

DOI: 10.17516/1999-494X-0384

УДК 621.396.96

## Parametric Radar Method for Detecting Small Unmanned Aircraft System Using Narrow-Band Quasi-Continuous Signals

Aleksey V. Kogtin, Aleksey N. Fomin,  
Vitaly V. Loy\*, Georgy Y. Shaidurov,  
Dmitriy A. Charinsev and Vladimir A. Kopilov  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 31.12.2021, received in revised form 17.02.2022, accepted 04.03.2022

**Abstract.** The article discusses a method for detecting small unmanned aircraft system (MBLA) with an effective scattering area (ESR) of less than  $0.1 \text{ m}^2$ , a narrow-band radar using a quasi-continuous signal. A block diagram of a radar system, an energy sensitivity assessment of the method for the case of using a narrow-band radar system with a quasi-continuous radiated signal is proposed. It is shown that a continuous signal radar system can be implemented as a small-sized, compact mobile radar system with a radiation power of 5–10 MW and a detection range of up to 10 km.

**Keywords:** quasi-continuous signal, the autodyne principle of operation, speed of rotation of the propellers, the beating of the propellers of aircraft system.

Citation: Kogtin, A.V., Fomin, A.N., Loy, V.V., Shaidurov, G.Y., Charinsev, D.A. and Kopilov, V.A. Parametric Radar Method for Detecting Small Unmanned Aircraft System Using Narrow-Band Quasi-Continuous Signals. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(2), 216–222. DOI: 10.17516/1999-494X-0384

# Параметрический радиолокационный метод обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов с использованием узкополосных квазинепрерывных сигналов

А. В. Когтин, А. Н. Фомин, В. В. Лой,  
Г. Я. Шайдуров, Д. А. Чаринцев, В. А. Копылов  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В статье рассматривается метод обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) с эффективной площадью рассеивания (ЭПР) менее  $0,1 \text{ м}^2$ , узкополосной РЛС с использованием квазинепрерывного сигнала.

Предлагается структурная схема радиолокационной станции, энергетическая оценка чувствительности метода для случая использования узкополосной РЛС с квазинепрерывным излучаемым сигналом. Показано, что РЛС с непрерывным сигналом может быть реализована как малоразмерная, компактная мобильная РЛС с мощностью излучения 5–10 мВт и дальностью обнаружения до 10 км.

**Ключевые слова:** квазинепрерывный сигнал, автодинный принцип работы, частота вращения винтов, биения винтов летательных аппаратов.

Цитирование: Когтин, А. В. Параметрический радиолокационный метод обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов с использованием узкополосных квазинепрерывных сигналов / А. В. Когтин, А. Н. Фомин, В. В. Лой, Г. Я. Шайдуров, Д. А. Чаринцев, В. А. Копылов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(2). С. 216–222. DOI: 10.17516/1999-494X-0384

Известно, что особенностью тактики использования разведывательных и боевых МБЛА является работа на небольших высотах, порядка 100–2000 м, при скоростях полета до 100 км/ч, в том числе и в режиме зависания, когда скорость летательного аппарата (ЛА) близка к нулю. При этом ЭПР объекта радиолокации находится в пределах менее  $0,1 \text{ м}^2$ , что не дает возможности их обнаружения традиционной импульсной техникой радиолокации, а использование миллиметрового или оптического диапазона связано с существенным влиянием метеословий [1–4].

В источниках [5–7] описывается метод обнаружения подобных целей с использованием РЛС автодинного типа и приводятся данные экспериментов в лабораторных условиях, осуществленных в лаборатории радиолокации Сибирского федерального университета в 2015 г. Эти эксперименты показали, что самолетная модель МБЛА четко идентифицируется с дистанции 10–15 м автодинной РЛС на рабочих частотах 2,5 и 10 ГГц путем выделения частоты вращения винтов, как металлических, так и пластмассовых.

