

РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ RADIOLOCATION AND RADIO NAVIGATION

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47>

УДК 621.396.962.2

И. Ф. Купряшкин

Военный учебно-научный центр

"Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина"

ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

Н. В. Соколик✉

Информационно-технический центр Южного военного округа

пр. Буденновский, д. 43, Ростов-на-Дону, 344011, Россия

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С НЕПРЕРЫВНЫМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ИНТЕРЕСАХ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОЗАМЕТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ, ОЦЕНКИ ИХ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. На фоне повсеместного использования беспилотных летательных аппаратов и легкомоторной авиации растет интерес к поиску путей повышения эффективности локализации и определения параметров движения воздушных объектов с малой эффективной площадью рассеяния. В связи с этим закономерно внимание к радиолокационным системам (РЛС) с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением. Использование таких зондирующих сигналов позволяет значительно снизить пиковую мощность РЛС и уменьшить ее массогабаритные и стоимостные характеристики. Статья посвящена исследованию перспективы применения малоомощной наземной РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом в интересах обнаружения, а также определения координат и параметров движения малозаметных воздушных объектов. Предложен алгоритм обработки радиолокационных сигналов, позволяющий упростить процедуру обнаружения таких целей, раскрыта структура и приведено описание этапов алгоритма. В основе рассматриваемого алгоритма лежит методика формирования дальностно-доплеровского портрета зоны обзора с использованием цифровой обработки сигнала. Приведены результаты применения алгоритма в малоомощной РЛС С-диапазона, полученные при обработке эхосигналов квадрокоптера, зарегистрированных в ходе натурного эксперимента. Показано успешное решение практической задачи обнаружения и сопровождения малоразмерного воздушного объекта с эффективной площадью рассеяния до 0.5 м², спектр вторичного излучения которого характеризуется выраженной многомодальностью. Результаты эксперимента подтвердили практическую значимость предлагаемого алгоритма и возможность его реализации при создании мобильных переносных радиолокационных комплексов и постов автоматического обнаружения и сопровождения малозаметных одиночных и групповых целей с выдачей информации на пульт оператора.

Ключевые слова: радиолокационная система, обработка сигналов, малоразмерная воздушная цель, эхосигнал, дальностно-доплеровский портрет

Для цитирования: Купряшкин И. Ф., Соколик Н. В. Алгоритм обработки сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением в интересах обнаружения малозаметных воздушных объектов, оценки их дальности и скорости движения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 1. С. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47

Ivan F. Kupryashkin

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy"
54A, Starykh Bolshevikov Str., 394064, Voronezh, Russia*

Natal'ya V. Sokolik✉

*Information-Technical Center of the South Military Command
43, Budyonnovsky Pr., 344011, Rostov-on-Don, Russia*

ALGORITHM OF SIGNAL PROCESSING IN THE RADAR SYSTEM WITH CONTINUOUS FREQUENCY MODULATED RADIATION FOR DETECTION OF SMALL-SIZED AERIAL OBJECTS, ESTIMATION OF THEIR RANGE AND VELOCITY

Abstract. Nowadays the interest in search of ways of improving the efficiency of small radar cross-section aerial objects detection and localization rises against the background of widespread use of light and unmanned aerial vehicles. As a result, researchers pay attention to radar systems (RS) with continuous linear frequency modulation (linear FM) signal. The use of such signals gives the measurable opportunity to reduce radar system peak-speech power and to cut the cost and weight-size parameters of the RS. The paper observes low-power ground based radar implementation prospects for purposes of detection and estimation of motion rates of small-sized aerial objects. The proposed algorithm of radar signals processing enables to simplify the detection of such targets. The paper reveals the structure and defines the steps of the algorithm. The fundamental for the algorithm under consideration is the method of the range-Doppler image composition of the scanned area using digital signal processing. The paper presents the results of the algorithm operation in the low-power RS of C-band radar, obtained by processing of quadrotor echo-signals during the real experiment. The results show successful solution of the applied problem of detection and tracking on the small-sized aerial object with the radar cross-section equal to less than 0.5 m^2 and the spectrum of secondary radiation characterized by the expressed multimodality. The results of the experiment validate the application of the algorithm and demonstrate the possibility of the algorithm implementation in design of portable RS and automated target acquisition centers for detecting and tracking of the small-sized aerial targets (both, single as multi agent) with the information display on operator control panel.

