

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396

**ПРОЦЕДУРА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА
СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ДЛЯ АДАПТАЦИИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
К ДЕЙСТВИЮ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ****С. Н. Кириллов**, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, д.т.н., профессор; kirillov.lab@gmail.com**П. С. Покровский**, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ; paulps@list.ru**А. А. Лисничук**, аспирант РГРТУ, a.a.lisnichuk@gmail.com

Применение известных сигнально-кодowych конструкций (СКК) в радиосистемах передачи информации при действии узкополосных помех приводит к значительным потерям в помехоустойчивости. Целью работы является разработка процедуры многокритериального синтеза СКК в интересах адаптации радиосистем передачи информации к действию узкополосных помех. Предложенная процедура синтеза СКК использует комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и ослабление действия узкополосных помех, внеполосное излучение, помехоустойчивость при аддитивном «белом» гауссовском шуме для случая решетчатого кодирования, а также энергоэффективность формируемой СКК. Показано, что использование разработанной процедуры обеспечивает дополнительный выигрыш в помехоустойчивости при действии узкополосной помехи до 21 дБ по сравнению с известной СКК (ТСМ PSK-8).

Ключевые слова: синтез сигнально-кодowych конструкций, синтез радиосигналов, адаптивные системы передачи информации, интеллектуальные системы передачи информации, многокритериальная оптимизация, минимизация действия узкополосных помех.

Введение

На показатели качества радиосистем передачи информации (РСПИ) определяющее влияние оказывают используемые процедуры кодирования и модуляции. При этом при согласованности данных процедур по некоторому критерию получают сигнально-кодowych конструкции, обеспечивающие дополнительное улучшение характеристик РСПИ. На практике широко распространены СКК на основе решетчатого кодирования (trellis coded modulation – ТСМ) [1], обеспечивающие повышение помехоустойчивости РСПИ к действию аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ) без расширения занимаемой полосы частот. Однако применение данных СКК в условиях действия узкополосных помех (УП), спектральный состав которых может изменяться с течением времени, не позволяет достигнуть заявленных характеристик.

В случае априорно неизвестной помеховой обстановки наибольшей эффективностью обладают адаптивные РСПИ. При этом адаптация РСПИ за счет использования класса известных СКК, как в системах когнитивного радио [2], не позволяет обеспечить защиту от действия преднамеренных помех, так как известные СКК могут быть распознаны с целью постановки эффективных структурных помех. Необходимо отметить, что разработка нестандартной процедуры кодирования, удовлетворяющей требованиям ТСМ, представляет собой нетривиальную задачу, так как многие из известных процедур кодирования данного класса разрабатывались на основе эмпирического подхода. Напротив, в работах [3, 4] предложены процедуры синтеза многопозиционных радиосигналов, реализующие адаптацию РСПИ к действию УП за счет применения как известных, так и нестандартных видов модуляции.

Адаптацию СКК к действующим УП целесообразно осуществить за счет синтеза многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих требованиям к ТСМ. При этом параметры СКК оказывают определяющее влияние на качественные характеристики РСПИ: уровень внеполосного излучения, энергоэффективность и др. Кроме того, при синтезе СКК в интересах недопущения деградации других важных для РСПИ показателей качества необходимо осуществить многокритериальный синтез, позволяющий более эффективно использовать предоставленные ресурсы радиоканала при соответствующих критериях качества.

Целью работы является разработка процедуры многокритериального синтеза СКК в интересах адаптации РСПИ к действию УП.

Теоретическая часть

Для решения поставленной задачи необходимо учитывать ограничения, накладываемые решетчатым кодированием на класс используемых СКК. Во-первых, скорость кодирования должна составлять $k / (k + 1)$, при этом вносимая избыточность компенсируется применением вида модуляции с позиционностью 2^{k+1} , т.е. вдвое большей в сравнении с передачей данных без кодирования. Во-вторых, отображение кода в сигнал основывается на последовательном разбиении используемого канального алфавита на подмножества с возрастающими минимальными евклидовыми расстояниями между элементами [5].

Как отмечалось выше, для эффективного уменьшения влияния УП на РСПИ целесообразно синтезировать СКК за счет определения многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих требованиям для ТСМ. При этом возможно использовать известные процедуры кодирования и декодирования.

