

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОПАДАЮЩЕГО РАДИОИМПУЛЬСА*

Ю. Э. Корчагин, П. А. Кондратович, М. В. Трифонов

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

Поступила в редакцию 01.09.2018 г.

Аннотация. Выполнен синтез однопорогового последовательного алгоритма оценки длительности пропадающего радиоимпульса с произвольной формой огибающей. Предполагалось, что в наблюдаемой реализации сигнал может отсутствовать. Предложен эвристический однопороговый последовательный 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 алгоритма оценки. Показано, что сокращение времени анализа возможно за счет снижения точности оценки длительности. Исследовано влияние возможного пропадания сигнала на точность оценки длительности. Результаты конкретизированы для радиоимпульса с экспоненциально изменяющейся огибающей.

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

THE SEQUENTIAL ALGORITHM FOR THE DURATION ESTIMATION OF THE MISSING RADIO PULSE

Yu. E. Korchagin, P. A. Kondratovich, M. V. Trifonov

Abstract. A synthesis of a single-threshold sequential algorithm for estimating the duration of a missing radio pulse with an arbitrary envelope is performed. We assumed that in the observed implementation the signal may be absent. We propose a heuristic one-threshold sequential duration estimation algorithm to reduce the analysis time of the observed implementation. 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. The results are concretized for a radio pulse with an exponentially varying envelope.

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

Задача оценки длительности сигнала на фоне аддитивного гауссовского белого шума актуальна для практических приложений статистической радиофизики, например, при изучении распространения радиоволн в неустойчивых каналах. Такими являются каналы подвижной радиосвязи в условиях пересечённой местности, каналы, использующие отражение радиоволн от метеорных следов или спорадического слоя E в ионосфере, и др. Неустойчивость

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-49-00079)

© Корчагин Ю. Э., Кондратович П. А., Трифонов М. В., 2018

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

Алгоритмы оценки длительности сигнала на фоне аддитивного гауссовского белого шума к настоящему времени довольно хорошо изучены как для регулярных, так и для разрывных сигналов [1–6]. Были синтезированы максимально правдоподобные (МП) и байесовские алгоритмы оценки длительности для различных моделей сигналов, которые требуют 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. На основе подхода, предложенного в [7], синтезированы ОПП алгоритмы оценки длительности квазидетерминированного сигнала [8, 9] и радиоимпульса с прямоугольной формой огибающей [10]. В данной работе выполнен синтез и анализ ОПП алгоритма оценки длительности узкополосного радиоимпульса с огибающей произвольной формы.

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

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

и гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 , $f(t)$ — непрерывная функция, описывающая форму огибающей радиосигнала, a_0, φ_0, τ_0 — амплитуда, начальная фаза и длительность принятого сигнала соответственно. Будем считать, что длительность сигнала принимает 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).

Предположим сначала, что сигнал присутствует в принятой реализации с вероятностью $p_1 = 1$. Для синтеза алгоритма оценивания длительности можно воспользоваться методом МП [1–3], согласно которому МП оценка длительности совпадает с положением абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП) [2, 6, 11]

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

Здесь отброшены интегралы от функций, осциллирующих с удвоенной частотой [2, 6, 11]. 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, 11] максимизацию выражения (3) по амплитуде и начальной фазе, получаем

$$L(\tau) = (X_1^2(\tau) + Y_1^2(\tau))/q(\tau), \quad (4)$$

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

$$q(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau f^2(t) dt.$$

Таким образом, приёмное устройство должно формировать логарифм ФОП (4) для всех возможных значений длительности из априорного интервала (2) и находить МП оценку длительности как положение его абсолютного максимума [6].

