

УДК 504.064

**ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА КАНАЛОВ ДЛЯ РАНГОВЫХ
ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ**

А.Р. Бестугин, С.В. Дворников², С.С. Дворников³, И.А. Киршина⁴, Ненашев В.А.⁵

¹⁻⁵Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург, Россия)

¹fresguap@mail.ru, ²practicdsv@yandex.ru, ³dvornic92@mail.ru, ⁴ikirshina@mail.ru,
⁵nenashev.va@yandex.ru

Аннотация. Особенностью работы крупных авиационных узлов является одновременное использование большого числа радиоэлектронного оборудования (РЭО) большой мощности, задействованного для управления воздушным движением. В таких условиях сложно ограничить взаимное влияние РЭО, что приводит к возникновению непреднамеренных помех. Учитывая случайный характер возникновения непреднамеренных деструктивных воздействий, а также достаточно большое количество излучающих средств, возникающие помехи будет носить несинхронный характер, поэтому их компенсация не может быть решена путем организационных мероприятий.

В таких условиях разумным решением видится использование логических многоканальных обнаружителей. Поскольку мешающие помехи носят импульсный характер, в рассматриваемой ситуации целесообразен выбор ранговых обнаружителей.

С учетом указанных обстоятельств, представлены результаты исследования, обеспечивающие уверенную работу РЭО в условиях непреднамеренных помех импульсного характера.

Проведенные исследования показали, что в условиях воздействия импульсных помех непреднамеренного характера обоснованным решением является использование 6-ти канальных обнаружителей. Такое решение при одинарном потоке деструктивного воздействия с вероятностью появления помехи в канале $p = 0,05$ позволит свести вероятность ложного обнаружения до уровня $\alpha = 5 \times 10^{-2}$.

При этом следует понимать, что в таких условиях, классические обнаружители, базирующиеся на накопление энергии реализаций, оказываются практически неработоспособными,

При этом расчет характеристик для ранговых обнаружителей известен, что позволяет полученные результаты использовать в практических приложениях.

Ключевые слова: радиоэлектронное оборудование, ранговые обнаружители, импульсные помехи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-79-10259.

**JUSTIFICATION OF THE NECESSARY NUMBER OF CHANNELS FOR RANKING
DETECTORS UNDER THE INFLUENCE OF IMPULSE INTERFERENCE**

A.R. Bestugin¹, S.V. Dvornikov², S.S. Dvornikov³, I.A. Kirshina⁴, V.A. Nenashev⁵

¹⁻⁵Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (Saint-Petersburg, Russia)

Abstract

The peculiarity of large aviation hubs is the simultaneous use of a large number of high-power radio-electronic equipment (REE) involved in air traffic control. In such conditions it is difficult to limit the mutual influence of REE, which leads to the occurrence of unintentional interference. Taking into account the random nature of the occurrence of unintentional destructive effects, as well as a sufficiently large number of radiating means, the emerging interference will be non-synchronous in nature, so their compensation can not be solved by organizational measures.

Under such conditions, a reasonable solution is the use of logic multichannel detectors. Since the interfering interference is impulsive in nature, in this situation is appropriate to choose rank detectors.

Taking into account the above circumstances, the results of the study are presented, providing confident operation of REE in the conditions of unintentional interference of impulsive nature.

The conducted studies have shown that under the influence of pulse interference of unintentional nature a reasonable solution is the use of 6-channel detectors. Such a solution for a single stream of destructive impact with the probability of interference in the channel $p = 0.05$ will reduce the probability of false detection to the level of $\alpha = 5 \times 10^{-2}$.

It should be understood that under such conditions, classical detectors based on the accumulation of energy of realizations are practically inoperable,

At the same time, the calculation of characteristics for rank detectors is known, which allows the obtained results to be used in practical applications.

Keywords: radio-electronic equipment, rank detectors, impulse interference.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-79-10259.

Введение. Особенностью работы крупных авиационных узлов является одновременное использование большого числа радиоэлектронного оборудования (РЭО) большой мощности, задействованного для управления воздушным движением [1, 2]. В таких условиях сложно ограничить взаимное влияние РЭО, что приводит к возникновению непреднамеренных помех [3, 4]. А с учетом ограниченного пространства размещения РЭО в пределах авиационных узлов и достаточно большой излучающей мощности передающих устройств, воздействие помех происходит даже по боковым лепесткам диаграмм направленности приемных трактов. В результате возникает так называемый эффект «размножения» помех [5], который проявляется в возникновении ложных целей на экранах радиолокаторов [6, 7]. Учитывая случайный характер возникновения непреднамеренных деструктивных воздействий, а также достаточно большое количество излучающих средств, возникающие помехи будет носить несинхронный характер, поэтому их компенсация не может быть решена путем организационных мероприятий [8, 9].

