

УДК 004: 621. 396 (045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-11-20

## Анализ сигнально-кодовых конструкций в задачах повышения энергетической скрытности радиолиний

А. Н. Киченко, соискатель, АО «Сарапульский радиозавод», Россия

А. В. Савельев, доктор технических наук, профессор, АО «Сарапульский радиозавод», Россия

К. В. Шишаков, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Статья посвящена анализу сигнально-кодовых конструкций для задач повышения энергетической скрытности радиолиний, включая исследование цифровых модемов и помехоустойчивых кодеров. В качестве основного критерия энергетической эффективности выбрано отношение мощности сигнала к мощности шума после компрессии сигнала на детекторе приемника при заданном его отношении в канале связи и при требуемом значении вероятности ошибки на бит для принимаемого сигнала.*

*Обосновывается, что среди сигналов цифровых модемов наибольшую энергетическую скрытность в зашумленной электромагнитной обстановке позволяют достичь широкополосные линейно-частотно модулированные сигналы. Для этого проведено их сравнение с традиционно модулированными сигналами и с фазоманипулированными широкополосными сигналами.*

*Для задач обеспечения эффективной радиосвязи в условиях предельного уменьшения мощности сигнала по сравнению с шумами радиоканала проведено исследование влияния помехоустойчивых кодеров на повышение энергетической эффективности радиолиний. Сначала выполнены расчеты для сигнально-кодовых конструкций, сформированных разными комбинациями типовых вариантов цифровых модуляторов и помехоустойчивых кодеров. В список цифровых модуляторов вошли следующие: PAM, ASK, PSK, QAM, FSK, MSK с разной степенью многопозиционности. Среди помехоустойчивых кодов были выбраны коды БЧХ, Рида-Соломона, Голя, сверточные, Хэмминга. Исследование эффективности разных их комбинаций выполнено на стенде National Instruments на основе технологии SDR с использованием готовых подпрограмм для модуляторов и помехоустойчивых кодеров, реализованных в среде LabView.*

*Отдельно для обеспечения повышенной помехоустойчивости скрытных радиоканалов выполнен анализ и выбор параметров эффективности сигнально-кодовых конструкций на основе линейно-частотно модулированных сигналов. Показано, что наиболее высокая энергетическая скрытность радиолиний будет обеспечиваться методами комбинированного применения линейно частотно модулированных сигналов с помехоустойчивыми кодерами Рида – Соломона.*

**Ключевые слова:** модуляция, помехоустойчивое кодирование, ЛЧМ-сигналы, сигнально-кодовые конструкции, энергетическая скрытность радиолиний.

### Введение

Одним из основных путей повышения энергетической скрытности радиолиний систем связи является уменьшение энергетического уровня радиосигналов по сравнению с электромагнитным фоном, что приводит к затруднению процессов их энергетического обнаружения [1–3]. При этом радиосигнал будет полностью скрыт, если его накапливаемое значение за время  $T$  будет ниже порога чувствительности приемника обнаруживающего средства, работающего в условиях естественных помех [4, 5].

Повышение энергетической скрытности радиолиний обеспечивается в первую очередь выбором сигналов [6] и помехоустойчивых кодеров [7, 8] с уменьшением спектральной плотности. Их объединение в рамках модемного оборудования представляет собой двухкаскадные сигнально-кодовые конструкции (СКК) [9]. При этом

наибольший потенциал в уменьшении отношения сигнал/шум имеют широкополосные модемы [10, 11], позволяющие многократно увеличить базу сигнала. Это, в свою очередь, позволяет на выходе приемника выполнять эффективную компрессию удлиненных по времени энергетически слабых импульсов со значительным увеличением отношения сигнал/шум. Применение помехоустойчивых кодеров обеспечивает требуемые значения BER (ошибок на бит передаваемой информации) в условиях приема возрастающего количества принятых ошибочных бит [12, 13]. Но они будут несколько удлинять временной сеанс передачи информационных блоков (обычно не более чем в два раза).

Достижение правильного выбора и эффективной сбалансированности цифровых модемов и помехоустойчивых кодеров в СКК зависит от изменяющихся условий на трассе. Поэтому в общем

случае решение таких задач лежит в плоскости построения настраиваемых радиосистем, которые последовательно развиваются в сторону адаптивных и трансформирующихся в когнитивные радиосистемы [14, 15], эффективно работающие на нестационарных радиотрассах [16, 17].

Целью статьи является анализ путей повышения энергетической скрытности радиолиний с помощью выбора сигнально-кодовых конструкций.

### Выбор критерия энергетической эффективности СКК

В качестве общего критерия энергетической эффективности СКК примем отношение сигнал/шум ( $S/N$ ) на входе приемника:

$$S = E_b \cdot R_b, \quad N = N_0 \cdot \Delta f \Rightarrow \\ \Rightarrow S/N = (E_b / N_0) \cdot (R_b / \Delta f), \quad (1)$$

где  $E_b$  – энергия на бит информации;  $N_0$  – спектральная плотность шума (тепловой шум приемника плюс шум от параллельно работающих радиостанций);  $R_b = 1 / T_b$  – битовая скорость передачи информации,  $T_b$  – длительность бита;  $\Delta f$  – полоса частот пропускания приемника.

Сигналом  $S$  в (1) является мощность сигнала на входе приемника:

$$S = P_0 \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot K, \quad (2)$$

где  $P_0$  – выходная мощность передатчика;  $G_{TX}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $G_{RX}$  – коэффициент усиления приемной антенны;  $K$  – коэффициент передачи канала связи, описывающий потери на трассе.

Видно, что с точки зрения СКК основным критерием энергетической эффективности становится отношение ( $E_b / N_0$ ). При этом минимально необходимая его величина, обеспечивающая уверенный прием цифровой информации, зависит от типа детектора. В теории цифровой связи известны зависимости вероятности ошибки на бит (BER) для типовых вариантов цифровых модуляторов. В частности, для оптимального детектора фазомодулированных сигналов отношение ( $E_b / N_0$ ) обычно составляет 6–8 дБ при приеме цифровой информации с достаточной достоверностью.

