



УДК 621.396.967

А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, А. А. Головков, В. М. Кутузов, В. Н. Малышев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
О. Г. Петкау, Н. С. Стенюков, М. С. Шмырин
АО «НИИ "Вектор"»

Полуактивная радиолокация в системах мониторинга обстановки и охраны важных объектов¹

Представлены принципы построения и вопросы практической реализации систем полуактивной радиолокации, использующих сигналы подсвета сторонних источников. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) и АО «НИИ "Вектор"» в этом направлении. Рассмотрены преимущества систем полуактивной радиолокации, возможности когерентной обработки с большим временем накопления, а также перспективы применения систем полуактивной радиолокации для охраны важных объектов и мониторинга территорий, включая обнаружение и траекторное сопровождение наземных, надводных и воздушных объектов. Описана структура разрабатываемого пассивного когерентного локационного комплекса, приведены его основные технические характеристики.

Полуактивная радиолокация, пассивная когерентная локация, цифровое наземное вещание, DRM, DVB-T2, сплошное радиолокационное покрытие, охрана объектов, периметров и территорий

По способу использования излучения радиолокацию обычно подразделяют на активную и пассивную. Активные радиолокационные системы излучают в пространство электромагнитную энергию и обнаруживают отраженные от целей сигналы. Пассивная радиолокация основана на регистрации сигналов, излучаемых самими целями.

С середины 1980-х гг. стало развиваться такое направление, как полуактивная радиолокация (ПАРЛ). Суть его заключается в том, что на приемной позиции регистрируются сигналы, отраженные от цели, однако излученные не собственным передатчиком радиолокационной станции (РЛС), а неким внешним по отношению к системе (сторонним) передатчиком. Сигналы стороннего передатчика называют сигналами подсвета. Чаще всего в качестве подсвета используют сигналы вещательных (радио- и телевизионных) передатчиков, мобильных телефонных сетей, спутниковых навигационных систем и т. д. ПАРЛ пред-

ставляет собой соединение идей пассивной и активной локации: от первой – отсутствие собственного передатчика, от второй – прием отраженных сигналов [1], [2].

Основные достоинства и недостатки ПАРЛ-системы (ПАРЛС) связаны с отсутствием в ее составе собственного передатчика. Из достоинств отметим меньшую стоимость производства, размещения и эксплуатации, отсутствие необходимости выделения частоты, отсутствие вредного воздействия на окружающую среду и помех другим радиотехническим устройствам. Среди недостатков – отсутствие контроля за передатчиком: его местоположение, тип сигнала, режим работы не зависят от РЛС и их нельзя как-то настраивать в интересах локационной системы (впрочем, возможен вариант, когда в качестве источника сигнала подсвета используется передатчик, похожий на обычный вещательный, но на самом деле согласованный с приемной позицией (ПП) ПАРЛС).

¹ В публикации использованы результаты ОКР "Разработка пассивного когерентного локационного комплекса для охраны важных объектов", выполняемой СПбГЭТУ "ЛЭТИ" по договору с АО «НИИ "Вектор"» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства при финансовой поддержке работ по проекту Министерством образования и науки Российской Федерации (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Кроме того, достоинством ПАРЛС является возможность формирования произвольной зоны наблюдения за счет широкой (как правило) сети достаточно мощных передатчиков подсвета и оптимального выбора местоположения ПП. С другой стороны, следует отметить, что ПАРЛ – технологически сложный метод, требующий использования особого оборудования и высокоэффективных алгоритмов обработки. Тем не менее совокупность преимуществ ПАРЛ, особенно проявившихся в связи с развитием наземного цифрового вещания, обусловила значительный интерес к использованию этой технологии для решения радиолокационных задач.

ПАРЛС в общем случае состоит из нескольких разнесенных в пространстве передающих и приемных позиций. ПАРЛС могут быть бистатическими (один приемник и один передатчик) (рис. 1) и мультистатическими (несколько приемников – один передатчик, несколько передатчиков – один приемник, несколько передатчиков – несколько приемников). Мультистатические ПАРЛС могут быть одночастотными, т. е. принимать сигналы от нескольких передатчиков, работающих на одной частоте, и многочастотными.

Различают когерентные ПАРЛС, называемые за рубежом пассивными когерентными РЛС (Passive coherent location radar – PCL), и некогерентные. Некогерентным ПАРЛС для измерения координат цели требуется не менее двух ПП при пеленгационном (угломерном) и не менее трех ПП при разностно-дальномерном (гиперболическом) способах определения координат цели.

