

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
05.22.08 – Управление процессами перевозок;
05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;
05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК 621.396.82

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-8-15

**Оценка воздействия помеховых сигналов
на решающее устройство приемо-анализирующего тракта
цифровых радиотехнических систем**

В.Е. Емельянов¹, С.П. Матюк¹

*¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В настоящее время в связи с возрастающей сложностью навигационного обеспечения воздушных судов, с ростом требований, предъявляемых к ним, все более необходимой является разработка систем комплексной обработки навигационной информации. Средства радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи (РТОПиЭС) являются основным источником сбора, обработки и представления информации о воздушной обстановке диспетчерскому составу службы движения, а также служат для решения ряда навигационных задач. При этом уровень безопасности полетов наряду с пропускной способностью зон управления воздушным движением, зависящие от решения соответствующего диспетчера, в значительной степени определяется достоверностью представляемой разнообразной входной информации. В свою очередь, большинство современных цифровых средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи на выходе приемо-анализирующего тракта имеют решающее или пороговое устройство, срабатывание которого в результате воздействия смеси шумовых и помеховых сигналов снижает достоверность информации за счет выбросов сигнального распределения, при условии что импульсные помехи, воздействующие на оборудование, и собственные шумы приемников не коррелированы. В работе приводится оценка среднего количества выбросов на выходе решающего устройства с учетом анализа вероятностных характеристик рассматриваемых сигналов. Для шумов, подчиненных распределению Рэлея, и узкополосной импульсной помехи с нулевым средним значением найдены математические ожидания среднего времени пребывания и среднего числа положительных выбросов оцениваемого процесса. Анализируется случай взаимодействия двух обзорных трассовых радиолокаторов «Скала-М» и АТСR-22, имеющих практически идентичные тактико-технические характеристики. Рассчитана зависимость длительности выбросов для ситуации, когда радиолокатор «Скала-М» является источником непреднамеренных электромагнитных помех для радиолокатора АТСR-22.

Ключевые слова: выброс случайного процесса, распределение Рэлея, длительность выброса, вероятность прохождения, порог срабатывания, среднее число выбросов.

Для цитирования: Емельянов В.Е., Матюк С.П. Оценка воздействия помеховых сигналов на решающее устройство приемо-анализирующего тракта цифровых радиотехнических систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 3. С. 8–15. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-8-15

Assessment of the impact of interference signals on the decision circuit of the receiving-analyzing route of digital radio engineering systems

V.E. Emelyanov¹, S.P. Matyiuk¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: Currently, due to the increasing complexity of navigation support for aircraft (A/C), with the growth of requirements for them, it is increasingly necessary to develop systems for integrated processing of navigation information. The facilities for radio engineering flights support and aeronautical telecommunications are the main source of collecting processing and presenting information about the air situation to the traffic control staff. They are also used to solve the number of navigation problems. At the same time, the level of flight safety, along with the capacity of air traffic control zones depending on the decision of the ATC unit, is largely specified by the reliability of the various input information provided. At another point, most sophisticated digital tools for radio engineering flights support and aeronautical telecommunications at the output of the receiving-analyzing route have a decision or threshold circuit, the actuation of which, as a result of exposure to a mixture of noise and interference signals, reduces the reliability of information due to bursts of signal distribution, provided that impulse interference affecting the equipment and mush of receivers are not correlated. The work provides an estimate of the average amount of signal bursts at the output of the decision circuit taking into consideration the analysis of the probabilistic characteristics of the signals under consideration. For noises subject to the Rayleigh distribution and narrow-band impulse interference with a zero-mean value, the mathematical expectations of the average response time and the average number of positive bursts of the estimated process are found. The case of interfacing two airway surveillance radars “Skala-M” and “ATCR-22”, which have virtually identical operating characteristics, is analyzed. The dependence of the burst duration is calculated for the situation when the “Skala-M” radar is a source of unintended EMI for the “ATCR-22” radar.

Key words: burst of a random probability, Rayleigh distribution, burst duration, probability of passing, response threshold, average number of bursts.

