

проведение тщательных исследований характеристик и калибровка на согласованных уровнях напряжённости импульсного электрического поля.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ, и при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Л и т е р а т у р а

1. **Giri D. V., Tesche F. M., Baum C. E.** An Overview of High-Power Electromagnetic (HPEM) Radiating and Conducting Systems // Circuit and Electromagnetic System Design Notes. 2006. No. 50. P. 1–19.

2. **Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Добровотворский М. И., Сухов А. В., Алешко А. И.** Метрологическое обеспечение средств измерений параметров импульсных электрических и магнитных полей естественного и искусственного происхождения // Измерительная техника. 2016. № 2. С. 40–42.

3. **Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Добровотворский М. И., Сухов А. В., Алешко А. И.** Метрологическое обеспечение измерений параметров сильных импульсных электромагнитных полей в субнаносекундном диапазоне // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 48–52.

4. **Сахаров К. Ю., Подосенов С. А., Сухов А. В., Туркин В. А., Михеев О. В., Алешко А. И.** Метрологическое обеспечение измерений импульсных электромагнитных полей в пикосекундном диапазоне // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости ТехноЭМС-2015: Сб. науч. трудов II Всеросс. науч.-техн. конф. 2015. С. 22–26.

5. **Lee Joo-Gwang, Kang Jin-Seob, Kim Jeong-Hwan.** Time Domain Antenna Range at KRISS // Proc. Conf. Precision Electromagnetic Measurements. 2008. P. 642–643.

6. **Johnk R. T., Ondrejka A. R.** Time-domain calibrations of D-dot sensors // NIST Technical Notes. 1998. No. 1392. 40 p.

7. **Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Добровотворский М. И., Сухов А. В.** Измерительный преобразователь напряжённости импульсного электрического поля пикосекундной длительности // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 62–64.

Дата принятия: 18.10.2017.

621.396.9

Оценка дальности и радиальной скорости объектов широкополосной радиолокационной станцией в условиях миграции отметок по каналам дальности

Л. Б. РЯЗАНЦЕВ, В. П. ЛИХАЧЁВ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, e-mail: kernel386@mail.ru

Предложен способ, позволяющий увеличить время когерентного накопления отражённых от объектов сигналов для увеличения дальности действия радиолокационной станции с непрерывным линейным частотно-модулированным излучением в условиях миграции отметок по каналам дальности. Вычислены дальность и радиальная скорость объекта при условии, что изменение расстояния до него за период модуляции существенно превышает разрешающую способность радиолокационной станции по дальности. Проведена оценка потенциальных точностей оценок, представлены результаты экспериментальной проверки предложенного способа.

Ключевые слова: широкополосная РЛС, непрерывный частотно-модулированный сигнал, дальность, радиальная скорость, потенциальная точность, когерентное накопление, миграция отметок по каналам дальности.

The technique allowing to increase the time of coherent accumulation of received signals for the radar range increasing with the following calculation target range and radial velocity is proposed. Here with the target range change during the modulation period of transmitted signal is considerably exceeding radar range resolution. The assessment of potential accuracy of range and velocity estimation is carried out, and the results of experimental testing of the proposed technique are presented.

Key words: wide-band radar, FMCW, range, radial velocity, potential accuracy, coherent accumulation, range cell migration.

В настоящее время широкополосные радиолокационные станции (РЛС) непрерывного излучения с линейным частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом активно используются для обнаружения и измерения параметров движения

малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, а также в автомобильных системах предотвращения столкновения и контроля скорости [1, 2]. Основными тенденциями по увеличению дальности действия таких систем и, как

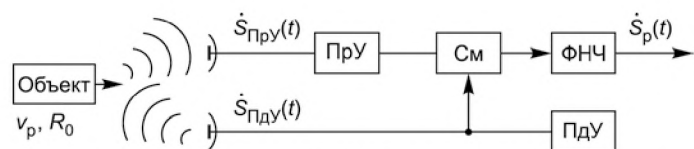


Рис. 1. Структурная схема радиолокационных станций непрерывного излучения:

ПрУ – приемное устройство; ПДУ – передающее устройство; См – смеситель; ФНЧ – фильтр нижних частот

следствие, времени на принятие управляющих решений, являются повышение эквивалентной излучаемой мощности и времени когерентного накопления сигналов [3]. Однако первое направление ограничено решениями Государственной комиссии по радиочастотам, а второе – временем, в течение которого определение расстояния до объекта за период зондирования не превышает разрешающей способности РЛС по дальности, т. е. отсутствует миграция отметок по каналам дальности [3, 4]. Для устранения миграции отметок можно применять способы, описанные в [5], но их практическое использование затрудняется из-за отсутствия точных сведений о законе изменения дальности до объекта.