Key words: radar system, signal processing, small-sized aerial objects, target return, range-Doppler image

For citation: Kupryashkin I. F., Sokolik N. V. Algorithm of Signal Processing in the Radar System with Continuous Frequency Modulated Radiation for Detection of Small-Sized Aerial Objects, Estimation of their Range and Velocity. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47 (In Russian)

Введение. Обнаружение малоразмерных воздушных объектов (легкомоторных самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов) является одной из важнейших задач современных радиоэлектронных систем наблюдения [1]. Ее актуальность обусловлена значительным увеличением объемов производства малоразмерных летательных аппаратов и возрастанием степени угроз, обусловленных их широким использованием. В то же время, селекция и определение параметров движения таких целей на фоне пассивных помех представляет собой довольно сложную задачу [2].

В последнее время наблюдается значительный интерес к радиолокационным системам (РЛС) с непрерывным линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом [2]–[5], так как его использование позволяет существенно уменьшить пиковую мощность излучения РЛС и, как следствие, снизить энергопотребление и улучшить массогабаритные и стоимостные характеристики системы.

Малоразмерные воздушные объекты обычно характеризуются эффективной площадью рассея-

ния порядка $0.001 \dots 0.1 \text{ м}^2$ [6]–[8], что при относительно низкой средней мощности ($0.01 \dots 1 \text{ Вт}$) РЛС с непрерывным излучением приводит к необходимости увеличения продолжительности интервала когерентного накопления эхосигналов целей для обеспечения требуемого качества их обнаружения. Однако характерной особенностью эхосигналов таких объектов, как, например, мультикоптеры, служит многомодальность спектра доплеровских частот [6], [7], что существенно затрудняет определение их скорости с использованием традиционных подходов, применяемых в импульсно-доплеровских РЛС.

В связи с этим цель настоящей статьи – создание алгоритма обработки сигналов в РЛС с непрерывным излучением, обеспечивающего эффективную фильтрацию эхосигналов малоразмерных объектов на фоне пассивных помех и фоновых шумов.

Описание алгоритма. Структурная схема РЛС с непрерывным излучением (рис. 1) включает передающее устройство ПДУ, приемное

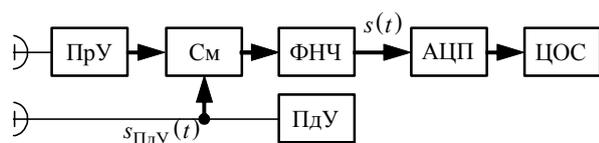


Рис. 1. Структурная схема РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом
Fig. 1. Block diagram of a radar system with continuous linear FM-signal

устройство ПрУ, смеситель См, фильтр нижних частот ФНЧ, аналого-цифровой преобразователь АЦП и систему цифровой обработки сигнала ЦОС. Ее функционирование с использованием предлагаемого алгоритма обработки принятых сигналов включает следующие основные этапы:

- формирование и излучение зондирующего сигнала;
- прием и демодуляция эхосигнала;
- преобразование полученного сигнала в цифровую форму;
- дискретное преобразование Фурье (ДПФ) выборки отсчетов сигнала, зарегистрированных в течение заданного временного интервала когерентного накопления (формирование набора комплексных дальностных портретов зоны обзора);
- формирование дальностно-доплеровского портрета зоны обзора посредством выполнения ДПФ над выборками отсчетов комплексных дальностных портретов, соответствующих одинаковым наклонным дальностям (выборками отсчетов отдельных каналов дальности);
- фильтрация пассивных помех;
- выделение отметок эхосигналов целей на дальностно-доплеровском портрете с использованием адаптивного детектора локальных неоднородностей;
- межпериодное усреднение амплитуд сигналов в отдельных каналах дальности.

Рассмотрим этапы алгоритма обработки сигналов в РЛС с непрерывным излучением более подробно на примере изотропного точечного отражателя.

Формирование и излучение зондирующего сигнала. Сигнал, формируемый ПДУ РЛС с непрерывным излучением и излучаемый в течение отдельного периода зондирования T , описывается соотношением

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

где A_0 – амплитуда зондирующего сигнала; f_0 – начальная частота; $b = 2\pi\Delta f_c/T$ – скорость изменения частоты, причем Δf_c – ширина спектра сигнала; ψ_0 – начальная фаза.

Прием и демодуляция эхосигнала. Принятый эхосигнал перемножается с опорным в смесителе См (рис. 1), и далее в результате фильтрации ФНЧ формируется сигнал разностной частоты.

