

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

***ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН РАДИОЛОКАЦИОННОГО
НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ
ПОЛЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ***

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Радионаблюдение»
для студентов специальности «Радиоэлектронная защита информации»
дневной формы обучения

Минск БГУИР 2012

УДК 621.396.96:621.397(076.5)

ББК 32.95+32.94-5я73

И88

С о с т а в и т е л ь

П. Г. Семашко

Исследование зон радиолокационного наблюдения объектов в электромагнитном поле телевизионных передатчиков : метод. указания к лаб. работе по дисц. «Радионаблюдение» для студ. спец. «Радиоэлектронная защита информации» днев. формы обуч. / сост. П. Г. Семашко. – Минск : БГУИР, 2012. – 20 с.

ISBN 978-985-488-805-7.

Рассмотрены принципы радиолокационного наблюдения объектов путем приема и анализа рассеянных ими электромагнитных полей, создаваемых сторонними источниками, в частности, передатчиками цифрового телевизионного вещания. Приведена методика расчета зон радионаблюдения, учитывающая наличие прямого мешающего сигнала, а также диффузного и зеркального мешающих отражений от сферической земной поверхности. В лабораторной работе исследуются форма и размеры зон обнаружения, влияние на них различных параметров. Моделирование зон обнаружения осуществляется в программной среде Mathcad. Методические указания содержат необходимые теоретические сведения, порядок выполнения лабораторной работы, требования к содержанию отчета, список рекомендуемой литературы.

УДК 621.396.96:621.397(076.5)

ББК 32.95+32.94-5я73

ISBN 978-985-488-805-7

© Семашко П. Г., составление, 2012

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2012

Содержание

1. Цель лабораторной работы	4
2. Краткие теоретические сведения	4
2.1. Принципы радиолокации с посторонним подсветом	5
2.2. Источники сигнала подсвета	8
2.3. Устройство и принцип работы РЛС с посторонним подсветом	10
2.4. Зоны обнаружения и методика их расчета	13
3. Порядок выполнения	18
4. Содержание отчета	19
Литература	20

Библиотека БГУИР

1. Цель лабораторной работы

- 1) изучить принципы построения и функционирования скрытной радиолокационной системы (РЛС) с использованием сигналов цифрового телевидения;
- 2) исследовать тактико-технические характеристики скрытной РЛС;
- 3) приобрести навыки расчета зон обнаружения РЛС с учетом особенностей распространения радиоволн над сферической поверхностью Земли.

2. Краткие теоретические сведения

В 90-х гг. XX в. во Франции, Великобритании, США, Беларуси и некоторых других странах получила практическое развитие идея радиолокации с посторонним подсветом. Суть идеи состоит в том, что для наблюдения за объектами используются электромагнитные поля, создаваемые сторонними передатчиками, обычно передатчиками телевизионного (ТВ) и радиовещания. Такие передатчики создают достаточно мощное поле на высотах до 2 км над поверхностью Земли и покрывают практически все населенные территории. На поверхности любого объекта, оказавшегося в поле подсвета, возникают наведенные этим полем токи проводимости (в металлах) и токи смещения (в диэлектриках). Эти токи являются источником вторичного электромагнитного излучения, т. е. отраженного (рассеянного) поля. Путем анализа вторичных полей осуществляется радиолокационное обнаружение объекта, определение его координат в пространстве и параметров движения.

Радиолокационные системы (РЛС) с посторонним подсветом относятся к категории полуактивных. Отсутствие собственного радиопередатчика дает следующие основные преимущества:

- высокая радиотехническая скрытность;
- не требуется выделение полосы частот;
- отсутствует вредное воздействие на экологию окружающей среды и на человека;
- РЛС не создает помех другим радиоэлектронным средствам;
- РЛС экономичны в производстве и эксплуатации по сравнению с активными системами.

Кроме того, большие высоты поднятия антенн и мощности используемых ширококвотельных передатчиков обуславливают повышенную напряженность поля в приземном слое, что является благоприятным условием для обнаружения маловысотных и малоразмерных целей. Двухпозиционная топология РЛС помогает обнаруживать объекты, изготовленные по технологии «стэлс», поскольку их конструкция оптимизирована по минимуму обратного вторичного излучения, а боковое вторичное излучение, как правило, выше.

2.1. Принципы радиолокации с посторонним подсветом

РЛС с посторонним подсветом в общем случае представляет собой многопозиционную систему, состоящую из одного или нескольких источников сигнала подсвета и одной или нескольких приемных станций, разнесенных в пространстве. Последние связаны между собой в единую систему обработки радиолокационной информации (рис. 1).

Элементарной структурной единицей такой РЛС является бистатическая система (рис. 2). Расстояние от передатчика до РЛС d называется базой. Обнаружение сигнала, отраженного от цели, принятого основной остронаправленной антенной, осуществляется корреляционным методом, причем опорный сигнал для коррелятора принимается вспомогательной (слабонаправленной) антенной напрямую от источника подсвета. При обнаружении отраженного сигнала фиксируется угловое положение основной антенны $\Theta_{ц}$, которое отождествляется с азимутом цели. Определяется время запаздывания t_3 отраженного от цели сигнала относительно опорного сигнала, которое пропорционально суммарной дальности r_{Σ} , пройденной волной по пути «передатчик – цель – приемник РЛС»: $t_3 = (r_{\Sigma} - d)/c$, где c – скорость распространения радиоволн. Определяется доплеровский сдвиг (ДС) частоты отраженного сигнала $\Omega_{д.с.}$

