

## ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОЗАМЕТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

**Купряшкин Иван Фёдорович**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры боевого применения средств радиоэлектронной борьбы (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»)¹.

E-mail: ifk78@mail.ru.

**Лихачёв Владимир Павлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры боевого применения средств радиоэлектронной борьбы (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»)¹.

E-mail: lvp\_home@mail.ru.

**Назарова Ольга Юрьевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники  
Донского государственного технического университета².

E-mail: olga2018rostov@yandex.ru.

**Соколик Наталья Валентиновна**

начальник отделения информационно-технического центра  
Южного военного округа³.

E-mail: sokolik777@mail.ru.

¹Адрес: 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а.

²Адрес: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

³Адрес: 344011, г. Ростов-на-Дону, пр. Будёновский, 43.

**Аннотация:** Статья посвящена проблеме радиолокационного обнаружения малозаметных воздушных целей. Целью статьи является изучение возможности применения наземных радиолокационных систем с непрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом для обнаружения, оценки координат и параметров движения малозаметных воздушных объектов. Предложен алгоритм обработки принимаемых сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением, обеспечивающий обнаружение малозаметных воздушных целей на фоне пассивных помех, а также оценку дальности и скорости их движения. Основу алгоритма составляет формирование дальностно-доплеровского портрета зоны обзора с последующими режекцией спектра пассивных отражателей и адаптивным поиском спектральных составляющих эхо-сигналов движущихся объектов. Проведена экспериментальная оценка возможностей радиолокационной системы с непрерывным частотно-модулированным сигналом дециметрового диапазона длин волн по обнаружению, оценке координат и параметров движения малозаметных воздушных объектов на примере авиамодели самолета Як-52. Показано, что радиолокационная система с непрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом дециметрового диапазона обеспечивает эффективное обнаружение и оценку координат и скорости воздушных малозаметных целей. Дальность действия при этом составляет несколько сотен метров даже при малой средней мощности излучения (до 100 мВт) и использовании слабонаправленных приёмной и передающей антенн. Достигнутые массогабаритные характеристики системы позволяют рассматривать её как портативное переносное автономное устройство, характеризующееся низким энергопотреблением и высокой скрытностью работы вследствие непрерывного характера излучения.

**Ключевые слова:** радиолокационная система, малозаметный воздушный объект, непрерывный линейно-частотно-модулированный сигнал, дальностно-доплеровский портрет, разностная частота.

### Введение

Одной из наиболее актуальных задач радиолокационного обзора воздушного пространства является обнаружение и оценка координат и параметров движения малозаметных летательных аппаратов с заданными качеством и точностью. При этом очевидно, что основным требованием к радиолокационным системам (РЛС), решающим эту задачу, является компактность, низкое энергопотребление и возможность оперативного развертывания на позициях, непригодных для размещения обычных обзорных РЛС.

В связи с этим среди разработчиков РЛС наблюдается повышенный интерес к системам с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом [1–4], так как его использование позволяет существенно улучшить массогабаритные и стоимостные характеристики систем за счёт уменьшения пиковой мощности излучения и снижения требований к производительности системы цифровой обработки принимаемых сигналов.

Целью статьи является изучение возможности применения наземных РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом для обнаружения, оценки координат и параметров движения малозаметных воздушных объектов.

### Материалы и методы

Обработка эхо-сигналов в РЛС с непрерывным излучением включает приём эхо-сигнала зоны обзора, его перемножение с опорным сигналом

в смесителе, низкочастотную фильтрацию результата перемножения (сигнала с выхода смесителя) с последующим преобразованием в цифровую форму (рис. 1). Цифровые отсчёты демодулированного сигнала поступают в систему цифровой обработки сигнала (ЦОС), реализующую процедуру быстрого преобразования Фурье над выборками отсчётов каждого отдельного периода модуляции, и последующее межпериодное когерентное накопление.

Зондирующий сигнал на выходе ПДУ в течение отдельного периода модуляции сигнала РЛС  $T$  описывается выражением

$$s(t) = A_0 \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{b}{2} t^2 + \psi_0\right), \quad t \in [0; T]$$

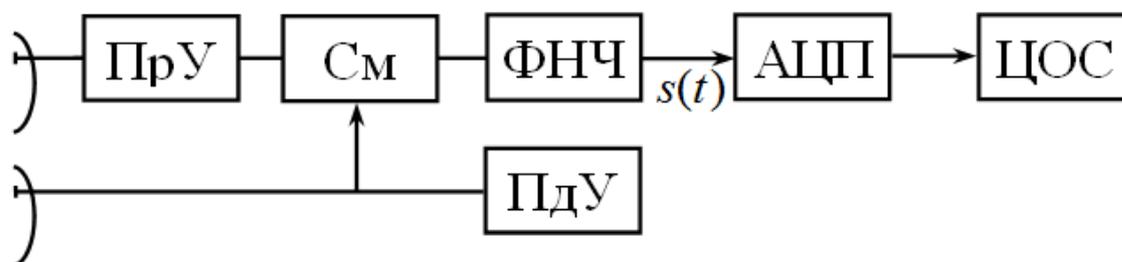
где  $A_0$  – амплитуда сигнала;  $f_0$ ,  $b = 2\pi\Delta f_c/T$ ,  $\psi_0$ ,  $\Delta f_c$  – начальная частота, скорость изменения частоты, начальная фаза и ширина спектра зондирующего сигнала соответственно.

