

УДК 621.37

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-47-62

Современные решения по повышению энергоэффективности радиолиний для технического обновления радиостанций интегрированных систем связи***А. С. Батури**н, главный конструктор ОА «Сарапульский радиозавод», Сарапул, Россия**В. В. Хворенков**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия**К. В. Шишаков**, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассмотрены перспективные задачи по совершенствованию радиоаппаратуры с повышенной энергоэффективностью, относящиеся к углубленной предварительной проработке и исследованию эффективности с помощью стенда главного конструктора.

Сначала приведен теоретический факторный анализ энергетической эффективности радиотерминалов для помех, относительно равномерно распределенных по спектру. Рассмотрена задача выбора варианта цифровой модуляции и параметров помехоустойчивого кода из условия получения наименьшей энергии для передачи одного бита информации при заданной вероятности ошибки на бит и уровне спектральной плотности шума.

Применительно к широкополосным сигналам выделены энергоэффективные линейно-частотно-модулированные сигналы. В случае узкополосных сигналов рассмотрены когнитивные технологии повышения энергоэффективности для радиотрактов с частично заполненным спектром, настраивающие радиолинии на «окна наилучшей прозрачности» спектра. Отмечена их важность для УКВ-радиолиний и КВ-радиосистем с настройкой на оптимальную частоту путем регулярного зондирования ионосферы.

Рассмотрены особенности построения сетей когнитивного радио для повышения энергоэффективности радиосредств.

Обсуждаются пути построения алгоритмов энергоэффективной настройки модема и помехоустойчивого кодера на условия заданной радиолинии для отработки в стенде главного конструктора.

Сформулированы направления приоритетных задач по совершенствованию радиоаппаратуры с повышенной энергоэффективностью. Выделены насыщенные конкретные подзадачи для проработки на стенде главного конструктора.

Ключевые слова: радиотерминал, энергоэффективность, стенд главного конструктора, модуляция сигнала, помехоустойчивое кодирование, когнитивные радиосистемы, программно определяемое радио, сигнально-кодовые конструкции.

Введение

В современных условиях большую актуальность и интенсивность приобретают вопросы технического обновления радиостанций для использования в интегрированных системах связи новых поколений [1–3]. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию профессиональной нагрузки на главных конструкторов таких радиосредств не только по объему работ, но и по скорости их выполнения. Чтобы успевать за новыми идеями и тенденциями в технологических процессах совершенствования и развития радиотерминалов, приходится внедрять модульный принцип их проектирования, опирающийся на эффективное

использование технически отработанных решений в новой системной увязке, а также осваивать использование методов искусственного интеллекта для решения таких задач. При этом параллельно с изготовлением новых радиостанций становится важным создание их цифровых двойников, на которых выполняются предварительные проверки конструктивно и идейно новых решений [4]. В связи с этим задача технического обновления радиопродукции приобретает системный характер, так как требует параллельного сопровождения и совершенствования унифицированных так называемых стендов главного конструктора, являющихся по сути интеллектуальными помощ-

никами принятия быстрых управленческих решений [5, 6].

Приоритетность организации системных работ на таких стендах во многом определяется ранжированием выбранных критериев эффективности цифровых прообразов обновляемых радиосредств. В качестве примера основные критерии сетей 5G и новых сетей 6G показаны на рисунке 1 [7, 8]. Из рисунка видно, что для перспективных систем связи шестого поколения все большую актуальность приобретает проблема повышения энергоэффективности радиоаппаратуры. При этом приоритетность критерия спектральной эффективности заменяется на приоритетность критерия энергоэффективности. Это связано с тем, что возрастающие требования к увеличению объема и скорости вычислений приводят на практике к существенному увеличению интенсивности выделения тепловой энергии вычислителями, которая является потенциальной угрозой перегрева радиостанций. Основной причиной такого перегрева считается концентрация больших вычислительных ресурсов в малом объеме с учетом общей тенденции миниатюризации микросхем и кристаллов памяти.

Обеспечение достаточной энергетической эффективности радиоаппаратуры на практике во многом определяется правильной настройкой сигнально-кодовых конструкций (СКК) на внешние условия на радиотрассах [9–11]. В минимально анализируемом составе рассматриваются СКК, состоящие из двух компонент, – из взаимодополняющей комбинации модуляции сигнала и кодирования канала (помехоустойчивого кодирования). Оба эти устройства (модем и кодер) обычно позволяют найти резервы уменьшения энергии радиосигнала при сохранении заданной вероятности ошибки на бит ($BER = P_{\text{ош}}$ – количество ошибочно принятых битов в потоке / общее количество бит в потоке). Заметим, что для проведения более тонкого анализа к ним еще следует добавить формирующие фильтры модуляторов, а также при необходимости и другие элементы трактов радиотерминалов.

При разработке режимов настройки СКК важно иметь в виду, что перенастройка кодера канала выполняется проще – через смену алгоритма цифровой обработки сигналов в процессоре. В то же время быстрая перенастройка модема потребует расширенного участия аналого-цифровых преобразователей и сопутствующих фильтров, что реализовано в специальных технологиях программно определяемого радио (SDR = Software Defined Radio) [12, 13]. В на-

стоящее время технологии SDR представлены на рынке радиосредств готовыми радиоплатформами для использования в разрабатываемой радиоаппаратуре.

При этом практическая реализация выявленных перспективных механизмов повышения энергоэффективности радиолиний для технического обновления радиостанций интегрированных систем связи может потребовать расширения областей использования технологий когнитивного радио (CRS) [14–16]. Так, технологии когнитивного радио привлекают всё возрастающее внимание разработчиков по причине новых открывающихся возможностей по адаптивной настройке систем радиообмена на текущие условия эксплуатации [17–19]. Причем их рассмотрение в современных условиях неразрывно связано с технологиями SDR.

Также заметим, что задача повышения энергоэффективности радиолиний во многом перекликается с задачей повышения энергетической скрытности радиолиний [20], что позволяет шире рассматривать получаемые результаты.

В рамках поиска путей решения проблемы повышения энергоэффективности радиоэлектронной аппаратуры шестого поколения в рамках единой политики формирования универсальной программно-аппаратной платформы синтеза объектно ориентированных радиосистем с настройкой на топологические ограничения и условия эксплуатации, внедрение интеллектуальной подстройки сигнально-кодовых конструкций также становится всё более актуальной практической задачей [21–23].

Для более глубокого ознакомления с перечисленными технологиями отметим некоторые более ранние основополагающие технические работы и важные статьи по указанным направлениям: Морелос-Сарагоса. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Техносфера, 2005. 320 с.; Fuqin Xiong. Digital modulation techniques. Second edition. Artech House Telecommunications Library, Artech House, 2006, 1039 p.; Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. М. : МИЭТ, 2007. 432 с.; Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. Одесса : Фенікс, 2009. 180 с.; Китчер Э., Ланцов В. Н. Программная реализация когнитивной радиосистемы на SDR-платформе GNU Radio // Проектирование и технология электронных средств. 2013. С. 44–46.; Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 372 с. ISBN 978-5-9912-0305-0; Мирошникова Н.Е. Обзор систем

когнитивного радио // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 9. С. 108–111; SDR-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиоприемах / П.А. Будко [и др.]. // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2013. № 1. С. 34–38; Прокураков В. Когнитивные радиосистемы в сетях тактического назначения // Электронные компоненты. 2014. № 3. С. 36–38; Когнитивные

сверхширокополосные радиосистемы как метод повышения эффективности использования радиочастотного спектра. Т. П. Косичкина [и др.] // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 12. С. 37–43; SDR-радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот / Ю. Л. Николашин [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. № 1. С. 20–31.



a



b

Рис. 1. Основные приоритеты радиоаппаратуры 5G (a) и 6G (b)

Fig. 1. Main priorities of 5G (a) and 6G (b) radio equipment

Целью настоящей статьи является выделение, обсуждение и системно связанная формулировка перспективных задач по совершенствованию радиоаппаратуры с повышенной энергоэффективностью, предназначенных для углубленной предварительной проработки и исследования эффективности проектируемых радиосредств с использованием стенда главного конструктора.