На рис. 1 показана структурная схема РЛС с мощностью передатчика до 5 мВт при использовании зеркальной антенны площадью  $1 \text{ м}^2$  с двумя вибраторами, формирующей две взаимно ортогональные диаграммы направленности. Поскольку применяется автодинный принцип работы, то структура приемника представляется предельно простой. Сигналы с двух

взаимно ортогональных вибраторов антенны (1) поступают непосредственно на смеситель (2) и далее на фильтры низких частот (3). Фильтры низких частот, настроенные каждый на свою частоту  $F_1, F_2$ , пропускают принятые сигналы на фазовые детекторы, где выделяются их огибающие, и далее через аналого-цифровой преобразователь (5) поступают на пороговое устройство (6), где принимается решение о наличии цели или ее отсутствии. С выхода порогового устройства полезный сигнал поступает на микропроцессор, где осуществляется его цифровая обработка, и далее на устройство отображения (7) в виде спектра, как видно на рис. 2, 3.

Как изображено на рис. 2, частота вращения винтов четко проявлялась в виде дискретных линий спектра, а смена винтов модели МБЛА с металлических на пластиковые в целом мало отражалась на их амплитуде.

Дадим энергетическую оценку дальности действия автодинной РЛС в зависимости от диапазона используемых частот.

При мощности излучения передатчика  $P_{\text{пер}}$ , ЭПР цели  $\sigma_{\text{ц}} = 0,1 \text{ м}^2$ , эффективной площади антенны  $S_{\text{пр}} = S_{\text{пер}} = 1 \text{ м}^2$  мощность принятого сигнала  $P_{\text{пр}}$  на дистанции  $R$  для данной рабочей

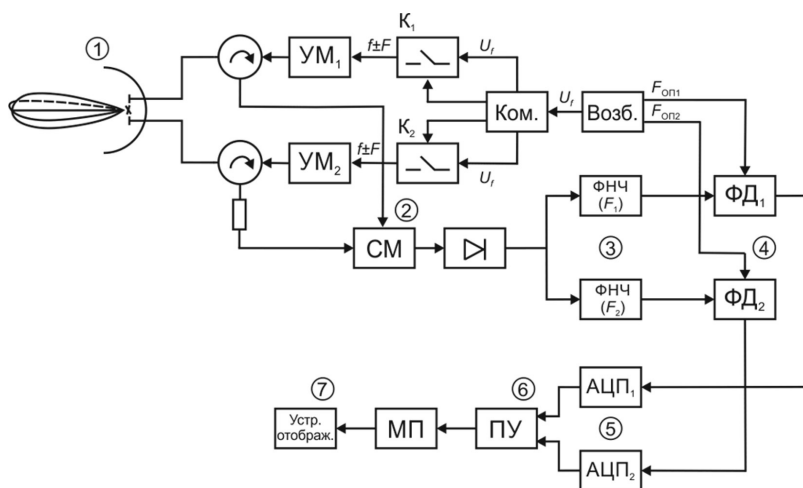


Рис. 1. Структурная схема узкополосной РЛС с квазинепрерывным излучаемым сигналом

Fig. 1. Block diagram of a narrowband radar with a quasi-continuous radiated signal

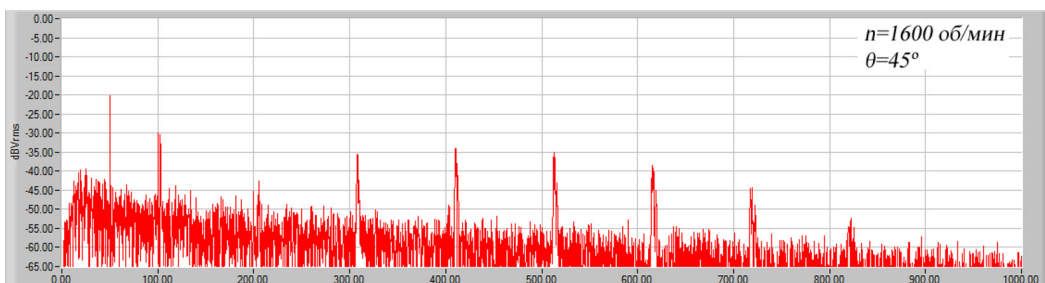


Рис. 2. Спектры принимаемых сигналов с дисплея (материал винта – диэлектрик)

