

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Безуглов Д.А.¹, Лыков А.П.², Киреев Д.Г.³, Поморцев П.М.³, Швидченко С.А.¹

¹ *Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», 344016, г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, 215, e-mail: bezuglovda@mail.ru*

² *Военный научный учебный центр Военно-Воздушных сил «Военно-Воздушная Академия» филиал г. Краснодар, 350005, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135100, e-mail: p.s.p@bk.ru*

³ *Федеральное космическое агентство (Roscosmos), Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш», 127018, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: metr@tmnpo.ru*

К системам связи, имеющим в своем составе космические сегменты и работающим в некоторых (экономически наиболее привлекательных) частотных диапазонах, предъявляются требования и ограничения, изложенные в стандартах международных организаций. Одним из важнейших аспектов разработки космических систем связи является исследование возможности применения в них методов помехоустойчивого кодирования, необходимых для обеспечения требуемого качества передачи информации. В настоящей работе проведен анализ рекомендаций Консультативного комитета по космическим информационным системам (CCSDS) и Европейского космического агентства (ESA) по использованию помехоустойчивых кодов и исследовано влияние их параметров на помехоустойчивость и скорость передачи информации по каналам космических систем связи.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, канал связи.

RESEARCH OF PARAMETERS OF NOISEPROOF CODING IN THE ANALYSIS OF SPACE COMMUNICATION SYSTEMS

Bezuglov D.A.¹, Lykov A.P.², Kireev D.G.³, Pomortsev P.M.³, Shvidchenko S.A.¹

¹ *Russia, Rostov institute of technology of service and tourism (branch) of Federal public budgetary educational institution of the higher professional education «Southern Russian state university of economy and service», 344016, Rostov-on-Don, Varfolomeyev St. 215, e-mail: bezuglovda@mail.ru*

² *Voenny Research Training Center of the Air Force, "Air Force Academy" branch, Krasnodar, 350005, Str. Dzerzhinsky, 135. e-mail: p.s.p@bk.ru*

³ *Federal Space Agency (Roscosmos), Federal State Unitary Enterprise "Scientific-Production Association «Technomash», 127018, Moscow, 3-d passage of Marina Grove, 40, e-mail: metr@tmnpo.ru*

To the communication systems incorporating space segments and working in some (economically the most attractive) frequency ranges, demands and the restrictions stated in standards of the international organizations are made. One of the most important aspects of development of space communication systems, research of possibility of application of methods of noiseproof coding in them necessary for ensuring of demanded quality of information transfer is. In the real work the analysis of recommendations of Consulting committee on space information systems (CCSDS) and the European space agency (ESA) on use of noiseproof codes is carried out and influence of their parameters on a noise stability and speed of information transfer on channels of space communication systems is investigated.

Keywords: error control coding, channel.

Для исследования параметров каналов систем связи при использовании помехоустойчивого кодирования целесообразно рассматривать каналы связи без реализации в них помехоустойчивого кодирования и каналы связи с их использованием.

Передача некодированных данных достаточно широко исследована, поэтому необходимо более подробно рассмотреть принципы осуществления помехоустойчивого кодирования. Необходимо отметить, что криптографические методы кодирования в данной

работе не рассматриваются, а речь пойдет только о помехоустойчивом кодировании, целью применения которого является обеспечение верности передаваемых данных.

Процедура кодирования подразумевает внесение некоторой доли избыточности в информационное сообщение по определенным правилам. Доля избыточности определяет скорость кода. Если в процессе кодирования « k » информационных символов дополняются « p » проверочными символами, то скорость такого кода составляет:

$$r = \frac{k}{k + p} \quad (1)$$

Блок двоичных символов, содержащий k информационных и p проверочных символов, определяемых форматом используемого помехоустойчивого кода, называют кодовой комбинацией (КК). Длина КК составляет $n=k+p$ бит (двоичных символов).