Демодулированный эхо-сигнал изотропного точечного отражателя на выходе ФНЧ в течение отдельного периода модуляции описывается выражением

$$s(t) = A_0 \cos\left(2\pi f_0 \tau(t) + b\tau(t)t - \frac{b}{2} \tau^2(t) + \psi_0\right), \quad t \in [0; T], \quad (1)$$

где  $\tau(t) = 2R(t)/c$  – время задержки, обусловленное распространением сигнала до отражателя и обратно;  $R(t)$  – закон изменения расстояния между носителем РСА и отражателем;  $c$  – скорость света.

В большинстве практических случаев изме-



**Рис. 1.** Структурная схема РСА с непрерывным частотно-модулированным зондирующим сигналом: ПрУ – приёмное устройство; ПДУ – передающее устройство; См – смеситель; ФНЧ – фильтр нижних частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦОС – система цифровой обработки сигнала

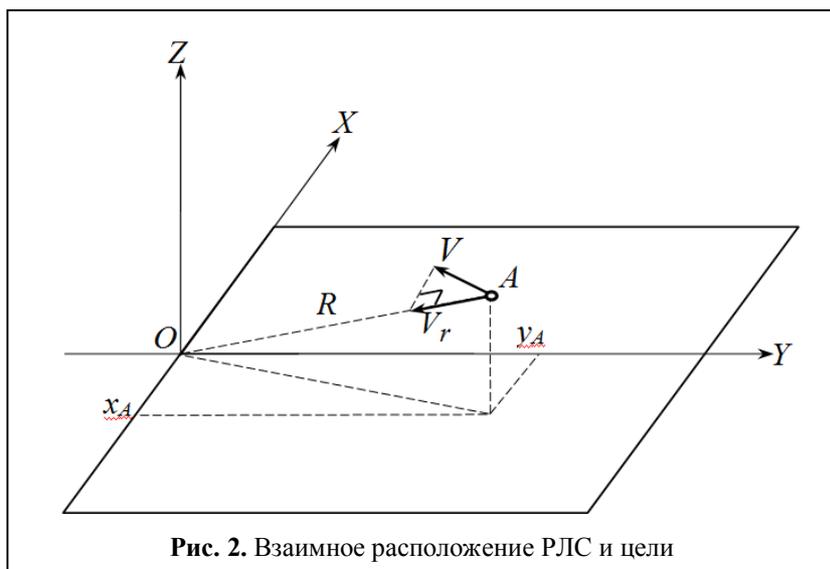


Рис. 2. Взаимное расположение РЛС и цели

нением времени задержки эхо-сигнала в течение периода модуляции можно пренебречь, и тогда (1) можно переписать в упрощенной форме

$$s(n, t) = A_0 \cos(2\pi f_0 \tau_n + b\tau_n t + \psi_0), \quad t \in [0; T], \quad (2)$$

где  $\tau_n = 2R(nT)/c$  – время задержки эхо-сигнала в начале  $n$ -го зондирования;  $n = 0, N_f - 1$ ;  $N_f = T_n/T$ ;  $T_n$  – длительность интервала когерентного накопления. Слагаемое  $-b\tau^2(t)/2$  в (1) при записи (2) не учитывалось вследствие незначительности его вклада в результирующее значение фазы демодулированного сигнала.

Из (2) следует, что демодулированный эхо-сигнал цели представляет собой радиоимпульс с разностной частотой  $f_{p_n} = b\tau_n/2\pi$  и начальной фазой  $\psi_n = 2\pi f_0 \tau_n + \psi_0$ , определяемыми расстоянием между фазовым центром антенны РЛС (точка  $O$ , рис. 2) и целью (точка  $A$ , рис. 2) в начале  $n$ -го периода модуляции зондирующего сигнала

$$R_{An} = R(nT) = \sqrt{(x_{A_n} - x_O)^2 + (y_{A_n} - y_O)^2 + z_{A_n}^2},$$

где  $x_{A_n} = [x_{A_n}; y_{A_n}; z_{A_n}]$ ;  $V$  – скорость полёта цели.