Если требуется уменьшить время анализа, можно использовать ОПП алгоритм [8–10], 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 в течение интервала времени $[T_1, T_2]$, порог не превышен. 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

$$\tau^* = \begin{cases} T_1, \tau' < T_1, \\ \tau', T_1 \leq \tau' \leq T_2, \\ T_2, \tau' > T_2, \end{cases} \quad (6)$$

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

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

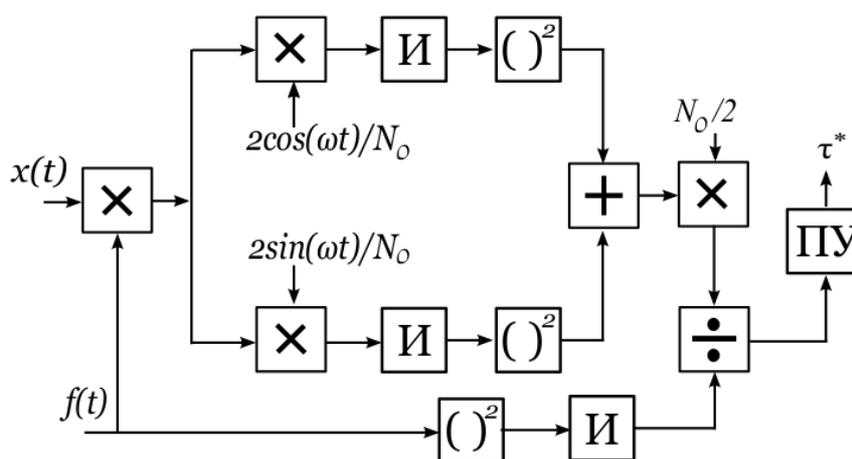


Рис. 1.

Здесь обозначено И — интегратор на интервале времени $[0, t]$, ПУ — пороговое устройство, осуществляющее сравнение сигнала с порогом h и фиксирующее время $t = \tau^*$, равное пороговой оценке длительности.

Будем считать далее, что сигнал может отсутствовать в принятой реализации. Найдём аналогично [8–10] среднее время анализа наблюдаемой реализации ОПП алгоритмом (6) с учётом возможного пропадания сигнала. Статистические характеристики времени наблюдения можно определить, на основе статистических характеристик 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 при наличии или отсутствии сигнала

$$F_j(h, T) = P\{t_j < T\}. \quad (7)$$

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

$$G_j(h, T) = P\left\{L_j(\tau) < h \atop T_1 \leq \tau \leq T\right\}. \quad (8)$$

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

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

Статистические характеристики случайных процессов $L_j(\tau)$ исследованы в [11]. Подставляя выражения (5) в формулу (4) и отбрасывая интегралы от функций, осциллирующих с удвоенной частотой, перепишем логарифм ФОП $L_j(\tau)$ в виде [11]

$$L_j(\tau) = \frac{[jG(\tau_0, \tau) \cos \varphi_0 + N_c(\tau)]^2 + [G(\tau_0, \tau) \sin \varphi_0 + N_s(\tau)]^2}{2q(\tau)}. \quad (9)$$

Здесь обозначено:

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

$$G(\tau_0, \tau) = q(\min[\tau_0, \tau]).$$

Величина $q(\tau)$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приёмника МП для сигнала длительности τ . 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

$$\langle N_c(\tau_1)N_c(\tau_2) \rangle = \langle N_s(\tau_1)N_s(\tau_2) \rangle = q(\min[\tau_1, \tau_2]), \quad \langle N_c(\tau_1)N_s(\tau_2) \rangle = 0.$$

Перейдём в выражении (9) к переменной $\lambda = q(\tau)$, $\Lambda_1 \leq \lambda \leq \Lambda_2$, $\Lambda_1 = q(T_1)$, $\Lambda_2 = q(T_2)$. Тогда логарифм ФОП (9) как функция переменной λ может быть представлен выражением

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

где $\lambda_0 = z_0^2 = q(\tau_0)$, $G(\lambda_0, \lambda) = \min(\lambda_0, \lambda)$, а $N_c(\lambda)$ и $N_s(\lambda)$ — гауссовские статистически независимые случайные процессы с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями

$$\langle N_c(\lambda_1)N_c(\lambda_2) \rangle = \langle N_s(\lambda_1)N_s(\lambda_2) \rangle = \min(\lambda_1, \lambda_2), \quad (10)$$

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

— гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией (10), т. е. стандартный винеровский процесс.

