

**РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

Научная статья

УДК 621.396.933

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179685>

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ  
ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

**Степан Сергеевич Патраков**

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

*Аннотация.* В статье рассматривается процесс информационного радиообмена в авиационном комплексе в условиях сложной помеховой обстановки, когда на вход приемного устройства динамического объекта поступают не только легитимный сигнал, но и сигналы с параметрами, одинаковыми с параметрами полезного сигнала, за исключением параметров, переносящих полезную информацию. Целью исследований, результаты которых представлены в статье, является повышение помехозащищенности радиосистемы передачи данных авиационных комплексов в условиях сложной помеховой обстановки. Обоснован выбор частоты Доплера сигнала в качестве дополнительного признака помехи. Разработана модель информационного обмена в комплексах в условиях помех, учитывающая

Доплеровский сдвиг несущей частоты. Предложен алгоритм обнаружения воздействия помех на динамический объект, основанный на отслеживании частоты Доплера принимаемого сигнала во всех точках траектории полета. Показателем помехозащищенности выбрана вероятность обнаружения помехи.

**Ключевые слова:** динамический объект, радиоуправление, помехи, алгоритм обнаружения помех, частота Доплера

**Для цитирования:** Патраков С.С. Метод оценивания устойчивости радиоуправления динамическим объектом в условиях сложной помеховой обстановки // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179685>

Original article

**RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION  
AND COMMUNICATIONS**

**THE METHOD FOR ASSESSING THE STABILITY OF RADIO  
CONTROL OF DYNAMIC OBJECT IN A COMPLEX INTERFERENCE  
ENVIRONMENT**

**Stepan S. Patrakov**

Military Space Academy named A.F.Mozhaisky, Saint-Petersburg, Russia

[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Abstract.** The article considers the process of information radio exchange in the aviation complex under conditions of a complex interference situation, when the input of the receiving unit receives not only a legitimate signal but the signals with the parameters

adequate to those of a legitimate signal except the parameters carrying valuable information. The purpose of the research, which results are presents in the article, consists in the noise immunity increasing of the data transmission radio system of aviation complexes in a complex interference environment. Selection of the Doppler frequency of the signal as an additional sign of interference is substantiated. The interference detection probability was selected as the noise immunity indicator. The interference detecting condition is defined. The author developed a model of informational exchange in complexes under interference conditions with account for the Doppler shift of the carrier frequency The model is complex and includes an analytical model, on which basis the simulation model was developed. The presented simulation results indicate the possibility for interference detecting with varying degrees of accuracy based on the statistical approach. To implement the proposed approach, the algorithm for the interference impact detecting on the dynamic object is developed, based on tracking the Doppler frequency of the received signal at all points of the flight path. The existing methods of non-cryptographic protection of information transmitted through the radio channel of modern aviation complex from interference ensure a probability of interference detecting not greater than 0,75. To increase the interference detecting probability, the author proposed to evaluate the information exchange stability based on tracking the Doppler frequency of the signal and interference, of which implementation allows achieving a noise immunity index of a least 0,99.

**Keywords:** dynamic object, radio control, interferences, interferences detection algorithm, doppler frequency

**For citation:** Patrakov S.S. The method for assessing the stability of radio control of dynamic object in a complex interference environment. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179685>

## **Введение**

На современном этапе развития сил выявления и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) промышленного и природного происхождения отмечается устойчивый рост насыщенности подразделений авиационными и наземными радиоуправляемыми беспилотными средствами мониторинга обстановки.

С учетом этого обстоятельства, а также того, что производители средств мониторинга обстановки в зоне ЧС зачастую используют одинаковые подходы, одну и ту же базу комплектующих, одинаковые частотные ресурсы (диапазоны) для организации каналов радиоуправления и передачи данных, все более вероятной становится ситуация, при которой различные средства мониторинга, работающие в районе ЧС, начнут создавать друг другу помехи за счет интерференции сигналов, работы в одном частотном диапазоне и т.д.

Это обуславливает тот факт, что в настоящее время при разработке и создании авиационных комплексов (АК) все большее внимание уделяется устойчивости информационного радиообмена (ИО) в условиях сложной помеховой обстановки, когда на вход приемного устройства динамического объекта (ДО) поступают не

только легитимный сигнал, но и сигналы с параметрами, одинаковыми с параметрами полезного сигнала, за исключением параметров, переносящих полезную информацию [1].

Повышение помехозащищенности существующих АК в условиях сложной помеховой обстановки может быть обеспечено за счет применения специальных алгоритмов ИО.

Следовательно, задача разработки алгоритмов ИО в условиях сложной помеховой обстановки на АК, основанных на выявлении дополнительных признаков воздействия помех в принимаемой радиоэлектронной смеси, является актуальной [2].

### **Постановка задачи**

Для устранения выявленного противоречия требуется решить задачу со следующей вербальной постановкой: разработать алгоритм обнаружения помех на АК, использование которого, с учетом заданных параметров АК, условий сложной помеховой обстановки ИО АК и накладываемых ограничений, позволит обеспечить требуемый уровень помехозащищенности АК.

Обнаружение помех должно быть основано на выявлении дополнительных признаков в принимаемой радиоэлектронной смеси. Для ДО предлагается в качестве такого параметра использовать доплеровский сдвиг несущей частоты. Выбор обосновывается тем, что характер изменения доплеровского сдвига напрямую связан с траекторией движения ДО и случайным характером влияния на траекторию

движения силы и направления ветра, что вносит дополнительные неопределенности для имитации доплеровского сдвига частоты сигнала.

Как известно, в радиоприемном устройстве при обнаружении сигнала для каждого возможного значения сигнального параметра  $f$  по принятой реализации  $u(t)$  вычисляется отношение правдоподобия [3]:

$$\Lambda_{s(i)}(u(t)/f) = \frac{W[u(t)]_{s(i)+N}}{W[u(t)]_N} = \frac{W[u(t)/f]}{W[u(t)]_N}, \quad (1)$$

где  $W[u(t)]$  – плотность вероятности, позволяющая определить вероятность получения конкретной реализации  $u(t)$ ;

$W[u(t)/f]$  – функция правдоподобия сигнального параметра  $f$ .