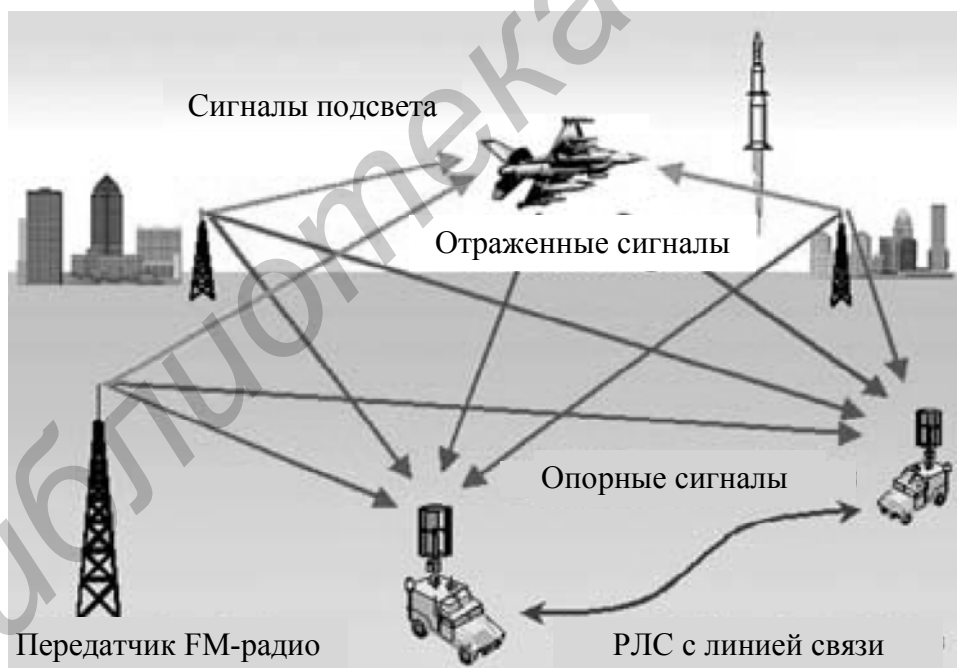


Рис. 1. Многопозиционная скрытная РЛС Silent Sentry® (США)

Координаты цели рассчитываются с помощью угломерно-эллиптического метода [1], [2]. При этом по времени запаздывания вычисляется суммарная дальность

$$r_{\Sigma} = r_1 + r_{ц} = ct_3 + d, \quad (1)$$

где r_1 – расстояние от источника подсвета до цели;
 r_{Σ} – расстояние от цели до приемной антенны РЛС;
 c – скорость света;
 d – расстояние от источника подсвета до РЛС (база).
 Расстояние до цели определяется выражением

$$r_{\Sigma} = \frac{r_{\Sigma}^2 - d^2}{2(r_{\Sigma} + d \cos \Theta_{\Sigma})}. \quad (2)$$

По доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала вычисляется радиальная скорость цели (проекция вектора скорости на бистатическую ось, показанную штриховой линией на рис. 2):

$$V_{\Sigma, \text{рад}} = V_{\Sigma} \cos \varphi = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Omega_{\text{д.с}}}{\cos(\beta/2)}, \quad (3)$$

где λ – длина волны сигнала подсвета;
 V_{Σ} – модуль вектора скорости цели;
 φ – угол между вектором скорости цели и биссектрисой бистатического угла;
 β – величина бистатического угла.

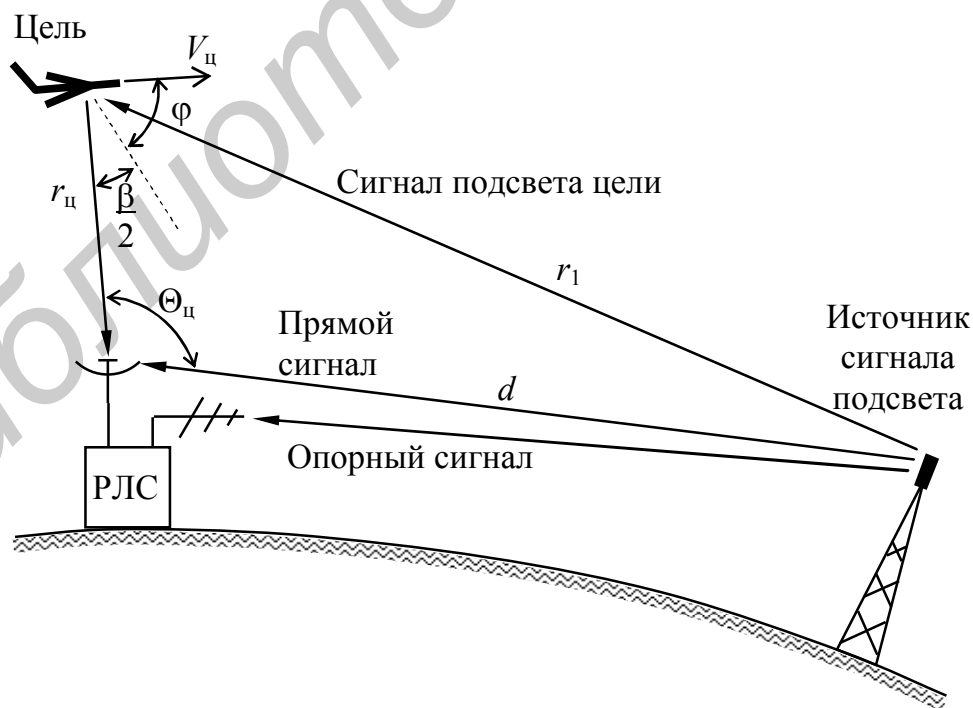


Рис. 2. Бистатическая РЛС с посторонним подсветом

Важной характеристикой РЛС является разрешающая способность по дальности, радиальной скорости, азимуту цели. Разрешающая способность определяется как минимальная разность одноименных параметров (дальности, скорости, азимута) двух целей, при которой эти цели наблюдаются раздельно и при условии, что все остальные параметры целей совпадают.

Разрешающая способность по дальности определяется шириной спектра Δf_0 сигнала подсвета:

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta f_0}. \quad (4)$$

Разрешающая способность по радиальной скорости цели определяется временем наблюдения (анализа) T_H отраженного сигнала:

$$\Delta V_r = \frac{\lambda}{2T_H}. \quad (5)$$

Разрешающая способность по азимуту цели равна ширине диаграммы направленности (ДН) антенны:

$$\Delta \beta = \frac{\lambda}{L_\beta}, \quad (6)$$

где L_β – размер раскрыва антенны в азимутальной плоскости.

При использовании периодических сигналов подсвета возникает неоднозначность определения дальности и радиальной скорости цели. При этом интервал однозначного определения дальности и скорости ограничен величинами

$$r_{\text{одн}} = \frac{cT_{\text{п}}}{2}, \quad V_{\text{одн}} = \frac{\lambda}{2T_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{п}}$ – период повторения сигнала.

Для полуактивных РЛС характерно наличие прямого сигнала (см. рис. 2), который проникает по боковым лепесткам ДН основной антенны. Прямой сигнал превышает полезный (отраженный от цели) на 60–90 дБ [3], а по некоторым оценкам – на 100 дБ [4]. Его подавление является одной из основных проблем, для решения которой используется комплекс мер, включающий электродинамическое экранирование основной антенны от источника подсвета, поляризационную селекцию, пространственную когерентную автокомпенсацию, спектральную селекцию. Кроме того, установлено, что отношение сигнал/помеха

(ОСП) зависит от выбора базы РЛС d . Оптимальная база, обеспечивающая максимум ОСП, должна составлять 30–70 % дальности от источника подсвета до линии его радиогоризонта.

