

УДК 681.3

Использование свойств циклостационарности информационных радиосигналов для слепого обнаружения высокоскоростных беспроводных каналов передачи информации

Гончаренко В. И., Клецков Д. А., Серкин Ф. Б., Шевцов В. А.

Постановка задачи: в настоящее время актуальной задачей является разработка методов по оценке состояния радиозфира с целью идентификации радиосигналов различных систем беспроводной связи. Эффективным средством решения данной задачи являются алгоритмы «слепого» обнаружения радиосигналов и оценки их параметров для идентификации систем беспроводной связи. Известно, что информационные сигналы подобных систем связи также могут рассматриваться как некоторый класс нестационарных сигналов – циклостационарные сигналы. Для таких сигналов эффективным средством идентификации может служить циклический спектральный анализ. В данной статье предлагается использовать аппарат циклического спектрального анализа для идентификации описанных сигналов. **Целью работы** является разработка метода «слепого» обнаружения сигналов радиосистем с высокой пропускной способностью на основе теории циклостационарности информационных радиосигналов с использованием аппарата циклического спектрального анализа. **Используемые методы:** решение задачи основано на теории циклического спектрального анализа, разработанного Гарднером и др. в конце 20 века и исследованного более детально в работах Энтони. **Новизна:** элементами новизны предложенного решения является комплексирование методов слепого обнаружения радиосигналов и теории циклического спектрального анализа применительно к сигналам высокоскоростных радиосистем, использующих прямое расширение спектра и расширение спектра методом последовательно перестраиваемой рабочей частоты. **Результат:** применение теории циклостационарности к методам слепого обнаружения показало свою потенциальную эффективность. По результатам моделирования получено, что рассматриваемая система радиосвязи с прямым расширением спектра успешно идентифицируется при таких отношениях сигнал/шум, при которых обеспечивается работоспособность самой системы связи. **Практическая значимость:** представленные алгоритмы могут быть применены на практике для решения задач идентификации и оценки параметров радиосигналов высокоскоростных систем беспроводной связи.

Ключевые слова: циклостационарные сигналы, циклический спектральный анализ, прямое расширение спектра, последовательная перестройка рабочей частоты, слепое обнаружение сигналов.

Актуальность

В настоящее время особенно актуальной становится задача исследования сигналов, излучаемых беспилотными летательными аппаратами [1]. Ведется много практически значимых исследований в области идентификации параметров этих сигналов и оценки их параметров [2-4]. Особенно продуктивными в этой области являются методы «слепого» обнаружения сигналов с использова-

Библиографическая ссылка на статью:

Гончаренко В. И., Клецков Д. А., Серкин Ф. Б., Шевцов В. А. Использование свойств циклостационарности информационных радиосигналов для слепого обнаружения высокоскоростных беспроводных каналов передачи информации // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 110-124. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-110-124

Reference for citation:

Goncharenko V. I., Kletskov D. A., Serkin F. B., Shevtsov V. A. Using the properties of cyclostationarity of information radio signals for blind detection of high-speed wireless information transmission channels. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 110-124 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-110-124

нием теории циклостационарности [5-8]. Данная теория позволила разработать новый подход к описанию нестационарных сигналов определенного типа [9-11]. Одним из основных свойств циклостационарности сигналов является то, что их можно легко отделить от других мешающих сигналов даже в том случае, когда их спектры пересекаются. Это открывает широкие возможности для обнаружения, идентификации и обработки сигналов, скрытых в высоких уровнях стационарного шума [12-15].

Циклостационарность расширяет класс стационарных сигналов, добавляя такие сигналы, статистические свойства которых периодически изменяются во времени. Как правило, период такого изменения статистических свойств сигнала называется "циклом". Таким образом, в отличие от стационарных сигналов, циклостационарные сигналы содержат дополнительную информацию из-за их скрытой периодичности. Во временной области дополнительная информация, предоставляемая циклостационарностью, передается периодическими изменениями статистических дескрипторов, таких как мгновенная автокорреляционная функция и связанные с ней параметры [7]. Оказывается, что та же самая информация относится в частотной области к корреляции между спектральными компонентами, разнесенными на определенные частоты, называемые *циклическими частотами* [10]. Использование данных свойств открывает новые возможности для обработки сигналов по сравнению с классическим стационарным подходом [12].

Целью исследований является разработка метода «слепого» обнаружения сигналов радиосистем с высокой пропускной способностью на основе теории циклостационарности информационных радиосигналов с использованием аппарата циклического спектрального анализа.

В данной работе показано, что применение теории циклостационарности в алгоритмах слепого обнаружения радиосигналов может быть применимо в задачах по обнаружению, идентификации и оценке параметров сигналов с прямым расширением спектра, а также сигналов с расширением спектра методом псевдослучайной периодической перестройкой частоты.

Особенности построения высокоскоростных систем связи с ПРС и ППРЧ

Известно, что для повышения помехоустойчивости систем связи, а также ряда других задач, в системах связи используются различные методы расширения спектра. Основных методов два: прямое расширение спектра (ПРС) с помощью псевдослучайной последовательности (ПСП) и внутрисимвольная псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ). Упрощенные схемы реализации подобных систем показаны на рис. 1 и рис. 2. Кодирование и модуляция символов, как правило, бывает различная. Для конкретики в данной статье рассмотрим сверточное кодирование со скоростью кодирования $r=1/2$, длиной кодового ограничения $k=7$ и полиномами $P=133/171$ и ФМн-4 модуляцию.

Следует отметить, что если в системе с внутрисимвольной ППРЧ для модуляции не используется многотоновый сигнал, то по энергетическим характеристикам такая система оказывается очень похожей на системы с ПРС, в кото-

рых число чипов ПСП соответствует числу субчастот ППРЧ, которые используются в каждом символе. Однако, современные системы с внутрисимвольной ППРЧ часто используют несколько субчастот для каждого символа, но опустим пока этот случай для упрощения описания алгоритмов слепого обнаружения.

