

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.5>

УДК: 621.391.6

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛА В РАЗЛИЧНЫХ БАЗИСАХ

С.Н. Агиевич, С.А. Луценко, С.С. Тихонов

Военная академия связи имени С.М. Буденного
194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2024 г.

Аннотация. Целью данной статьи является разработка обобщенной математической модели радиосигнала в различных базисах. Предлагаемая модель позволяет обобщить известные модели радиосигналов в базисных функциях синуса/косинуса, базисных функций сплайн-характеров, базисов сплайн-Виленкина-Крестенсона функций, базисов сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона-функций и др., строящихся на основе методов сплайн-алгебраического гармонического анализа. Для обобщенной модели сформулированы частные случаи для рассмотренных пространств базисных функций. Представлены структурные схемы и временные диаграммы, поясняющие основные этапы формирования и обработки радиосигналов в различных базисах. Методом моделирования в среде Матлаб проведена оценка помехоустойчивости предложенных радиосигналов. Анализ полученных результатов показал, что радиосигналы, сформированные на основе обобщенной математической модели в различных базисах по помехоустойчивости в условиях АБГШ сопоставимы (и даже имеют небольшое преимущество) с аналогичными сигналами, сформированными в базисах классических экспоненциальных функций. Представлена

оценка структурной скрытности. Показано, что структурная скрытность радиосигналов, сформированных в различных базисах, обеспечивается за счет формирования сигналов в априорно неизвестных базисах, параметры которых: группа, кольцо, порядок сплайна и номер базисной функции изменяются в соответствии с заданным кодовым словом, так же неизвестных потенциальным несанкционированным системам обработки. Структурная скрытность проявляется в неверном выборе базиса при обработке данных сигналов на прием, что влечет за собой расширение спектра сигнала. В результате происходит неверное оценивание параметров сигнала и неверная настройка демодулятора.

Ключевые слова: базисная функция, радиосигнал, математическая модель, сплайн-характеры, БФСХ.

Автор для переписки: Луценко Сергей Александрович,
sergei_lutsenko@inbox.ru

Введение

Разработка новых подходов к формированию и обработке радиосигналов является актуальной задачей в области радиотехники и телекоммуникаций как для гражданской, так для военной сферы. В связи с геометрическим ростом числа радиоустройств (в первую очередь из-за развития технологий Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT)) повышаются и возникают новые требования к качеству передачи данных и эффективности использования частотного спектра [1]. Одним из направлений развития является разработка новых методов формирования сигналов, позволяющих увеличить пропускную способность сетей и улучшить качество связи, новых методов обработки сигналов, обеспечивающих более эффективное использование спектра и уменьшение влияния помех, новых алгоритмов и методов передачи данных, позволяющих повысить эффективность использования радиоканалов и снизить энергопотребление радиоустройств.

В военных системах связи актуальность разработки новых подходов к формированию и обработке радиосигналов обусловлена в первую очередь необходимостью обеспечения высокой надежности и защищенности радиосвязи, особенно в условиях боевых действий при воздействии противника на каналы связи [2]. Также немаловажным фактором является наличие механизмов быстрой адаптации систем радиосвязи к изменяющимся условиям радиоэлектронной обстановки на коротком промежутке времени и оперативного внедрения новых технологий и стандартов на длительную перспективу.

Одна из главных проблем результативного решения задач формирования и обработки радиосигналов связана с адекватными формами их представления. С одной стороны, учитывая современные тенденции в передаче информации, целесообразным видится применение дискретных форм описания, для которых разработаны продуктивные методы цифровой обработки сигнала (ЦОС). С другой стороны, непрерывность по времени несущего колебания предполагает использование континуальных описаний. Таким образом, объективно возникает необходимость в разработке принципиально нового математического аппарата, объединяющего преимущества как дискретного, так и непрерывного представления радиосигналов, учитывающего их гладкость [3].

