

УДК 621.391

К.А. Лукин<sup>1</sup>, К.С. Васюта<sup>2</sup>, Ф.Ф. Зоц<sup>2</sup>, П.Л. Выплавин<sup>1</sup>, В.В. Кудряшев<sup>1</sup>, С.В. Озеров<sup>2</sup>,  
В.П. Паламарчук<sup>1</sup>, П.Г. Сущенко<sup>1</sup>, С.К. Лукин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков*

<sup>2</sup> *Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ ОБРАЗЦОВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО ШУМОВОГО РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

*В работе рассмотрена возможность получения радиолокационных портретов объектов наземной техники и летательных аппаратов при зондировании пространства шумовым и хаотическим сигналом с помощью РСА. Получены радиолокационные портреты, которые могут быть использованы для решения задач распознавания классов и типов радиолокационных объектов. Представлена техническая реализация методов формирования, генерирования и цифровой обработки шумовых и хаотических сигналов.*

**Ключевые слова:** шумовой сигнал, хаотический сигнал, шумовой радиолокатор, скрытность, антенна с синтезируемой диаграммой направленности, радиолокатор с синтезированной апертурой антенн, радиолокационный портрет.

### Введение

Методы ведения современных боевых действий определяют новые требования к радиолокационной информации. Новые тактические принципы активно используют воздушные военные средства. Увеличение количества классов и типов наземных и воздушных средств требует их распознавания для быстрого принятия решений командирами по целераспределению и целеуказанию. Радиолокационные станции (РЛС), которые стоят на вооружении радиотехнических войск (РТВ) не обеспечивают распознавания классов целей, которое позволило бы дополнить выдаваемую информацию на обеспечиваемые командные пункты.

Существуют разнообразные подходы к распознаванию целей по их доплеровским характеристикам и радиолокационным портретам [1, 2]. Решение задач обнаружения и измерения с заданными качественными характеристиками требует обеспечения соответствующих технических характеристик РЛС. Вид радиолокационного сигнала определяет качество радиолокационной информации: скрытность работы, помехоустойчивость РЛС, характеристики обнаружения объектов и измерения их параметров. Требования к скрытности РЛС могут быть обеспечены за счет использования неперiodических случайных сигналов с заданной низкой спектральной плотностью мощности [1 – 4]. Для решения задачи распознавания целей по дальностным портретам в РЛС необходимо повысить их разрешающую способность по дальности до 1 м за счет обеспечения полосы частот зондирующего сигнала РЛС, равной 150 МГц [2]. Существующие РЛС РТВ имеют меньшую ширину спектра зондирующего сигнала.

Современные разработки в области шумовых наземных РЛС S-, X- и Ka-диапазонов демонстрируют субметровое разрешение не только по дальности, но и по угловой координате [3-9]. Радарные системы, разработанные в лаборатории нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова национальной академии наук Украины, имеют различные диапазоны рабочих дальностей, обеспечивают измерение дальности до целей и их скорости, а также позволяют формировать двухмерные и трехмерные радиолокационные изображения и работают в скрытном режиме. Однозначность измерения дальности до объектов локации и скрытность работы указанных систем обеспечены за счет использования хаотических и шумовых зондирующих сигналов при непрерывном и импульсном излучении [3 – 6]. В этих РЛС используют разнообразные аналоговые и цифровые методы формирования зондирующего сигнала. В частности, для формирования широкополосного аналогового случайного сигнала с требуемой формой спектральной плотности мощности используется частотная модуляция генератора управляемого напряжением (ГУН) с помощью узкополосных хаотических сигналов. Цифровая обработка сигналов для получения радиолокационной информации проводится с использованием процессоров и программируемых логических интегральных схем.