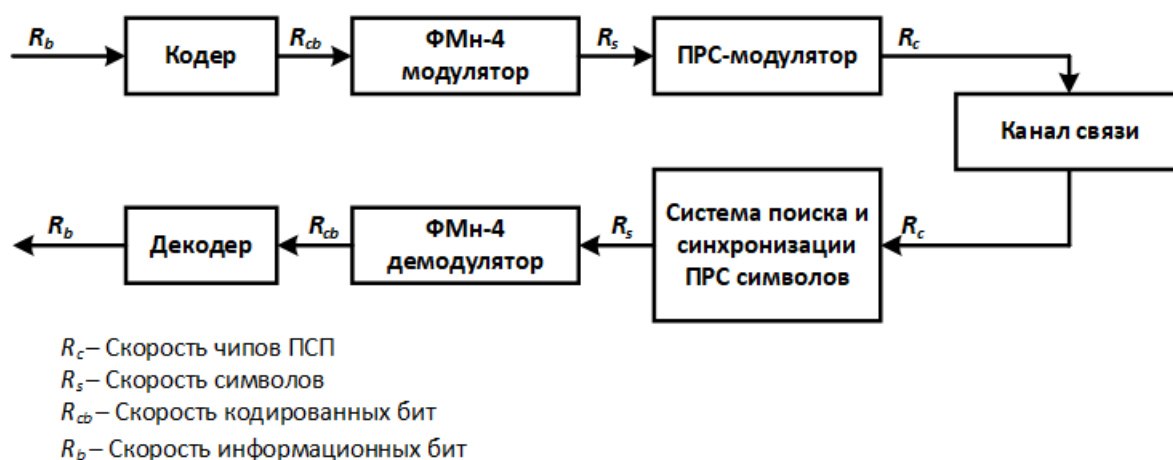


Рис. 1. Система связи с ПРС



Рис. 2. Система связи с внутрисимвольной ППРЧ

Можно видеть, что оба класса описанных систем имеют ярко выраженную периодичность, определяемую свойствами псевдо-шумовой последовательности, а также характеристиками псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Соответственно, к описанию данных сигналов можно применить аппарат теории циклостационарности и применить циклический спектральный анализ для идентификации параметров этих сигналов.

Постановка задачи

В некоторых случаях при развертывании систем связи или обеспечения известных условий функционирования других систем необходимо производить анализ помеховой обстановки, а также идентификацию сигналов, способных мешать работе систем беспроводной связи или других систем. Для решения поставленной задачи предлагается применить теорию циклостационарности

информационных радиосигналов для разработки метода слепого обнаружения сигналов этих «нежелательных» систем.

Решение данной задачи может быть декомпозировано следующим порядком действий:

- анализ частотных и временных характеристик сигналов высокочастотных беспроводных систем связи, использующих различные методы расширения спектра;
- разработка методов эффективной реализации алгоритмов циклического спектрального анализа для получения циклической спектральной плотности мощности;
- разработка алгоритмов «слепого» обнаружения и оценки параметров радиосигналов описанных систем связи на основе описанных алгоритмов;
- проведение имитационного моделирования реализованных алгоритмов с целью получения статистических параметров обнаружения и идентификации радиосигналов.

Таким образом, постановку задачи можно сформулировать следующим образом.

Дано: множество частот, формирующих рабочий диапазон частот радиоприемника специального назначения, который функционирует в условиях априорной неопределенности относительно наличия в заданном диапазоне полезного радиосигнала. Ограничения определяются полосой приемника, а также эквивалентной шумовой температурой приемника в заданной полосе частот. Требуется найти и идентифицировать радиосигналы в заданной полосе частот, которые возможно описать с помощью теории циклостационарности. Для решения задачи требуется разработать алгоритмы «слепого» обнаружения с использованием аппарата циклического спектрального анализа.

Циклический спектральный анализ радиосигналов

В отличие от обычных нестационарных сигналов, циклостационарные сигналы обладают хорошо проработанной теорией, которая фактически расширяет все инструменты обработки сигналов, исторически разработанные для стационарных сигналов. Это связано с тем, что циклостационарность является строго определенным свойством, в отличие от нестационарности в широком смысле. В частности, спектральный анализ стационарных сигналов находит важное обобщение, которое проработано в статьях [8, 9]. Рассмотрены возможности представления экспериментального спектрального анализа циклостационарных сигналов, которые принято называть *циклическим спектральным анализом* (ЦСА). Рассмотрим далее аналитическое описание основных аспектов данной теории.

При дальнейшем описании примем, что Δ является периодом дискретизации и n определяет порядковый номер отсчетов: $X(n\Delta) \rightarrow X(n)$. Строго говоря, (квази-) циклостационарный сигнал $X(n)$ – это сигнал, совместная функция плотности вероятности которого является (квази-) периодической функцией времени. Квазипериодичность в данном случае обобщает периодические свой-

ства сигналов, состоящих из суммы периодичностей с несоизмеримыми периодами. Таким образом, это означает, что любой статистический дескриптор (среднее значение, среднеквадратическое значение, мгновенная средняя частота и др.) сигнала $X(n)$ также является (квази-) периодической функцией времени. Отметим, что это определение подразумевает статистику ансамбля, а не статистику времени, как часто принимается для стационарных и эргодических сигналов. В частности, ненулевое (квази-) периодическое среднее $E(X(n)) \neq 0$ обязательно подразумевает, что сигнал $X(n)$ содержит некоторые периодические компоненты, и в то же время, среднее по времени значение $\bar{X}$ может принимать нулевое значение. Для простоты рассмотрим сигналы с нулевым средним, и, следовательно, ограничим рассмотрение классическими случайными сигналами. Это предположение не ограничивает общности, поскольку существуют эффективные методы центрирования циклостационарных сигналов с ненулевым средним [8].

