируемого и реального объектов должны быть соизмеримыми.

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные требования, предъявляемые к переизлучателям, устанавливаемым на ложные цели.
2. Почему плоские переизлучатели не используют для радиоподавления РЛС?
3. Поясните принцип действия уголковых отражателей радиосигналов.
4. Какие виды уголковых отражателей используют в системах радиоподавления?
5. Назовите методы, которые используют для увеличения сектора переизлучаемых радиосигналов уголковыми отражателями.
6. Какими особенностями обладают уголковые отражатели, снижающими эффективность их действия, и какие методы используют для повышения эффективности?
7. Почему уголковые отражатели с треугольными гранями применяют чаще, чем отражатели других типов?
8. Поясните принцип действия линзы Люнеберга.
9. Какие меры применяют для увеличения сектора переизлучения радиосигналов линзой Люнеберга?
10. В чём заключается принцип действия переизлучающих антенных решёток?
11. Какие методы используют для обеспечения антенными решётками переизлучения радиоволн с любой поляризацией?

## **4. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ**

### **4.1. Общие положения**

От величины эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) защищаемых объектов во многом зависят энергетические соотношения, которые необходимо учитывать при разработке методов и средств создания помех. Уменьшение ЭПР даёт возможность пропорционального уменьшения потребных энергетических потенциалов передатчиков помех, потребного количества дипольных отражателей, потребных ЭПР ловушек и их количества и т. д. Кроме того, при снижении ЭПР объекта сокращается дальность его обнаружения.

Значения ЭПР различных объектов определяют их геометрические формы и электромагнитные свойства отражающих поверхностей; соотношение размеров объекта и длины волны сигналов облучения; взаимное пространственное положение защищаемого объекта и облучающего его средства.

Уменьшение ЭПР наиболее эффективно реализуется на этапе проектирования объекта, т. е. когда с самого начала проектирования ставится задача получения малой ЭПР. Попытки уменьшить ЭПР уже существующих объектов, таких, как самолёты, вертолёты, корабли и т. п., приводят к менее значительным результатам.

За рубежом в последние годы реализуется широкомасштабная программа по созданию боевых средств с низкими демаскирующими признаками во всех диапазонах электромагнитных волн, включая акустический, радиолокационный, инфракрасный, оптический. Программа получила название «Стелс» (stealth – тайно, скрытно). Суть этой программы состоит в разработке технологии снижения ЭПР боевой техники с единиц и десятков до сотых долей квадратных метров. Работы проводятся в направлении совершенствования форм объектов, использования высокоэффективных покрытий, по-

глошающих или рассеивающих энергию электромагнитных волн, применения неметаллических композиционных материалов и др.

По технологии «Стелс» разработаны стратегический бомбардировщик В-2, тактический истребитель F-117А, всепогодный разведчик (фирма «Локхид») и даже патрульный дирижабль. Кроме того, эту технологию предполагается использовать при разработке крылатых ракет, космических летательных аппаратов, надводных и подводных кораблей, автобронетанковой техники и др.

В связи с тем, что радиолокационные станции могут наблюдать ударную волну сверхзвуковых летательных аппаратов на большой дальности, объекты, разработанные по технологии «Стелс», должны двигаться с дозвуковой скоростью.

Определённые трудности при реализации технологии «Стелс» вызывает замена металлических конструкций не отражающими композиционными материалами, основными из которых являются:

- высокая стоимость изготовления;
- недостаточная усталостная прочность;
- высокий коэффициент трения;
- относительно малая термостойкость, в результате чего может происходить выгорание материала на сверхзвуковых скоростях;
- ухудшение экранировки бортового электро- и радиооборудования от внешнего электромагнитного излучения и атмосферного электричества.

#### 4.2. Выбор малоотражающих форм объектов

Расчёты и эксперименты показывают, что наименьшей ЭПР обладают конусные поверхности при облучении их со стороны вершины. Плоские поверхности имеют гораздо большую ЭПР, пропорциональную её площади  $S$  и обратно пропорциональную квадрату длины волны сигналов облучения  $\lambda$

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}. \quad (4.1)$$

Летательные аппараты и другие защищаемые объекты имеют сложную структуру, отражённый от них сигнал представляет собой векторную сумму элементарных полей  $E_i(t)$ , образуемых её отдельными элементами в раскрыве приёмной антенны радиоэлектронного средства на расстоянии  $R$

$$E_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R_i} . \quad (4.2)$$

Наибольший вклад в суммарное поле вносят поля сигналов, образованные зеркальным и резонансным переизлучением и ориентированные в направлении на приёмник подавляемой РЛС (так называемые блестящие точки).

ЭПР различных объектов уменьшают выбором такой формы их элементов, при которой большая часть электромагнитной энергии рассеивается в стороны от направления прихода радиоволн. Это, например, шаровые или конусные поверхности, которые могут снижать ЭПР на несколько порядков. Так, если уголкового отражателя и пластина с поверхностью 1 м в диапазоне сантиметровых волн обладают ЭПР порядка 1300 м<sup>2</sup>, то ЭПР конуса (при облучении со стороны вершины) и шара с такими же поверхностями составляют 0,3 м<sup>2</sup> и 1,0 м<sup>2</sup> соответственно. Замена уголкового перехода на эллиптический позволяет уменьшить ЭПР отражающего элемента примерно в 1000 раз. Для снижения уровня отражённой электромагнитной энергии плоские поверхности часто заменяют гофрированными, трансформирующими зеркальное рассеяние в сторону прихода радиоволны на диффузное.

При разработке конструкций летательных аппаратов для уменьшения их заметности уменьшают площади плоскостей, исключают их пересечение под прямыми углами, заменяют прямые плоскости кривыми, выявляют и устраняют резонирующие элементы, применяют неметаллические композиционные материалы, слабо рассеивающие энергию электромагнитных волн. Воздухозабор-

ники, как правило, размещают наверху и сзади кабины пилотов. Авиабомбы, ракеты, контейнеры с радиоэлектронной аппаратурой (например, средствами РЭБ) размещают внутри планера. Аэродинамическая схема самолётов чаще всего представляет собой так называемое «летающее крыло» и не имеет вертикального оперения. Функцию рулей направления выполняют расщепляющиеся щитки, установленные на концах крыла. Для уменьшения радиолокационной заметности сопла двигателей выполняют плоскими.

В качестве примера на рис. 4.1 приведено схематическое изображение стратегического бомбардировщика В-2, разработанного в США по технологии «Стелс».

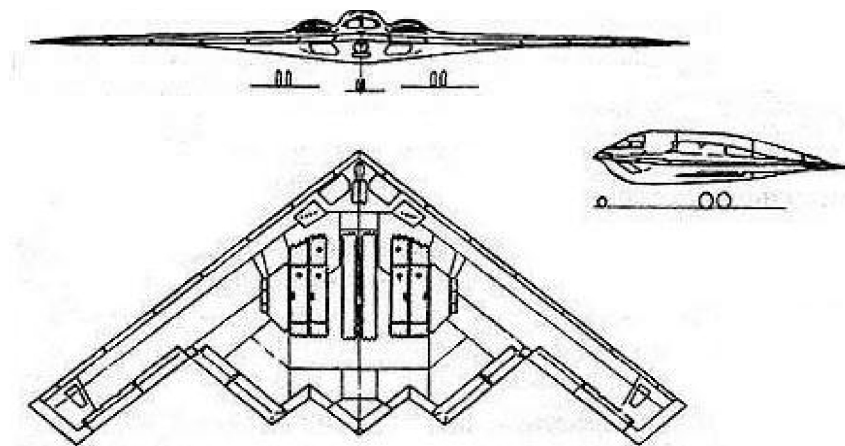


Рис. 4.1. Схематическое изображение бомбардировщика В-2

Планер самолёта построен в основном из титановых и алюминиевых сплавов с широким применением углепластиков. Форма В-2 в плане образована 12 прямыми линиями, что позволяет сконцентрировать все отражения в горизонтальной плоскости в нескольких основных, узких секторах. Использована так называемая «четырёхлепестковая» схема, при которой параллельные передние и задние кромки корпуса и кромки люков, створок ниш шасси и отсеков двигателей, а также обечасок воздухозаборников формируют X – образное расположение четырёх основных секторов отражения

(по два сектора с передней и задней полусфер). С боковых и фронтальных ракурсов самолёт практически не имеет прямых линий и плоских поверхностей. Носок крыла имеет внутреннюю шиповидную радиопоглощающую конструкцию с сотовым заполнителем. Передняя кромка корпуса острая, без изломов, со стреловидностью  $33^\circ$ . Задняя кромка имеет форму двойного W.

