

Вероятностная оценка обнаружения разрывных сигналов с неизвестными параметрами

Probabilistic evaluation of the detection of discontinuous signals with unknown parameters

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Сергеевич

(dvornik92@mail.com)

кандидат технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,

старший преподаватель кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: вероятность обнаружения разрывных сигналов – probability of detecting discontinuous signals; измерение длительности сигналов – measurement of signal duration; корреляционная обработка сигналов – correlation processing of signals.

В статье представлены результаты разработки обнаружителя разрывных сигналов, обеспечивающего снижение вероятности ложной тревоги за счет увеличения дисперсии в пределах содержащего его фрагмента. Представлена структурная схема обнаружителя. Рассмотрены особенности его функционирования. Обоснована его эффективность по отношению к общеизвестным обнаружителям на основе корреляционной обработки входных реализаций. Приведены результаты, подтверждающие правомерность теоретических заключений. Сформулированы направления дальнейшего исследования.

The article presents the results of the development of a discontinuous signal detector, which reduces the probability of false alarms by increasing the dispersion within the fragment containing it. The block diagram of the detector is presented. The features of its functioning are considered. Its effectiveness in relation to well-known detectors is substantiated on the basis of correlation processing of input implementations. The results confirming the validity of theoretical conclusions are presented. Directions for further research are formulated.

Введение

Сложность решения радиотехнических задач, как правило, обусловлена отсутствием априорной информации о параметрах обрабатываемых сигналов [1–4]. При этом данная проблематика усугубляется

в условиях, когда искомые сигналы представляют собой одиночные кратковременные импульсы [5, 6], исключающие применение процедур статистического накопления выборок [7, 8]. Поэтому поиск приемлемых решений применительно к рассматриваемой ситуации является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение.

Вместе с тем проведенный анализ известных подходов решения подобных задач показал, что они базируются на корреляционную обработку входных реализаций [9–11], в ходе которой производят сравнительную оценку полученных результатов.

Сущность работы таких обнаружителей основана на анализе дисперсии в тех пределах обрабатываемой выборки входной реализации, где содержится полезный сигнал. Очевидно, что повышение эффективности подобных алгоритмов можно обеспечить за счет применения процедур, повышающих уровень дисперсии. С учетом указанных обстоятельств в настоящей статье представлены технические результаты реализации обнаружителя, решающего такую задачу.

Корреляционная обработка разрывных сигналов

Импульсные сигналы относятся к классу так называемых разрывных сигналов [12, 13], которые характеризуются тем, что их сигнальные функции не дифференцируемы [14]. Указанная особенность не позволяет для сигналов данного класса разработать оптимальные алгоритмы обнаружения. Данная проблема уже освещалась, в том числе и на страницах данного издания [15, 16].

Но, несмотря на указанные особенности, для обнаружения разрывных сигналов широко исполь-

зуются методы корреляционной обработки [17, 18]. Для раскрытия их сущности рассмотрим сигнальную функцию $K(v_0, v_1)$, которая в общем случае представляет собой корреляционный интеграл между сигналом $s(t, v_0)$ с известным значением измеряемого параметра v_0 , и этим же сигналом $z(t, v_1)$, значение измеряемого параметра v_1 которого неизвестно.

Для класса разрывных сигналов в качестве неизвестных параметров выступают [13, 15]: временной интервал, характеризующий положение разрывного сигнала в пределах обрабатываемой реализации, частота заполнения радиоимпульса, значение начальной фазы. Таким образом, параметр v_1 можно рассматривать с позиций аргумента, значение которого в обрабатываемой реализации зависит от уровня и интенсивности канальных шумов.

Тогда корреляционный интеграл сигнальной функции $K(v_0, v_1)$ представим в следующем виде [16]:

$$K(v_0, v_1) = \int_0^T s(t, v_0)z(t, v_1)dt, \quad (1)$$

где T – интервал корреляционной обработки.

