

УДК 621.396

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ КЛАССА ЦИФРОВЫХ СТРУКТУРНО-ЗАЩИЩЕННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

Кириллов С.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой РУС РГПТУ, e-mail: kirillov.lab@mail.ru;

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

MULTI-CRITERIA SYNTHESIS FOR CLASS OF DIGITAL STRUCTURALLY PROTECTED RADIO SIGNALS

Kirillov S.N., Lisnichuk A.A.

To increase the noise immunity of prospective radio communication systems, a procedure has been developed for multi-criteria synthesis for class of structurally protected radio signals in order to adapt to narrow-band interference action. The combined quality criterion included private criteria responsible for reducing narrow-band interference effects; noise immunity with additive «white» Gaussian noise, as well as minimizing out-of-band radiation and maximizing signal structural hiding. The application of the last criterion led in radio monitoring systems to a significant increase in the probability of bit error from detectors set of the known signals types under consideration (by up to 25 %).

Key words: radio signal synthesis, signal structural hiding, multi-criteria optimization, increasing noise immunity.

Ключевые слова: синтез радиосигналов, структурная скрытность, многокритериальная оптимизация, повышение помехоустойчивости.

Введение

В интересах реализации концепции многошелонированной помехозащищенности перспективных радиосистем передачи информации (РСПИ) необходимо повышение как помехоустойчивости, так и структурной скрытности передаваемых сигналов. Для адаптации РСПИ к действию совокупности аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ) и других мешающих факторов (в том числе и узкополосных помех (УП)) целесообразно применять многокритериальный синтез радиосигналов с провалом в спектральной плотности мощности (СПМ) на частотах действия помехи [1]. При этом особое внимание следует уделить дополнительно увеличению структурной скрытности радиоканала. Это, в свою очередь, затруднит распознавание типа радиосигнала и приведет к невозможности несанкционированного перехвата передаваемой информации или постановки эффективной (сигналоподобной) помехи.

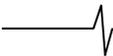
Для исключения влияния конкретного алгоритма распознавания вида модуляции целесообразно рассмотреть показатель качества, обеспечивающий увеличение структурной скрытности в виде максимизации вероятности битовой ошибки от набора детекторов известных типов сигналов в случае подачи на их вход смеси синтезированного сигнала и АБГШ при сравнительно высоком отношении сигнал-шум. Стоит отметить, что в такой модели создаются наиболее жесткие требования для показателя качества структурно-защищенных радиосигналов, так как для системы определения вида модуляции предполагается идеальная синхронизация как по несущей, так и по тактовой частотам, и, кроме того, отсутствие воздействия УП.

Для увеличения помехозащищенности перспективных радиосистем передачи информации разработана процедура многокритериального синтеза класса структурно-защищенных радиосигналов в интересах адаптации к действию узкополосных помех. В состав комбинированного критерия качества входили частные критерии, отвечающие за ослабление действия узкополосных помех и помехоустойчивость при аддитивном «белом» гауссовском шуме, а также обеспечивающие минимизацию внеполосного излучения и максимизацию структурной скрытности формируемого сигнала. Применение последнего критерия привело в системах радиомониторинга к существенному увеличению вероятности битовой ошибки от набора детекторов рассматриваемых известных типов сигналов (на величину до 25 %).

Целью работы является разработка процедуры многокритериального синтеза класса цифровых структурно-защищенных радиосигналов в интересах адаптации РСПИ к действию УП.

Критерий увеличения структурной скрытности радиосигналов

Для достижения увеличения структурной скрытности целесообразно потребовать максимизацию расстояний в пространстве сигналов между классом синтезируемых радиосигналов S_{opt} и точками S_{ζ} , соответствующими известным видам модуляции. При этом при превышении таким расстоянием величины, равной минимальному евклидову расстоянию между элементами канального алфавита для QPSK-сигнала d_{QPSK}^{min} , дальнейшая максимизация его значения не будет приводить к дополнительной структурной скрытности, и, следовательно, целесообразно исключить данное расстояние из рассмотрения на текущей итерации. Кроме того, стоит отметить, что для каждого известного вида модуляции вычисляется матрица взаимных (с синтезируемым радиосигналом) евклидовых расстояний $D_2(S_{\zeta}, S_{opt})$, а для выполнения численной оптимизации, как правило, необходимо ска-