В существующих образцах радиолокационного вооружения, например 79К6 и П-18МА или П-18МУ, применяются сложные линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) и фазо-кодо-манипулированные (ФКМ) радиоимпульсы [10 – 12]. В то же время в радиолокационном вооружении зарубежного производства, построенному по принципу скрытных LPI радаров, при-

меняются более сложные частотно-модулированные (ЧМ) и ФКМ сигналы, по сравнению с ЛЧМ и кодами Баркера [13 – 15]. Как отмечается в [16] для таких сигналов характерна более высокая скрытность, чем для ЛЧМ сигнала. Исходя из вышеизложенного, а также из предшествующего опыта авторов статьи, предлагается в радиолокационном вооружении в качестве зондирующего сигнала применять шумовые и хаотические сигналы с целью обеспечения скрытности работы, а также функции распознавания классов целей по их радиолокационным изображениям.

**Целью работы** является получение радиолокационных изображений образцов наземных и летательных аппаратов с помощью шумового РСА 8-мм диапазона, в котором применяются шумовые и хаотические сигналы и, в частности, сигналы, сформированные при помощи полинома Чебышева первого рода  $k$ -го порядка.

### Основные характеристики наземного шумового радара с синтезированной апертурой

Для формирования радиолокационных изображений в работе используется наземный шумовой РСА 8-мм диапазона длин волн [5, 3-4, 6]. Общий вид данного РСА представлен на рис. 1.

Комплект аппаратуры РСА состоит из двух пунктов. Каждый пункт РСА включает в себя: ан-

тенну с синтезируемой диаграммой направленности; передатчик; приемник; блок управления; блок питания; треногу с высокой механической жесткостью (рис. 1). Сигналы промежуточной частоты поступают на вход двухканального аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) GaGe-82. Частота дискретизации АЦП равна 1 ГГц, а его разрядность равна 8 бит (эффективная – 7 бит). Более подробное описание и принципы функционирования данного РСА можно найти в работах [5, 6].

Аппаратура РСА является реконфигурируемой, что позволяет проводить измерения в однопозиционном и в бистатическом режимах работы. Данный РСА позволяет получить двумерные радиолокационные портреты. Формирование указанных портретов осуществляют при использовании непрерывного и импульсного зондирования. Цифровая обработка сигналов и формирование изображений позволяют применять различные алгоритмы обнаружения и измерения [3 – 6]. Основные характеристики данного РСА приведены в табл. 1. Излучаемая мощность передатчика была снижена до примерно 12 мВт с учетом небольшой дальности, величины коэффициента шума приемника и ширины полосы частот передатчика (табл. 1). Дальнейшее снижение излучаемой мощности можно достичь за счет увеличения времени когерентного накопления принимаемых сигналов.

