

УДК 621.396

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ РАДИОСИГНАЛОВ С ПРЯМЫМ РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА ДЛЯ АДАПТИВНЫХ К УЗКОПОЛОСНЫМ И СТРУКТУРНЫМ ПОМЕХАМ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*Лисничук А.А., к.т.н., доцент кафедры РУС РГПТУ, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com*

### MULTI-CRITERIA SYNTHESIS OF DIRECT-SEQUENCE SPREAD SPECTRUM RADIO SIGNALS FOR COMMUNICATION SYSTEMS ADAPTATION TO NARROW-BAND AND STRUCTURAL INTERFERENCES

*Lisnichuk A.A.*

*Problem statement: as a result of frequency range congestion, a complex of interferences is acting on radio communication systems, among which narrow-band and structural ones occupy a special place: narrow-band interference – due to the high probability of unintentional occurrence (or simplicity of generation) and effective influence on the suppressed radio line; structural influence – due to the correlation in some parameters with the useful radio signal at the same frequency-time ranges. A trivial solution for this problem is to change the frequency range, for example, using cognitive radio systems. However, the use of such systems is not always advisable in practice. Since, on the one hand, there may be no free parts of spectrum at the current time, and on the other hand, this approach is extensive, leading to a decrease in the overall efficiency of using frequency resource (in the presence of interference).*

*Purpose: development and analysis of the realizable characteristics of multi-criteria synthesis of direct-sequence spread spectrum radio signals for communication systems adaptation to combination of additive «white» Gaussian noise (AWGN), structural and narrow-band interferences.*

*Results: in comparison with the known signals, the synthesized ones increase interference immunity up to 9 dB (in term signal-to-interference ratio) under action of AWGN, structural and narrow-band interference while maintaining the noise immunity threshold at the level of QPSK signal at action of only AWGN.*

*Practical relevance: the results obtained indicate the advisability of using a class of synthesized direct-sequence spread spectrum radio signals to ensure effective adaptation of communication systems (without changing the spectral range) to the action of AWGN, structural and narrow-band interferences.*

**Key words:** synthesis of radio signal, radio communication system, multi-criteria optimization, increase of noise immunity, DSSS radio signal.

**Ключевые слова:** синтез радиосигналов, радиосистемы передачи информации, многокритериальная оптимизация, повышение помехоустойчивости, радиосигналы с прямым расширением спектра.

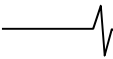
#### Введение

Повышение помехоустойчивости радиосистем передачи информации (РСПИ) является известной научно-технической задачей, решению которой посвящено множество работ, например [1-3]. Однако в качестве модели помеховой обстановки, как правило, рассматривается совокупность аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ) и некоторого мешающего воздействия (в виде узкополосной, структурной или импульсной помехи). На практике же в результате перегруженности частотного диапазона возможна ситуация действия комплекса помех на РСПИ, среди которых особое место занимают узкополосные и структурные: первые – за счет высокой вероятности непреднамеренного возникновения (или простоты генерации) и достаточно эффективного влияния на подавляемую радиолинию; вторые – за счет корреляции по некоторым параметрам с полезным радиосигналом при совпадающих частотно-временных диапазонах. Тривиальным решением данной задачи является смена частотного диапазона, например, при помощи систем когнитивного радио (cognitive radio). Однако применение таких систем не всегда целесообразно на практике. Так как, с одной стороны, в текущий момент времени могут отсутствовать свободные участки спектра, а с другой – такой подход является экстенсивным, приводящим к снижению общей эффективности использования частотного ресурса (в условиях наличия помех).

*Постановка проблемы: в результате перегруженности частотного диапазона возможно действие комплекса помех на радиосистемы передачи информации, среди которых особое место занимают узкополосные и структурные: первые – за счет высокой вероятности непреднамеренного возникновения (или простоты генерации) и достаточно эффективного влияния на подавляемую радиолинию; вторые – за счет корреляции по некоторым параметрам с полезным радиосигналом при совпадающих частотно-временных диапазонах. Тривиальным решением данной задачи является смена частотного диапазона, например, при помощи систем когнитивного радио (cognitive radio). Однако применение таких систем не всегда целесообразно на практике. Так как, с одной стороны, в текущий момент времени могут отсутствовать свободные участки спектра, а с другой – такой подход является экстенсивным, приводящим к снижению общей эффективности использования частотного ресурса (в условиях наличия помех).*