Четыре двигателя установлены попарно по обеим сторонам центральной части корпуса. Плавное сопряжение элементов конструкции, минимальное число выступающих элементов и тщательно заделанные щели на внешних поверхностях способствуют изотропному рассеянию облучающих самолёт электромагнитных волн.

Панели остекления кабины пилотов имеют слой с фотореакционной способностью и становятся светонепроницаемыми при световом воздействии ядерного взрыва. Золотосодержащее покрытие остекления не даёт пройти через него радиолокационному излучению.

На наиболее отражающие электромагнитную энергию места корпуса (так называемые «блестящие точки») нанесены противорадиолокационные покрытия.

При сравнительно больших геометрических размерах и значительной массе В-2 (размах крыла составляет 52,4 м, площадь несущей поверхности – около  $480 \text{ м}^2$ , взлётная масса – 81,5 т) эффективная поверхность рассеяния бомбардировщика, по сведениям иностранной печати, не превосходит  $1\text{--}5 \text{ м}^2$ .

#### **4.3. Применение противорадиолокационных покрытий**

ЭПР защищаемых объектов можно уменьшить нанесением на их поверхность противорадиолокационных покрытий. По принципу работы такие покрытия разделяют на поглощающие и интерференционные.

#### *4.3.1. Поглощающие покрытия*

Работа поглощающих покрытий основана на превращении электромагнитной энергии облучающих радиоволн в тепловую. Материал таких покрытий представляет собой диэлектрики с конечной проводимостью. Электромагнитная волна, проникая в диэлектрик, вызывает появление токов проводимости и смещения, которые обуславливают тепловые потери. Толщину покрытия делают больше длины волны облучающего сигнала, поэтому падающая волна теряет значительную часть энергии прежде, чем успеет отразиться от металлической поверхности защищаемого объекта. Отражённая от поверхности объекта волна также ослабляется в поглощающем материале, распространяясь в обратном направлении.

В качестве основы таких покрытий используют стеклотекстолит, пенопласт, различные каучуки. Наполнителями служат магнитные (никель-цинковые ферриты, порошковое карбонильное железо) и немагнитные материалы (порошок графита, угольная и ацетиленовая сажа).

Покрытие хорошо поглощает электромагнитную энергию, если оно согласовано со свободным пространством, т. е. волновое сопротивление на границе «покрытие – свободное пространство» равно волновому сопротивлению свободного пространства. Согласование обеспечивается тем, что внешний слой покрытия выполняют из материала с диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями, близкими к единице. Интенсивность поглощения повышается, если концентрация наполнителя в основе материала увеличивается от внешней поверхности к основанию. Это достигается либо особой технологией пропитки основы поглотителем, либо изготовлением многослойных покрытий, в которых концентрация поглотителя постепенно возрастает (рис. 4.2). Чтобы на границах слоёв не возникало паразитных отражений, не допускается резких изменений  $\epsilon$  и  $\mu$  при переходе от слоя к слою, а также от окружающей среды к покрытию.

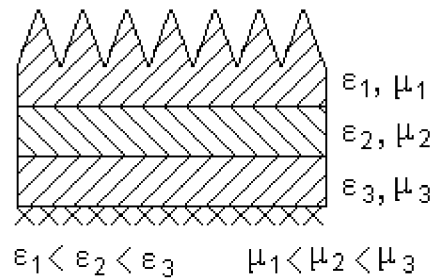


Рис. 4.2. Многослойное поглощающее покрытие

С целью увеличения площади взаимодействия покрытия с падающей электромагнитной волной внешнюю поверхность покрытия часто выполняют в виде шипов, имеющих форму конуса или пирамиды (рис. 4.2). В них электромагнитная волна, последовательно отражаясь от поверхности шипов, значительно больше соприкасается с покрытием и интенсивнее поглощается. Некоторые шиповидные покрытия снижают интенсивность отражения радиоволн в сантиметровом диапазоне на 90% и более. Интенсивность поглощения зависит от геометрических характеристик шиповидной отражающей поверхности. Это наглядно видно из рис. 4.3, на котором показано два варианта поверхностей: с углом между гранями шипов  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 4.3, а) и  $\varphi = 45^\circ$  (рис. 4.3, б).

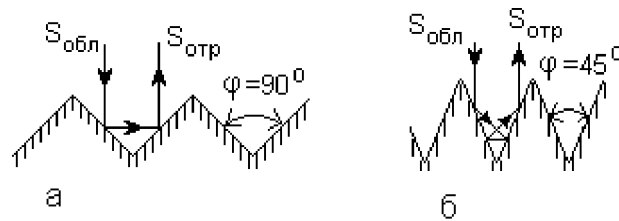


Рис. 4.3. Варианты шиповидных отражающих поверхностей

Некоторые типы поглощающих материалов снижают интенсивность отражения электромагнитной энергии не только в радиодиапазоне, но и энергии световых волн. Это уменьшает вероятность обнаружения и поражения военной техники оружием с опти-



ко-электронными и оптическими системами наведения. В войсках применяются маскирующие покрытия с диффузным рассеянием энергии инфракрасного и видимого излучений, а военная техника окрашивается составами, уменьшающими контраст на фоне земной поверхности или неба, что снижает дальность визуального и оптического обнаружения примерно на 30%.

Для личного состава разрабатывают образцы полевого обмундирования и накидок, имеющие камуфляжную покраску, снижающую дальность обнаружения не только визуальными, но и инфракрасными средствами. В основном при камуфляжном окрашивании применяют три цвета: зелёный, коричневый и чёрный. Сочетание этих цветов обеспечивает в 1,5–2 раза снижение вероятности визуального обнаружения по сравнению с одноцветной окраской [3]. Поглощающими и рассеивающими электромагнитную энергию веществами покрывают также каски личного состава.

#### 4.3.2. Интерференционные покрытия

Такие покрытия уменьшают ЭПР защищаемого объекта за счёт взаимного ослабления радиоволн, отражённых от границы раздела «свободное пространство – материал покрытия» и от границы раздела «материал покрытия – поверхность объекта». На рис. 4.4, иллюстрирующем принцип действия интерференционных покрытий, обозначено: ① – свободное пространство; ② – материал

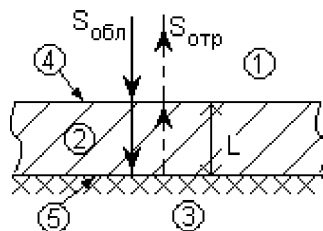


Рис. 4.4. К пояснению принципа действия интерференционных покрытий

покрытия; ③ – защищаемый объект; ④ – граница раздела «свободное пространство – материал покрытия»; ⑤ – граница раздела «материал покрытия – поверхность объекта».

Материал и толщину покрытия выбирают так, чтобы волны, отражённые от границ разделов,

складывались в противофазе (интерференция облучающей  $S_{\text{обл}}$  и отражённой  $S_{\text{отр}}$  радиоволн), ослабляя суммарную отражённую волну. Для этого толщина покрытия должна удовлетворять следующему условию:

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, n = 0, 1, 2 \dots \quad (4.3)$$

Так как характеристики интерференционных покрытий связаны с длиной облучающей волны, то они эффективны в сравнительно узком участке диапазона радиоволн. Для расширения полосы рабочих частот такие покрытия делают многослойными.

При введении в интерференционные покрытия ферромагнитных веществ с примесью сажи добиваются того, что они обладают и поглощающими свойствами.

Качество интерференционных покрытий характеризуют долей отражённой от них энергии  $P_{\text{отр}}$ . Эта доля зависит от угла падения волны  $\varphi$ . На рис. 4.5 показана такая зависимость  $P_{\text{отр}}, \% = f(\varphi^\circ)$  для одного из типов применяемых для защиты летательных аппаратов покрытия [1].

