

## **ПРИНЦИПЫ И ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

А.П. Кондратенко, П.А. Коваленко, И.С. Добрынин  
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*Предлагается два основных варианта построения активной системы с внешним подсветом сигналами сотовой связи. Определены принципы построения и области применения для различных вариантов системы. Оценены параметры барьерной зоны обнаружения.*

*активная система, радиолокационная система, излучение мобильной связи*

**Постановка проблемы.** Воздушное пространство – зона высокого риска и повышенной опасности. Современные воздушные объекты (ВО) характеризуются большим диапазоном скоростей и высот полета, маневренностью, часто – малой заметностью, возможностью свободно перемещаться в трехмерном пространстве. Поэтому воздушные объекты имеют потенциально высокую степень военной и экономической угрозы безопасности государства. Радиолокационный контроль воздушного пространства в масштабах страны – абсолютно необходимая общегосударственная задача, требующая больших финансовых затрат. На сегодняшний день основной проблемой в организации высокоэффективной системы контроля воздушного пространства является создание и поддержка сплошного автоматизированного радиолокационного поля над территорией государства и прилегающими территориями на малых и гранично малых высотах [1].

**Анализ литературы.** Для обеспечения непрерывного радиолокационного контроля полетов ВО на малых высотах возможно использование разнесенных радиолокационных систем, которые используют излучение внешних (по отношению к системе) передатчиков [2]. Примером создания и функционирования таких систем является белорусская система «Поле», американская система «Silent Sentry», французская «Dark». Указанные системы используют излучение телевизионных центров или УКВ радиостанций, сигналы которых по своей структуре не являются наилучшими для использования в целях радиолокации: недостатком является плохая разрешающая способность по дальности и периодичность АКФ подсвечивающих сигналов [3].

На сегодняшний день происходит интенсивное развитие мобильной связи стандарта GSM, поэтому в некоторых странах (Великобритания, Германия) проводятся работы по разработке активных систем с внешним подсветом сигналами передающих станций сотовой связи [4, 5]. В работе [6] решена задача синхронизации позиций в разнесенной системе с передающими станциями сотовой связи, в работе [7] оценена геометрия многопозиционной радиолокационной системы с внешним подсветом сигналами мобильной связи. Возможности обнаружения наземных объектов (автомобилей) двухпозиционной радиолокационной системой с использованием сигналов сотовой связи отображены в работе [8]

Анализ приведенной литературы подтверждает актуальность проводимых исследований. На этапе разработки новой радиолокационной системы обнаружения ВО с использованием излучения передатчиков станций сотовой связи важно определение основных вариантов и принципов построения системы, областей применения различных вариантов.

**Цель статьи.** Обоснование основных принципов и вариантов построения активной системы обнаружения ВО с внешним подсветом сигналами сотовой связи.

**Методика анализа.** Использование сигналов передатчиков станций мобильной связи позволяет предложить два основных варианта построения системы. Первым вариантом построения системы является создание полос предупреждения на основе звеньев просветной локации.

Возможность обнаружения ВО методом локации на «просвет» доказана уже давно. Соответствующие теоретические и практические результаты отражены в [9, 10]. Основными отличительными свойствами указанного метода локации является:

- независимость эффективной площади рассеяния (ЭПР) при рассеянии вперед от наличия радиопоглощающего покрытия и формы ВО;
- значительное увеличение (на несколько порядков) ЭПР ВО, которые находятся в области прямой видимости между передатчиком и приемником (в области линии базы).

Комплекс просветной радиолокации строится в виде звеньев (барьеров). Каждое звено представляет собой бистатическую радиолокационную станцию, которая строится на базе следующих принципов [10]:

а) на передающей позиции используется слабонаправленная антенна, облучающая сигналом одновременно весь сектор существования просветного эффекта;

б) на приемной позиции используется антенна с многолучевой диаграммой направленности, перекрывающая сектор существования просветного эффекта;

в) антенны на обеих позициях подняты на высоту 25...30 м для обеспечения прямой радиовидимости при расстоянии между позициями 40...50 км;

г) пространственно-временная обработка эхосигналов на приемной позиции включает параллельный обзор пространства по угловой координате и спектральный анализ в области доплеровских частот;

д) сопровождение ВО осуществляется по вектору первичных (изменяемых) координат  $\{f_d, \beta\}$  ( $f_d$  – доплеровское смещение частоты,  $\beta$  – угловая координата в горизонтальной плоскости);

е) проводится функциональное преобразование измеренных координат в плоскостные пространственные координаты и сопровождение ВО по пространственным координатам.