For citation: Emelyanov, V.E. & Matyiuk, S.P. (2022). Assessment of the impact of interference signals on the decision circuit of the receiving-analyzing route of digital radio engineering systems. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 3, pp. 8–15. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-8-15

Введение

Современные средства радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи являются основным источником сбора, обработки и представления информации о воздушной обстановке для диспетчерского состава службы движения [1, 2]. Однако при этом актуализируется проблема обеспечения достоверности информации, определяемая конструктивными характеристиками указанного оборудования. Наряду с этим возникают задачи оценки готовности оборудования, вытекающие из жестких требований ИКАО к достоверности и конфиденциальности передаваемой информации. Любое нарушение в работе средств РТОПиЭС сказывается на доминантных отраслевых показателях, таких как безопасность полетов и пропускная спо-

собность зон управления воздушным движением (УВД) [3, 4]. В данной работе авторы пытаются произвести оценку воздействия помеховых сигналов на корректное функционирование информационных каналов цифровых радиотехнических систем.

Методы и методология исследования

В соответствии с [5] среднее количество срабатываний решающего устройства (РУ) на интервале времени T , в предположении некоррелированности импульсных помех и шумов приемника, определяется соотношением

$$M[N(u_0, T)] = M[N_0(u_0, T)] + m(v_n)R, \quad (1)$$

где $M[N(u_0, T)]$ – среднее количество срабатываний РУ от воздействия помех за время T при пороге срабатывания u_0 ; $m[\nu_n]$ – среднее количество импульсных помех на входе приемника за время T ; R – вероятность прохождения помехи на выход дешифратора.

Отметим, что среднее количество выбросов шума над порогом РУ будет определяться только теми выбросами, длительность которых превосходит заданную величину τ_0 [6, 7]. При этом где $D_{ш}$ и $D_{вш}$ являются дисперсиями внутренних и внешних шумов приемника соответственно.

С учетом [8] запишем

$$N_B(u_0) = \frac{1}{2\sqrt{\sigma\pi}} \delta^* \Delta\omega W_1(u_0). \quad (2)$$

Так как шум при прохождении через узкополосные фильтры приемного тракта нормализуется, то одномерная плотность распределения шума описывается распределением Рэлея [9, 10]

$$W_1(u_0) = (u_0/D^*) \exp(-u_0^2/2D^*). \quad (3)$$

$$\Psi(\tau) = \frac{\Delta\omega^2 Z^2}{48} \int_0^\infty \tau_0 \exp\left(-\frac{1}{96} \Delta\omega^2 Z^2 \tau_u^2\right) d\tau_u = \exp\left(-\frac{1}{96} \Delta\omega^2 Z^2 \tau_0\right). \quad (7)$$

Далее, подставляя (7) в (5), окончательно получим

$$N_0(Z) = \frac{1}{2\sqrt{\sigma\pi}} \Delta\omega Z \exp\left(-\frac{1}{96} Z^2 (48 + \Delta\omega^2 \tau_0^2)\right). \quad (8)$$

Для определения R , опуская в записи ее зависимость от соответствующих переменных, воспользуемся асимптотическим представлением интеграла для вероятности прохождения импульса помехи через приемоанализирующий тракт [17]:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u-\eta(1/a)}^\infty \exp(-x^2/2) dx, \quad (9)$$

где $u = Z - a$; $a = A_{ш}/\delta$, $A_{ш}$ – амплитуда импульсной помехи;
 $\eta = (2S)^{-1} - u(2S)^{-2} + 4/3 (U^2 + 1)(2S)^{-3}$;

Подставляя (3) в (2) и обозначая отношение сигнал/шум через $Z = u_0/\delta_{ш}$, получаем [11, 12]

$$N_B(Z) = \frac{1}{2\sqrt{\sigma\pi}} \Delta\omega Z \exp(-Z_0^2/2). \quad (4)$$

Принимая во внимание необходимость учета чувствительности срабатывания РУ по длительности шума, преобразуем (4) к виду [13, 14]

$$N_0(Z) = \frac{1}{2\sqrt{\sigma\pi}} \Delta\omega Z \exp(-Z_0^2/2) \Psi(\tau), \quad (5)$$

где $\Psi(\tau)$ – вероятность того, что длительность выброса превышает τ_0 .

Выражение для функции распределения вероятностей длительностей выбросов относительным порогом, необходимое для определения $\Psi(\tau)$, запишем в виде [15, 16]

$$W_1(\tau_0, Z) = \frac{1}{48} \omega^2 Z^2 \tau_0 \exp\left(-\frac{1}{96} \Delta\omega^2 Z^2 \tau_u^2\right). \quad (6)$$

С учетом (6) получаем

$S = u_0^2/D_{ш}$; $Z = \hat{u}/\delta_{ш}$,
 \hat{u} – пороговое значение амплитуды входного сигнала.