*Цель: разработка и анализ реализуемых характеристик многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра в интересах адаптации систем передачи информации к сложной радиообстановке в виде совокупности аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ), структурной и узкополосной помех.*

*Результаты: в сравнении с известными синтезированными сигналами позволяют получить выигрыш до 9 дБ (по отношению сигнал-помеха) в условиях действия АБГШ, структурной и узкополосной помех при сохранении порога помехоустойчивости на уровне QPSK-сигнала при действии только АБГШ.*



рам с полезным радиосигналом при совпадающих частотно-временных диапазонах. Тривиальным решением данной задачи является смена частотного диапазона, например, при помощи систем когнитивного радио [4, 5]. Однако применение таких систем не всегда целесообразно на практике с точки зрения как доступности свободных участков спектра в текущий момент времени, так и общей эффективности использования частотного ресурса. Для преодоления обозначенного недостатка в работах [6-9] разработаны процедуры многокритериального синтеза сигналов для адаптации РСПИ (без смены спектрального диапазона) к действию различных помех. Представляет интерес обобщение задачи многокритериального синтеза радиосигналов для адаптации РСПИ к действию совокупности АБГШ, узкополосной и структурной помех.

### Математическое описание радиосигналов с прямым расширением спектра в виде совокупности элементов канального алфавита

Для решения поставленной задачи целесообразно рассматривать радиосигналы с прямым расширением спектра (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum), так как они обладают сравнительно высокой помехоустойчивостью. Многопозиционные сигналы данного класса можно представить в виде совокупности элементов канального алфавита (КА)  $s_{r(i)}$ , каждый из которых описывается с помощью соответствующей расширяющей кодовой последовательности (КП) и элементарного импульса  $p_{r(i)}(t)$ , то есть [6]:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_S} s_{r(i)}(t - iT_S) = \sum_{i=1}^{N_S} \left( \sum_{j_{KPI}=1}^n \left[ b_{r(i)}[j_{KPI}] \cdot p_{r(i)} \left( t - iT_S - j_{KPI} \frac{T_S}{n} \right) \right] \right), \quad (1)$$

$$s_r \in \mathbf{S}; \quad r = \overline{1, M},$$

где  $N_S$  – количество информационных символов;  $r(i)$  – процедура манипуляционного кодирования [то есть отображение очередных  $\log_2 M$  бит (информационного символа) в номер соответствующего элемента канального алфавита];  $p_{r(i)}(t) = 0$ , и  $t \leq 0$ ,  $t \geq T_S/n$ ;  $T_S$  – символьный интервал;  $n$  – количество элементов  $b_{r(i)}[j_{KPI}]$  в расширяющей КП  $\mathbf{b}_{r(i)}$ , в общем случае комплексных;  $M$  – позиционность вида модуляции, соответствующая количеству элементов в КА  $\mathbf{S}$ .

Из анализа данного выражения следует, что радиосигналы с прямым расширением спектра допускают изменение своих свойств за счет синтеза как структуры (т.е. ансамбля кодовых последовательностей), так и формы огибающей (т.е. набора элементарных импульсов). В сложной помеховой обстановке (когда в полосе частот сигнала действуют структурные и узкополосные помехи) необходимо применение максимального числа способов увеличения помехоустойчивости, т.е. целесообразно синтезировать как структуру, так и набор элементарных импульсов. В этом случае необходимо учитывать достоинства, недостатки и использовать наиболее эффективный для соответствующей отдельной ча-

сти сложной помеховой обстановки способ увеличения помехоустойчивости РСПИ. При этом для недопущения неконтролируемого изменения других важных характеристик РСПИ представляет интерес применение многокритериального подхода.

### Многокритериальный синтез набора элементарных импульсов

Многокритериальный синтез набора элементарных импульсов целесообразно осуществлять аналогично синтезу КА для радиосигналов без расширения спектра [7, 8]. Следовательно, представляет интерес рассмотрение следующих критериев качества РСПИ [6]:

- максимизация пропускной способности при минимизации действия узкополосных помех (УП) на РСПИ путем формирования провалов в спектральной плотности мощности (СПМ) синтезируемого набора элементарных импульсов;

- максимизация помехоустойчивости к действию АБГШ путем увеличения евклидова расстояния между элементами синтезируемого набора;

- минимизация внеполосного излучения с помощью задания штрафа при превышении эталонной СПМ;

- минимизация пик-фактора путем уменьшения квадрата коэффициента вариации мгновенной мощности сигнала, вычисленного по элементам синтезируемого набора элементарных импульсов.