Выделим в (1) коэффициент усиления  $G$  приемника:

$$E_b / N_0 = (S / N) \cdot G, \quad G \equiv \Delta f / R_b = \Delta f \cdot T_b. \quad (3)$$

Он представляет собой базу сигнала и характеризует коэффициент компрессии (сжатия) радиоимпульса на выходе приемника  $K = \tau_{и} / \tau_{сж}$ , где  $\tau_{сж} = 1 / \Delta f$ ,  $\tau_{и}$  – исходная длительность им-

пульса. Так, например, линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы принимаются на специальную частотную маску, повторяющую временное поведение радиоимпульсов [18]. При этом происходит увеличение амплитуды каждого выходного радиоимпульса путем суммирования амплитудных значений всех периодов сигнала, а уровень шумов не повышается. Таким образом, за счет увеличения времени корреляционной обработки сигнала ( $T_b$ ), а также расширения полосы приема ( $\Delta f$ ) можно добиться существенного понижения уровня сигнала  $S$  по отношению к уровню шума  $N$ .

### Выбор широкополосных сигналов (ШПС)

Применение таких сигналов позволяет существенно снизить плотность потока излучаемой мощности передающим устройством, что на прямых трассах имеет существенные преимущества перед обычными узкополосными сигналами. Среди них обычно выделяют фазоманипулированные (ФМ) и ЛЧМ-сигналы.

В ФМ одночастотных сигналах несущая частота модулируется псевдослучайной кодовой последовательностью с частотой следования импульсов, значительно превышающей ширину полосы информационного сигнала. На их основе работает большинство систем радиосвязи с низкоорбитальными космическими аппаратами.

В сигналах с нелинейной частотной модуляцией несущей выполняется изменение частоты по выбранному закону [19, 20]. Среди них наибольшее распространение получили сигналы первого порядка с огибающей прямоугольной формы – ЛЧМ [21–24]. Преимущества таких сигналов по сравнению с ФМ-сигналами проявляются в полном отсутствии в их составе монохромных несущих. С точки зрения скрытности это выгодно отличает их от всех остальных сигналов, используемых в настоящее время.

Передача сообщений по каналу радиосвязи осуществляется пакетами символов, которые имеют линейный закон изменения частоты на длительности символов. В начале каждого из них располагается синхрокомбинация, при обнаружении которой приемным устройством устраняется неопределенность по начальной задержке и по несущей частоте ЛЧМ.

База ЛЧМ-сигнала зависит от ширины спектра ( $W_d$ ) и длительности ( $T_{ЛЧМ}$ ) радиоимпульса:  $B = W_d \cdot T_{ЛЧМ}$ . Она влияет на равномерность спектральной плотности сигнала и обычно превышает значение 80. Заметим, что если при  $B = 20$  спектр сигнала только начинает переходить от параболического к плоскому, то при  $B = 200$  получается уже практически плоский равномерный

спектр. При этом для заданной базы  $B$  с помощью увеличения длительности посылки  $T_{\text{ЛЧМ}}$  можно существенно снизить спектральную плотность  $W_d$  потока излучаемой мощности.

**Сравнение широкополосных ЛЧМ- и ФМ-сигналов**

В табл. 1 приведены сравнительные параметры ансамбля ФМ ШПС, построенного на основе

большого множества Касами; ансамбля ЛЧМ-16 с  $W_d = 40$  кГц,  $T_{\text{ЛЧМ}} = 0,005$  с и ансамбля ЛЧМ-256 с  $W_d = 150$  кГц,  $T_{\text{ЛЧМ}} = 0,05$  с. Видно, что при сравнимых базах сигналов скорость при использовании ЛЧМ-16 получилась в пять раз выше, чем в случае применения ФМ ШПС.

Таблица 1. Сравнение характеристик ФМ и ЛЧМ ШПС

Вид сигнала	Количество элементов, $N$	База, $B$	Мощность ансамбля, $N_A$	Информационная емкость символа, $V_E$ (бит)	Скорость, $v_{\text{отн}}$
ФМ ШПС	255	255	4111	12	0,047
ЛЧМ-16	16	200	16	4	0,25
ЛЧМ -256	256	7500	256	8	0,031

Таким образом, в скрытых радиолиниях наиболее эффективно использовать ЛЧМ-сигналы. Они позволяют в той же частотной полосе существенно повысить скорость, получить равномерный спектр, более просто реализовать большие базы и обеспечить лучшую помехоустойчивость относительно узкополосных и структурных помех. При этом сверхнизкие каналные скорости дают возможность предельно понижать мощность, необходимую для передачи информации в радиолиниях. Большое разнообразие форм сигнала, отсутствие несущей на фиксированной частоте в сочетании с пониженной мощностью могут существенно затруднить или исключить обнаружение излучения работающей радиостанции средствами радиоэлектронной разведки.

**Сравнение ЛЧМ-сигналов с другими традиционными сигналами**

Сравним энергетические характеристики ЛЧМ-сигнала и других сигналов. Для этого запишем минимальную излучаемую мощность  $P$ , обеспечивающую прием сигнала с требуемой вероятностью ошибки. В ней выделим коэффициент  $K$ , не зависящий от вида модуляции:

$$P = \frac{h^2}{Tc} \cdot K, \quad \frac{v^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot D \cdot L}{S_d \cdot \eta} = K, \quad (4)$$

где  $h^2$  – отношение сигнал/помеха на входе демодулятора приемного устройства;  $v^2$  – интен-

сивность его внутренних шумов;  $S_d, \eta$  – действующая площадь и КПД АФУ приемной антенны;  $D$  – наклонная дальность на излучение (м);  $L$  – ослабление сигнала на трассе, обусловленное поляризационными потерями и потерями в атмосфере;  $Tc$  – длительность символа (с).

В качестве сравниваемых сигналов выберем: гауссовскую частотную модуляцию минимального фазового сдвига GMSK (1 бит на символ), квадратурную фазовую модуляцию QPSK (2 бита на символ), линейную частотную модуляцию ЛЧМ (в варианте 4 бита на символ), многочастотную телеграфию МЧТ (в варианте 8 бит на символ).

