

АДАПТИВНАЯ К ПОМЕХАМ РАДИОСИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

*Лисничук А.А., д.т.н., профессор кафедры «Радиоуправление и связь» РГРТУ им. В.Ф. Уткина,
e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com*

ADAPTIVE TO INTERFERENCE WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM BASED ON MULTI-CRITERIA SYNTHESIS OF MULTI-POSITION SIGNALS

Lisnichuk A.A.

A block diagram of a software-defined transmitter and detector of a relatively wide class of known and synthesized multi-position radio signals (both with and without DSSS) and signal-code structures (TCM- and FQPSK-like) providing effective adaptation to interference under various external conditions has been developed.

The synthesized signals and signal-code structures take into account the most significant quality indicators for information transmission radio systems, namely, attenuation of interference, out-of-band radiation, noise immunity at AWGN and energy efficiency of the generated radio signal, as well as minimizing the confusion of the information symbol with clock synchronization errors.

A comparative analysis of synthesized radio signals of various positionality is carried out in the interests of adapting information transmission systems to the current interference environment.

Key words: radio signal synthesis, software-defined radio, multi-criteria optimization, noise immunity.

Ключевые слова: синтез радиосигналов, программно-определяемые радиосистемы, многокритериальная оптимизация, помехоустойчивость.

Введение

На практике работа разнообразных радиосистем передачи информации (РСПИ), в том числе и на основе программно-определяемого радио (Software-defined radio – SDR), осуществляется в условиях действия различного вида радиопомех: узкополосных, структурных, полосовых, импульсных, а также их комбинаций. На показатели качества РСПИ (в том числе и на помехоустойчивость) существенное влияние оказывают вид используемых сигналов и характеристики устройств их обработки. Существующие системы программно-определяемого радио способны перестраивать параметры сигнала путем варьирования несущей частоты, мощности радиопередатчика, скорости передачи информации, а также способов кодирования и модуляции [1, 2]. Данный подход не позволяет удовлетворить потребности современных РСПИ в части многозшелонированной помехозащищенности радиоканалов, т.е. обеспечения скрытности и помехоустойчивости радиолиний на различных этапах формирования, передачи и детектирования сигналов [3, 4]. Кроме того, системы SDR могут посчитать диапазон частот непригодным для передачи информации при наличии даже узкополосной помехи (УП), что в свою очередь в целом уменьшает эффективность использования свободных участков спектра.

В условиях ограниченного частотного ресурса целесообразно производить синтез радиосигналов для адаптации систем SDR к действию помех при использовании в том числе и нестандартных видов модуляции. Опти-

Разработана структурная схема программно-конфигурируемых формирователя и детектора сравнительно широкого класса известных и синтезированных многопозиционных радиосигналов (как с прямым расширением спектра, так и без него) и сигнально-кодовых конструкций (TCM- и FQPSK-подобных), обеспечивающих эффективную адаптацию к действию помех при различных внешних условиях.

Синтезированные сигналы и сигнально-кодовые конструкции учитывают наиболее значимые для радиосистем передачи информации показатели качества, а именно ослабление действия помех, внеполосное излучение, помехоустойчивость при АБГШ и энергоэффективность формируемого радиосигнала, а также минимизацию перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации.

Проведен сравнительный анализ синтезированных радиосигналов различной позиционности в интересах адаптации систем передачи информации к действующей помеховой обстановке.

мизация по единственному показателю качества приводит к неконтролируемому ухудшению других показателей, поэтому для более эффективного использования ресурсов радиоканала целесообразно применять многокритериальный синтез сигналов. Целесообразно учитывают наиболее значимые для SDR показатели качества, а именно ослабление действия помех, внеполосное излучение, помехоустойчивость при аддитивном «белом» гауссовском шуме (АБГШ) и энергоэффективность формируемого радиосигнала [3].

При согласованности используемых процедур кодирования и модуляции по некоторому критерию получают сигнально-кодовые конструкции (СКК), обеспечивающие дополнительное улучшение характеристик РСПИ. На практике широко распространены СКК на основе решетчатого кодирования и «зависимых» сигналов, позволяющие реализовать соответственно повышение помехоустойчивости РСПИ к действию АБГШ без расширения занимаемой полосы частот и уменьшение внеполосного излучения [5].