Отличительной особенностью когерентных систем является наличие двух каналов приема – прямого 1 и переотраженного целью 2 сигналов (рис. 1). В системе измеряется временной интервал между поступлением этих сигналов, что позволяет определить пространственные координаты цели, если на ПП измеряется направление на цель. С точки зрения обработки сигнала пассивную когерентную РЛС отличает

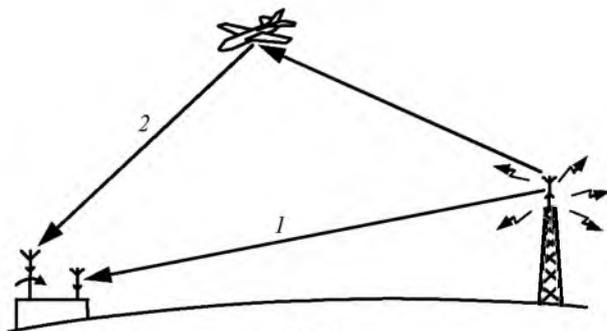


Рис. 1

чает вычисление взаимной корреляционной функции прямого и переотраженного сигналов. Далее рассмотрены только когерентные ПАРЛС.

Широкое внедрение цифровых форматов передачи сообщений и успехи в области цифровой обработки сигналов привели к тому, что в последнее десятилетие интерес к полуактивной локации существенно возрос, однако при этом остается нерешенным ряд вопросов, связанных с использованием новейших цифровых стандартов, например, наземного телевизионного вещания (ТВ) DVB-T2 в интересах радиолокационного наблюдения.

В результате работ по созданию ПАРЛС, использующих сигналы подсвета вещательных передатчиков, ряд стран (США, Великобритания, Франция, Германия, Польша, Чехия, Беларусь) создали действующие системы или макеты, работающие по этому принципу. Первой из таких систем стала американская ПАРЛС "Silent Sentry" компании "Lockheed-Martin", использующая излучение ТВ- и FM-передатчиков. Затем последовала британская ПАРЛС "Celldar" (CELLular raDAR) (2003) разработки "Roke Manor", использующая излучение сотовой телефонной сети стандартов GSM 900, 1800 и 3G. На базе "Celldar" разрабатываются пассивные системы, использующие иные сигналы подсвета, например Wi-Fi. Европейской компанией "Thales" разработана ПАРЛС "Homeland Alerter 100", предназначенная для получения данных о малоскоростных маловысотных воздушных целях (в том числе беспилотных аппаратах, крылатых ракетах и целях, создаваемых по технологии Stealth) и использующая сигналы цифровых радиовещательных станций УКВ-диапазона и аналоговых ТВ-передатчиков. В родственной ПАРЛС "SINBAD" этой же компании используются уже наземные цифровые ТВ-передатчики стандарта DVB-T. Своя ПАРЛС есть и у чешской фирмы ERA. Существует также множество разработок исследовательского характера: "CORA" (FGAN, Германия), "CASSIDIAN PARADE" ("Cassidian Electronics"), PaRaDe (Варшавский технологический университет; PARADE – Passive radar demonstrator) и др. Об интенсивности работ в области ПАРЛ за рубежом свидетельствует и постоянное обсуждение этой темы на конференциях и страницах профильных журналов.

Традиционное радиолокационное наблюдение обеспечивает обнаружение целей на средних и больших высотах. Развертывание новых РЛС для маловысотного поля – дело весьма дорогое, а в местах с большой плотностью населения, кроме

того, вызывает серьезные проблемы в сфере экологии и электромагнитной совместимости (воздействие излучения РЛС на радиоэлектронные системы жизнеобеспечения, связи, а также экологические и санитарные нормативы, принятые для гражданского населения).

Современные вызовы и угрозы требуют применения именно средств маловысотной радиолокации. Причем находиться они должны как раз на густонаселенных территориях и в местах расположения стратегически важных объектов (АЭС, порты и др.).

К основным факторам, определяющим актуальность создания ПАРЛС, относятся следующие.

Во-первых, все увеличивающаяся активность коммерческой и частной легкомоторной авиации. Уже сегодня масштабы никем не санкционированных полетов самодельных и промышленным способом изготовленных летательных аппаратов (и связанные с ними происшествия) заставляют задуматься о проблеме контроля в приземном воздушном пространстве.