Частота среза ФНЧ определяется как

$$f_{\text{ср}} = R_{\text{max}}/C_r,$$

где R_{max} – ограничение по дальней границе зоны обзора РЛС; $C_r = cT/(2\Delta f_c)$ – коэффициент пересчета значений дальности до цели в соответствующие значения разностной частоты; c – скорость света.

Сигнал на выходе ФНЧ описывается выражением

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

где $\tau(t) = 2R(t)/c$ – время задержки, причем $R(t)$ – закон изменения расстояния между РЛС и целью.

В большинстве практических случаев изменением времени задержки эхосигнала в течение периода модуляции можно пренебречь. Тогда демодулированный эхосигнал на n -м зондировании описывается упрощенным выражением:

$$s_n(t) = A_0 \cos(2\pi f_{pn}t + \psi_n), \quad (1)$$

$$t \in [0; T], \quad n = \overline{1, N_f},$$

где $f_{pn} = b\tau_n/(2\pi)$ – разностная частота демодулированного эхосигнала; $\psi_n = 2\pi f_0 \tau_n + \psi_0$ – начальная фаза, причем $\tau_n = 2RnT/c$ – время задержки эхосигнала в начале n -го зондирования; $N_f = T_H/T$ (T_H – длительность интервала когерентного накопления).

Преобразование полученного сигнала в цифровую форму. Частота дискретизации демодулированного эхосигнала при его аналого-цифровом преобразовании выбирается согласно классическому условию [6] $F_{\text{АЦП}} = 2f_{\text{ср}}$. После дискретизации и запоминания в памяти ЦОС (рис. 1) демодулированный сигнал представляет собой двумерный массив отсчетов вида

$$S = \{s_{i,n}\}; \quad s_{i,n} = s_n(t_i), \quad (2)$$

$$i = \overline{0, N_{\text{сч}} - 1}, \quad n = \overline{0, N_f - 1},$$

где $t_i = i\Delta t = i/F_{\text{АЦП}}$; $N_{\text{сч}} = F_{\text{АЦП}}T$.

Формирование набора комплексных дальностных портретов зоны обзора. Двумерный

дальностный портрет зоны обзора формируется следующей операцией:

$$\dot{S}_r = F_{\parallel} \{S; K_r\}, \quad (3)$$

где $F_{\parallel} \{\cdot\}$ – оператор ДПФ, выполняемый с коэффициентом частотной интерполяции K_r^{-1} над всеми N_f столбцами двумерного массива отсчетов дискретизированного эхосигнала $S(2)$, зарегистрированного в течение интервала когерентного накопления T_H .

Спектр эхосигнала (1), принятого в отдельном периоде зондирования, описывается выражением

$$\dot{S}_r(f) = \frac{A_0 T}{2} \left| \frac{\sin[\pi T(f_{pn} - f)]}{\pi T(f_{pn} - f)} \right| \times \exp\{j[\pi T(f_{pn} - f)] + \psi_n\}. \quad (4)$$

Составляющие его отсчеты дискретных дальностных портретов определяются как

$$\dot{s}_{r,n,k} = \frac{A_0 T}{2} \left| \frac{\sin[\pi T(f_{pn} - f_k)]}{\pi T(f_{pn} - f_k)} \right| \times \exp\{j[\pi T(f_{pn} - f_k)] + \psi_n\},$$

где $f_k = k\delta f_p = k/(K_r T)$, причем $\delta f_p = 1/(K_r T)$ – шаг изменения разностной частоты на дальностном портрете.

Формирование дальностно-доплеровского портрета зоны обзора. Из (4) следует, что положение максимума огибающей спектра соответствует разностной частоте демодулированного сигнала f_{pn} , причем фаза гармоники ψ_n на этой частоте определяется временной задержкой эхосигнала на n -м зондировании. Тогда среднее значение доплеровского изменения частоты на интервале наблюдения $[(n-1)T; nT]$ определяется через отношение приращения фазы к периоду модуляции сигнала:

$$f_{dn} = (\psi_n - \psi_{n-1}) / (2\pi T).$$

Дальностно-доплеровский портрет зоны обзора формируется с помощью операции

$$\dot{S}_f = F_{\perp} \{\dot{S}_r; K_f\}, \quad (5)$$

где $F_{\perp} \{\cdot\}$ – оператор ДПФ, выполняемый с коэффициентом частотной интерполяции K_f^{-1} над

всеми N_r строками двумерного массива отсчетов дальностного портрета \dot{S}_r (3), зарегистрированного в течение интервала когерентного накопления.