Противорадиолокационные покрытия должны работать в широком диапазоне температур, повышенной влажности, обладать высокими механическими свойствами, устойчивостью к воздействию ско-

ростного набегающего воздушного потока. Наиболее совершенные материалы должны поглощать не менее 99 % мощности падающих радиоволн [3].

Общим недостатком противорадиолокационных покрытий всех типов является относительно большие масса и габариты. Особенно это относится к широкодиапазонным, многослойным по-

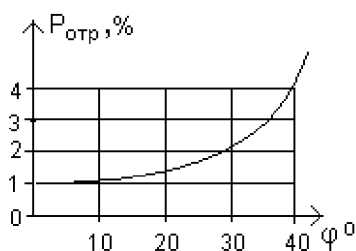


Рис. 4.5. Зависимость отражённой от интерференционного покрытия энергии от угла падения электромагнитной волны

крытиям. Кроме того, такие покрытия могут снижать аэродинамические характеристики защищаемых летательных аппаратов. В связи с этим покрытия наносят в основном на те места и элементы, которые в наибольшей степени отражают электромагнитную энергию («блестящие точки»). Это стыки и резкие переходы, действующие как угловые радиоотражатели, узкие кромки крыла и воздухозаборников, участки поверхности малой кривизны, например нижняя часть фюзеляжа самолёта, носовые части самолётов и ракет и др.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что даёт уменьшение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) защищаемых объектов?
2. Какие факторы определяют ЭПР реальных объектов?
3. Назовите основные направления разработки технологии «Стелс».
4. Перечислите трудности, возникающие при замене металлических конструкций защищаемых объектов композиционными материалами.
5. Какие формы отражающих поверхностей имеют наименьшую ЭПР?
6. На каком эффекте основана работа поглощающих противорадиолокационных покрытий?
7. Какими методами можно увеличить эффективность работы поглощающих покрытий?
8. Поясните принцип действия интерференционных покрытий?
9. На какие части защищаемых объектов наносят противорадиолокационные покрытия?

## 5. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СРЕДЫ РАПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

### 5.1. Ионизирующие излучения

Состояние ионизации атмосферы определяет условия распространения электромагнитных волн. При повышении электронной концентрации изменяются скорость распространения, условия отражения, преломления и поглощения волн, что оказывает существенное влияние на работу радиоэлектронных средств различного назначения. Поэтому умышленные локальные изменения ионизации атмосферы относят к методам пассивного радиоподавления.

Концентрацию электронов в атмосфере можно значительно увеличить при высотных ядерных взрывах, вызывающих ионизацию газов атмосферы, а также при сжигании легко ионизирующихся элементов (например, частиц цезия). Ионизация происходит под действием быстро движущихся элементарных частиц (нейтронов, альфа- и бета-частиц) и в результате ионизирующего излучения (гамма- и рентгеновских лучей).

Уровень ионизации, вызванной ядерным взрывом, возрастает с увеличением высоты, так как при этом снижается плотность частиц в газах, свободные электроны реже сталкиваются с ионами и, следовательно, рекомбинируют менее интенсивно. Концентрация электронов остаётся высокой до тех пор, пока вследствие рекомбинации электронов с ионами и взаимодействия с нейтральными частицами восстановится нормальная плотность ионизации. Ядерные взрывы на высотах 400–500 км образуют слой с повышенной ионизацией толщиной около 100 км. Нормальная плотность ионизации восстанавливается по истечении длительного времени после ядерного взрыва. Так, после высотного ядерного взрыва мощностью 1 Мт нормальная ионизация атмосферы восстанавливается только через несколько часов или даже суток.

Известно, что пространственные радиоволны распространяются на большие расстояния в своеобразном сферическом волноводе,

образованном нижней границей ионосферы и поверхностью Земли [18]. Дальность распространения таких радиоволн  $R_{\text{макс1}}$  (сплошная линия на рис. 5.1) определяется высотой нижней границы ионосферы  $h_1$ , от которой они отражаются. При отражении они испытывают сильное поглощение. Дополнительная ионизация, вызванная ядерным взрывом, смещает вниз нижнюю границу слоя ионизации  $h_2$ , что приводит к уменьшению длины пути (пунктирная линия на рис. 5.1), а следовательно, и дальности распространения радиоволн  $R_{\text{макс2}}$ .

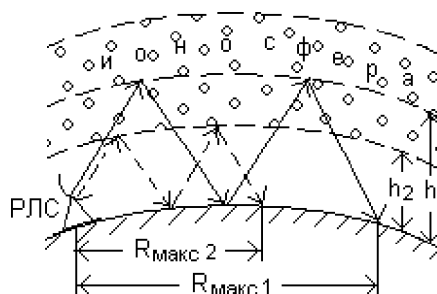


Рис. 5.1. Зависимость дальности распространения радиоволн от высоты ионосферы

Прямые и поверхностные волны, использующиеся в радиолокации, радионавигации, радиоуправлении, при прохождении через область ядерного взрыва значительно ослабляются. Кроме того, искривляется фронт волны, поскольку в ионизированных областях диэлектрическая и магнитная проницаемости отличаются от нормальных (рис. 5.2). Всё это искажает информацию о координатах целей, приводит к ошибкам наведения управляемого оружия.

Ионизирующие излучения высотных ядерных взрывов могут существенно ухудшить параметры и даже вывести из строя радиоэлектронную аппаратуру вследствие изменения физических и химических свойств её элементов. Под действием радиоактивного излучения изменяются ёмкости конденсаторов, сопротивления резисторов, параметры полупроводниковых приборов и электронных ламп.

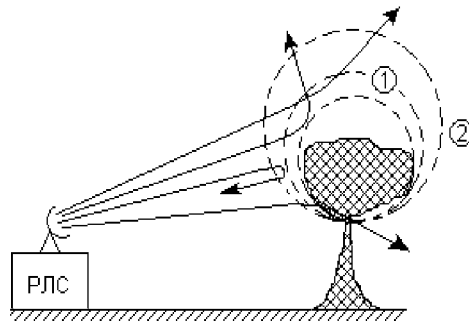


Рис. 5.2. Прохождение радиолучей через области ядерного взрыва:  
① – ионизированная область; ② – область радиолокационной тени

В процессе ядерных взрывов одновременно с ионизирующим излучением образуются кратковременные электромагнитные импульсы вследствие взаимодействия гамма-лучей с молекулами воздуха атмосферы. Такие импульсы излучаются в широком диапазоне электромагнитных волн в течение нескольких микросекунд, имея высокую плотность потока мощности, достигающую  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Распространяясь в атмосфере, по грунту, проводным линиям связи, линиям электропередачи, газопроводам и т. п., импульсы наводят в них большие токи и напряжения. Токи наводятся также в антенных устройствах и элементах радиотехнических систем. Эти токи способны плавить провода, пробивать изоляцию, повреждать детали, а иногда и поражать обслуживающий персонал.

Ионизация атомов и молекул атмосферы может возникать от действия раскалённых газов, выбрасываемых работающими реактивными двигателями летательных аппаратов. Струя ионизированного выхлопного газа (плазмы) изменяет ЭПР самолёта или ракеты. Энергия сигналов облучающей РЛС системы наведения управляемого оружия отражается одновременно от сопровождаемого объекта Ц и от реактивной струи РС, находящихся в пределах раскрытия диаграммы направленности антенны  $\Theta$  (рис. 5.3). В результате сложения отражённых сигналов на входе приёмника РЛС получается суммарный сигнал, энергетический центр которого в картин-

ной плоскости диаграммы направленности антенны ЭЦ<sub>Σ</sub> находится между энергетическими центрами сигналов, отражённых от объекта Ц и струи РС (рис. 5.4).