Будем иметь

$$R = 1 - \Phi[u - \eta(1/a)]. \quad (10)$$

Обозначим среднее количество импульсов помехи, вызвавших срабатывание РУ через \hat{V}_0 . Тогда $\hat{V}_0 = V_0\{1 - \Phi[u - \eta(1/a)]\}$.

Подставляя (8), (9) в (1), получим для среднего количества срабатываний РУ от импульсных помех и шумов

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \Delta\omega Z \exp\left(-\frac{1}{96} Z^2 (48 + \Delta\omega^2 \tau_0^2)\right) + V_0 \{1 - \Phi[u - \eta(1/a)]\}. \quad (11)$$

При условии что на вход приемо-анализирующего тракта воздействует только аддитивная смесь помеха + шум, длительность выброса случайного процесса $\varepsilon(t) = g(t) + n(t)$, где $g(t)$ и $n(t)$ – случайные процессы, соответствующие непрерывным элементарным помехам и шумам, можно оценить по соотношению [18, 19, 20]

$$M[\tau_B(u_0, T)] = M[T_{\Pi}(u_0, T)] / M[N(u_0, T)], \quad (12)$$

где $M[T_{\Pi}(u_0, T)]$ и $M[N(u_0, T)]$ – среднее время пребывания и среднее число положительных выбросов процесса $\varepsilon(t)$ выше уровня u_0 на отрезке $[t_0, t_0 + T]$, причем

$$M[T_{\Pi}(u_0, T)] = \int_{t_0}^{t_0+T} dt \int_{u_0}^{\infty} W(y, t) dy, \quad (13)$$

где $W(y, t)$ – одномерная плотность вероятности процесса $\varepsilon(t)$.

Импульсная помеха представляет собой узкополосный стационарный процесс с нулевым средним значением и дифференцируемой функцией корреляции [21, 22]:

$$r_{\xi}(\tau) = \delta_{\xi}^2 r(\tau) \cos \omega_{\xi} \tau, \quad (14)$$

где δ_{ξ}^2 – дисперсия; $r(\tau)$ – функция, медленно меняющаяся по сравнению с $\omega_{\xi}(\tau)$.

Для случая некоррелированной импульсной помехи и шума несложно получить [10]

$$M[T_i(u_0, T)] = \frac{\pi}{\omega_{\xi}} \operatorname{erfc} \left[\frac{u_0}{\delta_{\xi} \sqrt{2(1+2b_{\xi}^2)}} \right], \quad (15)$$

где $\operatorname{erfc} x = (2/\sqrt{\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2) dt$, а $b^2 = \sqrt{D_{\Pi}/D_{\text{ш}}}$.

Результаты исследования

Зачастую резервирование радиолокационной информации обеспечивается использованием рассматриваемых радиолокаторов, при этом минимально допустимое расстояние между ними соответствует 1,5 км, что в свою очередь обеспечит необходимую синхронизацию группы РЛС в районе аэропорта и необходимую управляемость средствами. Для ситуации, когда радиолокатор «Скала-М» яв-