Применение многокритериального синтеза набора элементарных импульсов для минимизации действия узкополосной помехи на РСПИ целесообразно за счет формирования данным способом сравнительно широкого и глубокого провала в СПМ сигнала, необходимого для эффективной работы РСПИ в данной сигнально-помеховой обстановке.

Удобным методом решения многокритериальных задач является переход к синтезу радиосигналов на основе взвешенной суммы критериев качества [10]:

$$k_p = c_1 M_1 \int |G_0(f) - G_S(f)|^2 df + c_2 M_2 / \rho_S + c_3 M_3 \eta(G_S(f), G_M(f)) + c_4 M_4 D_S / \mu_S^2, \quad (2)$$

где  $c_i, M_i > 0$ ,  $\left( \sum_{i=1}^4 c_i = 1 \right)$  – соответственно весовые и

масштабирующие (приводящие в одинаковый динамический диапазон) коэффициенты для каждого входящего критерия качества;  $G_0(f), G_S(f)$  – соответственно «эталонная» (с провалом на частоте действия УП) и текущая нормированные СПМ сигналов;  $\rho_S$  – среднее значение всех возможных попарных евклидовых расстояний между составляющими набора элементарных импульсов;  $\eta(\bullet)$  – «штрафная» функция, ограничивающая превышение внеполосным излучением сигнала специальной функции  $G_M(f)$ ;  $D_S, \mu_S$  – соответственно дисперсия и математическое ожидание мгновенной мощности сигнала, задаваемого набором элементарных импульсов.

В работе [11] показано, что при данном наборе критериев качества минимизацию целевой функции (2) целесообразно выполнять квазиньютоновским методом оптимизации.

## Многокритериальный синтез ансамбля расширяющих кодовых последовательностей

Для рационального использования ресурсов радиоканала целесообразно применять критерии качества, отвечающие за пропускную способность и минимизацию действия как структурных помех (СП), так и АБГШ, а также косвенно обеспечивающие минимизацию перепутывания информационного символа при погрешностях тактовой синхронизации. Высокую чувствительность к действию мешающих факторов (в том числе и структурных помех) в современных РСПИ проявляют контуры синхронизации, устойчивость которых определяется в том числе и радиосигналами, несущими полезную информацию и задающими тактовую частоту. Следовательно, в процедуре многокритериального синтеза ансамбля КП целесообразно также учитывать корреляционные свойства многопозиционных сигналов. Предлагается использовать следующие критерии приближения и качества [9]:

1) критерий максимума пропускной способности за счет ослабления действия СП. В данном критерии целесообразно использовать аппарат вейвлет-пакетного разложения (ВПР), а именно максимизировать энергию в тех ветвях ВПР синтезируемого ансамбля КП ( $\mathbf{B}$ ), в которых энергия действующей СП минимальна, т.е.

$$\min_{\mathbf{B}} \left\{ \sum_{z=1}^L d_2(W_{opt}(z), W_{KPI}(z, \mathbf{B})) \right\}, \quad (3)$$

где  $d_2(\bullet)$  – евклидово расстояние;  $W_{opt}(z), W_{KPI}(z, \mathbf{B})$  – нормированные энергии в  $z$ -й ветви ВПР соответственно для «эталоны» и синтезированного ансамбля КП;  $L$  – общее количество ветвей ВПР. При этом «эталон»  $W_{opt}$  определяется по измеренному ВПР структурной помехи  $W_N$  в соответствии со следующим выражением:

$$W_{opt}(z) = \lambda_2 - W_N(z), \quad \lambda_2 = const, \quad \lambda_2 = \max_z [W_N(z)],$$

$z = \overline{1, L}$ . Целесообразность применения ВПР вместо Фурье-анализа обусловлена большей адекватностью представления локальных особенностей синтезируемых многопозиционных радиосигналов;

