

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВАРИАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ЭХО-СИГНАЛОВ В НЕИЗЛУЧАЮЩИХ РАДАРАХ*

И. В. Донец^{1,2}, Я. А. Рейзенкинд^{1,2}, В. Н. Шевченко¹

¹АО «Всероссийский научно-исследовательский институт "Градиент"»,
344010, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 96

²Южный федеральный университет,
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42
E-mail: rostov@gbsviaz.ru

Представлены результаты экспериментальной апробации вычислительно-эффективной процедуры построения многомерных (в координатах «угловое направление — задержка — доплеровский сдвиг частоты») радиоизображений эхо-сигналов целей вариационным методом в комплексах радиолокации с посторонним подсветом.

Ключевые слова: скрытная радиолокация, совмещённое обнаружение и локализация эхо-сигналов, радиоизображение.

DOI: 10.15372/AUT20180207

Введение. В последние годы наблюдается новый виток развития радиолокации с посторонним подсветом (пассивная, скрытная или неизлучающая), основанной на одновременном приёме сигналов, излучаемых различными нерадарными наземными или спутниковыми передатчиками (теле- и радиовещания, связи), и сигналов, рассеянных целями. Исследования в этой области в нашей стране [1–11] и за рубежом [12–14] стимулируются преимуществами данного направления по сравнению с классической активной радиолокацией: радиотехнической скрытностью, живучестью, экологичностью и экономичностью.

Традиционно [1, 2, 4, 9, 14] в комплексах скрытной радиолокации обработка сигналов проводится в несколько этапов. Сначала формируется частотно-временное изображение эхо-сигналов целей, по которому выполняется обнаружение рассеивающих объектов и оценка задержек (для оценок дальностей) и доплеровских сдвигов частоты (для оценок скоростей). Далее полученные задержки используются для локализации целей в трёхмерном пространстве путём нахождения точек пересечения эллипсоидов вращения или точек пересечения эллипсоидов вращения и пеленгов целей. Доплеровские сдвиги частоты применяются для оценки скоростей целей. В силу того что при многоэтапной обработке сигналов неизбежна потеря информации, этот подход не может обеспечить потенциально возможные характеристики обнаружения и оценивания пространственных координат объектов.

Более перспективными являются одноэтапные методы совмещённого обнаружения и оценивания параметров эхо-сигналов, в основу которых положены методы формирования многомерных изображений в координатах «задержка — доплеровский сдвиг частоты — угловое направление» [8]. В [15, 16] аналогичный подход исследуется применительно к радарам MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) и SIMO (Single-Input Multiple-Output).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 3.5398.2017/8.9).

В работе [8] в рамках решения задачи совместного обнаружения/оценивания параметров радиомолчащих объектов в неизлучающих радарх предложена и математическим моделированием апробирована процедура формирования многомерных радиоизображений эхо-сигналов целей в координатах «задержка — доплеровский сдвиг частоты — угловое направление» на основе вариационного подхода. Цель предлагаемой работы — апробация этой процедуры в натурном эксперименте: обнаружение и сопровождение подвижного объекта, включая оценку его пространственных координат, когда наличие подвижного объекта в зоне наблюдения подтверждено визуально.

Структура системы для одноэтапного обнаружения и оценивания пространственных координат эхо-сигналов. В [8] для одноэтапного обнаружения и оценивания пространственных координат подвижных объектов рассматривается бистатистическая пара, включающая в себя один передатчик подсвета и один многоканальный приёмник. Приёмник подключён к M пространственно разнесённым антенным элементам и осуществляет когерентный приём и цифровую регистрацию прямого сигнала подсвета, используемого при дальнейшей обработке в качестве опорного, и сигналов, рассеянных подвижными и неподвижными объектами. Предполагается, что координаты антенн передатчика и приёмника известны, а запись временных отсчётов принятых сигналов производится синхронно с частотой выборки, удовлетворяющей теореме отсчётов. Полная постановка задачи и вычислительно-эффективная процедура её решения, включающая шесть пунктов (этапов), приведены в [8].

