

ОДНОПороГОВЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОПАДАЮЩЕГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО РАДИОИМПУЛЬСА*

Ю. Э. Корчагин, С. А. Слинчук

*Воронежский государственный университет,
Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Воронежский государственный технический университет*

Поступила в редакцию 16.10.2017 г.

Аннотация. Выполнен синтез однопорогового последовательного алгоритма оценки длительности пропадающего прямоугольного радиоимпульса. Предполагалось что в наблюдаемой реализации сигнал может отсутствовать. Предложен эвристический алгоритм оценки длительности, позволяющий сократить время анализа наблюдаемой реализации. Найдены характеристики эффективности функционирования однопорогового последовательного алгоритма оценки и выполнено сравнение его точности с точностью известного максимально правдоподобного алгоритмов оценки. Показано, что сокращение времени анализа возможно за счет снижения точности оценки длительности. Исследовано влияние возможного пропадания сигнала на точность оценки длительности.

Ключевые слова: оценка длительности, пропадающий сигнал, прямоугольный радиоимпульс, амплитуда, начальная фаза, максимально правдоподобный алгоритм, рассеяние оценки, время принятия решения.

THE SINGLE-THRESHOLD SEQUENTIAL ALGORITHM FOR THE DURATION ESTIMATION OF THE MISSING RECTANGULAR RADIO PULSE

Yu. E. Korchagin, S. A. Slinchuk

Abstract. A single-threshold sequential algorithm of estimating duration of a decaying rectangular radio pulse has been synthesized. It was assumed that in the observed implementation the signal may be absent. A heuristic algorithm of estimating duration, which makes it possible to reduce analysis time of the observed implementation, has been proposed. The performance characteristics of a single-threshold sequential estimation algorithm has been found, and its accuracy with the accuracy of the known maximum likelihood estimation algorithms has been compared. We are shown that the reduction analysis time is possible due to decrease in accuracy of the evaluation of duration. The effect of a possible signal loss on the accuracy of estimate duration has been investigated.

Keywords: duration estimation, missing signal, rectangular radio signal, amplitude, initial phase, maximum likelihood algorithm, variance of the estimate, decision time.

Задачи обработки сигналов, прошедших неустойчивый канал распространения имеют большое практическое и теоретическое значение при изучении распространения радиоволн. Такими являются каналы подвижной радиосвязи в условиях пересечённой местности, каналы, использующие отражение радиоволн от метеорных следов или спорадического слоя E в ионосфере и др. Оценка длительности сигнала, отражённого от спорадического слоя E даёт возможность получить представление о времени существования этого слоя. Однако,

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-49-00079)
© Корчагин Ю. Э., Слинчук С. А., 2017

неустойчивость канала распространения приводит к возможности пропадания сигнала. Поэтому представляет интерес синтез и анализ алгоритмов оценки длительности пропадающего радиоимпульса, наблюдаемого на фоне шума.

Задача оценки длительности сигнала на фоне аддитивного гауссовского белого шума рассматривалась в ряде работ [1–6]. Были синтезированы максимально правдоподобные (МП) и байесовские алгоритмы оценки длительности квазидетерминированного сигнала, радиоимпульса с неизвестными начальной фазой и амплитудой и начальной фазой. Найдены теоретические и экспериментальные характеристики оценки. Однако МП алгоритм приводит к необходимости анализа принятой реализации на всём априорном интервале возможных значений длительности сигнала. В работе [7] на примере задачи обнаружения и оценки момента разладки интенсивности пуассоновского потока показано, что сократить время анализа позволяет применение однопорогового последовательного (ОПП) алгоритма, который для квазидетерминированного сигнала с неизвестной длительностью синтезирован в [8]. Далее целесообразно исследовать ООП алгоритм оценки длительности пропадающего радиосигнала. В данной работе выполнен синтез и анализ ООП алгоритма оценки длительности узкополосного радиоимпульса с прямоугольной формой огибающей.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ доступна наблюдению реализация

$$x(t) = \gamma_0 s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) + n(t)$$