Для преодоления ограничений существующих подходов на время когерентного накопления отраженных от объектов сигналов и увеличения дальности действия РЛС необходимо разработать способ измерения параметров движения объектов (дальности и радиальной скорости) в условиях миграции отметок по каналам дальности, а также определить точностные характеристики предложенного способа.

Работа РЛС основана на зондировании, приеме и демодуляции (при умножении на опорный сигнал передатчика) отраженных от объекта сигналов (рис. 1). Демодулированный сигнал разностной частоты $\dot{S}_p(t)$ в течение отдельного периода модуляции T_m зондирующего сигнала можно описать следующим выражением [6]:

$$\dot{S}_p(t) = A_0 \exp\{j2\pi(f_0\tau(t) + \mu\tau(t)t - \mu\tau(t)^2/2 + \psi_0)\} + \dot{n}(t), \quad (1)$$

$$t \in [0, T_m],$$

где A_0 – амплитуда сигнала; j – мнимая единица; $f_0, \mu = \Delta F/T_m, \psi_0, \Delta F$ – начальная частота, скорость изменения частоты, случайная начальная фаза и ширина спектра зондирующего ЛЧМ-сигнала, соответственно; T_m – период модуляции зондирующего сигнала; $\dot{n}(t)$ – гауссов шум в приемном канале с равномерной спектральной плотностью N_0 ; $\tau(t) = 2R(t)/c$ – время задержки, обусловленное распространением сигнала до объекта и обратно; $R(t)$ – закон изменения дальности до объекта; c – скорость света.

В большинстве случаев изменение радиальной составляющей скорости объекта v_p за период зондирования является незначительным, и поэтому закон изменения дальности $R(t)$ можно принять линейным, т. е.

$$R(t) = R_0 + v_p t, \quad (2)$$

где R_0 – начальная дальность объекта.

С учетом формулы (2) выражение (1) можно переписать в виде

$$\dot{S}_p(t) = A_0 \exp\{j2\pi(\Theta_0 + \Theta_1 t + \Theta_2 t^2)\} + \dot{n}(t); \quad (3)$$

$$\Theta_0 = 2f_0 R_0/c - 2\mu R_0^2/c^2 + \psi_0;$$

$$\Theta_1 = 2f_0 v_p/c - 4\mu R_0 v_p/c^2 + 2\mu R_0/c;$$

$$\Theta_2 = 2\mu v_p/c - 2\mu v_p^2/c^2.$$

Слагаемое Θ_0 определяет начальную фазу сигнала, не зависящую от времени и поэтому не учитываемую в ходе дальнейшей обработки. Приняв во внимание малую величину слагаемых $4\mu R_0 v_p/c^2$ и $2\mu v_p^2/c^2$ по отношению к другим слагаемым, входящим в Θ_1, Θ_2 , выражение (3) можно представить в сокращенной форме:

$$\dot{S}_p(t) = A_0 \exp\left\{j2\pi\left(f_{Rd}t + \frac{\mu_p}{2}t^2\right)\right\} + \dot{n}(t), \quad (4)$$

где $f_{Rd} = f_R + f_d$; $f_R = 2\mu R_0/c$; $f_d = 2f_0 v_p/c$ – доплеровская частота; $\mu_p = 4\mu v_p/c$.

Существующие способы [3, 4] определения R_0, v_p сводятся к оценке частот f_R, f_d и ориентированы на короткие (единицы миллисекунд) значения T_m , при которых отсутствует миграция отметок по каналам дальности, т. е. $T_m v_p < \delta r$. Тогда значение квадратичного фазового множителя из выражения (4) примет вид

$$\mu_p/2 < 2\mu \delta r/(T_m c),$$

где $\delta r = c/(2\Delta f)$ – разрешающая способность по дальности.

Из выражения (4) следует, что движение объекта обуславливает появление в сигнале разностной частоты дополнительной ЛЧМ, скорость изменения частоты μ_p которой пропорциональна радиальной скорости объекта v_p , а начальная частота f_{Rd} – радиальной скорости и начальной дальности до него. В этом случае определение v_p, R_0 может быть основано на измерениях μ_p, f_{Rd} , что обеспечивает инвариантность такого подхода к длительности периода модуляции зондирующего сигнала и миграции отметок по каналам дальности.