Для рационального использования ресурсов радиоканала при синтезе СКК целесообразно применять многокритериальный подход [6, 7], что обеспечивает возможность учета наиболее значимых для РСПИ показателей качества, а именно пропускной способности, ослабления действия УП, внеполосного излучения, помехоустойчивости при АБГШ для случая ТСМ и энергоэффективности формируемого сигнала. Предлагается при этом одновременно использовать следующие критерии качества [3, 4]:

Критерий максимума пропускной способности за счет ослабления действия УП. В [8] показано, что для максимизации пропускной способности канала при наличии УП необходимо

формировать сигнал с провалом в спектральной плотности мощности (СПМ) на частоте действия помехи, т.е. можно задать показатель качества СПМ в виде:

$$\min_{\mathbf{S}} \{d_2(G_t(f), G(f, \mathbf{S}))\}, \quad (1)$$

где $d_2(\cdot)$ – расстояние в евклидовой метрике, $G_t(f)$ – эталонная СПМ с провалом на частоте действия УП, $G(f, \mathbf{S})$ – СПМ синтезируемого сигнала, \mathbf{S} – канальный алфавит.

Критерий минимума внеполосного излучения. Для минимизации внеполосного излучения и уровня взаимных помех радиолиний передачи информации, согласно норм ГК РСЧ [9], необходимо применение спектрально-эффективных СКК с заданной шириной полосы занимаемых частот. Тогда данный показатель качества целесообразно задать в виде:

$$\min_{\mathbf{S}} \{h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{t \log}(f))\}, \quad (2)$$

где $h(\cdot)$ – «штрафная» функция, резко возрастающая при нарушении ограничения; $G_{t \log}(f)$ – «маска» СПМ в логарифмическом масштабе, устанавливающая ограничения на внеполосное излучение.

Критерий максимума помехоустойчивости к собственным шумам приемника при использовании ТСМ. В интересах выполнения требований, предъявляемых к радиосигналам для реализации решетчатого кодирования, необходимо, чтобы при последовательном разбиении используемого канального алфавита на подмножества возрастали минимальные евклидовы расстояния между элементами. Для этого целесообразно соответствующие попарные евклидовы расстояния между элементами канального алфавита для синтезируемой СКК ($\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l$) устремить к эталонным ($\mathbf{s}_k^{(t)}, \mathbf{s}_l^{(t)}$) – используемым при стандартной ТСМ. Следовательно, можно задать данный показатель качества в виде:

$$\min_{\mathbf{S}} \left\{ \sum_k \sum_l (d_2(\mathbf{s}_k^{(t)}, \mathbf{s}_l^{(t)}) - d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l))^2 \right\}, \quad (3)$$

$$k, l = \overline{1, M}, k \neq l, \mathbf{s}_k^{(t)}, \mathbf{s}_l^{(t)} = const,$$

M – количество элементов в канальном алфавите (соответствует позиционности СКК).

Критерий максимума энергоэффективности. В работе [3] показано, что квадрат коэффициента вариации мгновенной мощности, вычисленный по элементам канального алфавита, имеет, по крайней мере на множестве известных сигналов, монотонную зависимость с пик-

фактором соответствующего радиосигнала, однако, в отличие от последнего, не содержит нежелательную в задачах оптимизации чебышевскую метрику. Следовательно, критерий качества энергоэффективности целесообразно задать в виде:

$$\min_{\mathbf{S}} \{D[P_{\text{мч}}(\mathbf{S})] / (M[P_{\text{мч}}(\mathbf{S})])^2\}, \quad (4)$$

где $D[\cdot]$, $M[\cdot]$ – операторы вычисления дисперсии и математического ожидания (усреднения по временной реализации) соответственно; $P_{\text{мч}}(\mathbf{S})$ – мгновенная мощность, вычисленная по элементам канального алфавита.

Комбинированный критерий качества. Как показано в [6, 7], эффективным методом решения подобных многокритериальных задач является переход к синтезу СКК по комбинированному критерию качества с целевой функцией вида:

$$\begin{aligned} k_p(\mathbf{S}) = & c_1 M_1 d_2(G_i(f), G(f, \mathbf{S})) + \\ & + c_2 M_2 \sum_k \sum_l (d_2(\mathbf{s}_k^{(l)}, \mathbf{s}_l^{(l)}) - d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l))^2 + \\ & + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\text{тлог}}(f)) + \\ & + c_4 M_4 (D[P_{\text{мч}}(\mathbf{S})] / (M[P_{\text{мч}}(\mathbf{S})])^2), \quad (5) \\ & \sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = \text{const}; \\ & \mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l \in \mathbf{S}; \quad k, l = \overline{1, M}; \end{aligned}$$

где c_i – параметры, определяющие вес каждого входящего показателя качества; M_i – нормирующие коэффициенты, приводящие отдельные слагаемые к общему динамическому диапазону.