2) критерий максимума структурной скрытности и помехоустойчивости при действии АБГШ. Данный критерий аналогичен соответствующему критерию для набора элементарных импульсов:

$$\max_{\mathbf{B}} \{ \langle d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle \}, \quad (4)$$

$$\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l \in \mathbf{B}; \quad k, l = \overline{1, M}, \quad k \neq l,$$

где  $\langle \cdot \rangle$  – оператор усреднения по набору всех возможных попарных расстояний между элементами ансамбля КП  $\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l$ ;

3) косвенный критерий минимума перепутывания информационных символов при погрешностях тактовой синхронизации реализуется путем уменьшения среднеарифметического значения модулей взаимно-корреляционной функции (ВКФ)  $V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l)$  элементов ансамбля КП (в 10 %-м центральном диапазоне ВКФ), т.е.

$$\min_{\mathbf{B}} \{ \langle V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle \}, \quad (5)$$

$$\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l \in \mathbf{B}; \quad k, l = \overline{1, M}, \quad k \neq l;$$

4) косвенный критерий максимума точности тактовой синхронизации, который достигается путем уменьшения среднеарифметического значения модулей боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ)  $R(\mathbf{b}_k)$  элементов ансамбля КП, особенно вблизи главного лепестка, т.е.

$$\min_{\mathbf{B}} \{ \langle R(\mathbf{b}_k) \rangle \}, \quad \mathbf{b}_k \in \mathbf{B}; \quad k = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Тогда целевую функцию в интересах многокритериального синтеза ансамбля расширяющих КП можно представить следующим образом:

$$k_e(\mathbf{B}) = \alpha_1 M_1 \sum_{z=1}^L [d_2(W_{opt}(z), W_{KPI}(z, \mathbf{B}))] + \\ + \alpha_2 M_2 / \langle d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + \\ + \alpha_3 M_3 \langle V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + \alpha_4 M_4 \langle R(\mathbf{b}_k) \rangle, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1; \quad M_i, \alpha_i > 0; \quad M_i, \alpha_i = const;$$

$$\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l \in \mathbf{B}; \quad k, l = \overline{1, M}, \quad k \neq l.$$

Здесь  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты для каждого входящего критерия качества при синтезе ансамбля КП.

При этом минимизацию данной целевой функции целесообразно выполнять следующим образом [9]: при помощи метода оптимизации на основе генетического алгоритма определить предполагаемую область глобального оптимума, а затем методом покоординатного спуска вычислить точку минимума.

## Результаты имитационного моделирования

В интересах определения количественной меры действия рассматриваемого комплекса помех на радиоканалы на основе синтезированных и известных сигналов с прямым расширением спектра проведено имитационное моделирование следующих процессов:

- постановки комплекса радиопомех: узкополосной (в виде «небелого» гауссовского шума, ширина спектра – 10 % от ширины СПМ полезного сигнала) и структурной (в виде QPSK-сигнала с прямым расширением спектра ансамблем случайных КП, частотно-временные диапазоны для СП и полезного сигнала совпадают); отношение мощностей помех 1:1;

- многокритериального синтеза и формирования радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения как ансамбля кодовых последовательностей, так и набора элементарных импульсов;

- воздействия на полезный сигнал АБГШ и помех;

- детектирования из принятой смеси информационной составляющей радиосигнала (жесткие решения демодулятора по критерию максимума отношения правдоподобия);

- определения реализованных характеристик РСПИ при текущих условиях (параметрах АБГШ и помеховой обстановки), накопления статистики.

Целесообразно рассмотреть четырехпозиционные радиосигналы как обладающие сравнительно высокими характеристиками помехоустойчивости при компактном объеме канального алфавита, что, в свою очередь, положи-

тельно сказывается на уменьшении вычислительной сложности процедур синтеза. При этом разрабатываемый подход не теряет общности и при соответствующих параметрах может быть применен для многокритериального синтеза радиосигналов с позиционностью  $M > 4$ . Значения весовых коэффициентов составляют  $c_1 = 0,25$ ;  $c_3 = 0,3$  и  $\alpha_1 = 0,5$ ,  $\alpha_2 = 0,1$ ,  $\alpha_3 = 0,1$ ,  $\alpha_4 = 0,3$ , что определяет компромисс между критериями качества, аналогичный результатам в [9] и [11] соответственно; длина КП – 32 элемента. Синтезируются четыре КП, расширяющие синфазные и квадратурные компоненты двух элементов КА; в полный КА входят также сигналы, противоположные синтезированным; размерность задачи синтеза составляет  $4 \cdot 32 = 128$ ; в качестве начальных условий использовался ансамбль дополненных  $M$ -последовательностей.