Во-вторых, возможность террористических угроз с использованием летательных аппаратов различных классов, в том числе беспилотных. Относительная доступность легкомоторного авиарма позволяет использовать его для скрытой доставки оружия к густонаселенным центрам, местам массового скопления людей, стратегически и политически важным объектам государственного управления или обеспечения жизнедеятельности и т. д.

В Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ) "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) интенсивными исследованиями в области ПАРЛ начали заниматься с 2012 г. [1]–[5]. Одной из первых работ в этом направлении была НИР "Разработка пассивной радиотехнической системы контроля воздушной обстановки мегаполиса при использовании радиоизлучений цифрового телевидения и радиовещания" (шифр "Мегаполис"), выполненная в рамках договора с АО «НИИ "Вектор"».

В результате выполнения НИР были разработаны технические предложения по созданию указанной ПАРЛС. ПАРЛС контроля воздушной обстановки мегаполиса должна формировать сплошное (стелющееся) радиолокационное покрытие приземного пространства, в котором в городских (пригородных) условиях обеспечивается обнаружение и сопровождение воздушных объектов, летящих со скоростью не менее 20 км/ч на высоте более 35 м. Площадь зоны видимости ПАРЛС при вероятности обнаружения 0.9 и вероятности ложной тревоги менее 10^{-3} должна составлять не менее 2500 км². Точность определения координат ПАРЛС должна быть не менее 10 км на плоскости по сигналам радиовещания КВ-диапазона и не менее 100 м на плоскости и по высоте 1000 м по сигналам цифрового телевидения. Число одновременно сопровождаемых целей – не менее 10 по сигналам радиовещания КВ-диапазона и 100 – по сигналам цифрового телевидения.

В процессе выполнения НИР "Мегаполис" проведен ряд натурных экспериментальных исследований с использованием разработанного и реализованного макета ПАРЛС.

Далее представлены некоторые результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований.

Экспериментальный макет ПАРЛС включал (рис. 2):

- две телевизионные антенны для приема цифровых ТВ-сигналов дециметрового диапазона (1, 2);
- полосовые фильтры (3, 4) и усилители (5, 6);
- двухканальный АЦП 7;
- ноутбук 8, реализующий функции предварительной обработки сигналов, визуализации наблюдаемого процесса и записи полученных данных на жесткий диск для последующей их обработки.

В качестве стороннего источника излучения использовался передатчик ТВ-сигнала стандарта DVB-T2 частотой 586 МГц, располагающийся на телевизионной башне Ленинградского радиотелевизионного передающего центра (ЛРТГЦ).

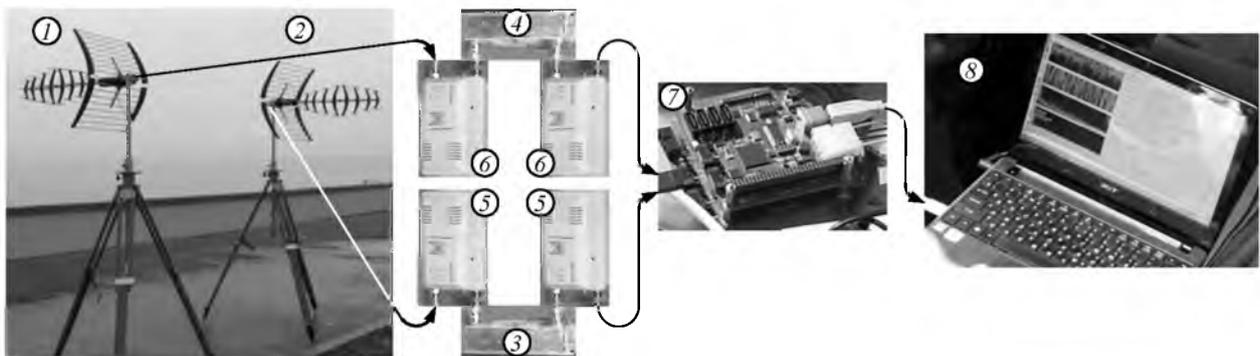


Рис. 2

Обнаружение самолетов. Во время проведения экспериментов макет ПАРЛС располагался во дворе Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУГА) по координатам 59.819187° с. ш., 30.289363° в. д. (рис. 3, 1). Расстояние между этой точкой и телебашней (рис. 3, 2) с использующейся в качестве стороннего источника излучения передатчиком DVB-T2 17.6 км. В экспериментах обнаруживались гражданские самолеты при их взлете и посадке в аэропорту "Пулково" (рис. 3, 3).