Перечисленные процедуры обладают своими особенностями, преимуществами и недостатками. Для эффективного использования разработанных процедур многокритериального синтеза радиосигналов различной позиционности в интересах адаптации РСПИ к действующей помеховой обстановке целесообразно произвести сравнительный анализ реализуемых характеристик.

При этом первоочередное значение приобретает разработка единой структурной схемы адаптивных программно-конфигурируемых формирователя и детектора радиосигналов, соответствующих разработанным процедурам многокритериального синтеза сигналов и сигнально-кодовых конструкций [3, 5, 6]. Это необходимо для реализации универсального приемо-передающего устройства, охватывающего сравнительно широкий класс радиосигналов, обеспечивающих эффективную адаптацию к действию помех при различных внешних условиях.

Целью работы является разработка структурной схемы адаптивных программно-конфигурируемых формирователя и детектора радиосигналов на основе процедур многокритериального синтеза и сравнительный анализ реализуемых характеристик сигналов различной позиционности.

Структурные схемы адаптивных программно-конфигурируемых формирователя и детектора радиосигналов

Для эффективной адаптации SDR к помеховой обстановке необходимо, чтобы используемое представление радиосигналов с одной стороны реализовывало сравнительно широкий класс сигналов, а с другой не предъявляло жестких требований к элементной базе при их формировании и обработке. Представляет интерес рассмотрение класса многопозиционных радиосигналов, получивших широкое распространение на практике. Как правило, при передаче цифровой информации по радиоканалу в процессе модуляции осуществляется отображение битового потока данных в набор сигналов, согласованных с характеристиками используемого канала. Причем совокупность таких детерминированных сигналов образует каналный алфавит (КА) данного вида модуляции, который определяет качественные характеристики РСПИ (помехоустойчивость, энергоэффективность и др.). Следовательно, в интересах адаптации SDR к действию помех возможно применение представления радиосигналов в виде совокупности элементов КА, так как такое математическое описание радиосигналов явля-

ется общим для известных радиосигналов со следующими видами модуляции: ASK, PSK, APSK, QAM, FSK, FQPSK, EFQPSK, CEFQPSK и др., а кроме того возможно математическое описание и неизвестных радиосигналов, по меньшей мере, как промежуточных классов между стандартными видами модуляции [7].

Для реализации процедур многокритериального синтеза сигналов и сигнально-кодовых конструкций в интересах адаптации SDR к действию помех предложена структурная схема формирователя радиосигналов на основе КА (см. рис.1).

Начало работы данной схемы можно реализовать при помощи использования КА, соответствующего известному виду модуляции или (в случае наличия) полученному КА на предыдущей итерации адаптации. С помощью радиоканала обратной связи с приемной стороны поступает информация о синтезированном КА (в соответствии с процедурой синтеза [7]). Затем полученный КА загружается в устройство памяти, при этом задается режим работы кодера. Информационная двоичная последовательность от источника данных поступает в кодер, который производит манипуляцию сигнала (сигнально-кодовой конструкции), согласно текущему КА, а при необходимости и помехоустойчивое кодирование. Так как прямое расширение спектра радиосигнала может быть выполнено при помощи применения соответствующего КА [3], то данный блок может также реализовывать такой класс сигналов. Полученные синфазная и квадратурная составляющие комплексной огибающей сигнала подаются на квадратурный модулятор, где формируется искомый радиосигнал.

Таким образом, приведенная схема формирователя радиосигналов (передающей части адаптивной к помеховой обстановке SDR) позволяет реализовать как широко применяемые на практике, так и неизвестные виды модуляции путем использования соответствующего КА и определения режима работы кодера.

Для устройств детектирования радиосигналов и сигнально-кодовых конструкций, адаптивных к действию помех, предлагается использовать структурную схему, приведенную на рис. 2, где УВВ – устройство взятия выборки.