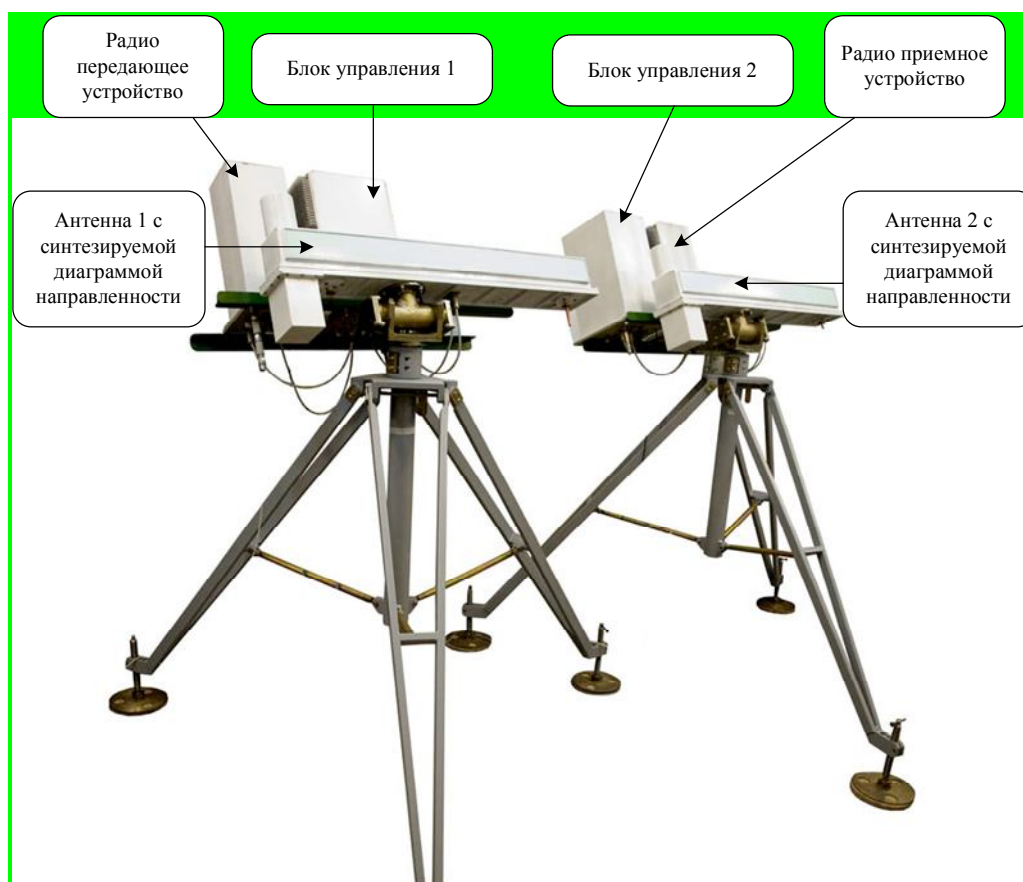


Рис. 1. Общий вид наземного шумового радара с синтезированной апертурой 8-мм диапазона при проведении эксперимента

Таблиця 1

Основные характеристики наземного шумового (хаотического) радара с синтезированной апертурой 8-мм диапазона

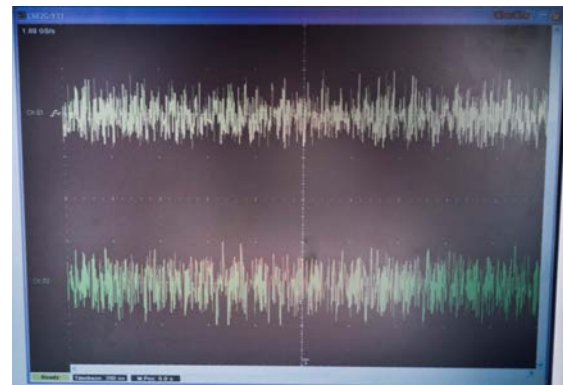
Параметры	Значение
Диапазон частот	36 – 37 ГГц
Максимальная мощность излучения	150 мВт
Коэффициент шума приемника	4,8 дБ
Ширина спектра зондирующего сигнала	~ 450 МГц
Размер синтезированной апертуры	0,7 м
Ширина диаграммы направленности антенны:	
по азимуту	80°
по углу места	20°
Разрешающая способность:	
по дальности	0,3 м
по азимуту на дистанции 50 м	0,5 м
Время одного сканирования	20 с
Рабочий диапазон дальностей	3 – 100 м
Напряжение питания	220 В, 50 Гц

Скрытность формирования радиолокационных изображений (портретов) зависит от характеристик аппаратуры и зондирующего сигнала [3, 13 – 18]. Известные свойства шумовых сигналов обосновывают их применение для формирования радиолокационных портретов [3-4]. Используются непрерывные шумовые сигналы с большой величиной произведения ширины частотной полосы сигнала на время когерентного накопления. К достоинствам применения данных сигналов относятся: отсутствие неоднозначности измерения дальности; симметричность функции неопределенности; простота генерации зондирующего сигнала; сложность перехвата сигнала по сравнению с перехватом периодических сигналов, и др. [3, 4]. Временные реализации зондирующего (опорного) и принимаемого сигналов данного РСА на промежуточной частоте показаны на рис. 2, а, а их усредненная спектральная плотность мощности - на рис. 2, б.