В работах Агиевича С.Н. предложена новая теория систем базисных функций (например, базисных функций сплайн-характеров (БФСХ), базисов сплайн-Виленкина-Крестенсона функций (СВКФ), базисов сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона-функций (СПВКФ) и др.), строящихся на основе методов сплайн-алгебраического гармонического анализа (САГА) и позволяющих существенно расширить круг используемых базисных функций при формировании радиосигналов. Частными случаями систем базисных функций являются и непрерывные экспоненциальные функции синуса/косинуса, что позволяет получать обобщенные математические модели для всех типов радиосигналов, построенных на их основе. Базовые определения и свойства базисных функций сплайн-характеров представлены в группе статей [4-7] и в данной работе не рассматриваются

1. Обобщенная математическая модель радиосигнала

В подавляющем большинстве случаев модуляция/манипуляция радиосигналов на физическом уровне в современных системах спутниковой связи происходит по трем модуляционным/манипуляционным признакам (или их комбинациям) – амплитуде, частоте и фазе, которые соответствуют амплитудной, частотной и фазовой модуляции/манипуляции и их комбинациям, формируемым в базисных функциях синуса/косинуса. Тогда классическая запись радиосигнала на длительности одного символа может быть представлена как:

$$s(t) = Ad(t) \cos(\omega t + \theta), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad (1)$$

где A – амплитуда радиосигнала;

ω – начальная частота радиосигнала;

θ – начальная фаза несущего колебания,

$\theta \in [0, 2\pi]$; $d(t)$ – информационная последовательность,

$d(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{при } t \notin [0, T_s] \end{cases}$, где T_s – длительность информационного символа.

В статьях [8-11] предложены прикладные математические модели радиосигналов, сформированные на основе теории систем базисных функций, однако, в проведенных исследованиях при математических записях радиосигналов использовались только классические манипуляционные признаки амплитуда/частота/фаза.

В выражении (2) представлена обобщенная математическая запись радиосигнала $z(t_{ti})$ на длительности одного тактового интервала (символа) t_i , содержащая четвертый манипуляционный параметр – непосредственно базисную функцию:

$$z(t_{ti}) = b_{flow}(t_{ti}) V m t_{i t_i} (A t_{i t_i}, f t_{i t_i}, \varphi t_{i t_i}, L_{(H,K)} G_n^p), \quad (2)$$

где $0 < t \leq t_i$, t_i – длительность тактового интервала; $i = 0, 1, \dots, I_t - 1$, I_t – количество тактовых интервалов радиосигнала; $b_{flow}(t_i)$ – битовый поток на входе модулятора; $Vmti_{i_t}$ – универсальная модель вида модуляции; Ati_{i_t} – амплитуда радиосигнала; fti_{i_t} – частота радиосигнала; ϕti_{i_t} – фаза радиосигнала; $L(H,K)G_n^p$ – пространство базисных функций радиосигнала, H – абелева группа, K – кольцо, n – номер базисной функции, p – гладкость базисной функции. Универсальная модель вида модуляции $Vmti_{i_t}$ включает в себя все виды манипуляций/модуляций $Vmti_{i_t} \in \{AM_n, CM_n, FM_n \text{ и др.}\}$.

Тогда аналитическое выражение для обобщенной математической записи радиосигнала в системах базисных функций может быть записано как:

$$\tau_{L(H_{jr},K_{jr})}^{(H_{jr},K_{jr})} S_n^p(t) = \tau_{L(H_{jr},K_{jr})}^{(H_{jr},K_{jr})} A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot eseq(t) \cdot \tau_{L(H_{jr},K_{jr})}^{(H_{jr},K_{jr})} \chi_{nr}^p(t, \phi_{kr}), \quad (3)$$

где $ir = 1 \dots IR$ – изменение пределов амплитуды радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, IR – размерность амплитуды; $nr = 1 \dots NR$ – изменение пределов частоты радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, NR – размерность частоты; $kr = 1 \dots KR$ – изменение пределов фазы радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, KR – размерность фазы; $jr = 1 \dots JR$ – изменение пределов базиса радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, JR – размерность базисной функции; $b_{flow}(t)$ – битовый поток; $eseq(t)$ – расширяющая спектр радиосигнала функция; $0 \leq t \leq T$, $T \leq \tau(H_{jr}, K_{jr}) \leq L(H_{jr}, K_{jr})T$, T – длительность символа; $\tau(H_{jr}, K_{jr})$ – длительность передачи информации в пределах базиса; $L(H_{jr}, K_{jr})T$ – длительность передачи информации; $\tau_{L(H_{jr},K_{jr})}^{(H_{jr},K_{jr})} A_{ir}(t)$ – амплитуда радиосигнала; $\tau_{L(H_{jr},K_{jr})}^{(H_{jr},K_{jr})} \chi_{nr}^p(t, \phi_{kr})$ – базисная функция из пространства $L(H_{jr}, K_{jr})G_{nr}^p$ с номером nr .