На передачу избыточных символов расходуются энергетические и частотные ресурсы каналов связи, хотя они не содержат информацию, а лишь позволяют исправить на приемной стороне некоторое число ошибок, возникших под действием шумов в процессе передачи по каналу связи. Способность кода к исправлению t ошибок в одной КК определяется его минимальным кодовым расстоянием d_{\min} [1; 6]:

$$t = \frac{d_{\min} - 1}{2} \quad (2)$$

При разработке каналов систем связи Международные организации, такие как CCSDS и ESA в своих рекомендациях и стандартах приводят следующие параметры рекомендуемых при разработке каналов связи кодов Рида-Соломона, сверточных кодов и каскадных кодов.

Рекомендации Консультативного комитета по космическим информационным системам *CCSDS 401.0-B-2*, *401. 0-R-1*, предусматривают кодирование данных с помощью сверточного кода, перемежения символов и каскадного кода с использованием кода Рида-Соломона [2].

CCSDS рекомендует использовать несимметричный сверточный код с максимально правдоподобным (по Витерби) декодированием со следующими параметрами: длина кодового ограничения $L = 7$ бит; скорость кода $R = 1/2$ бита на символ; векторы связи регистров: $G(1)=1111001, G(2)=1011011$; метод декодирования – мягкие решения при не менее чем 8 уровнях квантования сигнала.

Рекомендуемый CCSDS код Рида-Соломона предназначен только для каскадного кодирования и имеет следующие параметры: число бит на один кодовый символ $J = 8$; число исправляемых ошибок в кодовом слове $Y=16$; глубина перемежения символов $I=5$ (разрешается $I=1$); параметры J , Y и I не зависят друг от друга; число символов на одно

кодированное слово $n=2^i-1=255$; число информационных символов в кодированном блоке (слове) $k=n-2^i=255-32=223$; неприводимый многочлен, генерирующий поле Галуа $GF(2^8)$ в поле Галуа G : $F(x) = x^8+x^7+x^2+x+1$; порождающий многочлен кода в поле Галуа:

$$g(x) = \prod_{j=1}^{143} (x-a_j),$$

где a_j – корни порождающего многочлена, которые совместно с полиномом $F(x)$ характеризуют данный систематический блочный код (255, 223); максимальная длина кодированного блока (слова) $n \cdot I \cdot j = 255 \cdot 5 \cdot 8 = 10200$ двоичных символов, из которых 1280 символов – проверочные и 8920 символов – информационные.

Требования к параметрам сверточного кода, предъявляемые стандартом Европейского космического агентства (ESA) *ESA PSS-04-103*, аналогичны соответствующим требованиям, изложенным в рекомендациях CCSDS. Требования к параметрам кода Рида-Соломона отличаются от рекомендаций CCSDS в части полинома, генерирующего поле Галуа.

При кодировании канала связи для надежного выделения символьной частоты и поддержания символьной синхронизации необходимо обеспечить такую плотность символьных переходов, чтобы на каждые 1000 последовательных символов приходилось не менее 125 символьных переходов.

Для получения большего выигрыша по помехоустойчивости, чем при использовании одного из указанных выше кодов, следует применять их комбинацию: код Рида-Соломона использовать в качестве внешнего (первого) кода, а сверточный код – в качестве внутреннего (второго) кода.

При анализе каналов связи традиционно принято рассматривать две группы показателей – энергетические и частотные, определяемые при фиксированных целевых показателях – скорости передачи информации и вероятности ошибки на бит.

Степень использования частотных ресурсов традиционно оценивается показателем α_ρ удельного расхода занимаемой радиочастотной полосы частот Δf_ρ , затрачиваемой на передачу единичного объема информации в секунду при заданных значениях вероятности ошибки на бит $p_\sigma \leq p_{\sigma mp}$ и уровня внеполосных излучений $\rho \leq \rho_{mp}$ [5]:

$$\alpha_\rho = \Delta f_{\text{выд}} / R \mid p_\sigma \leq p_{\sigma mp}, \rho \leq \rho_{mp} \quad (3)$$

Для каждого вида сигналов, используемых в каналах связи, при заданных значениях уровня внеполосных излучений этот показатель известен.