Первый пример циклостационарного сигнала может выглядеть следующим образом

$$X(n) = p(n) \cdot W(n), \quad (1)$$

где $p(n) = p(n+N)$ – периодичная функция с периодом N отсчетов; $W(n)$ – белый Гауссов шум с дисперсией σ_W^2 .

Данный пример показывает, что циклостационарный сигнал, как правило, не имеет периодической формы, а имеет случайное поведение, синхронизированное с некоторым периодическим механизмом, период N которого намеренно назван циклом сигнала, чтобы избежать путаницы с термином «период» периодического сигнала.

Вторым менее очевидным примером циклостационарного сигнала является отклик периодически изменяющейся во времени системы на стационарное возбуждение. Например, рассмотрим выход системы второго порядка, возбужденной белым Гауссовым шумом

$$X(n) = a_1(n) \cdot X(n-1) + a_2(n) \cdot X(n-2) + W(n), \quad (2)$$

где $a_i(n) = a_i(n+N)$, $i=1,2$ – коэффициенты авторегрессии с периодом N отсчетов.

На практике часто достаточно ограничить описание случайного сигнала его статистическими параметрами второго порядка, т.е. той статистикой, которая относится к энергоемкости и взаимодействиям. Действительно, вся статистика второго порядка отражается в мгновенной автокорреляционной функции

$$R_{2X}(n, \tau) = E\left(X(n + \beta\tau), X(n - \bar{\beta}\tau)^*\right), \beta + \bar{\beta} = 1, \quad (3)$$

где параметр β допускает общую формулировку различных эквивалентных определений, встречающихся в литературе (типичное значение β равно 0,5 для симметричной мгновенной автокорреляционной функции и 1 или 0 для асимметричной мгновенной автокорреляционной функции). Случайные сигналы, имеющие периодическую мгновенную автокорреляционную функцию

$$R_{2X}(n, \tau) = R_{2X}(n+N, \tau), \quad (4)$$

называются *циклостационарными сигналами второго порядка*, т.е.

$$R_{2X}(n, \tau) = |p(n)|^2 \cdot \sigma_W^2 \cdot \delta(\tau) = R_{2X}(n + N, \tau). \quad (5)$$

Поскольку $p(n) = p(n + N)$, а $\delta(\tau) = 1$, при $\tau = 0$, $\delta(\tau) = 0$ для других τ .

Сигналы с периодической статистикой второго порядка также иногда называют *периодически коррелированными*. По определению мгновенная автокорреляционная функция (квази-) циклостационарного сигнала является (квази-) периодической; поэтому может быть разложена в ряд Фурье

$$R_{2X}(n, \tau) = \sum_{\alpha_i \in A} R_{2X}(\tau, \alpha_i) e^{j2\pi\alpha_i n \Delta} \quad (6)$$

по всему спектру $A = \{\alpha_i\}$ циклических частот α_i , связанных с ненулевыми коэффициентами Фурье

$$R_{2X}(n, \tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{n=-L/2}^{L/2} R_{2X}(n, \tau) e^{-j2\pi\alpha_i n \Delta}. \quad (7)$$

Поскольку они являются функциями только временной задержки τ и индексируются циклической частотой α_i , коэффициенты Фурье R_{2X} называются *циклическими автокорреляционными функциями* или циклическими корреляционными функциями сигнала X . Циклическая автокорреляционная функция задается выражением вида

$$R_{2X}(\tau, \alpha_i) = c_i \cdot \sigma_W^2 \cdot \delta(\tau), \quad (8)$$

где $\alpha_i = i/N$, $i \in Z$ и c_i — это i -й коэффициент $|p(n)|^2$.

Отметим, что при $\alpha_i = 0$ циклическая автокорреляционная функция сводится к обычной (усредненной по времени) автокорреляционной функции R_{2X} . В общем случае циклическая автокорреляционная функция обладает следующими свойствами симметрии

$$R_{2X}(\tau, \alpha_i)^* = R_{2X}(-\tau, -\alpha_i) e^{j2\pi(\bar{\beta} - \beta)\alpha_i \tau \Delta} = R_{2X}(\tau, -\alpha_i), X \in R. \quad (9)$$

Временные дескрипторы циклостационарных сигналов часто оказываются менее удобными для анализа характеристик сигналов, чем частотные. Поскольку мгновенная автокорреляционная функция R_{2X} является функцией двух переменных времени n и t , ее аналог в частотной области представляет собой двумерное преобразование Фурье с двумя частотными переменными α и f

$$SC_{2X}(\alpha, f) = \Delta^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{2X}(n, \tau) e^{j2\pi\alpha n \Delta} e^{j2\pi f \tau \Delta}. \quad (10)$$

В приведенном выше выражении SC_{2X} представляет собой спектральную автокорреляционную функцию и отображает распределение мощности сигнала по отношению как к спектральной частоте f , связанной с формой сигнала, так и к циклической частоте α , связанной с циклической эволюцией сигнала. Следовательно, в отличие от классического спектрального анализа стационарных сигналов, спектральная автокорреляционная функция имеет дополнительное измерение, связанное с нестационарностью характеристик сигнала. Таким образом, можно определить частотно-временное представление, называемое *спектром Вигнера-Вилла* [14, 15]

$$WV_{2X}(n, f) = \int_{-1/2\Delta}^{1/2\Delta} SC_{2X}(\alpha, f) e^{j2\pi\alpha n\Delta} d\alpha = \Delta \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{2X}(n, \tau) e^{j2\pi f\tau\Delta}, \beta = 0,5. \quad (11)$$