На основе оценки положения максимума огибающей двумерного спектра эхосигнала цели, т. е. определения номера его строки k и столбца m на дальностно-доплеровском портрете можно перейти к оценкам ее дистанции и скорости движения

$$\hat{R} = C_r(f_{pk} - f_{dm}); \quad \dot{v}_r = -f_{dm}c / (2f_0), \quad (6)$$

где $f_{dm} = (m - K_f N_f / 2)\delta f_d$ – доплеровский сдвиг частоты эхосигнала цели, причем $\delta f_d = 1/(K_f T_H)$ – значение шага доплеровской частоты на дальностно-доплеровском портрете.

Фильтрация пассивных помех. С целью исключения обнаружения и оценки параметров эхосигналов неподвижных отражателей процедуре поиска частотных пиков (определения индексов k и m) должен предшествовать этап режекции спектральных составляющих, расположенных в области нулевых значений доплеровских частотных сдвигов.

В [9], [10] отмечается, что огибающая спектральной плотности мощности пассивных помех довольно точно аппроксимируется экспоненциальной моделью:

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

где $\sigma_f = 2\sigma_v/\lambda$, причем σ_v – среднеквадратическое значение скорости движения пассивных отражателей (от 0.12 м/с при легком ветре до 0.37 м/с при штормовом); $\lambda = c/f_0$.

С учетом (6) пассивные помехи можно режектировать, поочередно построив перемножая элементы массива \dot{S}_f (5) с вектором отсчетов U , элементы которого определяются как

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

Выделение отметок эхосигналов целей на дальностно-доплеровском портрете. Адаптивное обнаружение частотных пиков можно осуществить при помощи детектора типа CFAR (Constant False Alarm Rate) [11]–[13], принцип функционирования которого в самом общем виде состоит в анализе отсчетов, локализованных в пределах прямоугольной скользящей области (рис. 2).

¹ Коэффициенты частотной интерполяции K_r и K_f определяют количество цифровых отсчетов на одну спектральную составляющую. Их значения в диапазоне 1...8 определяются производительностью устройства ЦОС и требуемой детализацией дальностно-доплеровского портрета.

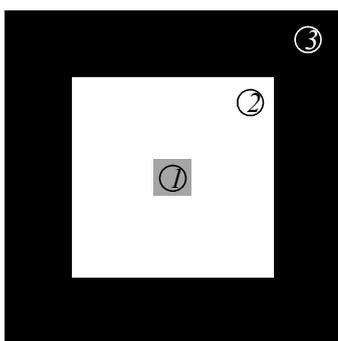


Рис. 2. Рабочая область алгоритма CFAR
Fig. 2. CFAR algorithm operating space

Определение порога обнаружения осуществляется на основе оценки плотности распределения отсчетов в зоне фоновых отражений (рис. 2, 3). В случае, если значение достаточной статистики, определяемое по отсчетам тестируемой зоны (рис. 2, 1), превышает значение этого порога, принимается решение об обнаружении цели.

Размеры тестируемой зоны задаются исходя из ожидаемого диапазона скоростей воздушных объектов. Ее минимальная протяженность по координате дальности обычно определяется как

$$n_r = (1.3 \dots 1.5) \Delta R_{\max} / (C_r \delta f_p),$$

а по координате доплеровского сдвига – как

$$n_d = (1.3 \dots 1.5) (2 f_0 \Delta v_{\max}) / (c \delta f_d),$$

где $\Delta R_{\max} = v_{\max} T_H$ – изменение расстояния между РЛС и объектом, движущимся с максимальной скоростью v_{\max} , за интервал когерентного накопления T_H ; Δv_{\max} – максимальное изменение радиальной скорости движения объекта, движущегося с максимальной скоростью v_{\max} , за тот же интервал когерентного накопления T_H .

Размеры критической зоны (рис. 2, 2) выбираются такими, чтобы исключить влияние отсчетов отметки цели на результат оценки параметров плотности распределения отсчетов в зоне фоновых отражений [13].

Межпериодное усреднение амплитуд сигналов в отдельных каналах дальности. Характерной особенностью дальностно-доплеровских портретов малоразмерных воздушных объектов, в первую очередь таких, как мультикоптеры, является многомодальность спектра доплеровских частот [6], [7]. В результате точное определение скорости движения цели становится затруднительным вследствие значительной неоднозначности доплеровского сдвига частоты ее эхосигнала.