Отметим частные случаи для обобщенной модели (3).

Случай 1. Для пространства $L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)G_{nr}^p$ (пространство СПВКФ), полученного из пространства $L(H_{jr}, K_{jr})G_{nr}^p$, где $H := H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{jr}$ – произвольные целые числа, справедливо:

$$\begin{aligned} & \tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & = \tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) A_{ir}(t) \tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) \chi_{nr}^p(t, \varphi_{kr}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) \leq L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) T.$$

Случай 2. Для пространства $L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)G_{nr}^p$ (пространство СВКФ), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а μ – произвольное целое число, справедливо:

$$\begin{aligned} & \tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & = \tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) A_{ir}(t) \tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) \chi_{nr}^p(t, \varphi), \end{aligned} \quad (5)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) \leq L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) T.$$

Случай 3. Для пространства $L(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C)G_{nr}^p$ (пространство функций сплайн-Крестенсона), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а ρ – простое целое число, справедливо:

$$\begin{aligned} & \tau(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & L(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) S_{ir}^p(t) = \\ & = \tau(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) A_{ir}(t) \tau(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) \chi_{nr}^p(t, \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) \leq L(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C) T.$$

Случай 4. Для пространства $L(H_N, C)G_{nr}^p$ (пространство классических сплайн-функций), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_N$, $\mu = N$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} S_{ir}^p(t) &= \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} A_{ir}(t) \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} \chi_n^p(t, \varphi), \\ ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_N, C) \leq_{L(H_N, C)} T. \end{aligned} \quad (7)$$

Случай 5. Для пространства $L(H_N, C)G_{nr}^p$ при $p \rightarrow \infty$, полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_N$, $\mu = N$ и $K = C$ – поле комплексных чисел, справедливо:

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow \infty} \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} S_{ir}^p(t) &= \lim_{p \rightarrow \infty} \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} A_{ir}(t) \tau_{L(H_N, C)}^{(H_N, C)} \chi_n^p(t, \varphi) = A_{ir}(t) \exp(j2\pi nt/N), \\ ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_N, C) \leq_{L(H_N, C)} T. \end{aligned} \quad (8)$$

Случай 6. Для пространства $L(H_{2^l}, GF(r^v))G_{nr}^p$ (пространство сплайн-функций Галуа), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_{2^l}$ и $K = GF(r^v)$ есть поле Галуа, $v = 1, 2, 4, l = 1, 2, \dots$, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} S_{ir}^p(t) &= \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} A_{ir}(t) \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} \chi_{nr}^p(t, \varphi), \\ ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{2^l}, GF(r^v)) \leq_{L(H_{2^l}, GF(r^v))} T. \end{aligned} \quad (9)$$

Случай 7. Для пространства $L(H_{2^l}, GF(r^v))G_f^p$ (пространство сплайн-функций Рейдера), полученного из пространства $L(H, K)G_f^p$, где $H := H_{2^l}$ и $K = GF(r^v)$ – поле Галуа, $v = 1, l = 1, 2, \dots$, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} S_{ir}^p(t) &= \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} A_{ir}(t) \tau_{L(H_{2^l}, GF(r^v))}^{(H_{2^l}, GF(r^v))} \chi_{nr}^p(t, \varphi), \\ ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{2^l}, GF(r^v)) \leq_{L(H_{2^l}, GF(r^v))} T. \end{aligned} \quad (10)$$

Случай 8. Для пространства $L(\Gamma, Z_{\mu[l]})G_{nr}^p$ (пространство сплайн-функций Гаусса), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H = \Gamma$ – группа целых

чисел, $K = Z_{\mu}[i]$ – кольцо целых комплексных чисел, $\mu = a + ib$ – целое комплексное число, справедливо:

$$\tau(\Gamma, Z_{\mu}[i]) S_{ir}^p(t) = \frac{\tau(\Gamma, Z_{\mu}[i])}{L(\Gamma, Z_{\mu}[i])} A_{ir}(t) \frac{\tau(\Gamma, Z_{\mu}[i])}{L(\Gamma, Z_{\mu}[i])} \chi_{nr}^p(t, \varphi), \quad (11)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(\Gamma, Z_{\mu}[i]) \leq L(\Gamma, Z_{\mu}[i]) T.$$

На рис. 1, 2 представлены структурная схема и временные диаграммы, поясняющие основные этапы формирования радиосигнала в различных базисах.