лярное значение целевой функции. При рассмотрении минимального значения из матрицы взаимных евклидовых расстояний в целевой функции возникает минимаксная метрика, которая приводит к появлению множества локальных оптимумов и в целом затрудняет оптимизацию [2]. Предлагается для преодоления данного недостатка вычислять среднее по ансамблю от матрицы взаимных евклидовых расстояний (при помощи оператора $M[\cdot]$). И, наконец, для учета нескольких (количество которых обозначим L) известных видов модуляции в данном критерии необходимо рассматривать взвешенную сумму соответствующих частных критериев (здесь вес определяет важность структурной защиты от определенного сигнала), однако при равнозначности рассматриваемых частных критериев возможно вычисление по ним среднеарифметического значения. Тогда данный критерий можно записать в следующем виде:

$$k_{si}(\mathbf{S}_{opt}) = \frac{1}{L} \sum_{\zeta=1}^L M \left[\left\{ \mathbf{D}_2(\mathbf{S}_{\zeta}, \mathbf{S}_{opt}) \mid d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j}) < d_{QPSK}^{\min} \right\} \right] \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j}) \in \mathbf{D}_2(\mathbf{S}_{\zeta}, \mathbf{S}_{opt}),$$

$$s_{\zeta,i} \in \mathbf{S}_{\zeta}, \quad s_{opt,j} \in \mathbf{S}_{opt}, \quad i, j = \overline{1, M_N}.$$

где $d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j})$ – взаимное евклидово расстояние между i -м ($s_{\zeta,i}$) и j -м ($s_{opt,j}$) элементами канальных алфавитов соответственно для известного \mathbf{S}_{ζ} и синтезируемого сигналов \mathbf{S}_{opt} ; M_N – позиционность радиосигналов, как правило, соответствует объему канального алфавита. Необходимо отметить, что при оптимизации сигналы должны подвергаться нормировке по мощности для недопущения реализации тривиального решения путем увеличения энергии синтезируемого сигнала.

Для более точной постановки задачи необходимо ограничить класс анализируемых сигналов. В современных РСПИ целесообразно рассмотреть четырехпозиционные радиосигналы, как реализующие сравнительно высокие показатели качества при компактном объеме канального алфавита. В качестве известных видов модуляции предлагается рассмотреть такие широко распространенные на практике сигналы как фазоманипулированные: QPSK, QPSK с формой элементарного импульса $p_1(t) = \sin(\pi t / T_s)$, (T_s – символьный интервал), QPSK ($p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$); частотно-манипулированные: FSK-4 с индексом модуляции $h = 0,5$, FSK-4 ($h = 1$); перспективные: FQPSK (Fehler-patented quadrature phase-shift keying).

Процедура многокритериального синтеза структурно-защищенных радиосигналов

Для недопущения неконтролируемого изменения других важных характеристик РСПИ представляет интерес применение многокритериального подхода. Следовательно, целесообразно рассмотрение следующих критериев качества перспективных РСПИ [1, 3-6]:

– максимизация пропускной способности при минимизации действия УП на РСПИ путем формирования про-

валов в СПМ синтезируемого канального алфавита;

– максимизация помехоустойчивости к действию АБГШ путем увеличения евклидова расстояния между элементами синтезируемого канального алфавита;

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

– максимизация структурной скрытности синтезируемых радиосигналов.