Результаты экспериментальных исследований. Для подсвета целей использовались сигналы цифрового вещания 37-го телевизионного канала (диапазон частот 598–606 МГц), передатчик которых располагался на удалении 17 км от пункта приёма эхо-сигналов. Приёмная система включала 16 логопериодических антенн, размещённых на окружности радиусом $R = 2,4\lambda_0$ (λ_0 — длина волны на центральной частоте сигнала подсвета), 16-канальный когерентный радиоприёмник прямого усиления и 16-канальный 16-разрядный АЦП. Запись сигналов со всех антенн производилась выборками длиной 524288 отсчётов с частотой дискретизации 304688 Гц в течение интервала времени ~ 300 с. Часть этого времени в пределах прямой видимости на расстоянии примерно 8–9 км от приёмного пункта наблюдался вертолёт.

Опорный сигнал \mathbf{s} находился как главный собственный вектор матрицы Грамма [17]. Для расчёта элементов матрицы Φ (см. формулы (7), (15) в [8]) антенны были откалиброваны в азимутальной плоскости.

С помощью вычислительно-эффективной процедуры (п. 1 алгоритма в [8]) анализировалась сигнальная обстановка для нулевого доплеровского сдвига частоты. Использовалась пространственная сетка, содержащая 60 направлений по азимуту с шагом 6° при числе задержек 15, т. е. 900 узлов. Поверхность амплитуд компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^0$, соответствующего нулевому доплеровскому сдвигу, показана на рис. 1. На поверхности выделяется главный максимум, связанный с прямым сигналом подсвета с нулевым азимутом и с нулевой задержкой, а также несколько меньших максимумов, связанных с мощными стационарными переотражателями.

Далее (п. 2 алгоритма в [8]) выполнялся отбор части компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^0$ с амплитудами в интервале от 0 до -50 дБ относительно сигнала подсвета и фиксировались соответствующие им наборы задержек $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_G$ и угловых положений $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_G$ (всего 44 стационарных объекта).

Размер использованной в дальнейших расчётах пространственной сетки сокращался путём исключения узлов (п. 3 в [8]), не попавших в указанные наборы. В результате размер сетки уменьшился на 95 % и составил 45 узлов.

Согласно пп. 4 и 5 сетка для нулевого сдвига частоты ($p = 0$) последовательно комбинировалась с одной из сеток, соответствующих ненулевому частотному сдвигу ($p \neq 0$). Эти сетки содержали по 15 временных задержек и по 20 углов прихода, взятых через 1° , что

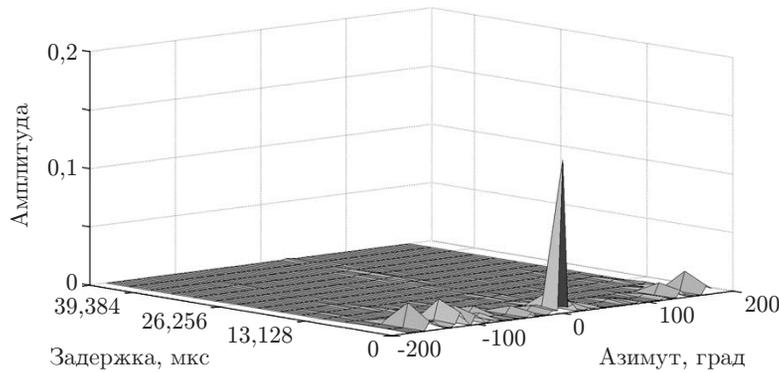


Рис. 1. Амплитуды компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^0$

позволяло произвести обзор в секторе 360° . Таким образом, многократно выполнялись итерации (см. (10) в [8]) на сетках размером $45 + 15 \cdot 20 = 345$ узлов. Отметим, что полная координатная сетка содержала 1512000 узлов, а число сеток уменьшенного размера (345 узлов) — $1512000/300 = 5040$.

Далее проводился анализ полученных комплектов трёхмерных изображений (п. 6 в [8]), связанных с последовательными выборками в течение времени наблюдения 300 с в координатах «угол — задержка» при значениях сдвигов частоты от $-81,34$ до $81,34$ Гц с шагом $0,581$ Гц. Сечение одного из таких изображений — поверхность амплитуд компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^p$, соответствующая сдвигу частоты $70,301$ Гц ($p = 121$), показана на рис. 2, где наибольший максимум, величина которого равна $3,74 \cdot 10^{-12}$, предположительно является сигналом, отражённым от вертолёта.

Для автоматического обнаружения движущегося объекта сначала выделялись максимумы амплитуд в трёхмерном пространстве, а затем для каждого из них использовался метод Неймана — Пирсона [18].

