

Сатдинов Айрат Иршатович, Смирнов Александр Александрович, Дворовой Максим Олегович,  
Грибанов Евгений Владимирович, Прасько Григорий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛИНИЙ  
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В РЕЖИМЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ**

В статье рассмотрена радиолиния спутниковой связи с обработкой сигнала на борту ретранслятора связи, "мягкими" решениями на входе декодера, когерентным приемом, перфорацией пораженных символов (блоков) при совместном применении кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) и методов многопозиционной манипуляции в условиях воздействия преднамеренных помех.

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2016/4/25.html](http://www.gramota.net/materials/1/2016/4/25.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

**Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2016. № 4 (106). С. 109-112. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2016/4/](http://www.gramota.net/materials/1/2016/4/)

**© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

## ON CLOSE PACKING OF SOLIDS IN THREE-DIMENSIONAL SPACE

Romanov Vadim Nikolaevich, Doctor in Technical Sciences, Professor  
 Saint-Petersburg  
 vromanvpi@mail.ru

The article gives a solution for the task of the close packing of solids of different shapes in three-dimensional Euclidean space. As the standards of comparison the author considers solids forming a partition of three-dimensional space, namely, hexahedron, rectangular prism, triangular prism, hexagonal prism. The dependence on the choice of the standard of relative volume and filling factor for a number of solids, in particular, solids of revolution and regular polyhedrons is studied. The paper also proposes an algorithm for the solution of the task for bodies of arbitrary shape depending on topological properties and smoothness.

*Key words and phrases:* theory of numbers; close packing; standard; solids of revolution; regular polyhedrons; relative volume; filling factor.

УДК 621.396

Технические науки

*В статье рассмотрена радиопередача спутниковой связи с обработкой сигнала на борту ретранслятора связи, «мягкими» решениями на входе декодера, когерентным приемом, перфорацией пораженных символов (блоков) при совместном применении кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) и методов многопозиционной манипуляции в условиях воздействия преднамеренных помех.*

*Ключевые слова и фразы:* радиопередача спутниковой связи; частотно-энергетическая эффективность; помехозащита; сигнально-кодовые конструкции; ретранслятор связи.

Сатдинов Айрат Иршатович, к.т.н.

Смирнов Александр Александрович, к.т.н.

Дворовой Максим Олегович, к.т.н.

Грибанов Евгений Владимирович, к.т.н.

Прасько Григорий Александрович, к.т.н.

Военная академия связи имени С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург  
 PrGrigoriy@yandex.ru

**ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
 РАДИОЛИНИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В РЕЖИМЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ  
 ПЕРЕСТРОЙКИ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ**

Вследствие ограниченности частотного ресурса ретрансляторов связи (РС) проблеме повышения частотно-энергетической эффективности помехозащищенных радиопередач спутниковой связи с частотно-временным доступом (ЧВД) к ресурсу РС уделяется повышенное внимание. Как известно, при высокой скорости передачи данных реализация помехозащиты затруднена вследствие ограниченности выделенной полосы частот для каждой земной станции (ЗС) либо абонентского терминала.

ЧВД к ресурсу РС предполагает централизованное управление, а также особенности используемых протоколов доступа к ресурсам канала управления и информационным каналам. Эффективность цифровых спутниковых систем связи можно существенно повысить путем применения более совершенных методов кодирования и манипуляции, позволяющих наиболее полно использовать пропускную способность канала при достаточно высоких предъявляемых требованиях к достоверности передачи данных. Практически это повышает достоверность или скорость передачи данных (либо одновременно и то и другое) без увеличения отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале.

Основные характеристики передающих частей спутниковых модемов: используемые сигнально-кодовые конструкции (СКК) и спектральные характеристики передаваемых сигналов стандартизированы, поэтому для перспективной системы спутниковой связи (ССС) наибольший интерес представляет разработка оптимальных (или близких к оптимальным) алгоритмов демодуляции сигнала. При условии, что решена проблема синхронизации по частоте несущего колебания при ЧВД к ресурсу РС в помехозащищенном режиме с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), можно повысить частотно-энергетическую эффективность радиопередач спутниковой связи (РЛСС) с обеспечением требуемого качества принимаемых сигналов за счет применения различных сочетаний высокоскоростных методов многопозиционной манипуляции и высокоизбыточных помехоустойчивых кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC – Low-Density Parity-Check Code) с псевдослучайной структурой.