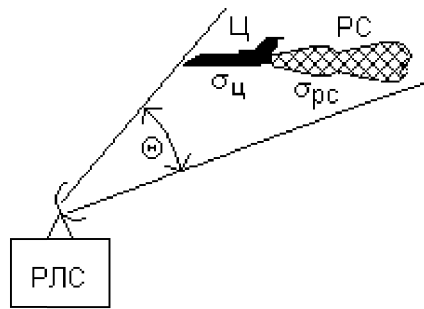


Рис. 5.3. Влияние реактивной струи на сопровождение цели

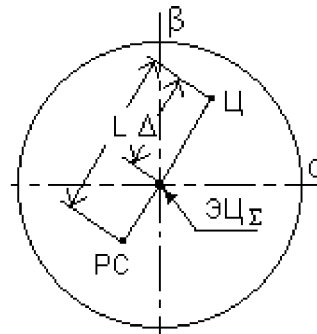


Рис. 5.4. Положение энергетических центров цели Ц, реактивной струи РС и суммарного центра ЭЦ<sub>Σ</sub> в картинной плоскости диаграммы направленности антенны

Смещение кажущегося центра вторичного излучения означает, что РЛС системы наведения будет определять координаты сопровождаемого объекта с ошибкой  $\Delta$ . Смещение энергетического центра суммарного сигнала определяет следующее соотношение:

$$\Delta = L \frac{\sigma_{рс}}{\sigma_{ц} + \sigma_{рс}}, \quad (5.1)$$

где  $L$  – расстояние между эпицентрами отражения сопровождаемого объекта (цели) и струи в картинной плоскости;  $\sigma_{ц}$  и  $\sigma_{рс}$  – соответственно ЭПР цели и струи.

Ошибка сопровождения  $\Delta$  будет тем больше, чем больше соотношение ЭПР реактивной струи  $\sigma_{рс}$  к ЭПР цели  $\sigma_{ц}$ .

ЭПР струи зависит от количества и распределения в ней свободных электронов. На образование свободных электронов основное влияние оказывают натрий, калий, цезий, обычно в незначительных количествах имеющиеся в топливах двигателей. Для уве-

личения концентрации свободных электронов в топливо двигателей добавляют алюминий. Газообразный алюминий с потенциалом ионизации 5,98 эВ непосредственно освобождает весьма мало электронов, однако он резко повышает температуру горения, а концентрация свободных электронов с увеличением температуры возрастает по экспоненциальному закону. Таким образом, изменяя давление в камере сгорания, содержание алюминия и примесей калия или натрия в топливе либо вводя в него добавки, способные уменьшать степень ионизации газа в струе, можно управлять величиной эффективной отражающей поверхности струи.

Если следящая РЛС расположена в задней относительно сопровождаемого объекта полусфере (в секторе около  $40^\circ$ ), возможно уменьшение общей отражающей поверхности струи и объекта. В этом случае падающая на струю из задней полусферы электромагнитная волна глубоко проникает внутрь плазменной области и может потерять значительную часть энергии, прежде чем отразится от поверхности объекта. Следовательно, в такой ситуации реактивная струя может выполнять роль поглощающей среды, т. е. является своеобразным экраном для радиосигналов.

## **5.2. Аэрозольные образования**

Пассивное противодействие с помощью аэрозольных образований осуществляют в основном для защиты наземных и надводных объектов от поражения ракетами и авиабомбами с высокоточными оптико-электронными средствами наведения. Однако уже ряд лет исследуются возможности защиты аэрозольными образованиями летательных аппаратов [3, 7].

Аэрозоли применяются как для групповой, так и для индивидуальной защиты объектов и представляют собой особый тип рассеиваемых веществ, отличающихся тем, что они образуют газообразные облака частиц, способных отражать, поглощать или преломлять электромагнитную энергию в диапазонах ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных волн.



Аэрозольные образования в виде облаков, полос или завес создаются из белого или красного фосфора, нефти, эпоксидных, фенольных, полиэтиленовых смол и других пенообразующих высокомолекулярных веществ. Определённую форму образований из аэрозолей получают распылением их частиц в потоке горячих газов, полимеризацией паров в холодном воздухе или образованием в воздухе пенопласта во взвешенном виде. Для защиты от систем наведения оружия, работающего в диапазоне миллиметровых волн, частицы могут представлять собой очень тонкие вытянутые проводники, тонкие графитовые нити или другие материалы. Хорошими поглощающими свойствами обладает дымообразующее вещество, полученное из четырёххлористого титана. В зависимости от состава компонентов частицы, образующие аэрозольные образования, могут иметь диаметр от одного до 100 мкм. Считается, что для образования аэрозольного облака, обеспечивающего затухание излучений инфракрасных и лазерных средств примерно в 80 раз, необходимо на площади 600 м<sup>2</sup> распылить около 400 г аэрозольных частиц.

Создаются аэрозольные образования с помощью специальных аэрозольных генераторов, шашек, ракет, снарядов, гранатомётных установок и других средств. Основное внимание при разработке методов такой защиты должно уделяться скоростному развертыванию требуемых образований. Время развёртывания не должно превышать нескольких секунд (5–7 с). Полосы аэрозольных образований для защиты атакующих летательных аппаратов могут формироваться заранее, в соответствии с планами боевой операции. Иногда для защиты летательных аппаратов в форсажную камеру двигателей вводят аэрозольное вещество, которое смешиваясь с выпускными газами, образует плазму, ослабляющую энергию лазерного облучения ГСН ракеты.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Вспомните, как влияет состояние атмосферы на условия распространения радиоволн.
2. Какие воздействия могут оказать ядерные взрывы на характеристики ионосферы и на параметры радиоаппаратуры?
3. В чём заключается эффект воздействия ионизированных выхлопных газов реактивных двигателей на работу радиолокационных станций?
4. Какие методы позволяют увеличить ЭПР струи выхлопных газов реактивных двигателей защищаемых летательных аппаратов?
5. Поясните методы создания аэрозольных образований и эффект воздействия таких помех на средства наведения управляемого оружия.

## **6. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ РАДИОПОДАВЛЕНИЯ**

### **6.1. Общие положения**

Комплексное использование методов активного и пассивного радиоподавления средств управления оружием позволяет значительно повысить эффективность защиты различных объектов, в том числе и летательных аппаратов. Оптимизация параметров комплексирования осуществляется с помощью специальных программирующих и вычислительных устройств бортового комплекса защиты.

На вход программирующего устройства поступает информация от различных датчиков, включая приёмник предупреждения об облучении, датчик фиксирующий момент пуска противником ракеты, навигационные устройства, обеспечивающие данными о лётных параметрах защищаемого и атакующих объектов, анализаторы сигналов облучения и др. Одновременно на пункт сбора информации поступают с устройств памяти сведения о типовых средствах угрозы. Всё это совместно обрабатывается бортовой ЭВМ. В результате оценивается степень угрозы различных объектов, определяются приоритеты подавления, формируется оптимальный комплекс активных помех, вырабатывается программа выброса дипольных отражателей, запуска ловушек или других пассивных средств с учётом их наличия на защищаемом объекте.

Одним из наиболее перспективных видов комплексирования является создание перенацеливающих помех, которые формируются пассивными отражателями при облучении их сигналами передатчиков активных помех. Возможны различные варианты создания перенацеливающих помех. Рассмотрим некоторые из них.

## 6.2. Перенацеливание на подстилающую поверхность

Развитие зенитного радиоуправляемого ракетного оружия привело к тому, что преодоление летательными аппаратами противовоздушной обороны (ПВО) на средних и больших высотах значительно усложнилось и в тактике боевого применения авиации значительное место стало отводиться отработке методов прорыва системы ПВО на малых и предельно малых высотах [13]. Такая тактика позволяет добиться скрытности подхода к атакуемым целям, внезапности нападения.

Соответственно изменились и методы использования активных средств ПВО. Для поражения ЛА при движении его на малых высотах запуск самонаводящихся ракет наземного базирования стал осуществляться под большими углами к горизонту, с последующим пикированием их на цель. Однако в этом случае в растровой диаграмме направленности антенны головки самонаведения (ГСН) ракеты Р кроме сигналов, отраженных от цели Ц, попадают сигналы отраженные от участков подстилающей поверхности (земной или водной), как это показано на рис. 6.1, которые могут маскировать сигналы, отраженные от цели.