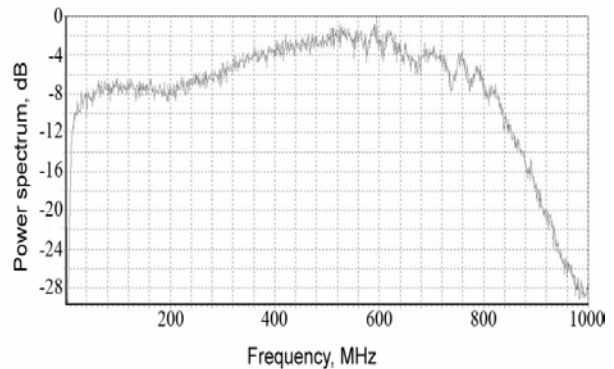
Экспериментальные исследования проведены в два этапа. На подготовительном этапе, внутри помещения лаборатории, проведены калибровочные измерения и настройка аппаратуры РСА для формирования радиолокационных портретов объектов. Первый этап работы направлен на формирование радиолокационных портретов наземной техники на НТК ХУВС. В ходе второго этапа получены радиолокационные портреты летательных аппаратов, находящихся на учебном аэродроме ХУВС.

### Формирование радиолокационных изображений образцов наземной техники

Формирование радиолокационных портретов образцов наземной техники включает проведение серии измерений. Схема измерений приведена на рис. 3. Аппаратура РСА сконфигурирована для работы в однопозиционном режиме. Аппаратура РСА развертывалась в 5 различных положениях.



а



б

Рис. 2. Временные реализации зондирующего и принятого сигналов, а также их спектров на промежуточной частоте в наземном шумовом РСА 8-мм диапазона длин волн: а – временные реализации зондирующего (опорного) и принимаемого хаотических сигналов; б – усредненная спектральная плотность мощности

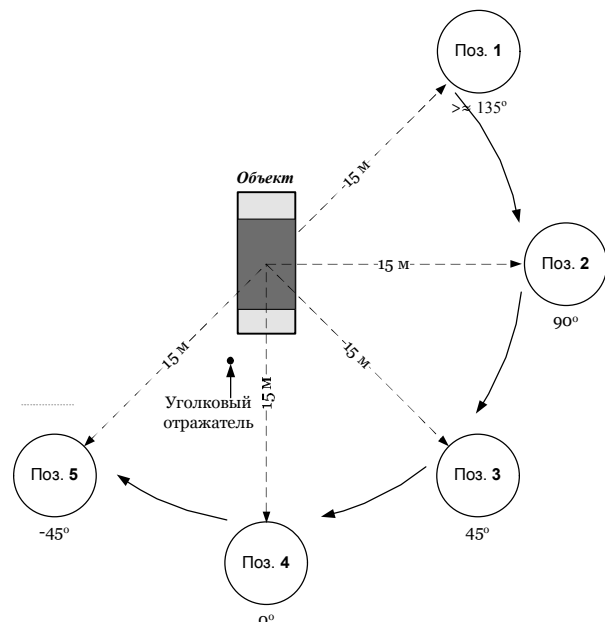


Рис. 3. Схема измерений при получении радиолокационных изображений наземного объекта

В каждом из положений формировалось радиолокационное изображение в плоскости дальность-азимут. Размеры и расположение объектов зоны обзо-

ра измерены лазерным дальномером Bosch DLE 150 с точностью измерения в данных условиях равной  $\pm 2$  мм и показаны на рисунках.

В ходе экспериментального исследования, зона обзора РСА включала: образец наземной техники, бетонный пьедестал, местные предметы и уголко-вый отражатель. Длина образца наземной техники примерно равна 7,5 м, его ширина равна 3 м, а высота – 4 м. Перед образцом наземной техники установлен уголко-вый отражатель. Эффективная поверхность рассеяния данного отражателя на рабочей частоте составила  $2,3 \text{ м}^2$ .

Пример полученного радиолокационного портрета приведен на рис. 4. В зоне обзора находились несколько объектов наземной техники (рис. 4, а, рис. 4, б). На радиолокационном портрете есть отклики от местных предметов: антенны, деревья, столба и др. Полученный радиолокационный портрет образца наземной техники имеет несколько блестящих точек (рис. 4, в). Сравнительный анализ радиолокационных портретов данного образца, полученных в положениях 1 и 5, показывает различие в распределении блестящих точек (рис. 3, рис. 4, в, рис. 5).