2.2. Источники сигнала подсвета

В настоящее время на территории любого государства существует огромное количество источников электромагнитных полей. На населенных территориях эксплуатируется практически весь имеющийся электромагнитный ресурс. Однако не все источники могут использоваться для радиолокационного подсвета. Необходимым требованиям наиболее удовлетворяют станции наземного ТВ вещания (аналогового и цифрового), станции наземного УКВ ЧМ и DAB (digital audio broadcasting) радиовещания, базовые станции сотовых систем связи, спутниковые радиолокационные, радионавигационные и связные системы [2]. Можно выделить следующие требования к источникам подсвета полуактивной РЛС.

1. *Пространственное покрытие* определяется формой ДН антенны и излучаемой мощностью. Для радиолокационного подсвета наиболее подходят наземные источники со слабонаправленной антенной в азимутальной плоскости, а также спутниковые системы. Соотношение мощностей таких источников иллюстрируется рис. 3, где показаны предполагаемые плотности потока мощности у цели, создаваемые излучением в полосе одного канала (для многоканальных систем) и рассчитанные для условий распространения в свободном пространстве.

2. *Временное покрытие* определяется графиком работы передатчика, используемого для подсвета, на территории, обслуживаемой скрытной РЛС. С этой точки зрения выгодно использовать системы с круглосуточным вещанием. Для источников, расположенных в космическом пространстве на околоземной орбите, необходимо учитывать перемещение области подсвета на поверхности Земли. Например, достаточно мощное излучение, создаваемое РЛС разведывательного спутника ENVISAT, малоприспособлено для скрытной радиолокации, поскольку спутник осуществляет последовательный обзор всей поверхности Земли, и каждый ее участок попадает в зону подсвета не чаще одного раза в несколько дней.

3. *Частотный диапазон*. Наиболее оптимально использование излучений метрового и дециметрового диапазонов. На более низких частотах возрастают размеры антенных систем, а также появляются мешающие отражения от ионизированных слоев атмосферы. На более высоких частотах увеличиваются потери при распространении радиоволн, ухудшаются шумовые характеристики приемного тракта.

4. *Функция неопределенности (ФН)* сигнала подсвета определяет такие характеристики РЛС, как разрешение по дальности и радиальной скорости цели, однозначность определения данных параметров. Боковые лепестки ФН влияют на характеристики обнаружения сигнала. Идеальной является ФН кнопочного типа, характерная для непрерывных шумоподобных сигналов.

5. *Стабильность* характеристик сигнала определяет постоянство во времени характеристик обнаружения и разрешения полуактивной РЛС. Наилучшей стабильностью обладают цифровые системы, в которых модуляция несущей осуществляется псевдослучайными сигналами или рандомизированными цифровыми информационными потоками. Примером источника крайне нестабильного сигнала подсвета является ЧМ радиовещательная станция. Ширина спектра этого сигнала может изменяться в течение трансляции в 2–3 раза при передаче музыки и в 10 и более раз при передаче речи (в паузах между словами) [2]. Для полуактивной РЛС это означает такие же колебания разрешающей способности по дальности, а также мощности отраженного сигнала (если спектральную плотность принять постоянной).

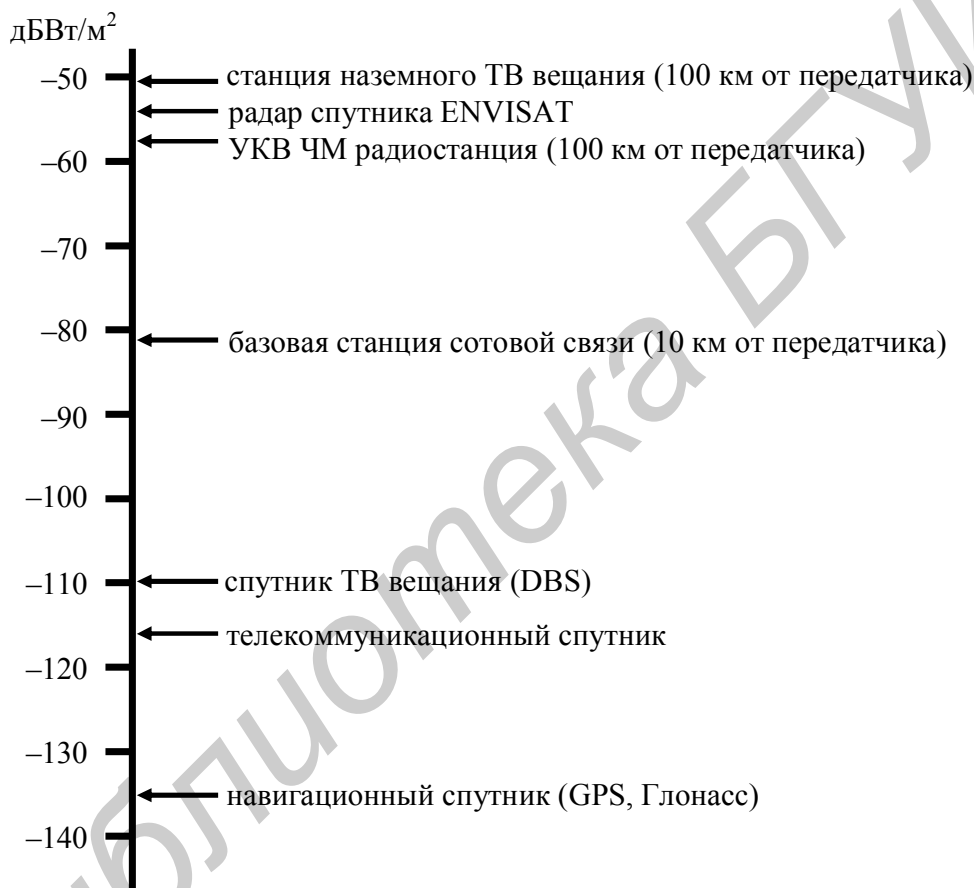


Рис. 3. Плотности потока мощности, создаваемые различными источниками подсвета [2]

Основные характеристики сигналов, пригодных для радиолокационного подсвета, приведены в табл. 1.