Чтобы дать объяснение терминологии «спектральная автокорреляционная функция» для $SC_{2X}(\alpha, f)$, рассмотрим спектральное разложение Крамера, при котором случайный сигнал $X(n)$ раскладывается на комплексные экспоненты [13]

$$X(n) = \int_{-1/2\Delta}^{1/2\Delta} e^{j2\pi f n\Delta} dX(f). \quad (12)$$

где $dX(f)$ – приращение спектра, учитывающее вес экспоненты $e^{j2\pi f n\Delta}$ в сигнале $X(n)$. Подставив разложение Крамера (выражение (12)) в выражение (3), можно получить, что $SC_{2X}(\alpha, f)$ имеет альтернативное выражение

$$SC_{2X}(\alpha, f) df d\alpha = E(dX(f + \beta\alpha), dX(f - \bar{\beta}\alpha)^*). \quad (13)$$

Данное выражение показывает, что $SC_{2X}(\alpha, f)$ является мерой корреляции между спектральными приращениями $dX(f + \beta\alpha)$ и $dX(f - \bar{\beta}\alpha)$, то есть между частотными составляющими сигнала X на частотах $f + \beta\alpha$ и $f - \bar{\beta}\alpha$, отстоящих друг от друга на α .

Спектральная автокорреляционная функция (рис. 3) имеет следующие свойства

$$SC_{2X}(\alpha, f)^* = SC_{2X}(-\alpha, f + (\bar{\beta} - \beta)\alpha) = SC_{2X}(-\alpha, -f), \text{ при } X \in R; \quad (14)$$

$$SC_{2X}(-\alpha, f) = SC_{2X}(\alpha, f + (\bar{\beta} - \beta)\alpha)^* = SC_{2X}(-\alpha, -f)^*, \text{ при } X \in R. \quad (15)$$

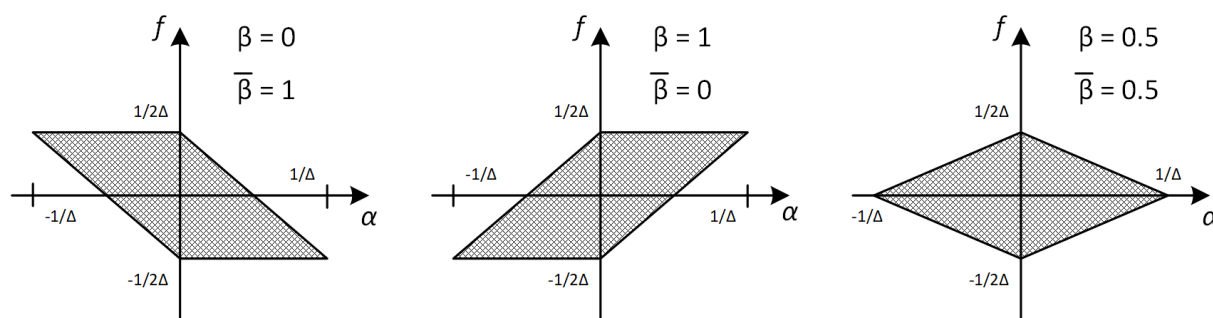


Рис. 3. Частотная поддержка спектральной автокорреляционной функции при различных значениях параметров β и $\bar{\beta}$.

Поскольку $dX(f + \beta\alpha)$ и $dX(f - \bar{\beta}\alpha)$ являются периодическими функциями частоты f с периодом $1/\Delta$ (из-за дискретизации во временной области), частотная поддержка спектральной корреляции ограничена главным квадрантом

$$\begin{cases} -\frac{1}{2\Delta} \leq f + \beta\alpha \leq \frac{1}{2\Delta}; \\ -\frac{1}{2\Delta} \leq f - \bar{\beta}\alpha \leq \frac{1}{2\Delta}. \end{cases} \quad (16)$$

Другие квадранты могут быть получены симметричным образом.

Определенная таким образом спектральная автокорреляционная функция потенциально может характеризовать любой нестационарный сигнал, будь то циклостационарный сигнал или нет. В случае циклостационарных сигналов спектральная корреляция имеет весьма специфическую структуру. При подстановке ряда Фурье (выражение (6)) в выражение (10) фактически получается, что

$$SC_{2X}(\alpha, f) = \sum_{\alpha_i \in A} SC_{2X}(f, \alpha_i) \delta(\alpha - \alpha_i), \quad (17)$$

где

$$SC_{2X}(f, \alpha_i) = \Delta \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_{2X}(\tau, \alpha_i) e^{-j2\pi f \tau \Delta}. \quad (18)$$

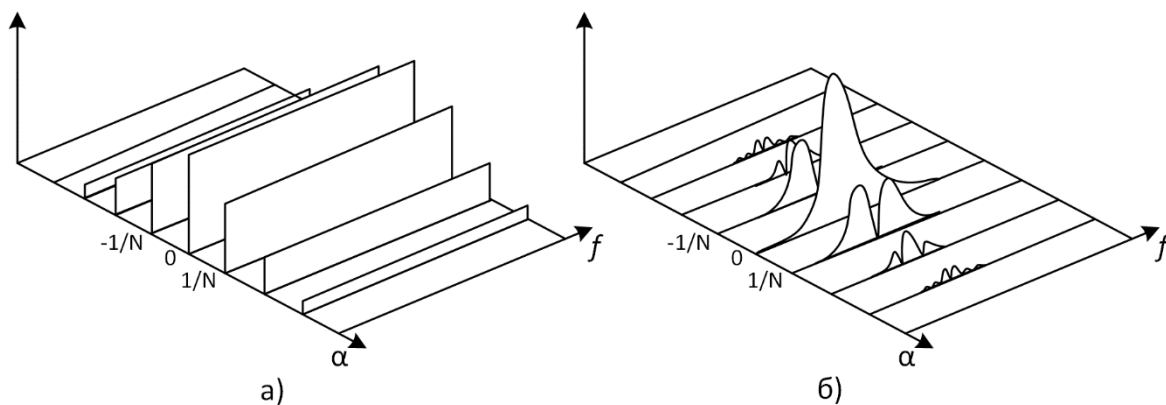


Рис. 4. Спектральная автокорреляционная функция $SC_{2X}(\alpha, f)$:
а) первый (базовый) пример; б) второй пример