Для простоты будем считать, что мощность сигнала распределяется равномерно в эффективной полосе сигнала:  $P/W$ , где  $P$  – излучаемая мощность, а  $W$  – эффективная полоса спектра сигнала.

Тогда будут иметь место зависимости, приведенные в табл. 2. В ней для ЛЧМ-сигнала при расчете  $P/W$  выбраны  $Tc = 5$  мс, а скорость изменения частоты на интервале символа составляла  $\mu = 8$  МГц/с. Из табл. 2 также следует, что для достижения требуемой устойчивости связи при минимальной спектральной плотности мощности наиболее эффективно использование линейной частотной модуляции.

Таблица 2. Сравнение энергетических характеристик сигналов

Вид модуляции	GMSK	QPSK	МЧТ-256 (без ППРЧ)	ЛЧМ
$h^2$	$h^2 = 12,43$	$h^2 = 13,1$	$h^2 = 17,76$	$h^2 = 14,57$
$W$	$W = \frac{1,5}{Tc}$	$W = \frac{1}{Tc}$	$W = \frac{256}{Tc}$	$W = \frac{16}{Tc} + \mu \cdot Tc$
$P/W$	$8,29 \cdot K$	$13,1 \cdot K$	$0,069 \cdot K$	$0,067 \cdot K$

Заметим, что снижение скорости передачи информации при использовании сигналов GMSK, QPSK и МЧТ позволяет уменьшить излучаемую мощность, но не приводит к снижению спектральной плотности мощности. Тогда как увеличение длительности символа ЛЧМ-сигнала позволит получить значение отношения  $P/W$  меньше приведенного в таблице, что составляет возможность дальнейшего повышения энергетической скрытности за счет уменьшения скорости передачи информации.

#### Влияние помехоустойчивых кодов на повышение энергетической скрытности радиолиний

Так как системы скрытой радиопередачи предназначены для работы в условиях сильной зашумленности радиосигналов, поэтому оценку эффективности их СКК будем проводить по критериям ( $E_b/N_0$ ) и BER. Далее в соответствии с (3) нетрудно перейти к нужному отношению  $S/N$  выбором требуемого коэффициента усиления  $G$ .

Исследования эффективности традиционных СКК для обеспечения помехоустойчивости скрытых каналов связи были проведены на специально построенном стенде на платформе *National Instruments – NIPXIe-7966R* с модулем *NI 5791R*. Формирование передаваемого сигнала, его модуляция, кодирование, а также настройка приемопередающего оборудования осуществлялись в среде разработки *LabVIEW* с использованием стандартных программных модулей модемов и кодеров. Использовались два комплекта оборудования: один в качестве передатчика, другой – в качестве приемника. Они были соединены через коаксиальный кабель.

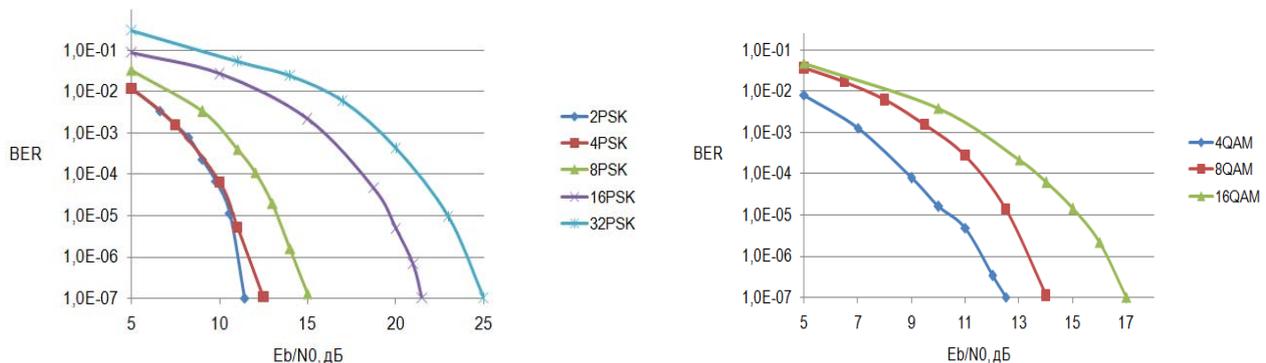


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки (BER) в зависимости от ( $E_b/N_0$ ) для сигналов PSK и QAM различных размерностей (без помехоустойчивых кодеров)

Видно, что увеличение количества уровней модулированного сигнала (многопозиционности сигнала) уменьшает его стойкость к шуму в канале, но в то же время повышает скорость пере-

Схемы моделирования исследуемых цифровых систем радиосвязи построены с использованием типовых процедур в среде *LabVIEW*.

Так как эффективность СКК одновременно зависит от эффективности цифровых модемов и помехоустойчивых кодеров, поэтому сначала исследовалось ухудшение качества радиоприема в зависимости от уровня шума в каналах радиосвязи при отсутствии помехоустойчивых кодеров. Для моделирования были выбраны следующие варианты цифровых модуляторов / демодуляторов [25]: PAM (Pulse Amplitude Modulation) – импульсная амплитудная модуляция; ASK (Amplitude Shift Keying) – амплитудная манипуляция; PSK (Phase Shift Keying) – фазовая модуляция; QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудно-фазовая модуляция; FSK (Frequency Minimum Shift Keying) – частотная манипуляция (модуляция с разрывной фазой); MSK (Minimum Shift Keying) – частотная модуляция минимального фазового сдвига.

Полученные результаты моделирования эффективности работы разных вариантов модемов в составе радиосистем с различным уровнем помех в каналах радиопередачи показаны на рис. 1. Вероятность битовой ошибки BER вычислялась как среднее значение для 100 попыток при передаче по 10000 бит. А уровень помех характеризовался отношением энергии  $E_b$ , затрачиваемой на передачу одного бита, к спектральной плотности средней мощности белого гауссовского шума  $N_0$ . Тип канала связи описывался моделью канала АБГШ (аддитивный белый гауссовский шум).