В такой ситуации целесообразно использовать CFAR-детектор не для точной локализации отметки цели, а для подавления областей дальностно-доплеровского портрета, уровень сигнала в которых не превышает пороговый. Последующее некогерентное суммирование его столбцов, т. е. огибающих дальностных портретов в отдельных доплеровских каналах, позволяет сформировать усредненный одномерный дальностный портрет зоны обзора:

$$\bar{S}_k = \frac{1}{N_f K_f} \sum_{m=0}^{N_f K_f - 1} |\tilde{S}_{f_{k,m}}|,$$

где $\tilde{S}_f = \{\tilde{S}_{f_{k,m}}\}$ – массив отсчетов дальностно-доплеровского портрета зоны обзора после выполнения процедур подавления пассивных помех и фоновых шумов.

Результаты экспериментов. Описанный алгоритм обработки сигналов использовался в эксперименте по обнаружению квадрокоптера (рис. 3) с помощью РЛС, разработанной коллективом сотрудников ВУНЦ ВВС "ВВА" совместно с АО "НИИ СТТ" (г. Смоленск) (рис. 4). Параметры РЛС приведены в таблице.



Рис. 3. Внешний вид квадрокоптера, задействованного в эксперименте

Fig. 3. Appearance of the quadrotor used in the experiment

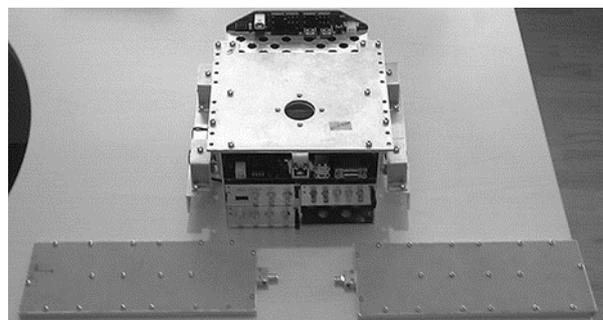


Рис. 4. Внешний вид РЛС, использовавшейся в эксперименте по обнаружению квадрокоптера
Fig. 4. Appearance of the radar used in the quadrotor detecting experiment

Основные характеристики РЛС
Radar basic specifications

Параметр Parameter	Характеристики Specifications
Длина волны, см Wavelength, cm	5.47 (C-диапазон) (C-band)
Мощность излучаемого сигнала, Вт Radiated signal power, W	1
Ширина спектра сигнала Δf_c , МГц Signal spectrum width, MHz	475
Период модуляции T , мкс Modulation period T , μ s	1200
Максимальная дальность действия, км Maximum range, km	4
Масса комплекта, кг Weight, kg	4
Поляризация Polarization	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ

На рис. 5 приведен пример дальностно-доплеровского портрета зоны обзора РЛС (результат формирования дальностно-доплеровского портрета зоны обзора). Яркая вертикальная полоса обусловлена пассивными помехами. На рис. 6 показан соответствующий этому портрету

