

УДК 621.391:621.396.96
doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Обнаружение когерентно-импульсных многочастотных сигналов

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

adop@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается обнаружение когерентно-импульсных многочастотных эхо-сигналов на фоне некоррелированных (собственных) шумов приемника. Целью работы является синтез и анализ алгоритмов обнаружения квазидетерминированных и совместные флюктуирующих многочастотных сигналов. *Материалы и методы.* Исследование проводится на основе статистических методов – вычисления отношения правдоподобия и анализа характеристик обнаружения для приведенных моделей многочастотного сигнала. *Результаты.* Получены алгоритмы обнаружения при различном характере межпериодной обработки (когерентной или некогерентной) в частотных каналах. При когерентной межпериодной обработке отдельных компонент многочастотного сигнала обнаружение радиолокационной цели, движущейся с неизвестной скоростью, осуществляется отдельно в каждом частотном канале. При некогерентной межпериодной обработке компонент многочастотного сигнала обнаружение осуществляется по результатам линейного суммирования выходных величин частотных каналов. *Выводы.* На основе анализа характеристик обнаружения синтезированных алгоритмов установлено оптимальное число частотных каналов, при котором обеспечиваются выигрыши в пороговом сигнале по сравнению с использованием одного частотного канала.

Ключевые слова: алгоритм обработки, анализ, многочастотный сигнал, обнаружение, отношение правдоподобия, пороговое отношение сигнал/шум, синтез, характеристики обнаружения

Для цитирования: Попов Д. И. Обнаружение когерентно-импульсных многочастотных сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 101–109. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Detection of coherent-pulse multi-frequency signals

D.I. Popov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

adop@mail.ru

Abstract. *Background.* The detection of coherent-pulse multi-frequency radar signals against the background of the receiver's own noise is considered. The purpose of this research is to synthesize and analyze algorithms for detecting quasi-deterministic and jointly fluctuating multi-frequency signals. *Materials and methods.* The study is carried out on the basis of statistical methods – calculating the likelihood ratio and analyzing the detection characteristics for the given models of multi-frequency signal. *Results.* Detection algorithms are obtained for different types of interperiod processing (coherent or incoherent) in frequency channels. In the case of coherent interperiodic processing of individual components of a multi-frequency signal, the detection of a target with an unknown Doppler speed is carried out separately in each frequency channel. In the case of incoherent interperiod

processing, detection is performed based on the results of linear summation of the output values of the frequency channels. *Conclusions.* Based on the analysis of the detection characteristics of the synthesized algorithms, the optimal number of frequency channels is established, at which gains in the signal-to-noise threshold ratio are achieved in comparison with the use of a single-frequency signal.

Keywords: processing algorithm, analysis, multi-frequency signal, detection, likelihood ratio, threshold signal-to-noise ratio, synthesis, detection characteristics

For citation: Popov D.I. Detection of coherent-pulse multi-frequency signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):101–109. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Введение

Для защиты радиолокационных систем от разнообразных помех широкое распространение получили современные способы цифровой обработки отраженных от целей сигналов [1–5], а также когерентно-импульсные многочастотные сигналы, которые используются не только в радиолокации, но и в смежных областях науки и техники [6–13].

В книге [6] рассматривается обработка при условии одиночных импульсов в частотных каналах, а многочастотный сигнал считается «эквивалентным пачке отраженных сигналов с независимыми от импульса к импульсу случайными амплитудами», что приводит к известной обработке в виде квадратичного суммирования импульсов частотных каналов. При этом какое-либо описание многочастотных сигналов фактически отсутствует, обработка в каналах отсутствует, задача анализа сведена к известной, а одиночных импульсов в радиолокации не бывает. Такой подход не описывает полностью многочастотный сигнал и его обработку, так как реально в обзорных радиолокаторах в каждый частотный канал поступает пачка импульсов.