Обнаружение и измерение координат ВО в бистатической радиолокационной системе с обнаружением «на просвет» происходит в пределах узкой области, которая расположена вдоль линии, соединяющей приемную (Пр) и передающую (Пер) позиции. Размер области определяется действием «просветного» эффекта, при котором происходит резкое увеличение величины бистатической ЭПР ВО. Значительное увеличение (до 40 дБ) бистатической ЭПР по отношению к совмещенной ЭПР происходит при значениях бистатических углов  $\theta = 150 \dots 180^\circ$ , что соответствует на рис. 1 размеру сектора углов  $\vartheta$  до  $\pm 15^\circ$  [9].

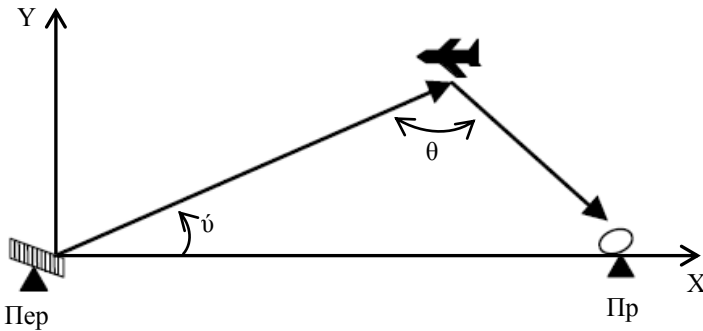


Рис. 1. Геометрия бистатической радиолокационной системы

Рассмотрим энергетические соотношения в бистатической системе с обнаружением «на просвет». Выражение для отношения сигнал/шум (ОСШ) в данном случае выглядит следующим образом:

$$q = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2 \cdot F_T(\alpha, \beta) \cdot F_R(\alpha, \beta) \cdot \sigma_b}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{\text{ш}} \cdot R_T^2 \cdot R_R^2 \cdot K_{\text{пот}}}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – средняя мощность излучения передающего устройства;  $G_T, G_R$  – коэффициент усиления передающей и приемной антенны соот-

ответственно;  $F_T(\alpha, \beta) \cdot F_R(\alpha, \beta)$  – нормированная диаграмма направленности (ДН) антенны передающей и приемной антенны соответственно;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma_6$  – бистатистическая ЭПР ВО;  $P_{ш} = P_{вн} \cdot \gamma$  – пороговая чувствительность приемного устройства;  $P_{вн}$  – мощность внутренних шумов в полосе приемного тракта;  $\gamma$  – коэффициент различимости;  $\alpha, \beta$  – угловые координаты;  $K_{пот}$  – коэффициент обобщенных потерь.

Будем считать, что ДН приемной и передающей антенны обеспечивают перекрытие «просветного эффекта» главными лепестками ДН, при этом передающую и приемную антенну можно считать ненаправленными. Это определяет ширину главного лепестка ДН в азимутальной плоскости не менее  $30^\circ$ . Значение средней мощности излучения передающей станции (ПС), расположенной за пределами города, лежит в пределах (38 – 42) Вт, а значение коэффициента усиления антенны ПС составляет 17 дБ. Предположим, что базовое расстояние между ПС мобильной связи и приемной позицией 40...50 км, в области «просветного эффекта» находится ВО с ЭПР  $1 \text{ м}^2$ , приемное устройство имеет коэффициент шума, равный трем, коэффициент обобщенных потерь  $K_{пот} = 10$ , коэффициент усиления антенны приемного устройства  $G_R = 20$  дБ. При указанных исходных данных проведенные в соответствии с (1) расчеты показывают, что обнаружение ВО возможно на расстоянии до 5...7 км от линии базы при условной вероятности правильного обнаружения  $D = 0,9$  и условной вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-5}$  (для рэлеевской модели флюктуаций экосигналов) (рис. 2).

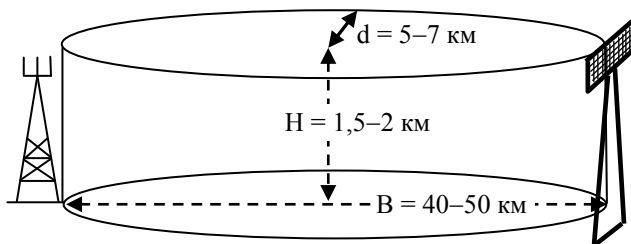


Рис. 2. Параметры зоны обнаружения звена просветной локации

Отметим, что комплекс просветной локации обладает рядом существенных недостатков:

1. Обнаружение ВО производится в узкой области пространства (в области существования «просветного эффекта»), что не позволяет обеспечивать непрерывный радиолокационный контроль всего пространства;

2. Зона обнаружения существенно зависит от вида ВО и траектории его полета.