Наиболее перспективными источниками сигнала подсвета являются передатчики цифрового наземного ТВ вещания. Радиосигнал цифрового телевидения, согласно стандарту DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) [8], формируется путем квадратурной модуляции множества ортогональных несущих колебаний рандомизированными цифровыми потоками данных (частотное

разделение мультиплекса). В результате образуется шумоподобный сигнал со спектром, близким по форме к прямоугольному, шириной $\Delta f_0 = 7,61$ МГц. Такой сигнал имеет кнопочную функцию неопределенности и может использоваться в скрытной РЛС для обнаружения цели с однозначным определением дальности и скорости.

Таблица 1

Радиолокационные характеристики сигналов подсвета

Сигнал	Эффективная ширина спектра, кГц	Разрешение по дальности, м
Аналогового ТВ:		
– несущая сигнала изображения ¹ ;	–	–
– сигнал яркости ² ;	150...250	600...1000
– сигнал звукового сопровождения ³	10...100	1500...15000
УКВ ЧМ радиовещания ⁴	10...100	1500...15000
Базовой станции GSM связи	200	750
Базовой станции CDMA связи	1230	122
DAB	1536	98
DVB-T	7610	20

Примечания:

¹ Обеспечивается определение только скорости цели.

² Однозначное определение дальности только на интервале 9,6 км.

^{3,4} Высокая нестабильность характеристик.

2.3. Устройство и принцип работы РЛС с посторонним подсветом

Полуактивная РЛС с использованием постороннего источника сигнала подсвета имеет два приемных канала: целевой и опорный (рис. 4).

Опорный канал предназначен для приема сигнала подсвета от его источника. Этот сигнал используется для подавления прямого сигнала в целевом канале, а также для корреляционной обработки отраженного сигнала.

К антенне опорного канала не предъявляются высокие требования по коэффициенту усиления и характеристике направленности. Принятый сигнал после прохождения преселектора и усилителя высокой частоты (ПУВЧ) преобразуется на первую промежуточную частоту в смесителе. На второй вход смесителя поступает колебание местного гетеродина. Полосовой фильтр (ПФ) осуществляет предварительную селекцию полезного сигнала. Затем сигнал преобразуется на вторую промежуточную частоту во втором смесителе. Фильтр сосредоточенной селекции (ФСС) выделяет необходимую полосу сигнала и должен иметь сильное затухание в полосе задержания. Аналого-цифровое преобра-

зование, как правило, производится на промежуточной частоте, и дальнейшая обработка сигнала осуществляется в цифровом виде.

Целевой канал предназначен для приема сигнала, отраженного от цели. Антенна целевого канала должна иметь высокий коэффициент усиления и достаточно узкую диаграмму направленности, обеспечивающую угловое разрешение целей. Обзор пространства по азимуту производится путем вращения антенны с помощью антенного привода (АП). Принятый сигнал также подвергается двойному преобразованию частоты и аналого-цифровому преобразованию. Пространственный автокомпенсатор (АК) служит для подавления сильного прямого сигнала, проникающего по боковым лепесткам антенны целевого канала. В многоканальном корреляторе (МК) производится корреляционная обработка и обнаружение отраженного от цели сигнала. В качестве эталонного сигнала корреляторов используется сигнал из опорного канала. МК обеспечивает параллельный обзор по времени запаздывания и по частоте Доплера. Для формирования сетки доплеровских частот используется синтезатор частот (СЧ). Обнаруженные отметки целей отображаются на индикаторах (И) в координатах «азимут – дальность» и «азимут – скорость». Развертка индикатора по азимуту синхронизируется с угловым положением антенны по сигналу с АП.

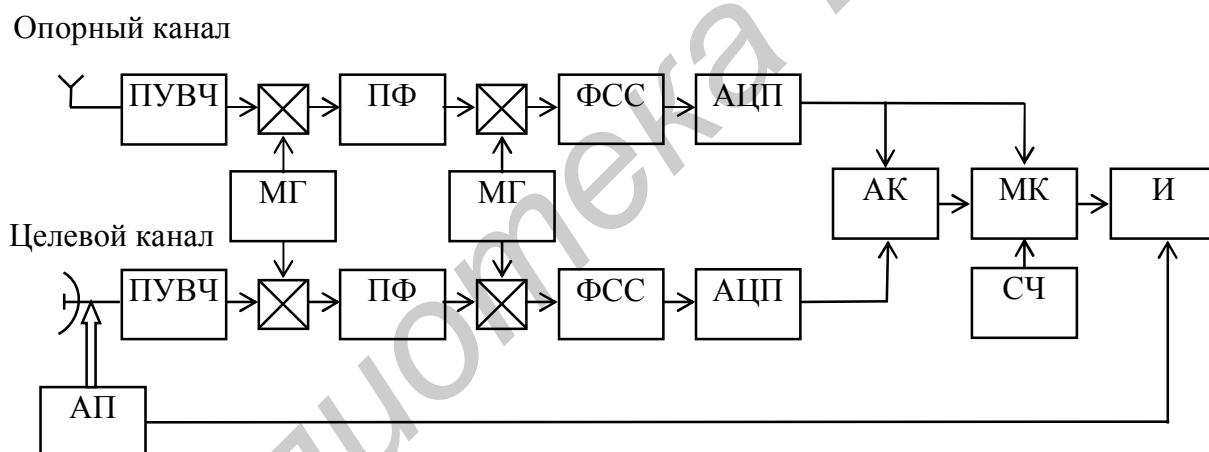


Рис. 4. Функциональная схема полуактивной РЛС

Обнаружение отраженного от цели широкополосного сигнала цифрового телевидения производится в условиях априорной неопределенности времени его запаздывания и доплеровского смещения частоты. В таких случаях традиционно используется многоканальный коррелятор матричного типа (рис. 5), каждый канал которого производит обнаружение в заданном элементе разрешения по времени запаздывания и частоте Доплера. Устройство принятия решения (УПР) осуществляет сравнение квадрата модуля корреляционного интеграла с порогом. Для работы корреляторов формируются опорные сигналы со всевозможными задержками в анализируемом диапазоне:

$$t_{3,i} = i/\Delta f_0, i = 1, 2 \dots m_r, \quad (8)$$

где m_r – количество элементов анализа по задержке, равное произведению максимального времени запаздывания отраженного от цели сигнала и ширины его спектра $\Delta f_0 = 7,61$ МГц, поскольку разрешение по времени запаздывания равно $1/\Delta f_0$.