аддитивной смеси полезного сигнала

$$s(t, a, \varphi, \tau) = \begin{cases} a \cos(\omega t - \varphi), & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t < 0, t > \tau \end{cases} \quad (1)$$

и гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Здесь a_0, φ_0, τ_0 — амплитуда, начальная фаза и длительность принятого сигнала соответственно. Будем считать, что длительность сигнала может принимать значения из априорного интервала

$$\tau \in [T_1, T_2]. \quad (2)$$

Дискретный параметр γ_0 может с вероятностью p_1 принимать значение $\gamma_0 = 1$ (сигнал присутствует) и с вероятностью $p_0 = 1 - p_1$ — значение $\gamma_0 = 0$ (сигнал отсутствует). Длительность сигнала будем считать случайной величиной, заданной на интервале (2) и обладающей априорной плотностью вероятности $W_{1pr}(\tau)$ при $\gamma_0 = 1$ и $W_{0pr}(\tau) = \delta(\tau)$ при $\gamma_0 = 0$. Будем также считать, что интервал наблюдения удовлетворяет условию $0 < T_1 \leq T_2 \leq T$, так что сигнал (1) полностью размещается в этом интервале. Располагая реализацией $x(t)$, необходимо сформировать оценку длительности сигнала (1).

Для синтеза алгоритма оценивания можно воспользоваться методом МП [1–3], согласно которому МП оценка длительности совпадает с положением абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП) [2, 6]

$$L(a, \varphi, \tau) = \frac{2a}{N_0} \int_0^\tau x(t) \cos(\omega t - \varphi) dt - \frac{a^2 \tau}{2N_0}. \quad (3)$$

Здесь отброшены интегралы от функций, осциллирующих с удвоенной частотой [2, 6].

Положение максимума логарифма ФОП по переменной τ можно найти с помощью его последовательной максимизации сначала по амплитуде и начальной фазе, затем по длительности

$$\tau_m = \arg \sup L(\tau), \quad L(\tau) = \sup_{a, \varphi} L(a, \varphi, \tau).$$

Выполняя аналогично [6] максимизацию выражения (3) по амплитуде и начальной фазе, получаем

$$L(\tau) = N_0 \frac{X_1^2(\tau) + Y_1^2(\tau)}{2\tau}, \quad (4)$$

$$X_1(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau x(t) \cos(\omega t) dt, \quad Y_1(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau x(t) \sin(\omega t) dt. \quad (5)$$

Таким образом, приёмное устройство формирует логарифм ФОП (4) для всех возможных значений длительности из априорного интервала (2) и находит МП оценку длительности как положение его абсолютного максимума.

В тех случаях, когда требуется уменьшить время анализа, целесообразно использовать ОПП алгоритм [7,8], согласно которому анализ решающей статистики $L(\tau)$ (4) начинается в момент времени T_1 , а прекращается либо в момент $\tau' < T_2$ первого превышения ею порога h , либо в момент времени T_2 , если $\tau' \geq T_2$. Порог h определяется выбранным критерием оптимальности. При этом среднее время анализа принятой реализации не превосходит T_2 и может изменяться соответствующим выбором порога. В качестве пороговой оценки длительности используют величину

$$\tau^* = \begin{cases} T_1, \tau' < T_1, \\ \tau', T_1 \leq \tau' \leq T_2, \\ T_2, \tau' > T_2, \end{cases}$$

которая совпадает с временем принятия решения ОПП алгоритма $T_a = \tau^*$.

Блок-схема ОПП алгоритма оценивания длительности сигнала изображена на рис. 1.