Учитывая, что у разрывных сигналов сигнальные функции не дифференцируемы, алгоритмы их обнаружения будут иметь асимптотическую структуру. Это связано с невозможностью осуществления прямых расчетов вероятностей ложной тревоги α , определяющих ошибки первого рода, и пропуска цели β , являющихся ошибками второго рода [19].

Согласно [20] оптимальный алгоритм обнаружения полезного сигнала с неизвестными параметрами в гауссовых шумах, позволяющего определить его временное положение в обрабатываемой выборке, можно представить в виде следующего неравенства:

$$l(\mathbf{x}) = W_n(\mathbf{x} | H_1) / W_n(\mathbf{x} | H_0) \geq c, \quad (2)$$

где $l(\mathbf{x})$ – отношение функций правдоподобия, удовлетворяющих гипотезе H_1 , согласно которой в обрабатываемой выборке \mathbf{x} содержится полезный сигнал (функция правдоподобия $W_n(\mathbf{x} | H_1)$), и гипотезе H_0 , согласно которой в обрабатываемой выборке \mathbf{x} полезный сигнал отсутствует (функция правдоподобия $W_n(\mathbf{x} | H_0)$); c – порог принятия решения о наличии полезного сигнала в обрабатываемой выборке.

Тогда с учетом гауссова характера канальных шумов выражение (2) перепишем к следующему виду

$$L = \ln(l(\mathbf{x})) \geq C = \ln(c). \quad (3)$$

Но поскольку сигнальные функции разрывных сигналов не дифференцируемы, то прямая реализация процедур логарифмирования отношения правдоподобия $l(s)$ становится невозможной. Указанные обстоятельства как раз и обуславливают переход к асимптотическим алгоритмам оценки измеряемых параметров.

Корреляционный обнаружитель разрывных сигналов

Анализ подходов к практической реализации алгоритмов обнаружения сигналов показал, что в их основе преимущественно лежит реализация процедур расчета взаимных корреляционных функций вида, определяемого выражением (1). Тогда с учетом процедур цифровой обработки функцию взаимной корреляции для двух произвольных сигналов x и y представим в виде:

$$K_{xy}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i Y_{i+j}. \quad (4)$$

В формуле (4) N – число дискретных отсчетов в обрабатываемой выборке.

На рис. 1 представлено устройство, реализующее расчет взаимной корреляционной функции.

Основу коррелятора, представленного на рис. 1, составляют перемножитель и интегратор. Очевидно, что если на оба входа представленного устройства подать один и тот же сигнал, то в результате на выходе получим автокорреляционную функцию, см. рис. 2.

Особенностью коррелятора, представленного на рис. 2, является то, что на второй его вход сигнал поступает через линию задержки. Такое техническое решение обеспечивает сравнение предыдущей и последующей посылок. Поэтому если допустить, что величина задержки сопоставима с длительностью разрывного сигнала, то такое решение обеспечивает решение задачи обнаружения даже в условиях априорной неопределенности о форме разрывного сигнала.

Однако анализ аналогичных технических решений показал [9], что в этом случае достаточно велика вероятность ложной тревоги. Поэтому предлагается все же использовать эталонный сигнал в алгоритме обнаружения. Поскольку такое решение открывает возможность повторной реализации процедур корреляции. Тогда результирующее устройство будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Работает предложенное устройство следующим образом. Из входной реализации, содержащей только шум X , посредством автокоррелятора формируют автокорреляционную функцию K_{xx} , которая выступает в качестве порогового значения. Затем принимают входную реализацию Z , которая может содержать полезный сигнал, а может и не содержать его. И последовательно рассчитывают первую K_{xz} и вторую K_{zx} взаимные функции корреляции. А на компараторе значения K_{xx} и K_{zx} сравнивают между собой и принимают одну из гипотез H_1 или H_0 о наличии или отсутствии в принятой реализации полезного сигнала.