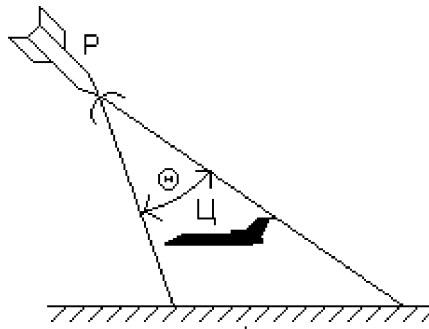


Рис. 6.1. Наведение ракеты на низколетящую цель

В ГСН, работающей в режиме непрерывного излучения, обычно используют устройства, осуществляющие селекцию целей по скорости, которые исключают захват на сопровождение сигнала

лов, отраженных от неподвижных объектов, в нашем случае от земной или водной поверхности. Однако, если с помощью аппаратуры, размещенной на защищаемом объекте, осуществить облучение подстилающей поверхности активными помехами ретрансляционного типа, то различие в параметрах сигналов, отраженных от цели Ц и подстилающей поверхности, будет незначительным и ГСН может перейти на сопровождение сигналов, отражённых от поверхности. Рисунок 6.2 поясняет принцип создания таких помех.

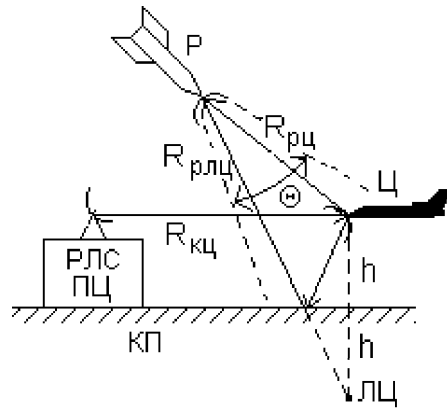


Рис. 6.2. Принцип создания перенацеливающих помех типа «антипод»

Радиолокационная станция подсвета цели РЛС ПЦ, расположенная на командном пункте КП, производит облучение цели Ц. По сигналам, отражённым от цели, осуществляется наведение ракеты Р на цель. Аппаратура защищаемого объекта принимает сигналы облучения, усиливает их и переизлучает на подстилающую поверхность. Сигналы, отраженные от облучаемой поверхности, будут имитировать ложную цель ЛЦ, направление на которую может значительно отличаться от направления на защищаемый объект. Это эквивалентно вынесенному дополнительному передатчику помех, зеркально расположенному относительно подсвечиваемой поверхности, поэтому такую помеху называют помехой типа «антипод».

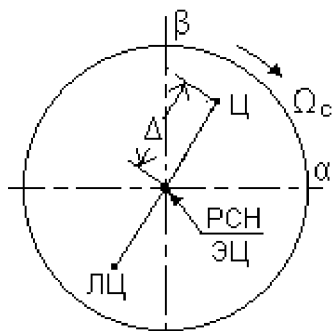


Рис. 6.3. Положение целей Ц и ЛЦ, равносигнального направления РСН и энергетического центра ЭЦ в картинной плоскости диаграммы направленности антенны

Механизм воздействия такой помехи рассмотрим на примере работы полуактивной системы самонаведения, использующей амплитудно-фазовый метод пеленгации, в котором равносигнальное направление (РСН) формируется за счёт конического сканирования диаграммы направленности антенны [6]. На рис. 6.3 показано положение защищаемого летательного аппарата Ц и ложной цели ЛЦ в картинной плоскости, т. е. плоскости, перпендикулярной РСН. Окружность на рисунке представляет собой след точки, соответствующей максимуму сканирующей симметричной диаграммы направленности антенны. Оба источника вторичного излучения Ц и ЛЦ находятся в пределах апертуры пеленгационной характеристики ГСН и не разрешаются по угловым координатам. Центр окружности соответствует положению РСН.

Система автоматического сопровождения по направлению ГСН в этом случае может перейти на сопровождение так называемого энергетического центра двухточечного источника сигнала (ЭЦ), образованного на входе системы двумя целями, не разрешаемыми по угловым координатам. Ошибка сопровождения защищаемого объекта будет определяться расстоянием  $\Delta$  между ЭЦ и Ц. По мере сближения может наступить угловое разрешение источников излучения и, при соответствующей энергетике помехового сигнала,

произойти перенацеливание системы самонаведения на подстилающую поверхность.

Положение энергетического центра и характеристики отраженных сигналов зависят от параметров системы формирования ретрансляционной помехи, параметров системы самонаведения оружия поражения, взаимного положения и динамики перемещения всех объектов в пространстве, отражающих свойств подстилающей поверхности и ряда других факторов.

Рассмотрим основные требования, которые необходимо выполнить при создании помехи типа «антипод».

Первое требование состоит в том, чтобы уровень сигнала ложной цели на входе подавляемого приёмника ГСН ракеты превосходил уровень сигнала непосредственно отражённого от защищаемого объекта. Величина отраженного подстилающей поверхностью сигнала определяется площадью его формирования, интенсивностью облучающей энергии и коэффициентом отражения. Размеры переотражающей площадки на подстилающей поверхности зависят от ширины диаграммы направленности облучающей антенны передатчика помех, как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях. В свою очередь, мощность сигнала от ложной цели на входе подавляемого приёмника будет определяться размерами области перекрытия, образуемой наложением диаграмм направленности антенны пеленгатора ГСН и антенны передатчика помех. Размеры этой области будут изменяться при изменении дальности между пеленгатором и отражающей площадкой.

Коэффициент отражения радиосигналов от различных поверхностей существенно зависит от угла визирования, длины волны сигналов облучения, типа и физико-химических характеристик подстилающей поверхности [17].

Условия формирования отражённых сигналов от таких протяжённых объектов, как земная или водная поверхность, значительно отличаются от условий формирования сигналов при отражении от точечных целей, т. е. объектов взаимодействия, угловые размеры

которых значительно меньше ширины диаграммы направленности антенны передатчика, облучающего объект.

Как известно, отражение радиоволн обусловлено тем, что любой физический объект, находящийся на пути распространения радиоволн, будет представлять для них среду с другими значениями магнитной и диэлектрической проницаемости по отношению к первичной среде. Вследствие этого на границе раздела двух сред волны отражаются и преломляются. При этом часть энергии облучающей волны возвращается в первую среду, а часть её преломляется и переходит во вторую среду. Таким образом, любой объект, отражающий радиоволны, можно представить в виде источника вторичного излучения.

Характер отражения радиоволн от протяжённой поверхности определяется прежде всего соотношением между длиной радиоволны  $\lambda$  и размерами неровностей отражающей поверхности. Если линейный размер  $d$ , характеризующий максимальную неровность поверхности, много меньше длины волны  $d \ll \lambda$ , поверхность является для данного излучения гладкой, зеркальной и отражение от неё происходит по законам геометрической оптики: угол падения равен углу отражения (рис. 6.4, а). Если размеры неровностей поверхности сравнимы с длиной волны  $d \sim \lambda$ , поверхность является для данного излучения шероховатой, а отражение от неё происходит диффузно, равномерно во всех направлениях, как это показано на рис. 6.4, б. Интенсивность отражённого сигнала не зависит от угла приёма радиоволн.

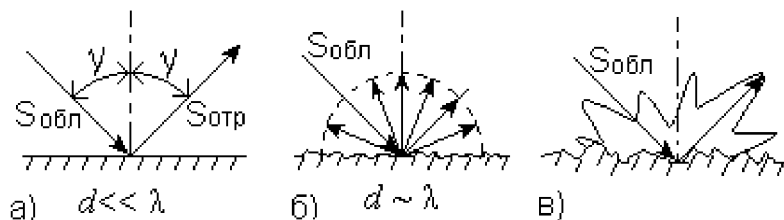


Рис. 6.4. Виды отражающих поверхностей:  
а – зеркальная; б – диффузная; в – реальная



Реальная земная или водная поверхность представляет собой весьма сложный отражающий объект, который нельзя отнести ни к одному из рассмотренных видов поверхностей. На ней имеются неровности с размерами много больше длины волны, но они сами имеют неровности, для которых  $d < \lambda$  и  $d \sim \lambda$ . В общем случае такую поверхность можно представить в виде модели, состоящей из совокупности большого числа независимых и случайно расположенных отражающих элементов. Каждым элементом рассеивается часть падающей на него энергии. Следствием этого, а также в результате пространственной интерференции радиоволн, отражённых от различных элементов поверхности, формируется сложная многолепестковая диаграмма вторичного излучения, показанная на рис. 6.4, в. Форма такой диаграммы имеет случайный характер и зависит от направления облучения. Кроме того, на неё накладываются острые лепестки отражений от таких объектов, размеры которых кратны нечётному числу полуволн

$$d = (2n + 1) \lambda / 2; n = 0, 1, 2, \dots$$

В этом случае отражающий объект может играть роль полуволнового вибратора и может возникнуть достаточно интенсивное вторичное резонансное излучение.