Результаты синтеза, полученные при использовании целевой функции (5), не содержат «худших» СКК, т.е. не требуют дополнительного времени на отсеивание неоптимальных решений, однако могут содержать не все «нехудшие» СКК [6].

Необходимо заметить, что оптимизация по целевой функции (5) представляет собой задачу нелинейного программирования сравнительно высокой размерности, решение которой должно производиться в режиме реального времени. Из анализа работ [10, 11] следует, что при вышеприведенных требованиях целесообразно использование квазиньютоновских методов с конечно-разностной аппроксимацией производных.

Таким образом, процедура синтеза СКК в интересах адаптации РСПИ к действию УП включает в себя следующие этапы:

1) по полученной СПМ УП определяется эталонная СПМ $G_i(f)$;

2) при учете соответствующих весовых параметров c_i формируется целевая функция, согласно выражению (5);

3) при помощи квазиньютоновского метода оптимизации вычисляется предполагаемая точка глобального оптимума.

Оптимизация производится итеративно до выполнения условий останова: в первую очередь это фактор времени (адаптация не должна длиться дольше определенного промежутка времени), также используются стандартные критерии останова, такие как [10]: достижение требуемой точности решения или когда скорость движения к минимуму так упала, что не имеет смысла продолжать оптимизацию, или когда метод начал расходиться или заикливаться, т.е.:

$$\begin{aligned} k_p(\mathbf{S}_{k-1}) - k_p(\mathbf{S}_k) & < \tau_F (1 + |k_p(\mathbf{S}_k)|), \\ \|\mathbf{S}_{k-1} - \mathbf{S}_k\| & < \sqrt{\tau_F} (1 + \|\mathbf{S}_{k-1}\|), \\ \|\mathbf{g}_k\| & \leq \sqrt[3]{\tau_F} (1 + |k_p(\mathbf{S}_k)|). \end{aligned}$$

Здесь параметр τ_F определяет число правильных разрядов $k_p(\mathbf{S}_k)$, которое необходимо получить; \mathbf{g}_k – градиент целевой функции на k -й итерации.

Экспериментальные исследования

Для уточнения постановки задачи многокритериального синтеза необходимо ограничить класс СКК, используемых при адаптации в РСПИ. В настоящее время для передачи информации широко используются четырехпозиционные сигналы и, в частности QPSK-сигналы [5], позволяющие получить сравнительно высокие показатели качества при малом объеме КА, что, в свою очередь, положительно отражается на скорости оптимизации. В случае применения решетчатого кодирования QPSK-сигнал трансформируется в СКК (TCM PSK-8).

Кроме того, для адекватного сравнения по показателям внеполосного излучения целесообразно рассматривать спектрально-эффективную СКК TCM PSK-8 ($p(t)$), у которой форма элементарного импульса задается следующим выражением:

$$p(t) = \sin^2(\pi t / T_S), \quad 0 \leq t \leq T_S,$$

где T_S – символный интервал.

Также целесообразно задать центральную частоту УП, равную несущей полезного сигнала, так как в этом случае оказывается наиболее не-

гативное воздействие на РСПИ за счет поражения частот с высокой концентрацией СПМ, а также затруднено формирование провала в спектре синтезируемой СКК.

На характеристики синтезируемых СКК оказывают существенное влияние весовые коэффициенты c_i [см. выражение (5)]. В интересах обоснования компромиссных значений данных коэффициентов при определении множества синтезируемых радиосигналов методом имитационного моделирования по целевой функции (5) получены зависимости показателей качества от коэффициентов c_i (см. рисунки 1-3).