При условии одинаковой вероятности передачи различных символов сигнала данная схема, содержащая M каналов (по количеству элементов в КА), построена по критерию поэлементного корреляционного приемника, требующего выполнения следующих операций:

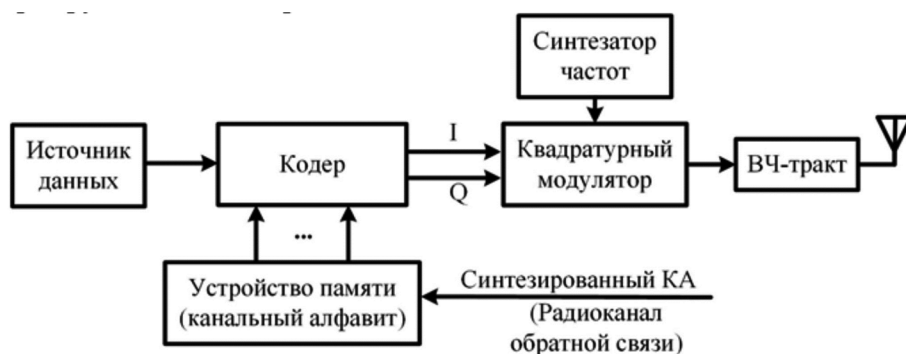


Рис. 1. Структурная схема адаптивного к помеховой обстановке формирователя радиосигналов на основе канального алфавита

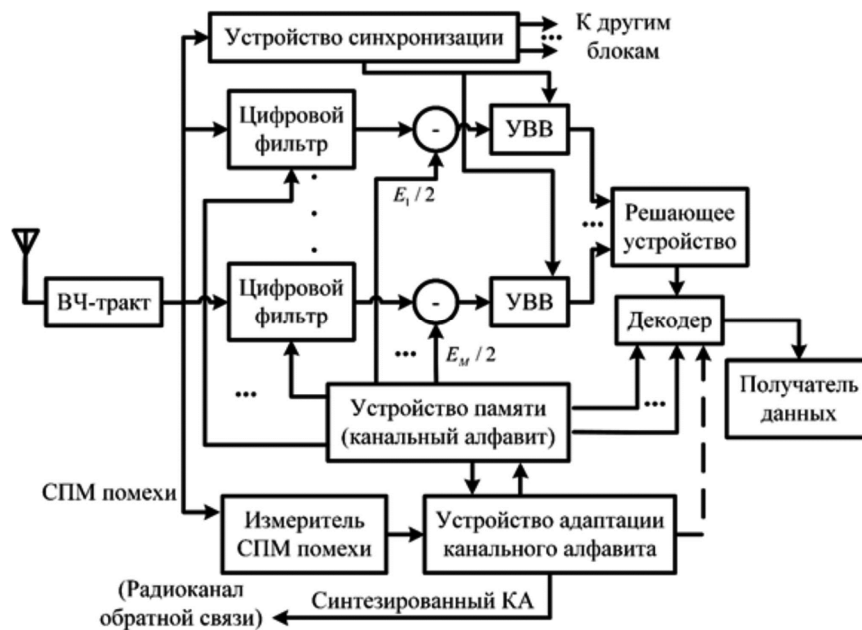


Рис. 2. Структурная схема адаптивного к помеховой обстановке приемника радиосигналов на основе канального алфавита

$$\max_{l=1, M} \left\{ \operatorname{Re} \left[\int_0^{T_s} a(t) s_l^*(t) dt \right] - \frac{E_l}{2} \right\}, \quad (1)$$

где $\operatorname{Re}[\cdot]$ – операция взятия вещественной части комплексного числа; $a(t)$ – сигнал на входе детектора; $s_l^*(t)$ – сигнал комплексно-сопряженный для $s_l(t)$; E_l – энергия l -го элемента КА. Выражение $\operatorname{Re} \left[\int_0^{T_s} a(t) s_l^*(t) dt \right]$ вычисляется с помощью цифрового фильтра, согласованного с l -м элементом КА.

При обнаружении действия помехи информация о ее спектральной плотности мощности (в случае УП) или о ее структуре (при сигналоподобной помехе) поступает в устройство адаптации КА, в котором выполняется соответствующая процедура синтеза радиосигналов или сигнально-кодовых конструкций. Оценка параметров помех можно производить как на фоне полезного сигнала, так и в перерыве передачи сообщений.