дачи информации. При этом модуляторы 4PSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK по отношению к бинарной фазовой модуляции 2PSK могут давать увеличение скорости передачи в 2, 3, 4 и в 5 раз, а мо-

дуляторы 4QAM, 8QAM, 16QAM – соответственно в 2, 3, 4 раза.

Для улучшения условий компромисса между скоростью передачи и стойкостью к шуму в схемы моделирования были добавлены помехоустойчивые кодеры разных типов со стандартными программными кодами, написанными в среде *LabVIEW* для платформы *National Instruments – NIXIe-7966R* с модулем *NI 5791R*. Полученные результаты приведены на рис. 2

(BER, как и ранее, вычислялась как среднее значение для 100 попыток при передаче по 10000 бит). Для разных типов модемов (4PAM, 16QAM, MSK, 4FSK, 8ASK и др.) была исследована эффективность введения следующих помехоустойчивых кодеров: БЧХ, Рида – Соломона (РС), Голея, сверточного, Хэмминга. При этом наихудшие результаты на графиках соответствуют вариантам без помехоустойчивых кодеров.

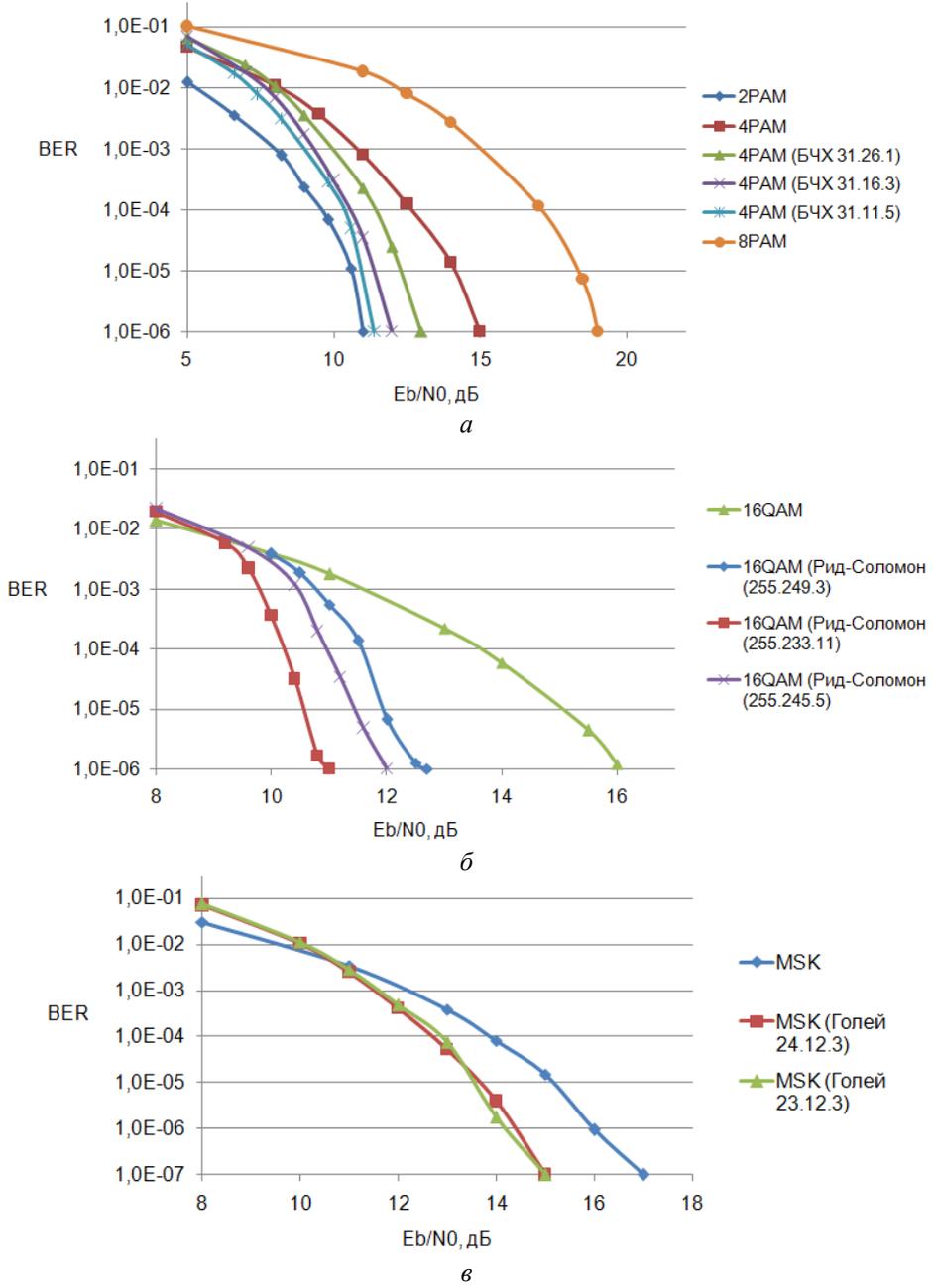


Рис. 2. Зависимости BER от ( $E_b / N_0$ ) для разных СКК: а – PAM + БЧХ; б – 16QAM + РС; в – MSK + код Голея (окончание на с. 16)