Обозначим H_0 и H_1 соответственно гипотезы об отсутствии и наличии движущегося объекта в узле координатной сетки. При отсутствии объекта (гипотеза H_0) случайные величины \tilde{w} включают в себя остаточные шумы алгоритма и сигналы от малоскоростных подвижных объектов: $\tilde{w} = \tilde{\nu}$. При появлении движущегося объекта (гипотеза H_1) к этим сигналам добавляется рассеянный от него случайный сигнал $\tilde{\Sigma}$: $\tilde{w} = \tilde{\nu} + \tilde{\Sigma}$.

Функцию плотности распределения вероятности случайной величины $|\tilde{w}|$ (гипотеза H_0), где $\tilde{w} = \tilde{\nu}$, построить не удалось из-за изменения $|\tilde{w}|$ в большом динамическом диапазоне от 10^{-44} до $10^{-4,7}$. Вместо неё была построена функция плотности распределения вероятности случайной величины $y = \lg |\tilde{w}| = \lg |\tilde{\nu}|$. Эта функция $\rho(y|H_0)$ показана на рис. 3. Вероятность ложной тревоги задавалась равной $P_{FA} = 10^{-3}$. Пороговое значение

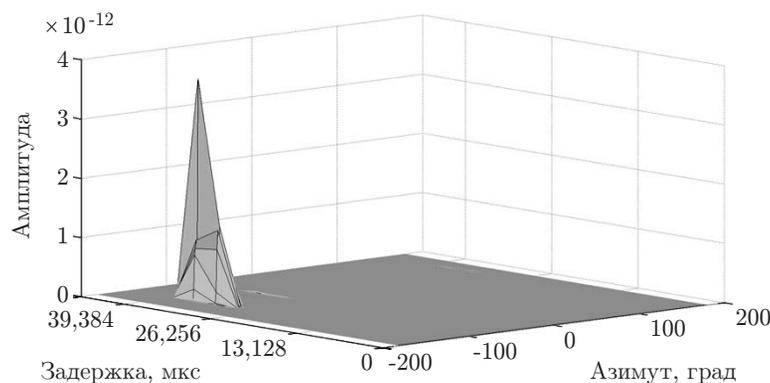


Рис. 2. Амплитуды компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^{121}$

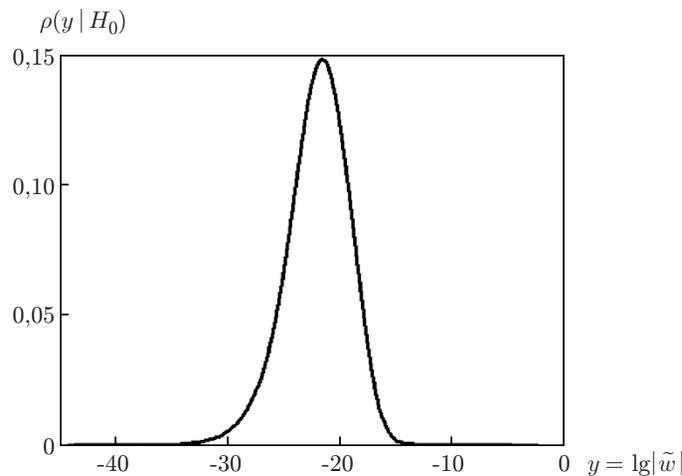


Рис. 3. Функция плотности распределения вероятности случайной величины y

случайной величины y будет $y_{\text{thres}} = -13,259$, а математическое ожидание $\langle y \rangle = -22,058$. Обе эти величины находились численным интегрированием.

Для гипотезы H_1 , соответствующей присутствию подвижного объекта с амплитудой сигнала, например, $3,74 \cdot 10^{-12}$ (см. рис. 2), более чем в 10^{10} раз превосходящего уровень $|\tilde{w}| = 10^{\langle y \rangle} = 10^{-22,058}$, имеем $y = \lg |\tilde{w}| \approx \lg |\tilde{\nu}| + \lg \chi \approx \lg |\tilde{\nu}| + \langle \lg \chi \rangle$, где $\chi = |\Sigma/\tilde{\nu}|$ — квадратный корень из отношения сигнал/шум. При этом математическое ожидание величины y по сравнению с гипотезой H_0 смещается на величину $\langle \lg \chi \rangle$ в сторону увеличения y и для плотностей вероятностей справедливо соотношение $\rho(y | H_1) \approx \rho(y - \langle \lg \chi \rangle | H_0)$. В рассматриваемом случае $\langle \lg \chi \rangle = 10,63$ (эта величина также находилась численным интегрированием). Тогда вероятность обнаружения подвижного объекта определяется интегрированием плотности вероятности $\rho(y | H_1)$ от y_{thres} до ∞ . Для сигнала от подвижного объекта с амплитудой $3,74 \cdot 10^{-12}$ вероятность обнаружения $P_D = 0,762$.