Пример полученных в эксперименте результатов корреляционной обработки (взаимная функция



Рис. 3

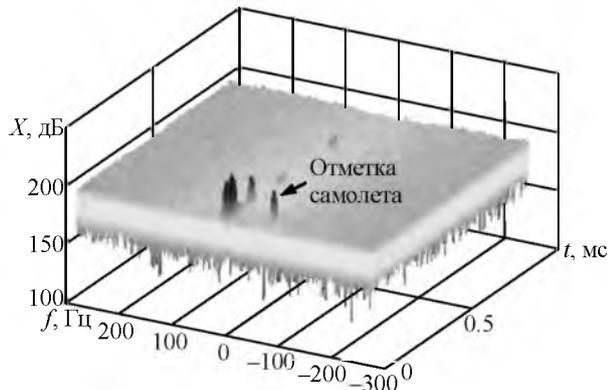


Рис. 4

неопределенности (ВФН) прямого и переотраженного сигналов X) представлены на рис. 4.

Обнаружение судов. Во время проведения экспериментов макет ПАРЛС располагался на берегу Финского залива (рис. 5, 1) на расстоянии 11 км от ЛРТПЦ (рис. 5, 2). В процессе экспериментов осуществлялось устойчивое обнаружение судов, движущихся в акватории Финского залива (рис. 5, 3) на расстоянии до 20 км от макета ПАРЛС.

Пример результатов корреляционной обработки прямого и переотраженного сигналов судна приведены на рис. 6.

Обнаружение автомобилей. Во время эксперимента макет ПАРЛС располагался на расстоянии приблизительно 40 м от участка Кольцевой автомобильной дороги (КАД) Санкт-Петербурга [3]. На рис. 7, а показаны все траектории на плоскости "задержка (τ_b) – частота Доплера" (f_D), обнаруженные, сопровождаемые и сброшенные за случайно выбранный временной интервал, равный 30 с. Рядом с последней отметкой каждой траектории отображен ее номер. Один из кадров