Спектр демодулированного сигнала (2) описывается выражением

$$\dot{S}(f) = \frac{A_0 T}{2} \left| \frac{\sin \pi T(f_{p_n} - f)}{\pi T(f_{p_n} - f)} \right| \times \exp\{j(\pi T(f_{p_n} - f) + \psi_n)\}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что положение максимума огибающей спектра

$$\frac{A_0 T}{2} \left| \frac{\sin \pi T(f_{p_n} - f)}{\pi T(f_{p_n} - f)} \right|$$

соответствует разностной частоте демодулированного сигнала  $f_{p_n}$ , причём значение фазочастотного спектра  $\psi_n$  на

этой частоте определяется временной задержкой эхо-сигнала на момент начала  $n$ -го периода модуляции зондирующего сигнала.

Это означает, что спектр демодулированного суммарного эхо-сигнала зоны обзора по сути описывает её комплексный дальностный портрет.

Также видно, что значения фаз спектральных составляющих, обусловленных отражениями от неподвижных целей, не изменяются от периода к периоду (т.к.  $\tau_n = const$ ), в отличие от эхо-сигналов движущихся объектов, начальная фаза эхо-сигналов которых изменяется пропорционально величине изменения расстояния между РЛС и целью за период модуляции. Отношение приращения фазы к периоду модуляции сигнала характеризует среднее значение доплеровского частотного сдвига на интервале времени  $[(n-1)T; nT]$ :

$$f_{\partial_n} = \frac{\psi_n - \psi_{n-1}}{2\pi T}.$$

Отсюда следует, что вычисление двумерного преобразования Фурье от реализации демодулированного сигнала, принятого в течение нескольких периодов зондирования, и режекция его составляющих, соответствующих нулевым доплеровским сдвигам, позволяет решить задачу селекции движущихся целей [5].

Практически во всех современных РЛС с непрерывным излучением обработка демодулированного сигнала осуществляется с использованием цифровых методов. При этом частота дискретизации АЦП выбирается из условия [6]

$$F_{\text{ацп}} = 2f_{\text{нч}},$$

где  $f_{\text{нч}} = R_{\text{max}}/C_r$  – частота среза ФНЧ, определяемая из ограничения по дальней границе зоны обзора РЛС НИ  $R_{\text{max}}$ ;  $C_r = cT/2\Delta f$  – коэффициент пересчёта значений дальности до цели в соответствующие значения разностной частоты.

Демодулированный эхо-сигнал после дискретизации в АЦП представляет собой двумерный массив отсчётов вида

$$s_{i,n} = s(t_i - nT), \quad (4)$$

где  $t_i = i\Delta t = i/F_{\text{ацп}}$ ;  $i = \overline{0, N_r - 1}$ ;  $N_r = F_{\text{ацп}}T$ .

Дальнейшая обработка сигнала включает выполнение процедуры двумерного ДПФ, т.е. формирования дальностно-доплеровского портрета, и определения положения частотного пика, соответствующего максимуму огибающей спектра сигнала отдельной движущейся цели, т.е.

$$[k, m] = \arg \max \{ \dot{S}_f \},$$

где  $\dot{S}_f = F_1 \{ \dot{S}, K_f \}$  – результат процедуры вычисления одномерных ДПФ над всеми строками двумерного массива отсчётов комплексного дальностного портрета  $\dot{S} = F^1 \{ s, K_r \}$ , в свою очередь представляющего собой результат одномерного ДПФ над всеми столбцами массива вещественных отсчётов демодулированного сигнала  $s$ , определяемого выражением (4);  $F_1 \{ a, K \}$  и  $F^1 \{ a, K \}$  – операторы ДПФ, выполняемого с коэффициентом частотной интерполяции  $K$  над строками или столбцами двумерного массива  $a$  соответственно.

На основе оценки номеров строки  $k$  и столбца  $m$ , соответствующих положению максимума огибающей спектра эхо-сигнала движущейся цели, формируются оценки дальности и радиальной скорости как

$$\hat{V}_r = -\frac{f_{\dot{\delta}_m} c}{2f_0},$$

$$\hat{R} = C_r (f_{p_k} - f_{\dot{\delta}_m}),$$

где

$$f_{p_k} = k\delta f_p = k/K_r T \quad \text{и} \quad f_{\dot{\delta}_m} = \left( m - \frac{K_f N_f}{2} \right) \delta f_{\dot{\delta}} -$$

– значения разностной частоты и доплеровского частотного сдвига, соответствующие  $k$ -й строке и  $m$ -у столбцу массива отсчётов дальностно-доплеровского портрета  $\dot{S}_f$ ;

$\delta f_p = 1/K_r T$  и  $\delta f_{\dot{\delta}} = 1/K_f T_c$  – шаги изменения разностной и доплеровской частоты на дальностно-доплеровском портрете соответственно.

Процедура адаптивного обнаружения частотных пиков достаточно просто реализуется с использованием алгоритмов семейства CFAR [7, 8]. Суть работы детектора типа CFAR заключается в оценке локальных параметров плотности распределения вероятности отсчётов, попавших в пределы скользящей области, имеющей вид прямоугольной рамки (рис. 3). На основе измеренных параметров в соответствии с принятым правилом обнаружения рассчитывается пороговое значение достаточной статистики, обеспечивающее постоянный заданный уровень ложной тревоги (обычно  $10^{-4} \dots 10^{-5}$ ). В случае, если значение достаточной статистики, вычисленной по отсчётам дальностно-доплеровского портрета в пределах тестируемой области (рис. 3), превышает пороговое, принимается решение о наличии эхо-сигнала цели.