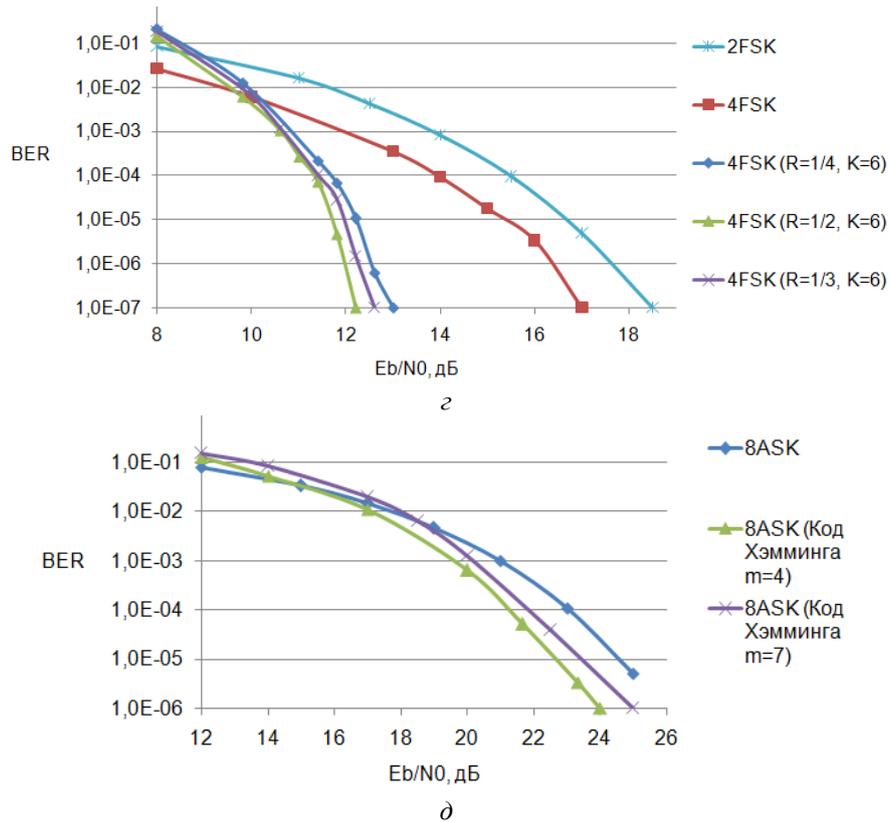


Рис. 2. Окончание: z – FSK + сверточный код; d – 8ASK + код Хемминга (начало на с. 15)

Как и ожидалось, с увеличением количества исправляемых ошибок энергетическая эффективность кода увеличивалась.

Полученные на рис. 2 графики показывают, что эффективность выбранного варианта кода БЧХ обеспечивается при  $E_b/N_0 \geq 6$  дБ. При использовании СКК 16QAM с кодом Рида – Соломона на уровне вероятности битовой ошибки  $10^{-5}$  получился энергетический выигрыш  $\approx 5$  дБ по сравнению с передачей данных без помехоустойчивого кодирования. Эффективность кода Голя обеспечивалась при  $E_b/N_0 \geq 11$  дБ. Применение сверточного кода с модуляцией FSK целесообразно при  $E_b/N_0 > 10$  дБ, иначе вероятность появления ошибочно принятых бит СКК со сверточным кодом становилась больше, чем для СКК без кодирования. При этом использование сверточного кода с заданными параметрами может обеспечить энергетический выигрыш до 5 дБ. Применение кода Хемминга с модуляцией 8ASK дает энергетический выигрыш по отношению к сигналу без кодирования  $\approx 2$  дБ при  $BER = 10^{-5}$ . Получаемый за счет реализации в модемном оборудовании эффективных процедур помехоустойчивого кодирования энергетический выигрыш при построении скрытых радиолиний может быть направлен на снижение мощности передающих

средств при сохранении заданного качества связи.

#### Повышение энергетической скрытности радиолиний при работе с ЛЧМ-сигналами

По сравнению с вышерассмотренными традиционными цифровыми модуляторами переход к линейно-частотно модулированным сигналам позволяет еще более повысить отношение сигнал/шум ( $S/N$ ) на входе приемника.

Так, при приеме ЛЧМ-сигналов с использованием согласованного оптимального фильтра получим перед детектором сжатие ЛЧМ-импульсов с коэффициентом:  $K_{сж} = B/2$ , где  $B = \Delta f \cdot T_b = G$  – база сигнала. При этом выходной сигнал будет по форме повторять автокорреляционную функцию ЛЧМ-импульса.

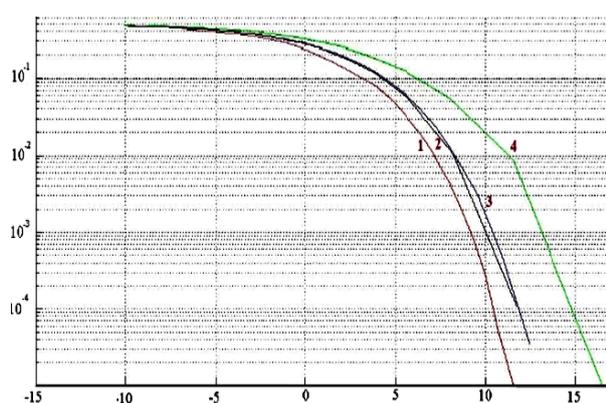
При больших базах ЛЧМ-импульсы многократно сжимаются, резко возрастая на фоне белого шума. Поэтому отношение сигнал/шум может быть уменьшено на порядки:

$$S/N = (E_b/N_0)/B.$$

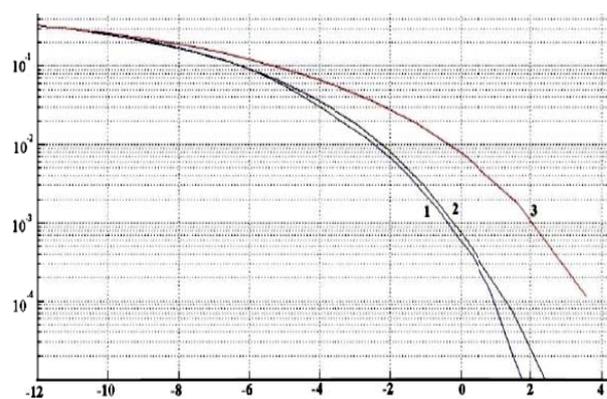
Так, в работе [26] проведено сравнение помехоустойчивости двоичных сигналов с FSK-модуляцией и с ЛЧМ-модуляцией стандарта LORA в АБГШ-канале, выполненное методами моделирования в Matlab без использования помехоустойчивых кодеров. Для соотнесения с

вышеприведенными рисунками повторим на рис. 3 полученные в указанной статье результаты. На рис. 3, а для модуляции FSK с девиацией частоты между двумя гармониками 5 кГц графики функций соответствуют в (3): 1 –  $R_b = 1,2$  кбит/с,  $\Delta f = 10$  кГц; 2 –  $R_b = 4,8$  кбит/с,  $\Delta f = 10$  кГц; 3 –  $R_b = 38,4$  кбит/с,  $\Delta f = 40$  кГц; 4 –  $R_b = 38,4$  кбит/с,  $\Delta f = 20$  кГц. А на рис. 3, б для двоичной модуляции ЛЧМ: 1 –  $R_b = 680$

бит/с,  $\Delta f = 10$  кГц; 2 –  $R_b = 5,5$  кбит/с,  $\Delta f = 80$  кГц; 3 –  $R_b = 5,5$  кбит/с,  $\Delta f = 50$  кГц. Эти и другие результаты сравнения в условиях дополнительных помех показали, что даже при отсутствии помехоустойчивых кодеров применение технологии LORA позволяет повысить помехоустойчивость на 12–14 дБ за счет уменьшения скорости передачи двоичной информации.