Эффективность использования радиолинией канала связи энергетических ресурсов оценивается показателем удельного расхода энергии сигнала на передачу одного бита информации:

$$\beta^2 = E_{\sigma} / N_0 = P_c \cdot T_{\sigma} / N_0 = P_c / (R \cdot N_0) \quad \text{при } p_{\sigma} = p_{\sigma mp}, \quad (4)$$

где N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности аддитивного нормального белого шума; P_c – средняя мощность сигнала на входе приёмника.

Источниками шума являются различные случайные космические и атмосферные помехи и внутренние шумы приёмников. В этом случае шум в радиолинии является флюктуационным и имеет равномерный спектр, ширина которого значительно превосходит полосу пропускания приёмного устройства [4]. Поэтому в качестве модели шума на входе приёмного устройства целесообразно рассматривать аддитивный нормальный белый шум с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 :

$$N_0(f) = k \cdot T^0, \quad f \in \Delta f_{\rho}, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана,

T^0 – эквивалентная шумовая температура приёмника.

Необходимо отметить, что показатели удельного расхода энергии β^2 и вероятности p_{σ} ошибки на бит определяют помехоустойчивость радиолинии.

При когерентном приёме, в соответствии с геометрическим представлением сигналов и шумов в функциональном пространстве в условиях нормального белого шума, действующего на входе приёмника двоичной радиолинии канала связи, вероятность ошибки в одном бите информации может быть найдена из выражения [1; 6]:

$$p_{\sigma} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi(\sqrt{\beta^2(1-k_c)}) \right], \quad (6)$$

где k_c – коэффициент корреляции символов;

$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-z}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – табулированная функция Крампа [4];

$z = \sqrt{\beta^2(1-k_c)}$ – аргумент функции Крампа.

При осуществлении некодированной передачи данных со скоростью R , при использовании сигнала с удельным расходом полосы частот на бит α_{ρ} при заданном уровне внеполосных излучений ρ занимаемая радиолинией полоса частот составит $\Delta f_{\rho} = \alpha_{\rho} \cdot R$.

В случае использования помехоустойчивого кодирования и при той же скорости передачи информации занимаемая радиолинией полоса частот увеличится до размера $\Delta f_{\rho(k)} = \alpha_{\rho} \cdot F_{(k)} = \alpha_{\rho} \cdot R / r_k = \Delta f_{\rho} / r_k$.

Таким образом, при переходе к передаче данных с использованием помехоустойчивого кода со скоростью r_k занимаемая радиолинией полоса частот увеличится в $\Delta f_{\rho(k)} / \Delta f_{\rho} = 1 / r_k$ раз, ($0 < r_k < 1$), то есть обратно пропорционально скорости кода.

При фиксированных мощности сигнала и скорости передачи информации по каналу связи удельный расход энергии сигнала на один кодированный символ $\beta_{(k)}^2$ уменьшится в $1/r_k$ раз по сравнению с некодированной передачей и составит $\beta_{(k)}^2 = \beta^2 \cdot r_k$.

При этом вероятность ошибки в кодированном символе $p_{c(k)}(\beta_{(k)}^2)$ на выходе демодулятора увеличится и составит $p_{c(k)}(\beta_{(k)}^2) > p_{\sigma}(\beta^2)$, то есть ухудшится качество приёма кодированных символов. Однако применение помехоустойчивого кода (n, k, t) позволяет на приёмной стороне в КК длиной n гарантированно исправлять до t ошибок включительно.