В предлагаемой статье используется в данном контексте другой подход:

- когерентно-импульсный пачечный сигнал в частотных каналах;
- статистическое описание многочастотных сигналов;
- алгоритмы обработки в частотных каналах и выбор алгоритма объединения каналов в зависимости от типа межпериодной обработки (когерентной или некогерентной) в частотных каналах;
- способ раздельного в каналах вынесения решения об обнаружении сигнала;
- адекватный поставленной задаче метод анализа;
- подтверждение оправданности и целесообразности раздельного обнаружения в каналах, приводящего к выигрышам в пороговом отношении сигнал/шум и, как следствие этого, к уменьшению мощности передатчика;
- существенные выигрыши в эффективности по отношению к известным в литературе результатам.

Предлагаемые алгоритмы и их анализ представляют собой развитие статистической теории межпериодной обработки когерентно-импульсных многочастотных радиолокационных сигналов.

Квазидетермированный сигнал

Сигнал в виде когерентной пачки N радиоимпульсов, отраженных от движущейся цели и следующих через период повторения T , в каждом из M

частотных каналов описывается квазидетерминированной (детерминированной со случайной начальной фазой) последовательностью цифровых отсчетов комплексных огибающих $S_j^{(l)} = s_l \exp\{i(j\varphi_l + \varphi_{0l})\}$, где $\varphi_l = \Omega_{Дл}T$ – доплеровский сдвиг фазы в l -м частотном канале за период повторения T ; φ_{0l} – начальная фаза; $j = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, M}$. Отсчеты сигнала и их аддитивная смесь с внутренним шумом приемника образуют совокупности вектор-столбцов соответственно $\mathbf{S}_l = \{S_j^{(l)}\}^T$ и $\mathbf{U}_l = \{U_j^{(l)}\}^T$. При отсутствии сигнала совокупность $\{\mathbf{U}_l\} = \{\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M\}$ соответствует некоррелированным шумовым отсчетам и описывается гауссовской плотностью вероятности $P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l\})$ с одинаковой для всех частотных каналов дисперсией $\sigma_{\text{ш}l}^2 = \overline{U_j^{(l)}U_j^{(l)*}} / 2 = \sigma_{\text{ш}}^2$. Наличие сигнала смещает распределение шума, т.е. $P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\}) = P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l\})$. Тогда

$$P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M P_{\text{сш}}(\mathbf{U}_l) = \frac{1}{(2\pi\sigma_{\text{ш}}^2)^{MN}} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_{\text{ш}}^2} \sum_{l=1}^M (\mathbf{U}_l^{\text{T}*} - \mathbf{S}_l^{\text{T}*})(\mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l)\right\}.$$

Алгоритм оптимального обнаружения многочастотного сигнала найдем, вычислив условное отношение правдоподобия:

$$\Lambda(\{\mathbf{U}_l\} / \{\varphi_{0l}\}) = \frac{P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\})}{P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l\})} = \prod_{l=1}^M \Lambda(\mathbf{U}_l / \varphi_{0l}), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{U}_l / \varphi_{0l}) &= \exp\left\{\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} (\mathbf{U}_l^{\text{T}*} \mathbf{S}_l + \mathbf{S}_l^{\text{T}*} \mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l^{\text{T}*} \mathbf{S}_l)\right\} = \\ &= \exp\left\{\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} \sum_{j=1}^N s_l e^{i(j\varphi_l + \varphi_{0l})} U_j^{(l)*} + s_l e^{-i(j\varphi_l + \varphi_{0l})} U_j^{(l)} - s_l^2\right\}. \end{aligned}$$

Начальная фаза φ_{0l} является случайной величиной с равномерным законом распределения $P(\varphi_{0l}) = 1/2\pi$, $0 \leq \varphi_{0l} \leq 2\pi$. Безусловное отношение правдоподобия вычисляется теперь путем соответствующего интегрирования:

$$\Lambda(\mathbf{U}_l) = \exp\left(-\frac{q}{2}\right) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{(s_l / \sigma_{\text{ш}}^2) |X_l| \cos(\varphi_{0l} - \arg X_l)\right\} d\varphi_{0l},$$

где $q = \frac{Ns_l^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}$, $X_l = \sum_{j=1}^N e^{-ij\varphi_l} U_j^{(l)}$.