Выражение (14) говорит о том, что мощность циклостационарных сигналов распределяется по спектральным линиям, параллельным оси f , и расположена на циклических частотах α . Типичная непрерывно/дискретная структура спектральной автокорреляционной функции циклостационарных сигналов выявляет центральную роль, которую играет спектральная величина $S_{2X}(f, \alpha_i)$, также известная как *циклическая спектральная плотность мощности* (ЦСПМ) или *циклический спектр*, т.е. дискретное во времени преобразование Фурье (Discrete-time Fourier Transform) циклической автокорреляционной функции. В то время как спектральная автокорреляционная функция $SC_{2X}(\alpha, f)$ представляет собой поверхностную плотность мощности, циклический спектр мощности $S_{2X}(f, \alpha_i)$ является линейной плотностью мощности, которая является функцией только частоты f и индексируется циклической частотой α . Лучше раскрыть разницу между спектральной автокорреляционной функцией и ЦСПМ можно с помощью следующих выражений

$$SC_{2X}(\alpha, f) = \lim_{L \rightarrow \infty} E(X_L(f + \bar{\beta}\alpha), X_L(f - \beta\alpha)^*), \quad (19)$$

$$S_{2X}(f, \alpha_i) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L\Delta} E(X_L(f + \bar{\beta}\alpha_i), X_L(f - \beta\alpha_i)^*), \quad (20)$$

где $X_L(f)$ – это DTFT от сигнала $X(n)$, используя L отсчетов сигнала.

Из выражений (14) и (16) становится ясно, что физическая интерпретация циклического спектра мощности аналогична интерпретации обычного спектра

мощности стационарных сигналов. Действительно, циклический спектр мощности равен классическому спектру мощности (т.е. преобразованию Фурье) при $\alpha_i = 0$.

В качестве иллюстрации взаимосвязи между спектральной корреляцией и циклическим спектром мощности снова рассмотрим сигнал первого примера. Его спектральная автокорреляционная функция выглядит следующим образом

$$SC_{2X}(\alpha, f) = \Delta \sum_{\alpha_i \in A} c_i \sigma_W^2 \delta(\alpha - \alpha_i), \quad (21)$$

и, следовательно, его циклический спектр мощности определяется выражением вида

$$S_{2X}(f, \alpha_i) = \Delta c_i \sigma_W^2. \quad (22)$$

Для удобства понимания, основные преобразования между дескрипторами второго порядка для циклостационарных сигналов представлены рис. 5.

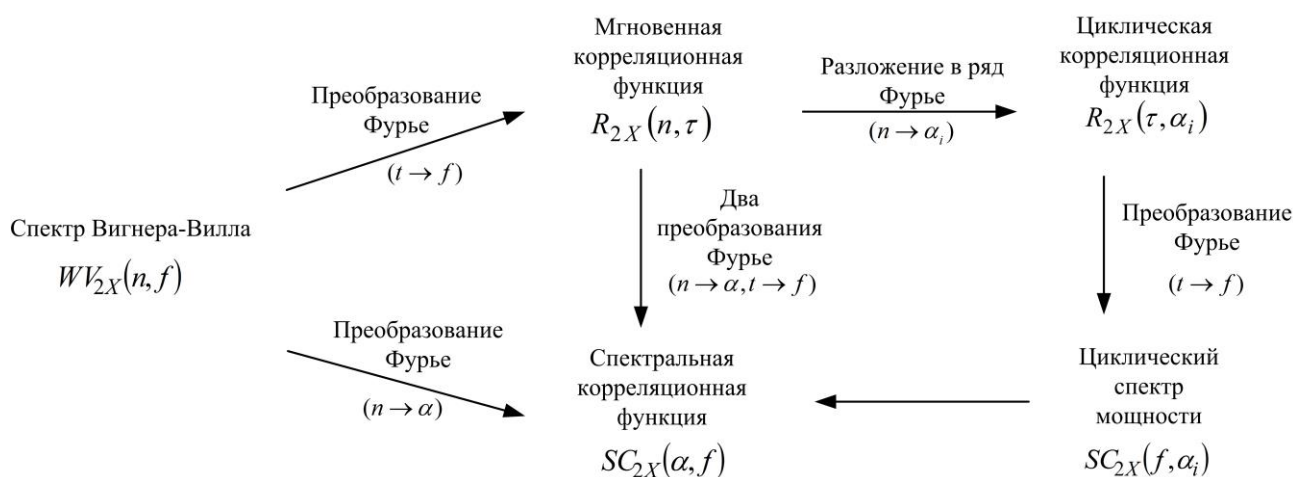


Рис. 5. Схема преобразований дескрипторов второго порядка

Методика «слепого» обнаружения радиосигналов на основе прямого расширения спектра

Методика «слепого» обнаружения базируется на предположении, что если в результате циклического спектрального анализа (ЦСА) получена циклическая спектральная плотность мощности (ЦСПМ) с ярко-выраженными компонентами на некоторых частотах, то это означает, что в эфире присутствует некоторый информационный сигнал с временными характеристиками, соответствующими найденной частоте.