В процессе оценки энергетики спутниковых радиопередач и требуемой полосы частоты для реализации канала необходимо знать пороговые значения ОСШ или  $E_b/N_0$  для различных СКК, применяемых

в современных системах связи, а также структуру и параметры передаваемых информационных блоков данных (пакетов) с целью обеспечения требований, предъявляемых для выполнения тех или иных задач (передача речи, видео, данных и т.д.).

Все системы передачи информации можно разделить на четыре характерные группы [3]. Остановимся на четвертой группе – высокоэффективные системы, позволяющие одновременно получать выигрыш как по частотным, так и по энергетическим показателям. Эту группу, как правило, составляют каскадные системы (СКК), в которых используются многопозиционные сигналы и корректирующие коды.

Следовательно, применение сигналов многопозиционной манипуляции (фазовая манипуляция (ФМ), амплитудная фазовая манипуляция (АФМ), квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ)) повышает частотную эффективность ССС и уменьшает энергетическую, а применение кодов LDPC дает противоположный результат, в частности по энергетике. В идеале, важно повысить оба показателя, что предполагает использование в современных ССС СКК как наиболее эффективного сочетания взаимосогласованных методов многопозиционной манипуляции и помехоустойчивого кодирования [1; 2]. Значительно повысить эффективность перспективной ССС можно за счет применения обработки сигналов на основе высокоэффективных СКК на борту РС.

Для обеспечения наибольшей скорости передачи данных в РЛСС в как можно меньшей полосе частот  $\Delta f_c$ , занимаемой передаваемым сигналом, необходимо, кроме того, обеспечить требуемую помехоустойчивость РЛСС с ППРЧ, определяемую как возможность обеспечения связи с заданным качеством ( $P_b \leq 10^{-n}$ ) в условиях воздействия преднамеренных помех заданной интенсивности.

Применение ППРЧ для решения задачи помехозащиты и выполнения требований по помехозащищенности предполагает внесение избыточности в передаваемое сообщение и расширение полосы используемого для передачи диапазона частот. Каждый передаваемый блок (пакет) данных подвергается помехоустойчивому кодированию (примитивному, как в кодах с повторением, или эффективному – турбокоды, коды LDPC), перемежению символов, разбиению на блоки, каждый из которых передается в своей полосе частот. В радиолиниях с ППРЧ и перфорацией пораженных помехой блоков (пакетов) сообщения целесообразно иметь энергетический запас  $\Delta h^{2*}$ . Величина требуемого запаса  $\Delta h^{2*}$  определяется несколькими факторами: помехоустойчивостью СКК без перфорации; вероятностью подавления блоков сообщения; энергетике постановщика помех; добротностью тракта приёма РС; временных характеристик ППРЧ и действенностью программы ППРЧ (ее непредсказуемостью).

Графическая интерпретация возможных вариантов постановки помех представлена на Рис. 1.