Для определения характеристики помехоустойчивости к действию помех и АБГШ рассматривается пороговое отношение сигнал-шум (порог помехоустойчивости,  $g$ ), которое определяется как значение, равное отношению  $E_b / N_0$  при вероятности битовой ошибки  $P_o = 10^{-3}$ , в условиях действия АБГШ, СП и УП; для получения устойчивых оценок для каждого значения  $g$  накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам. Для всех показателей качества РСПИ статистика накапливалась по 100 реализациям. Доверительные интервалы рассчитаны для доверительной вероятности 0,95, однако не приведены на рисунках, чтобы их не загромождал.

На рис. 1 приведены зависимости порога помехоустойчивости для известного и синтезированных сигналов от отношения сигнал-помеха ( $q$ ) при действии АБГШ, СП и УП [средняя частота последней ( $f_{yII}$ ) соответствует частоте несущего колебания полезного сигнала].

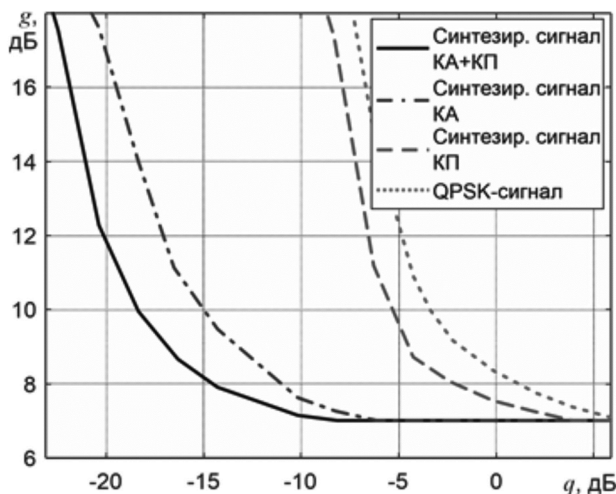


Рис. 1. Зависимости порога помехоустойчивости от отношения сигнал-помеха при действии АБГШ, СП и УП, несущие частоты полезного сигнала и УП совпадают

Здесь «Синтезир. сигнал КА+КП» – многокритериальный синтез сигнала за счет определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля кодовых последовательностей; «Синтезир сигнал КА» и «Синтезир. сигнал КП» – соответственно за счет определения только набора элементарных импульсов (адаптация РСПИ к

действию УП) или ансамбля кодовых последовательностей (адаптация РСПИ к действию СП) приведены для определения робастности синтезируемых сигналов. В качестве известного рассматривается QPSK-сигнал с прямым расширением спектра ансамблем дополненных  $M$ -последовательностей.

Из анализа рис. 1 следует, что в сравнении с известными синтезированными сигналами снижают действие рассматриваемого комплекса помех (в терминах отношения сигнал-помеха) более чем на 2 дБ и 11 дБ при адаптации РСПИ только к СП или УП соответственно, т.е. исключительно к одному компоненту данной радиообстановки. Большая реализуемая эффективность за счет определения набора элементарных импульсов связана с формированием достаточно широкого провала в СПМ сигнала для адаптации к УП, при этом и СП на данных частотах имеет максимальные значения составляющих спектра. Применение многокритериального синтеза как для набора элементарных импульсов, так и для ансамбля КП позволяет вплоть до  $q = -14$  дБ сохранять помехоустойчивость на уровне (при ухудшении показателя  $g$  менее чем на 1 дБ) QPSK-сигнала при действии только АБГШ.

На рис. 2 приведены зависимости порога помехоустойчивости для известного и синтезированных сигналов от отношения сигнал-помеха при действии АБГШ, СП и УП ( $f_{yII} = 0,75 fT_s$ ).