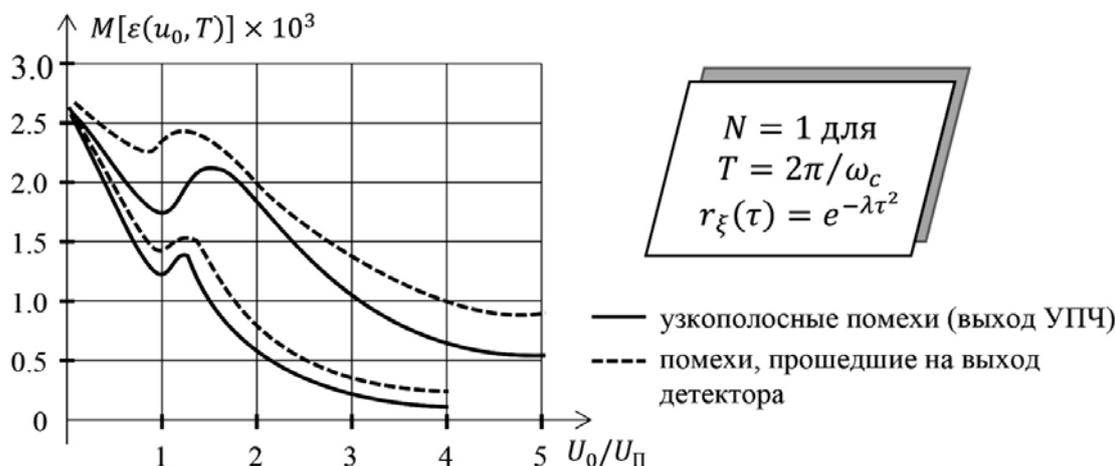


Рис. 1. Зависимость длительности выброса от отношения сигнал/помеха
Fig. 1. Dependence of the burst duration on the signal-to-noise ratio

ляется источником помех для АТСР-22, на рис. 1 представлена зависимость средней за время T зависимости положительных выбросов случайного процесса $\varepsilon(t)$ выше заданного уровня.

Из рис. 1 следует, что при условии отношения сигнал/помеха, превышающего три, длительности выбросов сигнальных распределений практически не будут влиять на характеристики обнаружения с учетом сглаживающих свойств дешифрирующих устройств, что совпадает с результатами, приведенными в работе [10].

Обсуждение полученных результатов

Предлагаемая методика может быть использована при априорной оценке достоверности информации как на стадии проектирования, так и на стадии техэксплуатации с учетом характеристик функционального использования исследуемых систем [23, 24].

Заключение

Полученные оценки позволяют определить характеристики готовности оборудования и, с точки зрения авторов, являются полезными при построении моделей оценки помехозащищенности и достоверности информации, позволяющих в свою очередь рассматривать показатели системы УВД являющимися качественными отраслевыми характеристиками.

Список литературы

1. Kolesov V.V., Myasin E.A. Noise radar of millimeter range // *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*. 2018. Vol. 10, no. 2. Pp. 235–256. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.235
2. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией при наличии ретрансли-

рованной помехи // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65, № 8. С. 804–808. DOI: 10.31857/S0033849420070074

3. Леонидов В.В., Гуляев И.Б., Колчин Г.С. Модель системы цифрового автоматического регулирования усиления импульсных усилителей мощности на биполярных транзисторах для передающих модулей радиолокационных систем // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63, № 7. С. 758–762. DOI: 10.1134/S0033849418070100

4. Chiochio S. Modeling and evaluation of enhanced reception techniques for ADS-B signals in high interference environments / S. Chiochio, A. Persia, F. Suntucci, F. Graziozi, M. Pratesi, M. Faccio // *Physical Communication*. 2020. Vol. 42. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101171 (дата обращения: 17.06.2021).

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., доп. и перер. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

6. Борисов А.В., Казанчян Д.Х. Фильтрация состояний марковских скачкообразных процессов по комплексным наблюдениям I: точное решение задачи // *Информатика и ее применения*. 2021. Т. 15, № 2. С. 12–19. DOI: 10.14357/19922264210302

7. Будунова К.А., Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И. Оценка ошибки усечения ряда Кравченко – Котельникова // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63, № 9. С. 935–941. DOI: 10.1134/S003384941809005X

8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3 кн. Кн. 3. М.: Советское радио, 1976. 288 с.

9. Рогозин И.А. Новые критерии согласия для семейства распределения Рэлея, основанные на некотором специальном свойстве и некоторой характеристике // *Записки научных семинаров ПОМИ РАН*. 2021. Т. 505. С. 230–243.

10. Увайсов С.У., Гродзенская И.С. Обнаружение слабого сигнала на фоне помехи в случае распределения Рэлея // *Измерительная техника*. 2006. № 4. С. 55–58.

11. Abdulkhalek A.A.-B. A new extended Rayleigh distribution // *Journal of King Saud University – Science*. 2020. Vol. 35, iss. 5. Pp. 2576–2581. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.04.015

12. **Bhat A.A., Ahmad S.P.** A new generalization of Rayleigh distribution: properties and applications // *Pakistan Journal of Statistics*. 2020. Vol. 36, no. 3. Pp. 225–250.

13. **Tahani A.A.** Estimation of the unknown parameters for the compound Rayleigh distribution based on progressive first-failure-censored sampling // *Open Journal of Statistics*. 2011. Vol. 1, no. 3. DOI: 10.4236/ojs.2011.13020 (дата обращения: 17.06.2021).