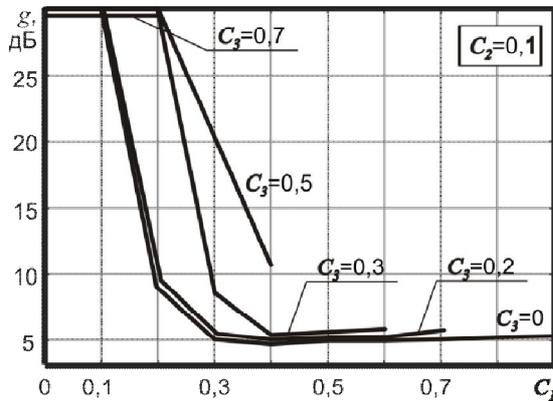


Рисунок 1 – Зависимости показателя подавления УП от весовых коэффициентов c_i

Здесь в качестве показателя подавления УП рассматривается порог помехоустойчивости СКК (g), который определяется как значение, равное отношению E_b / N_0 при вероятности битовой ошибки $P_o = 10^{-3}$, в условиях действия АБГШ и УП в виде «небелого» гауссовского шума (ширина спектра – 5% от ширины спектра синтезированной СКК; расположение – на нулевой нормированной частоте); в интересах получения устойчивых оценок для каждого значения g накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам; кроме того, для всех показателей качества РСПИ статистика накапливалась по 50 реализациям УП.

Для характеристики внеполосного излучения использовались ширина СПМ СКК по уровням -30 и -60 дБ (G_{30} и G_{60} соответственно); а в качестве показателя энергоэффективности – пик-фактор (Π).

При проведении экспериментальных исследований параметр c_2 был фиксирован ($c_2 = 0,1$), так как соответствующий критерий робастен к вариации весовых коэффициентов, и, кроме того, шум входных каскадов приемников присутствует во всех РСПИ и соответственно помехоустойчивость сигналов к воздействию АБГШ

для случая ТСМ является необходимым условием их функционирования. Следовательно, возможно варьировать только параметры c_1 и c_3 , так как $c_4 = 1 - c_3 - c_2 - c_1$.

При условии наличия УП (отношение сигнал-помеха равнялось -4 дБ) наибольший приоритет приобретает критерий $d_2(G_i(f), G(f, S))$. Из результатов, приведенных на рисунке 1, следует, что эффективное подавление УП осуществляется при значениях $c_1 \geq 0,4$ ($c_3 < 0,5$); при этом для эффективного использования остальных критериев необходимо выбрать коэффициент c_1 минимально возможным. Низкая адаптация к УП при $c_3 = 0,5; 0,7$; объясняется преобладанием в этих случаях критерия минимума внеполосного излучения.

Принимая во внимание нецелесообразность исключения критерия минимума внеполосного излучения (при $c_3 = 0$ происходит неконтролируемое изменение соответствующего показателя качества; см. рисунок 2), а также резкое повышение пик-фактора при $c_1 > 0,5$ (см. рисунок 3) данные точки исключаются из рассмотрения.

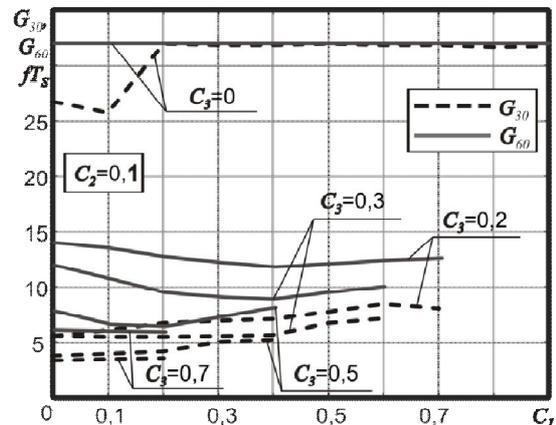


Рисунок 2 – Зависимости показателей внеполосного излучения от весовых коэффициентов c_i

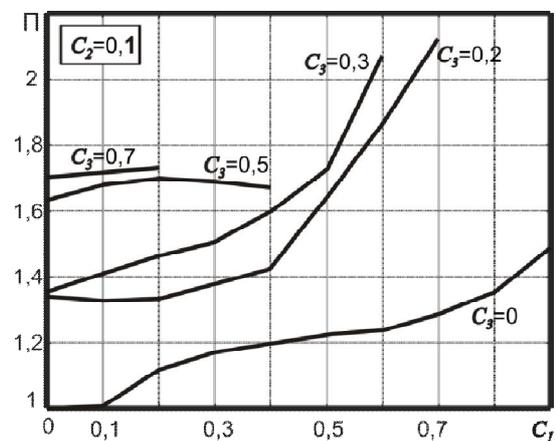


Рисунок 3 – Зависимости показателя энергоэффективности от весовых коэффициентов c_i

При этом конкретные значения весовых коэффициентов целесообразно задавать исходя из требований текущей задачи и обеспечения компромисса между спектральной и энергетической эффективностями. Например, далее в данной работе синтез СКК осуществляется при $c_1 = 0,4$ и $c_3 = 0,3$.