В таких условиях разумным решением видится использование логических многоканальных обнаружителей, работающих на принципе « k из n ». Поскольку мешающие помехи носят импульсный характер, то согласно [10, 11], в рассматриваемой ситуации целесообразен выбор ранговых обнаружителей [12].

С учетом указанных обстоятельств, в настоящей статье представлены результаты исследования, связанные с обоснованием реализации условия « k из n » [13, 14],

обеспечивающих уверенную работу РЭО в условиях непреднамеренных помех импульсного характера.

Общие положения. В условиях совместной работы РЭО мощность возникающих взаимных помех, как правило, оказывается значительно выше уровня спектральной плотности мощности шумов. Учитывая импульсный характер такого воздействия, для его описания может быть использована модель на основе простейшего Пуассоновского потока [15]. Такая модель определяется вероятностью проявления помехового импульса в одном из n каналов, которую обозначим как p .

Согласно [16], Пуассоновская модель тем точнее, чем выше скважность проявления помехового импульса, т.е. чем меньше вероятность ее появления.

Обоснованность выбора такой модели определяется тем, что сумма не менее чем четырех несинхронных регулярных потоков, по своим характеристикам близка к простейшему Пуассоновскому потоку. Следовательно, при $n > 4$, такой подход будет оправдан.

Далее будем полагать, что при выполнении гипотезы H_0 (отсутствие в канале полезного сигнала), в приемном тракте присутствуют или аддитивная смесь стационарного шума $n(t)$ и импульсной помехи $m(t)$, или только шум.

Тогда, при выполнении гипотезы H_0 , функцию распределения входной выборки в канала $x(t)$, в соответствии с формулой полной вероятности [17, 18], можно записать

$$W(x) = (1 - p)W_1(x) + pW_2(x), \quad (1)$$

где $W_1(x)$ – функция распределения шума, т.е. входная выборка $x(t)$ содержит только шум $n(t)$; $W_2(x)$ – функция распределения аддитивной смеси шума и импульсной помехи, т.е. входная выборка $x(t)$ содержит шум $n(t)$ и помеху $m(t)$.

Заметим, что выражение (1), в общем случае, справедливо при условии ординарности потока, т.е. вероятность одновременного появления двух и более импульсов достаточно мала. Так как отчеты для любых двух каналов независимы, то можно воспользоваться для распределения ранга $R(k | H_0)$ при выполнении гипотезы H_0 выражением, характеризующим потоки с большой скважностью следования помехи

$$R(k | H_0) = \int_k^n [(1 - p)W_1(x) + pW_2(x)]^k \times \\ \times [1 - (1 - p)W_1(x) + pW_2(x)]^{n-k} \times \\ \times [(1 - p)dW_1(x) + pdW_2(x)] \quad (2)$$

Решение (2) получено в [19], и определено как

$$R(k | H_0) = \frac{1}{n + 1}. \quad (3)$$

Равенство (3) указывает на непараметричность рангового обнаружителя, который при $n = 1$, может рассматриваться как знаковый обнаружитель, для которого значение $R(k | H_0) = 0,5$ [20].

Из условия (3) следует, что импульсная помеха даже с произвольным распределением амплитудных значений не изменит величину вероятности ложного обнаружения при использовании рангового обнаружителя.

Вместе с тем, при возрастании p , когда Пуассоновская модель теряет свойство ординарности, необходимо учитывать вероятность одновременного воздействия нескольких импульсных помех.

В случае для одновременного прихода двух импульсных помех от разных источников, составное распределение будет описываться следующим выражением [19]

$$W(x) = (1-p)^2 W_1(x) + 2p(1-p)W_2(x) + p^2 W_{22}(x), \quad (4)$$

где $W_{22}(x)$ – функция распределения аддитивной смеси шума и двух импульсных помех.

Однако даже в этом случае непараметричность рангового обнаружителя сохраняется. При этом в обнаружителях, основанных на накоплении отсчетов, при том же принципе принятия решения, основанного на логическом выборе « k из n », вероятность ложной тревоги α будет сильно зависеть от параметров помехи [20, 21], что затрудняет их практическое использование.

Обоснование выбора канальности рангового обнаружителя. Представленное обоснование выбора рангового обнаружителя для условий воздействия импульсных помех в Пуассоновском канале позволяет в дальнейшем рассмотреть условия, определяющих выбор потребного числа каналов для эффективной работы РЭО.