14. **Wiegand M., Nadarajah S.** Series approximations for Rayleigh distributions of arbitrary dimensions and covariance matrices // *Signal Processing*. 2019. Vol. 165. Pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.06.035

15. **Aliev T.A., Musaeva N.F., Gazizade B.I.** Calculation algorithms of the high order moments of interference of noisy signals // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. Vol. 50, iss. 6. Pp. 1–13. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.10

16. **Schick A., Zhu Y.** Efficient estimation of the error distribution in a varying coefficient regression model // *Mathematical Methods of Statistics*. 2017. no. 26. Pp. 176–195. DOI: 10.3103/S1066530717030024

17. **Детков А.Н.** Оптимальное оценивание дискретно-непрерывных марковских процессов по наблюдаемым цифровым сигналам // *Радиотехника и электроника*. 2021. Т. 66, № 8. С. 748–759. DOI: 10.31857/S0033849421080027

18. **Курбаналиев В.К.** Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов // *Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2020. Т. 12, № 3. С. 319–328. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.319

19. **Потапов А.А.** Математические основы фрактально-скейлингового метода в статистической физике и приложениях // *Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2021. Т. 13, № 3. С. 245–296. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.245

20. **Сидоров И.Г.** Минимаксная линейная фильтрация стационарного случайного процесса в условиях интервальной нечеткости матрицы состояния системы с ограниченной дисперсией // *Радиотехника и электроника*.

ка. 2018. Т. 63, № 8. С. 831–836. DOI: 10.1134/S003384941807015X

21. **Рыбаков К.А.** Об одном классе задач фильтрации на многообразиях // *Информатика и ее применения*. 2019. Т. 13, № 1. С. 16–24. DOI: 10.14357/19922264190103

22. **Сотникова М.В.** Синтез цифрового управления с прогнозом для удержания контролируемых переменных в заданном диапазоне // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2019. Т. 15, № 3. С. 397–409. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2019.309

23. **Черкасов К.В.** Анализ вероятностных характеристик электрических параметров широкополосного балансного смесителя частот СВЧ радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов и оценка его надежности / К.В. Черкасов, И.А. Романов, С.А. Мешков, В.Д. Шашурин // *Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2021. Т. 13, № 1. С. 19–26. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.019

24. **Якимов А.В., Ключев А.В., Кревский М.А.** Природа вносимого фазового 1/F шума в автогенераторах диапазона СВЧ // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65, № 1. С. 90–95. DOI: 10.31857/S0033849420010076

References

1. **Kolesov, V.V. & Myasin, E.A.** (2018). *Noise radar of millimeter range*. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, vol. 10, no. 2, pp. 235–256. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.235 (in Russian)

2. **Kulikov, G.V., Lelyukh, A.A. & Grachenko, Ye.N.** (2020). *Noise immunity of a coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference*. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 934–938. DOI: 10.1134/S1064226920070074

3. **Leonidov, V.V., Gulyayev, I.B. & Kolchin, G.S.** (2018). *Model of the digital automatic gain control system of pulse-power amplifiers with bipolar transistors for transmitter*

modules of radar systems. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 63, no. 7, pp. 835–839. DOI: 10.1134/S0033849418070100

4. **Chiocchio, S., Persia, A., Suntucci, F., Graziosi, F., Pratesi, M. & Faccio, M.** (2020). *Modeling and evaluation of enhanced reception techniques for ADS-B signals in high interference environments*. Physical Communication, vol. 42. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101171 (accessed: 17.06.2021).

5. **Tikhonov, V.I.** (1982). *Statistical radio technics*. 2nd ed., dop. i pererab. Moscow: Radio i svyaz, 624 p. (in Russian)

6. **Borisov, A.V. & Kazanchyan, D.Kh.** (2021). *Filtering of markov jump processes given composite observations I: exact solution*. Informatics and Applications, vol. 15, no. 2, pp. 12–19. DOI: 10.14357/19922264210302 (in Russian)

7. **Budunova, K.A., Kravchenko, V.F. & Pustovoit, V.I.** (2018). *Truncation error bound for the Kravchenko–Kotelnikov series*. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 63, no. 9, pp. 998–1004. DOI: 10.1134/S003384941809005X