Совместно параметры f_{Rd}, μ_p можно оценить методом максимального правдоподобия, который сводится к поиску положения максимума двумерной корреляционной функции для различных значений f и скорости изменения частоты μ_s эталонного ЛЧМ-сигнала [7]:

$$\dot{S}(f, \mu_s) = \mathcal{F}\{\dot{S}_p(t)\dot{S}_s^*(t, \mu_s)\}; \quad (5)$$

$$\hat{\mu}_p = \underset{f}{\operatorname{argmax}} [\dot{S}(f, \mu_s)], \quad \hat{f}_{Rd} = \underset{\mu_s}{\operatorname{argmax}} [\dot{S}(f, \mu_s)], \quad (6)$$

где $\dot{S}_s(t, \mu_s) = \exp\{j\pi\mu_s t^2\}$ – эталонный сигнал; f – текущая частота; $\mathcal{F}$ – оператор преобразования Фурье; $\mu_s \in [\mu_{pmin}, \mu_{pmax}]$, μ_{pmin}, μ_{pmax} – границы априорного интервала значений параметра μ_p , определяемые, соответственно, минимальной и максимальной радиальными скоростями целей согласно вы-

ражению (4).

Устройство, реализующее процедуры (5), (6), содержит N каналов. Это количество рассчитывают из условия обеспечения требуемой точности оценки $\hat{\mu}_p$, т. е.

$$N \geq |\mu_{p\max} - \mu_{p\min}| / \sigma\{\hat{\mu}_p\},$$

где $\sigma\{\hat{\mu}_p\}$ – средняя квадратическая ошибка (СКО) оценки параметра μ_p .

Данное устройство представлено на рис. 2. Полученные оценки $\hat{\mu}_p$, $\hat{f}_{Rd}$ позволяют определить значения $\hat{v}_p$, $\hat{R}_0$ в соответствии с выражениями

$$\hat{v}_p = \hat{\mu}_p c / (4\mu); \quad (7)$$

$$\hat{R}_0 = \hat{R}_{Rd} - \hat{R}_d, \quad (8)$$

где $\hat{R}_{Rd} = \hat{f}_{Rd} c / (2\mu)$; $\hat{R}_d = \hat{f}_d c / (2\mu)$ – смещение по дальности, обусловленное доплеровской частотой; $\hat{f}_d = 2f_0 \hat{v}_p / c$.

Потенциальные точности оценок $\hat{v}_p$, $\hat{R}_0$ зависят от потенциальных точностей оценок линейного $\hat{f}_{Rd}$ и квадратичного $\mu_p/2$ фазовых множителей функции (4), нижние границы дисперсий которых соответствуют условию Крамера-Рао [8] и определяются как

$$\sigma^2\{\hat{\mu}_p\} = 90 / (q^2 T_m^4 \pi^2); \quad \sigma^2\{\hat{f}_{Rd}\} = 3 / (q^2 T_m^2 \pi^2),$$

где $q^2 = 2A_0^2 T_m / N_0$.

Соответствующие СКО оценок $\hat{v}_p$, $\hat{R}_0$ с учётом линейности их связи с параметрами $\hat{\mu}_p$, $\hat{f}_{Rd}$ (см. (7), (8)) выводятся из следующих выражений:

$$\sigma\{\hat{v}_p\} = \frac{c}{\pi T_m \Delta F} \sqrt{\frac{45}{8q^2}}; \quad \sigma\{\hat{R}_0\} = \frac{f_0 c}{\pi \Delta F^2} \sqrt{\frac{45}{8q^2}}. \quad (9)$$

Анализ (9) показывает, что увеличение величин T_m и ΔF приводит к пропорциональному повышению точности измерения радиальной скорости объекта, а точность оценивания дальности этого объекта повышается пропорционально квадрату ширины спектра сигнала ΔF . Кроме того, меньшие значения f_0 обеспечивают более высокую точность определения дальности до объекта вследствие уменьшения погрешности измерения доплеровской частоты $\hat{f}_d$.