Для получения радиолокационного портрета нескольких образцов наземной техники, аппаратура РСА была установлена перед пьедесталом (рис. 5, а). В зоне обзора находились 7 образцов наземной техники, а также местные предметы. Расположение основных объектов показано на рис. 5, а. Соответствующий радиолокационный портрет приведен на рис. 5, б. В данном положении РСА, радиолокационный портрет содержит отклик от грани бетонного пьедестала, на котором установлены все образцы.

Отличия в радиолокационных изображениях, полученных для различных ракурсов, объясняются изменениями отражательных свойств наземных объектов с изменением ракурса. Полученные изображения содержат также отклики, от местных предметов. Эти отклики могут быть уменьшены за счет оптимизации схемы эксперимента, а также за счет обработки сигналов и самих изображений.

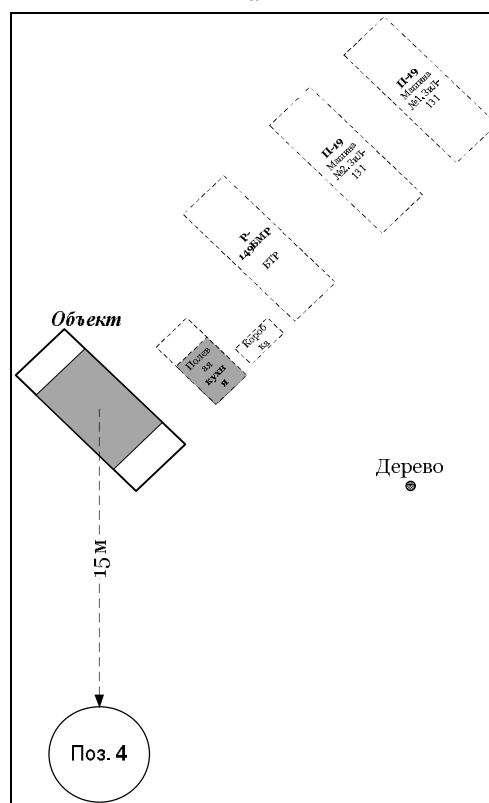
Отмеченное различие в отражательных свойствах данных объектов, связанное с формой и электрофизическими характеристиками их поверхностей. Получены отличия отражательных свойств наземного объекта при изменении угла его обзора.

### Формирование радиолокационных портретов летательных аппаратов

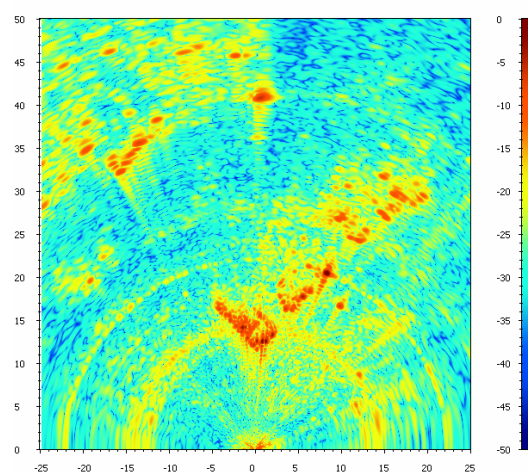
Наземный Шумовой РСА 8-мм диапазона использовался также и для получения радиолокационных изображений образцов летательных аппаратов. В качестве примера, на рис. 6 показано радиолокационное изображения истребителя Су-27 (рис. 6, б) которое соответствует его оптическому изображению (рис. 6, а).