Очевидно, что значения K_{xx} в силу случайности шумовой реализации будут различны при каждом

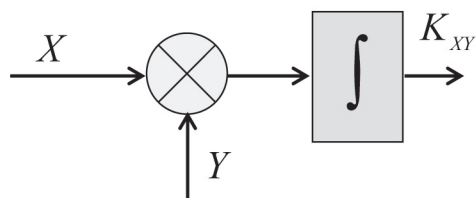


Рис. 1. Устройство расчета взаимной корреляционной функции

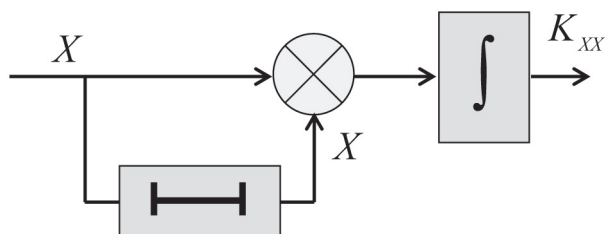


Рис. 2. Устройство расчета автокорреляционной функции

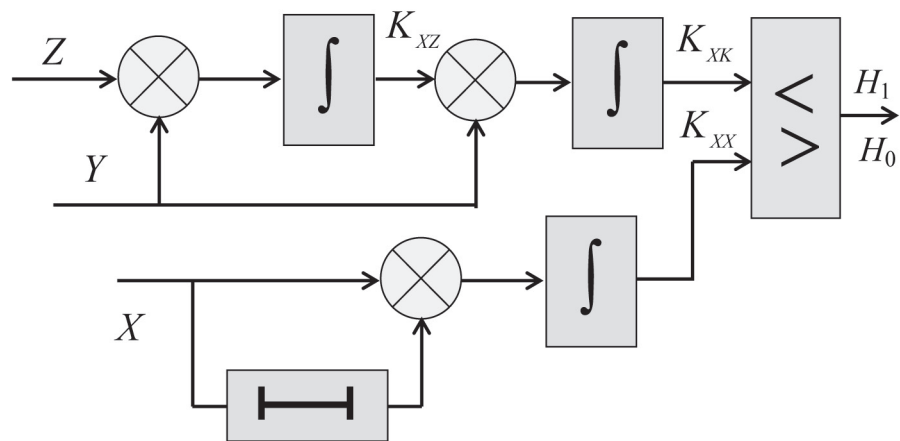


Рис. 3. Устройство обнаружения разрывных сигналов с двойной корреляционной обработкой

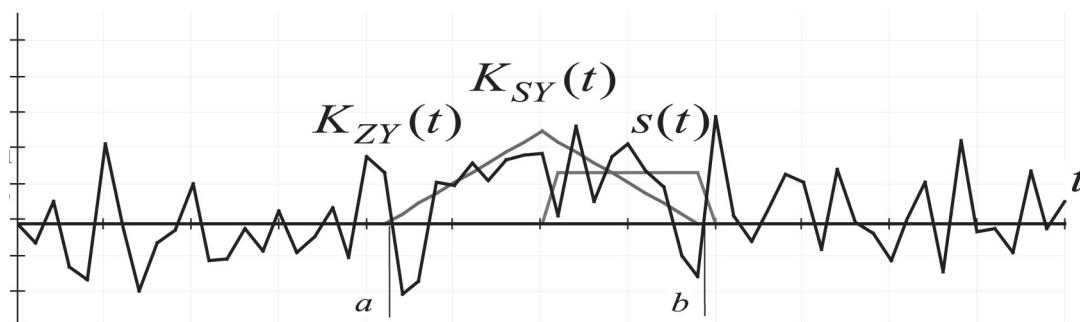


Рис. 4. Фрагменты взаимных функций корреляции, полученные в соответствии с известным алгоритмом обнаружения разрывных сигналов