Отношения правдоподобия как для сигнала, так и для помехи будут равны ввиду энергетических свойств помехи:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_s(u(t)/f) &= e^{\left[ \frac{2}{N_0} \int_0^{T_H} u(t) \cdot s(t) dt - \frac{\mathcal{E}_s}{N_0} \right]} \\ \Lambda_i(u(t)/f) &= e^{\left[ \frac{2}{N_0} \int_0^{T_H} u(t) \cdot i(t) dt - \frac{\mathcal{E}_i}{N_0} \right]} \end{aligned} \right\}, \text{ т.к. } \mathcal{E}_s = \mathcal{E}_i \Rightarrow \begin{cases} \Lambda_s(u(t)/f) = \Lambda_i(u(t)/f), \\ \Lambda_{0s} = \Lambda_{0i} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\frac{\mathcal{E}_s}{N_0}$  – отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума,

$T_H$  – время приема сигнала (помехи),

$\Lambda_0$  – порог отношения правдоподобия.

Далее в радиоприемном устройстве вычисляется послеопытное распределение параметра  $f$  обнаруженного сигнала (помехи):

$$W[f/u(t)] = \frac{W(f) \cdot W[u(t)/f]}{W[u(t)]}, \quad (3)$$

где  $W[f]$  – априорная плотность вероятности сигнального параметра.

После чего сразу определяется то значение параметра  $f$ , которому соответствует максимум послеопытного распределения параметра  $f$  обнаруженного сигнала (помехи)  $W_{\max}[f/u(t)]$ .

Найдем из выражения (1)  $W[u(t)/f]$  и подставим в (3):

$$W[f/u(t)] = \frac{W[u(t)]_N}{W[u(t)]} \cdot \Lambda[u(t)/f] \cdot W(f). \quad (4)$$

Как следует из выражения (4), для обнаружения помехи необходимо выбрать такой измеряемый параметр  $f$ , апостериорная плотность вероятности которого отвечала бы условию:

$$W_{\max}[f/s(t)] \neq W_{\max}[f/i(t)]. \quad (5)$$

Таким образом частоты Доплера легитимного сигнала и помехи будут между собой отличаться, что и является дополнительным признаком помехи. При этом следует отметить, что максимум послеопытного распределения должен вычисляться путем поиска такой частоты Доплера  $f_d$ , которая соответствует максимуму функции  $W(f_d)$ . Формализуем поставленную задачу.

Дано:

сигнал на входе ПРМ:  $s(t) = A(t) \cdot \cos \left[ 2\pi \left( f_n \pm \Delta f_n(t) + \underline{f_d^s(t)} \right) t + \varphi_0 \right],$

помеха на входе ПРМ:  $i(t) = A(t) \cdot \cos \left[ 2\pi \left( f_n \pm \Delta f_n(t) + \underline{f_d^i(t)} \right) t + \varphi_0 \right],$

где  $A(t) = A_0 \cdot \exp \left[ -\pi \left( \frac{t - \frac{\tau_u}{2}}{\tau_u} \right)^2 \right]$  – амплитуда сигнала (помехи);

$f_n$  – несущая частота (НЧ) сигнала (помехи);

$\Delta f_n(t)$  – частота девиации сигнала (помехи);

$f_d^s(t)$  – доплеровский сдвиг НЧ сигнала;

$f_d^i(t)$  – доплеровский сдвиг НЧ помехи;

$\varphi_0$  – фазовая постоянная;

$\tau_u$  – длительность импульса.

Ограничения  $\Delta$ :

– требования к временной синхронизации приемо-передающей аппаратуры выполнены (в радиоприемнике определение границ следования символов осуществляется с требуемой точностью):  $\gamma_\tau \rightarrow \min.$



Для оценивания помехозащищенности АК от помехи предлагается использовать такой показатель, как вероятность обнаружения помехи на основе отслеживания частоты Доплера  $f_d$  в каждой точке траектории полета:

$$D_f = F(W(f_d), \{V_f\}, \{M_f\}),$$

где  $W(f_d)$  – априорная плотность распределения вероятности частоты Доплера;

$\{V_f\}$  – множество параметров АК;

$\{M_f\}$  – множество моделей информационного обмена АК.

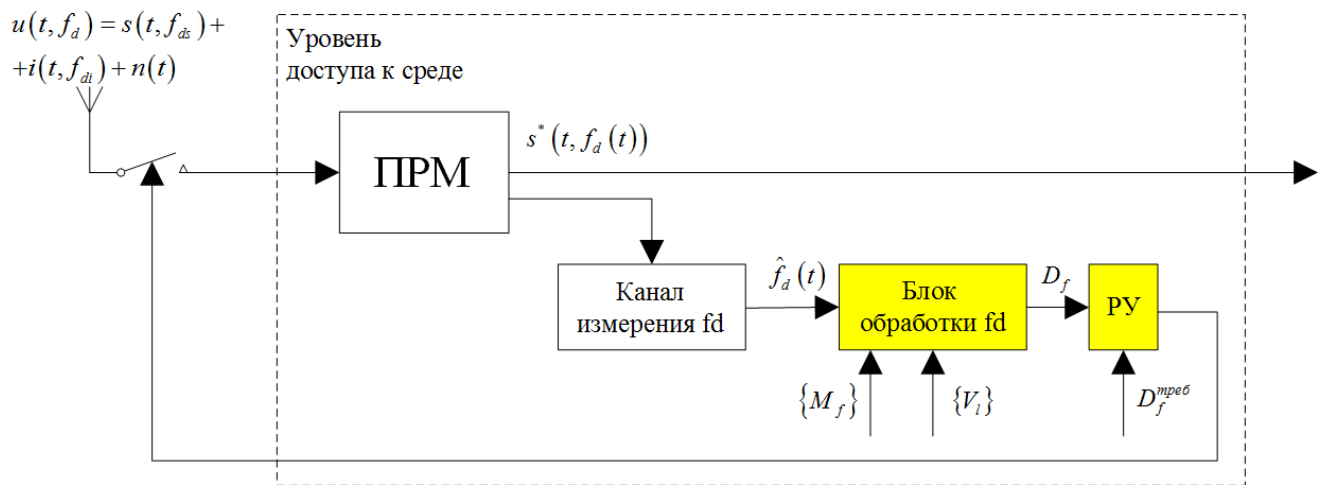


Рис. 1. Пояснения к постановке задачи

Найти:

$$V_f^* = \operatorname{argmax}_{V_f \in \{V_f\}} D_f, \quad D_f \geq D_f^{\text{треб}}.$$

## Схема метода

Информационный радиообмен в АК в условиях сложной помеховой обстановки представляет собой сложный динамический процесс. Он состоит как из линейных подпроцессов, которые целесообразно моделировать аналитически, так и из подпроцессов, характеризующихся нелинейностью и неопределенностью поведения, большим количеством переменных, неочевидными зависимостями между переменными, для которых аналитическое решение крайне сложно найти, а иногда оно и вовсе отсутствует. Поэтому для анализа таких подпроцессов можно использовать другую технологию – имитационное моделирование [4, 5].

В ходе исследований была разработана аналитическая модель ИО в АК в сложных условиях помеховой обстановки, представляющая собой следующую систему уравнений:

1) исходные данные:  $f_n, \beta, \theta, U, \varepsilon, V_0, q, a, H_0$ .

$$2) \quad V = V_0 + q \cdot t ,$$

$$V_x = V \cdot \cos(\beta) ,$$

$$V_y = V \cdot \sin(\beta) ,$$

$$W_x = \sqrt{V_x^2 - U^2 \sin^2 \varepsilon} + U \cdot \cos \varepsilon ,$$

$$W_y^2 = V_y^2 ,$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} ,$$

$$H = S_y = H_0 + \left( V_0 + \frac{q \cdot t}{2} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot t,$$

$$S_x = a + \left[ \sqrt{\left( V_0 + \frac{q \cdot t}{2} \right)^2 \cdot \cos(\beta) - U^2 \sin^2 \varepsilon + U \cdot \cos \varepsilon} \right] \cdot t,$$

$$L = \sqrt{r^2 + S_x^2},$$

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{r}{S_x},$$

$$\alpha(t) = \frac{W_x \cdot t}{r},$$

$$S_x(S_0, O) = \sqrt{L^2 + r^2 + 2 \cdot r \cdot L \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)},$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left( \frac{S_y}{S_x(S_0, O)} \right),$$

$$W_R = \frac{W \cdot \cos \theta}{\cos(\gamma - \beta)},$$

$$f_d = -(f_u / c) \cdot W_R,$$

где  $V_0$  – начальная скорость ДО;

$U$  – скорость ветра;

$q$  – ускорение;

$\beta$  – угол взлета (снижения) ЛА;

$\theta$  – угол между проекциями на земную плоскость вектора  $\vec{W}$  путевой скорости и вектора  $\vec{r}$  радиолуча принимаемого колебания;

$\gamma$  – угол наклона радиолуча к поверхности земли;

$\alpha$  – угол сноса (УС) – угол, заключенный между направлениями вектора истинной  $\vec{V}$  и путевой  $\vec{W}$  скоростей;

$\varepsilon$  – угол ветра (УВ) – угол, заключенный между направлениями вектора путевой скорости  $\vec{W}$  и вектора скорости ветра  $\vec{U}$ ;

$S$  – дальность от пункта управления до ДО;

$H_0$  – высота старта ДО относительно уровня моря;

$H$  – высота полета ДО;

$a$  – расстояние от пункта управления до точки старта.

На рисунке 2 представлены пояснения к аналитической модели.