Интенсивность вторичного излучения зависит также от вида подстилающей поверхности. Так, лесной массив в большей степени рассеивает падающую на него электромагнитную энергию, чем пашня, песчаная пустыня или водная поверхность.

Кроме того, необходимо учитывать погодные условия и сезонные изменения подстилающей поверхности. Минимальные потери переотражённого сигнала наблюдаются зимой из-за снежного покрова. Ослабление переотражённого сигнала увеличивается по мере таяния снега и увеличения травяного покрова поверхности. Типовые сезонные изменения коэффициента отражения радиоволн сантиметрового диапазона от земной поверхности для средней полосы России показаны на рис. 6.5 [8].

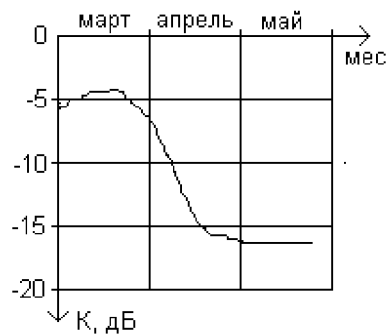


Рис. 6.5. Сезонные изменения коэффициента отражения

Для сравнения количественных характеристик сигналов, отражённых от различных поверхностей, вводят понятие коэффициента отражения  $k_{отр}$ , который равен отношению мощности, переизлучённой в данном направлении  $P_{отр}$ , к мощности, которую переизлучал бы идеально отражающий изотропный излучатель  $P_{отр.и}$

$$k_{отр} = P_{отр} / P_{отр.и}.$$

Характерной особенностью морской поверхности является то, что её рассеивающая способность сильно зависит от её состояния и с увеличением волнения возрастает. Кроме того, элементы такой поверхности, отражающие радиоволны, непрерывно перемещаются ветрами и течениями. Это может привести к дополнительному доплеровскому приращению частоты отражённых сигналов.

Необходимый энергетический потенциал передатчика помех  $\mathcal{E}_п$  можно определить следующим образом

$$\mathcal{E}_п = P_{пп} G_{пп} \geq K_п P G \frac{\sigma_ц}{4\pi R_{кц}^2 k_{отр}} \left( \frac{R_{рлц}}{R_{рц}} \right)^2, \quad (6.1)$$

где  $P_{пп}$  – мощность передатчика помех;  $G_{пп}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $K_п$  – минимальный коэффициент подавления;  $P$  – мощность передатчика РЛС подсвета цели;  $G$  – коэффициент усиления антенны РЛС подсвета цели;  $\sigma_ц$  – эффективная поверхность рассеяния цели;  $k_{отр}$  – коэффициент потерь сигнала помехи при его отражении от подстилающей поверхности;  $R_{кц}$  – расстояние между РЛС подсвета цели и целью;  $R_{рлц}$  – расстояние между ракетой и ложной целью;  $R_{рц}$  – расстояние между ракетой и целью.

Полный коэффициент усиления ретрансляционного тракта станции помех  $K_{yc}$  определяет следующее соотношение:

$$K_{yc} \geq K_{\pi} \frac{4\pi\sigma_{ц}}{\lambda^2 k_{отр}} \left( \frac{R_{рлц}}{R_{рц}} \right)^2, \quad (6.2)$$

$\lambda$  – длина волны сигналов облучения цели.

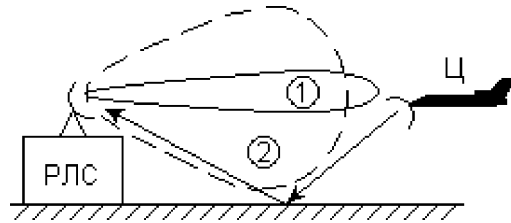


Рис. 6.6. Влияние формы диаграммы направленности приёмной антенны подавляемой РЛС на параметры перенацеливающих помех

Значительную роль в применении перенацеливающих помех играют форма и ориентация основного лепестка диаграммы направленности антенны подавляемой РЛС (рис. 6.6). Вероятность попадания подсвеченной поверхности в пределы основного лепестка для веерной диаграммы ② гораздо больше, чем для остронаправленной диаграммы ①. При отклонении траектории движения защищаемого летательного аппарата от предельно низких высот может оказаться, что ГСН сопровождает цель главным лепестком антенны с остронаправленной диаграммой. В этом случае перенацеливающая помеха может быть эффективна при воздействии её через боковые лепестки приёмной антенны подавляемой РЛС, однако для этого требуется дополнительное увеличение мощности переотражённого сигнала помехи за счёт увеличения мощности передатчика помех и направленности передающей антенны, через которую излучаются сигналы в сторону подстилающей поверхности.

Для более эффективного воздействия помеховых сигналов на канал автоматического сопровождения по скорости ГСН необхо-

димо осуществлять модуляцию ретранслируемых сигналов по частоте в диапазоне возможных отклонений доплеровских приращений частоты сигналов, отражённых от подстилающей поверхности и от защищаемого объекта.

Энергию отражённых сигналов можно увеличить, если на подстилающую поверхность вдоль трассы планируемого полёта заранее рассеять дипольные отражатели. Такую операцию осуществляют с помощью беспилотных ЛА, специальных ракет, артиллерийских или миномётных снарядов.

Другое требование заключается в том, что на входе подавляемого приёмника ГСН уровень сигнала помехи, поступающей непосредственно от передатчика помех, должен быть меньше уровня сигнала помехи, переотражённого подстилающей поверхностью. Это требование определяет допустимый уровень паразитного излучения передающей антенны станции помех в направлении на подавляемый приёмник относительно уровня сигнала помехи, излучаемого в направлении подстилающей поверхности

$$\frac{G_{\text{пп}}}{G_{\text{пп}}'} \geq \frac{R_{\text{рлц}}^2}{R_{\text{рц}}^2 k_{\text{отр}}} \mu, \quad (6.3)$$

где  $G_{\text{пп}}'$  – коэффициент усиления антенны передатчика помех в направлении ГСН;  $\mu$  – коэффициент, определяющий допустимую величину превышения помехой уровня проникающего сигнала на входе подавляемого приёмника.

Для реализации этого требования необходимо иметь передающую антенну станции помех с малым уровнем боковых лепестков, чтобы сигналы, излучаемые через боковые лепестки в направлении подавляемой РЛС, были значительно меньше, чем сигналы, отражённые от защищаемого объекта. Это накладывает жёсткие требования к конструкции передающей антенны и размещению её на объекте. При размещении антенны на защищаемом объекте желательно использовать экранирующее действие фюзеляжа летательного аппарата.

## 6.2. Перенацеливание на облака и полосы дипольных отражателей

Для увеличения эффективности защиты высоколетящих объектов с помощью дипольных отражателей используют ретрансляцию сигналов облучения в сторону облаков или заранее созданных полос таких отражателей. Механизм воздействия таких помех аналогичен перенацеливанию на земную или водную поверхность. Различие заключается в другой пространственной ориентации переизлучаемых сигналов. Все энергетические требования, необходимые для создания помехи типа «антипод», должны быть выполнены и при реализации перенацеливания на облака или полосы дипольных отражателей.

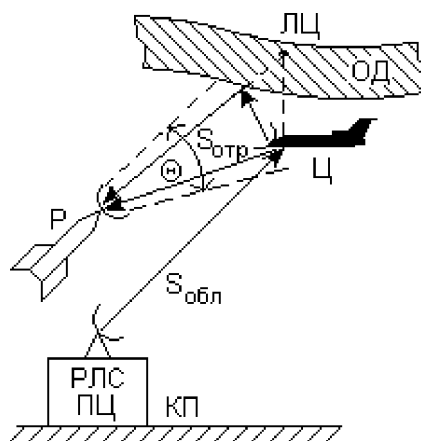


Рис. 6.7. Принцип активного перенацеливания ракеты на облако дипольных отражателей

В системах полуактивного наведения оружия облучение цели Ц осуществляет радиолокационная станция подсвета цели РЛС ПЦ (рис. 6.7). Отражённые от цели сигналы содержат информацию, необходимую для управления ракетой Р в процессе её наведения на цель. Аппаратура, размещённая на защищаемом объекте, принимает сигналы облучения  $S_{обл}$  и ретранслирует их с усилением в на-

правлении облаков или полос дипольных отражателей ОД, формируя тем самым сигналы ложной цели ЛЦ, направление на которую не должно совпадать с линией визирования ракета – цель. Однако оба источника сигналов должны находиться в пределах раствора диаграммы направленности  $\Theta$  приёмной антенны ГСН ракеты Р. Система наведения в этом случае будет сопровождать энергетический центр суммарного сигнала.