Например, при максимальной дальности обнаружения РЛС $r_{ц\max} = 100$ км максимальное время запаздывания составит $t_{3\max} = 2r_{ц\max}/c \approx 667$ мкс, а количество элементов разрешения по задержке $m_r = t_{3\max}\Delta f_0 = 5073$.

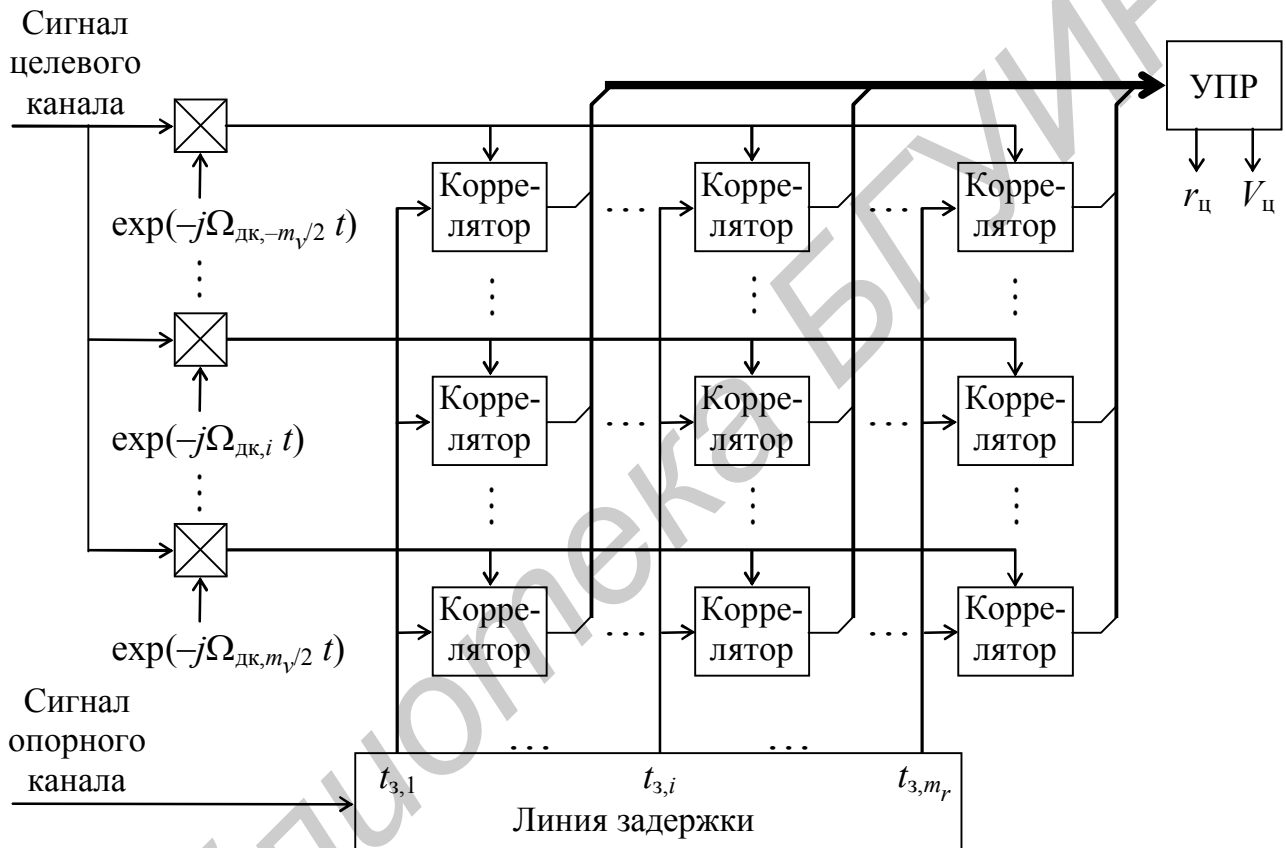


Рис. 5. Матричный коррелятор

В целевом канале производится коррекция всевозможных доплеровских сдвигов частоты отраженного сигнала на величину

$$\Omega_{дк,i} = 2\pi i/T_H, i = -m_v/2, \dots -1, 0, 1, \dots m_v/2, \quad (9)$$

где m_v – количество элементов анализа по частоте, равное произведению ширины диапазона доплеровских частот отраженного от цели сигнала $\Delta F_{дс}$ на время наблюдения (когерентного накопления) T_H , поскольку разрешение по частоте Доплера равно $1/T_H$.

Например, при максимальной радиальной скорости цели $V_{ц\max} = 300$ м/с ширина диапазона доплеровских частот составит $\Delta F_{\text{дс}} = 4V_{ц\max}/\lambda = 2400$ Гц, а количество элементов разрешения по частоте $m_v = \Delta F_{\text{дс}} T_{\text{н}} = 96$ (при $T_{\text{н}} = 40$ мс, $\lambda = 0,5$ м).

Главным недостатком матричного коррелятора является огромное количество каналов $m_r m_v = 487\,008$. Реализация такого устройства возможна только в цифровом виде. При этом потребуется вычислитель с быстродействием порядка $S_{\text{ар}} \approx 12 \cdot 10^{12}$ арифметических операций в секунду.

Снизить сложность обработки можно, применив быстрый алгоритм вычисления корреляционной функции в спектральной области с использованием БПФ.

2.4. Зоны обнаружения и методика их расчета

Основным показателем качества работы РЛС является максимальная дальность обнаружения цели. Но она является слишком общей оценкой, рассчитанной при ряде допущений, таких, как вероятность правильного обнаружения, высота и азимут цели (последнее важно для бистатических РЛС). Кроме того, хотя известно [5], что в силу интерференционных явлений зона обнаружения не является сплошной, это не находит отражения в параметре максимальной дальности.

Зоны обнаружения являются наиболее информативной характеристикой РЛС, показывающей качество обнаружения в любой точке пространства и учитывающей все основные факторы: характеристики зондирующего сигнала, технические характеристики передающей и приемной систем, алгоритм обработки и обнаружения сигнала, относительное расположение передатчика, цели и РЛС (с учетом высот и сферичности поверхности Земли), радиальную скорость цели, эффекты интерференции и рефракции радиоволн, эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) Земли и цели.

Зона обнаружения – это геометрическое место точек расположения цели, для которых ОСП в обнаружителе превышает уровень, обеспечивающий требуемые вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги: $\rho > \rho_{\text{тр}}$.