Fig. 2. Spectra of received signals from the display (screw material – dielectric)

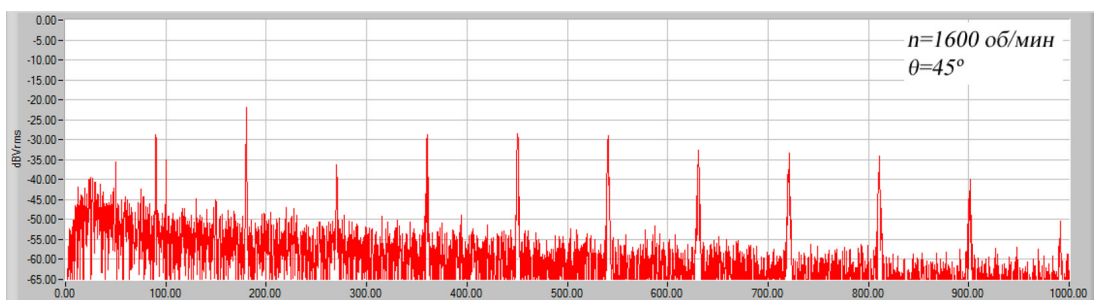


Рис. 3. Спектры принимаемых сигналов с дисплея (материал винта – углепластик)

Fig. 3. Spectra of received signals from the display (the screw material is carbon fiber)

длины волны  $\lambda$  можно оценить через уравнение радиолокации для случая отражения от корпуса МБЛА, которое имеет вид

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G \sigma_{\text{ц}} S_{\text{пр}} \gamma e^{-2kr}}{(4\pi r^2)^2}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пер}}$  – мощность передатчика;  $G = 4\pi \frac{S_{\text{пер}}}{\lambda^2}$  – коэффициент направленности действия передающей антенны;  $\sigma_{\text{ц}}$  – эффективная площадь рассеяния цели;  $S_{\text{пр}}$ ,  $S_{\text{пер}}$  – эффективные площади приемной и передающей антенн соответственно;  $r$  – расстояние до цели;  $k$  – коэффициент поглощения радиоволн в среде распространения.

Коэффициент  $k$  можно принять равным 1, если считать, что волна распространяется в вакууме без потерь и без интерференции.

Таким образом, принимаемая мощность уменьшается пропорционально 4-й степени расстояния.

Для случая использования сигнала, отраженного от винта МБЛА, как элементарного вибратора с длиной  $L$  уравнение радиолокации можно получить через оценку плотности потока мощности волны передатчика в районе цели:

$$\Pi_1 = \frac{P_{\text{пер}}}{4\pi R^2} e^{-2kr} \quad (2)$$

Поскольку  $\Pi_1 = \frac{E^2}{W_c}$  ( $\frac{\text{В}}{\text{м}^2}$ ), где  $W_c = 377 \text{ Ом}$  – волновое сопротивление пространства, то от-

сюда напряженность поля радиоволны в районе винта

$$E_1 = \sqrt{\Pi_1 W_c} \text{ (В/м)}. \quad (3)$$

Тогда напряженность поля, отраженного от винта, составляет  $E_2 = E_1 L$ , а мощность отраженного от винта сигнала

$$P_2 = \frac{(E_1 L)^2}{W_B} = \frac{\Pi_1 W_c}{W_B} L^2 \quad (4)$$

Мощность сигнала на входе приемника такова:

$$P_{2v} = \frac{P_{\text{пер}} G S_{\text{пр}}}{(4\pi r^2)^2} \frac{W_c L^2}{W_v} e^{-2kr} \quad (5)$$

