

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

О.В. Викулов, зам. дир. центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, д-р техн. наук, проф.,
vikulov@extech.ru

Рецензент: С.В. Стрельников, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов», д-р техн. наук, orionsvs@mail.ru

В статье рассмотрены общие принципы построения многопозиционных радиолокационных систем, их возможности и преимущества в плане скрытного наблюдения за воздушным пространством, приведены примеры реализации таких систем для защиты мегаполисов от беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, радиоэлектронное противодействие, помехозащищенность, скрытность, помехоустойчивость, беспилотный летательный аппарат.

WAYS TO INCREASE THE STEALTH AND NOISE IMMUNITY OF MULTI-POSITION RADAR SYSTEMS

O.V. Vikulov, Deputy Director of Centre, SRI FRCEC, Ph. D., Professor,
vikulov@extech.ru

The article discusses the general principles of constructing multi-position radar systems, their capabilities and advantages in terms of covert surveillance of airspace, and provides examples of the implementation of such systems for protecting megacities from unmanned aerial vehicles.

Keywords: multi-position radar system, electronic countermeasures, noise immunity, stealth, noise immunity, unmanned aerial vehicle.

В условиях активного применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) резко возрос уровень требований к объему и качеству радиолокационной информации о воздушной и помеховой обстановке, а также к обеспечению высокой защищенности радиолокационных систем (РЛС) от воздействия радиоэлектронных помех. Все это стимулирует специалистов искать новые направления в области разработки и создания таких радиолокационных систем. Одним из перспективных направлений повышения помехозащищенности РЛС является многопозиционная радиолокация [1]. В основу создания многопозиционной радиолокационной системы (МПРЛС) заложен принцип объединения и совместной обработки радиолокационной информации, получаемой ее приемными позициями в различных участках пространственно-временного электромагнитного поля.

Таким образом, под многопозиционной радиолокационной системой следует понимать совокупность разнесенных в пространстве передающих и приемных пунктов, обеспечивающих создание радиолокационного поля для совместного осуществления радиолокационного наблюдения. Структурно основу таких МПРЛС составляют бистатические РЛС, позиции которых могут состоять из передатчика (ПРД) и приемника (ПРМ) либо приемопередатчиков

(ПРД-ПРМ), разнесенных в пространстве на расстояние базы L и объединенных линией передачи данных. МПРЛС может быть реализована на основе различных вариантов геометрии ее построения с использованием как мобильных, так и стационарных пунктов приема [2].

В зависимости от состава таких позиций различают три вида бистатических МПРЛС: активную, полуактивную и пассивную (рис. 1). Когда передатчики выключены, такая система при наличии соответствующих линий связи между приемными пунктами может работать в пассивном режиме, определяя координаты воздушных целей (ВЦ), излучающих электромагнитные волны.

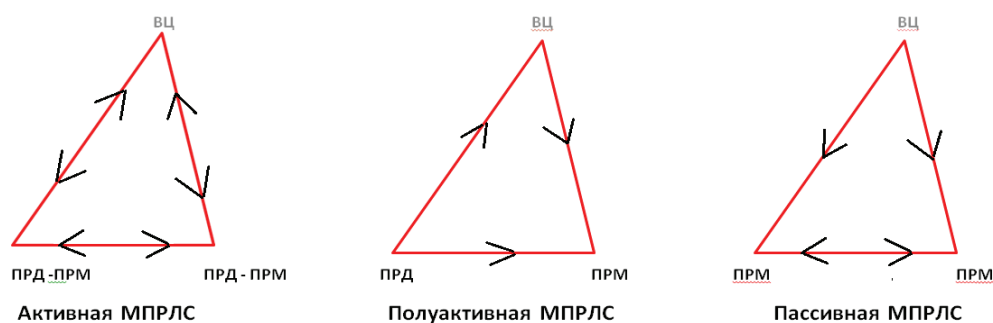


Рис. 1. Виды бистатических РЛС

В отличие от однопозиционной (совмещенной) РЛС, зона обнаружения целей в МПРЛС, кроме энергетического потенциала и условий радиолокационного наблюдения, в значительной степени зависит от геометрии их построения, количества и взаимного положения передающих и приемных пунктов. Понятие «максимальная дальность обнаружения» здесь является величиной, которую нельзя однозначно определить энергетическим потенциалом, как это имеет место для однопозиционной РЛС. Максимальная дальность обнаружения ВЦ в бистатической РЛС как элементарной ячейки МПРЛС определяется формой овала Кассини (линии постоянных отношений «сигнал/шум»), которому соответствует семейство изодальностных кривых или линий постоянных суммарных дальностей (эллипсов), определяющих положение цели на овале (рис. 2) в соответствии с выражением:

$$r_1 = \frac{(r_1 + r_2)^2 - L^2}{2(r_1 + r_2 + L \sin Q_r)}, \quad (1)$$

где: r_1, r_2 – расстояния от передатчика до цели и от цели до приемника; L – база МПРЛС – расстояние «передатчик – приемник»; Q_r – угол наблюдения цели.

В этом случае уравнение радиолокации для определения максимальной дальности действия для бистатической РЛС имеет вид:

$$r_1^2 r_2^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_B}{(4\pi)^3 P_{\min} q k v_1 v_2},$$

где: $r_1^2 r_2^2$ – квадраты расстояния от передатчика до цели и от цели до приемника;
 P_t – мощность передатчика, Вт;

$G_t G_r$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

P_{\min} – предельная чувствительность приемного устройства;

k – постоянная Больцмана;

$\nu_1 \nu_2$ – коэффициенты потерь при распространении радиоволн на пути от передатчика к цели и от цели к приемнику.