Требуемое ОСП при случайной фазе отраженного сигнала определяется выражением

$$\rho_{\text{тр}} = \log F_1 / \log D - 1, \quad (10)$$

где D – вероятность правильного обнаружения;

F_1 – вероятность ложной тревоги при разовом обнаружении.

Для улучшения характеристик обнаружения часто используется так называемый критерийный обнаружитель, работающий по критерию « n из k » ($n \leq k$). При этом для каждой цели осуществляется последовательно k разовых обнару-

жений. Окончательное решение о наличии цели принимается в том случае, если не менее n разовых решений о наличии цели были положительными.

В случае объединения разовых решений по критерию « k из k » вероятность ложной тревоги при окончательном решении $F = F_1^k$ (по правилу умножения вероятностей). Если требуется, чтобы во всем пространстве обнаружения, состоящем из m элементов, возникала в среднем одна ложная тревога за цикл обзора, то следует выбрать $F = m^{-1}$, и тогда вероятность ложной тревоги при разовых решениях $F_1 = m^{-1/k}$.

ОСП после когерентного накопления сигнала на интервале T_H определяется выражением

$$\rho = P_c T_H / (N_0 + N_{\text{пр.с}} + N_{\text{м.о}}), \quad (11)$$

где P_c – мощность отраженного от цели сигнала;

N_0 – спектральная плотность внутренних шумов приемника РЛС;

$N_{\text{пр.с}}$ – спектральная плотность прямого сигнала (с учетом электродинамического экранирования сигнала элементами рельефа поверхности Земли, пространственной когерентной автокомпенсации и спектральной селекции);

$N_{\text{м.о}}$ – спектральная плотность мешающих отражений (с учетом электродинамического экранирования сигнала элементами рельефа поверхности Земли и спектральной селекции).

При расчете зон целесообразно использовать геометрическую модель (рис. 6), учитывающую переотражение волн от сферической поверхности Земли.

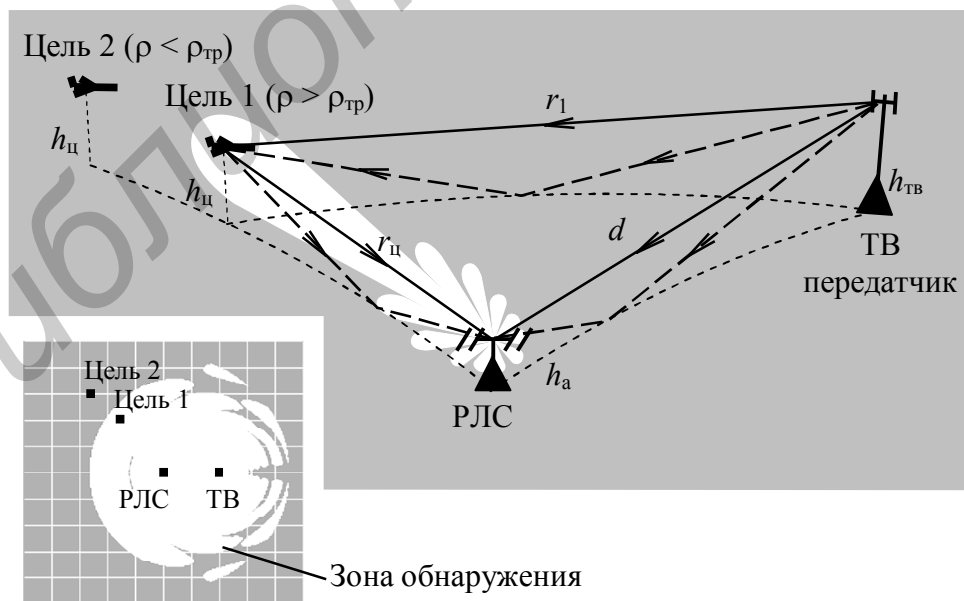


Рис. 6. Геометрическая модель для расчета зоны обнаружения РЛС

Зона обнаружения рассчитывается дискретно для всего множества азимутов и дальностей цели в требуемом диапазоне. При этом высота ($h_{ц}$) и радиальная скорость цели для всех точек полагается постоянной.

Мощность сигнала, отраженного от цели, можно записать в виде

$$P_c = \frac{qP_{ТВ}G_{ТВ}}{4\pi r_1^2} F^2(r_1, h_{ТВ}, h_{ц}) \frac{\sigma_{ц}}{4\pi r_{ц}^2} \frac{\lambda^2 G(0)}{4\pi} F^2(r_{ц}, h_{ц}, h_a), \quad (12)$$

- где $P_{ТВ}$ – мощность ТВ передатчика;
 q – коэффициент использования мощности ТВ передатчика (см. ниже);
 $G_{ТВ}$ – коэффициент усиления антенны ТВ передатчика;
 $h_{ТВ}$ – высота подъема фазового центра антенны ТВ передатчика над поверхностью Земли;
 F – интерференционный множитель;
 $\sigma_{ц}$ – эффективная поверхность рассеяния цели;
 $h_{ц}$ – высота цели;
 λ – длина волны;
 $G(\Theta_{\beta})$ – диаграмма направленности основной антенны РЛС в азимутальной плоскости;
 h_a – высота подъема фазового центра антенны РЛС над поверхностью Земли;
 r_1 – расстояние от передающей антенны до цели;
 $r_{ц}$ – расстояние от цели до приемной антенны.

Если коэффициент отражения волны от земной поверхности имеет модуль $K_{отр}$ и аргумент, близкий к π радиан, то интерференционный множитель будет равен

$$F(r, h_1, h_2) = \begin{cases} \sqrt{1 + K_{отр}^2 - 2K_{отр} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_{1экв} h_{2экв}}{r}\right)} & \text{– в зоне прямой видимости,} \\ 0 & \text{– вне зоны прямой видимости,} \end{cases} \quad (13)$$

- где h_1 и h_2 – высоты точек излучения и приема радиоволн над сферической поверхностью Земли;
 $h_{1экв}$ и $h_{2экв}$ – эквивалентные высоты этих точек над плоскостью, касательной к поверхности Земли в точке отражения [6];
 r – дальность от точки излучения до точки приема.

Значение коэффициента отражения $0 < K_{отр} < 1$ и существенно зависит от электрофизических свойств почвы, вида растительного покрова, погодных условий и для одного и того же участка местности может испытывать суточные и сезонные изменения.