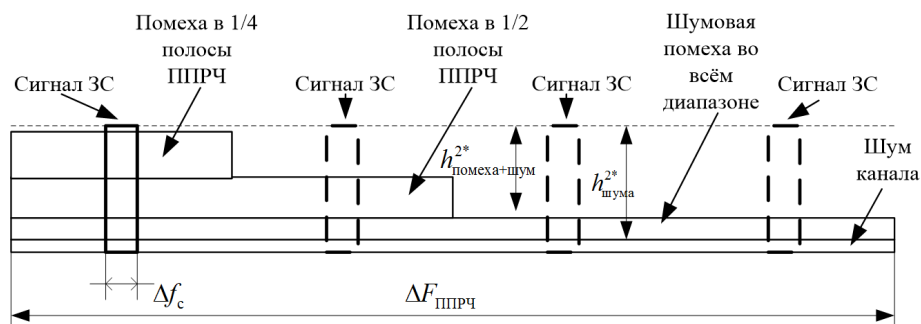


Рис. 1. Интерпретация возможных вариантов постановки помех

В помехозащищенных РЛСС используется помехоустойчивое кодирование двумя кодами – с повторением или коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ). Коды с повторением неэффективно расходуют частотно-энергетический ресурс и требуют значительного энергетического запаса, порядка 10...12 дБ, а код БЧХ не обеспечивает заданного коэффициента помехозащиты, так как исправляет только две ошибки на длине слова. В связи с этим, в качестве помехоустойчивых кодов предлагается использовать мощные помехоустойчивые коды LDPC, обладающие более высокой энергетической эффективностью в сочетании с перемежением.

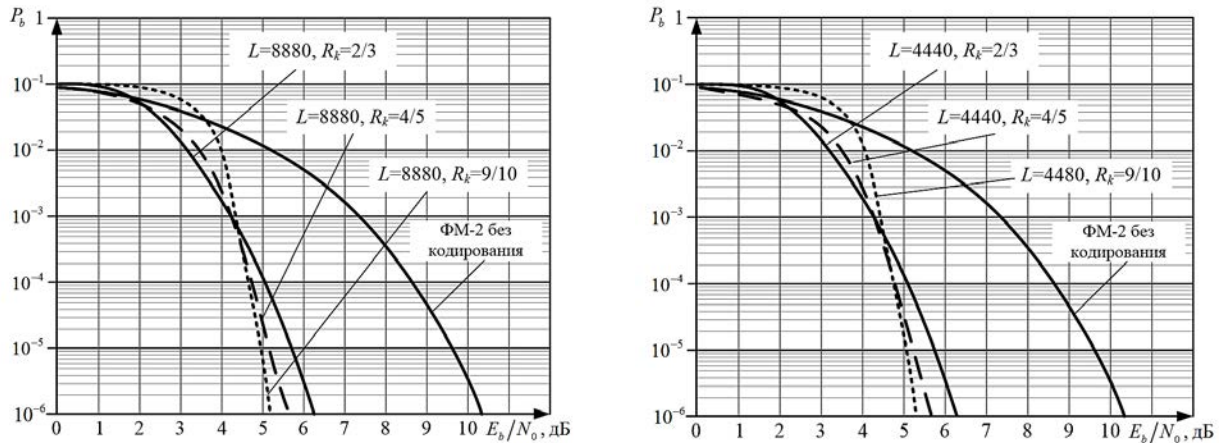
Таблица 1.

Параметры кодов LDPC стандарта GMR-1.GMPRS

№ Конфигурации	k	L	M	q	Скорость кода	Packet Normal Bursts (PNB)	Модуляция	Алгоритм перемежения кодера
0	2960	4440	74	20	2/3 C1	(5,12)	$\pi/4$ QPSK	TableA1
1	5920	8880	74	40	2/3 C2	(5,12)	16APSK	TableA2
3	3552	4440	74	12	4/5 C1	(5,12)	$\pi/4$ QPSK	TableA4
4	7104	8880	74	24	4/5 C2	(5,12)	16APSK	TableA5
6	4032	4480	64	7	9/10 C1	(5,12)	$\pi/4$ QPSK	TableA7
7	7992	8880	74	12	9/10 C2	(5,12)	16APSK	TableA8

С помощью имитационного моделирования получены результаты и проведен анализ частотно-энергетических характеристик и помехоустойчивости СКК стандарта GMR-1.GMPRS при отсутствии преднамеренных помех. Параметры для СКК в соответствии с GMPRS-1 05.003 представлены в Таблице 1 [4]. В статье представлены не все результаты имитационного моделирования, а только некоторые.