8. **Levin, B.R.** (1976). *Theoretical foundations of statistical radio technics. V 3 knigakh. Kn. 3*. Moscow: Sovetskoye radio, 288 p. (in Russian)

9. **Rogozin, I.A.** (2021). *New goodnessofit tests for the family of Rayleigh distributions, based on a special property and a characterization*. Zapiski nauchnykh seminarov POMI RAN, vol. 505, pp. 230–243. (in Russian)

10. **Uvaisov, S.U. & Grodzenskaya, I.S.** (2006). *Faint signal detection in noise for Rayleigh distribution*. Izmeritel'naya tekhnika, vol. 4, pp. 55–58. (in Russian)

11. **Abdulhakim, A.A.-B.** (2020). *A new extended Rayleigh distribution*. Journal of King Saud University – Science, vol. 35, issue 5, pp. 2576–2581. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.04.015

12. **Bhat, A.A. & Ahmad, S.P.** (2020). *A new generalization of Rayleigh distribution: properties and applications*. Pakistan Journal of Statistics, vol. 36, no. 3, pp. 225–250.

13. **Tahani, A.A.** (2011). *Estimation of the unknown parameters for the compound Rayleigh*

distribution based on progressive first-failure-censored sampling. Open Journal of Statistics, vol. 1, no. 3. DOI: 10.4236/ojs.2011.13020 (accessed: 17.06.2021).

14. **Wiegand, M. & Nadarajah, S.** (2019). *Series approximations for Rayleigh distributions of arbitrary dimensions and covariance matrices*. Signal Processing, vol. 165, pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.06.035

15. **Aliev, T.A., Musaeva, N.F. & Gazizade, B.I.** (2018). *Calculation algorithms of the high order moments of interference of noisy signals*. Journal of Automation and Information Sciences, vol. 50, issue 6, pp. 1–13. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.10

16. **Schick, A. & Zhu, Y.** (2017). *Efficient estimation of the error distribution in a varying coefficient regression model*. Mathematical Methods of Statistics, no. 26, pp. 176–195. DOI: 10.3103/S1066530717030024

17. **Detkov, A.N.** (2021). *Optimal evaluation of discrete continuous markov processes from observed digital signals*. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 66, no. 8, pp. 914–925. DOI: 10.31857/S0033849421080027

18. **Kurbanaliyev, V.K.** (2020). *Cumulative features for determining the type of signal manipulation*. Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, vol. 12, no. 3, pp. 319–328. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.319 (in Russian)

19. **Potapov, A.A.** (2021). *Mathematical foundations of the fractal scaling method in statistical radiophysics and applications*. Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, vol. 13, no. 3, pp. 245–296. DOI:10.17725/rensit.2021.13.245 (in Russian)

20. **Sidorov, I.G.** (2018). *Linear minimax filtering of a stationary random process under the condition of the interval fuzziness in the state matrix of the system with a restricted variance*. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 63, no. 8, pp. 902–907. DOI: 10.1134/S003384941807015X

21. **Rybakov, K.A.** (2019). *On a class of filtering problems on manifolds*. Informatics and Applications, vol. 13, no. 1, pp. 16–24. DOI: 10.14357/19922264190103 (in Russian)

22. Sotnikova, M.V. (2019). *Digital control design based on predictive models to keep the controlled variables in a given range*. Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes, vol. 15, no. 3, pp. 397–409. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2019.309 (in Russian)

23. Cherkasov, K.V., Romanov, I.A., Meshkov, S.A. & Shashurin, V.D. (2021). *Analysis of the probabilistic characteristics of the electrical parameters of a broadband balanced*

mixer of microwave radio signals based on resonant tunneling diodes and an assessment of its reliability. Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, vol. 13, no. 1, pp. 19–26. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.019 (in Russian)

24. Yakimov, A.V., Klyuyev, A.V. & Krevskii, M.A. (2020). *The nature of introduced phase 1/F noise in microwave oscillators*. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 84–89. DOI: 10.31857/S0033849420010076

Сведения об авторах

Емельянов Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, v.emelianov@mstuca.aero.

Матыюк Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, s.matiuk@mstuca.aero.

Information about the authors

Vladimir E. Emelyanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Radio Engineering and Information Security Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.emelianov@mstuca.aero.

Sergei P. Matiuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Radio Engineering and Information Security Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.matiuk@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 16.01.2022
Принята в печать 24.05.2022

Received 16.01.2022
Accepted for publication 24.05.2022