Найдём сначала вероятность (8) 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 (8) получено в работе [11]

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

Отсюда находим приближённое выражение для функции распределения (7) при $j = 0$

$$F_0(h, T) \approx \begin{cases} 1 - [q(T_1)/q(T)]^{h \exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 1, & h < 1. \end{cases} \quad (11)$$

Точность этой формулы возрастает с увеличением порога h и отношения $q(T_1)/q(T)$.

Найдём теперь вероятность (8), а также функцию распределения времени первого достижения логарифмом ФОРП границы (7) 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 $l = \lambda/\lambda_0$, $\Lambda_1/z_0^2 \leq l \leq \Lambda_2/z_0^2$. Тогда

$$L_1(l) = z_0^2 \frac{\min^2(1, l)}{2l} + z_0 \frac{\min(1, l)N_1(l)}{l} + \frac{N_c^2(l) + N_s^2(l)}{2l}. \quad (12)$$

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

$$L_1(\lambda) \approx \frac{\min^2(\lambda_0, \lambda)}{2\lambda} + \frac{\min(\lambda_0, \lambda)}{\lambda} N_1(\lambda). \quad (13)$$

Функция распределения момента первого достижения границы случайным процессом (13) найдена в [10]

$$F_1(h, T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\Lambda_1}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi-h+\Lambda_1/2)^2}{2\Lambda_1}\right] \times \\ \times \left\{ \Phi\left(\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda-\Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda-\Lambda_1}}{2}\right) - \exp(\xi)\Phi\left(-\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda-\Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda-\Lambda_1}}{2}\right) \right\} d\xi, \quad \Lambda \leq \lambda_0, \quad (14)$$

$$F_1(h, T) = 1 - \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi+\lambda_0/2)^2+h^2-h\lambda_0}{2\lambda_0}\right] \times \\ \times \left[\Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda-\lambda_0}}{2} + \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda-\lambda_0}}\right) - \exp(-\xi)\Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda-\lambda_0}}{2} - \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda-\lambda_0}}\right) \right] \times \\ \times \left\{ \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0-\Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} + \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0-\Lambda_1)}}\right) \exp\left[\frac{h\xi}{\lambda_0}\right] - \right. \\ \left. - \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0-\Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} - \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0-\Lambda_1)}}\right) \exp\left[-\frac{h\xi}{\lambda_0}\right] \right\} \frac{d\xi}{\sqrt{2\pi\lambda_0}}, \quad \Lambda > \lambda_0, \quad (15)$$

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

Используя выражения (11), (14), находим среднее время анализа ОПШ алгоритмом с учётом возможного отсутствия сигнала

$$\langle T_a \rangle = p_0 \langle T_{a0} \rangle + p_1 \langle T_{a1} \rangle,$$

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

Выигрыш во времени анализа ОПП алгоритмом по сравнению с алгоритмом МП будем аналогично [8–10] характеризовать величиной

$$\chi = \frac{\langle T_a \rangle}{T_2} = \eta_1 + p_0 \int_{\eta_1}^1 [1 - F_0(h, \eta)] d\eta + p_1 \int_{\eta_1}^1 [1 - F_1(h, \eta)] d\eta, \quad (16)$$

а точность ОПП алгоритма оценки длительности — безусловным рассеянием

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

где $V_j(h) = \int_{T_1}^{T_2} W_j \text{pr}(\tau) V_j(h|\tau) d\tau$ — 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, $j = 0, 1$. Если сигнал присутствует в принятой реализации, то $p_0 = 0$, $p_1 = 1$, $\langle T_a \rangle = \langle T_{a1} \rangle$, $V(h) = V_1(h)$. Для определения порога h можно использовать критерий минимума условного рассеяния пороговой оценки при условии наличия сигнала и истинной длительности $\tau_0 = (T_1 + T_2)/2$, выбранной посередине своего априорного интервала. Таким образом, порог определяется как $h_V = \arg \inf V_1(h)$. Будем называть такой порог оптимизированным по критерию минимума условного рассеяния пороговой оценки.