Таким образом, площадь зоны обнаружения МПРЛС, состоящей из одного передающего и нескольких приемных пунктов (либо наоборот), может значительно превосходить площадь зоны обнаружения эквивалентной однопозиционной РЛС.

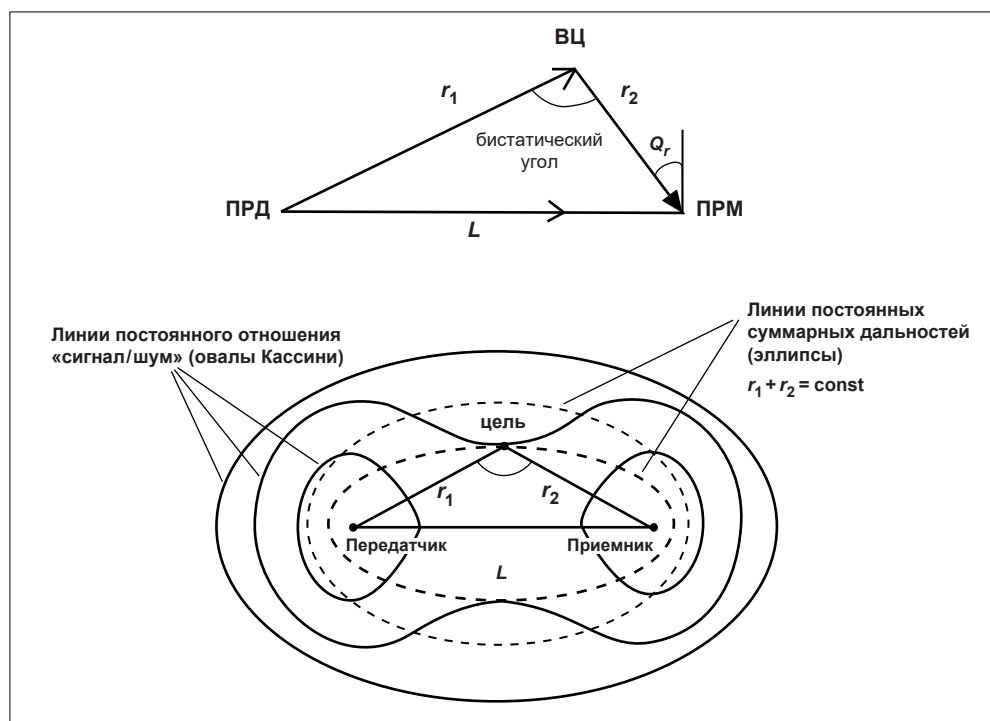


Рис. 2. Дальность действия в бистатической РЛС

При этом следует отметить, что значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) в двухпозиционной (бистатической) РЛС для одной и той же цели (ВЦ) отличается от ее ЭПР, измеренной в однопозиционной РЛС, и существенно зависит от величины бистатического угла. В процессе приближения ВЦ к линии базы L (линия «передатчик – приемник») наблюдается эффект резкого возрастания ЭПР такой цели (рис. 3), причем максимальное ее значение наблюдается при нахождении цели на линии базы L и определяется по формуле:

$$\sigma_B = 4\pi (A^2/\lambda^2), \quad (3)$$

где: A – площадь поперечного сечения цели, перпендикулярного направлению распространения радиоволн в метрах; λ – длина волны в метрах.

Использование данного эффекта в МПРЛС позволяет более эффективно обнаруживать такие малозаметные цели, как БПЛА, а также цели, изготовленные с применением стелс-технологии.

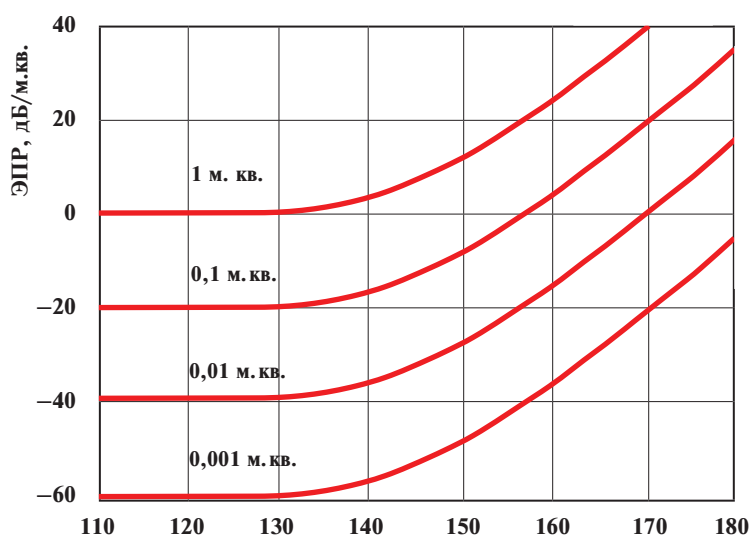


Рис. 3. ЭПР в бистатической РЛС

Функционирование реальных МПРЛС, как правило, происходит в условиях действия помех, поэтому в общем случае оценку их работоспособности следует проводить в условиях проведения противником радиоэлектронной борьбы (РЭБ). При этом важнейшим показателем качества функционирования МПРЛС является ее помехозащищенность.