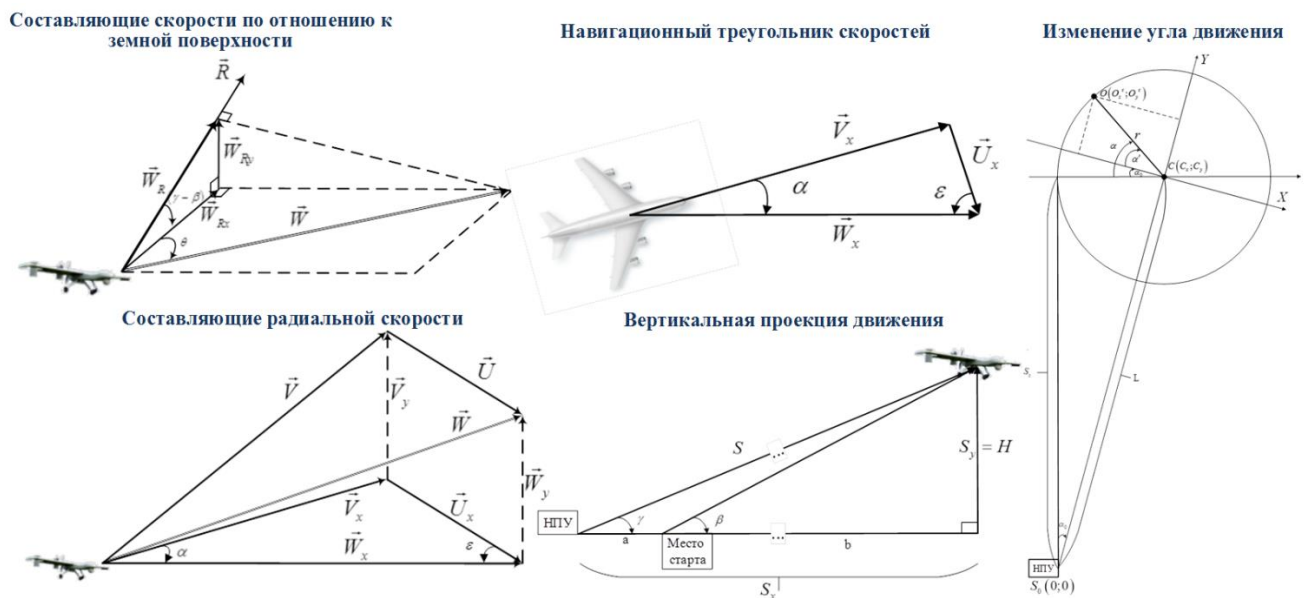


Рис. 2. Пояснения к аналитической модели

На основе аналитической модели в программной среде AnyLogic была разработана имитационная модель ИО АК в условиях сложной помеховой обстановки. Разработанная имитационно-аналитическая модель отличается от существующих тем, что в ней учитывается Доплеровский сдвиг несущей частоты сигнала в целях обнаружения помехи.

### Результаты моделирования

В результате имитационного моделирования были получены законы изменения частоты Доплера как для легитимного сигнала, так и для помехи (рисунок 3).

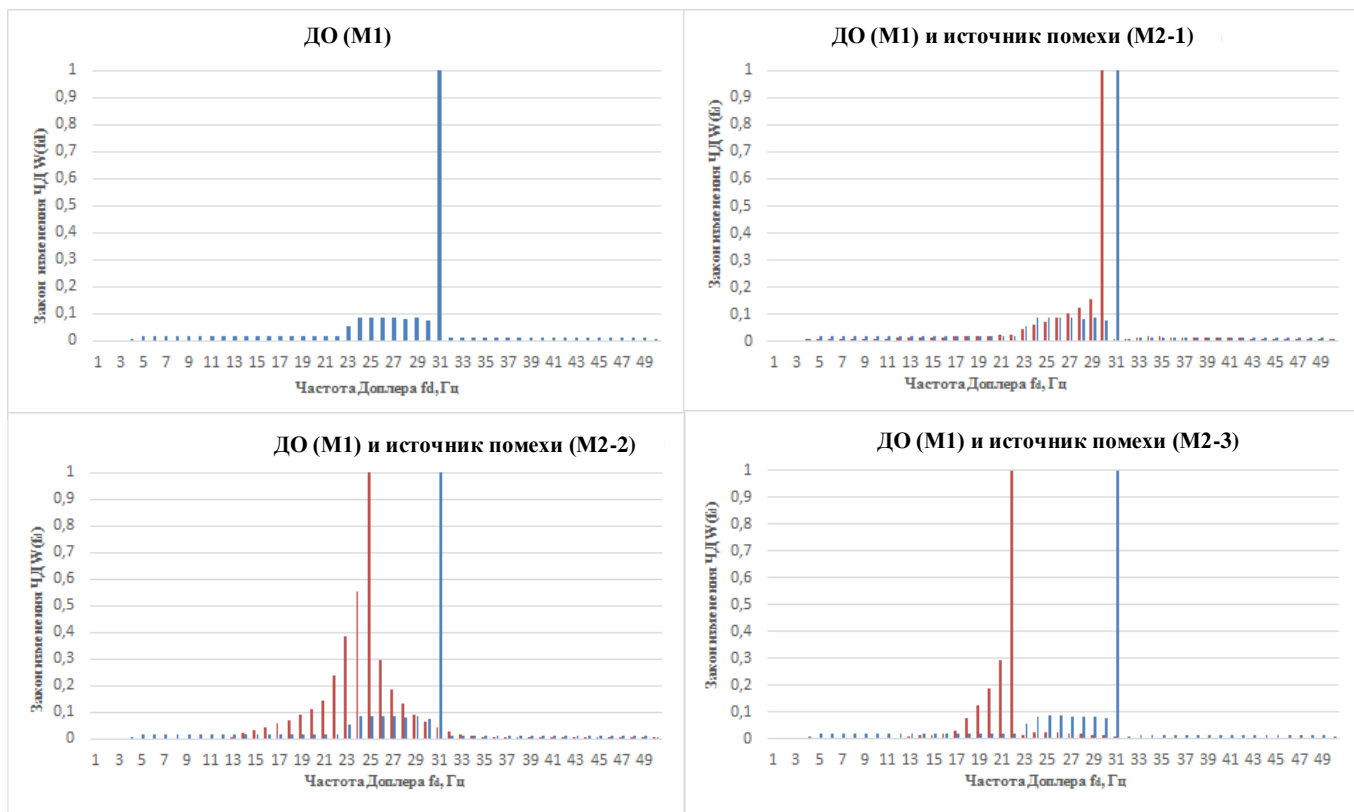


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

Представленные результаты имитационного моделирования свидетельствуют о том, что на основе статистического подхода возможно обнаружить помеху с различной степенью точности.

Помехозащищенность АК от помехи будет оцениваться вероятностью обнаружения помехи на основе отслеживания частоты Доплера  $f_d$ :

$$D_f = 1 - P_2(1 - P_1), \quad (6)$$

где 
$$P_1 = \frac{P_1^*}{P_1^* + P_2^*}, P_1^* = \prod_{l=1}^n P_{1l}(f_{dl}/M_1), P_2 = \frac{P_2^*}{P_2^* + P_1^*}, P_2^* = \prod_{l=1}^n P_{2l}(f_{dl}/M_2).$$

В применяемых радиоприемных устройствах современных АК закон распределения частоты Доплера принимается равномерным. Помехозащищенность АК, оцениваемая вероятностью обнаружения помехи на основе отслеживания частоты Доплера  $f_d$  в таком случае будет равна 0,75:

$$P_1 = P_2 = 1/2 \Rightarrow D_f = 1 - P_2(1 - P_1) = 1 - 1/2 + 1/4 = 3/4.$$

Этого недостаточно для устойчивого ИО в АК.