Спектральная плотность внутренних шумов

$$N_0 = bK_{ш}T(K), \quad (14)$$

где $b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;
 $K_{ш}$ – коэффициент шума приемника РЛС;
 $T(K)$ – абсолютная температура.

Спектральная плотность прямого сигнала, проникающего в антенну целевого канала РЛС, определяется выражением

$$N_{пр.с} = \frac{q P_{ТВ} G_{ТВ}}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G(\Theta_\beta)}{4\pi} \frac{1}{v_{эд} v_{пр} v_{сп} \Delta F_{пр.с}}, \quad (15)$$

где d – база РЛС;
 Θ_β – азимут цели относительно направления на передатчик;
 $v_{эд}$ – эффективность электродинамического экранирования;
 $v_{пр}$ – эффективность пространственной когерентной автокомпенсации;
 $v_{сп}$ – эффективность спектральной селекции;
 $\Delta F_{пр.с}$ – эффективная ширина спектра прямого сигнала с учетом ограниченного времени наблюдения.

Спектральная плотность мешающих отражений от поверхности Земли, принимаемых как по главному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала РЛС, определяется выражением

$$N_{м.о} = \frac{q P_{ТВ} G_{ТВ} \lambda^2 G(0)}{(4\pi)^3 d^2} (\Delta\beta + 2\pi\eta) a_{s0} \sin \alpha \ln \left(\frac{r_{рг}}{h_a} \right) \frac{1}{v_{эд} v_{сп} \Delta F_{м.о}}, \quad (16)$$

где $\Delta\beta$ – ширина диаграммы направленности антенны РЛС в азимутальной плоскости;
 η – относительный уровень боковых лепестков антенны РЛС;
 a_{s0} – удельная эффективная поверхность рассеяния Земли;
 α – угол падения волны на поверхность Земли на расстоянии d от ТВ передатчика;
 $r_{рг}$ – дальность от антенны РЛС до радиогоризонта;
 $\Delta F_{м.о}$ – эффективная полоса мешающих отражений с учетом ограниченного времени наблюдения.

Для сферической модели земной поверхности $\sin \alpha \approx (2R_3 h_{ТВ} - d^2) / 2R_3 d$, $r_{рг} \approx \sqrt{2R_3 h_a}$, где $R_3 \approx 8500$ км – эквивалентный радиус Земли, учитывающий нормальную рефракцию волн в тропосфере [5].

При использовании DVB-T сигнала, обладающего почти равномерным спектром в полосе $\Delta f_0 = 7,61$ МГц, высокое разрешение по дальности

$\Delta r = 1/(2\Delta f_0) \approx 20$ м приводит к значительному увеличению количества элементов разрешения и сложности обработки. Такое разрешение для обзорных РЛС, как правило, является избыточным, поэтому целесообразно использовать для обработки некоторый фрагмент спектра сигнала шириной $\Delta f_{\text{фр}} = q \Delta f_0$, где $q < 1$ и может иметь порядок $q = 1/8 \dots 1/16$. При этом для обнаружения цели будет использоваться только часть мощности сигнала подсвета, заключенная в полосе $\Delta f_{\text{фр}}$, поэтому коэффициент использования мощности передатчика равен q .

Эффективность электродинамического экранирования прямого сигнала и мешающих отражений определяется формой рельефа вдоль базы РЛС. По результатам измерений, выполненных белорусским предприятием «Алевкурп», практически путем выбора расположения антенны РЛС может быть обеспечена эффективность экранирования не хуже $v_{\text{эд}} = 30$ дБ. Также экспериментально подтверждено, что с использованием двухканального когерентного автокомпенсатора может быть обеспечено подавление прямого сигнала с эффективностью не хуже $v_{\text{пр}} = 30$ дБ. Спектральная селекция прямого сигнала невозможна ($v_{\text{сп}} = 1$), поскольку его спектр перекрывается со спектром отраженного сигнала ($\Delta f_{\text{фр}} \gg F_{\text{дс}}$).

Обнаружение осуществляется путем сравнения с порогом напряжения на выходе коррелятора. ОСП определяется выражениями (11), (12), (15) и (16), в которых $\Delta F_{\text{пр.с}} = \Delta F_{\text{мо}} = \Delta f_{\text{фр}}$.

Зоны обнаружения, рассчитанные по данной методике, имеют вид, показанный на рис. 7, где квадратные маркеры показывают местоположение РЛС и ТВ передатчика, а закрашенные светлыми тонами зоны – области пространства, где возможно обнаружение цели с вероятностью не ниже заданной. На каждом рисунке изображены три зоны, соответствующие вероятности правильного обнаружения 0,5, 0,8 и 0,9. Цена деления координатной сетки 20 км.

Вид зон обнаружения наглядно демонстрирует интерференционные явления, которые практически всегда наблюдаются при полевых испытаниях радаров и заключаются в срывах обнаружения на определенных дальностях. Интерференционные провалы (узкие участки пространства, где отсутствует обнаружение) имеют форму концентрических окружностей с центрами в позициях размещения источника подсвета (ТВ передатчика) и РЛС (рис. 7, а, б).

Кроме интерференционных провалов имеется слепой сектор в направлении ТВ передатчика, который обусловлен попаданием мешающего прямого сигнала в главный лепесток основной антенны. При сильном сигнале (большая мощность передатчика, большая ЭОП цели) количество и «глубина» провалов в зоне обнаружения уменьшается, ее форма приобретает вид круга, поскольку ограничивается в основном лишь дальностью прямой видимости (рис. 7, в).

Ряд допущений, таких как гладкая сферическая поверхность Земли, не позволяет считать полученные зоны точным отражением действительности. Однако эти зоны являются хорошим приближением для оценки характеристик РЛС в условиях неопределенности реальных условий эксплуатации (форма

рельефа и отражающие свойства Земли, рефракция атмосферы, которая может изменяться в течение суток и др.).