Данный интеграл сводится к табличному, приводящему к модифицированной функции Бесселя нулевого порядка $I_0(s_l |X_l| / \sigma_{\text{ш}}^2)$. Ввиду монотон-

ности функции $I_0(x)$ алгоритм обнаружения в l -м частотном канале принимает вид

$$u_l = |X_l|^2 = \left| \sum_{j=1}^N e^{-ij\phi_l} U_j^{(l)} \right|^2 \geq u_{0l}. \quad (2)$$

При неизвестной скорости цели построение алгоритма обнаружения (2) является многоканальным. Исключая неопределенность величины ϕ_l путем аналогичного работе [14] усреднения для k -го доплеровского канала, получаем

$$X_k^{(l)} = \sum_{j=1}^N h_j V^{(j-1)(k-1)} U_j^{(l)},$$

где $h_j = \text{sinc}[(j-1)\Delta\psi/2]$ – весовые коэффициенты, учитывающие ширину доплеровского канала; $V = e^{-i2\pi/N}$.

Данный алгоритм с учетом многоканальности обработки ($k = \overline{1, N}$) представляет собой дискретное преобразование Фурье взвешенных с коэффициентами h_j отсчетов $U_j^{(l)}$.

Для определения алгоритма обнаружения, инвариантного к доплеровской фазе ϕ_l , необходимо выполнить соответствующие усреднения в алгоритме (2) [7], тогда

$$v_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X_l|^2 d\phi_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{j,k=1}^N e^{-i(j-k)\phi_l} U_j^{(l)} U_k^{(l)*} d\phi_l.$$

Изменяя порядок интегрирования и суммирования, а также учитывая, что

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-i(j-k)\phi_l} d\phi_l = \text{sinc}[(j-k)\pi] = \begin{cases} 1, & j = k, \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$$

получаем

$$v_l = \sum_{j=1}^N |U_j^{(l)}|^2. \quad (3)$$

Исходя из отношения правдоподобия (1) и последующих вычислений, приводящих к выражению (3), окончательно находим

$$v = \sum_{j=1}^M v_l = \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^N |U_j^{(l)}|^2.$$

Данный алгоритм соответствует некогерентному накоплению в каждом частотном канале с последующим линейным суммированием результатов накопления.

Совместно флюктуирующий сигнал

В случае совместно флюктуирующего сигнала аддитивная смесь сигнала и внутреннего шума в виде N цифровых отсчетов комплексных огибающих $U_j^{(l)} = x_j^{(l)} + i y_j^{(l)}$, следующих через период повторения T и образующих совокупность $\{\mathbf{U}_l\} = \{\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M\}$, где вектор-столбец $\mathbf{U}_l = \{U_j^{(l)}\}^T$, $l = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, описывается корреляционной матрицей $\mathbf{R}_l = \overline{\mathbf{U}_l \mathbf{U}_l^{T*}} / 2$, элементы которой соответствуют работе [7].

При статистической независимости отраженных сигналов, соответствующих различным несущим частотам, совместная плотность вероятности совокупности $\{\mathbf{U}_l\}$ имеет вид

$$P(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M P(\mathbf{U}_l) = \left((2\pi)^{MN} \prod_{l=1}^M \det \mathbf{R}_l \right)^{-1} \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{U}_l \right), \quad (4)$$

где \mathbf{R}_l^{-1} – матрица, обратная \mathbf{R}_l ; причем при отсутствии сигнала ($\sigma_{c_l}^2 = 0$) матрицы \mathbf{R}_l и \mathbf{R}_l^{-1} являются диагональными с элементами соответственно $\sigma_{ш}^2 \delta_{jk}$ и $\delta_{jk} / \sigma_{ш}^2$.