В целях апробации разработанной имитационно-аналитической модели были сгенерированы реализации частоты Доплера для АК с конкретными характеристиками. В таблице 1 и на рисунке 4 представлены результаты моделирования, свидетельствующие о том, что предлагаемый способ защиты от помехи на основе отслеживания Доплеровского сдвига частоты позволяет повысить вероятность обнаружения помехи до уровня не ниже 0,99.

*Таблица 1*

Результаты моделирования для трех различных реализаций помехи

	1 эксперимент: M1, M2-1	2 эксперимент: M1, M2-2	3 эксперимент: M1, M2-3
$P_1$	0,91	0,93	0,97
$P_2$	0,09	0,07	0,03
$D_f$	0,992	0,995	0,999

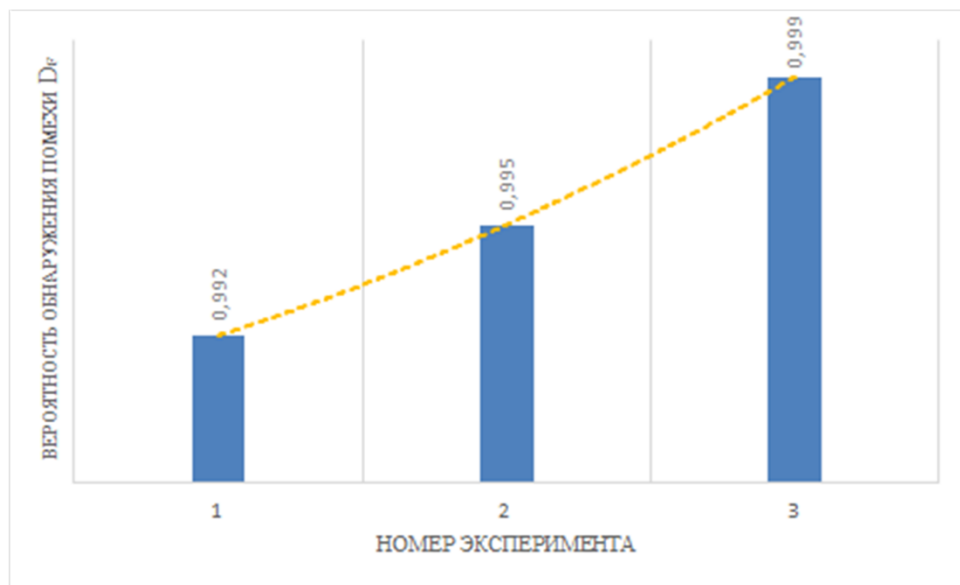


Рис. 4. Вероятность обнаружения помехи на основе отслеживания частоты  
Доплера сигнала

Для реализации предложенного подхода был разработан алгоритм обнаружения помехи на основе отслеживания частоты Доплера сигнала (рисунок 5).