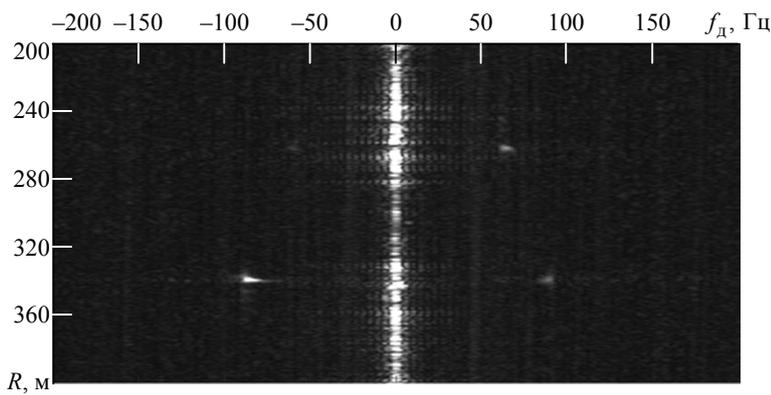


Рис. 5. Дальностно-доплеровский портрет зоны обзора до режекции пассивных помех

Fig. 5. Range-Doppler image of scanned area before clutter rejecting

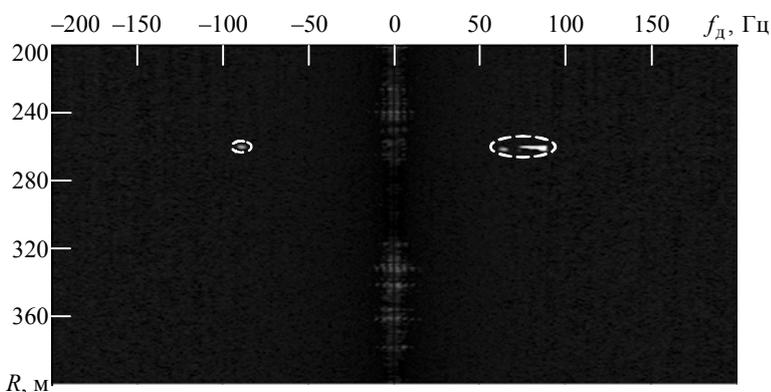


Рис. 7. Дальностно-доплеровский портрет зоны обзора после режекции пассивных помех

Fig. 7. Range-Doppler image of scanned area after clutter rejecting

дальностный профиль, усредненный за интервал наблюдения $T_H = 0.24$ с.

На рис. 7 показан дальностно-доплеровский портрет сектора наблюдения после режекции пассивных помех (результат фильтрации при $\sigma_v = 0.2$ м/с), а на рис. 8 – соответствующий этому портрету дальностный профиль, также усредненный за интервал наблюдения $T_H = 0.24$ с. На рис. 7 штриховыми линиями выделены моды отметки квадрокоптера. В отличие от рис. 6, на рис. 8 отчетливо наблюдается отдельный пик на дальности около 260 м, соответствующий эхосигналу квадрокоптера.

На всех дальностно-доплеровских портретах зоны обзора РЛС (рис. 5 и 7) присутствует горизонтальная полоса различной интенсивности на фиксированной дальности, порожденная доплеровскими составляющими эхосигналов от вращающихся винтов квадрокоптера. Наличие подобной отметки можно считать информативным признаком воздушного объекта типа мультикоптера.

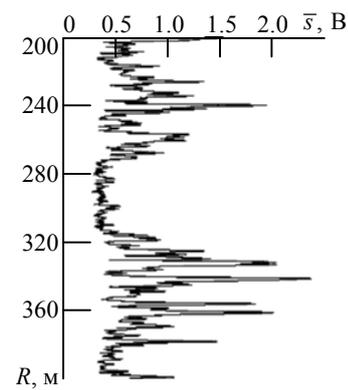


Рис. 6. Усредненный дальностный портрет до режекции пассивных помех

Fig. 6. Averaged range image before clutter rejecting

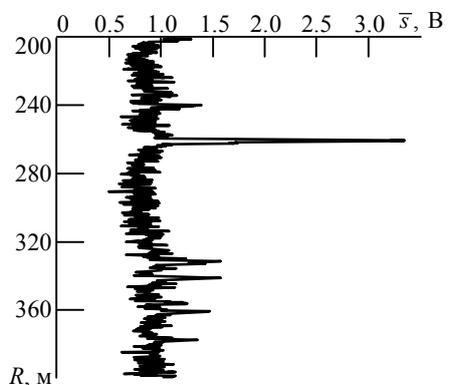


Рис. 8. Усредненный дальностный портрет после режекции пассивных помех и выделения отметки квадрокоптера

Fig. 8. Averaged range image after clutter rejecting and quadrotor discrimination

Дальнейшая обработка усредненного дальностного портрета может включать обнаружение и оценку дальности до целей. Определение скорости при этом обеспечивается за счет оценки смещения отметки цели по дальности за промежуток времени между соседними интервалами когерентного накопления, т. е. с использованием традиционных методов вторичной обработки радиолокационных сигналов [14], [15]. Недостаток такого подхода представляет невозможность разрешения целей, находящихся на одной дальности, по их доплеровским сдвигам. Однако если учесть, что полоса частот в современных РЛС с непрерывным излучением составляет десятки и сотни мегагерц, т. е. что разрешение по наклонной дальности составляет около метра или лучше, такую ситуацию можно считать маловероятной и, в любом случае, весьма непродолжительной.

Заключение. Таким образом, в целях снижения мощности излучения и, как следствие, повышения мобильности, энергоэффективности и скрытности работы наземной РЛС предложено использовать непрерывные линейно-частотно-модулированные сигналы. В настоящей статье подробно рассмотрен алгоритм обработки таких сигналов, базирующийся на создании набора

ра комплексных дальностных портретов зоны обзора РЛС на интервале когерентного накопления информации с дальнейшим формированием на этой основе дальностно-доплеровского портрета наблюдаемого сектора пространства. Последующая режекция стабильных спектральных составляющих пассивных отражателей и выделение спектра эхосигнала цели алгоритмом типа CFAR служат основой формирования усредненного дальностного портрета зоны ответственности РЛС с однозначным выделением на нем отметок реальных целей.