Далее последовательно рассмотрим перспективные возможности для повышения энергоэффективности радиолиний в составе интегрированных систем радиосвязи при создании новых образцов востребованных в настоящее время радиосредств с использованием стенда главного конструктора.

Теоретический факторный анализ энергетической эффективности радиотерминалов для помех, равномерно распределенных по спектру

Для оценки энергоэффективности аналоговых систем модуляции обычно используют отношение сигнал/шум (S/N) на входе приемника. В свою очередь, для цифровых систем модуляции принято дополнительно учитывать временную длительность T_b бита:

$$S/N = (S \cdot T_b) / (N \cdot T_b) \approx E_b / N_0,$$

где $E_b = S \cdot T_b$ – энергия на бит принимаемой информации; $R_b = 1 / T_b$ – битовая скорость передачи информации; S – мощность принятого сигнала; N – шум на входе приемника; N_0 – его

спектральная плотность ($N = N_0 \cdot \Delta f$); $\Delta f \approx 1 / T_b$ – ширина спектра радиоимпульса (полоса частот пропускания приемника с учетом формирующего фильтра).

При этом шум на входе приемника обычно складывается из теплового шума приемника и из помех от параллельно работающих радиостанций. Мощность принятого сигнала зависит от следующих факторов:

$$S = P_0 G_{TX} G_{RX} K_{\text{пот}},$$

где P_0 – выходная мощность передатчика; G_{TX} – коэффициент усиления передающей антенны; G_{RX} – коэффициент усиления приемной антенны; $K_{\text{пот}}$ – коэффициент передачи канала связи (характеризует суммарные потери на трассе и в тракте).

Таким образом, для цифровых систем модуляции важным критерием энергетической эффективности становится отношение (E_b / N_0). Его граничная величина, обеспечивающая уверенный прием цифровой информации, зависит от типа детектора. Так, в теории цифровой связи для разных вариантов идеальных модуляторов известны зависимости $BER_M = f_M(E_b / N_0)$ вероятности ошибки на бит (BER), показанные на рисунке 2. Такие функции характеризуются высокой крутизной. На рисунке: $Q(x)$ – функция интеграла ошибок; M – число позиций для многопозиционных видов модуляции; m – индекс модуляции для частотной модуляции; нижний индекс M показывает отношение к модему.

OOK	$Q(\sqrt{E_b / N_0})$	М-PSK код Грея	$\frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \log_2 M}{N_0} \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right)$
М-ASK код Грея	$\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{\log_2 M E_b}{(M-1)^2 N_0}}\right)$	FSK	$Q\left(\sqrt{\left[1 - \frac{\sin(2\pi \cdot m)}{2\pi \cdot m}\right] \frac{E_b}{N_0}}\right)$
BPSK	$Q(\sqrt{2E_b / N_0})$	MSK	$Q(\sqrt{E_b / N_0})$
Некогерентная DBPSK	$\frac{1}{2} \exp(-E_b / N_0)$	М-MSK	$\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left\{\sqrt{\log_2 M \frac{E_b}{N_0}}\right\}$
Когерентная DBPSK	$2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right]$	QAM код Грея	для $k = \log_2 M$, k – четное: $BER = \frac{2P_0 - P_0^2}{\log_2 M}$, где $P_0 = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{M-1 N_0}}\right)$
QPSK код Грея	$Q(\sqrt{2E_b / N_0})$		для нечетных k : $BER \leq \frac{1}{\log_2 M} \left[1 - \left(1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{M-1 N_0}}\right)\right)^2\right]$
Когерентная DQPSK при $E_b / N_0 \gg 1$	$2Q(\sqrt{2E_b / N_0})$		

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

Рис. 2. Функции $BER = f_M(E_b/N_0)$ для разных вариантов модуляции

Fig. 2. Functions $BER = f_M(E_b/N_0)$ for different modulation options

При необходимости более подробно об этих зависимостях можно узнать в следующих работах: Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. М. : Вильямс, 2003. 1104 с.; Выбор оптимального метода модуляции в современных цифровых системах радиосвязи. Моделирование в среде AWR DESIGN ENVIRONMENT. Практикум физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. 2008. 52 с. и др.

Однако данные результаты не отменяют необходимости имитационного моделирования «циф-

ровых двойников» рассматриваемых систем, которое обычно включает в себя учет множества дополнительных факторов и параметров (относящихся, в том числе, к фильтрам и конкретной аппаратной реализации радиотерминала). В качестве примера в таблице 1 приведем вариант расчета по влиянию выбора модулятора на энергоэффективность (см. статью «Исследование эффективности сигнально-кодовых конструкций для настройки когнитивной радиосистемы» (Шарипов Т. А., Шишаков К. В. Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–71)).

Таблица 1. Зависимости BER от отношения E_b / N_0 для разных модуляторов (без помехоустойчивого кодирования)

Table 1. BER dependencies on ratio E_b / N_0 for different modulators (without noise-tolerant coding)

2PSK							
E_b / N_0 , дБ	5	6,6	8,2	9	9,8	10,6	11,4
BER	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	0
4PSK							
E_b / N_0 , дБ	0	2,5	5	7,5	10	11	12,5
BER	$9,83 \cdot 10^{-2}$	$4,34 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-5}$	$8,93 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
8PSK							
E_b / N_0 , дБ	5	9	11	12	13	14	15
BER	$3,43 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
4QAM							
E_b / N_0 , дБ	5	7	9	10	11	12	12,5
BER	$8,31 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$	$3,36 \cdot 10^{-7}$	0
8QAM							
E_b / N_0 , дБ	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14
BER	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
16QAM							
E_b / N_0 , дБ	8	10	11	13	14	15,5	16
BER	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
MSK							
E_b / N_0 , дБ	8	11	13	14	15	16	17
BER	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$9,39 \cdot 10^{-7}$	0
2FSK							
E_b / N_0 , дБ	8	11	12,5	14	15,5	17	18,5
BER	$8,59 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$9,57 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-6}$	0
4FSK							
E_b / N_0 , дБ	8	10	13	14	15	16	17
BER	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$5,96 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-5}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$3,34 \cdot 10^{-6}$	0

В таблице использованы традиционные сокращения: PSK (Phase Shift Keying) – фазовая модуляция; QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудно-фазовая модуляция; MSK (Minimum Shift Keying) – частотная модуляция минимального фазового сдвига; FSK (Frequency Minimum Shift Keying) – частотная манипуляция (модуляция с разрывной фазой). При этом модуляторы 4PSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK по отношению к бинарной фазовой модуляции 2PSK могут давать увеличение скорости передачи в 2, 3, 4 и 5 раз, а модуляторы

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

С целью обеспечения наилучшего соответствия реальным SDR-радиотерминалам приведенные в таблице результаты были получены на специальном стенде на платформе *National Instruments* – NIPXIe-7966R с модулем NI 5791R. При этом формирование передаваемого сигнала, его модуляция, кодирование, а также настройка приемопередающего оборудования осуществлялись в среде разработки *LabVIEW* с использованием стандартных программных модулей моде-

мов и кодеров. Для уменьшения числа эксплуатационных факторов антенно-фидерные устройства были исключены из стенда. А передатчик и приемник соединялись напрямую через коаксиальный кабель. Схемы моделирования исследуемых цифровых систем радиосвязи также были построены с использованием типовых процедур в среде *LabVIEW*.