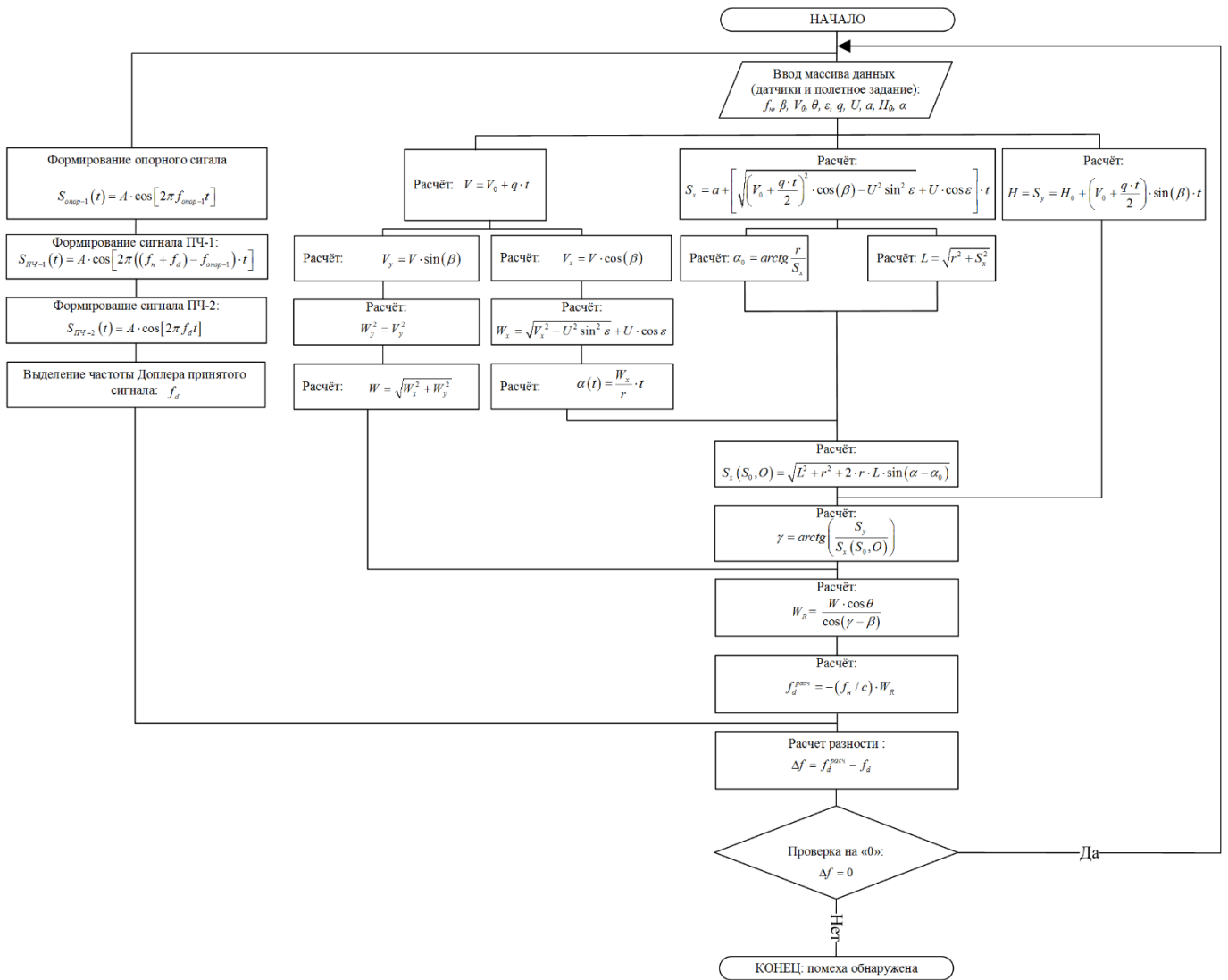


Рис. 5. Параллельная граф-схема алгоритма обнаружения помехи на основе отслеживания доплеровского сдвига несущей частоты

Реализуя предлагаемый алгоритм, радиоприемник ДО обнаруживает сигнал, измеряет частоту Доплера (ЧД), сравнивает её с опорной ЧД, сформированной по разработанной модели, отображенной на рисунке 2, и принимает решение о наличии в принятой радиоэлектронной смеси легитимного сигнала или помехи с вероятностью  $D_f \geq 0,99$ .



## Практические рекомендации по повышению устойчивости управления

Для оценивания возможности технической реализации предлагаемого метода оценивания устойчивости ИО необходимо определить потенциальную точность измерения параметра ЧД. Ведь именно потенциальная точность измерения ЧД и будет определять разрешающую способность сигнала и помехи с заявленной выше вероятностью.

Потенциальная точность измерения частоты узкополосного сигнала определяется показателем дисперсии максимально правдоподобной оценки частоты Доплера:

$$\sigma^2 \left[ \hat{f}_d / f_d \right] = \frac{1}{\frac{2\mathcal{E}_{s(i)}}{N_0} \cdot \frac{\int_0^{T_c} t^2 \cdot A^2(t) dt}{\int_0^{T_c} B^2(t) dt}},$$

где  $B(t)$  – огибающая узкополосного сигнала,

$T_c$  – длительность сигнала,

$\hat{f}_d$  – оценка ЧД,

$f_d$  – истинное значение ЧД,

$\mathcal{E}_{s(i)} / N_0$  – отношение сигнал/шум.

Очевидно, что при длительности сигнала единицы-десятки микросекунд вероятность невообразимо велика. Это объясняется тем, что для измерения ЧД

предлагается использовать сигнал, не предназначенный для этого, так как он не обладает требуемыми свойствами. Поэтому для реализации предлагаемого подхода необходимо накапливать сигнал. В схему обнаружителя помехи необходимо включить модуль накопления сигнала. Схема такого обнаружителя помехи представлена на рисунке 6.

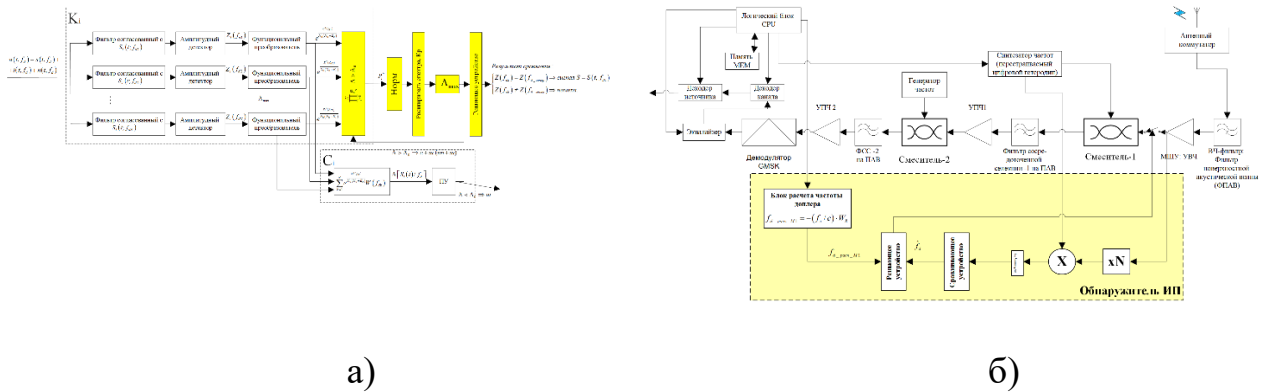
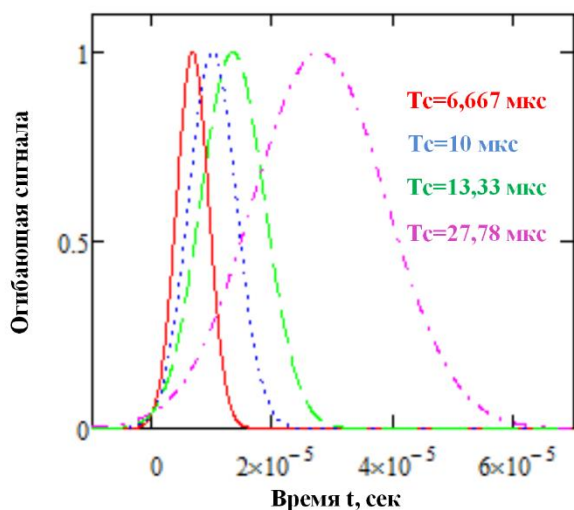
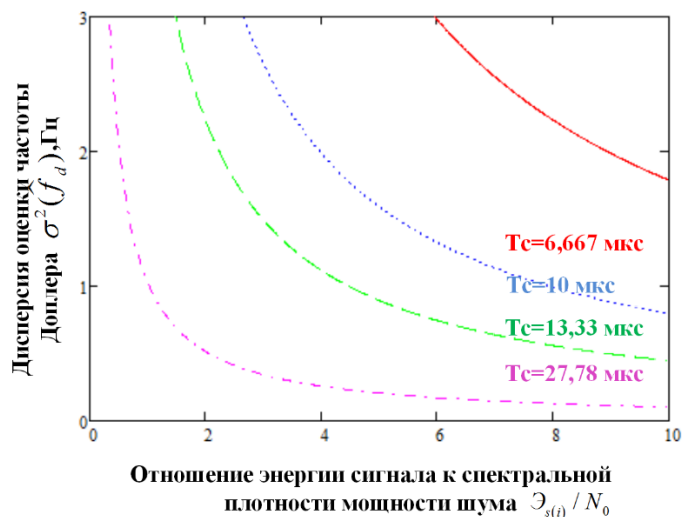