Далее будем полагать, что распределение шума, а также аддитивной смеси шума и импульсных помех определяются рэлеевской плотностью вероятности [22, 23], описываемой выражением

$$w(x) = \frac{x}{1+B} \exp\left[-\frac{x^2}{2(1+B)}\right], \quad (5)$$

где $B = \sigma_{\text{п}}^2 / \sigma_{\text{ш}}^2$ – отношение мощностей помехи и шума.

Условие (5) выполняется для $x \geq 0$.

В дальнейшем для удобства интерпретации результатов определим значение $\sigma_{\text{ш}}^2 = 1$.

Для раскрытия характера распределения $w(x)$, определяемого выражением (1), на рис. 1 представлены графики при $B_1 = 0,1$; $B_2 = 1$ и $B_3 = 10$.

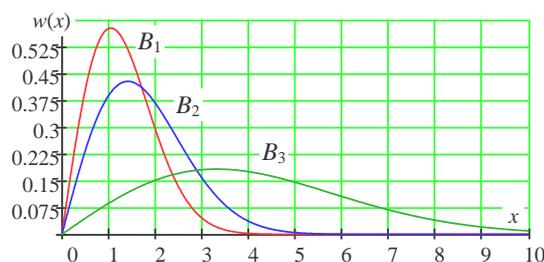


Рис. 1. Графики распределения реализаций на входе рангового обнаружителя с различными параметрами

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при мощности импульсных помех меньших или сопоставимых с мощностью шумов, максимум распределения $w(x)$ локализован в интервале $x = [1; 2]$. И лишь при существенном превышении мощности помех (на рис. 1 превышение на порядок), максимум смещается в район $x = 3$.

Данный факт может выступать одним из признаков, характеризующих помеховую обстановку. Соответственно для составного распределения [19], характеризующего многоканальный обнаружитель, плотность вероятности будет иметь следующий вид:

$$w(x) = (1 - p)x \exp(-x^2 / 2) + p \frac{x}{1 + B} \exp\left[-\frac{x^2}{2(1 + B)}\right], \quad (6)$$

Вместе с тем проведенное аналитическое моделирование для составного распределения (6), показала его устойчивость к изменению его параметров.

Так на рис. 2 представлены графики для $w_1(x)$ при $p_1 = 0,05$ и $B_1 = 0,1$; для $w_2(x)$ при $p_2 = 0,5$ и $B_2 = 0,1$; для $w_3(x)$ при $p_3 = 0,05$ и $B_3 = 10$ и для $w_4(x)$ при $p_4 = 0,5$ и $B_3 = 10$.

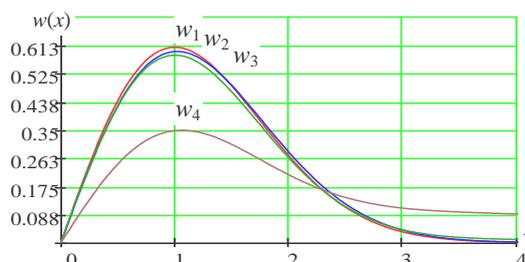


Рис. 2. Графики составного распределения реализаций на входе рангового обнаружителя с различными параметрами

Так, согласно проведенному моделированию, установлено, что изменение вероятности в широких пределах весьма незначительно влияет на искомый результат. И только лишь с существенным возрастанием мощности импульсных помех происходит «проседание» графика, фактически без изменения координат локального максимума. В таких условиях значение искомого порога G , может быть найдено только приближенно для заданной величины ложной тревоги α , что подтверждается результатами [24].

В свою очередь значение α может быть вычислено исходя из нормальной аппроксимации статистики на входе многоканального обнаружителя S_x , в соответствии с выражением [25]:

$$\alpha = 1 - \Phi\left[\frac{G - M(S_x | H_0)}{\sigma(S_x | H_0)}\right]. \quad (7)$$

Здесь $M(S_x | H_0)$ – математическое ожидание статистики S_x при условии выполнения гипотезы об отсутствии в канале полезного сигнала; $\sigma(S_x | H_0)$ – среднеквадратическое отклонение статистики S_x при условии выполнения гипотезы H_0 .

$\Phi(*)$ – функцией нормального интегрального распределения с нулевым значением математического ожидания и единичным значением дисперсии (функция Лапласа).