В таблице вероятность битовой ошибки BER вычислялась как среднее значение для 100 попыток при передаче по 10000 бит, а уровень помех характеризовался отношением энергии E_b/N_0 . Тип канала связи описывался моделью канала с аддитивным белым гауссовым шумом.

Дополнительное уменьшение вероятности ошибки на практике обеспечивается применением помехоустойчивого кодера: $BER_{СКК} = f_k(BER_M)$. При этом крутизна таких графиков еще более возрастет. Причем для малых BER_M исправление редких одиночных ошибок после модулятора выполняется теоретически идеально. Однако при реальном моделировании ошибки $BER_{СКК}$ все же могут наблюдаться из-за имеющейся вероятности необнаруженных ошибок в кодере, а также из-за возможного присутствия групповых ошибок.

Также следует учитывать, что при введении в систему кодера канала результирующая информационная скорость для каждой рассматриваемой СКК будет несколько уменьшаться (на коэффициент k/n): $C_{СКК} = R \cdot \log_2 M \cdot (k/n)$, где $C_{СКК}$ – информационная скорость (бит/с); R – техническая скорость (бод); M – размерность сигнала; k – количество информационных бит в кодовых словах (блоках); n – количество бит кодовых слов.

В современной технической литературе проведено множество исследований по влиянию выбора СКК на величину BER. С такими результатами для идеальных моделей можно ознакомиться, например, в работах: Песков С. П., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи, <http://www.telesputnik.ru/archive/pdf/18IZ70.pdf>; Comtech EF Data. Satellite Modem with Optional IP Module Installation and Operation Manual For Firmware Version 1.6.15 or higher. Part Number MN/CDM570L.IOM, Revision 12, <http://www.comtechefdata.com/files/manuals/mn-modems-pdr/mn-cdm570-570L.pdf> и др. [24–26].

Таким образом, на практике повышение энергетической эффективности связано с выбором варианта цифровой модуляции и параметров помехоустойчивого кода из условия дости-

жения наименьшей энергии для передачи одного бита информации E_b при заданной вероятности ошибки на бит BER и уровне спектральной плотности шума N_0 .

В случае помех, равномерно распределенных по спектру, высокий энергопотенциал имеют линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы. С особенностями их применения в системах связи можно познакомиться, в том числе, в статьях: Тутьгин В. С., Шведов С. В., Южаков А. В. Новые адаптивные алгоритмы обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1; Кандырин Н. П. Формирование широкополосных ЛЧМ сигналов методом прямого цифрового синтеза и перенос их в диапазон СВЧ. Ч. 1. Формирование прецизионных ЛЧМ-сигналов DDS синтезаторами // Системы обработки информации. 2016. Вып. 3. С. 64–68 и др.

В настоящее время в УКВ-диапазоне для передачи небольших пакетов данных ЛЧМ-сигналами с невысоким энергопотреблением разработан и широко применяется стандарт *LoRa*. Причем в статье Верхулевского К. «Технология LoRa в вопросах и ответах» (Беспроводные технологии. 2016. № 1. С. 18–22) 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.

Для ЛЧМ-сигналов в приведенных выше зависимостях длительность бита будет равна длительности ЛЧМ-радиоимпульса: $T_b = T_{ЛЧМ}$, а отношение (сигнал/шум) $S/N = (E_b/N_0)/B$ зависит от базы сигнала $B = \Delta f T_b$, которая выступает в роли коэффициента усиления G приемника:

$$E_b/N_0 = (S/N)G, \quad G = B = \Delta f T_b.$$

При приеме ЛЧМ-сигналов с использованием согласованного оптимального фильтра перед детектором происходит временное сжатие ЛЧМ-импульсов с коэффициентом $K_{сж} = \tau_{и} / \tau_{сж} = B/2$, где $\tau_{и} = T_b$ – исходная длительность импульса. При этом выходной сигнал будет по форме повторять автокорреляционную функцию ЛЧМ-импульса (Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Серия: Классика инженерной мысли: радиотехника. 2022. 528 с. ISBN 978-5-9519-2628-9).

Исходя из приведенных зависимостей, выделим основные факторы, представляющие интерес для повышения на практике энергетической эффективности радиотерминалов (рис. 3).

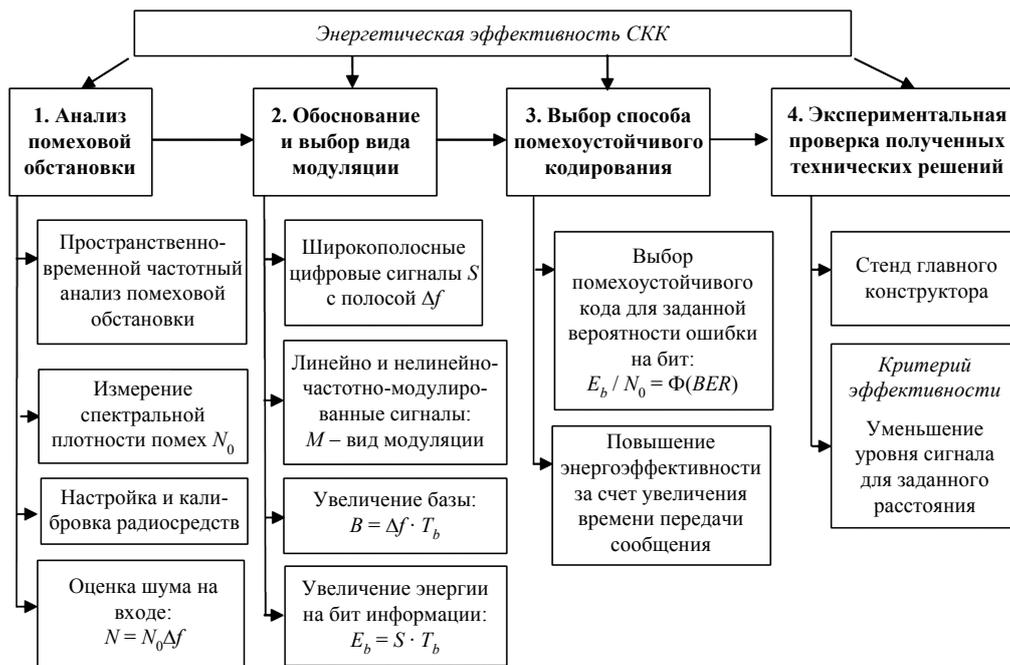


Рис. 3. Факторы, влияющие на энергетическую эффективность

Fig. 3. Factors affecting energy efficiency

Заметим, что в случае радиоканалов с неравномерным или пятнистым зашумлением спектра теоретический потенциал классических ЛЧМ-сигналов будет снижаться. В таких случаях перспективными могут стать ЛЧМ-сигналы, синтезируемые на незаполненном спектре и использующие для работы текущий набор прозрачных полосок спектра. Однако такие системы могут появиться только в рамках технологии когнитивного радио, которые в настоящее время получили свое развитие пока еще только для узкополосных сигналов.

О возможностях значительного понижения энергии радиосигнала указывается также в монографии В. Н. Тяпкина, Е. Н. Гарина «Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС» (Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2012. 260 с.). Так, в пункте 6.1.2 утверждается, что за счет сжатия широкополосного сигнала, а затем его накопления навигационные приемники могут сохранять свою работоспособность при работе на ненаправленную антенну, даже когда помеха превышает сигнал до 30 дБ.