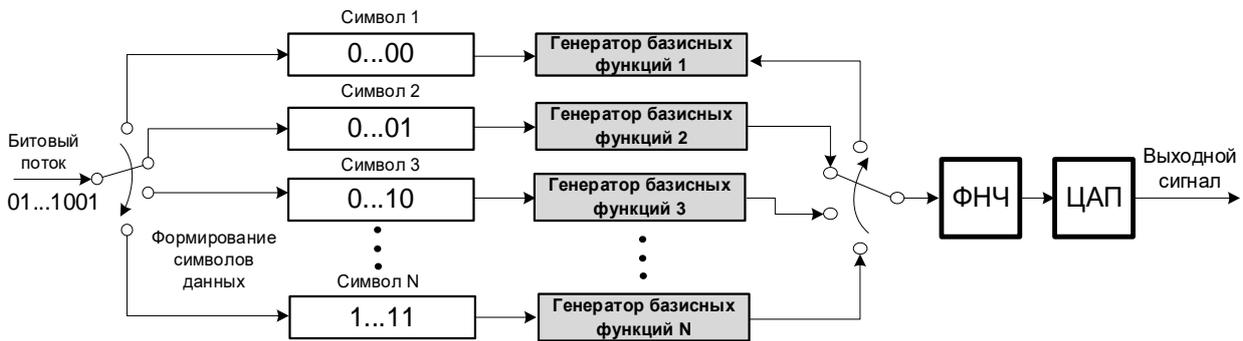


Рис. 1. Структурная схема формирования радиосигналов, сформированных в различных базисах.

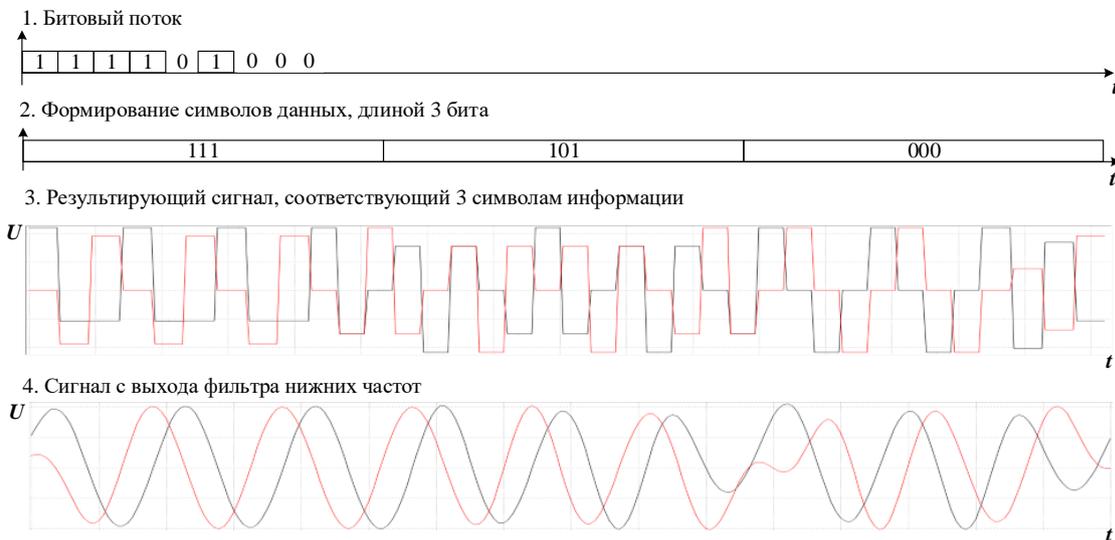


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие основные этапы формирования радиосигнала в различных базисах.