Рис. 6. Схема структурная (а) и принципиальная (б) обнаружителя помехи

На рисунке 7 представлены огибающие GMSK-сигнала четырех различных длительностей импульса и зависимости дисперсий оценки ЧД соответствующих сигналов от отношения мощности сигнала к мощности шума на входе приемника.



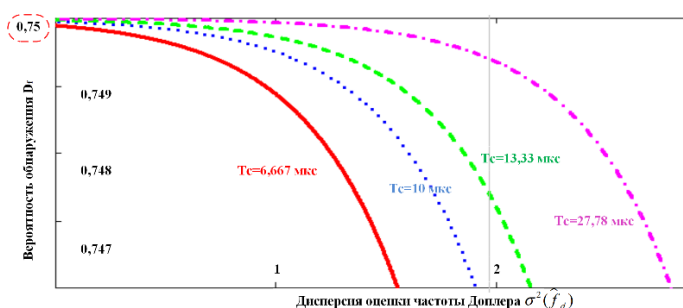
а)



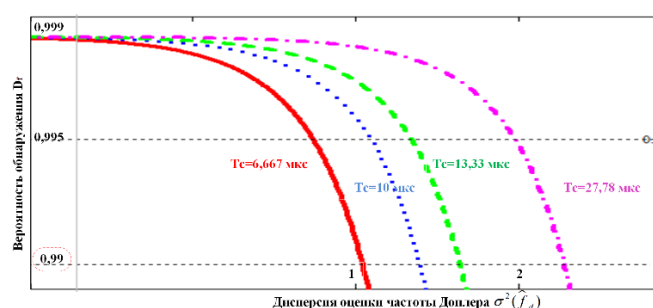
б)

Рис. 7. Огибающие GMSK-сигнала различной длительности (а) и зависимость дисперсии оценки ЧД от отношения  $E_s/N_0$  (б)

На рисунке 8 графически представлены зависимости вероятности обнаружения помехи на основе отслеживания ЧД от дисперсии оценки ЧД для существующих и для предлагаемого подходов. Как видно, предлагаемый подход обеспечивает вероятность обнаружения не ниже 0.99. В целях сравнения моделирование проводилось для сигналов одинаковой формы, но различной длительности.



а)



б)

Рис. 8. Зависимость вероятности обнаружения помехи от дисперсии оценки частоты Доплера при существующем подходе (а) и предлагаемом подходе (б)

Предлагаемый подход позволяет повысить вероятность обнаружения помехи на 25 %. Представлены практические рекомендации по технической реализации предложенного алгоритма. Полученные результаты целесообразно применять при проектировании устройств защиты информации, циркулирующей в радиосистемах передачи данных ДО различного назначения.

### **Заключение**

Существующие методы некриптографической защиты информации, передаваемой в радиоканале современных АК, от помех обеспечивают вероятность обнаружения помехи не выше 0,75. Для повышения вероятности обнаружения помехи в работе предложен метод оценивания устойчивости ИО на основе отслеживания частоты Доплера сигнала и помехи, реализация которого позволила достичь показателя помехозащищенности не ниже 0,99. Представлены практические рекомендации по реализации предлагаемого метода оценивания устойчивости ИО в АК в условиях сложной помеховой обстановки.

### **Список источников**

1. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101-175.
2. Бянкин А.А., Патраков С.С. Определение качества информационного обмена в комплексе с беспилотными летательными аппаратами // 73 Всероссийская научно-

техническая конференция, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2018): сборник трудов. - Санкт-Петербург: ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. С. 186-187.

3. Веретягин А.А. Теория обработки сигналов и автоматического управления в РЭС. – Спб.: МО РФ, 1992. – 718 с.

4. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем: учеб. пособие. – Норильск: НИИ, 2015. – 135 с.

5. Гусейнов Г.А., Зульфугарлы П.Р., Абдурахманова И.Г. О точности прямого геореференцирования беспилотного летательного аппарата в зонах с различными климатическими условиями // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169012>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-26)

6. Ананьев А.В., Иванников К.С., Филатов С.В. Основные принципы построения систем связи на базе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168188>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-16)

7. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Программный комплекс алгоритмов автономного определения параметров угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167100>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-17)

8. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Сравнительный анализ схем комплексирования информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)

9. Yan Chen, Dan Li, Yanhai Li, Xiaoyuan Ma. Use Moving Average Filter to Reduce Noises in Wearable PPG During Continuous Monitoring // EAI International Conference on Wearables in Healthcare, Budapest, Hungary, vol. eHealth 2016, LNICST 181, pp. 193–203. DOI: [10.1007/978-3-319-49655-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49655-9_26)
10. Патраков С.С., Лоскутов А.И., Шестопалова О.Л. Разработка интеллектуальной системы управления испытаниями // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 18-24.
11. Zheng Le, Lops Marco et al. Radar and Communication Co-existence: an Overview. URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.08676.pdf>.
12. Yao Y., Wu L. Cognitive Waveform Design for Radar-Communication Transceiver Networks // Journal of advanced transportation, 2018. DOI: [10.1155/2018/4182927](https://doi.org/10.1155/2018/4182927)
13. Liu F., Zhou L., Li Masouros et al. Toward Dual-functional Radar-Communication Systems: Optimal Waveform Design // IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, vol. 66 (16), pp. 4264-4279. DOI: [10.1109/TSP.2018.2847648](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2847648)
14. Dou Z., Zhong X., Zhang W. Radar-Communication Integration Based on MSK-LFM Spread Spectrum Signal // International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2017, vol. 10, pp. 108-117. DOI: [10.4236/ijcns.2017.108B012](https://doi.org/10.4236/ijcns.2017.108B012)
15. Патраков С.С., Лоскутов А.И., Фомин А.В. Модель интеллектуальной системы управления испытаниями объектов ракетно-космической техники // VIII Молодежная научно-техническая конференция «Инновационный арсенал молодежи» в АО «КБ Арсенал». сборник тезисов докладов. - Санкт-Петербург, БГТУ Военмех им. Д.Ф. Устинова, 2017. С. 144-153.