В результате анализа полученных комплектов изображений движущийся объект регистрировался с 79-й по 144-ю выборку со сдвигами частоты в интервале от $-36,0$ до $70,3$ Гц и отсчитанными от направления на источник подсвета азимутальными углами в интервале от 138 до -92° .

В приведённой на рис. 4, а диаграмме (спектрограмме) в координатах «доплеровский сдвиг частоты — номер временного съёма» изображены величины $\sum_{l,z} |\tilde{w}_{l,z}^p|$ для после-

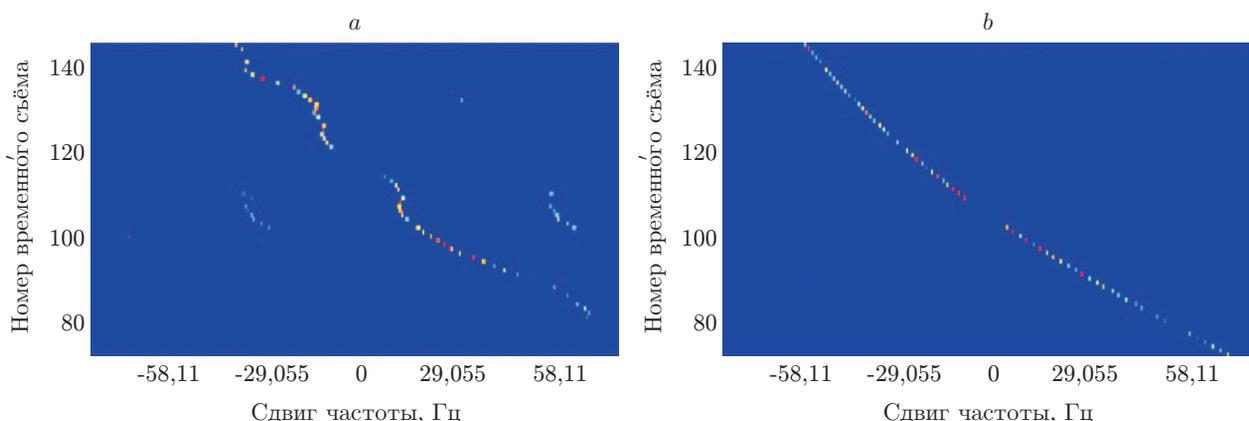


Рис. 4. Сумма амплитуд компонент векторов $\tilde{\mathbf{w}}^p$ по задержкам и направлениям как функция номера временного съёма: а — эксперимент, б — моделирование