Алгоритм оптимального обнаружения также определяется на основе отношения правдоподобия, которое с учетом выражения (4) найдем в виде

$$\Lambda(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M \Lambda(\mathbf{U}_l) = \left(\prod_{l=1}^M C_l \right) \exp \left(\frac{1}{2} \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{Q}_l \mathbf{U}_l \right), \quad (5)$$

где C_l – не зависящие от \mathbf{U}_l коэффициенты; \mathbf{Q}_l – матрица обработки для l -го частотного канала, элементы которой $Q_{jk}^{(l)}$ определяются уравнением

$$Q_{jk}^{(l)} + q_l \sum_{p=1}^N Q_{jp}^{(l)} \rho_{pk}^{(l)} e^{i(p-k)\varphi_l} = q_l \rho_{jk}^{(l)} e^{i(j-k)\varphi_l}, \quad (6)$$

в котором $q_l = \sigma_{c_l}^2 / \sigma_{ш}^2$ – отношение сигнал/шум в l -м частотном канале.

Из выражения (5) следует, что для обнаружения сигнала достаточно сравнить с пороговым уровнем величину

$$u = \sum_{l=1}^M u_l = \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{Q}_l \mathbf{U}_l = \sum_{l=1}^M \sum_{j,k=1}^N Q_{jk}^{(l)} U_j^{(l)*} U_k^{(l)}. \quad (7)$$

Конкретный вид алгоритма обработки зависит от корреляционных свойств сигнала. Одной из моделей узкополосных сигналов являются медленные или совместные (дружные) флюктуации, соответствующие $\rho_{jk}^{(l)} = 1$

($1 \leq j, k \leq N$). Решение уравнения (6) в этом случае с точностью до постоянного множителя принимает вид $Q_{jk}^{(l)} = e^{i(j-k)\varphi_l}$. Тогда алгоритм обнаружения в l -м частотном канале записывается в аналогичном (2) виде:

$$u_l = \left| \sum_{j=1}^N e^{-ij\varphi_l} U_j^{(l)} \right|^2. \quad (8)$$

Решение о наличии сигнала при неизвестной скорости цели и N -канальном построении алгоритма обнаружения (8) принимается по результатам раздельного сравнения с пороговым уровнем обнаружения величин $u_k^{(l)}$ [8].

Инвариантный к доплеровским фазам алгоритм обнаружения определяется аналогично предыдущему разделу путем усреднения алгоритма (8) в интервале однозначности $[-\pi \dots \pi]$ величины φ_l . Полученный алгоритм также соответствует линейному суммированию результатов некогерентного накопления в каждом частотном канале.

Анализ характеристик обнаружения

Анализ характеристик обнаружения без приведения числовых результатов представлен в работе [8]. При этом получено выражение для вероятности правильного обнаружения сигнала хотя бы в одном частотном канале

$$D = 1 - \left[1 - (F / MN)^{1 / (1 + Nq / M)} \right]^M, \quad (9)$$

где F – вероятность ложной тревоги для многоканальной системы обнаружения в целом; q – отношение суммарной мощности многочастотного сигнала к шуму одного канала.

Характеристики обнаружения, рассчитанные в соответствии с выражением (9) при $N = 20$ и $F = 10^{-6}$, приведены на рис. 1. Эти характеристики иллюстрируют возможности многочастотного (в данном случае двухчастотного) сигнала повышать эффективность обнаружения.

В работе [8] из выражения (9) получено соотношение для порогового отношения сигнал/шум:

$$q = \frac{M}{N} \left\{ \frac{\log(F / MN)}{\log[1 - (1 - D)^{1/M}] - 1} \right\}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по соотношению (10) при тех же значениях N и F зависимости порогового отношения сигнал/шум, позволяющие выбирать оптимальное число частотных каналов M . Данные зависимости подтверждают, что предложенная в данной работе обработка многочастотных сигналов обеспечивает существенные выигрыши в величине порогового отношения сигнал/шум по сравнению с результатами, приведенными в книге [6].