Согласно [26], функция Лапласа может быть рассчитана в соответствии с выражением

$$\Phi(G) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^G \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (8)$$

Поскольку в исследовании полагается выбор многоканального рангового обнаружителя, то в соответствии с [17], величина $M(S_x | H_0)$ трансформируется к виду

$$M(S_x | H_0) = nM(x), \quad (9)$$

а $\sigma(S_x | H_0)$, соответственно к

$$\sigma(S_x | H_0) = \sqrt{n}\sigma(x). \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) n – количество каналов, используемых в ранговом обнаружителе.

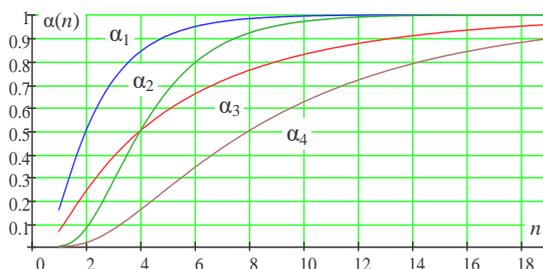


Рис. 3. Зависимость вероятности ложного обнаружения полезного сигнала

На рис. 3 графики построены при следующих значениях: α_1 при $M(x) = 0,05$, $G = 1$, $\sigma(x) = 0,5$; α_2 при $M(x) = 0,5$, $G = 1$, $\sigma(x) = 0,5$; α_3 при $M(x) = 0,05$, $G = 1$, $\sigma(x) = 0,25$; α_4 при $M(x) = 0,05$, $G = 2$, $\sigma(x) = 0,5$.

Согласно полученным результатам, доминирующее значение на характер зависимости α от общего числа каналов n оказывает выбор величины порога. В частности, если значение ложной тревоги при заданных параметрах обеспечивается $\alpha = 0,2$ при использовании одного канала. То повышение величины порога вдвое, то же самое значение α будет обеспечено уже при наличии не менее четырех каналов рангового обнаружителя.

Полученные результаты, см. рис. 3, интересны тем, что даже при выборе величины порога в восемь раз превышающего среднее значение аддитивной смеси шумов и импульсных помех, предельно достижимая вероятность ложного обнаружения не превысит $\alpha = 2,3 \times 10^{-4}$.

Причем данное значение будет обеспечено при наличии только одного канала обнаружителя.

В интересах обоснования допустимого числа каналов в многоканальных ранговых обнаружителях при их работе в условиях воздействия импульсных помех, с позиций возможности разумного выбора значения вероятности ложного обнаружения, рассмотрим ситуацию, при которой величины $M(S_x | H_0)$ и $\sigma(S_x | H_0)$ равны между собой, а искомый результат определяется лишь выбором значения порога.

Величина порога G определена значениям $G_1 = 2M(x)$, $G_2 = 3M(x)$, $G_3 = 4M(x)$, $G_4 = 5M(x)$, $G_5 = 6M(x)$, $G_6 = 7M(x)$, $G_7 = 8M(x)$, $G_8 = 9M(x)$, $G_9 = 10M(x)$.

Расчетные значения сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значение вероятности ложного обнаружения в зависимости от уровня порога (начало)

G	$\alpha(1)$	$\alpha(2)$	$\alpha(3)$
G_1	0,159	0,5	0,718
G_2	0,023	0,24	0,5
G_3	$1,35 \times 10^{-3}$	0,079	0,282
G_4	$3,167 \times 10^{-5}$	0,017	0,124

G_5	$2,867 \times 10^{-7}$	$2,339 \times 10^{-3}$	0,042
G_6	$9,866 \times 10^{-10}$	$2,035 \times 10^{-4}$	0,01
G_7	$1,28 \times 10^{-12}$	$1,105 \times 10^{-5}$	$1,946 \times 10^{-3}$
G_8	0	$3,715 \times 10^{-7}$	$2,66 \times 10^{-4}$
G_9	0	$7,709 \times 10^{-9}$	$2,656 \times 10^{-5}$

Таблица 1 – Значение вероятности ложного обнаружения в зависимости от уровня порога (продолжение)

G	$\alpha(4)$	$\alpha(5)$	$\alpha(6)$
G_1	0,841	0,91	0,949
G_2	0,681	0,814	0,89
G_3	0,5	0,673	0,793
G_4	0,309	0,5	0,658
G_5	0,159	0,327	0,5
G_6	0,067	0,186	0,342
G_7	0,023	0,09	0,207
G_8	$6,21 \times 10^{-3}$	0,037	0,11
G_9	$1,35 \times 10^{-3}$	0,013	0,051

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. Повышение количества каналов в ранговом обнаружителе ведет к существенному повышению вероятности ложного обнаружения. Снижение величины α может быть обеспечено только за счет повышения порога. Но такой подход ведет к снижению и вероятности правильного обнаружения.