Одним из удобных методов решения многокритериальных задач является переход к синтезу радиосигналов на основе взвешенной суммы [7] критериев качества:

$$c_1 M_1 \int |G_0(f) - G_S(f, \mathbf{S}_{opt})|^2 df + c_2 M_2 / \rho_S(\mathbf{S}_{opt}) + c_3 M_3 \eta(G_S(f, \mathbf{S}_{opt}), G_M(f)) + c_4 M_4 / k_{si}(\mathbf{S}_{opt}) \rightarrow \min_{\mathbf{S}_{opt}}, \quad (2)$$

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; $G_0(f)$, $G_S(f, \mathbf{S}_{opt})$ – соответственно «эталонная» (с провалом на частоте действия УП) и текущая нормированные СПМ радиосигналов; $\rho_S(\mathbf{S}_{opt})$ – среднее значение всех возможных попарных евклидовых расстояний между элементами $s_k, s_l \in \mathbf{S}_{opt}$ ($k, l = \overline{1, 4}$, $k \neq l$) канального алфавита \mathbf{S}_{opt} ; $\eta(\cdot)$ – «штрафная» функция, ограничивающая превышение внеполосным излучением сигнала специальной функции $G_M(f)$.

Применение такого подхода позволяет задавать компромисс между характеристиками РСПИ путем определения соответствующих весовых коэффициентов. Кроме того, результаты, полученные таким способом, не содержат «худших» сигналов, т.е. не требуют дополнительного времени на отсеивание неоптимальных решений.

Из результатов предварительных исследований следует, что дополнительное повышение структурной скрытности требуется не для всех элементов класса синтезируемых сигналов. Например, для сигнала, синтезированного в [4], при центральной частоте УП соответствующей несущей частоте и значении весовых коэффициентов $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$; вероятности битовой ошибки от набора детекторов рассматриваемых известных типов сигналов BER_{si} (при $E_b / N_0 = 20$ дБ) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатель BER_{si} для синтезированного сигнала (без применения критерия качества максимизации структурной скрытности) при центральной частоте УП соответствующей несущей частоте

Тип детектора	QPSK	QPSK $p_1(t)$	QPSK $p_2(t)$	FSK-4 $h = 0,5$	FSK-4 $h = 1$	FQPSK
BER_{si}	46 %	43 %	42 %	23 %	29 %	43 %

Из анализа табл. 1 следует, что минимальное значение $BER_{si} = 23\%$ достигается при детекторе FSK-4 $h = 0,5$. Данные значения свидетельствуют о довольно высокой структурной скрытности синтезированного радиосигнала без применения соответствующего критерия (при $BER_{si} > 15\%$ предполагается отсутствие возмож-

ности эффективного детектирования радиосигнала). Однако, такие показатели достигаются не для всех элементов класса синтезируемых радиосигналов: при центральной частоте УП равной $-0,75 fT_s$ и значении весовых коэффициентов $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$ показатели качества приведены в табл. 2.

Таблица 2. Показатель BER_{si} для синтезированного сигнала (без применения критерия качества максимизации структурной скрытности) при центральной частоте УП равной $-0,75 fT_s$

Тип детектора	QPSK	QPSK $p_1(t)$	QPSK $p_2(t)$	FSK-4 $h = 0,5$	FSK-4 $h = 1$	FQPSK
BER_{si}	1 %	3 %	2 %	23 %	27 %	48 %

Из анализа табл. 2 следует, что структурная скрытность синтезированного радиосигнала без применения соответствующего критерия не достигает требуемого уровня.

Исходя из этих результатов, а также с учетом выявленной существенной зависимости результатов оптимизации по целевой функции (2) от начальных условий, предлагается производит многокритериальный синтез структурно-защищенных радиосигналов в два этапа: синтез в соответствии с процедурой, приведенной в [4], а затем, при необходимости дополнительная минимизация по целевой функции (2) (при помощи квазиньютоновского алгоритма оптимизации).

Экспериментальные исследования

В интересах оценки реализуемых показателей качества РСПИ на основе многокритериального синтеза структурно-защищенных радиосигналов было проведено имитационное моделирование следующих процессов:

- многокритериального синтеза и формирования структурно-защищенных радиосигналов;
- добавления к полезному сигналу АБГШ;
- детектирования из принятой смеси информационной составляющей радиосигнала при помощи набора детекторов рассматриваемых известных типов сигналов;
- определения реализованных характеристик РСПИ при текущих условиях, накопление статистики.