а



б

Рис. 3. Зависимости BER от  $(E_b / N_0)$  для FSK- (а) и ЛЧМ-сигналов (б)

В свою очередь, в работе [27] отмечается, что для модема LORA на совмещенном GMSR-канале (с использованием дополнительной Гауссовой фильтрации) имеется возможность принимать и демодулировать двоичные ЛЧМ-сигналы на 19,5 дБ ниже уровня помех или шумов.

**Анализ эффективности СКК с ЛЧМ-сигналами для обеспечения помехоустойчивости скрытых радиоканалов**

Сначала кратко отметим особенности построения СКК с нелинейно-частотно модулированными сигналами. В их первом каскаде могут применяться сигналы с разными объемами ансамбля (например, при объеме ансамбля  $16 = 2^4$  одной элементарной посылкой ЛЧМ будет происходить кодирование 4 бит информации). При этом внешний код Рида – Соломона должен быть согласован с мощностью используемого ансамбля сигналов. Так как наибольшая исправляющая способность достигается, когда сообщение передается одним кодовым словом, то необходимо стремиться к согласованию длины кодового слова с объемами передаваемой информации.

При передаче данных блочным кодом часто целесообразно выбирать длину кодового слова, равную длине целого файла. В случаях слишком большой длины (когда объем файла может дос-

тигать нескольких кбайт) длину кодового слова следует выбирать исходя из опыта разработки подобных систем. При этом длина пакета может ограничиваться технически, либо возможностями применяемого кода, либо сложностью реализуемого декодера. Жестких требований к длине информационного пакета не предъявляется. На практике объем «короткого» пакета часто выбирают в 136 байт.

В процессе моделирования ЛЧМ-сигналов в каналах без замираний с кодерами Рида – Соломона (РС) для обеспечения вероятности ошибки  $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$  была установлена компромиссная эффективная кодовая скорость  $2/3$  для устойчивой работы радиолиний с пониженной энергетикой (то есть кодовое слово на  $2/3$  должно состоять из информационных символов и на  $1/3$  – из проверочных). Ее уменьшение слабо улучшало исправляющую возможность кода по сравнению с удлинением времени передачи. А ее увеличение, в свою очередь, оставляло возможности уменьшения энергетики радиолинии.

Для  $\nu_{\text{код}} = 2/3$  были проведены расчеты мощности ансамблей  $N$  ЛЧМ-сигналов, информационной емкости символов  $V_E$ , относительной скорости  $\nu_{\text{отн}} = \frac{V_E}{N}$ , а также предложены конкретные РС-коды и соответствующие значе-

ния объема  $V_{к.с}$  кодового слова. Полученные результаты показаны в табл. 3.

**Таблица 3. Характеристики ЛЧМ-сигналов с РС-кодами**

$N$	$V_{к.с}$ , бит	$\nu_{отн}$	Оптимальные коды	$V_{к.с}$ , бит
16	4	0,25	PC(31,21)	105
32	5	0,156	PC(63,43)	258
64	6	0,094	PC(127,85)	595
128	7	0,055	PC(255,171)	1368
256	8	0,031	PC(511,343)	3087

Видно, что с увеличением числа составляющих  $N$  достаточно быстро возрастает объем полезной информации, содержащейся в кодовом слове. Однако при этом  $\nu_{отн}$  снижается, что в целях достижения заданных информационных скоростей приводит к необходимости расширения полосы частот и, соответственно, к расточительному использованию частотного ресурса. Выбор ЛЧМ-16 обеспечивает возможность передачи пакетов объемом свыше 1 кбайт с помощью одного кодового слова.

Сигналы ЛЧМ-32, 64, 128, 256 также обеспечивают эффективную передачу пакетов указанного объема, поскольку коды РС допускают укорочение. Однако эти сигналы требуют избыточного частотного ресурса.

В результате, при выбранных исходных данных можно рекомендовать использовать СКК на базе ЛЧМ-16 и PC(255,171) GF2<sup>8</sup>. При этом кодовая скорость помехоустойчивого кодера из-за реализационных аспектов может корректироваться в сторону увеличения. Это упростит реализацию декодера и не приведет к ощутимым энергетическим потерям, так как проведенное моделирование показало, что график требуемого отношения сигнал/шум вблизи оптимума является «плоским».

### Заключение

В итоге можно утверждать, что высокая энергетическая скрытность радиолиний будет обеспечиваться методами комбинированного применения ЛЧМ-сигналов с помехоустойчивым кодированием, позволяя работать с малыми уровнями сигналов на входе приемника.

Также отметим, что проведенный анализ был выполнен для идеализированных АБГШ-каналов радиосвязи с равномерным распределением спектральной плотности шума. В то же время практические исследования реальной электромагнитной обстановки часто показывают ее нестационарность, достаточно быструю временную изменчивость частотного распределения помех, а также наличие частотных поло-

сок пониженной зашумленности с некоторым временем заморозки их положения на частотной оси. Для таких условий в общем случае также можно использовать результаты проведенного анализа, однако оценку уровня шума в (1)  $N = N_0 \cdot \Delta f$  следует выполнять уже через интегрирование по частотной полосе. При этом визуально наблюдаемое возмущение спектра сигнала при работающей радиолинии станет еще менее заметным на фоне более сильно выраженных шумовых частотных полос.