Использование возможностей технологий когнитивного радио для повышения энергоэффективности радиотрактов с незаполненным спектром помех

Для встречающихся на практике случаев радиотрактов с незаполненным спектром большой

энергетический потенциал имеют узкополосные сигналы с настройкой на окна прозрачности спектра помех.

Заметим, что в настоящее время узкополосные сигналы широко применяются в зашумленных каналах. Особенно они доминируют в КВ-радиосистемах, так как разные частоты для горизонтальных радиолиний обычно имеют отличающиеся непредсказуемые коэффициенты отражения от ионосферы. Для ряда таких КВ-систем специально разработаны модули автоматического установления связи (ALE – Automatic Link Establishment) с целью выполнения рабочей настройки радиолинии на оптимальную частоту путем регулярного зондирования ионосферы [27, 28].

В качестве одного из примеров, показывающих важность разработки таких систем для УКВ-диапазона, приведем две мгновенные выборки спектрального распределения помеховой обстановки для низкоорбитального спутникового канала связи в полосе частот 230...280 МГц (рис. 4) (являются дополнительным материалом, полученным при работе над статьей [29]). На рисунке по вертикали отмечены уровни помех [дБВт], а по горизонтали – номера полосок (литеры) деления частотного диапазона 230...280 МГц. При этом продолжительные наблюдения за формой спектра показывали ее нестационарность. В данном случае заметные изменения формы имели постоянную времени

около 1 минуты, однако некоторые прозрачные области спектра сохраняли большую продолжительность времени заморозенности.

В целом для данного радиоканала в полосе спектра 230...280 МГц можно было выделить не менее 128 прозрачных частотных литеров из 4000, уровень шума на которых до 30 дБ оказы-

вался ниже по сравнению с максимально зашумленными литерами. Однако для работы на этих подвижных прозрачных литерах требуется создание специальной когнитивной системы радиобмена, самонастраивающейся на благоприятные частотные полосы с уровнем помех $\approx (-155)$ дБВт.

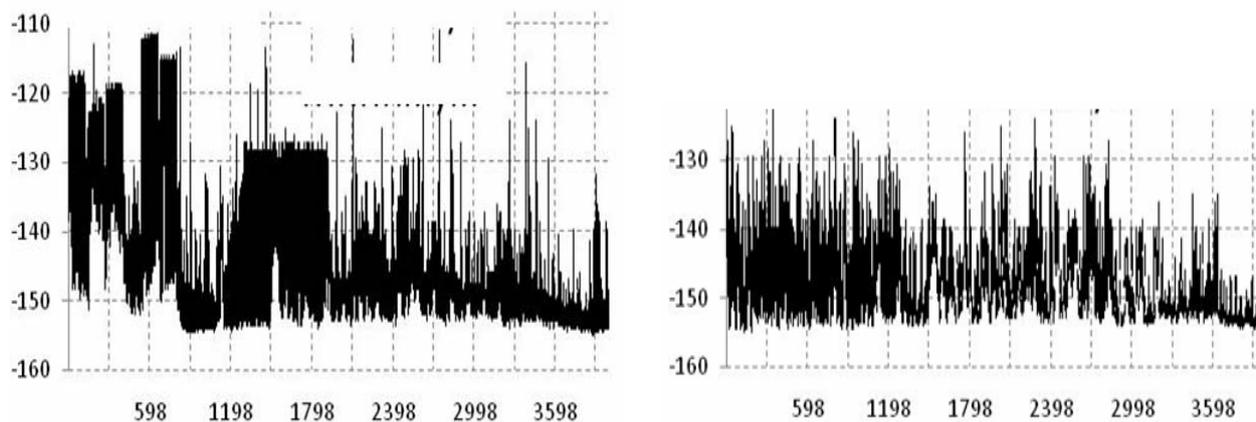


Рис. 4. Две выборки характерного спектрального распределения помех для спутникового канала связи в полосе частот 230...280 МГц

Fig. 4. Two samples of the characteristic spectral distribution of interference for the satellite communication channel in the frequency band 230...280 MHz

Таким образом, в случае пятнистого распределения спектра имеется потенциальная возможность многократно повысить энергоэффективность узкополосных радиолиний за счет внедрения перспективных технологий когнитивного радио, настраивающих радиолинии на окна наилучшей прозрачности спектра.

Кратко охарактеризуем радиосистемы такого типа. Когнитивная радиосистема (CR) согласно определению МСЭ в своей работе учитывает сведения об окружающей рабочей и географической средах, установившихся правилах и ее внутреннем состоянии. Ее внедрение строится на алгоритмах беспомехового вторичного использования спектра без предварительной конверсии частот. В настоящее время активно ведутся работы по построению систем широкополосного радиодоступа в диапазоне от 50 до 960 МГц с использованием технологии когнитивного радио и применением разработанного стандарта IEEE 802.22, в котором заложена возможность безлицензионного использования таких систем.

Разрабатываемые CR должны в динамическом режиме автономно подстраивать параметры работы и протоколы передачи с тем, чтобы достичь поставленной цели и одновременно учиться на основании полученного опыта. По-

этому их когнитивный цикл обычно состоит из следующих функций: Information Processing – обработка информации; Learning & Decisions – обучение и принятие решения; Execution – выполнение; Sensing & Observing – сбор сведений, измерения. К ним присоединены также Policies & Regulations – правила. В активном режиме когнитивные радиосистемы «прощупывают» окружающую радиобстановку и адаптируют параметры передачи в соответствии с результатами измерений. При этом среди методов измерения спектра выделяются: детектирование энергии, детектирование параметров, детектирование согласованных фильтров и др.

Для эффективной работы CR на практике абонентские станции желательно наделять следующими функциями: 1) осуществление мониторинга спектра с целью обнаружения неиспользуемых в данный момент времени диапазонов радиочастот (спектральных дыр) первичными пользователями (пользователями, закрепленными за данным диапазоном); 2) выполнение анализа параметров радиоканала, оценка канальной информации, предсказание состояния радиоканала; 3) осуществление в режиме реального времени динамического управления спектром с коррекцией значений своих операционных параметров (несущей частоты, вида модуляции,

излучаемой мощности); 4) предоставление вторичным пользователям (не закрепленным за данным частотным диапазоном) возможности использовать диапазоны первичных пользователей на время, в течение которого данный диапазон не используется первичным пользователем. Заметим, что отработка каждой из них является самостоятельной сложной технической задачей.

Аппаратная реализация систем когнитивного радио возможна только на технологиях SDR [31]. При этом базовые параметры их приемопередающего устройства определяются программным обеспечением, а не аппаратной конфигурацией. В таких системах вид модуляции передатчика управляется встраиваемым микроконтроллером. В приемниках для демодуляции сигнала также используются программные средства; основными компонентами становятся программируемые логические микросхемы ПЛИС и цифровые сигнальные процессоры DSP для обработки цифровых сигналов.

Решения по перенастройке рабочих характеристик CR принимаются по информации из окружающей радиосреды с помощью процессов зондирования, наблюдения и обучения. При этом разделяются варианты пассивного и активного анализа радиоэфира. В первом случае первичные пользователи самостоятельно предоставляют CR информацию о выделении/освобождении свободных частот. В нее могут входить: параметры мощности передатчика, геолокация, частота, модуляция, BER и др. В случае активного анализа предусматривается постоянный радиомониторинг в виде зондирования со стороны вторичных пользователей радиочастотного спектра (РЧС).