Другим вариантом построения системы, обеспечивающим непрерывный, сплошной контроль полетов ВО, является создание сети наземных приемных пунктов, которые организационно объединяются в единую систему.

В районе каждого приемного пункта, как показано в [7], находится несколько источников излучения (базовых станций), которые совместно представляют собой разнесенную радиолокационную систему. В этой системе характеристики направленности приемной и излучающей антенны должны быть согласованы, иначе часть излучаемой энергии не будет использована. Поэтому увеличение дальности обнаружения за счет эффективной поверхности приемной антенны возможно только за счет перехода к парциальным приемным каналам, т.е. при осуществлении параллельного приема эхо-сигналов из зоны подсвета [11]. Антенны ПС практически ненаправлены в азимутальной плоскости, а излучаемый ПС сигнал является непрерывным, поэтому полное использование энергии передатчиков базовых станций возможно только при многоканальном построении приемного устройства по азимуту и дальности.

Так как положение ВО априорно неизвестно, необходимо производить круговой обзор пространства по азимуту. Таким образом, в приемной позиции необходимо сформировать несколько парциальных пространственных каналов приема, которые одновременно перекроют диапазон углов по азимуту вкруговую.

Число пространственных каналов приемного устройства  $N_{\beta}$  определяется требованиями к разрешающей способности по азимуту и угловыми размерами сектора облучения:

$$N_{\beta} = \frac{\beta_{\text{сo}}}{\Delta\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta_{\text{сo}}$  – угловые размеры сектора облучения, град;  $\Delta\beta$  -- требуемая разрешающая способность РЛС по азимуту.

Антенная система определяет многие основные тактико-технические характеристики РЛС. Параллельный и гибкий обзор пространства, увеличение дальности обнаружения, помехозащищенности и пропускной способности, классификация и распознавание ВО возможны при использовании в качестве антенн приемной позиции адаптивных антенных решеток (ААР).

Следует также отметить, что применение параллельного обзора пространства по азимуту на основе ААР позволяет получить ряд дополнительных преимуществ по сравнению с традиционно используемым последовательным обзором пространства.

В современных РЛС используется, в основном, последовательный обзор пространства по азимуту путем электромеханического вращения антенны РЛС. Это приводит к необходимости использования громоздких приводов вращения антенн. Они нерационально расходуют большую часть (20 – 40)% энергии, которую потребляет РЛС. Переход к параллельному обзору пространства с использованием невращающихся ААР позволяет уменьшить весогабариты антенно-мачтовых устройств и упростить их эксплуатацию.

Особенностью обнаружения ВО под малыми углами места является наличие мощных отражений от подстилающей поверхности, что требует наличия в приемной позиции устройств селекции эхо-сигналов. Селекция эхо-сигналов производится по совокупности признаков: амплитуда, длительность, энергия, доплеровский спектр эхо-сигналов, координатные признаки отметок, межпериодные и межобзорные статистические закономерности изменений параметров эхо-сигналов и помех. Качество селекции улучшается за счет повышения качества анализа структуры эхо-сигналов. Увеличение количества измеряемых параметров эхо-сигналов и точности их оценки требуют увеличения времени непрерывного наблюдения ВО. Использование параллельного обзора пространства по азимуту позволяет значительно увеличить (по сравнению с последовательным обзором) время радиолокационного контакта с ВО, что позволяет повысить точность измерения радиальной скорости и качество селекции эхо-сигналов. В свою очередь, высокая разрешающая способность по радиальной скорости позволяет распознавать ВО по их спектральным портретам. Также отметим, что отсутствие модуляции пассивной помехи ДН антенны существенно повышает потенциальные возможности системы селекции движущихся целей по выделению полезных эхо-сигналов.

Одним из вариантов технической реализации параллельного обзора пространства является применение кольцевых фазированных антенных решеток. Также возможно применение системы из 3 – 4 невращающихся односторонних антенных решеток, каждая из которых имеет сектор обзора  $90...120^\circ$ .

Следует также отметить, что стоимость ААР при увеличении числа выполняемых ими функций (сканирование лучом в азимутальной и угломестной плоскости, прием, излучение, формирование многих парциальных лучей) быстро возрастает и становится соизмеримой со стоимостью остальной аппаратуры РЛС. Поэтому важно рациональное ограничение числа функций, выполняемых ААР [12].