При этом выбор числа каналов в ранговом обнаружителе свыше $n = 6$ нецелесообразен, поскольку даже при 10-кратном превышении порога уровня среднего значения входной реализации, вероятность ложной тревоги не может быть обеспечена ниже величины $\alpha = 0,05$.

В [24] получено значение порога, равного

$$G = 1,5\sqrt{n}, \quad (11)$$

при условии, что $p = 0,2$ и решение принимается по $k = 7$ из $n = 20$, а порог квантования равен $d = \sqrt{2 \ln 5}$.

Интерпретируя выражение (11) можно получить оптимальное значение величины порога для условий $n = 6$. Таковым будет значение $G = 3,67$.

Заключение. Проведенные исследования показали, что в условиях воздействия импульсных помех непреднамеренного характера обоснованным решением является

использование 6-ти канальных обнаружителей. Такое решение при одинарном потоке деструктивного воздействия с вероятностью проявления помехи в канале $p = 0,05$ позволит свести вероятность ложного обнаружения до уровня $\alpha = 5 \times 10^{-2}$ при выборе порогового уровня равного $G = 3,67M(x)$.

При этом следует понимать, что в таких условиях, согласно [17, 19, 24], классические обнаружители, базирующиеся на накопление энергии реализаций, оказываются практически неработоспособными,

При этом расчет характеристик для ранговых обнаружителей известен и достаточно подробно представлен в [27], что позволяет полученные результаты использовать в практических приложениях.

Дальнейшие исследования авторы связывают с использованием в качестве исходных данных компонентов матриц частотно-временной обработки входных реализаций, аналогично [28, 29].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shukurova, S. Analysis of the issues of modeling the air traffic control process with increasing flight intensity / S. Shukurova, N. Rustamov // Innovative Technologies. – 2023. – No. S1-1. – P. 23-28.

2. Sabohat, M. Sh. Modernization of personnel training technology for the air traffic management and maintenance system / M. Sh. Sabohat, M. S. Ilkhomjan // Вестник Академии гражданской авиации. – 2022. – No. 3(26). – P. 26-34. – DOI 10.53364/24138614_2022_26_3_26.

3. Затучный, Д. А. К вопросу о формализации пространства непреднамеренных помех навигационным системам воздушных судов гражданской авиации / Д. А. Затучный // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2019. – № 2(23). – С. 56-63. – EDN DNMTUD.

4. Дворников, С. В. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех / С. В. Дворников, Е. В. Марков, Э. А. Маноши // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15, № 6. – С. 4-9. – DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. – EDN KHPWMU.

5. Малышев, В. А. Алгоритм автоматического распознавания помеховой обстановки в радиолокационной информационной системе на основе управления измерениями / В. А. Малышев, А. В. Толстых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 4(19). – С. 19. – EDN YNWWEO.

6. Оценка вероятности ложной тревоги обнаружения цели при интеграции информационных систем подводного наблюдения надводного корабля / М. Я. Андреев, А. В. Губарев, С. Н. Охрименко [и др.] // Датчики и системы. – 2019. – № 9(239). – С. 37-39. – EDN YXKOHX.

7. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. - СПб.: Научно-технические технологии, 2017. - 546 с.

8. Дворников, С. В. Упрощенное представление модели Ната для расчета затухания сигнала на открытых трассах / С. В. Дворников // Информация и космос. – 2017. – № 3. – С. 6-10. – EDN ZGWHNB.