На практике CR обычно настраиваются на белые пятна РЧС или временно не используемые его участки. Из них наибольшее внимание привлекают телевизионные белые пятна, для которых применяются несколько алгоритмов для выбора свободной радиочастоты и работы с ней. Так, в алгоритме динамического выбора частоты (DFS – Dynamic Frequency Selection) радиотерминалы в случайном порядке выбирают свободный радиоканал в каждый период времени между приемом и передачей. Однако в нем средняя задержка случайного выбора частоты (RFS – Retention Frequency Selection) увеличена. В алгоритме снижения мощности излучения в пространстве (SB – Spatial Backoff) дополнительно настраивают уровень чувствительности приемника и порог распознавания сигнала для оптимизации пропускной способности в сетях IEEE 802.11 вместе с методом об-

наружения полной потери передачи. Этот метод тоже является медленным и обнаруживает прекращение передачи сигнала только при полном отсутствии доступа к среде.

Также заметим, что возможность применения устройств и систем когнитивного радио определена решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи РФ от 4 июля 2017 г. № 17-42-06 «О концепции развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года». В настоящее время метод «приспособленческого» доступа к спектру (OSA – Opportunistic Spectrum Access) исследован в меньшей степени, чем применение централизованного подхода по динамическому распределению ресурсов радиочастотного спектра между РЭС. Пока для принятия решения о выборе целевой сети и радиотехнологии доступа (RAT – Radio Access Technology) для когнитивных сетей не существует универсального и формализованного метода принятия решения.

Особенности построения сетей когнитивного радио для повышения энергоэффективности радиосредств

Это направление по трудоемкости относится к следующему уровню разработок. Здесь кратко охарактеризуем его.

В интегрированной сети когнитивного радио отдельный узел сети не может детектировать всех остальных пользователей на основе собственных измерений. Поэтому достоверную информацию обеспечивает групповое (совместное) измерение, когда результаты, полученные несколькими узлами, объединяются. Когнитивный процессор отвечает за механизмы получения ресурсов и за их последующее использование.

Для управления ресурсами в рамках когнитивной сети возможно увеличение емкости сети в условиях интерференции и ослабление интерференции за счет уменьшения мощности передаваемого сигнала.

В методе температуры интерференции результаты измерений собираются с нескольких фиксированных и мобильных узлов. По этим данным строится карта распределения мощности сигнала по большой территории.

Динамическое управление спектром близко к управлению мощностью передачи. На основе данных о детектированных промежутках в спектре и уровне мощности передаваемых сигналов производится выбор схемы модуляции для текущих условий в канале. Также произво-

дится выбор каналов для передачи. Для направления ресурсов в те участки, где потребность в них наиболее высока, используются направленные антенны. Алгоритм также подстраивается под условия, меняющиеся со временем.

Управление ресурсами производится на всех уровнях: QoS – контроль и управление допуском в сеть; HAR Q – планирование в динамическом режиме и адаптация линии (канальный уровень); адаптация канала управления, CQI и управление мощностью (физический уровень).

В сетях LTE радиочастотный спектр назначается в виде цветовой матрицы с временной и частотной осями. Чем интенсивнее цвет, тем выше отношение сигнал/шум для данного пользователя. Планирование позволяет разделить ресурсы между пользователями так, чтобы пользователи не мешали друг другу.

В современных системах связи для повышения пропускной способности применяются адаптивные методы выбора канала, алгоритмы передачи на нескольких несущих, несколько приемных и передающих антенн (MIMO). В когнитивных радиосистемах используются механизмы устранения интерференции, предотвращаются перехваты сигнала, повышается эффективность использования спектра и других ресурсов. При этом в когнитивной сети сочетаются все виды устройств передачи: проводные линии, наземные станции беспроводной связи, спутниковая связь, БПЛА. Важно обеспечить совместимость разнородных участков сети. В настоящее время де-факто стандартом связи стали IP-протоколы.

В таких системах важно предотвратить интерференцию, глушение и перехват сигнала. В когнитивных системах технологии достижения данной цели можно разделить на три категории: аппаратные (например, применение направленных антенн), физические (модуляция, кодирование, формирование диаграммы направленности антенны), сетевые (маршрутизация).

При детектировании помех когнитивное радио осуществляет скачкообразное переключение канала, однако в отличие от обычного алгоритма выбор нового канала производится адаптивно. Когнитивная сеть может обнаружить источники помех и подавить их.

Проблему интерференции можно ослабить с помощью применения направленной антенны. В результате анализа информации о направленности сигнала, полученной с разных узлов, вычисляется местоположение источника сигнала. Погрешность вносит задержка распространения сигнала. Нужно принимать во внимание и то,

что иногда отраженный сигнал сильнее компоненты, принятой напрямую с источника.

Для организации сети когнитивного радио применяется: 1) использование базы данных, содержащей информацию об окружающем радиопространстве (например, о технологиях радиодоступа); 2) использование контрольного канала (CPC – Cognitive Pilot Channel). Первый вариант может применяться для работы в белых пятнах спектра. Во втором варианте доставка необходимой информации осуществляется с помощью общего контрольного канала, который позволяет терминалу знать о статусе занятости радиоканала. Когнитивной системой с контрольным каналом можно считать систему, обеспечивающую работу радиоканала в окружающей среде с несколькими технологиями радиодоступа (RAT).

Принцип работы создаваемой когнитивной сети может заключаться, например, в следующем: мобильное устройство посредством встроенной навигации определяет собственные координаты и передает их по служебному каналу ближайшей точке доступа или базовой станции сотовой связи. Далее оперативная информация (запрос) транслируется по действующей транспортной сети в вычислительный центр, где мгновенно обрабатывается, определяется радиоэлектронная обстановка района, вычисляются допустимые технические характеристики для работы радиоэлектронной системы (РЭС) подвижной связи в телевизионной полосе частот и передаются обратно в ответ на запрос базовой станции. Мобильное устройство на месте корректирует собственные технические характеристики, после чего начинает использовать телевизионную полосу в интересах абонента. Вся работа системы выполняется в автоматическом режиме с применением геолокационной базы данных.

Архитектура сетей когнитивного радио может быть разной: типа инфраструктура, ad-hoc или mesh-архитектуры. При этом в архитектуре ad-hoc для организации сети не требуются базовые станции, так как сеть является самоорганизующейся.

Пути построения алгоритмов энергоэффективной настройки модема и помехоустойчивого кодера на условиях заданной радиолинии

На практике можно ставить задачи по проектированию и настройке когнитивных режимов адаптивной работы 1) радиолинии, 2) топологии сети связи, 3) совместной настройки радиолиний и интегрирующей их сети. Уровень слож-

ности этих режимов последовательно возрастает. К третьей задаче можно переходить только после обработки двух предыдущих.

Общая последовательность адаптивной работы когнитивной радиолинии может включать до четырех следующих последовательных этапов.

На первом этапе выполняется адаптация по спектру через настройку радиочастоты на наилучшие окна прозрачности разрешенной полосы спектра. Обратная связь замыкается через уровни принимаемой мощности сигнала на разных частотах (например, от периодически посылаемого тестового ЛЧМ-радиоимпульса или от сканирующей по спектру частотной последовательности).

На втором этапе после выбора частоты (частот) работы радиолинии выполняется адаптивная настройка ее уровня мощности для базового варианта СКК (обычно двухпозиционного – из модема и кодека средней силы). Обратная связь замыкается через достижение некоторого нормативного значения частоты появления ошибок BER .

После этого может быть выполнена настройка СКК. Для этого на третьем этапе по критерию энергоэффективности переключением алгоритма цифровой обработки сигналов в процессоре настраивается переход к более сильному кодеку канала с одновременным понижением уровня сигнала.

В свою очередь, на четвертом этапе с целью повышения скорости передачи информации, может быть выполнена цифровая перенастройка модема (с сопутствующими фильтрами) на основе технологий программно определяемого радио SDR. Здесь в случае относительно чистых радиолиний особый интерес представляет переход к многопозиционным модемам для кратного повышения скорости передачи информации. Обратная связь при настройке СКК (модема и кодера), как и ранее, замыкается через достижение некоторого нормативного значения BER .