Для подтверждения полученных результатов авторы провели эксперимент по измерению дальности и скорости приближающегося автомобиля широкополосной РЛС непрерывного излучения С-диапазона, описанной в [9]. Условия наблюдений были следующие: $f_0 = 5,25$ ГГц, $\Delta F = 500$ МГц, $T_m = 0,1$ с, средняя мощность зондирующего сигнала 10

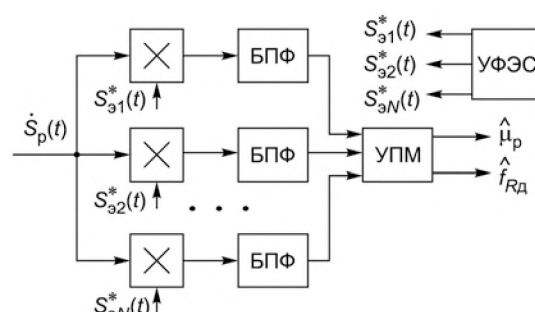


Рис. 2. Структурная схема измерителя параметров $\hat{\mu}_p$, $\hat{f}_{Rd}$: БПФ – быстрое преобразование Фурье; УПМ – устройство поиска положения максимума; УФЭС – устройство формирования эталонных сигналов

дБм, коэффициент усиления антенн 18 дБ. Скорость автомобиля составляла около 60 км/ч. Сигналы $\dot{S}_p(t)$, отражённые от движущегося автомобиля, оцифровывались аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации 400 кГц и разрядностью 8 бит, а затем обрабатывались на ПЭВМ. Спектр зарегистрированного сигнала $\dot{S}_p(t)$ и сечения двумерной корреляционной функции (5) при $\mu_s = \hat{\mu}_p$ для различных номеров периодов зондирования (в пересчёте к дальности) показаны на рис. 3, а, б, соответственно.

В каждом периоде T_m спектр сигнала $\dot{S}_p(t)$ представляет собой спектр ЛЧМ-колебания (см. рис. 3, а) с девиацией

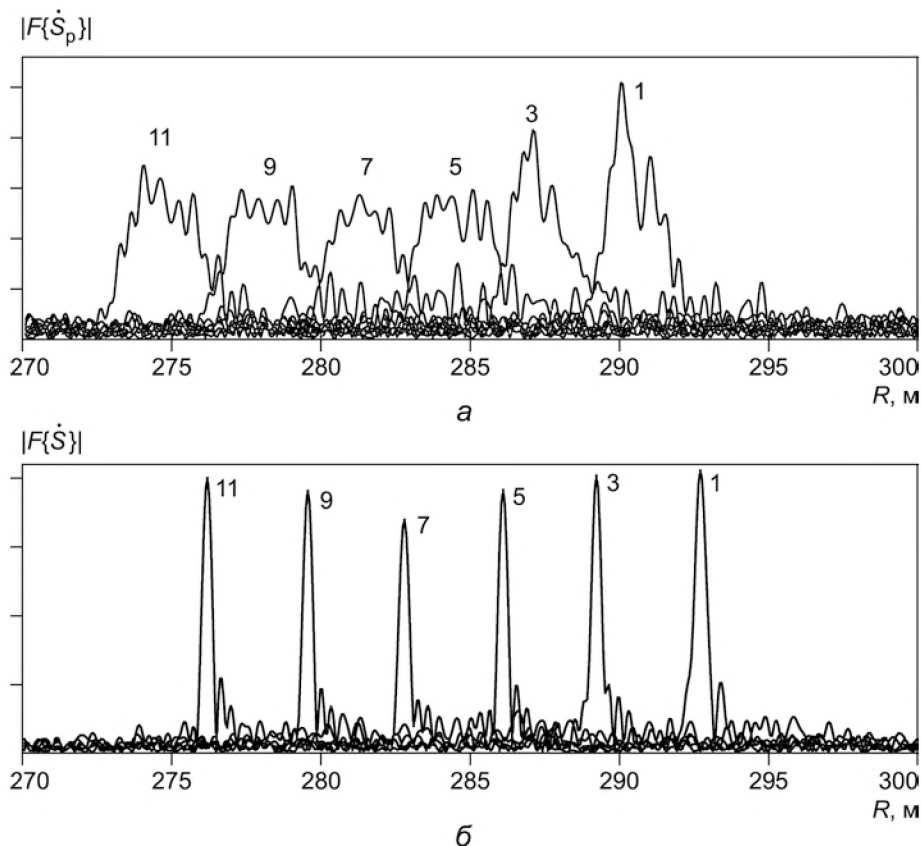


Рис. 3. Спектр сигнала $\dot{S}_p(t)$ (а) и сечения $\dot{S}(f, \mu_s)$ при $\mu_s = \hat{\mu}_p$ (б) в пересчёте к дальности: 1, 3, 5, 7, 9, 11 – номера периодов зондирования