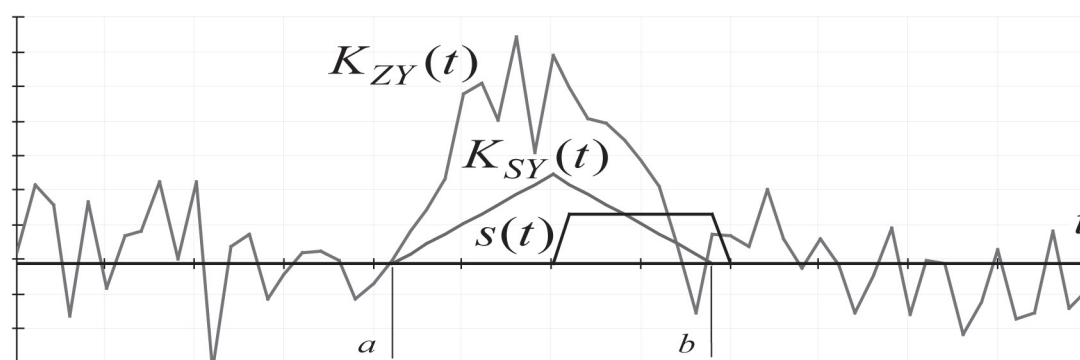


Рис. 5. Фрагменты взаимных функций корреляции, полученные в соответствии с предложенным алгоритмом обнаружения разрывных сигналов

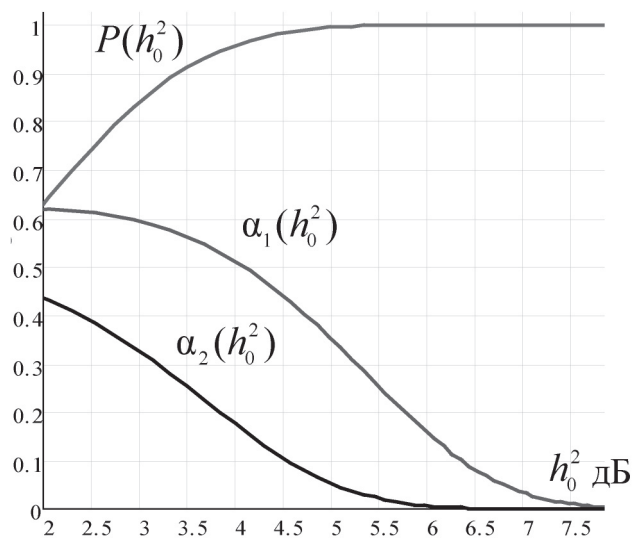


Рис. 6. Вероятность обнаружения разрывных сигналов

измерении. Поэтому в компараторе необходимо учитывать допустимый разброс значений $K_{\text{ХХ}}$

Оценка эффективности предложенного решения

Оценка эффективности функционирования предложенного обнаружителя получена по результатам его сравнения с алгоритмом обнаружения согласно рис. 1. Так, на рис. 4 показан фрагмент взаимной функции корреляции K_{ZY} , рассчитанной при значении отношения сигнал/шум h_0^2 обрабатываемого фрагмента, содержащего полезный сигнал $s(t)$, равного порядка 0 дБ. Здесь же показано положение разрывного сигнала $s(t)$ в условиях отсутствия шумов и рассчитанная для него взаимная функция корреляции K_{SY} при условии полного совпадения структуры полезного и эталонного сигналов.

Анализ структуры K_{ZY} позволяет сделать вывод, что методом визуального анализа сложно определить максимальное значение взаимной функции корреляции, которое соответствует моменту прихода полезного сигнала в пределах обрабатываемого фрагмента.

Вместе с тем аналогичные расчеты, проведенные с применением предложенного коррелятора, позволяют не только визуально обнаружить полезный сигнал, но и локализовать его временное положение в пределах обрабатываемого фрагмента, см. рис. 5 (на рис. 4 и 5 интервал взаимной функции корреляции обозначен буквами a и b).