Размеры тестируемой области выбираются

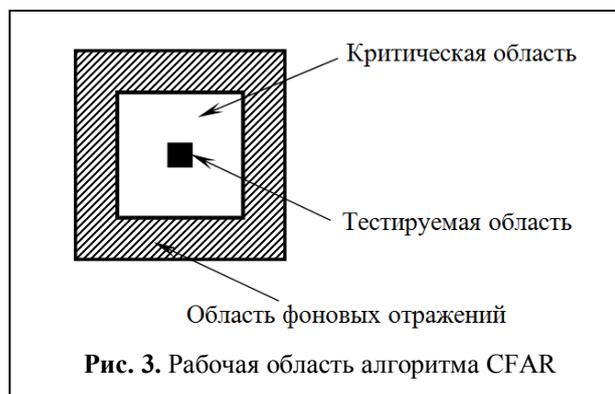


Рис. 3. Рабочая область алгоритма CFAR

Таблица 1. Основные характеристики РЛС

Параметр	
Длина волны	23 см (L-диапазон)
Мощность излучаемого сигнала	100 мВт
Ширина полосы частот	180 МГц
Период модуляции	1687,5 мкс
Максимальная дальность действия	5 км
Разрешение по дальности	0,83 м
Масса комплекта	4 кг
Поляризация	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ

исходя из диапазона скоростей обнаруживаемых целей. При этом её минимальный размер по координате дальности определяется как

$$n_r = \frac{(1,3...1,5)\Delta R_{\max}}{C_r \delta f_p},$$

где  $\Delta R_{\max} = V_{\max} T_c$  – изменение расстояния между РЛС и целью, движущейся с максимальной скоростью  $V_{\max}$ , за интервал когерентного накопления  $T_c$ .

По координате доплеровского сдвига минимальный размер тестируемой области определяется как

$$n_d = (1,3...1,5) \frac{2f_0 \Delta V_{r\max}}{c \delta f_d},$$

где  $\Delta V_{r\max}$  – максимальное изменение максимальной скорости движения цели за интервал когерентного накопления  $T_c$ .

Размеры критической области выбираются так, чтобы при наличии в её пределах отметки объекта отсчёты последней не влияли на результат оценки параметров плотности распределения вероятности в области фоновых отражений [7]. Размеры области фоновых отражений выбираются исходя из требований к точности определения параметров плотности распределения вероятности отсчётов фонового шума и производительности устройства обработки [7].

С целью исключения обнаружения и оценки параметров эхо-сигналов неподвижных отражателей процедуре поиска частотных пиков (определения индексов  $k$  и  $m$ ) предшествует этап режекции спектральных составляющих,

расположенных в области нулевых значений доплеровских частотных сдвигов.

В [9, 10] отмечается, что результатом обширной программы измерений спектров помеховых отражений, выполненных в 1990-х годах в лаборатории имени Линкольна Массачусетского технологического института с использованием очень стабильного радиолокационного оборудования при строго контролируемых условиях экспериментов, является экспоненциальная модель огибающей их спектральной плотности мощности

$$S_{mm}(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{|f| \sqrt{2}}{\sigma_f}\right),$$

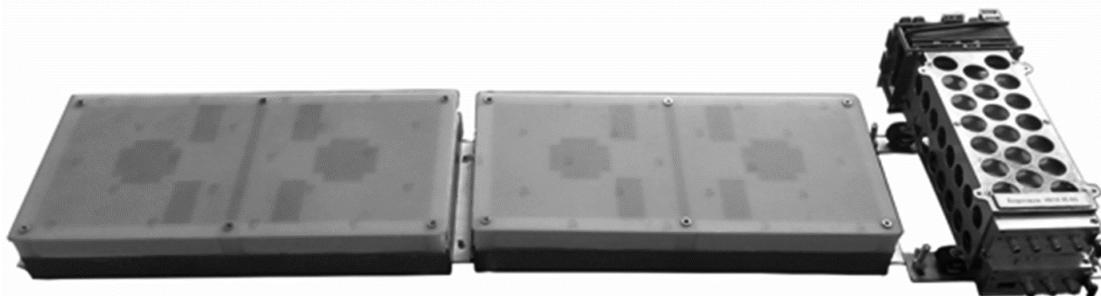
где  $\sigma_f = \frac{2\sigma_v}{\lambda}$ ;  $\sigma_v$  – среднеквадратическое значение скорости движения пассивных отражателей, определяемое текущей силой ветра и принимающее значение от 0,12 м/с при лёгком ветре до 0,37 м/с – при штормовом.