Под помехозащищенностью будем понимать способность МПРЛС сохранять свою работоспособность в условиях ведения противником радиоэлектронной борьбы. В общем случае РЭБ включает два последовательных этапа: радиоразведку и радиопротиводействие. Целью радиоразведки является установление факта работы радиоэлектронных средств (РЭС) на излучение и определение их параметров, необходимых для организации радиопротиводействия. Целью радиопротиводействия является создание таких помеховых условий, которые затруднили бы работу РЭС или вообще привели к срыву выполнения ее задач [3].

Основным способом радиопротиводействия МПРЛС является постановка помех. Постановка помех будет тем эффективнее, чем больше информации о подавляемой МПРЛС будет выявлено на этапе радиоразведки и использовано при организации радиопротиводействия. Отсюда следует, что помехозащищенность как качественный показатель функционирования МПРЛС предполагает, с одной стороны, меры, затрудняющие проведение противником радиоразведки (т.е. скрытность МПРЛС), с другой – сохранение на допустимом уровне качества работы МПРЛС при действии помех (т.е. ее помехоустойчивость).

Помехозащищенность МПРЛС зависит от технических характеристик радиоэлектронных средств ее позиций, от их взаимного пространственного расположения, от тактики использования МПРЛС, от частоты и времени ее работы, а также от аппаратуры радиоразведки и помехопостановки противника. Сочетание всех этих характеристик и условий наблюдения носит случайный характер, поэтому помехозащищенность в условиях действия преднамеренных помех следует оценивать как вероятность выполнения МПРЛС своих задач $P_{пзп}$ в условиях радиоэлектронной борьбы и определяемую соотношением (4) в соответствии с вероятностным графом исходов (рис. 4).

$$P_{пзп} = 1 - P_{пп} , \tag{4}$$

где: $P_{пп}$ – вероятность подавления МПРЛС помехами в условиях РЭБ.

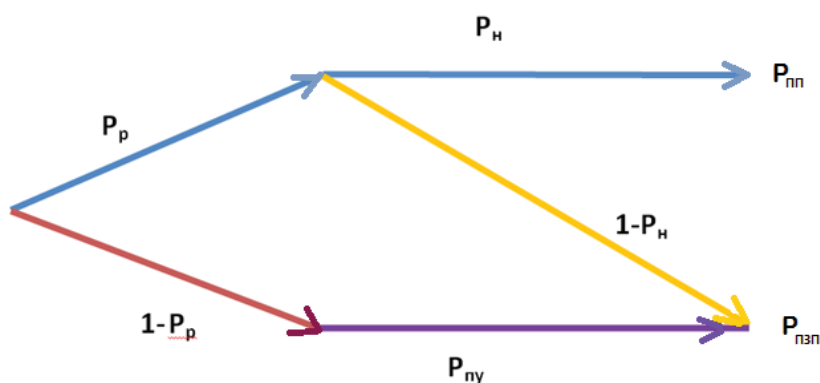


Рис. 4. Вероятностный граф исходов

Определим вероятность $P_{пп}$ как вероятность совместного события, предполагающего обнаружение работы МПРЛС средствами радиоразведки и подавление ее помехами в результате радиопротиводействия [2]:

$$P_{пп} = P_p P_n, \quad (5)$$

где: P_p – вероятность разведки параметров МПРЛС, необходимых для постановки прицельных помех и организации радиопротиводействия;

P_n – вероятность нарушения работы МПРЛС в результате радиопротиводействия.

В связи с этим вероятность P_p количественно можно связать со скрытностью МПРЛС, т.е. с ее способностью противостоять мерам радиотехнической разведки, направленным на обнаружение факта работы МПРЛС и определение параметров ее сигналов, необходимых для эффективного радиопротиводействия. Поэтому величину $P_{скр} = 1 - P_p$ можно принять в качестве критерия скрытности. В свою очередь, вероятность $P_{пуп} = 1 - P_n$ может характеризовать способность МПРЛС выполнять свои задачи в условиях действия преднамеренных помех противника [3]. Следовательно, эту величину можно принять в качестве критерия помехоустойчивости в условиях действия преднамеренных помех как вероятность выполнения системой своих задач в условиях радиоподавления.

Однако если противнику не удалось разведать параметры сигналов МПРЛС, то система будет работать в условиях собственных шумов либо в условиях действия широкополосной шумовой заградительной помехи. При этом ее работоспособность будет оцениваться помехоустойчивостью $P_{пу}$ в условиях отсутствия радиоподавления, т.е. в отсутствие прицельных преднамеренных помех [3]. Таким образом, полная помехозащищенность МПРЛС будет зависеть от ее скрытности $P_{скр}$ и от помехоустойчивости как в условиях действия преднамеренных помех $P_{пуп}$, так и при их отсутствии $P_{пу}$ по формуле:

$$P_{пзп} = P_{скр} P_{пу} + P_p P_{пуп} = (1 - P_p) P_{пу} + P_p (1 - P_n). \quad (6)$$

Далее рассмотрим отдельные виды скрытности МПРЛС и способы ее обеспечения в различных типах МПРЛС.

Радиоразведка противника, как правило, предполагает последовательное выполнение трех основных задач [4]: обнаружение сигнала как самого факта работы радиоэлектронного средства (РЭС); определение структуры обнаруженного сигнала на основе определения ряда его параметров; раскрытие содержащейся в передаваемом сигнале информации. Решение

всех этих задач радиоразведки позволяет противнику организовать более эффективное радиоподавление РЭС. Перечисленным задачам радиоразведки могут быть противопоставлены соответственно три вида скрытности МПРЛС: энергетическая, структурная и информационная.