После первой настройки этих этапов радиолиния переходит в режим отслеживания радиоэфира в обратной последовательности. При его слабом возмущении взаимосвязано работают кодек и модем в рамках настройки СКК. С существенным увеличением уровня помех повышается уровень сигнала и оценивается целесообразность смены окна радиопрозрачности.

Также важно заметить, что для уменьшения энергопотребления электроники радиотерминалов требуется разработка и использование специальных алгоритмов переключения СКК с минимальным числом вычислительных операций.

При этом наиболее простым считается предварительная заготовка набора кодеков и динамическое переключение между ними в зависимости от уровня помех в канале связи. В то же время более эффективным по энергопотреблению может стать динамическая перестройка отдельных параметров экономно реализованного выбранного помехоустойчивого кода.

Для предварительной заготовки эффективных СКК желательно на цифровых двойниках выполнять моделирование, заполняя соответствующие таблицы. Далее такие дискретные результаты при необходимости можно аппроксимировать выбранными непрерывными функциями:

$$BER = f_i(E_b / N_0)$$

или обратно:

$$E_b / N_0 = \Phi_i(BER),$$

где $f_i = f_i(M_i, K_i)$ – рассчитываемая в процессе имитационного моделирования функция, зависящая от выбранных M_i – варианта модуляции и K_i – варианта помехоустойчивого кодирования.

Кроме этого для заданных $BER \approx BER_0$ можно сформировать таблично задаваемую двумерную зависимость $E_b / N_0 = f(M_i, K_i)$.

В результате по величине измеренной BER на основе результатов таблицы можно оценить величину E_b / N_0 для текущего состояния канала радиосвязи. Отсюда сразу будет видно, какая СКК более предпочтительна с точки зрения наибольшей скорости передачи данных для требуемого значения BER и уровня шума E_b / N_0 (косвенно оцененного когнитивной радиосистемой).

При этом алгоритм работы решающего устройства по выбору наиболее эффективной СКК может включать следующие шаги: производится передача контрольного пакета данных и оценивается $BER \Rightarrow$ по измеренной величине BER оценивается $(E_b / N_0) \Rightarrow$ задается допустимая величина BER для работы системы в этих условиях \Rightarrow выбираются потенциально эффективные СКК, удовлетворяющие заданному диапазону E_b / N_0 и вероятности битовой ошибки \Rightarrow при наличии нескольких СКК в указанном диапазоне E_b / N_0 выбор делается в пользу СКК с наибольшей скоростью передачи информации.

Заметим, что с учетом того, что в цифровой радиосвязи могут применяться разные варианты модуляторов и помехоустойчивых кодеров, количество потенциальных для работы вариантов их комбинаций становится достаточно большим, поэтому желательно предварительно оценивать их потенциальную значимость. Исключение неэффективных или почти дублирующих

вариантов СКК позволит дополнительно снизить энергопотребление вычислителем. Кроме того, результаты сравнения вариантов СКК по эффективности будут зависеть и от особенностей программно-аппаратной реализации применяемых модуляторов и кодеков. Выбор наиболее эффективных вариантов СКК на практике во многом будет зависеть от конструктивных особенностей радиотерминалов и поэтому заранее не очевиден.

В заключение несколько слов скажем о разработке когнитивных режимов адаптивной настройки топологии сети связи. В одном из простых вариантов требуется одновременная периодическая рассылка пробных тестовых сигналов сразу всеми радиостанциями. При их регистрации формируется матрица функций взаимного ослабления радиосигналов между всеми радиотерминалами. На ее основе выбираются наилучшие пути маршрутизации, исключаются дублирующие неэффективные пути маршрутизации, а также может быть выполнена распределенная по нескольким путям маршрутизация с целью повышения общей скорости передачи информации (и с дополнительным повышением ее информационной скрытности). В более сложном варианте топология сети может настраиваться через постепенную самоорганизацию локальных кластеров радиосредств в составе общей сети.

Направления приоритетных задач по совершенствованию радиоаппаратуры с повышенной энергоэффективностью

В настоящее время основные приоритеты в планируемых исследованиях связывают с широко обсуждаемыми ориентирами создания радиоэлектронной аппаратуры шестого поколения. Накопленный нами в настоящее время опыт практических и теоретических разработок SDR-радиотерминалов КВ (3...30 МГц) и УКВ (30...500 МГц) диапазонов требует своего развития уже для частотного диапазона от 1,5 МГц до 6,5 ГГц.

В качестве первоочередных задач могут быть выделены проектирование и моделирование энергоэффективных сигнально-кодовых конструкций для создания радиоэлектронной SDR-аппаратуры нового поколения в составе когнитивных интегрированных систем связи.

Для этого требуется формирование ключевых модулей из имеющихся программно-аппаратных заделов для создания новых самонастраиваемых систем радиопокрытия местности в частотном диапазоне 3...500 МГц на основе технологии SDR в условиях многокритери-

альных физических ограничений в рамках единой политики формирования универсальной программно-аппаратной платформы синтеза объектно ориентированных радиосистем с настройкой на топологические ограничения и условия эксплуатации.

Параллельно с этим важен синтез и исследование эффективности энергосберегающих сигнально-кодовых конструкций для радиолиний в частотном диапазоне от 1,5 МГц до 6,5 ГГц на основе технологии SDR в условиях многокритериальных физических ограничений.

Среди решаемых на стенде главного конструктора более конкретных подзадач можно указать следующие.

1. Разработка моделей СКК в различных сочетаниях цифровых модуляторов и помехоустойчивых кодеров. В перечне модуляторов для углубленного исследования представляют интерес следующие варианты модуляции: линейная частотная модуляция (ЛЧМ), нелинейная частотная модуляция (НЧМ), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM, Orthogonal frequency-division multiplexing), многочастотные системы с гребенчатой структурой (МЧС-ГС), псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) и др. Среди приоритетных вариантов помехоустойчивого кодирования следует проанализировать коды Рида – Соломона, Боуза – Чоудхури – Хонквингема (БЧХ), полярные коды, турбокоды и др.

2. Проведение их исследований методами имитационного моделирования в средах Matlab и LabView на помехоустойчивость при воздействии АБГШ канала связи в соответствии со стандартами STANAG и MIL-STD для различных диапазонов частот (1,5...30 МГц; 30...520 МГц; 520 МГц ... 2,4 ГГц; 2,4...6,5 ГГц) при скорости передачи информации 1,2; 2,4; 3,6; 4,2; 19,2; 64; 500; 1000; 2000 кБит/сек.

3. Проведение исследований СКК методами имитационного моделирования в средах Matlab и LabView на энергетическую эффективность.

4. Разработка лабораторных макетов на основе технологии SDR для проведения натурных испытаний формирования и обработки СКК с возможностями адаптивной настройки структур и параметров выбранных эффективных СКК на характеристики канала радиосвязи.

5. Перенос отобранных во второй задаче эффективных сигнально-кодовых конструкций на разрабатываемую универсальную программно-аппаратную платформу синтеза объектно ориентированных радиосистем с настройкой на топо-

логические ограничения и условия эксплуатации.

При этом основными результатами их исследования и решения могут быть определены следующие.

1. Созданы ключевые модули для универсальной программно-аппаратной платформы синтеза объектно ориентированных радиосистем с настройкой на топологические ограничения и условия эксплуатации.

2. Предложены новые сигнально-кодовые конструкции для радиоэлектронной аппаратуры шестого поколения применительно к частотному диапазону от 1,5 МГц до 6,5 ГГц на основе технологии SDR в условиях многокритериальных физических ограничений.