Режекция пассивных помех с учётом описанной модели их спектральной плотности осуществляется путём поочередного построчного перемножения элементов массива  $\hat{S}_f$  с вектором отсчётов  $\mathbf{U}$ , элементы которого определяются как

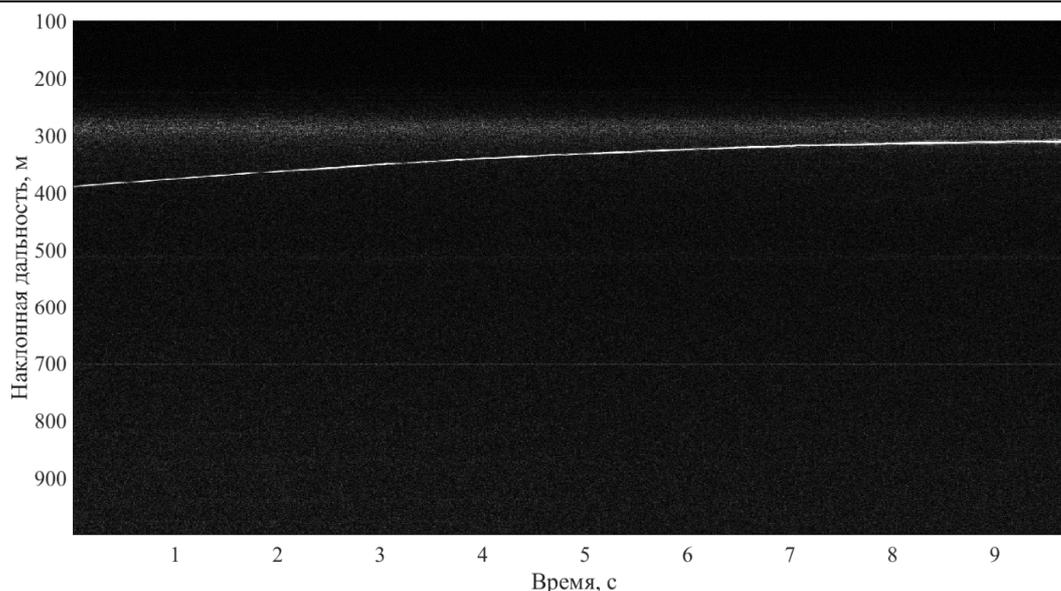
$$U_m = 1 - \sqrt{\exp\left(-\frac{|f_{dm}| \sqrt{2}}{\sigma_f}\right)}.$$

### Результаты исследования

Описанный порядок обработки сигналов использовался в ходе эксперимента по



**Рис. 4.** Внешний вид РЛС, использовавшейся в эксперименте по обнаружению малозаметных воздушных целей



**Рис. 5.** Дальностно-временной портрет, сформированный в результате обработки записи демодулированного сигнала длительностью 10 с

обнаружению малых беспилотных летательных аппаратов с использованием РЛС с характеристиками, приведенными в табл. 1. РЛС разработана коллективом сотрудников ВУНЦ



**Рис. 6.** Внешний вид авиамодели, задействованной в эксперименте

ВВС «ВВА» совместно с АО «НИИ СТТ» (г. Смоленск) (рис. 4).

На рис. 5 показан вид дальностно-временного портрета, сформированного в результате обработки записи демодулированного сигнала длительностью 10 с. Каждый столбец изображения соответствует огибающей спектра демодулированного сигнала, принятого в течение отдельного периода модуляции  $T$ . Отчетливо наблюдается эхо-сигнал цели (модели самолета Як-52 с размахом крыльев порядка 1,8 м, выполненной из композитных материалов (рис. 6), дальность до которой в начале интервала записи составляла около 390 м, а в конце – около 310 м.

Помимо записи сигнала также осуществлялась его обработка в реальном масштабе вре-