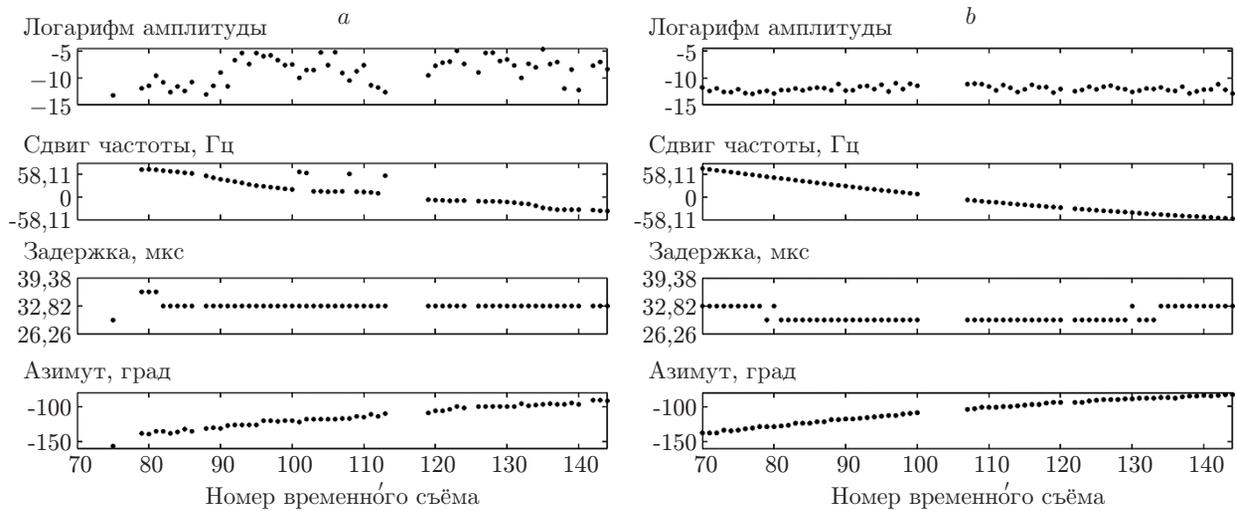


Рис. 5. Зависимости амплитуды сигнала, рассеянного подвижным объектом, сдвига частоты, задержки и азимутального направления от времени: *a* — эксперимент, *b* — моделирование

довательных временных съёмов с помощью изменяющихся от синего до красного условных цветов, причём синий цвет соответствует минимальной, а красный — максимальной сумме амплитуд компонент вектора $\tilde{\mathbf{w}}^p$ по всем исследуемым задержкам и направлениям прихода сигналов. При этом из рассмотрения исключены эхо-сигналы близко расположенных низкоскоростных объектов (автомобили, птицы) со сдвигом частоты, не превышающим 5,81 Гц.

Выстраивание отметок сигнала в трек на представленной спектрограмме подтверждает обнаружение подвижного объекта и описывает эхо-сигнал от его корпуса. Отметки, сдвинутые по частоте на ± 45 Гц от основного сигнала, свидетельствуют о наличии у объекта медленно вращающегося винта и являются сигналами микродоплеровской модуляции.

На рис. 5, *a* показаны построенные как функции времени (номера временного съёма i) амплитуда $|\tilde{w}|$ (в логарифмическом масштабе), сдвиг частоты, задержка z_i^p и азимут α_i^p , соответствующие компоненте $\tilde{\mathbf{w}}_i^p$ с амплитудой, превосходящей заданный порог $10^{-13,259}$. Наблюдаются значительные флуктуации амплитуды эхо-сигнала, что обусловлено изрезанностью диаграммы рассеяния объекта и его перемещением. Как видно из рисунка, экспериментальные точки для доплеровского сдвига частоты, задержки и азимутального угла ложатся на плавные кривые, что соответствует появлению из-за горизонта и движению медленно маневрирующей цели.

Полученные оценки параметров применялись для восстановления пространственной траектории цели путём расчёта её координат с помощью соотношений, приведённых в [8].

Оценка погрешности при восстановлении пространственной траектории.

Так как истинная траектория вертолёта не была известна, для оценки погрешности восстановления траектории использовался вычислительный эксперимент. Вертолёт моделировался идеально проводящей сферой диаметром 5 м. Траектория и скорость реального вертолёта оценивались из полученных экспериментальных результатов (см. рис. 5, *a*), и в вычислительном эксперименте траектория полагалась прямолинейной, а скорость — постоянной. Отношение сигнал/шум и величина параметра Лагранжа подбирались так, чтобы плотности распределения вероятности для шумов и спектрограммы, экспериментальные и полученные моделированием, были похожи, а соответствующие амплитуды сигналов (опорного и рассеянного объектом) были близки. На рис. 4, *b* приведена полученная в модельном эксперименте спектрограмма, а на рис. 5, *b* показаны зависимости амплитуды

сигнала, рассеянного подвижным объектом, сдвига частоты, задержки и азимутального направления от времени. Среднеквадратичная погрешность восстановления траектории не превосходила 22 м.

Заключение. Экспериментально подтверждена работоспособность вычислительно эффективной процедуры формирования многомерных радиоизображений эхо-сигналов реальной цели в координатах «задержка — доплеровский сдвиг частоты — угловое направление» на основе вариационного подхода. Благодаря применению этой процедуры выигрыш во времени вычислений составляет $\sim(1512000/345)^3/5040 = 1,67 \cdot 10^7$ раз, а без её использования обработка полученных экспериментальных результатов на доступной персональной ЭВМ была бы невозможна. Дальнейшее ускорение предложенной процедуры, как минимум в 8 раз, возможно с помощью подхода, изложенного в [19].