Рис. 5

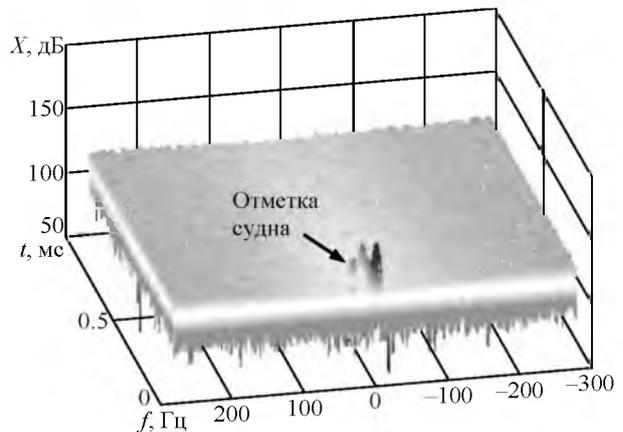


Рис. 6

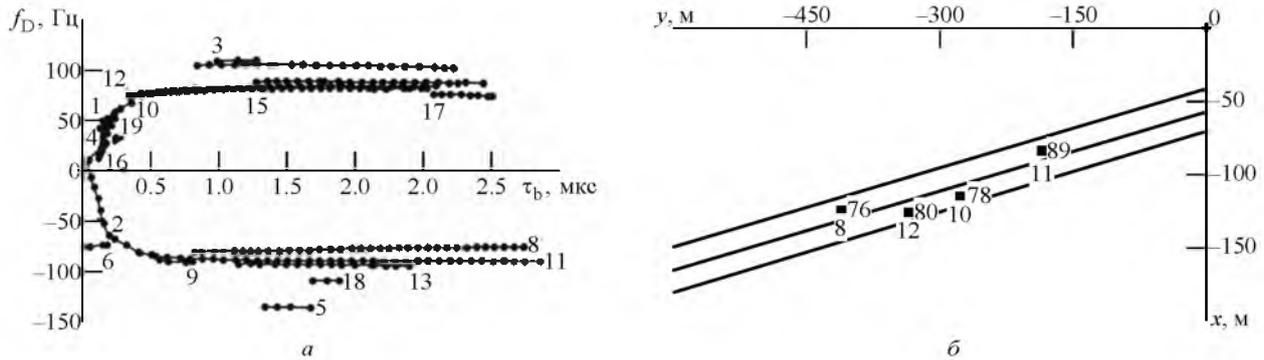


Рис. 7

индикатора положения и скорости автомобилей показан на рис. 7, б. Справа от квадратных маркеров, показывающих положение автомобиля в прямоугольной системе координат с началом в точке расположения ПП, отображается измеренная скорость [км/ч], снизу – номер траектории. Максимальная дальность обнаружения автомобилей составила 528 м.

В 2014 г. СПбГЭТУ "ЛЭТИ" приступил к выполнению ОКР "Разработка пассивного когерентного локационного комплекса для охраны важных объектов" (шифр "Охрана"), выполняемой по заказу АО «НИИ "Вектор"» в рамках реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г. Разрабатываемый в рамках ОКР пассивный когерентный локационный комплекс (ПКЛК) предназначен для обнаружения движущихся воздушных, наземных и надводных целей в охранной зоне важных объектов (критически важных, потенциально опасных и др.), таких как атомные электростанции, крупные инженерные сооружения, гидроузлы, химические производства и т. д.

Реализация проекта будет способствовать созданию технологий ПАРЛС, используемых для решения различных задач:

- охраны периметров и территорий стратегически важных объектов;
- управления воздушным движением (так как ПАРЛС при схожих (в перспективе) с активной РЛС характеристиках по обнаружению и точно-

сти сопровождения воздушных целей потребляет меньше энергии, не излучает, не требует выделения частот или частотных каналов);

- навигации и судовождения (особенно в акватории портов, где существуют ограничения на использование активных РЛС);

- создания радиолокационного поля, в том числе маловысотного, для обнаружения и сопровождения воздушных целей на границе, над городами, важными объектами.

В состав ПКЛК входят (рис. 8):

- базовый сегмент антенной системы (БСАС) 1, предназначенный для приема отраженных от целей и прямых сигналов цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 и сигналов FM-радиовещания;

- 18-канальное устройство приема и обработки сигналов (УПОС) 2, выполняющее фильтрацию, усиление, аналого-цифровое преобразование, предварительную цифровую обработку и передачу данных комплексу вычислительных средств (КВС);

- КВС 3, принимающий данные от УПОС и решающий с помощью специализированного программного обеспечения следующие задачи:

- ◊ обнаружение целей,
- ◊ оценку координат обнаруженных целей,
- ◊ захват траекторий и траекторное сопровождение целей,
- ◊ отображение на экране монитора параметров и результатов обработки (ПРО) по указанным пунктам,
- ◊ регистрацию ПРО,
- ◊ сигнализацию о несанкционированном появлении цели в зоне действия ПАРЛС,

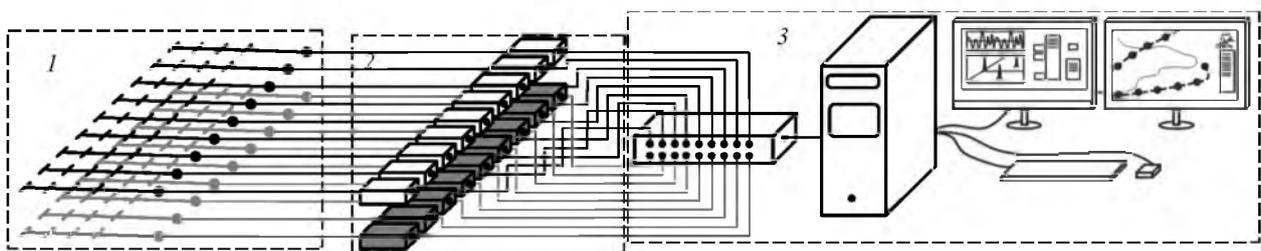


Рис. 8

Показатель	Значение
Зона действия:	
– по дальности (для цели с эффективной площадью рассеяния 1 м^2 при вероятности правильного обнаружения 0.9 и вероятности ложной тревоги 10^{-3}), км, не менее	10
– по азимуту, ...°, не менее	45
– по углу места, ...°, не менее	45
Разрешающая способность:	
– по дальности, м, не более	100
– по скорости, км/ч, не более	10
Предельная допустимая погрешность (ПДП) оценки координат цели в горизонтальной плоскости, м	200
ПДП оценки скорости цели в горизонтальной плоскости, км/ч	10
Количество одновременно сопровождаемых целей, не менее	10
Минимальная скорость цели, км/ч	10
Максимальная скорость сопровождаемой цели, км/ч, не менее	640
Максимальное ускорение сопровождаемой цели, м/с^2	7
Время захвата траектории с, не более	30