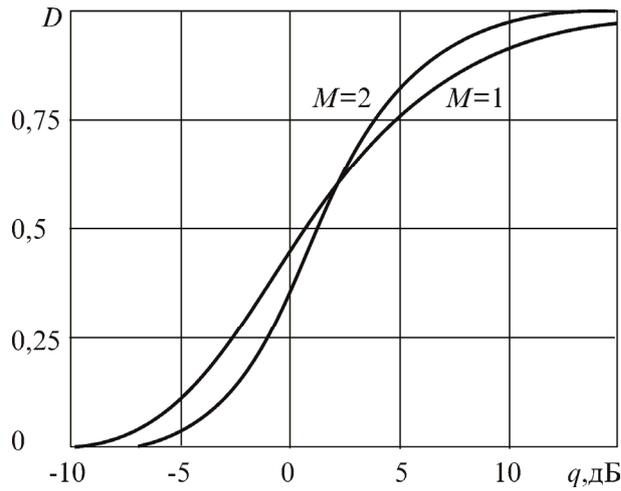


Рис. 1. Характеристики обнаружения при когерентной обработке одно- и двухчастотного сигнала

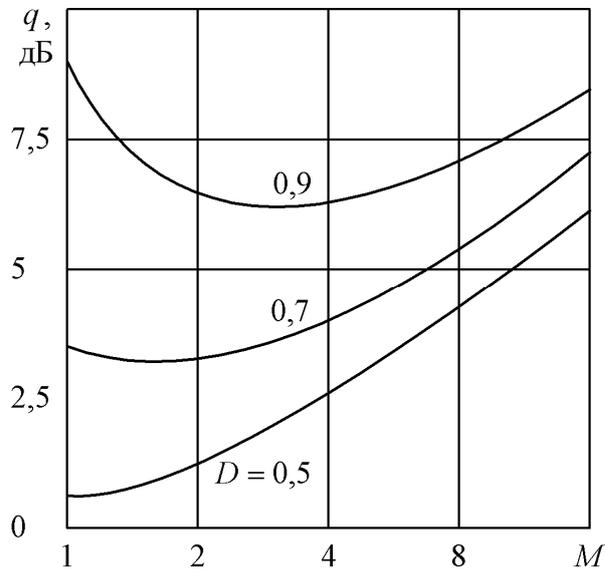


Рис. 2. Зависимости порогового отношения сигнал/шум от числа частотных каналов

Заключение

Таким образом, в результате статистического синтеза алгоритмов обнаружения многочастотных квазидетерминированных и совместно флюктуирующих сигналов установлено, что при когерентной межпериодной обработке отдельных компонент многочастотного сигнала обнаружение цели, движущейся с неизвестной скоростью, должно осуществляться отдельно в каждом доплеровском канале каждого частотного канала. При некогерентной межпериодной обработке в частотных каналах обнаружение осуществляется по результатам линейного суммирования выходных величин частотных каналов. На основе анализа характеристик обнаружения синтезированных алгоритмов когерентной обработки подтверждена целесообразность раздельного обнаружения сигналов в частотных каналах. При этом установлены зависи-

мости оптимального числа частотных каналов, при котором обеспечиваются выигрыши в пороговом отношении сигнал/шум по сравнению с одночастотным сигналом, что позволяет при заданных вероятностных показателях и дальности обнаружения упростить передатчик, уменьшив его мощность. Установлено, что эффективность предложенной обработки многочастотных сигналов характеризуется существенными выигрышами в величине порогового отношения сигнал/шум по сравнению с известными в литературе результатами.