3. Формирование универсальной программно-аппаратной платформы синтеза объектно ориентированных радиосистем с гибкой интеграцией эффективных сигнально-кодовых конструкций и аппаратных модулей конструкций радиосистем шестого поколения.

Найденные новые решения представляют практический интерес для создания гибридных сетей радиообмена повышенной эффективности в радиодиапазоне от 1,5 МГц до 6,5 ГГц, включая линии прямой ближней связи, линии ретрансляции через низкоорбитальные спутники связи, а также линии дальней загоризонтной КВ-связи.

Выводы

В современных условиях к радиосистемам нового поколения предъявляются повышенные требования по самоорганизации и приспособляемости создаваемых на подвижных объектах гибридных полихромных сетей радиообмена с временной интеграцией в стационарные телекоммуникационные сети. Кроме того, требуется последующее преобразование таких самоорганизующихся сетей в самоподдерживающиеся сети связи, обеспечивающие поддержку заданных ограничений на выбранные физические критерии. Для них предполагается обеспечение сбалансированности множества физических критериев: улучшение высокоскоростного радиопокрытия местности, повышение пропускной способности сети и ее радиолиний, достижение заданного уровня помехозащищенности, расширение широкополосности и др. Среди них возрастает роль критерия улучшения энергетической эффективности, особенно актуального для уменьшения тепловыделения радиоэлектронной аппаратурой в условиях ее конструктивной миниатюризации, а также для уменьше-

ния потребляемой энергии на малых подвижных объектах.

Поэтому поставленные в статье задачи синтеза новых энергоэффективных сигнально-кодовых конструкций для перспективных систем радиосвязи актуальны и требуют всестороннего исследования. Рассмотренные пути и шаги их решения с учетом накопленного в настоящее время практического и теоретического опыта разработки КВ (3...30 МГц) и УКВ (30...500 МГц) радиотерминалов представляют практический интерес для создания радиоэлектронной аппаратуры шестого поколения применительно к частотному диапазону от 1,5 МГц до 6,5 ГГц на основе технологии SDR в условиях многокритериальных физических ограничений.

Библиографические ссылки

1. *Mubashir H., Rehmani, Dhaou R.* Cognitive radio, mobile communications and wireless networks. Springer International Publishing, 2019, 292 p.
2. *Аджемов С. С., Чиров Д. С., Терешонок М. В.* Распознавание видов цифровой модуляции сигналов в системах когнитивного радио. М., 2018. 223 с.
3. *Виноградов, Е. М.* Современные направления повышения эффективности спектра и внедрения новых радиотехнологий // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 1. С. 68–78.
4. *Шантала В. С., Машкин А. И., Соколов В. А.* Использование сигнально-кодовой конструкции аппаратуры передачи данных для сравнения моделей радиоканала // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 37–43.
5. Построение системы контроля и тестирования радиосистем как элемента ИОТ / В. В. Хворенков, А. И. Нистюк, Р. А. Хатбуллин, А. А. Зыкин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 155–165.
6. Разработка программно-аппаратных средств для имитации работы радиосредств связи / В. В. Хворенков, А. А. Зыкин, А. Н. Копысов, М. А. Бояршинов, Р. А. Хатбуллин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 60–68.
7. *Степутин А. Н., Николаев А. Д.* Мобильная связь на пути к 6G : в 2 т. Инфра-Инженерия, 2020.
8. *Вэнь Тонг, Пейин Чжу.* Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту : пер. с англ. В. Яценкова. М. : ДМК Пресс, 2022. 632 с.
9. *Кулешов И. А., Солозобов С. А., Шевченко В. В.* Мониторинг радиоэлектронной обстановки в системе связи ВМФ // Техника средств связи. 2018. № 4 (144). С. 22–29.
10. Повышение показателей качества КВ-связи при использовании предсеансовой диагностики многомерного ионосферного радиоканала / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Р. Р. Бельгибаев // Вест-

ник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2018. № 2 (38). С. 6–32.

11. Зяблов В. В., Потапов В. Г. Сигнально-кодовые конструкции для бесконфликтных сетей // Информационные процессы. 2017. Т. 17, № 1. С. 1–13.

12. Дулькейт И. В., Завьялов С. А., Свирский В. М. Использование SDR технологий в морской радиосвязи // Омский научный вестник. Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы. 2018. № 1 (157). С. 63–68.

13. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б., Харин В. Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 5. С. 28-47.

14. Haykin S., Peyman S. Fundamentals of cognitive radio. In ser. Wiley series on adaptive and cognitive dynamic systems. Wiley, 2017, 232 p.

15. Li S., Wei Z., Guodong Z. Advanced sensing techniques for cognitive radio. Springer International Publishing, 2017, 76 p.

16. He X., Dai H. Adversary detection for cognitive radio networks. In ser. Springer Briefs in electrical and computer engineering. Springer, 2018, 83 p.

17. Сорочкин А. С. Оценка потенциальной эффективности применения когнитивного радио // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы международной научно-технической конференции. М. : МИРЭА, 2018. Т. 18, № 4. С. 935–938.

18. Алгоритмы управления частотным распределением в условиях массового использования когнитивного радио и интернета вещей / Н. П. Ямпурин, В. И. Логинов, Ю. С. Федосенко, С. В. Павлов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10, № 2. С. 16–23.

19. Зуев А. В. Распределение канальных ресурсов в когнитивной радиосети на основе аукционного метода управления доступом к среде передачи // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 14–32.

20. 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.

21. Путилин А. Н., Шаптала В. С. Иерархическое манипуляционное кодирование для сигнально-кодовой конструкции на основе трехмерной симплекс-решетки // Техника средств связи. 2019. № 1 (145). С. 164-169.

22. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. Research and development of hierarchical models of automated control systems for the parameters of the radio-line of the cognitive radio system. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1368 (4), 042001.

23. Хабаров Е. О., Максимов Е. В. Особенности сигнально-кодовой конструкции, устойчивой к обшчим замираниям в декаметровом канале связи // Фи-

зика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 2. С. 29–36.

24. Кандауров Н. А. Сигнально-кодовые конструкции для низкоскоростной широкополосной декаметровой связи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10, № 6. С. 33–38.

25. Kandaurov N.A. Signal-Code constructs and processing algorithm with automatic dispersion distortion compensation for wideband HF communication // T-Comm, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 76-79.

26. Урсол Д. В. О помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций для систем интернет вещей // Экономика. Информатика. 2021. Т. 48, № 4. С. 822–830.

27. Анализ занятости каналов с полосами от 3 до 24 КГц в задаче когнитивного КВ радио / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Р. Р. Бельгибаев, Н. А. Конкин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 96–97.

28. Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова Н. В. Экспериментальные модели многомерного ионосферного радиоканала для задач когнитивного КВ радио // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 446–447.

29. Киченко А. Н., Савельев А. В., Шишаков К. В. Анализ сигнально-кодовых конструкций в задачах повышения энергетической скрытности радиолиний // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 4. С. 11–20. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-11-20.

30. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Эффективность использования когнитивной радиосвязи в декаметровом диапазоне частот // Техника средств связи. 2018. № 2 (142). С. 6–22.

References

1. Mubashir H., Rehmani, Dhaou R. Cognitive radio, mobile communications and wireless networks. Springer International Publishing, 2019, 292 p.

2. Adzhemov S.S., Chirov D.S., Tereshonok M.V. *Raspoznavanie vidov cifrovoj moduljatsii signalov v sistemah kognitivnogo radio* [Recognition of types of digital modulation of signals in cognitive radio systems]. Moscow, 2018, 223 p. (in Russ.).