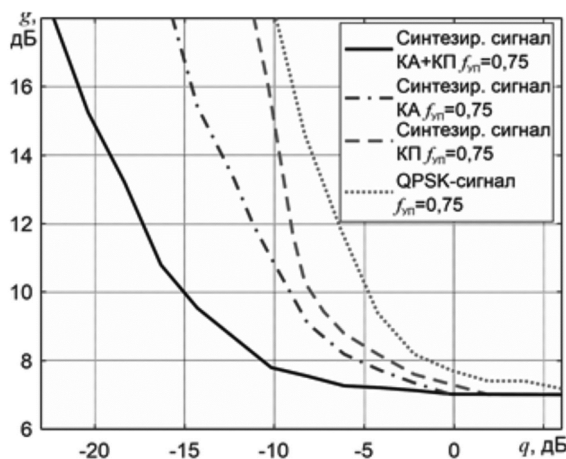


Рис. 2. Зависимости порога помехоустойчивости от отношения сигнал-помеха при действии АБГШ, СП и УП, несущие частоты полезного сигнала и УП смещены на величину  $0,75 fT_s$

Из анализа рис. 2 следует, что в сравнении с известными синтезированными сигналами снижают действие рассматриваемого комплекса помех (в терминах отношения сигнал-помеха) на 2 дБ и 3,5 дБ при адаптации РСПИ только к СП или УП соответственно, т.е. исключительно к одному компоненту данной радиообстановки. При этом за счет определения набора элементарных импульсов адаптация к УП не обеспечивает (сравнимого с соответствующими результатами, приведенными на рис. 1) подавления действия и СП, так как сформированный провал в СПМ не располагается на частотах с максимальной концентрацией СП. Применение многокритериального синтеза как для набора элементарных импульсов, так и для ансамбля КП позволяет вплоть до  $q = -10$  дБ сохранять помехоустойчивость на уровне (при ухудше-

нии показателя  $g$  менее чем на 1 дБ) QPSK-сигнала при действии только АБГШ.

Воздействие на РСПИ совокупности АБГШ, СП и УП при  $f_{yII} = 0,75 fT_s$  (в сравнении с тем, когда  $f_{yII}$  равна частоте несущего колебания полезного сигнала) оказывается меньшим по абсолютным величинам (см. рис. 1 и 2), что связано со снижением уровня мешающего воздействия за счет формы огибающей СПМ на частотах УП.

## Заключение

Обоснован многокритериальный подход для синтеза сигналов с прямым расширением спектра в интересах адаптации РСПИ к сложной радиообстановке в виде совокупности АБГШ, структурной и узкополосной помех. В состав комбинированного критерия качества входят частные критерии, отвечающие за ослабление действия помех, повышение помехоустойчивости при АБГШ, улучшение корреляционных характеристик, а также обеспечивающие максимизацию энергетической и спектральной эффективностей формируемого сигнала. Показано, что минимизацию действия таких помех целесообразно производить за счет определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля КП. Это позволяет получить выигрыш (по сравнению с QPSK-сигналом с расширением спектра ансамблем дополненных  $M$ -последовательностей) до 9 дБ (по отношению сигнал-помеха) в условиях сложной помеховой обстановки при сохранении порога помехоустойчивости на уровне QPSK-сигнала при действии только АБГШ. Кроме того, применение двух способов минимизации действия помех позволяет более эффективно распределить ресурсы между рассматриваемыми критериями качества.

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

## Литература

1. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Г.И. Тузова. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
2. Blahut R.E. Theory and practice of error control codes. Addison-Wesley, 1983.

3. Уидроу Б., Стириз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.

4. Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile communications // Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999, pp. 3-10.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе ансамбля кодовых последовательностей в интересах адаптации радиосистем передачи информации к структурным помехам // Радиотехника. 2016. № 8. С. 117-124.

10. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. М.: Сов. радио, 1975. 368 с.

11. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A. Multi-criteria signal synthesis 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.

## НОВЫЕ КНИГИ

Воскресенский Д.И., Добычина Е.М.

**Цифровые антенные решетки: Монография. – М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 240 с.: ил.**

Рассмотрен новый класс антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиолокационных комплексов, позволяющих повысить энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования амплитудно-фазового распределения с помощью предложенной системы автоматической калибровки. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей цифрового диаграммообразования и точностных характеристик калибровки макета цифровой решетки.

Для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями в области разработки, создания и применения цифровых решеток в современных радиоэлектронных системах. Может быть рекомендована в качестве учебного пособия студентам радиотехнических специальностей, а также аспирантам и магистрантам по направлениям «Радиотехника», «Радиофизика и электроника».