Неконтролируемое ухудшение соответствующих показателей качества при значениях $c_1 = 0$ или $c_3 = 0$ подтверждает необходимость использования многокритериального синтеза СКК.

Из анализа рисунков 1-3 следует, что при варьировании весовых коэффициентов c_i изменяются соответствующие им показатели качества: g – от 5 дБ до отсутствия подавления УП; ширина СПМ по уровням -30 и -60 дБ соответственно – от 3,8 до 8,7 и от 6,5 до 14,6 fT_s ; пик-фактор – от 1,0 до 2,1.

Для исследования эффективности работоспособности предлагаемой процедуры многокритериального синтеза СКК в интересах адаптации РСПИ к действию УП целесообразно произвести количественную оценку показателей качества синтезированных СКК при вариации отношения сигнал-помеха, а также осуществить сравнительный анализ синтезированных и известных СКК на основе решетчатого кодирования.

На рисунке 4 представлены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК от отношения сигнал-помеха (q).

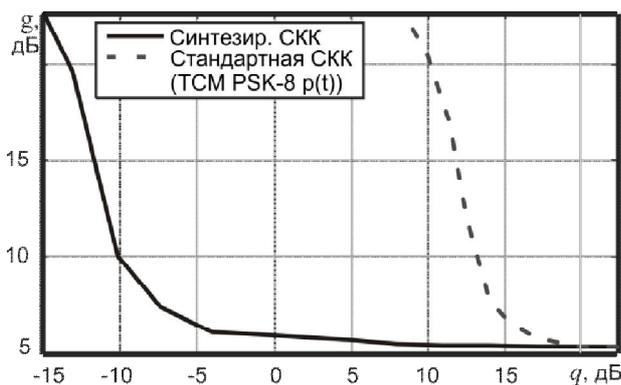


Рисунок 4 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК от отношения сигнал-помеха

Имитационное моделирование предлагаемой процедуры многокритериального синтеза СКК производилось в среде MATLAB. Из анализа рисунка 4 следует, что синтезированные СКК вплоть до $q = -4$ дБ сохраняют свою помехо-

устойчивость на уровне (ухудшение показателя g составляло менее 1 дБ) известной СКК [TCM PSK-8 ($p(t)$)] при воздействии только АБГШ; при этом для рассмотренной стандартной СКК такие же значения показателя g достигаются при отношении сигнал-помеха больше 17 дБ.

Показатели качества внеполосного излучения и энергетической эффективности для рассматриваемых СКК приведены в таблице.

Показатели качества СКК

Вид СКК	TCM PSK-8 ($p(t)$)	Синтезир. СКК
G_{30}, fT_s	3,8	5,5
G_{60}, fT_s	13,4	9,0
П	1,6	1,6

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что при сравнимых значениях пик-фактора синтезированные СКК хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), выигрывают на уровне -60 дБ более чем в 1,4 раза [в сравнении с спектрально-эффективной СКК TCM PSK-8 ($p(t)$)].

Заключение

Предложена процедура синтеза СКК в интересах адаптации РСПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и ослабление действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при АБГШ для случая TCM, а также энергоэффективность формируемой СКК.

Данная процедура позволяет реализовать СКК со следующими показателями качества: порог помехоустойчивости (g) – от 5 дБ до отсутствия подавления УП; ширина СПМ по уровням -30 и -60 дБ соответственно – от 3,8 до 8,7 и от 6,5 до 14,6 fT_s ; пик-фактор – от 1,0 до 2,1.

Предлагаемая процедура синтеза СКК (при значениях $c_1 = 0,4$; $c_2 = 0,1$; $c_3 = 0,3$ и $c_4 = 0,2$) в случае наиболее неблагоприятного воздействия на радиоканал УП (ширина спектра – 5% от ширины спектра синтезированной СКК; расположение – на нулевой нормированной частоте) обеспечивает помехоустойчивость на уровне (ухудшение показателя g составляет менее 1 дБ) известной СКК [TCM PSK-8 ($p(t)$)] при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха $q = -4$ дБ, что на 21 дБ лучше

данного показателя для рассмотренной стандартной СКК. При этом при сравнимых значениях пик-фактора синтезированные СКК хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), но выигрывают на уровне -60 дБ более чем в 1,4 раза [в сравнении с спектрально-эффективной СКК TCM PSK-8 ($p(t)$)].