В ходе натурного эксперимента с использованием РЛС С-диапазона средней мощностью излучения 1 Вт достигнута точность определения наклонной дальности наблюдаемой сложной цели с мультимодальным вторичным излучением (квадрокоптера) до 1 м, радиальной скорости до 1 м/с, установлена возможность определения типа цели.

Проведенный натурный эксперимент показал возможность практической реализации описанного алгоритма обработки непрерывных линейно-частотно-модулированных сигналов в целях эффективного обнаружения и определения параметров движения малоразмерных низковысотных воздушных объектов, характеризующихся невысокой радиолокационной заметностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлушенко М. И., Евстафьев Г. М., Макаренко И. К. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Науч. зап. ПИР-центра: Национальная и глобальная безопасность. 2004. № 2 (26). 612 с.
2. Zaugg E. C., Edwards M. C., Margulis A. The slim-sar: a small, multi-frequency, synthetic aperture radar for uas operation // 9th IEEE Intern. Radar Conf. 2010. Washington, DC. 10–14 May 2010, Piscataway: IEEE, 2010. doi: 10.1109/RADAR.2010.5494612
3. Duersch M. I. BYU MICRO-SAR: A very small, low-power lfm-cw sar: master's thesis. Brigham Young University. Provo, UT. URL: <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1727&context=etd/> (дата обращения 01.02.2019) doi: 10.1109/IGARSS.2006.110
4. Zaugg E. C. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. GRS-46, № 10. P. 2990–2998.
5. Малогабаритная двухдиапазонная PCA для беспилотного авиационного комплекса / А. В. Богомолов, И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев // Тр. XXIX Всерос. симпозиума "Радиолокационное исследование природных сред", Санкт-Петербург, 25–26 марта 2015 г. / ВКА им. А. Ф. Можайского. СПб.: 2015. Вып. 11. С. 235–240.
6. A system for measurement of electromagnetic wave scattered by small UAVs / A. V., Khristenko, M. O. Kovalenko, M. E. Rovkin, V. A. Khlusov, A. V. Marchenko, A. A. Sutulin, N. D. Malyutin // 2017 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2017). Astana, Kazakhstan, 29–30 June, 2017. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998472
7. The radar cross section of small propellers on unmanned aerial vehicles / T. Peto, S. Bilicz, L. Szucs, S. Gyimothy, J. Pavo // EuCAP 2016, Davos, Switzerland, 10–15 April, 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481645
8. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR images of small UAVs // IEEE A&E Systems Magazine. 2017. Vol. 32, iss. 9. P. 28–32. doi: 10.1109/MAES.2017.160167
9. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 672 с.
10. Billingsley J. B. Low-angle radar land clutter // Measurements and Empirical Models. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2002. 307 p.
11. Sniekers T. Design of a constant false alarm rate (CFAR) detection scheme: master's thesis. University of Twente, August 14, 2015. 117 p. URL: <https://utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/sniekers.pdf> (дата обращения 01.02.2019)
12. A new detection method based on CFAR and DE for OFPS / Zhenzheng Qiu, Tong Zheng, Hongquan Qu, Liping

Pang // Photonic Sensors. 2016. Vol. 6, № 3. P. 261–267. doi 10.1007/s13320-016-0342-8

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

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2018 г.

Статья принята к публикации 11 февраля 2019 г.

Купряшкин Иван Федорович – доктор технических наук (2017), доцент (2011) кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) военного учебно-научного центра "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина". Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокационные системы, системы радиоэлектронного противодействия радиолокационным системам.

E-mail: ifk78@mail.ru

Соколик Наталья Валентиновна – инженер по специальности "Сети связи и системы коммутации" (2001, Новочеркасский военный институт связи), начальник отделения Информационно-технического центра Южного военного округа (г. Ростов-на-Дону). Автор 27 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокационные системы, радиоэлектронные системы, обработка сигналов.