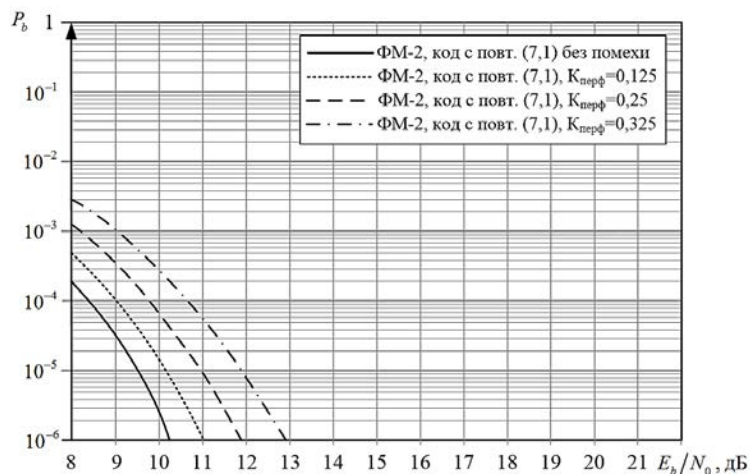
На Рис. 2 представлены результаты имитационного моделирования для СКК стандарта GMR-1.GMPRS. Для рассмотренных конфигураций использован метод манипуляции ФМ-2.



**Рис. 2.** Помехоустойчивость LDPC совместно с ФМ-2 (конфигурации № 0, 1, 3, 4, 6, 7) в условиях отсутствия преднамеренных помех

Как видно на Рис. 2, СКК стандарта GMR-1.GMPRS в канале с аддитивным белым гауссовским шумом обладают высокой помехоустойчивостью и энергетической эффективностью (обеспечивается вероятность ошибки на бит  $P_b \leq 10^{-5}$  при  $E_b/N_0 = 4...6$  дБ) при достаточно больших размерах передаваемых информационных блоков данных (пакетов) и высоких скоростях кодирования.

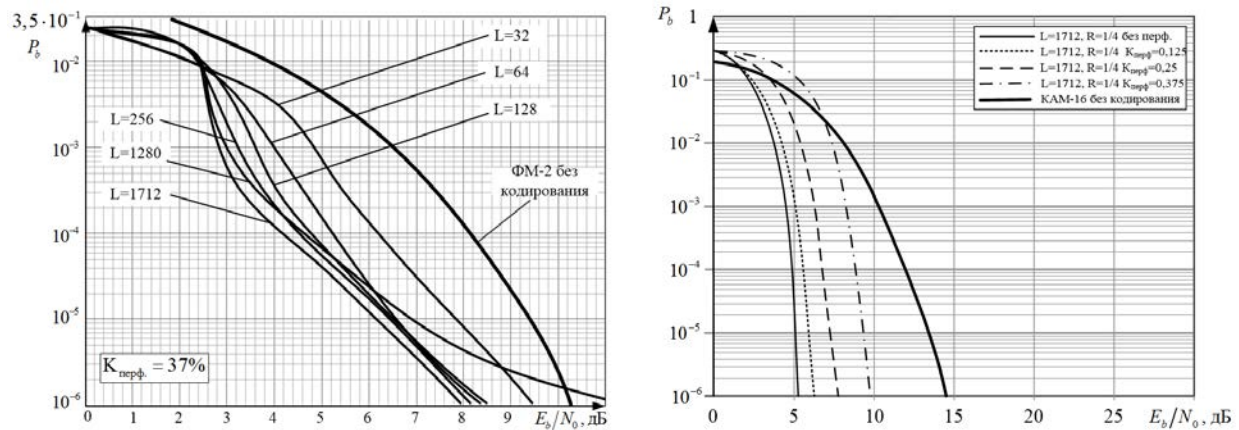
Таким же путем были получены результаты помехоустойчивости СКК для ССС, где используются в качестве помехоустойчивых кодов примитивные коды, в частности, с семикратным повторением при «мягких» решениях на выходе демодулятора в условиях воздействия помехи, подавляющей 12,5%, 25% и 37,5% блока ППРЧ (Рис. 3).