а

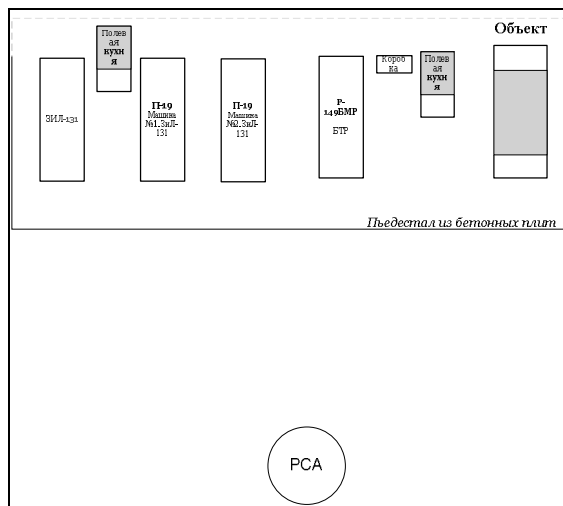


б

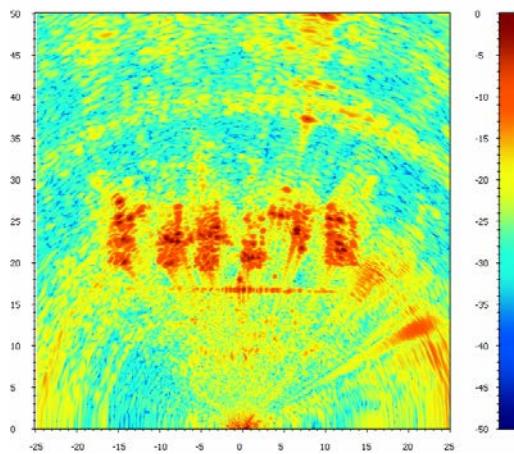


в

Рис. 4. Формирование радиолокационного портрета образца наземной техники: а – фотография образца наземной техники; б – схема измерений; в – полученный радиолокационный портрет



а



б

Рис. 5. Измерения для формирования радиолокационного портрета нескольких образцов наземной техники: а – схема измерений; б – полученный радиолокационный портрет

### Выводы

Таким образом, в работе продемонстрирован новый подход к получению радиолокационных изображений. В результате проведенных экспериментов получены радиолокационные изображения нескольких образцов военной техники с разрешением порядка 30 см. Данные изображения сформированы в плоскости дальность-азимут. Полученные результаты показали возможность применения хаотических и шумовых сигналов для изучения отражательных свойства объектов наземной техники и летательных аппаратов и получения их радиолокационных изображений.

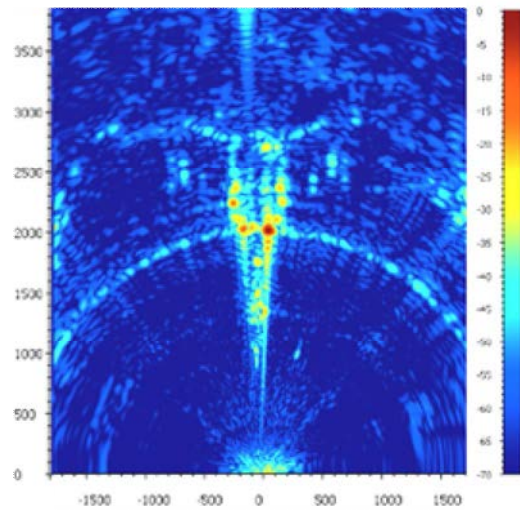
Наличие средств получения двумерных радиолокационных портретов позволяет ставить и решать задачи распознавания объектов наблюдения по их двумерным радиолокационным портретам.

### Список литературы

1. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking / Y.D. Shirman, S.A. Gorsh



а



б

Рис. 6. Истребитель Су-27: а – оптическое изображение; б – полученный радиолокационный портрет

kov, S.P. Leschenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevsky. – Boston, London: Artech House, 2002. – 294 p.

2. Леценко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / С.П. Леценко // Прикладная радиоэлектроника. – X. : ХНУРЭ, 2009. – № 4 (8). – С. 490 – 496.

3. Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона / К. А. Лукин // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 13. – С. 344 – 358.

4. Шумовая радарная технология / К.А. Лукин, А.А. Могила, Ю.А. Александров [и др.] // Прикладная радиоэлектроника. – X., 2009. – Т. 9, № 4. – С. 510–525.

5. Ka-Band Bistatic Ground-Based Noise Waveform SAR for Short-Range Applications / K.A. Lukin et al. // IET Radar, Sonar & Navigation. – August 2008. – Vol. 2, no. 4. – P. 233 – 243.