При формировании радиосигнала в различных базисах выполняются следующие процедуры:

1) Входящий информационный поток разделяется на символы данных. Разрядность символа данных определяется количеством базисных функций, с помощью которых задается форма сигнала.

2) Задается набор базисных функций, соответствующий разрядности символа данных.

3) Задается манипуляционная карта (схема модуляции), которая устанавливает однозначное соответствие между входным символом и соответствующей ему базисной функцией.

4) По значению символа данных выбирается и излучается базисная функция в соответствии с заданной манипуляционной картой.

5) По окончании; $\tau(H_{jr}, K_{jr})$ передача информации осуществляется с использованием следующей базисной функции.

6) По истечению $L(H_{jr}, K_{jr})^T$ передача информации завершается.

Предлагаемый подход открывает широкие возможности для адаптивного выбора соответствующего базиса и номера базисной функции в самом базисе, что позволяет, с одной стороны, регулировать использование вычислительного ресурса, а с другой – существенно затруднять процесс нелегитимного приема информации.

На рис. 3, 4 представлены структурная схема и временные диаграммы, поясняющие основные этапы обработки радиосигнала в различных базисах.

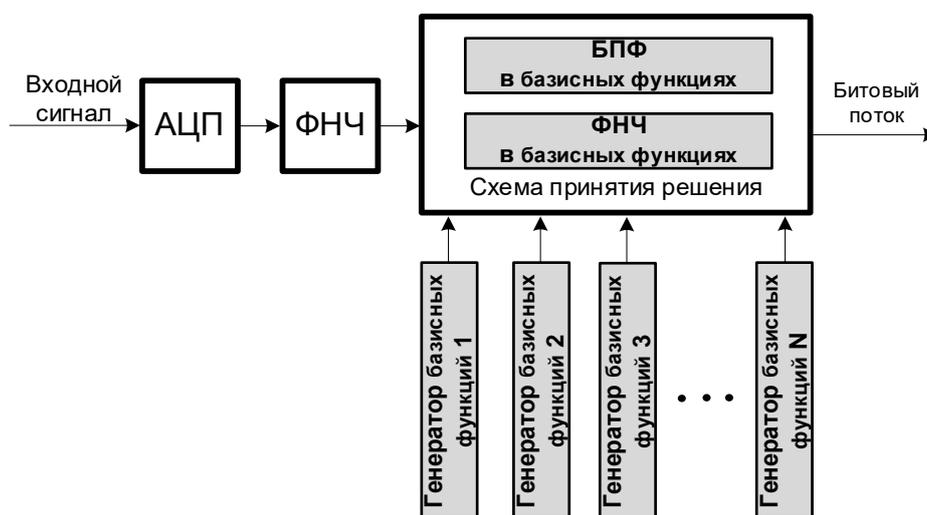


Рис. 3. Структурная схема обработки радиосигналов, сформированных в различных базисах.

Обработка радиосигналов, сформированных в различных базисах, осуществляется с использованием тех же процедур (как и при формировании), но выполняемых в обратном порядке:

- 1) Формируются отчеты принимаемого радиосигнала;
- 2) По информации об используемом базисе (в соответствии с заданной манипуляционной картой) производится обнаружение радиосигнала и установление тактовой синхронизации.
- 3) Фиксируется длительность $\tau(H_{jr}, K_{jr})$ приема информации в пределах фиксированного базиса.
- 4) На основе информации об используемой базисной функции производится демодуляция и получение соответствующих бит информации.
- 6) По окончании $\tau(H_{jr}, K_{jr})$ прием информации осуществляется с использованием другого базиса на основании заданной манипуляционной карты.
- 7) По истечению $L(H_{jr}, K_{jr})T$ прием информации завершается.