В интересах получения количественных оценок, характеризующих вероятность обнаружения разрывных сигналов, были использованы результаты исследования [21], согласно которым

$$\alpha \approx 1 - \exp \left[-\frac{\xi(h_0^2)^{b-1}}{(2\pi)^{(b+1)/2}} \exp \left(\frac{-(h_0^2)^2}{2} \right) \right], \quad h_0^2 \geq \sqrt{b-1}, \quad (5)$$

$$\beta \approx \frac{(h_0^2)^{b/2}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\xi(u)^{b-1}}{(2\pi)^{(b+1)/2}} \exp \left(\frac{-(u)^2}{2} \right) \right] \times \int_{-\infty}^u \exp \left(\frac{2(h_0^2)^2 - x^2}{4} \right) dx, \quad u \geq \sqrt{b-1} \quad (6)$$

где h_0^2 – значение отношения сигнал/шум в канале; b – количество неизвестных параметров разрывного сигнала (в качестве параметров могут рассматриваться: начальное положение, начальная фаза, частота заполнения и т.д.); ξ – параметр, характеризующий объем проводимых испытаний, который при должной статистике $\xi \rightarrow 1$, $u=L/h_0^2$ – нормированный порог.

С использованием выражений (5) и (6) было проведено аналитическое моделирование зависимости вероятности обнаружения от ОСШ, а также значений

вероятности пропуска целей, полученных с учетом известного алгоритма обнаружения и предложенного (результаты аппроксимированы по 200 выборкам, полученным в ходе моделирования). Обобщенные результаты демонстрируются на рис. 6.

Результаты, представленные на рис. 6, получены при условии только априорной неопределенности о времени прихода импульса, т. е. его положения в пределах обрабатываемого фрагмента. Для формул (5) и (6) значение $b=1$.

Эффективность предложенного обнаружителя соответствует общей теории [21]. Приемлемые результаты $P=0,8$ достигаются при ОСШ порядка 2,75 дБ. При этом следует отметить, что предложенный подход обеспечивает увеличение дисперсии обрабатываемой выборки за счет дополнительных процедур корреляционной обработки. Такой подход позволяет существенно снизить величину ложной тревоги с $\alpha_1=0,62$ (для известного корреляционного обнаружителя, см. рис. 6), до $\alpha_2=0,34$ (для предложенного обнаружителя). При этом точность определения временного положения разрывного сигнала в обрабатываемой реализации повысилась с 20% до 3% от ее длительности при ОСШ порядка 3 дБ.

Таким образом, дополнительная корреляционная обработка позволяет повысить эффективность алгоритмов обнаружения разрывных сигналов.

Заключение

Разработанный обнаружитель обеспечил решение поставленной задачи по повышению дисперсии в пределах обрабатываемой выборки, содержащей полезный сигнал. Проведенное моделирование показало приемлемую эффективность его функционирования. Так, вероятность обнаружения 0,8 обеспечивается при ОСШ порядка 2,7–2,8 дБ. При этом вероятность ложной тревоги снижается почти в 2 раза по отношению к традиционным корреляционным обнаружителям.

Дальнейшее исследование авторы связывают с применением методов совместного частотно-временного анализа при обработке фрагментов входных реализаций, представленных в [22–24].

Литература

1. Старовойтов, Е. И. Перспективные технологии облетных методов радиотехнических измерений / Е.И. Старовойтов, В.И. Руссанов // Радиостроение. – 2022. – № 1. – С. 1–30.
2. Дворников, С. В. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов : монография / С.В. Дворников, А.М. Кудрявцев. – Санкт-Петербург : ВАС, 2010. – 240 с.
3. Подстригаев, А. С. Выбор приемника для широкополосного анализа сигнальной обстановки на основе оценки ее сложности / А.С. Подстригаев, А.В. Смоляков, В.П. Лихачев // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 1. – С. 143–153.