9. Дворников, С. В. Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера / С. В. Дворников, А. Ф. Крячко, А. В. Пшеничников // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 84-89. – EDN GLQVYA.
10. Корrado В. А. Минимаксное обнаружение квазидетерминированного сигнала на фоне гауссовой помехи с псевдоистинной корреляционной матрицей // Радиотехника и электроника. – 1978 – Т. 23, № 2. – С. 326-333.
11. Бурнашев, М. В. О минимаксном обнаружении гауссовских стохастических последовательностей с неточно известными средними и ковариационными матрицами / М. В. Бурнашев // Проблемы передачи информации. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 70-84. – DOI 10.31857/S0555292322030068.
12. Лесковский, И. В. Непараметрические ранговые и знаковые обнаружители сигналов радиоэлектронных систем при множестве работающих РЭС при скученности судов / И. В. Лесковский, В. В. Попов // Транспортное дело России. – 2023. – № 2. – С. 229-234. – DOI 10.52375/20728689_2023_2_229.
13. Многоканальный обнаружитель источников помех / В. Н. Антипов, С. Л. Иванов, Е. Е. Колтышев [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2021. – Т. 75, № 2. – С. 57-65. – DOI 10.18127/j20700784-202102-06.
14. Дворников, С. В. Метод обнаружения сигналов диапазона ВЧ на основе двухэтапного алгоритма принятия решения / С. В. Дворников // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15, № 3. – С. 114-119. – EDN GYLGXA.
15. Likhttsinder, V. Y. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control / V. Y. Likhttsinder, Yu. O. Vakai // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Vol. 28, No. 3(67). – P. 75-89. – DOI 10.14498/tech.2020.3.5. – EDN RYA1HW.
16. Лихтциндер, Б. Я. Обобщение формул для моментов очереди при неординарном пуассоновском потоке для очередей пакетов в системах телекоммуникаций / Б. Я. Лихтциндер, А. Ю. Привалов // Проблемы передачи информации. – 2023. – Т. 59, № 4. – С. 32-37. – DOI 10.31857/S0555292323040046.
17. Акимов, П. С. Помехоустойчивость знакового и рангового обнаружителей в условиях воздействия шума и хаотических импульсных помех / П. С. Акимов, М. Н. Бирюков, В. Я. Литновский // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1986. – Т. 29 № 4. – С. 25-30.
18. Дворников, С. В. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона / С. В. Дворников, Г. Р. Овчинников, А. А. Балыков // Информация и космос. – 2019. – № 3. – С. 6-12. – EDN CGVGII.
19. Обнаружение радиосигналов / П. С. Акимов, Ф. Ф. Евстратов, С. И. Захаров [и др.] ; ред. А. А. Колосов – М. : Радио и связь, 1989. – 287 с.
20. Майоров, В. В. Имитационная модель для оценки вероятностей правильного и ложного обнаружений в устройствах поиска ФМШПС / В. В. Майоров // Теория и техника радиосвязи. – 2007. – № 2. – С. 39-43. – EDN MWCVCP.
21. Исследование субканальных шумов сигналов, сформированных по технологии ортогонального частотного мультиплексирования / А. Р. Бестугин, С. В. Дворников, А. Ф.

Крячко [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – № 3. – С. 123-129. – EDN VAIBLL.

22. Овчинников, А. А. Анализ и оптимизация схем кодирования для каналов с рэлеевскими замираниями / А. А. Овчинников, А. А. Фоминых // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 47-56. – DOI 10.36724/2409-5419-2023-15-3-47-56.

23. Помехоустойчивость сигналов с перестановочной частотной модуляцией в каналах с постоянными параметрами при некогерентном приеме / С. В. Дворников, Е. А. Попов, А. А. Балыков, С. С. Дворников // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 12(20). – С. 24-31. – DOI 10.18127/j00338486-201912(20)-04. – EDN KYZAPH.

24. Основы радиолокации: учебник для вузов / М. И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

25. Артемов, М. Л. Потенциальная точность пеленгования при флуктуациях диаграмм направленности антенной системы многоканального обнаружителя-пеленгатора / М. Л. Артемов, М. П. Сличенко, С. П. Трушин // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 1. – С. 123-131. – DOI 10.18127/j00338486-202201-17. – EDN KZZDDY.

26. Чернов, А. В. О применении функций Гаусса и Лапласа в сочетании с теоремой Колмогорова для аппроксимации функций многих переменных / А. В. Чернов // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. – 2024. – Т. 63. – С. 114-131. – DOI 10.35634/2226-3594-2024-63-08.

27. Акимов, П. С. Квазипараметричность рангового обнаружителя при импульсных помехах / П. С. Акимов, М. Н. Бирюков // Радиотехника. – 1985. – № 5. – С. 25-28.

28. Дворников, С. В. Билинейные распределения с пониженным уровнем интерференционного фона в частотно-временном пространстве (продолжение обзора) / С. В. Дворников // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 69-81. – EDN XRVQDR.

29. Дворников, С. В. Цифровой синтез спектрально-эффективных сигналов телевидения / С. В. Дворников // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2015. – № 6. – С. 168-173. – EDN VMBFIR.

Reference

1. Shukurova, S. Analysis of the issues of modeling the air traffic control process with increasing flight intensity / S. Shukurova, N. Rustamov // Innovative Technologies. – 2023. – No. S1-1. – P. 23-28.

2. Sabohat, M. Sh. Modernization of personnel training technology for the air traffic management and maintenance system / M. Sh. Sabohat, M. S. Ilkhomjan // Вестник Академии гражданской авиации. – 2022. – No. 3(26). – P. 26-34. – DOI 10.53364/24138614_2022_26_3_26.