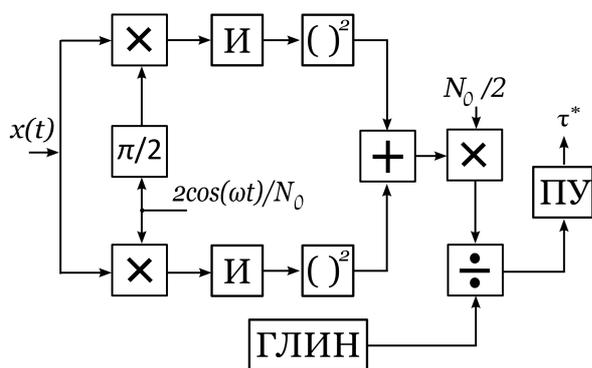


Рис. 1. Здесь обозначено И – интегратор на интервале времени $[0, t]$, ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения, ПУ – пороговое устройство, осуществляющее сравнение выходного сигнала интегратора с порогом h и фиксирующее время $t = \tau^*$, равное пороговой оценке длительности.

Поскольку ОПП алгоритм может обеспечить сокращение времени анализа (принятия решения) по сравнению с МП алгоритмом, найдём среднее время анализа наблюдаемой реализации ОПП алгоритмом. Статистические характеристики времени анализа можно определить, зная статистические характеристики случайной величины τ' . Наиболее полной характеристикой времени τ' первого достижения границы h реализацией логарифма ФОП является его функция распределения. Обозначим $L_j(\tau) = L(\tau | \gamma_0 = j)$, $j = 0, 1$, $T_{aj} = T_a$, $t_j = \tau'$ при $\gamma_0 = j$, $F_j(h, T)$ – функция распределения времени t_j

$$F_j(h, T) = P \{t_j < T\}. \quad (6)$$

Вероятность достижения границы $F_j(h, T)$ можно выразить через вероятность

$$G_j(h, T) = P \left\{ L_j(\tau) < h \right\}_{T_1 \leq \tau \leq T}, \quad (7)$$

недостижения процессом $L_j(\tau)$ границы h к моменту времени T

$$F_j(h, T) = 1 - G_j(h, T).$$

Для определения функции (7) исследуем статистические характеристики случайных процессов $L_j(\tau)$. Подставив выражения (5) в формулу (4) и отбрасывая интегралы от функций, осциллирующих с удвоенной частотой, перепишем логарифм ФОП $L_j(\tau)$ в виде

$$L_j(\tau) = \frac{[z_0^2 j \min(1, \tau/\tau_0) \cos \varphi_0 + N_c(\tau)]^2 + [z_0^2 j \min(1, \tau/\tau_0) \sin \varphi_0 + N_s(\tau)]^2}{2z_0^2 \tau/\tau_0}. \quad (8)$$

Здесь обозначено:

$$N_c(\tau) = \frac{2a_0}{N_0} \int_0^\tau n(t) \cos(\omega t) dt, \quad N_s(\tau) = \frac{2a_0}{N_0} \int_0^\tau n(t) \sin(\omega t) dt,$$

$z_0^2 = a_0^2 \tau_0 / N_0$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приёмника МП для принятого сигнала. Шумовые составляющие $N_c(\tau)$, $N_s(\tau)$ представляют собой линейные преобразования гауссовского случайного процесса, и поэтому также являются гауссовскими. Они обладают нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями

$$\langle N_c(\tau_1) N_c(\tau_2) \rangle = \langle N_s(\tau_1) N_s(\tau_2) \rangle = z_0^2 \min(\tau_1, \tau_2) / \tau_0, \quad \langle N_c(\tau_1) N_s(\tau_2) \rangle = 0.$$

Перейдём в выражении (8) к переменной $\lambda = z_0^2 \tau / \tau_0$, $\Lambda_1 \leq \lambda \leq \Lambda_2$, $\Lambda_1 = z_0^2 T_1 / \tau_0$, $\Lambda_2 = z_0^2 T_2 / \tau_0$. Тогда логарифм ФОП (8) как функция переменной λ может быть представлен выражением

$$L_j(\lambda) = \frac{j \min^2(\lambda_0, \lambda) + 2j \min(\lambda_0, \lambda) N_1(\lambda) + N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)}{2\lambda},$$