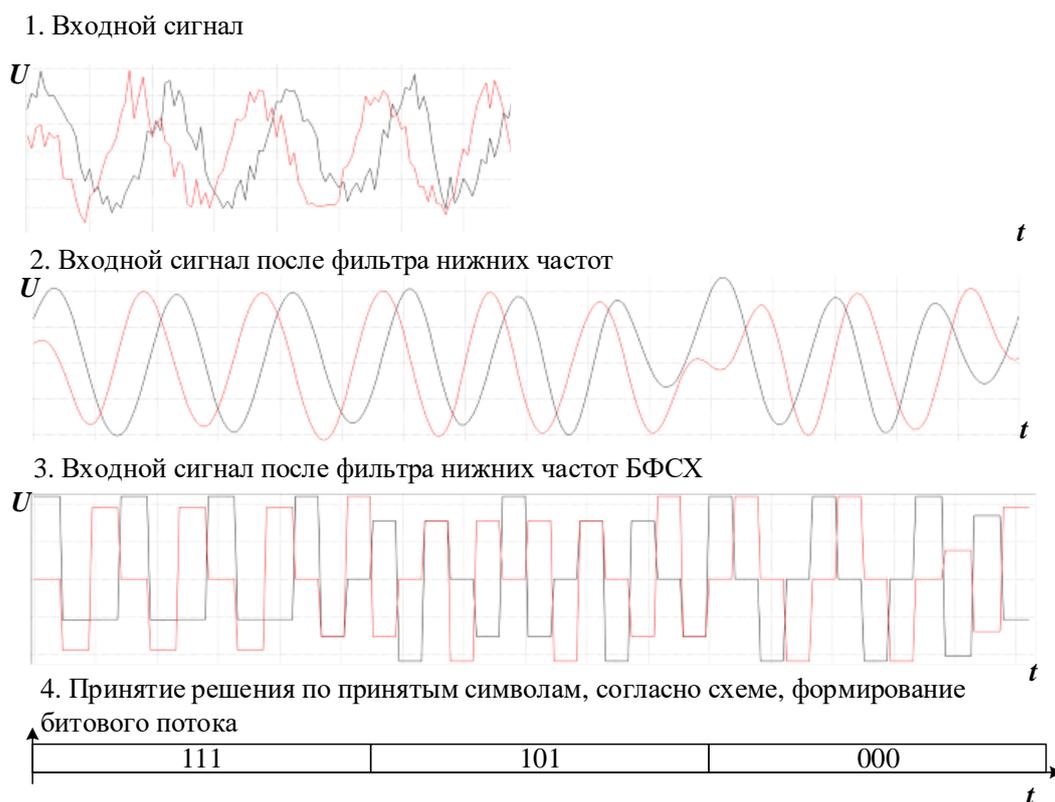


Рис. 4. Этапы обработки радиосигналов, сформированных в различных базисах.

Оценка помехоустойчивости радиосигналов, описанных обобщенной математической моделью в различных базисах, производилась методом моделирования (на основе функций ВКФ, как частного случая базисов функций сплайн-характеров). Был взят канал с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) по показателю вероятности битовой ошибки $P_{\text{ош}}$ на выходе демодулятора в зависимости от текущего значения отношения сигнал/шум (ОСШ). Кроме того, произведена оценка значений отношения сигнал/помехи (ОСП) при воздействии ретранслированной помехи.

Графики оценки помехоустойчивости радиосигналов, сформированных в различных базисах, представлены на рис. 5. При моделировании использовались условные единицы для простоты получения конечного результата. При формировании сигналов в различных базисах брались одинаковые по длительности символы (количество отсчетов на символ), использовались фильтры нижних частот (ФНЧ) с одинаковыми амплитудно-частотными характеристиками, при этом отличался только

базис формирования и методика обработки. То есть, при формировании сигнала QPSK использовались одни и те же манипуляционные вектора, проводилась передискретизация в одинаковое количество раз, использовался тот же ФНЧ и накладывался одинаковый АБГШ.

Анализ полученных результатов показал, что радиосигналы, сформированные на основе обобщенной математической модели в различных базисах по помехоустойчивости в условиях АБГШ сопоставимы (и даже имеют небольшое преимущество) с аналогичными сигналами, сформированными в базисах классических экспоненциальных функций. Как известно, при переходе от ВКФ в классический базис дискретно-экспоненциальных функций происходит расширение основного лепестка полезного сигнала, в связи с чем в основной лепесток спектра полезного сигнала попадает больше шума, чем и объясняется выигрыш при проведении моделирования.