Создавая на входе приёмника ГСН ракеты значительное энергетическое превышение сигналов ложной цели по отношению к сигналам истинной цели, можно вызвать большие ошибки наведения. При наступлении разрешения целей Ц и ЛЦ по угловым координатам в процессе сближения, система самонаведения может перейти на сопровождение ложной цели.

Рассмотрим один из вариантов оптимального комплексирования активных и пассивных средств радиоэлектронной защиты летательных аппаратов.

Предположим, что РЛС наведения управляемого оружия сопровождает защищаемый объект по угловым координатам. Создавая активные помехи такой РЛС (например, создавая уведящую помеху по скорости или по дальности [4]), можно нарушить режим сопровождения. Факт срыва сопровождения может быть зафиксирован анализатором облучения комплекса РЭБ защищаемого объекта по резкому уменьшению амплитуды сигналов облучения или по изменению других параметров этих сигналов.

РЛС, сопровождающая объект, в этом случае переходит в режим повторного поиска и захвата цели. Для этого обычно диаграмма направленности антенны начинает перемещаться в пространстве в пределах нескольких градусов по азимуту и углу места. В этот момент на устройство сброса дипольных отражателей подаётся команда сброса пачек диполей с темпом, который будет вызывать след, состоящий из дипольных дискретных образований, в каждом радиолокационном элементе разрешения по дальности. Диполи сбрасываются до тех пор, пока не прекратится приём сигналов об-

лучения анализатором, что свидетельствует о прекращении сопровождения защищаемого объекта.

Эффект действия такого способа создания помех усиливается, если защищаемый объект производит манёвр при срыве сопровождения.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие задачи позволяет решать комплексирование активных и пассивных методов радиоподавления?
2. Поясните принцип создания помех, перенацеливающих самонаводящуюся ракету на подстилающую поверхность.
3. Расскажите об основных требованиях, которые необходимо выполнять при создании помех типа «антипод».
4. Какие факторы влияют на условия отражения радиоволн от подстилающей поверхности?
5. Что характеризует коэффициент отражения радиосигналов от подстилающей поверхности?
6. Как влияет на эффективность перенацеливающих помех форма и ориентация диаграммы направленности антенны подавляемой РЛС?
7. Перечислите методы, позволяющие увеличить эффективность помех, перенацеливающих на подстилающую поверхность.
8. В чём заключаются требования, предъявляемые к конструкции антенны передатчика помех?
9. Расскажите о принципе создания и эффективности воздействия помех, перенацеливающих самонаводящиеся ракеты на облака дипольных отражателей.

## **7. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ**

Развитие средств радиоэлектронного подавления (РЭП) осуществляется в тесном взаимодействии с развитием радиолокационной техники и характеризуется постоянной технической и научной конфронтацией. Любое совершенствование радиолокационной техники, связанное с повышением её эффективности, надёжности и помехоустойчивости, вызывает ответную реакцию в области РЭП. Разрабатываются новые методы и технические средства, ориентированные на компенсацию или полное устранение преимуществ прогрессивной радиолокационной техники. Разработчики радиолокационной техники, в свою очередь, предпринимают соответствующие меры и совершенствуют свою технику таким образом, чтобы снизить эффективность новых методов и средств РЭП. Такую конфликтную ситуацию называют радиоэлектронной борьбой (РЭБ) [3, 8].

Одним из основных направлений развития и совершенствования средств РЭП является разработка комплексов РЭП с высокой степенью адаптивности, обладающих способностью автоматически в реальном масштабе времени осуществлять анализ радиоэлектронной обстановки, выбор оптимального вида и формы помеховых воздействий на подавляемую РЭС, оценку эффективности действия средств РЭП.

Большое внимание в комплексах РЭП уделяется имитирующим помехам. Основная опасность таких помех заключается в существенной перегрузке каналов обработки информации в РЛС, что затрудняет или делает невозможным обнаружение и захват сигналов цели на автосопровождение. Имитирующие помехи могут воздействовать как по главному лучу диаграммы направленности антенны, так и по боковым лепесткам, если в РЛС отсутствуют устройства подавления мешающих излучений, принимаемых по боковым лепесткам. Наличие в РЛС автокомпенсаторов помеховых



сигналов, принимаемых по боковым лепесткам, не гарантирует защиту от помех, если число источников помеховых излучений превышает число автокомпенсаторов.

Автокомпенсаторы и адаптивные фазированные антенные решётки (ФАР) могут быть подавлены и с помощью нестационарных помеховых сигналов, излучаемых из нескольких точек пространства. Для этого время действия помеховых сигналов должно быть меньше времени переходного процесса в адаптивной системе или в автокомпенсаторе.

К наиболее перспективным способам радиоподавления относятся способы совместного применения маскирующих и имитирующих помех. Исследования показывают, что в подавляемой РЛС требуется затратить значительно больше усилий для защиты от помех «смешанного» состава по сравнению со случаем отдельного применения средств маскирующих и имитирующих помех [21].

Один из путей повышения эффективности радиоэлектронного подавления является разработка методов функционального поражения РЭС. Под функциональным поражением подразумевают нарушение функционирования РЭС при воздействии мощного короткоимпульсного СВЧ-излучения [22]. Средства функционального поражения обеспечивают высокую эффективность вывода из строя автоматизированных систем управления, связи, разведки, контроля, радиоэлектронных систем подрыва боеприпасов и являются важным инструментом наступательной информационной борьбы.

Эффект функционального поражения, определяемый главным образом степенью защищённости элементной базы РЭС от воздействия мощного СВЧ-излучения, слабо зависит от функционального назначения РЭС. Наиболее уязвимыми являются чувствительные элементы входных трактов приёмных устройств РЭС, построенных на основе твёрдотельных полупроводниковых структур. Помеховое излучение проникает как через антенну, так и минуя её, через технологические щели, люки обслуживания и вентиляционные люки, цепи питания, провода, кабели. Причиной невосстанавливаемых

отказов в большинстве случаев является тепловой пробой поражаемых полупроводниковых структур.

Иностранные специалисты отмечают, что разработка и производство средств функционального поражения относится к области ключевых технологий, определяющих уровень оборонной техники современного государства.

Для снижения демаскирующего эффекта при создании активных помех разрабатываются и внедряются специальные помехи, которые называют «не оставляющие следа», т. е. воспроизводимые как неисправности аппаратуры или действие естественных геофизических факторов.

В настоящее время существует устойчивая тенденция повышения роли и удельного веса программного решения задач на всех этапах обработки сигналов с помощью цифровых вычислительных средств, являющихся неотъемлемой частью современных и перспективных РЭС. В связи с этим всё большее значение приобретает проблема информационного подавления таких систем, алгоритмы функционирования которых могут рассматриваться как объекты РЭБ. Преднамеренные воздействия различной физической природы, используемые для снижения эффективности функционирования алгоритмов, реализуемых в вычислительных системах, получили названия алгоритмических. В общем случае к таким воздействиям относятся: несанкционированный доступ к информации, хранящейся в памяти ЭВМ, ввод в программное обеспечение «логических бомб» и вирусов, искажение алгоритмов обработки информации и нарушение логики их применения. Как отмечают специалисты [23, 24], особенно опасными среди этих воздействий являются вирусы. В связи с важностью алгоритмического воздействия на вычислительные средства можно предположить, что в ближайшие годы будет изменен концептуальный подход к методам радиоэлектронного подавления в плане изыскания и исследования новых видов алгоритмических воздействий и их комплексирование с традиционными видами помех.