4. Дворников, С. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 221–228.
5. NMR signal detection in the presence of external interference / N.V. Anisimov, A.A. Tarasova, I.A. Usanov [et al.] // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. – 2021. – Vol. 26, No. 5. – P. 58–59.
6. Дворников, С. В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге / С.В. Дворников // *Мобильные системы*. – 2007. – № 4. – С. 33–35.
7. Artemiev, V. M. Detection of signals of moving objects based on the time selection method / V.M. Artemiev, S.M. Kostromitsky, A.O. Naumov // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series*. – 2021. – Vol. 66, No. 3. – P. 335–342.
8. Дворников, С. В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения / С.В. Дворников // *Научное приборостроение*. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 92–97.
9. Егисапетов, Э. Г. Обнаружитель шумоподобных сигналов, не дающий ложных обнаружений, связанных с корреляционными свойствами модулирующих фазу сигнала последовательностей / Э.Г. Егисапетов // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2022. – Т. 76, № 1. – С. 51–58.
10. 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.
11. Адаптивное двухпороговое обнаружение и многосигнальное пеленгование источников частотно-неразделимых радиосигналов / М.Л. Артемов, О.В. Афанасьев, М.Ю. Ильин [и др.] // *Антенны*. – 2020. – № 3 (265). – С. 48–57.
12. Петриева, О. В. Дискретно-манипулированные сигналы с разрывной во времени структурой / О.В. Петриева // *Актуальные научные исследования в современном мире*. – 2020. – № 10-1 (66). – С. 101–103.
13. Соловьева, Е. Б. Исследование разрывных периодических сигналов с использованием измерительного комплекса LABVIEW / Е.Б. Соловьева, Ю.М. Иншаков // *Качество. Инновации. Образование*. – 2020. – № 5 (169). – С. 72–79.
14. Давыдочкин, В. М. Сигнальная функция в задаче повышения точности радиолокационных измерений с учётом частотной дисперсии в волноводах / В.М. Давыдочкин // *Измерительная техника*. – 2017. – № 8. – С. 24–29.
15. Измерение временных параметров сигналов в условиях высокой интенсивности шумов / А.М. Голик, Ю.Е. Толстуха, С.В. Дворников [и др.] // *Вестник метролога*. – 2022. – № 1. – С. 9–12.
16. Предложения по измерению начальной фазы радиопульсов на основе функций взаимной корреляции / А.М. Голик, С.В. Дворников, Ю.А. Клейменов, А.В. Суслин // *Вестник метролога*. – 2022. – № 2. – С. 5–8.
17. Буйлов, Е. Н. Уточненная методика выбора параметров устройства корреляционной обработки широкополосного линейно-частотно-модулированного сигнала / Е.Н. Буйлов, С.А. Горшков // *Журнал радиоэлектроники*. – 2019. – № 7. – С. 12.
18. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов / С.В. Дворников, С.С. Манаенко, С.С. Дворников, А.А. Погорелов // *Информационные технологии*. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 140–143.
19. Дворников, С. В. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС / С.В. Дворников, О.Г. Духовницкий // *Информация и Космос*. – 2015. – № 4. – С. 73–77.
20. Дворников, С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) / С.В. Дворников // *Труды учебных заведений связи*. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 47–60.
21. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1984. – 439 с.
22. Дворников, С. В. Метод обнаружения радиоизлучений на основе частотно-временного распределения Алексеева / С.В. Дворников, В.К. Железняк, Р.Н. Храмов [и др.] // *Научное приборостроение*. – 2006. – Т. 16, № 1. – С. 107–115.
23. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / С.В. Дворников, В.К. Железняк, В.Ф. Комарович, Р.Н. Храмов // *Информация и Космос*. – 2005. – № 4. – С. 13–16.
24. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов / А.А. Алексеев, В.К. Железняк, В.Ф. Комарович, С.В. Дворников // *Научное приборостроение*. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 77–87.