Энергетическая скрытность МПРЛС характеризует способность противостоять мерам, направленным на обнаружение сигнала разведывательным приемным устройством. Количественной мерой энергетической скрытности может служить вероятность правильного обнаружения $P_{обн}$ сигнала РЭС при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$, которые, в свою очередь, зависят от отношения «сигнал – помеха» на входе разведывательного приемника и правила принятия решения при обнаружении сигнала. Поэтому для обеспечения энергетической скрытности необходим выбор такой мощности излучения передатчиков МПРЛС и такого спектра излучения их сигналов, при которых мощность сигнала на входе разведывательного приемника была бы меньше его реальной чувствительности.

Для обеспечения такой энергетической скрытности в МПРЛС энергия излучения каждой передающей позиции может быть существенно снижена за счет использования кооперативного приема сигналов всеми ее приемными позициями, а если при этом используются широкополосные сигналы, то при их малой спектральной плотности и относительно узкой полосе пропускания разведывательного приемника энергия принимаемого разведываемого сигнала не будет превышать уровень его собственных шумов.

Структурная и пространственная скрытность МПРЛС характеризует способность противостоять мерам радиоразведки, направленным на раскрытие формы пространственно-временного сигнала, а именно: вида и способов его кодирования и модуляции. Структурная скрытность $P_{стр}$ обеспечивается использованием сложных шумоподобных сигналов, структура которых затрудняет их разведку противником. В качестве таких сигналов могут использоваться сигналы на основе псевдослучайных последовательностей большой длительности, сигналы со сложной модуляцией, например фазово-кодовой либо фазо-частотно-кодовой, и т.п. При этом в МПРЛС дополнительно можно обеспечить еще и пространственную скрытность за счет попеременного переключения передающих позиций на прием. В этом смысле абсолютную скрытность будут иметь пассивные МПРЛС, состоящие исключительно из приемных позиций и работающие по сигналам, излучаемым либо переизлучаемым самой целью.

Информационная скрытность МПРЛС $P_{инф}$ определяется способностью противостоять мерам, направленным на раскрытие содержания радиолокационной информации о цели, что затрудняет постановку эффективных уводящих или имитирующих помех. Информационная скрытность в МПРЛС обеспечивается за счет информационной избыточности при кооперативном приеме сигналов в пространственно разнесенных позициях, когда конечная информация о цели формируется в результате совместной обработки сигналов, принятых на отдельных позициях [1].

Таким образом, скрытность МПРЛС – это альтернативное событие обнаружению ее работы, оцениваемое вероятностью разведки ее параметров P_p . Зачастую задача раскрытия смысла радиолокационной информации не ставится, и в этом случае можно принять $P_{инф} = 1$, а $P_p = P_{обн} P_{стр}$. В ряде же реальных случаев для организации радиопротиводействия и вовсе достаточно обнаружить сигнал подавляемой МПРЛС, тогда вероятность разведки P_p будет полностью отождествляться лишь с $P_{обн}$.

Отмеченные выше возможности МПРЛС в плане их радиолокационной скрытности позволили, в свою очередь, обеспечить высокие показатели ее помехозащищенности и «живучести». Так, создать прицельные по направлению активные помехи одновременно нескольким пространственно разнесенным позициям МПРЛС практически невозможно, а вынужденное излучение помех в широком пространственном секторе снижает их интенсивность в направлении каждой отдельной позиции. Более того, против МПРЛС с несколькими передающими

позициями, работающими на разных частотах, и кооперативным приемом сигналов в широком диапазоне частот прицельные по частоте помехи также являются неэффективными. При этом важная особенность МПРЛС состоит в том, что при оптимальной совместной обработке сигналов и помех, принимаемых разнесенными позициями, взаимно коррелированные помехи в разных позициях подавляются, а полезный сигнал успешно выделяется на их фоне. Такая особенность позволяет МПРЛС самой обнаруживать цели, прикрываемые помехами даже по главным лепесткам диаграммы направленности (ДН) ее приемных антенн (рис. 5).

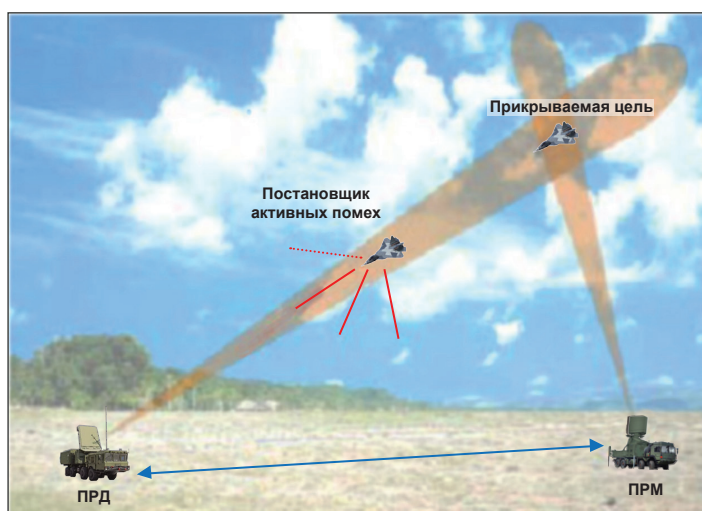


Рис. 5. Активные помехи бистатической РЛС

Более того, благодаря пространственному разнесению позиций объем области пересечения главных лепестков ДН передающей и приемных позиций МПРЛС оказывается значительно меньше, чем объем области главного лепестка приемопередающей ДН однопозиционной совмещенной РЛС. Это также позволяет существенно снизить интенсивность пассивных помех на входах приемников отдельных позиций (рис. 6).