Синтезированный КА и режим работы кодера передается по радиоканалу обратной связи. В соответствии с синтезированным КА в каждом канале из устройства памяти в цифровой фильтр загружаются соответствующие коэффициенты, а на вычитающее устройство подается значение $E_l/2$, задается режим работы детектора. Стоит заметить, что прямое расширение спектра может сниматься за счет применения соответствующих цифровых фильтров [3].

В процессе детектирования радиосигналов устройство синхронизации осуществляет тактирование основных блоков приемника, в соответствии с которым УВВ выдает значение выражения (1) в момент времени завершения очередного символического интервала. Для повышения точности синхронизации на начальном этапе работы этого устройства целесообразно использовать преамбулу в виде синхропоследовательности. На выходе решающего устройства формируется номер канала

по критерию (1) или же соответствующая метрика (при мягких решениях). Блок декодера при необходимости производит помехоустойчивое декодирование, а затем выводит к получателю информационные символы.

На рис. 3 приведены пояснения порядка работы адаптивной к помеховой обстановке РСПИ.

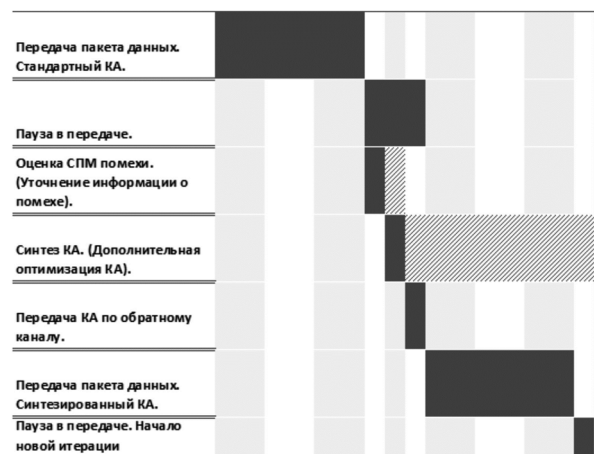


Рис. 3. Порядок работы адаптивной к помеховой обстановке системы передачи информации

При отсутствии действующей помехи на приемную часть SDR возможна передача данных и при помощи стандартных видов модуляции. Однако необходимо проводить регулярную оценку помеховой обстановки. Это целесообразно выполнять с помощью известных подходов, например [8], с учетом действия довольно мощной помехи и наличия пауз в передаваемых сообщениях, так как функционирование современных РСПИ осуществляется преимущественно в пакетном режиме.

Для следующей итерации оценки возможен также этап уточнения информации о помехе во время синтеза КА, так как полезный радиосигнал в это время не излучается. После синтеза КА и начала передачи его по обратному каналу в случае сложной помеховой обстановки при необходимости возможна дополнительная оптими-

зация КА. Передача информации о синтезированном КА с приёмника реализуется за счет стандартных видов модуляции (или в случае наличия – полученных на предыдущей итерации адаптации РСПИ) и процедур помехоустойчивого кодирования. На практике, как правило, приемная и передающая части РСПИ находятся в различной радиообстановке, следовательно наличие действующих помех на детектор радиосигналов не означает, в общем случае, проблемы при использовании обратного радиоканала. После получения формирователем радиосигналов синтезированного КА происходит настройка и функционирование данной схемы по приведенному выше описанию. Далее наступает пауза в передаче данных и начинается новая итерация работы адаптивной к помеховой обстановке РСПИ.

Сравнительный анализ синтезированных радиосигналов различной позиционности в интересах адаптации систем передачи информации к действующей помеховой обстановке

Для определения позиционности вида модуляции, которую целесообразно использовать в РСПИ в текущий момент времени, на практике применяется принцип адаптивного выбора вида модуляции (adaptive modulation) и помехоустойчивого кодирования [9, 10]. Однако в известных работах в качестве мешающего воздействия рассматривают, как правило, АБГШ, т.е. не учитывают специфическое действие радиопомех различных классов. Для перехода к виду модуляции с меньшей позиционностью зачастую применяют однокритериальный подход.