**Рис. 3.** Помехоустойчивость СКК (код с повторением и ФМ-2) при воздействии помехи, подавляющей 12,5%, 25% и 37,5% блока ППРЧ

Из Рис. 3 следует, что помехоустойчивость данной СКК достаточно высокая, однако для этого необходимы большие энергетические и частотные затраты, а значит, такое сочетание методов помехоустойчивого кодирования и манипуляции является малоэффективным. Кроме того, при таких «малоэффективных СКК» достичь высокой скорости передачи информационных данных не представляется возможным.

На Рис. 4 представлены графики помехоустойчивости СКК, полученные за счет алгоритмов формирования и обработки сигналов, основанных на использовании низкоскоростных кодов с проверкой на четность ( $R_k = 1/4$ ), обладающих высокой исправляющей способностью на основе псевдослучайного распределения связей между информационными и проверочными битами сообщения и многопозиционных высокоскоростных методов манипуляции (ФМ-2, КАМ-16).



**Рис. 4.** Помехоустойчивость СКК с LDPC и ФМ-2, LDPC и КАМ-16 со скоростью  $R_k=1/4$  при подавлении 37,5% блока ППРЧ помехой

Анализ результатов имитационного моделирования (Рис. 3, 4) позволяет сделать следующие выводы: для полученных сочетаний низкоскоростных кодов с низкой плотностью проверок на четность и сигнальных ансамблей ФМ-2 и КАМ-16 при подавлении 35,7% полосы частот ППРЧ помехой оптимальной скоростью кодирования из всех рассмотренных вариантов является  $R_k = 1/4$ ; для рассмотренных СКК (LDPC и ФМ-2, LDPC и КАМ-16) в условиях воздействия помех выигрыш по энергетической эффективности относительно СКК с примитивными кодами при той же сигнально-помеховой обстановке может достигать 3...4 дБ, а по частотной эффективности – до 2-х и более раз.

Таким образом, представленные в этой статье определенные сочетания кодов LDPC с низкими скоростями кодирования и высокоскоростных многопозиционных методов манипуляции могут позволить повысить частотно-энергетическую эффективность радиолиний спутниковой связи в режиме ППРЧ.

#### Список литературы

1. Григорьев В. А. Сигналы современных зарубежных систем электросвязи: учебник. СПб.: ВАС, 2007. 368 с.
2. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. СПб.: Наука, 2007. 267 с.
3. Зюко А. Г. Повышение эффективности спутниковых систем связи // Электросвязь. 1988. № 5. С. 28-29.
4. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/5C101300\\_101399/5C1013760507/5C02.03.01\\_60/5Cts\\_1013760507v020301p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/5C101300_101399/5C1013760507/5C02.03.01_60/5Cts_1013760507v020301p.pdf) (дата обращения: 08.04.2016).

#### INCREASING FREQUENCY-ENERGY EFFICIENCY OF SATELLITE COMMUNICATION RADIO LINKS IN THE REGIME OF THE PSEUDORANDOM READJUSTMENT OF OPERATIONAL FREQUENCY

Satdinov Airat Irshatovich, Ph. D. in Technical Sciences  
Smirnov Aleksandr Aleksandrovich, Ph. D. in Technical Sciences  
Dvorovoi Maksim Olegovich, Ph. D. in Technical Sciences  
Gribanov Evgenii Vladimirovich, Ph. D. in Technical Sciences  
Pras'ko Grigorii Aleksandrovich, Ph. D. in Technical Sciences  
S. M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps in Saint Petersburg  
PrGrigoriy@yandex.ru

This article considers the radio link of satellite communication with signal processing on board of the communication relay, "soft" decisions at the input of the decoder, coherent reception, the perforation of affected symbols (blocks) in the combined use of codes with the low density of parity check (LDPC) and the methods of multiposition manipulation in the conditions of the impact of willful interference.

*Key words and phrases:* radio links of satellite communication; frequency-energy efficiency; anti-jamming; signal-code sequences; communication relay.