### Библиографические ссылки

1. Чипига А. Ф., Сенокосова А. В. Способ обеспечения энергетической скрытности спутниковой связи // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 5. С. 428–433.
2. Мальцев Г. Н. Помехоустойчивость и скрытность передачи информации по радиоканалам на основе комбинированного случайного кодирования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2. С. 82–89.
3. Пашищев В. П., Чипига А. Ф., Анзин И. В. Энергетическая скрытность низкоорбитальной системы спутниковой связи при произвольном удалении приемника радиоперехвата // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 122–135.
4. Бабинцев Е. С., Лянгузов К. А. Структурная скрытность сложного сигнала с ППРЧ // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 3. С. 57–58.
5. Кальянов Э. В. Скрытая передача информации при использовании запаздывания для выделения полезного сигнала из маскирующих колебаний // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 6. С. 56–62.
6. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. М. : МИЭТ, 2007. 432 с.
7. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы : справочник / под. ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. М. : Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.
8. Морелос-Сарагоса. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Техносфера, 2005. 320 с.
9. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. Одесса : Фенікс, 2009. 180 с.
10. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 372 с. ISBN 978-5-9912-0305-0.
11. Шумоподобные сигналы (анализ, синтез, обработка) / В. Е. Гантмахер, Н. Е. Быстров, Д. В. Чеботарев. СПб. : Наука и техника, 2005. 396 с.
12. Аронов Д. А. Оценка вероятности ошибки на бит передаваемой информации при наличии шума и модулированной помехи // Электросвязь. 2007. № 11. С. 56–59.
13. Анпилогов В. Р., Тырин П. Н., Эйбус А. Г. Характерные особенности развития спутниковой связи

и вещания // Технологии и средства связи. 2014. № 6-2, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2015». С. 36–41.

14. Гурьянов И. О. Когнитивное радио: Новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий // Электросвязь. 2012. № 8. С. 5–8.

15. Мирошникова Н. Е. Обзор систем когнитивного радио // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 108–111.

16. Локишин Б. А. Негестационные системы фиксированной спутниковой связи – состояние и перспективы развития // Электросвязь. 2018. № 2. С. 30–39.

17. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / под ред. М. А. Быховского. М. : Эко-Трендз, 2006. 376 с.

18. Тутьгин В. С., Южаков А. В. Цифровая обработка спутниковых ЛЧМ-сигналов в реальном времени средствами ПЛИС XILINX // Научно-технические ведомости СПбГПУ 6 – 1 '2011. С. 32–39.

19. Елагина К. А. Способы обнаружения сигналов с линейной и нелинейной частотной модуляцией со стабилизацией вероятности ложной тревоги // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 20–25.

20. Аксельрод Г. З., Елагина К. А. Применение сигнала с нелинейной частотной модуляцией для уменьшения потерь обнаружения // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 2. С. 40–43.

21. Кандырин Н. П. Формирование широкополосных ЛЧМ-сигналов методом прямого цифрового синтеза и перенос их в диапазон СВЧ. Часть 1. Формирование прецизионных ЛЧМ-сигналов DDS-синтезаторами // Системы обработки информации. 2016. Вып. 3. С. 64–68.

22. Тутьгин В. С., Шведов С. В., Южаков А. В. Новые адаптивные алгоритмы обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1.

23. Шведов С. В. Способ компенсации стационарных помех при обработке ЛЧМ-сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ 6 – 1 '2011. С. 215–219.

24. Буйлов Е. Н., Горшков С. А. Методика выбора параметров устройства корреляционно-фильтровой обработки широкополосного линейно-частотно-модулированного сигнала // Доклады БГУИР. 2019. № 5 (123). С. 101–107.

25. Шарипов Т. А., Шишаков К. В. Исследование эффективности сигнально-кодовых конструкций для настройки когнитивной радиосистемы // Вестник ИжГТУ. 2019. Т. 22. № 3. С. 63–71.

26. Бонч-Бруевич А. М., Кашиур Е. И. Исследование перспективных технологий цифровой модуляции в системах охранно-пожарной сигнализации // Молодежный научно-технический вестник : электронный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. Эл. No ФС77-51038, ISSN 2307-0609. 10 с. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/799518.html>.

27. Верхулевский К. Технология LoRa в вопросах и ответах // Беспроводные технологии. 2016. № 1. С. 18–22.

## References

1. Chipiga A.F., Senokosova A.V. [Way to ensure the energy stealth of satellite communications]. Space research. 2009. Vol. 47, no. 5, pp. 428-433 (in Russ.).

2. Maltsev G.N. [Interference and stealth of information transmission on radio channels based on combined random coding]. Information and Control Systems, 2015, no. 2, pp. 82-89 (in Russ.).

3. Pashintsev V.P., Chipiga A.F., Anzin I.V. [Energy stealth of the low-orbit satellite communication system at the arbitrary removal of the radio interception receiver]. Control, Communication and Security Systems. 2018. No. 4. Pp. 122-135 (in Russ.).

4. Babintsev E.S., Lianguzov K.A. [Structural stealth of a complex signal with PPR]. Vestnic of The Izhevsk State Technical University. 2007. No 3. Pp. 57-58 (in Russ.).

5. Kalyanov E.V. [Hidden transmission of information when using lag to highlight a useful signal from masking vibrations]. Letters to UTF. 2009. Vol. 35, no. 6. Pp. 56-62 (in Russ.).

6. Galkin V.A. *Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz'* [Digital Mobile Radio]. Moscow, MIET, 2007. 432 p. (in Russ.).

7. Goldarev V.V., Ovechkin G.V. *Pomekhoustoichivoe kodirovanie. Metody i algoritmy : spravochnik* [Interference-resistant coding. Methods and Algorithms: Handbook]. Moscow, Hotline-Telecom, 2004. 126 p (in Russ.).

8. Morelos-Saragoza. *Iskustvo pomekhoustoichivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye* [The art of interference-resistant coding. Methods, algorithms, application]. Moscow. Technosphere, 2005. 320 p. (in Russ.).

9. Banquet V.L. *Signal'no-kodovye konstruksii v telekommunikatsionnykh sistemakh* [Signal-code designs in telecommunications systems]. Odessa: Fenix, 2009. 180 p. (in Russ.).