где $\lambda_0 = z_0^2$, а $N_c(\lambda)$ и $N_s(\lambda)$ — гауссовские статистически независимые случайные процессы с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями

$$\langle N_c(\lambda_1) N_c(\lambda_2) \rangle = \langle N_s(\lambda_1) N_s(\lambda_2) \rangle = \min(\lambda_1, \lambda_2), \quad (9)$$

$$N_1(\lambda) = N_c(\lambda) \cos \varphi_0 + N_s(\lambda) \sin \varphi_0$$

— гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией (9), т. е. стандартный винеровский процесс.

Найдём сначала вероятность (7) при отсутствии сигнала в принятой реализации $j = 0$. Она представляет собой вероятность недостижения границы h случайным процессом

$$L_0(\lambda) = \frac{N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)}{2\lambda}.$$

Асимптотическое выражение для искомой вероятности (7) получено в работе [9]

$$P \{L_0(\lambda) < h, \lambda \in [\Lambda_1, \Lambda]\} \approx \begin{cases} (\Lambda_1/\Lambda)^{h \exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 0, & h < 1. \end{cases}$$

Отсюда находим приближённое выражение для функции распределения (6) при $j = 0$

$$F_0(h, T) \approx \begin{cases} 1 - (T_1/T)^{h \exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 1, & h < 1. \end{cases} \quad (10)$$

Точность этой формулы возрастает с увеличением порога h и отношения T_1/T .

Найдём теперь вероятность (7), а также функцию распределения времени первого достижения границы (6) при наличии сигнала в принятой реализации. При $j = 1$ решающая статистика (4) принимает вид

$$L_1(\lambda) = \frac{\min^2(\lambda_0, \lambda)}{2\lambda} + \frac{\min(\lambda_0, \lambda)N_1(\lambda)}{\lambda} + \frac{N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)}{2\lambda}.$$

Перейдём в последнем выражении к новой переменной $l = \lambda/\lambda_0$, $T_1/\tau_0 \leq l \leq T_2/\tau_0$. Тогда

$$L_1(l) = z_0^2 \frac{\min^2(1, l)}{2l} + z_0 \frac{\min(1, l)N_1(l)}{l} + \frac{N_c^2(l) + N_s^2(l)}{2l}.$$

При достаточно больших ОСШ последним слагаемым можно пренебречь по сравнению с предыдущими и, возвращаясь к переменной λ , записать приближённо

$$L_1(\lambda) \approx \frac{\min^2(\lambda_0, \lambda)}{2\lambda} + \frac{\min(\lambda_0, \lambda)}{\lambda} N_1(\lambda). \quad (11)$$

Функция распределения момента первого достижения границы случайным процессом (11) найдена в [10]

$$F_1(h, T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\Lambda_1}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi - h + \Lambda_1/2)^2}{2\Lambda_1}\right] \times \\ \times \left\{ \Phi\left(\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}}{2}\right) - \exp(\xi)\Phi\left(-\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}}{2}\right) \right\} d\xi, \quad \Lambda \leq \lambda_0, \quad (12)$$

$$F_1(h, T) = 1 - \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi + \lambda_0/2)^2 + h^2 - h\lambda_0}{2\lambda_0}\right] \times \\ \times \left[\Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}{2} + \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}\right) - \exp(-\xi)\Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}{2} - \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}\right) \right] \times \\ \times \left\{ \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0 - \Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} + \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0 - \Lambda_1)}}\right) \exp\left[\frac{h\xi}{\lambda_0}\right] - \right. \\ \left. - \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0 - \Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} - \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0 - \Lambda_1)}}\right) \exp\left[-\frac{h\xi}{\lambda_0}\right] \right\} \frac{d\xi}{\sqrt{2\pi\lambda_0}}, \quad \Lambda > \lambda_0, \quad (13)$$

где $\Lambda = z_0^2 T/\tau_0$, $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi}$ — интеграл вероятности.