16. Алиева А.Д., Гусейнова М.В., Гумбатов Д.А. Вопросы ослабления междронного электромагнитного воздействия противоборствующих сторон // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177667>.
17. Патраков С.С., Золотарев Е.Р., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости стандарта DVB-T2 на основе технологии программного приема // VIII Молодежная научно-техническая конференция «Инновационный арсенал молодежи» в АО «КБ Арсенал»: сборник тезисов докладов. - Санкт-Петербург: БГТУ Военмех им. Д.Ф. Устинова, 2018. – С. 181-182.
18. Perez D., Maza I., Caballero D., Scarlatti D., Casado E., Ollero A. A ground control station for a multi-UAV surveillance system // Journal of intelligent robotic systems, 2013, vol. 69 (1), pp. 119-130. DOI: [10.1007/s10846-012-9759-5](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9759-5)
19. Perera A.G., Al-Naji A., Law Y.W., Chahl J. Human detection and motion analysis from a quadrotor UAV // IOP conference series: materials science and engineering, 2018, vol. 405 (1). DOI: [10.1145/1322263.1322275](https://doi.org/10.1145/1322263.1322275)
20. Пушкарев О. Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии // Электронные компоненты. 2012. № 2. С. 42-48.

## References

1. Makarenko S.I. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 2. pp. 101-175.
2. Byankin A.A., Patrakov S.S. *73 Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennoi Dnyu radio: sbornik trudov*. Saint-Peterburg, LETI im. V.I. Ul'yanova (Lenina), 2018, pp. 186-187.

3. Veretyagin A.A. *Teoriya obrabotki signalov i avtomaticheskogo upravleniya v RES* (The theory of signal processing and automatic control in radioelectronic systems), Saint Petersburg, MO RF, 1992, 718 p.
4. Kupriyashkin A.G. *Osnovy modelirovaniya system* (Systems modeling basics), Noril'sk, NII, 2015, 135 p.
5. Guseinov G.A., Zul'fugarly P.R., Abdurakhmanova I.G. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169012>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-26)
6. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S., Filatov S.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168188>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-16)
7. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167100>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-17)
8. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)
9. Yan Chen, Dan Li, Yanhai Li, Xiaoyuan Ma. Use Moving Average Filter to Reduce Noises in Wearable PPG During Continuous Monitoring, *EAI International Conference on Wearables in Healthcare*, Budapest, Hungary, vol. eHealth 2016, LNICST 181, pp. 193–203. DOI: [10.1007/978-3-319-49655-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49655-9_26)
10. Patrakov S.S., Loskutov A.I., Shestopalova O.L. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemym*, 2014, no. 2 (69), pp. 18-24.
11. Zheng Le, Lops Marco et al. *Radar and Communication Co-existence: an Overview*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.08676.pdf>
12. Yao Y., Wu L. Cognitive Waveform Design for Radar-Communication Transceiver Networks, *Journal of advanced transportation*, 2018. DOI: [10.1155/2018/4182927](https://doi.org/10.1155/2018/4182927)



13. Liu F., Zhou L., Li Masouros et al. Toward Dual-functional Radar-Communication Systems: Optimal Waveform Design, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, vol. 66 (16), pp. 4264-4279. DOI: [10.1109/TSP.2018.2847648](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2847648)
14. Dou Z., Zhong X., Zhang W. Radar-Communication Integration Based on MSK-LFM Spread Spectrum Signal, *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2017, vol. 10, pp. 108-117. DOI: [10.4236/ijcns.2017.108B012](https://doi.org/10.4236/ijcns.2017.108B012)
15. Patrakov S.S., Loskutov A.I., Fomin A.V. VIII Molodezhnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Innovatsionnyi arsenal molodezhi» v AO «KB Arsenal». sbornik tezisov dokladov. Saint-Petersburg, BGTU Voenmekh im. D.F. Ustinova, 2017, pp. 144-153.
16. Alieva A.D., Guseinova M.V., Gumbatov D.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177667>
17. Patrakov S.S., Zolotarev E.R., Fomin A.V. VIII Molodezhnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Innovatsionnyi arsenal molodezhi» v AO «KB Arsenal»: sbornik tezisov dokladov. Saint-Petersburg, BGTU Voenmekh im. D.F. Ustinova, 2018, pp. 181-182.
18. Perez D., Maza I., Caballero D., Scarlatti D., Casado E., Ollero A. A ground control station for a multi-UAV surveillance system, *Journal of intelligent robotic systems*, 2013, vol. 69 (1), pp. 119-130. DOI: [10.1007/s10846-012-9759-5](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9759-5)
19. Perera A.G., Al-Naji A., Law Y.W., Chahl J. Human detection and motion analysis from a quadrotor UAV, *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 405 (1). DOI: [10.1088/1757-899X/405/1/012003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/405/1/012003)
20. Pushkarev O. *Elektronnye komponenty*, 2012, no. 2, pp. 42-48.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024

Одобрена после рецензирования 24.01.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 17.01.2024; approved after reviewing on 24.01.2024; accepted for publication on 26.04.2024