10. Galkin V.A. *Osnovy programmno-konfiguriruemogo radio* [Basics of Software-configurable radio]. Moscow, Hotline - Telecom, 2015. 372 p. ISBN 978-5-9912-0305-0 (in Russ.).

11. Gantmacher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. *Shumopodobnye signaly (analiz, sintez, obrabotka)* [Noise-like signals (analysis, synthesis, processing)]. St. Petersburg : Science and Technology, 2005. 396 p. (in Russ.).

12. Arons D.A. [Assess the probability of error on a bit of transmitted information in the presence of noise and modulated interference]. Telecommunications. 2007. No. 11. Pp. 56-59 (in Russ.).

13. Anpilogists V.R., Tyrin P.N., Eidus A.G. Characteristic features of the development of satellite communication and broadcasting // Technology and means of communication. – 2014. no. 6-2, special issue "Satellite Communications and Broadcasting - 2015." Pp. 36-41 (in Russ.).

14. Guryanov I.O. Cognitive Radio: New approaches to providing radio-frequency resource of promising radio technologies. Telecommunication, 2012, no 8. pp. 5-8 (in Russ.).

15. Miroshnikova N.E. [Review of Cognitive Radio Systems]. T-Comm - Telecommunications and Transport. 2013. No. 9. Pp. 108-111 (in Russ.).

16. Lokshyn B.A. [Non-state fixed satellite communication systems - state and development prospects]. Telecommunication. 2018. No. 2. Pp. 30-39 (in Russ.).
17. *Upravlenie radiochastotnym spektrom i elektromagnitnaya sovместimost' radiosistem* [Radio frequency spectrum control and electromagnetic compatibility of radio systems]. Under ed. M.A.Bykhovskiy. Moscow, Eco Trends, 2006. 376 p. (in Russ.).
18. Tuchigin V.S., Yuzhakov A.V. [Digital processing of satellite HFM signals in real time by PLIS XILINX]. Scientific and technical statements of SPBGPU 6 - 1 2011. Pp. 32-39 (in Russ.).
19. Elagina K.A. [Ways to detect signals with linear and non-linear frequency modulation with stabilization of the probability of false alarm]. Digital Signal Processing. 2016. No. 2. Pp. 20-25 (in Russ.).
20. Axelrod G.S., Elagina K.A. [Application of a signal with nonlineary frequency modulation to reduce detection losses]. Izvestia of RUSSIA universities. Radio electronics. 2015. Vol. 2. Pp. 40-43 (in Russ.).
21. Kandyrin N.P. [Formation of broadband PMD signals by direct digital synthesis and transfer them to the microwave range. Part 1. Formation of precision PM signals by DDS synthesizers]. Information processing systems, Kharkiv. 2016. Issue 3. Pp. 64-68 (in Russ.).
22. Tuchigin V.S., Shvedov S.V., Yuzhakov A.V. [New adaptive algorithms for detecting and determining the parameters of PMD signals]. Digital signal processing. 2011. No. 1 (in Russ.).
23. Swedes S.V. Method of compensation of station interference in the processing of PMD signals. Scientific and technical statements of SPBGPU 6 – 1, 2011, pp. 215-219 (in Russ.).
24. Builov E.N., Gorshkov S.A. [Method of choosing parameters of the device correlation-filter processing of broadband linear-frequency-modulate signal]. Reports BGUIR, 2019, no. 5 (123), pp. 101-107 (in Russ.).
25. Sharipov T.A., Shishakov K.V. [Study of the effectiveness of signal-code designs to adjust the cognitive radio system]. Vestnic IzhGTU. 2019. Vol. 22, no. 3. Pp. 63-71 (in Russ.).
26. Bonch-Bruevich A.M., Kashpur E.I. [Study of advanced digital modulation technologies in fire alarm systems]. Electronic journal "Youth Science and Technology Gazette"; MGTU by N.E. Bauman. Al. No FS77-51038, ISSN 2307-0609. 10 p. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/799518.html> (in Russ.).
27. Verhulevsky K. [LoRa Technology in questions and answers]. Wireless. 2016. No 1. Pp. 18-22 (in Russ.).

\*\*\*

### Analysis of Signal-Code Structures in the Tasks of Increasing the Energy Stealth of Radios

A. N. Kichenko, Applicant, Moscow, Russia

A. V. Saveliev, DSc in Engineering, Professor, Sarapul Radio Plant OJSC, Russia

K. V. Shishakov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper is devoted to analyzing signal-code structures for the tasks of increasing the energy stealth of radios, including the study of digital modems and jamming coders. The main criterion of the energy efficiency is the ratio of signal power to noise power after the signal's compression on the receiver detector at a given ratio in the communication channel and the required probability of the error per bit for the received signal.*

*It is substantiated that among the digital modems' signals, the greatest energy stealth in a noisy electromagnetic environment is obtained by broadband linearly modulated signals. For this purpose, they are compared with traditionally modulated signals and with phase-manipulated broadband signals.*

*A study of the impact of jam-resistant coders on radios' energy efficiency was conducted to provide efficient radio communication in conditions of the maximum reduction of signal power compared to radio channel noise. First, calculations were made for signal-code structures formed by different combinations of digital modulators' typical variants and jam-resistant coders. The digital modulators list includes PAM, ASK, PSK, QAM, FSK, MSK with varying degrees of multiposition. Codes BCH, Reed-Solomon, Goley, convolution, Hemming were selected among the jamming codes. The effectiveness of their different combinations was studied at the National Instruments stand by SDR technology using ready-made routines for modulators and jam-resistant coders implemented in LabView.*

*Separately, to ensure the increased jam-resistance of stealthy radio channels, the analysis and selection of parameters of signal-code structures efficiency based on linearly modulated signals were made. It is shown that the highest energy stealth of radio lines will be provided by methods of combined application of linearly modulated signals with Reed-Solomon jam-resistant coders.*

**Keywords:** modulation, jam-resistant coding, PMD signals, signal-code structures, energy stealth of radios.

Получено: 06.11.2020