Используя выражения (10), (12), находим среднее время анализа ОПП алгоритмом

$$\langle T_a \rangle = p_0 \langle T_{a1} \rangle + p_1 \langle T_{a2} \rangle,$$

$$\langle T_{aj} \rangle = P\{t_j < T_1\} T_1 + \langle t_j \rangle + P\{t_j > T_2\} T_2 = T_2 \left[\eta_1 + \int_{\eta_1}^1 [1 - F_j(h, \eta)] d\eta \right].$$

Выигрыш во времени анализа ОПП алгоритмом по сравнению с алгоритмом МП будем характеризовать величиной

$$\chi = \frac{\langle T_a \rangle}{T_2} = \eta_1 + p_0 \int_{\eta_1}^1 [1 - F_0(h, \eta)] d\eta + p_1 \int_{\eta_1}^1 [1 - F_1(h, \eta)] d\eta, \quad (14)$$

а точность ОПП алгоритма оценки длительности — безусловным рассеянием [2]

$$V(h) = p_0 V_0(h) + p_1 V_1(h),$$

где $V_j(h) = \int_{T_1}^{T_2} W_{j\text{ пр}}(\tau) V_j(h|\tau) d\tau$ — безусловные рассеяния пороговой оценки длительности, а

$$V_j(h|j\tau_0) = (T_1 - j\tau_0)^2 P\{t_j < T_1\} + (T_2 - j\tau_0)^2 P\{t_j > T_2\} + \int_{T_1}^{T_2} (T - j\tau_0)^2 dF_j(h, T)$$

— условные рассеяния пороговой оценки длительности при отсутствии и наличии сигнала в принятой реализации соответственно, $j = 0, 1$. Для определения порога h можно использовать критерий минимума безусловного рассеяния пороговой оценки, то есть определять порог как $h_V = \arg \inf V(h)$. Будем называть такой порог оптимизированным по критерию минимума безусловного рассеяния пороговой оценки.

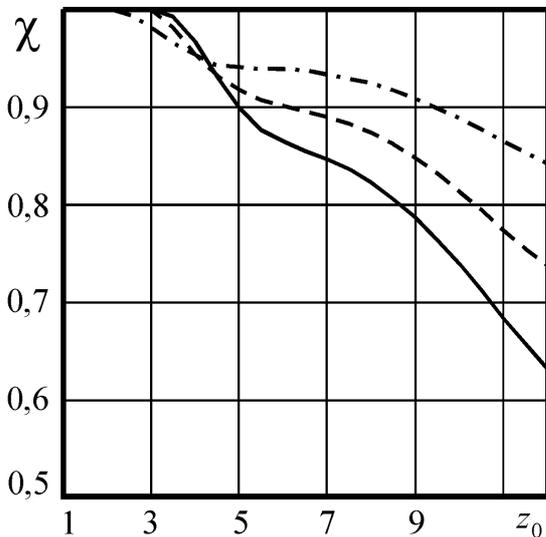


Рис. 2.

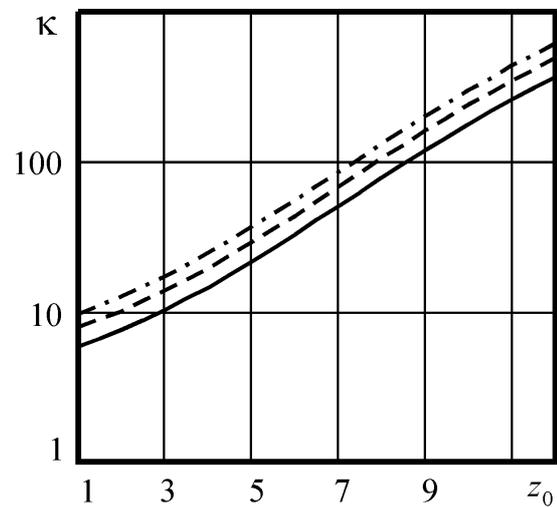


Рис. 3.