Список литературы

1. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев : КВиЦ, 2000. 428 с.
2. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008. 1352 p.
3. Principles of Modern Radar: Basic Principles / ed. by M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. New York : SciTech Publishing, IET, Edison. 2010. 924 p.
4. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / ed. by W. L. Melvin, J. A. Scheer. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
5. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. Second Edition. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 618 p.
6. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М. : Советское радио, 1970. 560 с.
7. Попов Д. И. Оптимальная обработка многочастотных сигналов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 1. С. 32–39.
8. Попов Д. И. Оптимизация систем когерентно-весовой обработки многочастотных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 4. С. 17–21.
9. Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Vertogradova E. G., Kubatko S. V. and Uryadov V. P. Drift velocity of small-scale artificial ionospheric irregularities according to a multifrequency HF doppler radar. II // Observation and modeling results. Radiophysics and Quantum Electronics. 2015. Vol. 58, № 6. P. 381–389. doi:10.1007/s11141-015-9613-2
10. Feketa P., Perestyuk Y. Perturbation theorems for a multifrequency system with pulses // Journal of Mathematical Sciences. 2016. Vol. 217, № 4. P. 515–524. doi:10.1007/s10958-016-2988-6
11. Collins L., Belianinov A., Somnath S., Balke N., Kalinin S. V., Jesse S., Rodriguez B. J. Multifrequency spectrum analysis using fully digital G mode-Kelvin probe force microscopy // Nanotechnology. 2016. Vol. 27, № 10. P. 105706. doi:10.1088/0957-4484/27/10/105706
12. Angelliaume S., Martineau P., Minchew B., Chataing S., Miegbielle V. Multifrequency Radar Imagery and Characterization of Hazardous and NOXIOUS Substances at Sea // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol. 55, № 5. P. 3051–3066. doi:10.1109/TGRS.2017.2661325
13. Bi D., Xie Y., Ma L., Li X., Yang X., Zheng Y. R. Multifrequency Compressed Sensing for 2-D Near-field Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66, № 4. P. 777–791. doi:10.1109/TIM.2017.2654578
14. Попов Д. И. Адаптивная обработка сигналов на фоне пассивных помех // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43, № 1. С. 59–68.

References

1. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu = Digital radar. Introduction to theory*. Kiev: KViTs, 2000:428.
2. Skolnik M.I. (ed.). *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008:1352.

3. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. (eds.). *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison. 2010:924.
4. Melvin W.L., Scheer J.A. (ed.). *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013:846.
5. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. Second Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014:618.
6. Shirman Ya.D. (ed.). *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii = Theoretical foundations of radar*. Moscow: Sovetskoe radio, 1970:560.
7. Popov D.I. Optimal processing of multi-frequency signals. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2013;(1):32–39. (In Russ.)
8. Popov D.I. Optimization of systems for coherent-weight processing of multi-frequency signals. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2013;(4):17–21. (In Russ.)
9. Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Vertogradova E.G., Kubatko S.V., Uryadov V.P. Drift velocity of small-scale artificial ionospheric irregularities according to a multifrequency HF doppler radar. II. *Observation and modeling results. Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015;58(6):381–389. doi:10.1007/s11141-015-9613-2
10. Feketa P., Perestyuk Y. Perturbation theorems for a multifrequency system with pulses. *Journal of Mathematical Sciences*. 2016;217(4):515–524. doi:10.1007/s10958-016-2988-6
11. Collins L., Belianinov A., Somnath S., Balke N., Kalinin S.V., Jesse S., Rodriguez B.J. Multifrequency spectrum analysis using fully digital G mode-Kelvin probe force microscopy. *Nanotechnology*. 2016;27(10):105706. doi:10.1088/0957-4484/27/10/105706
12. Angelliaume S., Martineau P., Minchew B., Chataing S., Miegbielle V. Multifrequency Radar Imagery and Characterization of Hazardous and NOXIOUS Substances at Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(5):3051–3066. doi:10.1109/TGRS.2017.2661325
13. Bi D., Xie Y., Ma L., Li X., Yang X., Zheng Y.R. Multifrequency Compressed Sensing for 2-D Near-field Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017;66(4):777–791. doi:10.1109/TIM.2017.2654578
14. Popov D.I. Adaptive signal processing against the background of passive noise. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2000;43(1):59–68. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Иванович Попов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехнических
систем, Рязанский государственный
радиотехнический университет имени
В. Ф. Уткина (Россия, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

Dmitriy I. Popov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering systems, Ryazan State
Radio Engineering University named
after V.F. Utkin (59/1 Gagarina street,
Ryazan, Russia)

Поступила в редакцию / Received 17.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.02.2022

Принята к публикации / Accepted 20.02.2022