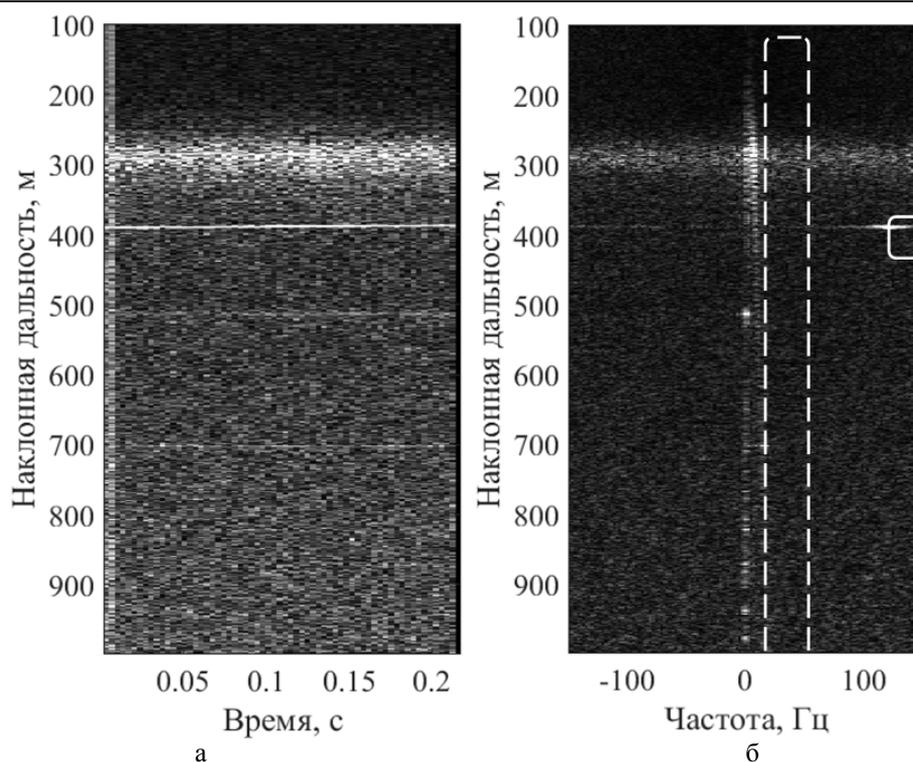


Рис. 7. Дальностно-временной (а) и дальностно-доплеровский (б) портреты, соответствующие первому интервалу когерентного накопления  $t = 0 \dots 0,216$  с

мени. При этом длительность отдельного интервала когерентного накопления составляла  $T_n = 0,216$  с, что соответствовало 128 зондированиям. На рис. 7 показаны дальностно-временной и дальностно-доплеровский портреты, соответствующие первому интервалу когерентного накопления  $t = 0 \dots 0,216$  с. Пунктирной линией на дальностно-доплеровском портрете обведена область отражений от неподвижных объектов и местности, сплошной линией – отметка движущейся цели.

На рис. 8,а показан вид дальностно-доплеровского портрета после режекции области пассивной помехи в соответствии с (15), а на рис. 8,б – результат работы процедуры поиска отметок цели (алгоритма CFAR). Оценка дальности составила 388,6 м, доплеровского сдвига и радиальной скорости – около 122,3 Гц и минус 15,1 м/с (54,4 км/ч) соответственно.

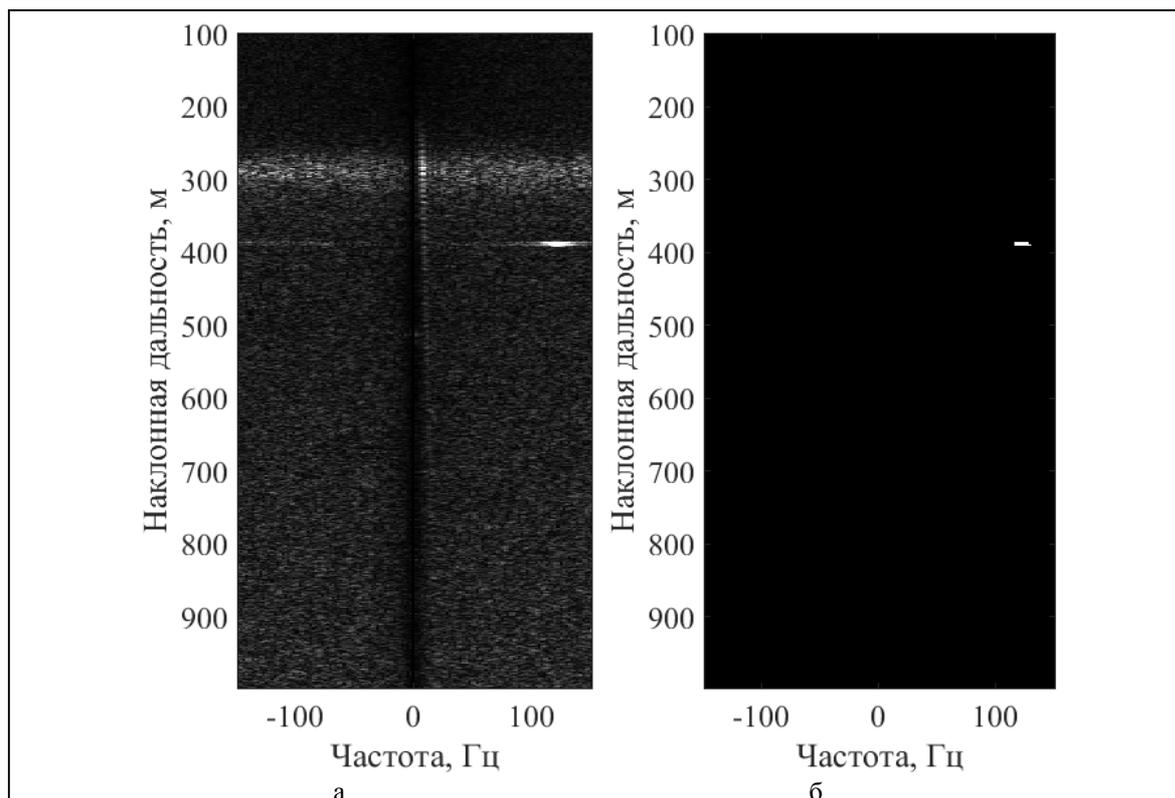
Результаты оценивания дальности и скорости в течение интервала записи сигнала, начиная со второй секунды, приведены на рис. 9.