В случае рассмотрения класса синтезированных радиосигналов для определения рекомендуемой позиционности вида модуляции целесообразно принимать во внимание следующие критерии: помехоустойчивость к действию АБГШ и сигнально-помеховой обстановки, требуемые аппаратные затраты для синтеза сигналов, а также реализуемый компромисс по другим важным показателям качества (энергетическая и спектральная эффективности, внеполосное излучение, корреляционные характеристики) [3, 6]. Требуемые аппаратные затраты для синтеза радиосигналов можно существенно снизить за счет предварительной подготовки набора различных начальных условий. Кроме того, наибольший интерес из всего класса синтезированных радиосигналов представляют те элементы, которые обеспечивают эффективную адаптацию РСПИ к действию помех. Без потери общности, рассмотрим выбор многопозиционных радиосигналов и СКК на основе определения КА при адаптации РСПИ к действию УП. В интересах оценки реализуемых показателей качества РСПИ на основе многокритериального синтеза радиосигналов было проведено имитационное моделирование следующих про-

цессов: постановки радиопомех; синтеза и формирования радиосигналов (СКК); воздействия на полезный сигнал АБГШ и помехи; детектирования из принятой смеси информационной составляющей радиосигнала (СКК); определения реализованных характеристик РСПИ при текущих условиях (параметрах АБГШ и мешающего воздействия), накопления статистики.

В таблицу сведены показатели качества энергетической эффективности и внеполосного излучения для синтезированных многопозиционных радиосигналов и СКК на основе определения КА при адаптации РСПИ к действию УП.

Здесь Π – пик-фактор радиосигнала; G_{30} и G_{60} – соответственно ширина СПМ радиосигнала по уровню -30 дБ и -60 дБ; T_s – символьный интервал; M – позиционность вида модуляции, соответствующая количеству элементов в канальном алфавите; c_1 и c_3 – весовые коэффициенты [11] соответственно для критериев качества максимизации помехоустойчивости к действию УП и минимизации внеполосного излучения, $c_i > 0$, ($\sum c_i = 1$).

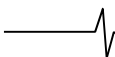
На рис. 4 приведены зависимости порога помехоустойчивости (т.е. отношения E_b / N_0 при вероятности битовой ошибки $P_o = 10^{-3}$) синтезированных и известных многопозиционных радиосигналов от отношения сигнал-помеха при воздействии АБГШ и УП (средняя частота – на частоте несущего колебания полезного сигнала; ширина спектра $\Delta f_N = 5\%$ от ширины СПМ соответствующего радиосигнала). Статистика накапливается не менее чем по 100 реализациям.

Цифрами на рис. 4 обозначено: 1 – Синтезированный сигнал с позиционностью $M = 4$ ($c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$); 2 – Синтезированная СКК (TCM PSK-8, $c_1 = 0,4$; $c_3 = 0,3$); 3 – Синтезированный сигнал $M = 16$ ($c_1 = 0,3$; $c_3 = 0,3$); 4 – Синтезированный сигнал $M = 8$ ($c_1 = 0,4$; $c_3 = 0,3$); 5 – QPSK-сигнал с элементарным импульсом $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$, $0 \leq t \leq T_s$; 6 – СКК с TCM PSK-8; 7 – Сигнал с PSK-8; 8 – Сигнал с QAM-16.

Из анализа таблицы следует, что при многокритериальном синтезе в случае перехода от четырех- к 8-позиционным сигналам возможно обеспечить сравнимые характеристики энергетической эффективности и внеполосного излучения. При этом помехоустойчивость уменьшается (см. зависимости 1 и 4 на рис. 4) на величину порядка 15 дБ по отношению сигнал-помеха и порядка 3 дБ по порогу помехоустойчивости. Это связано как с менее эффективным формированием провала в СПМ сигнала из-за увеличения размерности задачи оптимизации (т.е. объема КА), так и со снижением устой-

Показатели качества синтезированных многопозиционных радиосигналов и СКК

Вид модуляции	Π	G_{30}, fT_s	G_{60}, fT_s
Синтезированный сигнал $M = 4$ ($c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$)	1,6	5,6	8,5
Синтезированные сигнал $M = 8$ или СКК (TCM PSK-8, $c_1 = 0,4$; $c_3 = 0,3$)	1,6	5,5	9,0
Синтезированный сигнал $M = 16$ ($c_1 = 0,3$; $c_3 = 0,3$)	1,65	6,3	10,5