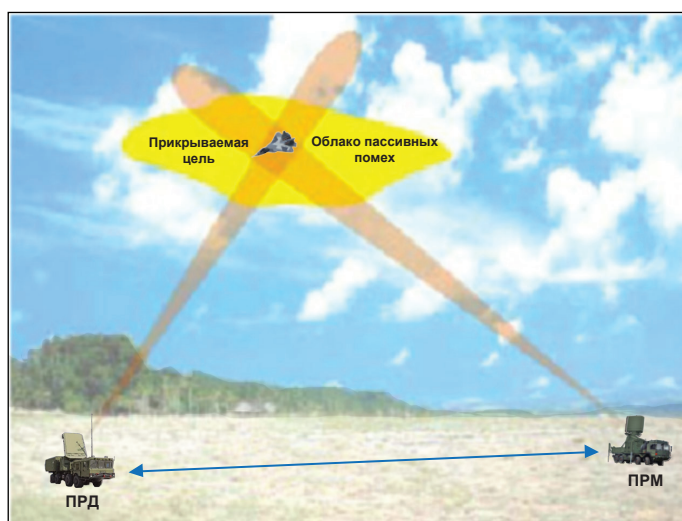


Рис. 6. Пассивные помехи бистатической РЛС

Против МПРЛС с разнесенными передающими и приемными позициями также малоэффективны источники мощных направленных пассивных помех, например угловые отражатели. При этом в МПРЛС нет известных ограничений на использование методов селекции движущихся целей (СДЦ), когда цель движется «по параметру» относительно РЛС, так что ее радиальная скорость близка к нулю. Этот недостаток СДЦ устраняется в МПРЛС, благодаря тому что радиальная скорость цели не может быть одновременно нулевой относительно сразу нескольких позиций. Аналогичным образом преодолевается в МПРЛС и такой недостаток однопозиционных РЛС, как наличие «слепых» радиальных скоростей, поскольку радиальные скорости цели различны относительно разнесенных позиций МПРЛС [5].

Наконец, рассредоточенность в пространстве и избыточное число позиций МПРЛС значительно повышают ее «живучесть» по сравнению с однопозиционной РЛС, так как выход из строя одной или даже нескольких позиций МПРЛС не приводит к полному нарушению ее работоспособности, а вызывает лишь определенное ухудшение ее характеристик. При этом разнесение передающих и приемных позиций затрудняет определение положения неизлучающих приемных позиций, что также повышает их «живучесть», в том числе при применении противорадиолокационных ракет и БПЛА, наводящихся на источник излучения.

В реальных условиях для обеспечения повышенной скрытности работы МПРЛС рассматриваются различные принципы их построения (наземного, воздушного и смешанных вариантов базирования) при использовании как зондирующих сигналов активных РЛС, так и сигналов постановщиков активных помех противника, а также сторонних для РЛС сигналов от телевизионных, радиовещательных передающих станций и от передатчиков сотовой связи.

Идея использования радиолокационного поля, формируемого радиовещательными и телевизионными передающими станциями (РТПС), а также базовыми станциями сотовой телефонной связи (СТС), для пассивной радиолокации находящихся в нем воздушных целей обусловлена тем, что высота их антенных башен может достигать 50–250 м, а формируемая ими всенаправленная зона подсвета прижата к поверхности земли. Простейший пересчет по формуле дальности прямой видимости показывает, что БПЛА, летящие на предельно малых высотах, попадают в поле подсвета таких передатчиков начиная с расстояния уже 50–80 км. Очевидно, что такая система будет наиболее эффективной для защиты городов с их плотными радиолокационными полями от РТПС и СТС, позволяя своевременно обнаруживать малозаметные низколетящие БПЛА, летящие в режиме радиомолчания.

Концепция использования такого эффекта в МПРЛС возникла в конце 90-х гг. XX в. с появлением высокопроизводительных компьютеров и средств обработки различных сложных сигналов (сигналов радиотелевизионных передающих станций, радиосигналов станций мобильной связи и пр.), способных обеспечить обработку больших объемов радиолокационной информации для достижения приемлемых точностных характеристик подобных систем. Кроме того, появление космической радионавигационной системы GPS (Global Position System) позволило производить точную топопривязку и жесткую временную синхронизацию всех пространственных элементов МПРЛС, что является необходимым условием при корреляционной обработке сигналов в подобных системах (рис. 7).

Радиолокационные характеристики сигналов, излучаемых телевизионными (ТВ), частотно-модулированными (ЧМ) радиовещательными передающими станциями и радиотелефонными станциями сотовой GSM связи, приведены в табл. 1 [6].

В нашей стране разработкой многопозиционной пассивной радиотехнической системы контроля воздушной обстановки мегаполиса при использовании радиоизлучений цифрового телевидения и радиовещания занимается АО «НИИ «Вектор» [URL: <https://nii-vektor.ru/> (дата обращения: 04.04.2024)], входящее в состав Концерна «Вега» Холдинга «Росэлектроника»

Госкорпорации «Ростех». В настоящее время там создан и испытан многопозиционный комплекс полуактивной радиолокации и радиомониторинга (МКПРиР) радиомолчащих объектов, использующий сигналы цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 [6]. Во время его испытаний были обнаружены и успешно сопровождалась гражданские самолеты в районе аэропорта Пулково, а также автомобили на Кольцевой автомобильной дороге вокруг г. Санкт-Петербурга.