Оценки в различные периоды зондирования

Номер периода	Параметры				
	$\dot{v}_p$, м/с	$\dot{f}_d$, Гц	$\dot{R}_d$, м	$\dot{R}_{Rd}$, м	$\dot{R}_0$, м
1	16,6	581,4	17,4	292,8	275,3
3	15,2	532,5	16,0	289,3	273,3
5	16,0	561,8	16,8	286,2	269,3
7	15,8	552,1	16,6	282,9	266,3
9	16,6	581,4	17,4	279,6	262,2
11	15,8	552,1	16,5	276,3	259,7
СКО	1,95	18,90	0,57	0,13*	0,92*
МО	57,6	560,2	16,8	3,30*	3,12*

Примечание. Знаком * отмечены СКО и МО изменений значений соответствующих параметров.

$\Delta F_p = 4\Delta F v_p / c$. Умножение сигнала $\dot{S}_p(t)$ на эталонный сигнал $\dot{S}_s(t, \mu_s)$ позволяет устранить дополнительную ЛЧМ и осуществить сжатие спектра (см. рис. 3, б). Это приводит к повышению отношения сигнал–шум q^2 в T_m раз и, как следствие, к увеличению дальности действия РЛС в $\sqrt[4]{T_m}$ раз [3]. Так, например, увеличение T_m с 2,5 мс до 0,1 с способствует увеличению максимальной дальности действия РЛС в 2,5 раза [5]. Таким образом, увеличение дальности действия, например, с 200 до 500 м при $v_p = 60 \dots 120$ км/ч приведёт к увеличению запаса времени на принятие управляющих решений на 9–18 с.

Оценки $\dot{v}_p$, $\dot{f}_d$, $\dot{R}_d$, $\dot{R}_{Rd}$, $\dot{R}_0$, полученные предложенным способом в различные периоды зондирования, а также их СКО и математические ожидания (МО) представлены в таблице.

Согласно выражению (9), потенциальные точности оценок $\dot{v}_p$, $\dot{R}_0$ при $q^2 = 19 \dots 21$ дБ (см. рис. 3, б) имеют значения $\sigma\{\dot{v}_p\} = 0,4 \dots 0,5$ м/с и $\sigma\{\dot{R}_0\} = 0,42 \dots 0,53$ м. В то же время СКО аналогичных оценок, полученных в ходе эксперимента (см. таблицу), не превышают 0,54 м/с и 0,92 м, соответственно. Поэтому с учётом флуктуаций отражённого сигнала и погрешностей обработки эти СКО можно считать согласующимися с их потенциальными значениями.

Заключение. Предложенный способ оценки дальности и радиальной скорости объектов позволяет увеличить время когерентного накопления сигналов до значений, когда измене-

ние расстояния до объекта за это время существенно превышает разрешающую способность РЛС по дальности. Увеличение времени когерентного накопления с единиц до десятков или сотен миллисекунд при ограничениях на эквивалентную излучаемую мощность позволит увеличить максимальную дальность действия РЛС в 1,5–2,5 раза и, соответственно, запас времени на принятие управляющих решений. Проведённые экспериментальные исследования точности выдаваемых оценок согласуются с полученными теоретическими значениями и доказывают его практическую реализуемость.

Л и т е р а т у р а

1. Drozdowicz J. 35 GHz FMCW drone detection system // 17th Int. Radar Symposium, Krakow, 2016.
2. Сысоева С. А. Интеллектуальные автомобильные системы и датчики // Компоненты и технологии. 2012. № 1. С. 7–18.
3. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970.
4. Meinecke M., Rohling H. Combination of LFMCW and FSK Modulation Principles for automotive radar systems // Proc. German Radar Symposium GRS200, Berlin, 2000.
5. Школьный Л. А. РЛС воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008.
6. Антипов В. Н., Колтышев Е. Е., Мухин В. В., Печенников А. В., Фролов А. Ю., Янковский В. Т. Радиолокационная система беспилотного летательного аппарата // Радиотехника. 2006. № 7. С. 14–20.
7. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы / Под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высшая школа, 1992.
8. Купряшкин И. Ф., Лихачёв В. П. Космическая радиолокационная съёмка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: Научная книга, 2014.
9. Богомолов А. В., Купряшкин И. Ф., Лихачёв В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритная двухдиапазонная РСА для беспилотного авиационного комплекса / Труды XXIX Всерос. симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. Вып. № 11. С. 235–240.

Дата принятия: 28.04.2017.