Рассмотрим для примера систему связи с ПРС, в которой:

$R_b = 682$ Кбит/с – информационная битовая скорость;

$R_{cb} = 1364$ Кбит/с – скорость кодированного потока;

$R_s = 682$ Ксимволов/с – символьная скорость;

$R_c = 10230$ Кчипов/с = 10,3 МГц – чиповая скорость;

$N = 15$ – число чипов ПСП, используемой для ПРС.

Упрощенная схема передатчика и устройства обнаружения показана на рис. 6.

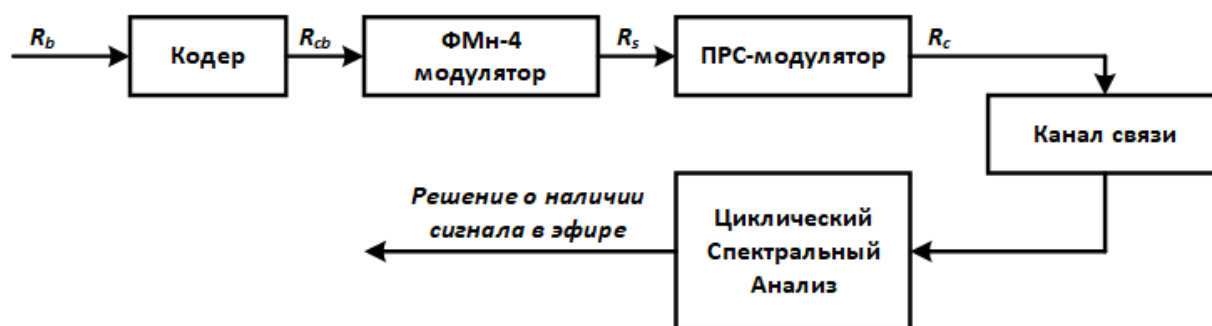


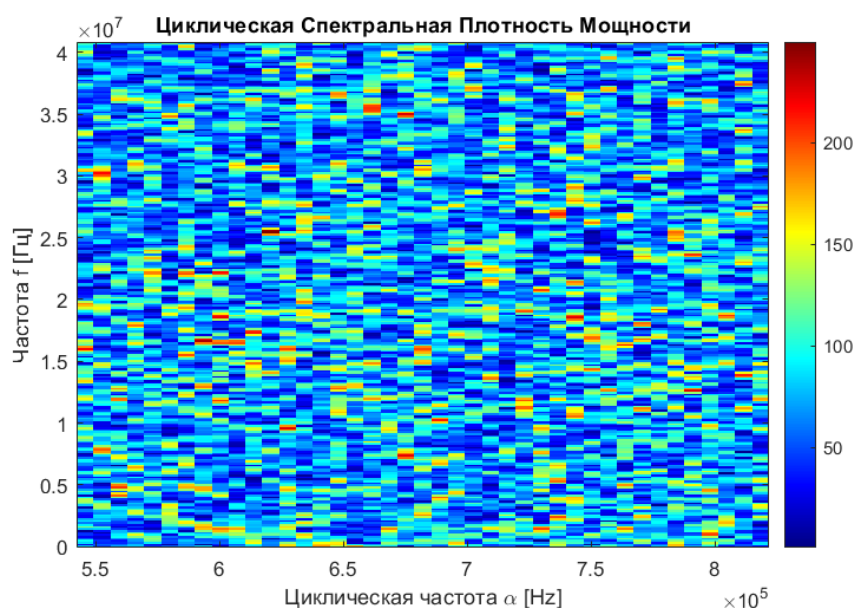
Рис. 6. Упрощенная схема передатчика и устройства обнаружения сигналов

На рис. 6 показан вид ЦСПМ, соответствующий различному отношению сигнал/шум, т.е. в контексте данной задачи, соответствующий мощности сигнала в эфире.

На рис. 7 показаны результаты анализа состояния радиоэфира с помощью циклического спектрального анализа.

На рис. 7(а) иллюстрируется равномерная ЦСПМ, соответствующая случаю, когда сигнал в эфире отсутствует, либо находится глубоко под шумами приемника.

На рис. 7(б) можно видеть ярко выраженные составляющие на циклической частоте 682000 Гц, соответствующие символьной скорости R_s при работе системы связи с ПРС, где $R_c = 15R_s$ (для ПРС используется 15-чиповая ПСП).



а) ЦСПМ при отсутствии сигнала системы связи в эфире



б) ЦСПМ при наличии сигнала системы связи в эфире

Рис. 7. Результаты анализа состояния радиоэфира с помощью ЦСПМ

Таким образом, можно провести моделирование и определить вероятность корректного обнаружения данного сигнала в эфире при различном символьном отношении сигнал/шум (E_s/N_o), т.е. в некоторой степени это может соответствовать также и дальности до объекта излучения (рис. 8).