Для каждого значения показателя качества BER_{si} накапливалось не менее 100 ошибочных бит, кроме того, статистика набиралась по 1000 реализациям смеси полезного сигнала и АБГШ.

Результаты моделирования многокритериального синтеза структурно-защищенных радиосигналов при центральной частоте УП равной $-0,75 fT_s$ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатель BER_{si} для синтезированного структурно-защищенного сигнала при центральной частоте УП равной $-0,75 fT_s$

Тип детектора	QPSK	QPSK $p_1(t)$	QPSK $p_2(t)$	FSK-4 $h = 0,5$	FSK-4 $h = 1$	FQPSK
BER_{si}	48 %	44 %	31 %	26 %	27 %	46 %

Из анализа табл. 3 следует, что минимальное значение $BER_{si} = 26\%$ достигается при детекторе FSK-4 $h = 0,5$. Необходимо отметить, что применение крите-

рия структурной скрытности радиосигналов позволило существенно увеличить показатель качества минимальной битовой ошибки от набора детекторов рассматриваемых известных типов сигналов на величину 25 % (см. табл. 2).

Однако, из табл. 3 также следует, что для трех видов модуляции достигается наименьшая, примерно равная, вероятность битовой ошибки BER_{si} : QPSK $p_2(t)$, FSK-4 $h = 0,5$, FSK-4 $h = 1$. С одной стороны, данное обстоятельство полезно для структурной скрытности, т.к. для системы определения вида модуляции предоставляется сравнительно равновероятная возможность отнести синтезированный радиосигнал к одному из трех классов. С другой стороны, можно выдвинуть гипотезу о построении более сложного приемника, учитывающего информацию от трех наиболее вероятных детекторов и выдающих итоговое решение о принятом бите по критерию 2 из 3 (т.е. исходя из простого большинства по частным решениям). Данная гипотеза также была проверена при помощи имитационного моделирования. В результате при таком детекторе достигается значение $BER_{si} = 16\%$, что свидетельствует об отсутствии возможности эффективного детектирования синтезированного структурно-защищенного радиосигнала с помощью систем определения известного вида модуляции.

Необходимо отметить, что реализация дополнительной структурной скрытности синтезированных радиосигналов требует некоторого увеличения занимаемой полосы частот: ширина спектральной плотности мощности по уровню -30 дБ увеличивалась на величину до 40 %. Однако, при этом, помимо высокой структурной скрытности, обеспечивается значительная помехоустойчивость путем эффективной адаптации РСПИ к действию УП: в условиях воздействия АБГШ и УП (вплоть до отношения сигнал-помеха -10 дБ) реализовывалась помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ.

Заключение

В интересах реализации концепции многоэшелонированной помехозащищенности перспективных радиосистем передачи информации разработана процедура многокритериального синтеза класса структурно-защищенных радиосигналов в интересах адаптации к действию УП. В состав комбинированного критерия качества входили частные критерии, отвечающие за ослабление действия узкополосных помех; помехоустойчивость при АБГШ, а также обеспечивающие минимизацию внеполосного излучения и максимизацию структурной скрытности формируемого сигнала. Применение критерия структурной скрытности радиосигналов позволило существенно увеличить соответствующий показатель качества на 25%, при этом ширина спектральной плотности мощности по уровню -30 дБ увеличивалась на величину до 40%. Однако, помимо высокой структурной скрытности, обеспечивается значительная помехоустойчивость путем эффективной адаптации РСПИ к действию УП: в условиях воздействия АБГШ и УП (вплоть до отношения сигнал-помеха -10 дБ) реализовывалась помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ.



Литература

1. 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.
2. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 368 с.
3. Кириллов С.Н., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез 16-позиционных радиосигналов на основе канального алфавита в интересах адаптации радиосистем передачи информации к узкополосным помехам // Радиотехника. 2018. № 5. С. 4-12.
4. Кириллов С.Н., Лисничук А.А. Сравнительный анализ воздействия узкополосных помех на когнитивные радиосистемы передачи информации на основе синтезированных четырехпозиционных радиосигналов // Радиотехника. 2018. № 5. С. 30-35.
5. 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.
6. 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.
7. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.