Конкретизируем полученные результаты для экспоненциально убывающего радиоимпульса, огибающая которого описывается функцией $f(t)$ вида

$$f(t) = C \exp(-\kappa t/T_2), \quad (17)$$

где κ — величина, характеризующая скорость изменения экспоненты,

$$C = \sqrt{\frac{2\kappa}{1 - \exp(-2\kappa)}}$$

— нормирующий множитель, выбранный так, чтобы энергия сигнала формы (16) максимальной длительности T_2 не зависела от выбора параметра κ и равнялась энергии прямоугольного импульса единичной амплитуды той же длительности. Тогда имеется возможность сравнивать эффективность алгоритма оценки длительности сигналов с одинаковыми энергиями и разным скоростями изменения огибающей.

Для экспоненциально изменяющегося импульса ОСШ имеет вид

$$q(\tau) = z_r^2 \frac{1 - e^{-2\kappa\tau/T_2}}{1 - e^{-2\kappa}}$$

где $z_r^2 = 2a_0^2 T_2 / N_0$ — ОСШ на выходе приёмника МП для прямоугольного импульса амплитуды a_0 и длительности T_2 .

На рис. 2 показаны зависимости выигрыша (16) во времени анализа от ОСШ z_r^2 для радиоимпульса с огибающей (16) при оптимизированном пороге h_V и $\kappa = 1$. Сплошная кривая

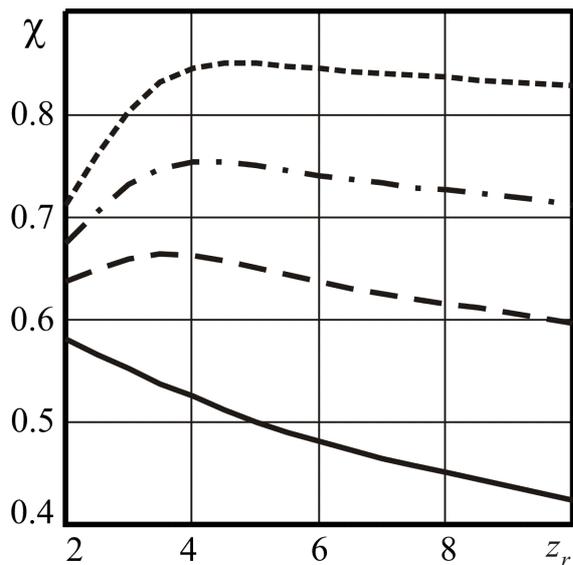


Рис. 2.

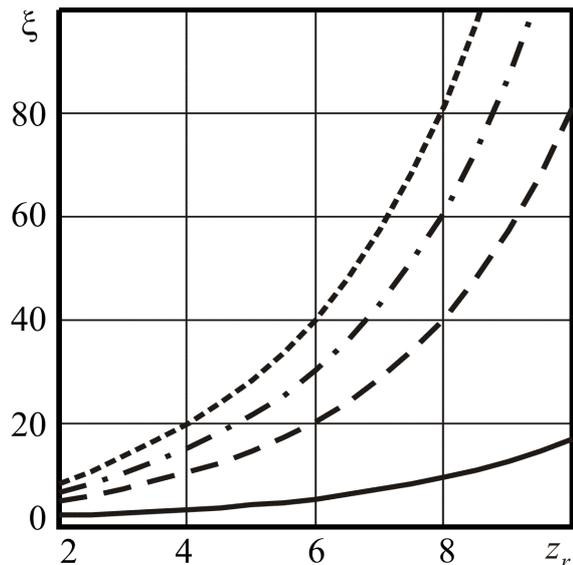


Рис. 3.