На рис. 2 показаны зависимости выигрыша (14) во времени анализа от ОСШ z_0 для прямоугольного радиоимпульса при оптимизированном пороге h_V . Сплошная кривая построена для $p_0 = 0,3$, штриховая — для $p_0 = 0,5$, штрих-пунктирная — для $p_0 = 0,7$. Априорная плотность вероятности неизвестной длительности при наличии сигнала была выбрана равномерной $W_{1\text{ пр}}(\tau) = 1/(T_2 - T_1)$, а при отсутствии сигнала, равной дельта функции $W_{0\text{ пр}}(\tau) = \delta(\tau)$. Зависимости на рис. 2 рассчитаны для значения динамического диапазона изменения неизвестной длительности $T_2/T_1 = 10$. Как видно из рис. 2, применение ОПП алгоритма оценки длительности позволяет добиться сокращения время анализа до 30% при ОСШ по напряжению до 10. При этом выигрыш во времени анализа возрастает с уменьшением априорной вероятности отсутствия сигнала и снижается с увеличением ОСШ.

Введём в рассмотрение проигрыш в точности ОПП оценки по сравнению с точностью МП оценки

$$\kappa = V(h)/V_0, \tag{15}$$

где $V_0 = 26\tau_0^2/z_0^4$ — рассеяние МП оценки длительности сигнала, присутствующего в принятой реализации с вероятностью 1 и найденное в [6].

На рис. 3 изображены зависимости от ОСШ z_0 проигрыша (15) ОПП оценки длительности прямоугольного радиоимпульса для оптимизированного порога h_V , равномерного распределения неизвестной длительности $W_{1pr}(\tau) = 1/(T_2 - T_1)$, $W_{0pr}(\tau) = \delta(\tau)$ и значения динамического диапазона изменения неизвестной длительности $T_2/T_1 = 10$. Сплошная кривая построена для $p_0 = 0,3$, штриховая — для $p_0 = 0,5$, штрих-пунктирная — для $p_0 = 0,7$.

Как видно из рис. 3 точность ОПП оценки оказывается заметно хуже точности оценки МП. Следовательно, сокращение времени анализа в результате применения ОПП алгоритма достигается за счёт ухудшения точности оценивания. Приведённые результаты позволяют найти разумный компромисс между необходимой точностью оценивания длительности сигнала и желательным сокращением времени анализа по сравнению с максимально правдоподобным алгоритмом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосулин, Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю. Г. Сосулин. — М. : Радио и связь, 1992.
2. Трифонов, А. П. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех / А. П. Трифонов, Ю. С. Шинаков. — М. : Радио и связь, 1986.
3. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. — М. : Сов. радио, 1977.
4. Трифонов, А. П. Приём сигнала с неизвестной длительностью / А. П. Трифонов, Ю. Э. Корчагин // Известия вузов. Радиофизика. — 2002. — Т. 65, № 7. — С. 625–637.
5. Корчагин, Ю. Э. Оценка длительности радиоимпульса с неизвестной фазой / Ю. Э. Корчагин // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2013. — Т. 56, № 7. — С. 29–37.
6. Корчагин, Ю. Э. Оценка длительности радиосигнала с неизвестными амплитудой и фазой / Ю. Э. Корчагин // Радиотехника. — 2013. — № 9. — С. 11–19.
7. Галун, С. А. Обнаружение и оценка момента изменения интенсивности пуассоновского потока / С. А. Галун, А. П. Трифонов // Автоматика и телемеханика. — 1982. — № 6. — С. 95–105.
8. Трифонов, А. П. Однопороговый последовательный алгоритм приема сигнала с неизвестной длительностью / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова, Ю. Э. Корчагин // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 2006. — Т. XLIX, № 6. — С. 525–536.
9. Трифонов, А. П. Обнаружение радиосигнала с неизвестными длительностью, амплитудой и начальной фазой / А. П. Трифонов, Ю. Э. Корчагин, М. В. Трифонов // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 5. — С. 401–414.
10. Корчагин, Ю. Э. Однопороговый последовательный алгоритм обнаружения сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью / Ю. Э. Корчагин // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 2012. — Т. 55, № 12. — С. 800–808.