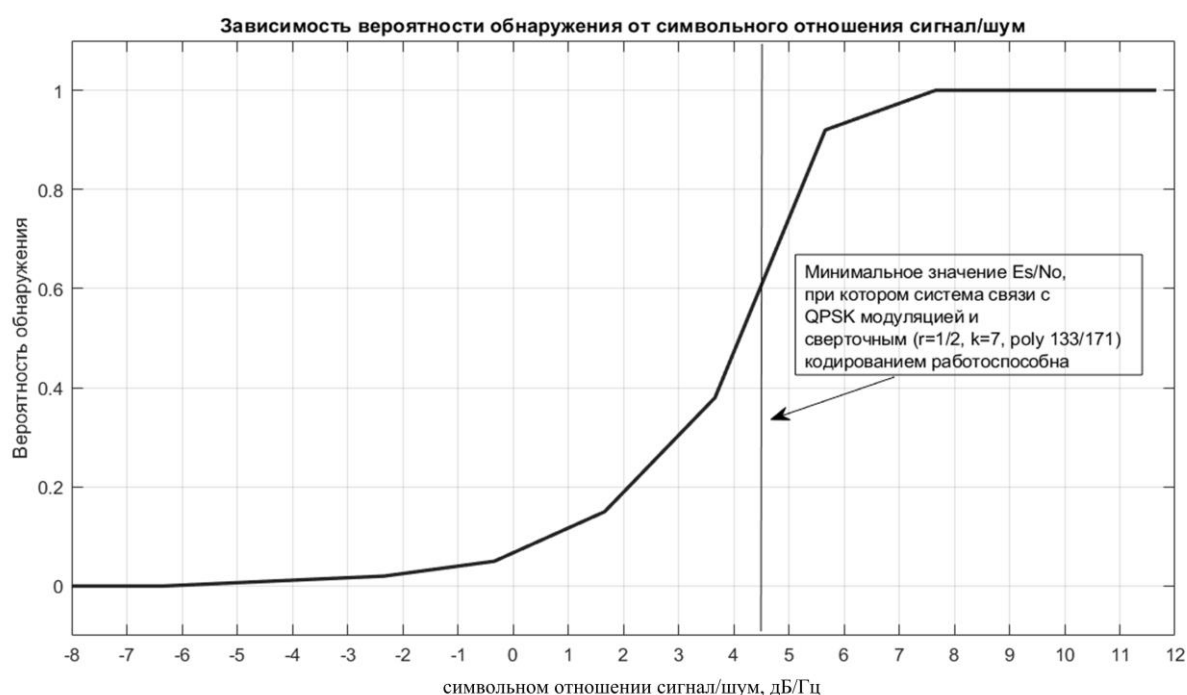


Рис. 8. Вероятность обнаружения информационного сигнала в эфире при различном отношении сигнал/шум

Из рис. 8 можно видеть, что вероятность корректного обнаружения с помощью описанной методики на базе ЦСА находится на уровне выше 0,5 для диапазона отношений сигнал/шум, в котором описанная система связи имеет низкую вероятность битовой ошибки, т.е. работоспособна.

Выводы

В работе исследован метод «слепого» обнаружения на основе свойств циклостационарности информационных радиосигналов, сформированных по методу прямого расширения спектра. Приведены основные аналитические соотношения для описания алгоритмов расчета дескрипторов второго порядка во временной и частотной области для (квази-) циклостационарных сигналов. С помощью имитационного моделирования показано, что применение ЦСПМ в алгоритмах слепого обнаружения радиосигналов может быть применимо в задачах по обнаружению, идентификации и оценке параметров сигналов с прямым расширением спектра, а также сигналов с расширением спектра методом псевдослучайной периодической перестройки частоты. В ходе исследований показано, что для системы связи с QPSK модуляцией и сверточным кодированием оказывается возможно идентифицировать работы системы связи при значениях сигнал/шум, обеспечивающих низкую вероятность битовой ошибки.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 21-19-00481.

Литература

1. Ананьев А.В., Лютин В.И., Иванников К.С. Синтез бортовых приемных устройств совмещенной обработки радиолокационных и информационных сигналов беспилотных летательных аппаратов малого класса // Телекоммуникации. 2022. № 9. С. 9-20.
2. Лютин В.И., Ананьев А.В. Различение и синхронизация широкополосных сигналов с внутриимпульсной нелинейной частотной модуляцией на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи // Телекоммуникации. 2018. № 3. С. 18-28.
3. Лютин В.И., Ананьев А.В., Гончаренко В.И. Различение и синхронизация псевдослучайных сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 428-445.
4. Ананьев А.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Кащенко А.Г., Кащенко Г.А. Минимизация рисков несанкционированного доступа к информации в наземных и аэромобильных радиосетях критически важных объектов методами многокритериальной многопутевой маршрутизации // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 2. С. 2-6.
5. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их применения в системах радиотехники и связи: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: ПГУТИ, 2004. – 266 с.
6. Кузьмин Л.В., Гриневич А.В. Способ слепого обнаружения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов на фоне межимпульсной интерференции // Письма в журнал технической физики. 2019. № 45 (16). С. 33-36.

7. Gardner W.A., The spectral correlation theory of cyclostationary time-series // *Signal Processing*. 1986. Vol. 11. No. 1. P. 13-36.
8. Antoni J. Cyclic spectral analysis in practice // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21. No. 2. P. 597-630.
9. Antoni J. Cyclostationarity by examples // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23. No. 4. P. 987-1036.
10. Gardner W.A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals // *IEEE Signal Processing Magazine*. 1991. Vol. 8. No. 2. P. 14-36. doi: 10.1109/79.81007.
12. Giannakis G.B. Cyclostationary signal analysis. *The Digital Signal. – Processing Handbook*, IEEE Press, 1998. – 32 p.
13. Flandrin P., Stockler J. *Time-Frequency/Time-scale Analysis*. – New York: Academic Press, 1999. – 386 p.
14. Martin W. Time-frequency analysis of random signals // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – Paris, France, 1982. P. 1325-1328. doi:10.1109/ICASSP.1982.1171454.
15. Martin W., Flandrin P. Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 1985. Vol. 33. No. 6. P. 1461-1470. doi: 10.1109/TASSP.1985.1164760