построена для не исчезающего сигнала ($p_0 = 0$). Штриховая, штрих-пунктирная и пунктирная линии соответствуют исчезающему сигналу с вероятностями отсутствия $p_0 = 0, 3$; $p_0 = 0, 5$ и $p_0 = 0, 7$ соответственно. 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 40% при ОСШ по напряжению до 10 в случае не исчезающего сигнала. В случае возможного отсутствия сигнала выигрыш во времени анализа снижается с увеличением априорной вероятности отсутствия сигнала.

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

$$\xi = V(h)/V_0, \quad (18)$$

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_r проигрыша (18) ОПП оценки длительности прямоугольного радиоимпульса для оптимизированного порога h_V , значения динамического диапазона изменения неизвестной длительности $T_2/T_1 = 10$ и $\kappa = 1$. Сплошная кривая построена для не исчезающего сигнала ($p_0 = 0$). Штриховая, штрих-пунктирная и пунктирная линии соответствуют исчезающему сигналу с вероятностями отсутствия $p_0 = 0, 3$; $p_0 = 0, 5$ и $p_0 = 0, 7$ соответственно. 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. Исчезновение сигнала приводит не только к ухудшению точности ОПП оценки, но и к увеличению среднего времени анализа принятой реализации. Приведённые результаты позволяют найти разумный компромисс между необходимой точностью оценивания длительности радиосигнала и желательным сокращением времени анализа по сравнению с максимально правдоподобным алгоритмом, а также учесть потерю точности вследствие возможного исчезновения сигнала.

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. 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.
10. Корчагин, Ю. Э. Однопороговый последовательный алгоритм оценки длительности пропадающего прямоугольного радиоимпульса / Ю. Э. Корчагин, С. А. Слинчук // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2017. — № 4. — С. 13–20.
11. 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.

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 apriornoi 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 neizvestnoy fazoy]. *Izvestiya VUZov. Radioelektronika — Radioelectronics and Communications Systems*, 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. Obnarujenie i ocenka momenta izmeneniya intensivnosti puassonovskogo potoka]. *Avtomatika i telemexanika — Automation and Remote Control*, 1982, no. 6, pp. 95–105.

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

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

10. Korchagin Yu.E., Slinchuk S.A. The single-threshold sequential algorithm for the duration estimation of the missing rectangular radio pulse. [Korchagin Yu.E., Slinchuk S.A. Odnoporogovyyj posledovatel'nyy algoritm ocenki dlitel'nosti propadayushhego pryamougol'nogo radioimpul'sa]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2017, no. 4, pp. 13–20.

11. 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, amplitudoy i nachal'noy fazoy]. *Izvestiya VUZov. Radiofizika — Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 401–414.

Корчагин Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики Воронежского государственного университета, г. Воронеж, доцент кафедры электроники и нанoeлектроники 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, Head of the Department of radiophysic of Voronezh State University, Voronezh, Associate Professor Department of Electronics and Nanoelectronics of National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russian Federation
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-89-16

Кондратович Павел Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент базовой кафедры телекоммуникационных систем и радиоэлектронной борьбы Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: pkondr@mail.ru

Kondratovich Pavel Aleksandrovich, Candidate of physico-mathematical sciences, Associate Professor of the Department of telecommunication systems and electronic warfare of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: pkondr@mail.ru

Трифонов Михаил Васильевич, ассистент кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: mixailtrifonov@yandex.ru
Тел.: +7(473)220-89-16

Trifonov Mihail Vasilevich, Assistant of the Department of radiophysic of Voronezh State University. Voronezh, Russian Federation
E-mail: mixailtrifonov@yandex.ru
Tel.: +7(473)220-89-16