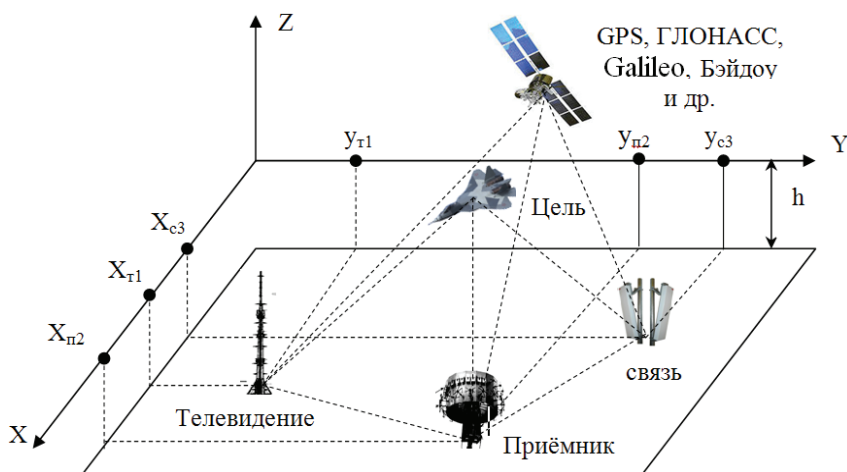


Рис. 7. Радиолокационные поля, формируемые РТПС и СТС

Таблица 1

Характеристики сигналов РТПС и СТС

Передающее устройство	Мощность, кВт	Уровень сигнала, dB/m ²	Полученные параметры		
			Разрешение по дальности, км	Пиковый уровень сигнала	
				Методами пеленгации, dB	Метод Доплера, dB
FM-радио (аналог)	50		1,8–16,5	-12,0; -27,0	-26; -46,5
ТВ (аналог)	100		9,6–15,6	-0,2	-9,1
DAB	10		1,5	-11,7	-38,0
DTV	10		0,044	-19,5	-34,6
GPS	–	-135	0,030	–	–
GSM 900, МГц	–	-80	1,8	-9,3	-46,7

Уникальность МКПРиР заключается в объединении в ней принципов многопозиционного обнаружения и оценки координат источников радиоизлучения методом радиомониторинга и принципов обнаружения, оценки координат и траекторного сопровождения подвижных радиомолчащих объектов методом полуактивной радиолокации по переотраженным сигналам. При этом комплекс не содержит активной радиолокационной станции, однако его характеристики вполне сравнимы с системами, содержащими активные РЛС. Так, его дальность обнаружения цели составляет 21 км, разрешающая способность по дальности – 50 м, разрешающая способность по скорости – 2,8 м/с, число одновременно сопровождаемых целей – не менее 100 шт., минимальная скорость сопровождаемой цели – 10 км/ч, максимальная скорость сопровождаемой цели – 900 км/ч [7].

Наиболее близкими зарубежными аналогами такого МКПРiP являются следующие радиолокационные системы:

- пассивная РЛС Aulos компании Leonardo (Италия);
- пассивный радар Homeland Alerter 100 фирмы Thales (Франция);
- пассивный радар TwInvis компании Hensoldt (Германия);
- многопозиционная РЛС «Дарк» фирмы Thales (Франция);
- многопозиционная РЛС «Риас» фирмы Thales (Франция);
- многопозиционная РЛС Celldar концерна Siemens (Германия);
- многопозиционная система ПВО AASR (Associative Aperture Synthesis Radar) фирмы Saab microwave systems (Швеция);
- пассивная многопозиционная РЛС Silent Sentry фирмы Lockheed-Martin (США), характеристики которой представлены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Характеристики пассивной МПРЛС Silent Sentry

Наименование характеристики	Значение
Дальность обнаружения целей, км (на частоте 100 МГц, ЭПР = 10 м ² ; P _D > 0,95; P _F > 10 ⁻³)	до 220
Зона обзора по азимуту, град.	0–360 (60 – для одной ФАР)
Зона обзора по углу места, град.	0–50
Точность определения координат целей, м	100–300 (оценка)
Точность определения скорости целей, м/с	1–3 (оценка)
Точность определения высоты полета целей, м	100 (оценка)
Скорость обновления данных о воздушной обстановке в режиме сопровождения целей	8 раз в секунду
Пропускная способность (количество одновременно сопровождаемых целей)	Более 200
Мощность системы автономного энергоснабжения приемного модуля, кВт	10

Однако все эти МПРЛС нельзя рассматривать в качестве прямого аналога МКПРiP, так как указанные в них технические решения не являются в полной мере комплексами. Основной решаемой задачей этих систем является наблюдение за воздушным пространством на больших дальностях – до 100 км. Это достигается усложнением структуры такой МПРЛС, что выражается в ее высокой стоимости. Например, стоимость американской МПРЛС Silent Sentry составляет от 3 млн – 5 млн долл., тогда как стоимость МКПРiP не превышает 250 тыс. долл.

Конкурентным преимуществом МКПРiP является объединение в одном комплексе принципов многопозиционного обнаружения и оценки координат источников радиоизлучения методом радиомониторинга и принципов обнаружения, оценки координат и траекторного сопровождения подвижных радиомолчащих объектов типа БПЛА методом полуактивной радиолокации по переотраженным сигналам.