Библиографический список

1. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets part I and part II. // *IEEE Communications Magazine*, vol. 25, February. 1987. pp. 5-21.
2. Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile communications // *Mobile Multimedia Communications*, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999. pp. 3-10.
3. Покровский П. С., Лисничук А. А. Алгоритм синтеза радиосигналов для адаптации интеллектуальных систем передачи информации к действию помех // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2014. № 48. С. 20-26.
4. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Многокритериальный синтез четырехпози-

ционных радиосигналов на основе канального алфавита // *Радиотехника*. 2015. № 11. С. 14-21.

5. Скляр Б. Цифровая связь. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
6. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 368 с.
7. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Лисничук А. А. Процедура синтеза 4-позиционных сигналов с расширением спектра // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2014. № 50-1. С. 29-33.
8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 832 с.
9. Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения. Нормы 19–13 / Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ). – М.: 2013. – 78 с.
10. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
11. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

UDC 621.396

THE PROCEDURE FOR MULTI-CRITERIA SYNTHESIS OF SIGNAL-CODE SEQUENCE TO ADAPT DATA COMMUNICATION RADIO SYSTEM TO NARROW-BAND INTERFERENCE

S. N. Kirillov, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; kirillov.lab@gmail.com

P. S. Pokrovsky, PhD (technical sciences), senior lecturer, RSREU, Ryazan; paulps@list.ru

A. A. Lisnichuk, post-graduate student, RSREU, Ryazan, a.a.lisnichuk@gmail.com

The use of the known signal-code sequence in data communication radio system under the action of narrow-band interference leads to significant losses in radio noise immunity. The aim is to develop the procedure for multi-criteria synthesis of signal-code sequence to adapt data communication radio system to narrow-band interference. The vector of criteria for signal-code sequence synthesis includes elements to increase AWGN and narrow-band interference immunity as well as power and bandwidth efficiency. It is shown that a synthesized signal-code sequence increases radio narrow-band interference immunity by more than 21 dB (compared to TCM PSK-8 signal-code sequence).

Key words: *synthesis of signal-code sequences, synthesis of radio signals, adaptive data communication systems, cognitive data communication systems, multi-criteria optimization, radio narrow-band interference immunity increase.*

References

1. Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets part I and part II. *IEEE Communications Magazine*, vol. 25, February. 1987. pp. 5–21.
2. Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile communications. *Mobile Multimedia Communications*,

1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999. pp. 3–10.

3. Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A. Algoritm sinteza radiosignalov dlja adaptacii intellektual'nyh sistem peredachi informacii k dejstvuju pomeh. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 48, pp. 20-26 (in Russian).

4. Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A. Mnogokriterial'nyj sintez chetyrehpozicionnyh radiosignalov na osnove kanal'nogo alfavita. *Radiotekhnika*. 2015, no. 11, pp. 14-21 (in Russian).
5. Skljar B. *Cifrovaja svjaz'* (Digital communication), Moscow: Vil'jams, 2003. 1104 p. (in Russian).
6. Gutkin L. S. *Optimizacija radioelektronnyh ustrojstv po sovokupnosti pokazatelej kachestva* (Optimize electronic devices on set of quality indicators), Moscow: Sov. radio, 1975, 368 p. (in Russian).
7. Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Lisnichuk A. A. Procedura sinteza 4-pozicionnyh signalov s rasshireniem spectra. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-1, pp. 29-33 (in Russian).
8. Shannon K. *Raboty po teorii informacii i kibernetike* (Works on information theory and cybernetics), Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1963. 832 p. (in Russian).
9. Normy na shirinu polosy radiochastot i vnepolosnye izluchenija radioperedatchikov grazhdanskogo primenenija. Normy 19-13. *Gosudarstvennaja komissija po radiochastotam (GKRCh)*. Moscow, 2013. 78 p. (in Russian).
10. Gill F., Mjurrej U., Rajt M. *Prakticheskaja optimizacija* (Practical optimization), Moscow: Mir, 1985. 510 p. (in Russian).
11. Himmel'blau D. *Prikladnoe nelinejnoe programirovanie*: per. s angl. (Applied Nonlinear Programming: Per. from English), Moscow: Mir, 1975, 536 p. (in Russian).