### Обсуждение и заключения

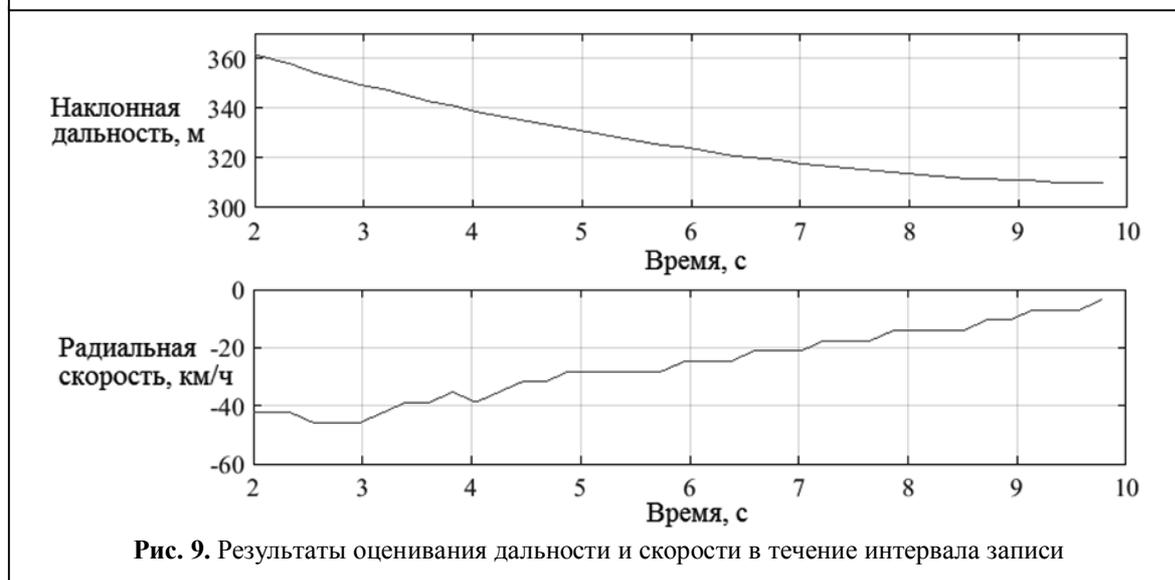
Таким образом, показано, что РЛС с непрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом дециметрового диапазона обеспечивает эффективное обнаружение и оценку координат и скорости воздушных малозаметных целей. Дальность действия РЛС при этом составляет несколько сотен метров даже при малой средней мощности излучения (до 100 мВт) и использовании слабонаправленных приёмной и передающей антенн. В целом массогабаритные характеристики рассмотренной и подобных РЛС позволяют рассматривать их как портативные переносные автономные устройства, характеризующиеся низким энергопотреблением и высокой скрытностью работы вследствие непрерывного характера излучения.

### Литература

1. Zaugg E.C., Edwards M.C., Margulis A. The SlimSAR: A Small, Multi-Frequency, Synthetic Aperture Radar for UAS Operation // 9th IEEE International Radar Conference. 2010. Pp. 277–282.



**Рис. 8.** Вид дальностно-доплеровских портретов:  
а – после режекции пассивной помехи; б – после выполнения процедуры поиска отметок цели



**Рис. 9.** Результаты оценивания дальности и скорости в течение интервала записи

2. *Duersch M.I.* BYU MICRO-SAR: A Very Small, Low-Power LFM-CW SAR // A thesis submitted to the faculty of Brigham Young University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. 2004.

3. *Zaugg E.C.* Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2008. Vol. 46, №10. Pp. 2990–2998.

4. *Богомолов А.В., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б.* Малогабаритная двухдиапазонная РСА для беспилотного авиационного комплекса // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» / СПб: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. Вып. 11. С. 235–240.

5. *Майоров Д.А., Савостьянов В.Ю., Митрофанов Д.Г.* Измерение радиальной скорости воздуш-

ных объектов в режиме перестройки частоты // Измерительная техника. 2008. № 2. С. 43–47.

6. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Методика обоснования требований к аналого-цифровому преобразованию в РЛС с синтезированной апертурой непрерывного излучения // Цифровая обработка сигналов. 2017. №2. С. 49–52.

7. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: Научная книга, 2014. 460 с.

8. Shuhong J., Jiayuan L., Mingzhi L. An Adaptive ship Detection Method in SAR Image based on CFAR // IPCSIT. 2012. Vol. 55.

9. Справочник по радиолокации. Под ред. М.И. Скольника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1. М.: Техносфера, 2015. 672 с.