Объединение в МКПРiP возможностей средств радиомониторинга (СРМ) и пассивного когерентного локатора (ПКЛ) позволяют использовать достоинства обеих таких систем:

- СРМ более точно, чем ПКЛ, определяет направление цели;
- СРМ, в отличие от ПКЛ, способен обнаружить более мелкие цели;
- ПКЛ, в отличие от СРМ, способен обнаружить неизлучающий объект;
- ПКЛ, в отличие от СРМ, способен более точно определить координаты объекта.

Благодаря такому объединению достоинств СРМ и ПКЛ в МКПРиР появляется возможность классификации и распознавания целей, что является существенным конкурентным преимуществом МКПРиР, который к тому же имеет небольшие габариты и передвижное исполнение, что обеспечивает его мобильность.

Кроме того, за счет многопозиционности МКПРиР появляются дополнительные преимущества, позволяющие:

- повысить точность траекторного сопровождения за счет объединения нескольких пространственно разнесенных полуактивных радиолокационных станций;
- определять при радиомониторинге не только направление, в котором находится цель, но и ее координаты;
- увеличить область покрытия охраняемого объекта.

Таким образом, МКПРиР является российской разработкой, в которой осуществляется совместная обработка данных полуактивной радиолокации и радиомониторинга с нескольких позиций для повышения эффективности обнаружения целей и точности определения их местоположения, траекторного сопровождения и возможности работы как по излучающим, так и по подвижным радиомолчащим объектам.

Наиболее близким отечественным аналогом такого МКПРиР является комплекс многопозиционной разнесенной радиолокационной системы полуактивной локации «Рубеж» производства АО «НПП «Кант» [URL: <http://nppkant.ru> (дата обращения: 04.04.2024)], который прошел успешные испытания по обнаружению малозаметных воздушных целей типа БПЛА со скоростями до 500 м/с на высотах до 500 м [9].

Данный комплекс был создан на принципе разнесенной угломерно-суммарно-дальномерной локации целей в зоне подсвета базовых станций сотовой связи стандарта GSM (Group Special Mobile). В качестве излучающего сигнала в нем используется излучение GSM-антенн сотовых операторов, а не собственные передатчики. При этом территориально-частотное планирование сети GSM осуществляется в целях формирования непрерывной зоны покрытия территорий с наибольшей плотностью населения. Сплошное поле подсвета таких базовых станций, в свою очередь, позволяет сформировать круглосуточное помехоустойчивое многочастотное поле локации воздушных целей по отраженному от них сигналу. Количество приемных позиций РЛК «Рубеж» превышает 10, поэтому его с полным основанием можно считать многопозиционной радиолокационной системой (МПРЛС) со всеми вытекающими преимуществами. В нем дальность до радиомолчащей цели определяется путем взаимной синхронизации позиций и вычисления начала отсчета суммарного времени запаздывания прихода отраженной от цели радиоволны, которая излучается GSM-антенной на определенном антенно-мачтовом сооружении. В этом случае координаты цели определяются благодаря уже известному расстоянию между двумя и более пассивными радиолокаторами (антенными постами), а также угломестным и азимутальным расположением цели в пространстве относительно каждого пассивного радиолокатора системы.

В отличие от МКПРиР, который использует сигналы телевизионного формата DVB-T2 и FM-радиостанций (диапазон волн $\lambda = 1-3$ м), РЛК «Рубеж» использует подсвет базовых станций сотовой связи стандарта GSM ($\lambda = 15$ см). Очевидно, что плотность покрытия сотовой связи значительно выше и создает более мощные сигналы на входе системы, а более короткие волны обеспечивают к тому же более высокую потенциальную точность измерения координат (в 10–20 раз точнее) [10].

В последнее время основными воздушными угрозами для критически важных объектов стали многочисленные модели БПЛА, эффективная отражающая поверхность которых составляет лишь сотые доли квадратного метра. Для противодействия таким целям компания «Антидронтех» [11] уже 7 лет занимается разработкой и продажей различных систем «Антидрон». Ее пассивный бистатический локаатор «Контур 03м» использует стороннее излучение и обладает минимальной дальностью отображения цели – 20 м, максимальной даль-

ностью работы по целям типа БПЛА (ЭПР – около $0,01 \text{ м}^2$) – 1500 м, точностью определения положения объекта до 1 м и возможностью определения азимута с точностью до $0,5^\circ$. Столь высокие характеристики позволяют данному локактору отображать текущие координаты БПЛА, определять координаты точки его взлета, записывать его траекторию и даже показывать марку и серийный номер беспилотников типа DJI Mavic или FPV-дронов. Данный локактор имеет непрерывный обзор по азимуту 360° и 90° по вертикали.

Таким образом, высокая скрытность и помехоустойчивость функционирования многопозиционных радиолокационных систем способствуют эффективной защите мегаполисов от беспилотных летательных аппаратов, обеспечивая своевременное обнаружение и подавление их действий.

Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания на 2024 г. № 075-00698-24-02.