E-mail: sokolik777@mail.ru

REFERENCES

1. Pavlushenko M. I., Evstafev G. M., Makarenko I. K. Unmanned Aerial Vehicles: History, Application, Threat of Proliferation and Development Prospects. PIR Center Study Papers: Russia and Global Security. 2004, no. 2 (26), 612 p. (In Russian)

2. Zaugg E. C., Edwards M. C., Margulis A. The Slim-SAR: a Small, Multi-Frequency, Synthetic Aperture Radar for UAS Operation. 9th IEEE Intern. Radar Conf. 2010. 10–14 May 2010, Washington, DC. Piscataway, IEEE, 2010. doi: 10.1109/RADAR.2010.5494612

3. Duersch M. I. BYU MICRO-SAR: A Very Small, Low-Power LFM-CW SAR: Master's Thesis. Brigham Young University. Provo, UT. Available at: <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1727&context=etd/> (accessed 01.02.2019) doi: 10.1109/IGARSS.2006.110

4. Zaugg E. C. Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2008, vol. GRS-46, no. 10, pp. 2990–2998.

5. Bogomolov A. V., Kupryashkin I. F., Likhachev V. P., Ryazantsev L. B. *Malogabaritnaya dvukhdiapazonnaya RSA dlya bespilotnogo aviatsionnogo kompleksa* [Compact Dual-Band SAR for Unmanned Aircraft Complex]. *Trudy XXIX Vseross. simpoziuma "Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnikh sred"* [Proc. of the XXIX All-Rus. Symp. "Radar Survey of Natural Media"], 25–26 March 2015, SPb, VKA im. A. F. Mozhaiskogo, 2015, vol. 11, pp. 235–240. (In Russian)

6. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. V., Sutulin A. A., Malyutin N. D. A System for Measurement of Electromagnetic Wave Scattered by Small UAVs. 2017 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2017). 29–30 June, 2017, Astana, Kazakhstan. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998472

7. Peto T., Bilicz S., Szucs L., Gyimothy S., Pavo J. The Radar Cross Section of Small Propellers on Unmanned Aerial Vehi-

cles. EuCAP 2016. 10–15 April, 2016, Davos, Switzerland, 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481645

8. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR Images of Small UAVs. IEEE A&E Systems Magazine. 2017, vol. 32, iss. 9, pp. 28–32. doi: 10.1109/MAES.2017.160167

9. *Spravochnik po radiolokatsii* [Radar Reference Guide]. Ed. by M. I. Skolnik. Vol. 1. Moscow, *Tekhnosfera*, 2015, 672 p. (In Russian)

10. Billingsley J. B. Low-angle Radar Land Clutter. Measurements and Empirical Models. Norwich, NY, William Andrew Publishing, 2002, 307 p.

11. Sniekers T. Design of a Constant False Alarm Rate (CFAR) detection scheme: Master's Thesis. University of Twente, August 14, 2015. 117 p. Available at: <https://utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/sniekers.pdf> (accessed 01.02.2019)

12. Zenzheng Qiu, Tong Zheng, Hongquan Qu, Liping Pang. A New Detection Method Based on CFAR and DE for OFPS. Photonic Sensors. 2016, vol. 6, no. 3, pp. 261–267. doi 10.1007/s13320-016-0342-8

13. Kupryashkin I. F., Likhachev V. P. *Kosmicheskaya radiolokatsionnaya s'emka zemnoi poverkhnosti v usloviyakh pomekh* [Space Radar Survey of the Earth's Surface under Noise Conditions]. Voronezh, *Nauchnaya kniga*, 2014, 460 p. (In Russian)

14. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital Radar. Introduction to the Theory]. Kiev, *Izd-vo KViTs*, 2000, 428 p. (In Russian)

15. Kristal' V. S. *Optimal'naya obrabotka radiolokatsionnykh signalov* [Optimum Processing of Radar Signals]. Moscow, *Novoe vremya*, 2014, 208 p. (In Russian)

Received November, 14, 2018

Accepted February, 11, 2019

Ivan F. Kupryashkin – Dr. of Sci. (Engineering) (2017), Associate Professor (2011) of the Department of Combat Use of Electronic Warfare Systems (with Aerospace Control Systems and Guided Weapons) of Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy". The author of more than 100 publications. Area of expertise: radar systems; systems of radioelectronic counteraction to radar.

E-mail: ifk78@mail.ru

Natal'ya V. Sokolik – Dipl.-engineering (2001), Engineer in "Communication Networks and Switching Systems" of Novocherkassk Military Signal Institute. Head of the Department of the Information-Technical Center of the South Military Command (Rostov-on-Don). The author of 27 publications. Area of expertise: radar systems; radioelectronic systems; signal processing.

E-mail: sokolik777@mail.ru