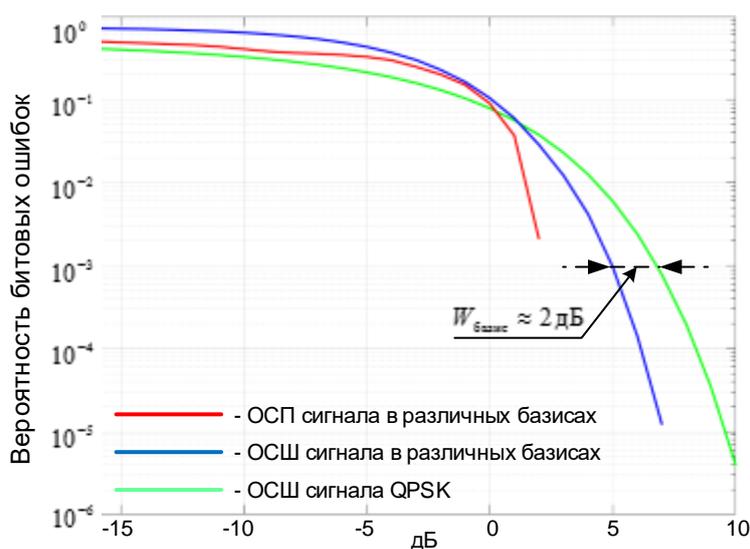


Рис. 5. Результаты оценки помехоустойчивости.

Оценка скрытности радиосигналов, описанных обобщенной математической моделью в различных базисах, производилась согласно подходу, предложенному в [12], где потенциальная структурная скрытность определяется количеством двоичных измерений, которое необходимо

выполнить для раскрытия структуры сигнала (рис. 6). Тогда общее выражение для потенциальной скрытности имеет вид:

$$S = \log_2 X, \quad (12)$$

где X – ансамбль всех возможных комбинаций, определяемый количеством всех возможных значений параметров радиосигнала.

Структурная скрытность радиосигналов, сформированных в различных базисах, обеспечивается за счет формирования сигналов в априорно неизвестных базисах, параметры которых: группа H_{jr} , кольцо K_{jr} , порядок сплайна p и номер базисной функции nr изменяются в соответствии с заданным кодовым словом, так же неизвестных потенциальным несанкционированным системам обработки. Структурная скрытность проявляется в неверном выборе базиса при обработке данных сигналов на прием, что влечет за собой расширение спектра сигнала. В результате происходит неверное оценивание параметров сигнала и неверная настройка демодулятора.

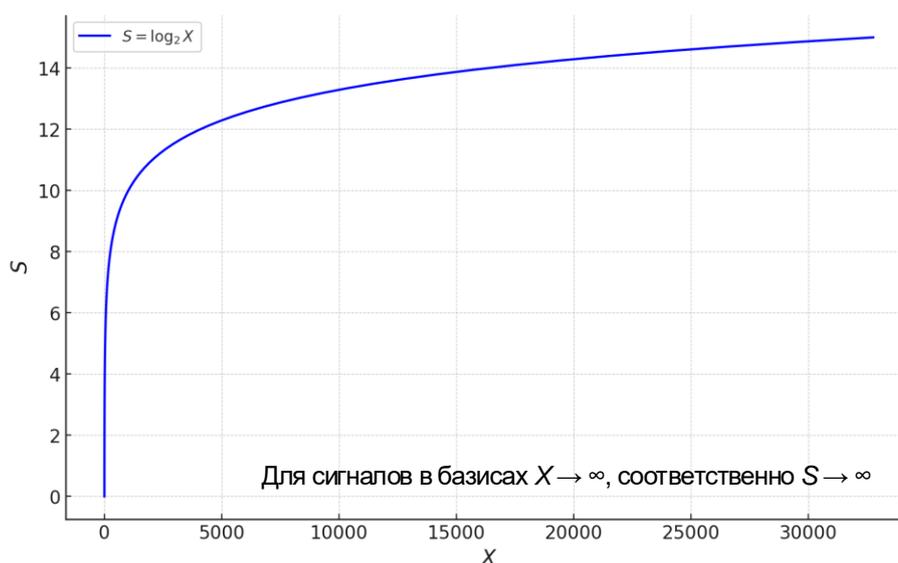


Рис. 6. Оценка структурной скрытности S .