Основными тактическими приёмами использования бортовых средств РЭП в ходе боевых операций в настоящее время и в ближайшие годы будут являться самозащита и прикрытие [25, 26].

Самозащита выполняется путём применения индивидуальных средств РЭП с целью снижения эффективности или нарушения устойчивой работы систем наведения средств поражения. Для самозащиты аппаратура РЭП устанавливается непосредственно на защищаемом объекте. Наиболее распространёнными способами РЭП являются использование средств имитации ложных целей, создание шумовых и имитирующих помех, применение средств искажения среды распространения радиоволн, алгоритмические воздействия и т. п. Важное место при организации самозащиты отводится средствам одноразового использования.

Все средства РЭП защищаемого объекта объединяются в комплекс индивидуальной защиты, управление которого будет в максимальной степени автоматизировано. Для реализации этого требования будут широко использоваться идеи искусственного интеллекта. Предусматривается, что в типовых ситуациях система будет осуществлять обнаружение и распознавание целей для радиоподавления, их ранжирование по степени угрозы, выбирать цели и способы их подавления, отдавать команды на включение средств активных и пассивных помех, а также уведомлять пилота о непосредственной угрозе самолёту и вырабатывать рекомендации для совершения манёвра.

Тенденция уменьшения ЭПР защищаемых объектов позволяет снижать требуемую для самоприкрытия эффективную излучаемую мощность передатчиков помех, что в свою очередь снижает масса-габаритные характеристики средств РЭП, повышает их надёжность, упрощает реализацию многофункциональных режимов работы.

Для повышения скрытности подхода к зоне боевых действий активные шумовые помехи будут создаваться только в крайних случаях и только наиболее угрожающим РЭС. Такие помехи будут

создаваться минимально необходимой для самоприкрытия мощностью и с использованием узких диаграмм направленности передающих антенн.

Противодействие головкам самонаведения атакующих ракет на конечном участке их полёта будет осуществляться с широким использованием расходуемых средств РЭП, таких, как дипольные отражатели, активные и пассивные ловушки, дистанционно-пилотируемые летательные аппараты и др.

Прикрытие осуществляется применением мощных средств РЭБ, устанавливаемых на специальных носителях. В авиации к ним относятся самолёты и вертолёты РЭП, применяемые самостоятельно или в составе ударных групп с целью прикрытия от радиолокационного наблюдения боевых порядков ударных самолётов. Типовым способом самостоятельных действий авиационных постановщиков групповых помех является применение их из зон барражирования, размещаемых за пределами огневой досягаемости средств ПВО противника (так называемая «закордонная» помеха). Наиболее перспективным способом концентрации мощности излучаемых помеховых сигналов является применение многолучевых фазированных антенных решёток [19].

В последние годы на смену традиционным аналоговым способам формирования помеховых сигналов приходят цифровые методы, которые реализуются посредством коммутируемой матричной структуры. Такие методы позволяют осуществлять модуляцию помеховых сигналов, настройку по частоте, калибровку по мощности, определять необходимые моменты излучения помех и т. д. Это означает, что по мере совершенствования средств ПВО нет необходимости создавать новую аппаратуру РЭП, достаточно обновить её математическое обеспечение. Алгоритм, по которому выполняются все указанные выше операции, начиная с анализа результатов перехвата радиосигналов и кончая логикой выбора варианта РЭП, должен быть построен на методах искусственного интеллекта.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные направления развития и совершенствования средств радиоэлектронного подавления.
2. В чём заключается метод функционального поражения РЭС?
3. Поясните эффект воздействия помех, «не оставляющих следа».
4. Какие методы используются и разрабатываются для подавления информационных систем?
5. Перечислите характерные особенности самозащиты объектов.
6. В чём заключается отличие метода прикрытия объектов от метода самозащиты?
7. Что означает термин «закордонная помеха»?
8. Какие методы формирования помеховых сигналов приходят на смену традиционным аналоговым способам?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вакин, С. А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов. – М. : Сов. радио, 1968. – 448 с.
2. Шлезингер, Р. Дж. Радиоэлектронная война / Р. Дж. Шлезингер. – М. : Воениздат, 1963. – 318 с.
3. Палий, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Палий. – М. : Воениздат, 1989. – 350 с.
4. Никольский, Б. А. Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов. Ч. 1 : учеб. пособие / Б. А. Никольский ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2004. – 110 с.
5. Защита от радиопомех / под ред. М. В. Максимова. – М. : Сов. радио, 1976. – 496 с.
6. Никольский, Б. А. Методы радионавигационных измерений. Ч. 1 : учеб. пособие / Б. А. Никольский ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2003. – 96 с.
7. Атражеев, М. П. Борьба с радиоэлектронными средствами / М. П. Атражеев, В. А. Ильин, Н. П. Марьин. – М. : Воениздат, 1972. – 272 с.
8. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичёв, Л. М. Юдин. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
9. Van Brunt. Applied ECM / E.W. – Engineering, USA, 1978. – V. 7.
10. Никольский, Б. А. Методы радионавигационных измерений. Ч. 2 : учеб. пособие / Б. А. Никольский ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2006. – 99 с.
11. Радиотехнические системы : учебник для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.
12. Финкельштейн, М. И. Основы радиолокации : учебник для вузов / М. И. Финкельштейн. – М. : Радио и связь, 1983. – 536 с.
13. Дымова, А. И. Радиотехнические системы : учебник для вузов / А. И. Дымова, М. Е. Альбац, А. М. Бонч-Бруевич. – М. : Сов. радио, 1975. – 440 с.
14. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / под ред. В. Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.
15. Васин, В. В. Справочник-задачник по радиолокации / В. В. Васин, Б. М. Степанов. – М. : Сов. радио, 1977. – 320 с.

16. *Пересада, С. А.* Борьба с низколетящими средствами воздушного нападения / С. А. Пересада, А. И. Филиппов, Л. И. Демидов. – М. : Воениздат, 1971. – 174 с.
17. *Зубкович, С. Г.* Статистические характеристики радиосигналов, отражённых от земной поверхности. – М. : Сов. радио, 1968. – 224 с.
18. *Никольский, Б. А.* Излучение и распространение радиоволн : учеб. пособие / Б. А. Никольский ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 1999. – 32 с.
19. *Никольский, Б. А.* Самолётные антенны : учеб. пособие / Б. А. Никольский ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 1999. – 64 с.
20. *Действие* проникающей радиации на изделия электронной техники / под ред. Е. А. Ладыгина. – М. : Сов. радио, 1980. – 224 с.
21. *Викулов, О. В.* Современное состояние и перспективы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы / О. В. Викулов, В. Д. Добыкин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – № 12.
22. *Панов, В. В.* Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения / В. В. Панов, А. П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 10–12.
23. *Щербаков, А. А.* Разрушающие программные воздействия / А. А. Щербаков. – М. : ЭДЭЛЬ, 1993.
24. *Касперский, Е. В.* Компьютерные вирусы и методы борьбы с ними / Е. В. Касперский. – М. : НТЦ Информтехника, 1992.
25. *Александров, Б. В.* Перспективные системы индивидуальной защиты самолётов / Б. В. Александров // Зарубежное военное обозрение. – 1996. – № 8.
26. *Ефимов, Е. Г.* Бортовое оборудование самолётов РЭБ групповой защиты / Е. Г. Ефимов, М. Н. Серёгин // Зарубежное военное обозрение. – 1995. – № 9.
27. *Васильев, А. В.* Радиоэлектронная борьба в воздушных операциях ВВС / А. В. Васильев // Зарубежное военное обозрение. – 1992. – № 1.
28. *Фомичев, К. И.* Электромагнитное оружие. Перспективы применения в информационной борьбе / К. И. Фомичев, Л. М. Юдин // Электроника. – 1999. – № 6.

Учебное издание

**Никольский Борис Аркадьевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ЗАЩИТЫ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Часть 2**

Учебное пособие

Редактор *О. Ю. Дьяченко*

Компьютерная верстка *О. Ю. Дьяченко*

Подписано в печать 30.05.07. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная

Усл. печ. л. 4,65. Тираж 150 экз. Заказ Арт. С-10/2007

Самарский государственный аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета  
443086, Самара, Московское шоссе, 34