References

1. Ananiev A.V., Lyutin V.I., Ivannikov K.S. Synthesis of onboard receivers for combined processing of radar and information signals of small unmanned aerial vehicles. *Telecommunications*, 2022, no. 9, pp. 9-20 (in Russia).
2. Lyutin V.I., Ananiev A.V. Discrimination and synchronization of broadband signals with intra-pulse nonlinear frequency modulation against the background of white noise and narrow-band additive interference. *Telecommunications*, 2018, no. 3, pp. 18-28 (in Russia).
3. Lyutin V.I., Ananiev A.V., Goncharenko V.I. Distinguishing and synchronization of pseudo-random signals with intra-pulse phase shift keying against the background of white noise and narrow-band additive interference. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*, 2018, no. 7, pp. 428-445 (in Russia).
4. Ananiev A.V., Bagdasaryan A.S., Bagdasaryan S.A., Kashchenko A.G., Kashchenko G.A. Minimizing the Risks of Unauthorized Access to Information in Ground and Airmobile Radio Networks of Critical Objects by Methods of Multi-Criteria Multi-Path Routing. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*, 2017, no. 2, pp. 2-6 (in Russia).
5. Goryachkin O.V. *Metody slepoy obrabotki signalov i ikh primeneniya v radiotekhnike i svyazi*. Diss. dokt. tehn. nauk [Methods of blind signal processing and their application in radio engineering and communication systems. Dr. habil. Thesis]. Samara, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 2004, 266 p (in Russia).
6. Kuzmin L.V., Grinevich A.V. A method for blind detection of ultra-wideband chaotic radio pulses against the background of interpulse interference. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2019, no. 45, pp. 33-36 (in Russia).

7. Gardner W.A., The spectral correlation theory of cyclostationary time-series. *Signal Processing*, 1986, vol. 11, no. 1, pp. 13-36.
8. Antoni J., Cyclic spectral analysis in practice. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, vol. 21, no. 2, pp. 597-630.
9. Antoni J., Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 987-1036.
10. Gardner W.A., Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1991, vol. 8, no. 2, pp. 14-36. doi: 10.1109/79.81007.
12. Giannakis G.B, *Cyclostationary signal analysis in: The Digital Signal Processing Handbook*. IEEE Press, 1998. 32 p.
13. Flandrin P., Stockler J. *Time-Frequency/Time-scale Analysis*. Academic Press, New York, 1999. 386 p.
14. Martin W. Time-frequency analysis of random signals. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Paris, France, 1982, pp. 1325–1328. doi:10.1109/ICASSP.1982.1171454.
15. Martin W., Flandrin P. Wigner–Ville spectral analysis of nonstationary processes. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, vol. 33, no. 6, pp. 1461–1470. doi: 10.1109/TASSP.1985.1164760.

Статья поступила 11 октября 2022 г.

Информация об авторах

Гончаренко Владимир Иванович – доктор технических наук, доцент. Директор Военного института. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: инфокоммуникационные технологии и системы связи и управления. E-mail: vladimirgonch@mail.ru

Клецков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук. Докторант научно-исследовательского отдела. Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны. Область научных интересов: инфокоммуникационные технологии, системы связи и управления, сбор и обработка информации. E-mail: major7786@mail.ru

Серкин Федор Борисович – кандидат технических наук. Доцент кафедры инфокоммуникаций. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: беспроводные системы связи. E-mail: serkinfb@list.ru

Шевцов Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой инфокоммуникаций. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: инфокоммуникационные технологии и системы связи. E-mail: vs.gtumai@gmail.com

Адрес: 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Using the properties of cyclostationarity of information radio signals for blind detection of high-speed wireless information transmission channels

V. I. Goncharenko, D. A. Kletskov, F. B. Serkin, V. A. Shevtsov

Purpose: currently, an urgent task is to develop methods for assessing the state of the radio air in order to identify the radio signals of various wireless communication systems. Algorithms for "blind" detection of radio signals and estimation of their parameters for the identification of wireless communication systems are an effective tool for solving this problem. It is known that information signals of such communication systems can also be considered as a certain class of non-stationary signals - cyclostationary signals. For such signals, cyclic spectral analysis can serve as an effective means of identification. This article proposes to use the apparatus of cyclic spectral analysis to identify the described signals. **The aim of the work** is to develop an algorithm for the «blind» detection of signals from high-capacity radio systems based on the theory of cyclostationarity of information radio signals using the apparatus of cyclic spectral analysis. **Methods:** the solution to the problem is based on the theory of cyclic spectral analysis developed by Gardner et al. at the end of the 20th century and studied in more detail in the works of Anthony. **Novelty:** The novelty of the proposed solution is the combination of methods of blind detection of radio signals and the theory of cyclic spectral analysis in relation to the signals of high-speed radio systems using direct spread spectrum and spread spectrum using the sequentially tunable operating frequency method. **Result:** the application of the theory of cyclostationarity to blind detection methods has shown its potential effectiveness. Based on the simulation results, it can be seen that the considered direct spread radio communication system is successfully identified at such signal-to-noise ratios that ensure the operability of the communication system itself. **Practical significance:** the presented algorithms can be applied in practice to solve the problems of identifying and estimating the parameters of radio signals of high-speed wireless communication systems.

Keywords: cyclostationary signals, cyclic spectral analysis, direct spectrum spreading, sequential tuning of the operating frequency, blind detection of signals.

Information about Authors

Vladimir Ivanovich Goncharenko – Dr. habil. of Technical Sciences, Full Professor. Director of the military institute. Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: infocommunication technologies and communication systems. E-mail: vladimirgonch@mail.ru

Dmitry Alexandrovich Kletskov – Ph.D. of Engineering Sciences. The post-graduate student of the research department. Yaroslavl Higher Military School of Air Defense. Research interests: infocommunication technologies, communication and control systems, collection and processing of information. E-mail: major7786@mail.ru

Fedor Borisovich Serkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of Infocommunications. Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: wireless communication systems. E-mail: serkinfb@list.ru

Vyacheslav Alekseevich Shevtsov – Dr. habil. of Technical Sciences, Full Professor. Head of the Department of Infocommunications. Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: infocommunication technologies and communication systems. E-mail: vs.gtumai@gmail.com

Address: Russia, 125993, Moscow, Volokolamsk highway, 4.