Заключение

Очевидно, что решение проблемы разработки обобщенной математической модели радиосигнала неразрывно связано с разработкой

соответствующих методов, позволяющих решать следующие частные задачи при реализации процессов организации радиосвязи:

- обеспечение непосредственного излучения сформированных радиосигналов в эфир;
- повышение точности оценивания частотных и временных параметров радиосигналов;
- повышение скорости обработки радиосигналов;
- обеспечение скрытности передачи информации;
- сопряжение существующих и перспективных средств радиосвязи;
- повышение помехозащищенности радиосигналов.

К основным достоинствам разработанной обобщенной математической модели радиосигнала следует отнести:

- увеличение размерности внутренних характеристик радиосигналов, позволяющих варьировать их свойствами для адаптации к сложившейся радиоэлектронной обстановки при осуществлении различных процессов организации радиосвязи;
- сочетание преимуществ дискретной и непрерывной форм их описания, обусловленное двойственной природой базисных функций (являются непрерывными функциями, но построенными по дискретным данным), что позволяет наилучшим образом учитывать то, что в средствах связи сигнал формируется и обрабатывается в дискретной форме, а излучается в виде непрерывного колебания;
- возможность учета степени гладкости обрабатываемых процессов, что позволит достичь более высоких точностей при интерполяции и, следовательно, при определении значений спектральных параметров, а также экстремумов корреляционных функций;
- физическую реализуемость при конечном значении степени гладкости;
- удобство реализации и получение возможности существенного сокращения объема вычислений средствами цифровой обработки сигналов;

– возможность выбора необходимой системы базисных функций для формирования радиосигналов с требуемыми свойствами.

Скорость обработки радиосигналов в различных базисных функциях может быть существенно выше (до 2-х – 3-х раз) даже без аппроксимации по сравнению с аналогичной обработкой классических радиосигналов в дискретно-экспоненциальных функциях. Данный факт может быть очень полезным в задачах, связанных с оперативным обнаружением радиосигналов (например, при решении задач зондирования).

Литература

1. Ядровская М.В., Поркшеян М.В., Синельников А.А. Перспективы технологии интернета вещей //Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21. – №. 2. – С. 207-217. EDN: HXPZIC
2. Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н. Об эволюции теории и практики построения существующих систем связи военного назначения на основе создания мультikonвергентной системы связи группировки войск (сил) на театре военных действий //Военная мысль. – 2021. – №. 1. – С. 66-78. EDN: HZBNUF
3. Агиевич С.Н., Беспалов В.Л. Цифровая обработка сигнала: скорость и экономия ресурсов // Мобильные системы. – 2007. – №. 3. – С. 26-29. EDN: HZSIUB
4. Агиевич С.Н. Формирование и обработка радиосигналов в базисах функций сплайн-характеров: Моногр. – СПб.: ВАС, 2014. – 224 с.
5. Агиевич С.Н. Сплайн-Виленкина-Крестенсона функции в представлении сигналов // Научное приборостроение. – 2002. – №. 1. – С. 79-89. EDN: HSQMXX
6. Агиевич А.С., Луценко С.А., Тихонов С.С. Моделирование сигналов спутниковых систем связи и ретрансляции данных с применением методов сплайн-алгебраического гармонического анализа //Телекоммуникации. – 2019. – №. 1. – С. 16-22. EDN: VRLYON

7. Агиевич С.Н. и др. Формирование и обработка радиосигналов методом сплайн-алгебраического гармонического анализа //Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №. 7. – С. 24-28. EDN: UGMBKP
8. Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Коробкин Д.И. Применение функций сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона при формировании сигналов OFDM //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №. 6. – С. 194-198. EDN: NULRVH
9. Луценко С.А. Модель функционирования спутниковой системы радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами в условиях постановки преднамеренных помех //Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 9. – С. 2-2. EDN: SANYNT
10. Fokin G., Sevidov V. Topology Search Using Dilution of Precision Criterion for Enhanced 5G Positioning Service Area //2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – IEEE, 2021. – С. 131-136. EDN: UCIATM
11. Fokin G., Sevidov V. Model for 5G UDN Positioning System Topology Search Using Dilution of Precision Criterion //2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2021. – С. 32-36. EDN: UROCVF
12. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с. EDN: SMHSV

Для цитирования:

Агиевич С.Н., Луценко С.А., Тихонов С.С. Обобщенная математическая модель радиосигнала в различных базисах. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.5>