чивости к АБГШ за счет уменьшения минимального евклидова расстояния между элементами КА, что подтверждается также сравнением реализуемых характеристик для известных видов модуляции соответствующей позиционности (см. зависимости 5 и 7 на рис. 4): относительный выигрыш в данной паре по отношению сигнал-помеха меньше (на величину до 7 дБ) по сравнению с синтезированными сигналами. Для улучшения помехоустойчивости многопозиционных синтезированных сигналов можно переходить к классу СКК на основе решетчатого кодирования. При сравнении четырехпозиционных сигналов и 8-позиционных СКК (ТСМ), наблюдается снижение (на величину до 2 дБ) порога помехоустойчивости (в случае СКК) за счет применения процедуры кодирования. Для известных видов модуляции деградация характеристик происходит при уменьшении отношения сигнал-помеха в сравнимом диапазоне значений (см. зависимости 5 и 6 на рис. 4); а для случая синтезированных сигналов и СКК (см. зависимости 1 и 2 на рис. 4) вторые проигрывают по помехоустойчивости (на величину порядка 7 дБ в смысле отношения сигнал-помеха) из-за как усложнения целевой функции (за счет согласования синтезируемого КА с процедурой кодирования), так и увеличения размерности задачи оптимизации.

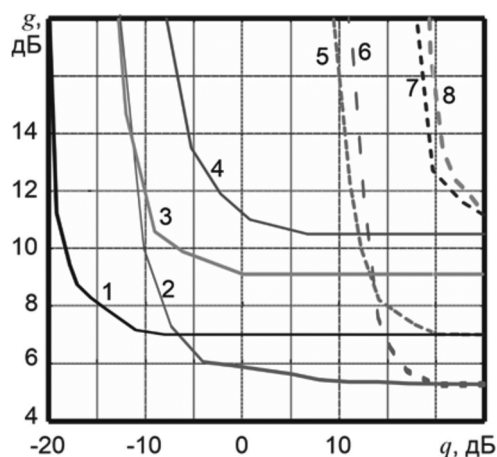


Рис. 4. Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных многопозиционных радиосигналов от отношения сигнал-помеха

Также из анализа таблицы и рис. 4 следует, что при многокритериальном синтезе в случае перехода от 8- к 16-позиционным радиосигналам возможно обеспечить сравнимые значения пик-фактора, однако показатели внеполосного излучения несколько ухудшаются: ширина СПМ по уровням -30 и -60 дБ увеличивается на 15 % и 17 % соответственно. Это связано с увеличением размерности задачи оптимизации (т.е. объема КА) и усложнением целевой функции. В частности, возрастает количество возможных комбинаций переходов между последовательно идущими элементами КА, гладкость данных межсимвольных переходов требуется для уменьшения внеполосного излучения. Кроме того, такое смещение компромисса между достигаемыми показателями качества синтезированных радиосигналов приводит к тому, что помехоустойчивость увеличивается (см. зависимости 4 и 3 на рис. 4) на величину порядка 7 дБ по отношению сигнал-помеха и порядка 1,5 дБ по поро-

гу помехоустойчивости. При сравнении реализуемых характеристик для известных видов модуляции соответствующей позиционности (см. зависимости 7 и 8 на рис. 4) деградация характеристик происходит при уменьшении отношения сигнал-помеха в сравнимом диапазоне значений.

Дальнейшее увеличение позиционности для синтезированных сигналов также возможно, однако обозначенная выше тенденция к смещению реализуемого компромисса для показателей качества (за счет, в частности, возрастания внеполосного излучения или других показателей качества) будет прогрессировать.

Заключение

Разработана структурная схема программно-конфигурируемых формирователя и детектора сравнительно широкого класса синтезированных многопозиционных радиосигналов (как с прямым расширением спектра, так и без него) и сигнально-кодовых конструкций (ТСМ- и FQPSK-подобных), обеспечивающих эффективную адаптацию к действию помех при различных внешних условиях. При многокритериальном синтезе сигналов в состав комбинированного критерия качества входят частные критерии, отвечающие за ослабление действия помех; за повышение помехоустойчивости при АБГШ, улучшение корреляционных характеристик, а также обеспечивающие максимизацию энергетической и спектральной эффективностей формируемого сигнала.