Для создания сплошного радиолокационного поля контроля за полетами ВО на малых высотах необходима сеть наземных приемных пунктов, которые организационно объединяются в систему и создают зону обнаружения или радиолокационное поле системы. Наряду с пара-

метрами зоны обнаружения отдельной приемной позиции существенное влияние на параметры радиолокационного поля системы оказывают количество и взаимное расположение приемных позиций на местности. «Идеальным» вариантом построения системы является размещение приемных пунктов по вершинам равносторонних треугольников (в узлах треугольной сетки) [11]. Идеализация построения определяется следующим:

- регулярность сети приемных пунктов (равенства расстояний между приемными пунктами);
- одинаковости размеров и форм зон обнаружения всех приемных пунктов.

Для формирования радиолокационного поля с требуемым значением нижней границы поля  $H_{\text{мин}}$  необходимое расстояние между приемными пунктами определяется:

$$d = 1,73 \cdot D_{\text{обн}}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{обн}}$  – радиус зоны обнаружения приемной позиции на высоте нижней кромки поля  $H_{\text{мин}}$ .

Для формирования сплошного радиолокационного поля над территорией площадью  $S_{\text{тер}}$  требуемое количество приемных постов определяется:

$$n = \frac{S_{\text{тер}}}{2,6 \cdot D_{\text{обн}}^2} \quad (4)$$

Другие варианты построения сети приемных позиций оказываются менее экономичными. Так, при тех же значениях  $D_{\text{обн}}$ , площади территории  $S_{\text{тер}}$  и размещении приемных постов в узлах квадратной сетки их число необходимо увеличить в 1,3 раза.

### **Выводы.**

1. Использование излучения передающих станций мобильной связи стандарта GSM позволяет создать радиолокационную систему обнаружения воздушных объектов в приземном воздушном пространстве, которая способна существенно дополнить радиолокационную информацию.

2. Построение радиолокационной системы на основе звеньев просветной локации обеспечивает простоту и дешевизну построения системы, однако не обеспечивает сплошного радиолокационного поля. Поэтому комплексы просветной локации целесообразно использовать в системах защиты охраняемых территорий: государственной границы, резиденций, стратегических объектов, входов в акватории портов и т.п.).

3. Для обеспечения непрерывного (над всей территорией Украины) контроля полетов воздушных объектов на высотах до 1,5...2 км необходима сеть наземных приемных пунктов. Полное использование энергии передатчиков станций сотовой связи возможно только при многоканальном по азимуту и дальности построении приемного тракта обработки

лов. Однако, это не исключает применение последовательного об-  
то азимуту при наличии необходимого баланса времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стеценко О.О., Коротков В.Ю. Створення єдиної системи радіолокаційної розвідки повітряного простору: проблеми та шляхи їх розв'язання // *Наука і оборона. Науково-теоретичний та науково-практичний журнал*. – К. – 1999. – № 4. – С. 18-22.
2. Кондратенко А. П. Роль и место нетрадиционной радиолокации в системе контроля воздушного пространства // *Зб. наук. пр. – X.: ХВУ. – 2002. – Вип. 1(39)*. – С. 87-90.
3. Griffiths H.D. *From a Different Perspective : Principles, Practice and Potential of Bistatic Radar* // *IEEE Int. RADAR 2003. paper RA031000.pdf, Adelaide, Australia, 3-5 September, 2003*.
4. Гвозденко А. Сотовая сеть в роли радара // *Компьютерное обозрение*. – 2003. – № 46. – С. 68.
5. Горелов А. Применение передатчиков телефонной мобильной связи в радиолокации // *Зарубежное военное обозрение*. – 2001. – № 2. – С. 54.
6. Кондратенко А.П., Манаков В.В., Коваленко П.А., Шаповалов С.В. Синхронизация позиций в разнесенной системе с передающими станциями сотовой связи // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал*. – 2004. – № 4 (8). – С. 19-24.
7. Кондратенко А.П., Манаков В.В., Коваленко П.А., Шаповалов С.В. Геометрия многопозиционной радиолокационной системы с передающей базовой станцией мобильной связи // *Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. – 2004. – № 139. – С. 45-49.
8. Hongo Sun, Danny K.P. Tan, Yilong Lu. *Design and Implementation of an Experimental GSM Based Passive Radar* // *IEEE Int. RADAR 2003. paper RA30040.pdf, Adelaide, Australia, 3-5 September, 2003*.
9. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
10. Бляхман А.Б., Рунова И.А. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации на просвет // *Радиотехника и электроника*. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 424-432.
11. Литвинов В.В. Основы построения радиолокационного вооружения радиотехнических войск. – Х.: ВИРТА, 1986. – 348 с.
12. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – Х.: ВИРТА, 1984. – 410 с.

Поступила 23.03.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор А.В. Кобзев,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.