REFERENCES

1. Sosulin Yu.G. Theoretical basis of radar and radio navigation. [Sosulin Yu.G. Teoreticheskie osnovy radiolokacii i radionavigacii]. Moscow: Radio and communications, 1992.
2. Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. The joint assessment of the distinction between signals and their parameters on the background noise. [Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. Sovmestnoe razlichenie signalov i ocenka ih parametrov na fone pomeh]. Moscow: Radio and communications, 1986.
3. Repin V.G., Tartakovskii G.P. Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems. [Repin V.G., Tartakovskii G.P. Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptaciya informacionnyh sistem]. Moscow: Sov, radio, 1977.
4. Trifonov A.P. Korchagin Yu.E. Receiving the signal of unknown duration. [Trifonov A.P. Korchagin Yu.E. Priem signala s neizvestnoi dlitel'nost'yu]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij*.

Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics, 2002, vol. 45, no. 5, pp. 625–637.

5. Korchagin Yu.E. Estimation of the radio pulse duration with unknown phase. [Korchagin Yu.E'. Ocenka dlitel'nosti radioimpul'sa s neizvestnoj fazoj]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, vol. 56, no. 7. pp. 29–37.

6. Korchagin Yu.E. Estimation duration of signal with unknown amplitude and phase. [Korchagin Yu.E. Ocenka dlitel'nosti radiosignala s neizvestnymi amplitudoi i fazoi]. *Radiotekhnika — Radioengineering*, 2013, no. 9, pp. 11–19.

7. Galun S.A., Trifonov A.P. Detection and estimation of the moment of change in the intensity of a Poisson flow. [Galun S.A., Trifonov A.P. Obnaruzhenie i ocenka momenta izmeneniya intensivnosti puassonovskogo potoka]. *Avtomatika i telexanika — Automation and Remote Control*, 1982, no. 6, pp. 95–105.

8. Trifonov A.P., Bepalova M.B., Korchagin Yu.E. Single-threshold sequential algorithm for receiving a signal with unknown duration. [Trifonov A.P., Bepalova M.B., Korchagin Yu.E'. Odnoporogovyy posledovatel'nyj algoritm priema signala s neizvestnoj dlitel'nost'yu]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, vol. 49, no. 6, pp. 525–536.

9. Trifonov A.P., Korchagin Yu.E., Trifonov M.V. Detection of Radio Signals with Unknown Duration, Amplitude, and Initial Phase. [Trifonov A.P., Korchagin Yu.E', Trifonov M.V. Obnaruzhenie radiosignala s neizvestnymi dlitel'nost'yu, amplitudoj i nachal'noj fazoj]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 401–414.

10. Korchagin Yu.E. Threshold serial algorithm for detecting of signal with unknown amplitude and duration. [Korchagin Yu.E. Odnoporogovyi posledovatel'nyi algoritm obnaruzheniya signala s neizvestnymi amplitudoi i dlitel'nost'yu]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics*, 2012, vol. 55, no. 12, pp. 800–808.

Корчагин Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор каф. радиофизики ВГУ, г. Воронеж, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем НИУ “МЭИ”, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-89-16

Korchagin Yurii Eduardovich, Doctor of physico-mathematical sciences, Professor of the Department of radiophysic of Voronezh State University. Voronezh, Associate Professor Department of Radio Engineering Devices and Antenna Systems of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russian Federation
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-89-16

Слинчук Светлана Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент каф. радиотехники ВГТУ, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: sslinchuk@gmail.com
Тел.: +7(903)650-52-02

Slinchuk Svetlana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Accosiate Professor of the Department of radiophysic of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: sslinchuk@gmail.com
Tel.: +7(903)650-52-02