Проведен сравнительный анализ синтезированных радиосигналов различной позиционности в интересах адаптации систем передачи информации к действующей помеховой обстановке. При выборе позиционности синтезированных радиосигналов в интересах адаптации РСПИ к помеховой обстановке целесообразно применение многокритериального подхода, учитывающего в текущий момент времени: помехоустойчивость к действию АБГШ и сигнально-помеховой обстановке, требуемые аппаратные затраты для синтеза сигналов, а также реализуемый компромисс по другим важным показателям качества (энергетическая эффективность, внеполосное излучение, корреляционные характеристики).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Литература

1. Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile communications. Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999, pp. 3-10.
2. Hu F., Chen B., Zhu K. Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5G: A survey. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 15754-15776.
3. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-1. С. 9-15. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-9-15
4. Лисничук А.А. Процедура многокритериального

синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 17-28. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-77-17-28

5. Кириллов С.Н., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез сигнально-кодовых конструкций на основе зависимых сигналов для адаптации радиосистем передачи информации к действию узкополосных помех. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 4. С. 3-12.

6. Лисничук А.А., Кириллов С.Н. Анализ характеристик когнитивных радиосистем передачи информации при адаптации к действию узкополосных помех на основе синтезированных четырехпозиционных радиосигналов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-1. С. 3-8. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-3-8

7. S.N. Kirillov, A.A. Lisnichuk, «Multi-criteria signal syn-

thesis procedure for adapting cognitive radio systems to the influence of interfering factors in the Arctic!, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, vol. 302, no. 1, pp. 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012059

8. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М: Радиотехника. 2014. 632 с.

9. Bischl H. et al. Adaptive coding and modulation for satellite broadband networks: From theory to practice. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2010. Т. 28. № 2. С. 59-111.

10. Кириллов С.Н., Лисничук А.А., Писака П.С., Грибко К.В. Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 3-14.

11. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. М.: Сов. Радио, 1975. 368 с.

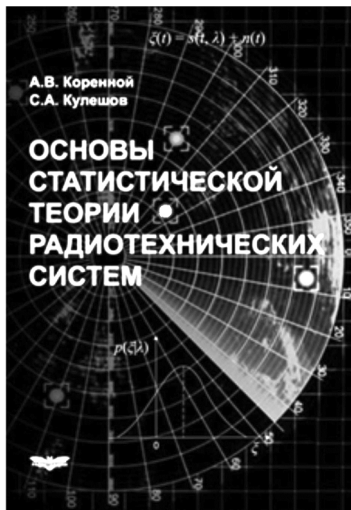
НОВЫЕ КНИГИ

Основы статистической теории радиотехнических систем: Учебное пособие под ред. А.В. Коренного.

М.: Изд-во Радиотехника, 2021 г. 240 с.: ил.

Приведены необходимые сведения из теории вероятностей, случайных процессов и математической статистики, и на их основе рассмотрены статистические методы анализа линейных и нелинейных систем. На базе теории фильтрации изложены современные методы синтеза радиоэлектронных систем различного назначения, основы теории информации и методы статистического моделирования. Методика применения теоретических результатов к решению практических задач проиллюстрирована содержательными примерами.

Предназначено для слушателей и курсантов военных вузов, а также студентов вузов, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы». Может быть полезно аспирантам и преподавателям вузов, занимающихся вопросами синтеза и анализа радиотехнических устройств и систем



Гаврилов К.Ю., Каменский И.В., Кирдяшкин В.В., Линников О.Н.

Моделирование и обработка радиолокационных сигналов в MATLAB: Учебное пособие. М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 264 с.: ил.

Рассмотрены методы моделирования радиолокационных сигналов при отражении от сложных целей, принципы моделирования аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов, включающие формирование двумерной матрицы цифровых отсчетов, методы согласованной фильтрации, обнаружения и обработки сигналов в импульсно-доплеровских радиолокационных системах.

Показаны примеры обработки наиболее распространенных видов радиолокационных сигналов – импульсных, с линейной частотной модуляцией и фазо-кодированных сигналов. Приведены программы моделирования и обработки сигналов в среде MATLAB.

Для студентов, аспирантов и инженеров, изучающих и использующих теорию радиолокации и методы моделирования и обработки радиолокационных сигналов. Будет полезна научным работникам и разработчикам радиолокационных систем.