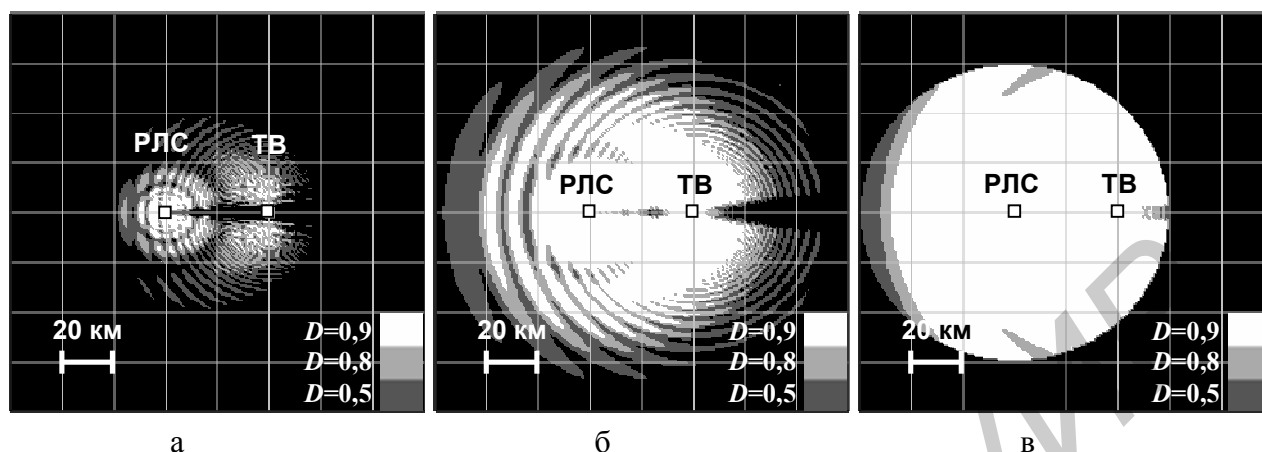


Рис. 7. Зоны обнаружения РЛС при использовании цифрового ТВ вещания

3. Порядок выполнения

Лабораторные исследования выполняются с помощью специальной программы в среде Mathcad.

Исходные данные: несущая частота $f_0 = 690$ МГц, мощность источника подсвета $P_{ТВ} = 5$ кВт, коэффициент усиления антенны источника подсвета $G_{ТВ} = 20$, высота подъема антенны источника подсвета $h_{ТВ} = 300$ м, ЭОП цели $\sigma_{ц} = 1$ м², высота цели $h_{ц} = 300$ м, высота антенны РЛС $h_a = 20$ м, коэффициент шума приемника РЛС $K_{ш} = 7$, коэффициент отражения земной поверхности $K_{отр} = 0,38$, время наблюдения $T_n = 40$ мс, коэффициент использования полосы частот сигнала подсвета $q = 1/8$, порядок критерийного обнаружителя $k = 2$ (критерий «2 из 2»), вероятность правильного обнаружения $D = (0,5; 0,8; 0,9)$.

Задание:

- 1) произвести расчет характеристик обзора и разрешения РЛС. Базу РЛС выбрать в пределах рекомендуемого диапазона;
- 2) произвести расчет мощности отраженного сигнала, спектральных плотностей помех, отношения сигнал/помеха, вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги при дальности ($r_{ц}$) и азимуте (Θ_{β}) цели, указанных в табл. 2;

Таблица 2

Данные для расчета

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_{ц}$, км	15	85	50	80	75	60	55	40
Θ_{β} , град	30	60	90	120	150	180	210	240

3) построить зону обнаружения. На рисунок зоны обнаружения нанести точку местоположения цели из п. 2 задания и указать рассчитанную вероятность D ;

4) построить график зависимости приведенного ОСП (разность фактического и требуемого ОСП) от дальности для заданного азимута цели. На графике отметить дальность цели;

5) исследовать влияние на форму зон обнаружения следующих параметров:

- а) мощности источника сигнала подсвета (1 кВт);
- б) высоты подъема антенны источника сигнала подсвета (50 м);
- в) ширины используемой части спектра сигнала подсвета (7,6 МГц);
- г) базы РЛС (10 км);
- д) высоты цели (50 м);
- е) ЭОП цели ($0,1 \text{ м}^2$);
- ж) эффективности электродинамического экранирования (15 дБ);
- з) времени когерентного накопления (10 мс);
- и) несущей частоты сигнала подсвета (450 МГц);
- к) кратности критерийного обнаружителя («3 из 3»);
- л) высоты фазового центра антенны РЛС (5 м);
- м) ширины диаграммы направленности антенны РЛС по азимуту (10 град).

Для этого по каждому подпункту «а» – «к» построить зону обнаружения, которая отличается от зоны обнаружения из п. 3 задания только по одному (исследуемому) параметру. Например, для подпункта «а» – установить мощность $P_{\text{тв}} = 1 \text{ кВт}$, а все остальные параметры – в соответствии с исходными данными. Сравнить полученную зону обнаружения с зоной из п. 3 и сделать вывод.

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Функциональная схема скрытной РЛС.
4. Результаты исследования.
5. Выводы.

Литература

1. Охрименко, А. Е. Основы обработки и передачи информации / А. Е. Охрименко. – Минск : МВИЗРУ ПВО, 1990. – 180 с.
2. Griffiths, H. D. From a different perspective: principles, practice and potential of bistatic radar / H. D Griffiths // Proc. of the International Radar Conference, Adelaide, Australia, 3–5 Sept. 2003. – P. 1–7.
3. Охрименко, А. Е. Первенец белорусской радиолокации – скрытный радар «Поле»: научно-технический очерк / А. Е. Охрименко. – Минск : БГУИР, 2005. – 167 с.
4. Saini, R. Direct path interference suppression in bistatic system: DTV based radar / R. Saini, M. Cherniakov, V. Lenive // Proc. of the International Radar Conference, Adelaide, Australia, 3–5 Sept. 2003. – P. 309–314.
5. Справочник по радиолокации. В 4 т. Т. 1: Основы радиолокации / под ред. М. Скольника; пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.
6. Энергетические характеристики сигналов и помех в РЛС с телевизионным подсветом / А. В. Романов [и др.]. – Минск : БГУИР, 1998. – 19 с.
7. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. В 2 ч. Ч. 1 : Основы радиолокации / А. Е. Охрименко. – М. : Воениздат, 1983. – 456 с.
8. European Standard ETSI EN 300 744 V1.4.1 (2001–01). Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television [Электрон. ресурс]. – Режим доступа : <http://www.etsi.org>.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН РАДИОЛОКАЦИОННОГО
НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ
ПОЛЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ**

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Радионаблюдение»
для студентов специальности «Радиоэлектронная защита информации»
дневной формы обучения

Составитель
Семашко Павел Геннадьевич

Редактор Г. С. Корбут
Корректор Е. Н. Батурчик
Компьютерная верстка Ю. Ч. Клочкевич

Подписано в печать 06.01.2012.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 100 экз.	Заказ 807.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6