Список литературы

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
2. Викулов О.В., Меркулов В.И. Структура моделей пространственно-временных сигналов и полей многопозиционной радиолокационной системы // Радиотехника. 1998. № 2. С. 26–29.
3. Викулов О.В., Добыкин В.Д., Дрогалин В.В., Казаков В.Д., Меркулов В.И., Чернов В.С., Шабатура Ю.М. Современное состояние и перспективы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 12. С. 3–16.
4. Викулов О.В., Меркулов О.В., Саблин В.Н. Авиационные многопозиционные радиолокационные системы многоканального наведения. Разведывательно-ударные комплексы // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 9. С. 3–31.
5. Алексеев Ю.Я., Викулов О.В., Громов М.В. и др. Способы и средства помехозащиты радиолокационных измерителей дальности и скорости в режимах сопровождения // Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 1. С. 3–64.
6. Алифанов Р.Н., Стародубцев П.А., Дементьев С.Г., Дементьев С.С. Системы общедоступного радиовещательного передатчика для обнаружения и сопровождения цели // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 6.
7. Пассивный когерентный локактор (ПКЛ). Технические характеристики. URL: <https://nii-vektor.ru/staczionarnyj-kogerentnyj-lokator> (дата обращения: 04.04.2024).
8. Аношкин И.М. Зарубежные многопозиционные радиолокационные системы скрытного контроля воздушного пространства // Наука и военная безопасность. 2007. № 1. С. 28–33.
9. Комплекс «Рубеж» превращает станции сотовой связи в радары. URL: <https://promvest.info/ru/novosti-kompaniy/kompleks-rubej-prevrashaet-stantsii-sotovoy-svyazi-v-radaryi/?ysclid=lu8mwnbwrz160446753> (дата обращения: 04.04.2024).
10. Контроль воздушного пространства: радиолокационное поле. Федеральная система разведки и контроля воздушного пространства проблемы совершенствования. URL: <https://vabkhaziizhit.ru/monitenegro/kontrol-vozdushnogo-prostranstva-radiolokacionnoe-pole-statya.html> (дата обращения: 26.03.2024).
11. Система обнаружения и подавления квадрокоптеров. URL: <https://antidronetech.ru> (дата обращения: 04.04.2024).

References

1. Chernyak V.S. (1993) *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multi-position radar] *Radio i svyaz'* [Radio and communication]. Moscow. 416 p.
2. Vikulov O.V., Merkulov V.I. (1998) *Struktura modeley prostranstvenno-vremennykh signalov i poley mnogopozitsionnoy radiolokatsionnoy sistemy* [Structure of models of spatio-temporal signals and fields of a multi-position radar system] *Radiotekhnika* [Radio engineering] No. 2. P. 26–29.
3. Vikulov O.V., Dobykin V.D., Drogalin V.V., Kazakov V.D., Merkulov V.I., Chernov V.S., Shabatura Yu.M. (1998) *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya aviatsionnykh sredstv radioelektronnoy bor'by*

[Current state and prospects for the development of aviation electronic warfare systems] *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Advances in modern radio electronics]. No. 12. P. 3–16.

4. Vikulov O.V., Merkulov O.V., Sablin V.N. (1998) *Aviatsionnye mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy mnogokanal'nogo navedeniya* [Aviation multi-position radar systems for multi-channel guidance] *Razvedyvatel'no-udarnye komplekсы. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Reconnaissance and strike complexes. Advances in modern radio electronics]. No. 9. P. 3–31.

5. Alekseev Yu.Ya., Vikulov O.V., Gromov M.V. and others (2000) *Sposoby i sredstva pomekhozashchity radiolokatsionnykh izmeriteley dal'nosti i skorosti v rezhimakh soprovozhdeniya* [Methods and means of interference protection of radar range and speed meters in tracking modes] *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Advances in modern radio electronics]. No. 1. P. 3–64.

6. Alifanov R.N., Starodubtsev P.A., Dementyev S.G., Dementyev S.S. (2014) *Sistemy obshchedostupnogo radioveshchatel'nogo peredatchika dlya obnaruzheniya i soprovozhdeniya tseli* [Public broadcast transmitter systems for target detection and tracking] *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet journal «Naukovedenie»]. No. 6.

7. *Passivnyy kogerentnyy lokator (PKL)* [Passive coherent locator (PCL)] *Tekhnicheskie kharakteristiki* [Specifications]. Available at: <https://nii-vektor.ru/stacionarnyj-koge-rentnyj-lokator> (date of access: 04.04.2024).

8. Anoshkin I.M. (2007) *Zarubezhnye mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy skrytnogo kontrolya vozdušnogo prostranstva* [Foreign multi-position radar systems for covert airspace control] *Nauka i voennaya bezopasnost'* [Science and military security]. No. 1. P. 28–33.

9. *Kompleks «Rubezh» prevrashchaet stantsii sotovoy svyazi v radary* [The Rubezh complex turns cellular communication stations into radars]. Available at: <https://promvest.info/ru/novosti-kompaniy/kompleks-rubej-prevrashchaet-stantsii-sotovoy-svyazi-v-radaryi/?ysclid=lu8mwn6wrz160446753> (date of access: 04.04.2024).

10. *Kontrol' vozdušnogo prostranstva: radiolokatsionnoe pole* [Airspace control: radar field] *Federal'naya sistema razvedki i kontrolya vozdušnogo prostranstva problemy sovershenstvovaniya* [The federal system of reconnaissance and airspace control problems of improvement]. Available at: <https://vabkhaziizhit.ru/montenegro/kontrol-vozdušnogo-prostranstva-radiolo-kacionnoe-pole-statya.html> (date of access: 26.03.2024).

11. *Sistema obnaruzheniya i podavleniya kvadrokopterov* [Quadcopter detection and suppression system]. Available at: <https://antidronetech.ru> (date of access: 04.04.2024)