3. Zatuchny, D. A. To the issue of formalizing the space of unintentional interference to the navigation systems of civil aviation aircraft / D. A. Zatuchny // Bulletin of St. Petersburg State University of Civil Aviation. - 2019. - № 2(23). - С. 56-63. - EDN DNMTUD.

4. Dvornikov, S. V. Increasing the noise immunity of decimeter radio channel transmissions in the conditions of unintentional interference / S. V. Dvornikov, E. V. Markov, E. A. Manoshi // T-Comm: Telecommunications and Transport. - 2021. - Т. 15, № 6. - С. 4-9. - DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-6-4-9. - EDN KHPWMU.

5. Malyshev, V. A. Algorithm of automatic recognition of interference situation in radar information system based on measurement control / V. A. Malyshev, A. V. Tolstykh // Modeling, optimization and information technologies. - 2017. - № 4(19). - P. 19. - EDN YNWWEO.
6. Estimation of the false alarm probability of target detection during the integration of underwater surveillance information systems of a surface ship / M. Y. Andreev, A. V. Gubarev, S. N. Ohrimenko [et al.] // Sensors and Systems. - 2019. - № 9(239). - C. 37-39. - EDN YXKOXC.
7. Makarenko S. I. Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars of the early XXI century. - SPb.: Science-intensive technologies, 2017. - 546 c.
8. Dvornikov, S. V. Simplified representation of the Hata model for calculating signal fading on open paths / S. V. Dvornikov // Information and Space. - 2017. - № 3. - C. 6-10. - EDN ZGWHNB.
9. Dvornikov, S. V. Modeling of radio engineering systems in conflict situations of cognitive nature / S. V. Dvornikov, A. F. Kryachko, A. V. Pshenichnikov // Wave electronics and information systems : Collection of articles of the XXII International Scientific Conference : 2 parts, St. Petersburg, June 03-07, 2019. Volume Part 2. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019. - C. 84-89. - EDN GLQVYA.
10. Corado V. A. Minimax detection of a quasi-deterministic signal in the background of a Gaussian iomgui with a psiistic correlation matrix // Radiotekhnika i elektronika. - 1978 - T. 23, № 2. - C. 326-333.
11. Burnashev, M. V. About minimax detection of Gaussian stochastic sequences with inaccurately known mean and covariance matrices / M. V. Burnashev // Problems of information transfer. - 2022. - T. 58, № 3. - C. 70-84. - DOI 10.31857/S0555292322030068.
12. Leskovskiy, I. V. Nonparametric rank and sign detectors of signals of radio-electronic systems at a set of working RPS at crowding of ships / I. V. Leskovskiy, V. V. Popov // Transportnoe delo Rossii. - 2023. - № 2. - C. 229-234. - DOI 10.52375/20728689_2023_2_229.
13. Multichannel interference source detector / V. N. Antipov, S. L. Ivanov, E. E. Koltyshev [et al.] // Uspekhi sovremennoi radioelectronics. - 2021. - T. 75, № 2. - C. 57-65. - DOI 10.18127/j20700784-202102-06.
14. Dvornikov, S. V. Method of the RF signal detection on the basis of the two-stage decision making algorithm / S. V. Dvornikov // Scientific Instrument Engineering. - 2005. - T. 15, № 3. - C. 114-119. - EDN GYLGXA.
15. Likhttsinder, B. Y. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control / B. Y. Likhttsinder, Yu. O. Bakai // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Vol. 28, No. 3(67). – P. 75-89. – DOI 10.14498/tech.2020.3.5. – EDN RYAIHW.
16. Likhtzinder, B. Ya. Generalization of formulas for queueing moments under the non-ordinary Poisson flow for packet queues in telecommunication systems / B. Ya. Likhtzinder, A. Yu. - 2023. - T. 59, № 4. - C. 32-37. - DOI 10.31857/S0555292323040046.
17. Akimov, P. S., Interference immunity of sign and rank detectors under the influence of noise and chaotic pulse interference / P. S. Akimov, M. N. Biryukov, V. Y. Litnovskiy // Izv. of Vuzov. Radioelectronics. - 1986. - T. 29 № 4. - C. 25-30.
18. Dvornikov, S. V. Software simulator of the ionospheric radio channel of the decameter band / S. V. Dvornikov, G. R. Ovchinnikov, A. A. Balykov // Information and Space. - 2019. - № 3. - C. 6-12. - EDN CGVGII.
19. Radio signal detection / P. S. Akimov, F. F. Evstratov, S. I. Zakharov [et al.] ; edited by A. A. Kolosov- M. : Radio and Communications, 1989. - 287 c.