- ◊ прием ПРО от других ПКЛК и передачу ПРО другим ПКЛК и внешним устройствам потребителя,
- ◊ предоставление возможности ввода информации через клавиатуру и компьютерную мышь,
- ◊ автоматизированный контроль функционирования ПКЛК.

В таблице приведены показатели ПКЛК при работе по сигналам цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2.

В настоящее время макет ПКЛК установлен на одном из корпусов СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (рис. 9) и находится в стадии исследовательских испытаний.

В результате проведенных исследований установлено, что ПАРЛС, использующие сигналы подсвета сторонних источников (таких, как вещательные телевизионные и радиочастоты, базовые станции мобильных систем и т. п.) в настоящее время рассматриваются как перспективные средства обнаружения и траекторного сопровождения радиомолчащих наземных, надводных и воздушных объектов. ПАРЛС обладает рядом преимуществ: меньшей стоимостью производства, размещения и эксплуатации; отсутствием необходимости выделения частот; отсутствием вредного



Рис. 9

воздействия на окружающую среду и помех другим радиотехническим устройствам; скрытностью. Характерные особенности ПАРЛС обуславливают высокий потенциал их применения для охраны важных объектов, мониторинга периметров и территорий, в т. ч. с созданием маловысотного радиолокационного поля. Широкое распространение современных цифровых вещательных и телекоммуникационных систем обеспечивает ПАРЛС эффективными сигналами подсвета с хорошими

корреляционными свойствами, что позволяет получить требуемые технические характеристики в самых разных условиях применения. Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных СПбГЭТУ "ЛЭТИ" и АО «НИИ "Вектор"», обуславливают хорошие перспективы создания и развертывания систем полуактивной радиолокации, использующих сигналы подсвета сторонних источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 1: Современное состояние / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Д. А. Ковалев и др. // Инновации. 2013. № 9. С. 114–119.

2. Бархатов А. В., Коновалов А. А. Использование сигналов цифрового эфирного телевидения для определения координат и скорости автомобилей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 4. С. 32–37.

3. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 2: Освещение воздушной обстановки и экологический мониторинг / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Д. А. Ковалев и др. // Инновации. 2013. № 10. С. 7–11.

4. Фам Хуан Тиеп. Экспериментальные исследования макета полуактивной радиолокационной системы при использовании радиоизлучений цифрового эфирного телевидения DVB-T2 // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 29–32.

5. Kovalev D. A., Veremyev V. I. Correction of DVB-T2 signal cross-ambiguity function for passive radar // IEEE Int. radar conf. Lille, 13–17 Oct. 2014. P. 1–4. URL: // <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7060403> (дата обращения: 29.09.2015).

A. V. Barkhatov, V. I. Veremjiev, A. A. Golovkov, V. M. Kutuzov, V. N. Malyshev
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

O. G. Petkau, N. S. Stenjukov, M. S. Shmyrin
JSC «SRI "Veknor"»

Semi-active radar systems for critical facilities monitoring and protection

The principles of construction and implementation of semi-active radar systems, using the illumination from third-party sources are presented. The results of theoretical and experimental researches of the Saint-Petersburg state electro-technical university "LETI" n. a. V. I. Ulyanov (Lenin) and JSC «SRI "Vector"» in this direction are given. The advantages of semi-active radar systems, the possibility of coherent processing with a large accumulation time in combination with the digital formation of the directional diagrams of the receiving antenna arrays, as well as prospects of application systems semi-active radar for the protection of important sites and monitoring areas, including the detection and orbital support of ground, surface and aerial objects. The structure of the developed passive coherent radar complex is described; its basic technical characteristics are given.

Semi-active location, passive coherent location, digital terrestrial broadcasting, DRM, DVB-T2, continuous radar coverage, protection of objects, perimeters and areas

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2015 г.