Для оценки  $P_{2v}$  можно воспользоваться также формулой (1) с подстановкой ЭПР винта  $\sigma$  данной в справочнике [8]. Далее можно оценить потери в мощности сигнала через оценку соотношений (1) и (5):

$$\frac{P_{2v}}{P_{\text{пр}}} = \frac{\sigma_v}{\sigma_{\text{ц}}} = \frac{W_c L^2}{W_v G} \quad (6)$$

При  $W_c = 377$  Ом,  $W_v = 75$  Ом,  $\sigma_{\text{ц}} = 0,1$  м<sup>2</sup>,  $L = 0,2$  м получим:

$$\frac{P_{2v}}{P_{\text{пр}}} = \frac{377 * 0,04}{75 * 0,1} = 2. \quad (7)$$

Таким образом, мощность отраженного сигнала от винта в два раза выше, чем от корпуса цели.

Дадим численную оценку минимальной требуемой мощности передатчика в автодинном и импульсном режимах на дальности  $r = 10$  км при  $\lambda = 3 * 10^{-2}$  м,  $S_a = 1$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{ц}} = 0,1$  м<sup>2</sup>. В этом случае

$$G = 4\pi \frac{S_a}{\lambda^2} = 4\pi \frac{1}{9 * 10^{-4}} = 1,4 * 10^4$$

Согласно (1) для автодинного режима без учета потерь в среде

$$P_{\text{пер}} = q \frac{P_{\text{ш}} (4\pi r^2)^2}{G S_{\text{пр}} \sigma_{\text{ц}}} \quad (8)$$

Здесь заданное соотношение сигнал/шум на входе приемника  $q = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = 10$  Мощность шумов

на входе приемника определяется выражением  $P_{\text{ш}} = k T_k^0 \Delta f$ , где  $k = 1,38 * 10^{-23}$  Вт/Гц·град – постоянная Больцмана;  $T_k^0 \approx 300$ °К – относительная температура шума по Кельвину;  $\Delta f = 1$  Гц – полоса пропускания приемника.

После подстановки исходных параметров в выражение (8) получим:

$$P_{\text{пер}} = 10 \frac{16\pi^2 * 10^{12} * P_{\text{ш}}}{1,4 * 10^4 * 1 * 0,1}, \quad P_{\text{ш}} = 1,38 * 10^{-23} * 300 * 1 = 4,2 * 10^{-21} \text{ Вт},$$

$$P_a = \frac{1,6 * 4,2 * 10^{-2}}{1,4 * 10^4} = 4,8 * 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Для импульсного режима при длительности импульса  $\tau = 3 * 10^{-6}$  с и накоплении в при-

емнике пачки из  $h = \frac{T}{28} = \frac{1}{6 * 10^{-6}} = 1,5 * 10^5$  импульсов

$$P_{\text{пер}i} = P_{\text{пер}} \frac{2}{3 * 10^{-6} * 1,5 * 10^5} = \frac{P_1 2}{4,5} * 10 = 4,44 P_1.$$

Как видим, проигрыш по мощности передающего устройства импульсного режима автодинному режиму составляет более чем в 4 раза.

На дистанции  $r = 10$  000 м запаздывание радиосигнала по времени составляет

$t_3 = \frac{2r}{c} = \frac{2 * 10^4}{3 * 10^8} = 0,6 * 10^{-4}$ , т.е период повторения импульсов РЛС должен быть не меньше

$T = 10^{-4}$  с, а длительность импульсов при разрешении по дальности  $\Delta r = 100$  м должна быть

$$\text{не менее чем } \frac{\Delta r}{c} = \frac{100}{3 * 10^8} = 0.3 \text{ мкс.}$$

Оттуда требуемая полоса пропускания приемника должна составлять  $\Delta f_u = \frac{1}{0.3 * 10^{-6}} = 3.3 * 10^6$  Гц.