6. SAR imaging with noise radar / D. Tarchi, K. Lukin, J. Fortuny-Guach, A. Mogyla, P. Vyplavin, A. Sieber // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems. – July 2010. – Vol. 46, no. 3. – P. 1214 – 1225.

7. Kulpa K.S. Signal Processing in Noise Waveform Radar. – Boston, USA: Artech House, 2013. – 272 p.

8. Galati G. W-band Noise Radar in Short Range Applications / G. Galati, M. Ferri, G. Pavan // International Radar Symposium IRS 2008. – Proceedings. Wroclaw - Poland, 21-23 May 2008, Wroclaw: Military University of Technology. – P. 211-214.

9. Narayanan R.M. Power Spectrum of Wind-Influenced Vegetation Backscatter at X-Band / R.M. Narayanan, D.W. Doerr, D.C. Rundquist // IEE Proceedings on Radar, Sonar, and Navigation. – April 1994. – Vol. 141, No. 2. – P. 125 – 131,

10. Трёхкоординатная радиолокационная станция кругового обзора 79К6 / КП "НИПК "ИСКРА" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://iskra.zp.ua/files/ru\\_79K6.PDF](https://iskra.zp.ua/files/ru_79K6.PDF).

11. РЛС П-18МА [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.aerotechnica.ua/index.php?id=products&prod=2&prodid=2>.

12. Подвижная РЛС обнаружения и целеуказания. РЛС П-18МУ. Формуляр ААЖВ.461314.001 ФО, 2006. – 60 с.

13. Pedro Jarpa. Quantifying the differences in low probability of intercept radar waveforms using quadrature mirror filtering / Jarpa Pedro. – Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2002. – 174 p.

14. Aytug Denk. Detection and jamming low probability of intercept (LPI) radars / Denk Aytug. – Monterey, Califor-

nia: Naval Postgraduate School, 2006. – 123 p.

15. Pace P.E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar / P.E. Pace. – Second Edition. – London: Artech house, 2009. – 862 p.

16. Ширман Я.Д. Пассивная радиолокация скрытых радиоизлучений / Я.Д. Ширман, В.М. Орленко С.В. Селезнев // Системи озброєння і військова техніка. Науковий журнал. – 2005. – № 1(1). – С. 97-104.

Поступила в редколлегию 18.11.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.П. Лещенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

#### ОТРИМАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОРТРЕТІВ ЗРАЗКІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗА ДОПОМОГОЮ НАЗЕМНОГО ШУМОВОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

К.О. Лукін, К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц, П.Л. Выплавін, В.В. Кудряшов, С.В. Озеров, В.П. Паламарчук, П.Г. Сущенко, С.К. Лукін

У роботі розглянута можливість отримання радіолокаційних портретів об'єктів наземної техніки і літальних апаратів при зондуванні простору шумовим і хаотичним сигналом за допомогою РСА. Отримані радіолокаційні портрети, які можуть бути використані для вирішення завдань розпізнавання класів і типів радіолокаційних об'єктів. Представлена технічна реалізація методів формування, генерування і цифрової обробки шумових і хаотичних сигналів.

**Ключові слова:** шумовий сигнал, хаотичний сигнал, шумовий радар, секретність, антена з синтезованою діаграмою спрямованості, радар з синтезованою апертурою антен, радіолокаційний портрет.

#### OBTAINING THE RADAR PORTRAITS OF MILITARY TECHNIQUES BY THE GROUND-BASED NOISE WAVEFORM SYNTHETIC APERTURE RADAR

K.A. Lukin, K.S. Vasyta, F.F. Zots, P.L. Vyplavin, V.V. Kudriashov, S.V. Ozerov, V.P. Palamarchuk, P.G. Suschenko, S.K. Lukin

The possibility of obtaining radar portraits of land-based techniques and aircrafts is considered when sounding space by a noise and chaotic signal by means of RSA. Radar portraits which can be used for the solution tasks of recognition classes and types of radar objects are received. The technical implementation of methods of formation, generation and digital processing of noise and chaotic signals is provided.

**Keywords:** noise waveform signal, chaotic signal, noise radar, secrecy, antenna with synthesized beam, synthetic aperture radar, radar image.