3. Vinogradov E.M. [Modern directions of increasing the efficiency of the spectrum and introducing new radiotechnologies]. *Informacionnye tehnologii i telekommunikacii*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 68-78 (in Russ.).

4. Shaptala V.S., Mashkin A.I., Sokolov V.A. [Use of signal-code design of data transmission equipment for comparison of radio channel models]. *Tehnika sredstv svjazi*, 2020, no. 3 (151), pp. 37-43 (in Russ.).

5. Hvorenkov V.V., Nistyuk A.I., Khatbullin R.A., Zykin A.A. [Construction of a system for monitoring and testing radio systems as an element of IOT]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 155-165 (in Russ.).

6. Hvorenkov V.V., Zykin A.A., Kopysov A.N., Boyarshinov M.A., Khatbullin R.A. Development of

software and hardware for imitation of radio communication facilities]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 60-68 (in Russ.).

7. Steputin A.N., Nikolaev A.D. [Mobile communication on the way to 6G]. *Infra-Engineering Publ.*, 2020.

8. Wen Tong, Peyin Zhu. [6G networks. The path from 5G to 6G through the eyes of developers. From connected people and things to connected intelligence]. Moscow, DMK Press Publ., 2022, 632 p. (in Russ.).

9. Kuleshov I.A., Solozobov S.A., Shevchenko V.V. [Monitoring of the radio-electronic situation in the communication system of the Navy]. *Tehnika sredstv svyazi*, 2018, no. 4 (144), pp. 22-29 (in Russ.).

10. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Belgibaev R.R. [Improving the quality of HF communication when using pre-session diagnostics of a multidimensional ionospheric radio channel]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy*, 2018, no. 2 (38), pp. 6-32 (in Russ.).

11. Zyablov V.V., Potapov V.G. [Signal-code constructions for conflict-free networks]. *Informacionnyye processy*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 1-13 (in Russ.).

12. Dulkeit I.V., Zavalov S.A., Svirsky V.M. [Use of SDR technologies in marine radio communication]. *Omskij nauchnyy vestnik. Priborostroenie, metrologiya i informacionno-izmeritel'nye pribory i sistemy*, 2018, no. 1 (157), pp. 63-68 (in Russ.).

13. Fokin G.A., Volgushev D.B., Kharin V.N. [Use of SDR technology for network positioning tasks. Formation of LTE reference signals]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 28-47 (in Russ.).

14. Haykin S., Peyman S. Fundamentals of cognitive radio. In ser. Wiley series on adaptive and cognitive dynamic systems. Wiley, 2017, 232 p.

15. Li S., Wei Z., Guodong Z. Advanced sensing techniques for cognitive radio. Springer International Publ., 2017, 76 p.

16. He X., Dai H. Adversary detection for cognitive radio networks. Springer Briefs in electrical and computer engineering. Springer, 2018, 83 p.

17. Sorokin A.S. [Evaluation of the potential effectiveness of the use of cognitive radio]. *Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija : materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 935-938 (in Russ.).

18. Yampurin N.P., Loginov V.I., Fedosenko Yu.S., Pavlov S.V. [Algorithms for controlling frequency distribution in conditions of mass use of cognitive radio and the Internet of things]. *Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 16-23 (in Russ.).

19. Zuev A.V. [Distribution of channel resources in the cognitive radio network on the basis of the auction

method of access control to the transmission medium]. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti*, 2019, no. 3, pp. 14-32 (in Russ.).

20. Pashintsev V.P., Chipiga A.F., Anzin I.V. [Energy stealth of a low-orbit satellite communication system at random removal of the radio interception receiver]. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti*, 2018, no. 4, pp. 122-135 (in Russ.).

21. Putilin A.N., Shaptala V.S. [Hierarchical manipulation coding for signal-code construction based on a three-dimensional simplex lattice]. *Tehnika sredstv svyazi*, 2019, no. 1 (145), pp. 164-169 (in Russ.).

22. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. Research and development of hierarchical models of automated control systems for the parameters of the radio-line of the cognitive radio system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1368 (4), 042001.

23. Khabarov E.O., Maksimov E.V. [Features of the signal-code design, resistant to general fading in the decimeter communication channel]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 29-36 (in Russ.).

24. Kandaurov N.A. [Signal-code constructions for low-speed broadband decimeter communication]. *Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 33-38 (in Russ.).

25. Kandaurov N.A. Signal-Code constructs and processing algorithm with automatic dispersion distortion compensation for wideband HF communication, *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 76-79.

26. Ursol D.V. [On the noise immunity of signal-code structures for Internet of Things systems. Economics]. *Jekonomika. Informatika*, 2021, vol. 48, no. 4, pp. 822-830 (in Russ.).

27. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Belgibaev R.R., Konkin N.A. [Analysis of the employment of channels with bands from 3 to 24 kHz in the problem of cognitive HF radio]. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii*, 2020, no. 1-2, pp. 96-97 (in Russ.).

28. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. [Experimental models of multidimensional ionospheric radio channel for cognitive HF radio problems]. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii*, 2020, no. 1-2, pp. 446-447 (in Russ.).

29. Kichenko A.N., Savelyev A.V., Shishakov K.V. [Analysis of signal-code structures in the tasks of increasing the energy stealth of radio lines]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 11-20 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-11-20.

30. Nikolashin Yu.L., Budko P.A., Zhukov G.A. [Efficiency of using cognitive radio communication in the decimeter frequency range]. *Tehnika sredstv svyazi*, 2018, no. 2 (142), pp. 6-22 (in Russ.).

Modern Solutions to Improve the Energy Efficiency of Radio Lines for the Technical Renewal of Radio Stations of Integrated Communication Systems

A.S. Baturin, Chief Designer of Sarapul Radio Plant, Sarapul, Russia

V.V. Hvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

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

Promising tasks for improving radio equipment with increased energy efficiency, related to in-depth preliminary study and efficiency research using the stand of the chief designer, are considered.

Initially, a theoretical factor analysis of the interference radio terminal energy efficiency with respect to evenly distributed over the spectrum is given. The problem of choosing a variant of digital modulation and parameters of a noise-resistant code from the condition of obtaining the least energy for the transmission of one bit of information at a given error probability per bit and the level of spectral noise density is examined.

With regard to broadband signals, energy-efficient linearly frequency-modulated signals are allocated. In the case of narrowband signals, cognitive technologies for improving energy efficiency for radio paths with partially filled spectrum, tuning radio lines to the "windows of the best transparency" of the spectrum, are studied. Their importance for VHF radio lines and HF radio systems with tuning to the optimal frequency by regular ionosphere sounding is noted.

The features of cognitive radio networks development to improve the energy efficiency of radio facilities are considered.

The ways of algorithms design for modem and noise-resistant encoder energy effective tuning to a given radio line conditions for testing in the stand of the Chief Designer are discussed.

Priority tasks for improving radio equipment with increased energy efficiency have been specified. Urgent specific subtasks for elaboration at the stand of the Chief Designer are highlighted.

Keywords: radio terminal, energy efficiency, stand of the chief designer, signal modulation, noise-resistant coding, cognitive radio systems, software-defined radio, signal-code structures.

Получено 26.09.2022

Образец цитирования

Батурин А. С., Хворенков В. В., Шишаков К. В. Современные решения по повышению энергоэффективности радиолиний для технического обновления радиостанций интегрированных систем связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 47–62. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-47-62.

For Citation

Baturin A.S., Hvorenikov V.V., Shishakov K.V. [Modern Solutions to Improve the Energy Efficiency of Radio Lines for the Technical Renewal of Radio Stations of Integrated Communication Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 47-62 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-47-62.