Следовательно, уровень шума возрастет в 10 раз и проигрыш автономному параметрическому режиму возрастет до 40 раз. При этом длительность импульса передатчика должна быть короткой (300 наносекунд), что сложнее реализовать. В этом случае обнаружение цели по частотам вращения винта потребует в приемнике демодуляции по амплитуде пачки импульсов.

Представленная схема построения РЛС и сравнительная энергетическая оценка непрерывного и импульсного режимов радиолокации показывают явные преимущества первой по обнаружению летательных аппаратов с ЭПР менее 0,1 м<sup>2</sup>.

### Список литературы / References

[1] Ананьев А. В., Рыбалко А., Рязанцев Л., Клевцов Р. Применение разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса по объектам аэродромных участков дорог. *Военная мысль*, 2020. [Ananiev A. V., Rybalko A., Ryazantsev L., Klevtsov R. The use of reconnaissance and strike groups of unmanned aerial vehicles of a small class on the objects of airfield sections of roads. *Military thought*, 2020 (in Russian)]

[2] Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты: способы применения в составе боевых систем (Техника и вооружение). *Военная мысль*, 2012, 3, 21–26. [Kazaryan B. I. Unmanned vehicles: methods of application as part of combat systems (Equipment and weapons). *Military thought*, 2012, 3, 21–26 (in Russian)]

[3] Денисов Б., Жмеренецкий В. Беспилотные летательные аппараты вооруженных сил Великобритании (Военно-воздушные силы). *Зарубежное военное обозрение*, 2018, 11, 56–66. [Denisov B., Zhmerenetsky V. Unmanned aerial vehicles of the armed forces of Great Britain (Air Force). *Foreign military review*, 2018, 11, 56–66 (in Russian)]

[4] Сенченко В. Израильские ударные беспилотные летательные аппараты (Военно-воздушные силы). *Зарубежное военное обозрение*, 2017, 10, 70–71. [Senchenko V. Israeli attack unmanned aerial vehicles (Air Force). *Foreign military review*, 2017, 10, 70–71 (in Russian)]

[5] Методы обнаружения маловысотных, малоскоростных целей на фоне подстилающей поверхности. *Сборник материалов XXXIX НТК ВАВКО*, секция № 8, Тверь, 2009, 256–258. [Methods for detecting low-altitude, low-speed targets against the background of the underlying surface. *Collection of materials of the XXXIX STC VAVKO*, section No. 8, Tver, 2009, pp. 256–258 (in Russian)]

[6] Бузыкин В. Т., Носков В. Я. Автодины. Области применения и перспективы развития. *Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн*. Сборник научных трудов. Харьков, 1991, 38–47. [Buzykin V. T., Noskov V. Ya. Autodynes. Areas of application and development prospects. *Radio engineering systems of millimeter and submillimeter wave ranges*. Collection of scientific papers. Kharkov, 1991, 38–47 (in Russian)]

[7] СФУ RU. Патент 2 622 608 (РФ) от 21.06.17, МПК G 01 S13/52. А. Фомин, Г. Шайдуров, Е. Гарин. Радиолокационный способ обнаружения летательных аппаратов / Заявка 2016127479.

Приоритет 07.07.2016. [SFU RU. Patent 2 622 608 (Russian Federation) dated 06/21/17, IPC G 01 S13/52. A. Fomin, G. Shaidurov, E. Garin. *Radar method for detecting aircraft* / Application 2016127479. Priority 07/07/2016 (in Russian)]

[8] Гершензон Е. М., Туманов Б. Н., Бузыкин В. Т. и др. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах. *Радиотехника и электроника*, 1982, 27(1), 104–112. [Gershenzon E. M., Tumanov B. N., Buzykin V. T. et al. General characteristics and features of the autodyne effect in self-oscillators. *Radio engineering and electronics*, 1982, 27(1), 104–112 (in Russian)]