20. Mayorov, V. V. Simulation model for estimating the probabilities of correct and false detections in the search devices of the FMSPS / V. V. Mayorov // Theory and technique of radio communication. - 2007. - № 2. - С. 39-43. - EDN MWCVCP.
21. Investigation of the subchannel noise of the signals formed by the orthogonal frequency multiplexing technology / A. R. Bestugin, S. V. Dvornikov, A. F. Kryachko [et al.] // Voprosy radioelektroniki. Series: Technics of television. - 2018. - № 3. - С. 123-129. - EDN VAIBLL.
22. Ovchinnikov, A. A. Analysis and optimization of coding schemes for channels with Rayleigh fading / A. A. Ovchinnikov, A. A. Fominykh // Science-intensive technologies in Earth space research. - 2023. - Т. 15, № 3. - С. 47-56. - DOI 10.36724/2409-5419-2023-15-3-47-56.
23. Interference immunity of signals with permutation frequency modulation in channels with constant parameters at incoherent reception / S. V. Dvornikov, E. A. Popov, A. A. Balykov, S. S. Dvornikov // Radiotekhnika. - 2019. - Т. 83, № 12(20). - С. 24-31. - DOI 10.18127/j00338486-201912(20)-04. - EDN KYZAPH.
24. Fundamentals of radiolocation: a textbook for universities / M. I. Finkelstein. - Moscow: Radio and communications, 1983. - 536 с.
25. Artemov, M. L. Potential accuracy of direction finding at fluctuations of the antenna system directional diagrams of a multichannel detector-finder / M. L. Artemov, M. P. Slichenko, S. P. Trushin // Radiotekhnika. - 2022. - Т. 86, № 1. - С. 123-131. - DOI 10.18127/j00338486-202201-17. - EDN KZZDDY.
26. Chernov, A. V. On the application of Gauss and Laplace functions in combination with Kolmogorov's theorem for approximation of functions of many variables / A. V. Chernov // Izvestiya Institutmatematiki i Informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta. - 2024. - Т. 63. - С. 114-131. - DOI 10.35634/2226-3594-2024-63-08.
27. Akimov, P. S. Quasi-parametricity of a rank detector under pulse interference / P. S. Akimov, M. N. Biryukov // Radiotekhnika. - 1985. - N 5. - С 25-28.
28. Dvornikov, S. V. Bilinear distributions with a reduced level of the interference background in the frequency-time space (review continuation) / S. V. Dvornikov // Proceedings of communication educational institutions. - 2018. - Т. 4, № 2. - С. 69-81. - EDN XRVQDR.
29. Dvornikov, S. V. Digital synthesis of spectrally efficient television signals / S. V. Dvornikov // Voprosy radioelektroniki. Series: Technics of television. - 2015. - № 6. - С. 168-173. - EDN VMBFIR.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дворников Сергей Сергеевич – доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств (Кафедра 23) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, кандидат технических наук.

Е-mail: dvornik92@mail.com

Дворников Сергей Викторович - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств (Кафедра 23) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного.

Е-mail: practicdsv@yandex.ru

Александр Роальдович Бестугин – д.т.н., профессор, директор Института радиотехники электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, SPIN-код: 1584-4019, AuthorID: 33418.

E-mail: fresguap@mail.ru

Ирина Анатольевна Киришина – к.э.н., доцент, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, SPIN-код: 1904-9672, AuthorID: 682156.

E-mail: ikirshina@mail.ru

Ненасhev Вадим Александрович – доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией машинного обучения Инженерной школы ГУАП. SPIN-код: 6728-6108. AuthorID: 745612.

E-mail: nenashev.va@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dvornikov S.S. – Associate Professor of the Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Means (Department 23) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Researcher of the Research Department, Military Academy of Communications, candidate of technical sciences.

E-mail: dvornik92@mail.com

Dvornikov S. V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Means (Department 23) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Professor of the Department of Radio Communication of the Military Academy of Communications.

Telephone: 8 812 247 94 00 E-mail: practicdsv@yandex.ru

Alexander R. Bestugin – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of Institute of radio engineering, electronics and communication, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, SPIN-код: 1584-4019, AuthorID: 33418.

E-mail: fresguap@mail.ru

Irina A. Kirshina –Ph. D. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Designing and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, SPIN-код: 1904-9672, AuthorID: 682156.

E-mail: ikirshina@mail.ru

Nenashev V. A. - Associate Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Candidate of

Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Machine Learning Laboratory of the Engineering School of SUAI

E-mail: nenashev.va@yandex.ru