Данная процедура позволяет обнаруживать слабые отражённые сигналы на фоне мощного сигнала подсвета и интенсивных переотражений от близко расположенных стационарных объектов, а также упрощает пространственную локализацию целей. Она способна обеспечить потенциально достижимые характеристики обнаружения и оценивания параметров подвижных объектов в неизлучающих радарх за счёт совмещённого обнаружения/оценивания в координатах «задержка — доплеровский сдвиг частоты — угловое направление», которое предотвращает потери информации, неизбежные при реализации методов многоэтапной обработки сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Parkhomenko N. G., Donets I. V., Shevchenko V. N.** Combined detection and spatial localization of several targets by radars with transmitters of opportunity // Proc. of 13 Intern. Radar Symposium (IRS-2012). Warsaw, Poland, May 23–25, 2012. P. 73–75.
2. **Пархоменко Н. Г., Донец И. В., Шевченко В. Н.** Интегрированное обнаружение, распознавание и пространственная локализация нескольких целей в радиолокаторах с посторонним подсветом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. **17**, № 6. С. 81–85.
3. **Пархоменко Н. Г., Онищенко В. С., Перетяцько А. А., Шевченко В. Н.** Метод адаптивной компенсации когерентных помех в системах пассивной радиолокации с посторонним подсветом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. **17**, № 6. С. 92–96.
4. **Донец И. В., Цветковская С. М., Шевченко В. Н.** Радиомониторинг радиомолчащих объектов по доплеровско-угловым измерениям в некогерентных мультистатических системах // Морская радиоэлектроника. 2014. **49**, № 3. С. 20–23.
5. **Пархоменко Н. Г., Перетяцько А. А., Рейзенкинд Я. А. и др.** Оценка параметров сигналов в пассивной радиолокации с посторонним подсветом вариационным методом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. **17**, № 6. С. 97–102.
6. **Пархоменко Н. Г., Перетяцько А. А., Рейзенкинд Я. А. и др.** Применение вариационного метода к задаче оценки параметров сигналов в пассивной радиолокации с посторонним подсветом // Автометрия. 2014. **50**, № 1. С. 60–65.
7. **Чернятьев Ю. Н., Донец И. В., Онищенко В. С. и др.** Метод синтеза частотно-временных радиоизображений в неизлучающих радарх // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. **58**, № 6. С. 465–475.
8. **Донец И. В., Рейзенкинд Я. А., Шевченко В. Н.** Оценивание параметров подвижных объектов в бистатических радарх с посторонним подсветом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. **20**, № 6. С. 76–84.
9. **Шевченко М. Е.** Алгоритм оценивания направлений прихода, задержек и доплеровских сдвигов частоты отражённых сигналов при полуактивной радиолокации на основе сигнального подпространства и Esprit-подхода // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 6. С. 36–43.

10. **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.
11. **Бархатов А. В., Веремьев В. И., Головков А. А. и др.** Полуактивная радиолокация в системах мониторинга обстановки и охраны важных объектов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 4. С. 71–77.
12. **Colone F., O'Hagan D. W., Lombardo P., Baker C. J.** A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. 2009. **45**, N 2. P. 698–722.
13. **Berger Chr. R., Demissie B., Heckenbach J. et al.** Signal processing for passive radar using OFDM waveforms // IEEE Journ. Select. Topics Signal Process. 2010. **4**, N 1. P. 226–238.
14. **Colone F., de Leo G., Paglione P. et al.** Direction of arrival estimation for multi-frequency FM-based passive bistatic radar // Proc. of the IEEE Radar Conference. Kansas, USA, May 23–27, 2011. P. 441–446.
15. **Roberts W., Li J., Stoica P. et al.** MIMO radar angle-range-Doppler imaging // Proc. of the IEEE Radar Conference. Pasadena, USA, May 4–8, 2009. P. 1–6.
16. **Tan X., Roberts W., Li J., Stoica P.** Sparse learning via iterative minimization with application to MIMO radar imaging // IEEE Trans. Signal Process. 2011. **59**, N 3. P. 1088–1101.
17. **Пат. 2528391 РФ.** Способ поиска малозаметных подвижных объектов /И. В. Донец, В. Н. Шевченко. Опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26.
18. **Richards M. A.** Fundamentals of Radar Signal Processing. N. Y.: McGraw-Hill, 2005. 513 p.
19. **Donets I. V., Reizenkind J. A., Shevchenko V. N.** Computing-effective variational procedures of echo-signals parameters estimation in passive radar systems // Proc. of the Conf. 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves. Divnomorskoe, Russia, June 26–30, 2017. Plenary Session II. P. 21–24.

Поступила в редакцию 23 мая 2016 г.