10. Billingsley J.B. Low-angle Radar Land Clutter – Measurements and Empirical Models. New-York: William Andrew Publishing, 2002. 358 p.

Поступила 21 декабря 2018 г.

English

## DETECTION OF STEALTHY AERIAL OBJECTS BY RADAR SYSTEM WITH CONTINUOUS UHF-BAND WAVE-EMISSION MODE

**Ivan Fedorovich Kupryashkin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of Electronic Warfare Combat Use (against Aerospace control systems and guided weapons), Military Training and Scientific Center, “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”(Voronezh) (MTSC AF "AFA").

*E-mail:* ifk78@mail.ru

*Address:* 394064, Voronezh, St. Starykh Bolshevikov, 54A.

**Vladimir Pavlovich Likhachev** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electronic Warfare Combat Use (against Aerospace control systems and guided weapons), Military Training and Scientific Center, “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”(Voronezh) (MTSC AF "AFA").

*E-mail:* lvp\_home@mail.ru

*Address:* 394064, Voronezh, St. Starykh Bolshevikov, 54A.

**Olga Yurjevna Nazarova** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radioelectronics, Don State Technical University.

*E-mail:* olga2018rostov@yandex.ru

*Address:* 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1.

**Natalia Valentinovna Sokolik** – Department Head of Technical and Information Center, Southern Military District.

*E-mail:* sokolik777@mail.ru

*Address:* 344011, Rostov-on-don, Budennovsky Ave., 43.

*Abstract:* During the recent decades, the developers of radar systems increase focus on the problem of detection and localization of air targets with a small radar cross-section and thus low radar visibility. Currently the use of ground-based radar systems with continuous probing signal and with periodic linear frequency modulation is reckoned as one of the most promising trends of its solution. The signal selection of this type is due to the possibility of providing sufficient energy at a relatively small peak power of the transmitter, as well as due the hardware implementation simplicity. The article describes the processing algorithm for the received signals in the radar with continuous wave-emission based on the generation of the Doppler range portrait of the scanning area accompanied by the rejection of the clutter spectrum in zero valuations area of Doppler frequencies. Spectral component adaptive search in probing signals reflected from moving targets is performed by using CFAR type detector. The dimensions of the detector's operating area are selected with regard to the following: the speed range of detected aerial objects; the set accuracy for defining parameters of the samples' probability density function; as well as the performance of the signal processing device. The practical application results of the proposed algorithm during the experiment to detect Yak-52 aircraft model by a low-power L-range radar system are presented. The possibility was confirmed for effective detection, assessment of coordinates and speed of small-size aerial objects by ground-based decimeter radar system with continuous linear-frequency-modulated signal and with average wave-emission power not more than 100 MW. The range of reliable detection of the aircraft model was several hundred meters, even using low-directivity receiving and transmitting antennas. The

experiments' findings enable to suggest the possibility of using such systems that feature low power consumption and high stealth operation, as portable wearable detection devices for unmanned aircraft vehicles.

*Keywords:* radar system, stealthy aerial object, continuous linear-frequency modulated signal, range Doppler portrait, differential frequency.

### References

1. Zaugg E.C., Edwards M.C., Margulis A. The SlimSAR: A Small, Multi-Frequency, Synthetic Aperture Radar for UAS Operation. 9th IEEE International Radar Conference. 2010. Pp. 277–282.
2. Duersch M.I. BYU MICRO-SAR: A Very Small, Low-Power LFM-CW SAR. A thesis submitted to the faculty of Brigham Young University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. 2004.
3. Zaugg E.C. Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2008. Vol. 46, №10. Pp. 2990–2998.
4. Bogomolov A.V., Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Ryazantsev L.B. Small-size dual-band SAR for unmanned aircraft system. Proceedings of the XXIX all-Russian Symposium "Radar study of natural environments". St. Petersburg: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2015. Iss. 11. Pp. 235–240.
5. Majorov D.A., Savostyanov V.Yu., Mitrofanov D.G. Range-rate measurement of aerial objects in the frequency tuning mode. Measuring equipment. 2008. No. 2. Pp. 43–47.
6. Ryazantsev L.B., Kupryashkin I.F., Likhachev V.P. Requirement validation methods for analog-to-digital conversion in synthetic aperture radar of continuous wave-emission. Digital signal processing. 2017. No. 2. Pp. 49–52.
7. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P. Space radar survey of the Earth's surface under noise conditions. Voronezh: Monograph, 2014. 460 p.
8. Shuhong J., Jiayuan L., Mingzhi L. An Adaptive ship Detection Method in SAR Image based on CFAR. IPCSIT. 2012. Vol. 55.
9. Radar Handbook. Ed. By M.I. Skolnik Transl from Engl. under general edit. of V.S. Verba. In 2 books. Book 1. Moscow: Tehnosfera, 2015. 672 p.
10. Billingsley J.B. Low-angle Radar Land Clutter – Measurements and Empirical Models. New-York: William Andrew Publishing, 2002. 358 p.