Наглядно изменение энергетических и частотных характеристик каналов связи при переходе к передаче данных с использованием помехоустойчивого кодирования представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1 поясняет изменение скорости передачи символов по радиолинии канала связи с использованием помехоустойчивого кодирования при обеспечении той же скорости передачи информации, что и при некодированной передаче данных.

На рис. 2 представлено изменение вероятности ошибки в символе сигнала КИМ₂-ФМ при передаче данных с использованием циклических кодов с длиной кодовой комбинации $n=31$ при фиксированной скорости передачи информации и мощности сигнала.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 зависимостей позволил выявить следующие особенности каналов связи с использованием помехоустойчивого кодирования.

При фиксированной скорости передачи информации по каналу связи повышается скорость передачи кодовых символов по радиолинии по сравнению с некодированной передачей, так как в единицу времени необходимо передавать ещё и избыточные (проверочные) символы.



Рис. 1. Изменение скорости передачи символов по каналу связи при переходе к передаче данных с использованием помехоустойчивого кодирования.

Это обусловлено тем, что снижение скорости передачи полезной информации недопустимо, поскольку приведёт к снижению полноты и оперативности (своевременности) предоставления данных потребителям. В свою очередь это потребует уменьшения длительности символа в видеотракте радиолинии канала связи пропорционально скорости используемого помехоустойчивого кода. Если в радиолинии без использования помехоустойчивого кодирования скорость передачи информации составляла R , то при использовании в ней помехоустойчивого кода со скоростью r_k скорость передачи кодовых символов должна быть $F_{(k)} = R / r_k$. Уменьшение длительности бита в видеотракте радиолинии приведёт к расширению занимаемой радиолинией полосы частот при фиксированном методе модуляции и заданном уровне внеполосных излучений.

Применение помехоустойчивых кодов в ТРЛ при фиксированных мощности сигнала и уровне внеполосных излучений приводит к двойственной ситуации (рис. 2).

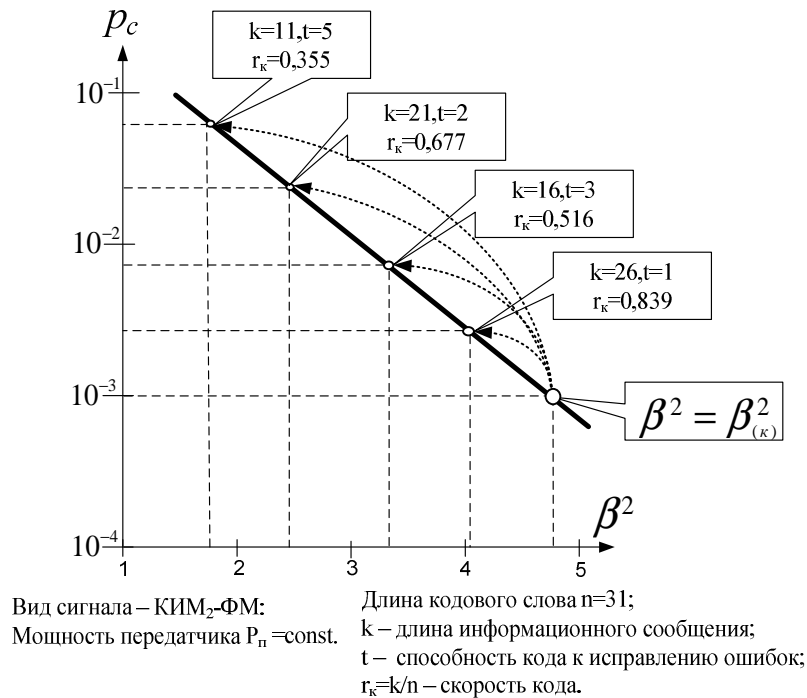


Рис. 2. Изменение вероятности ошибки на символ сигнала КИМ₂-ФМ при использовании помехоустойчивых кодов при фиксированных мощности сигнала и скорости передачи.

Выводы

Во-первых, использование помехоустойчивого кодирования приводит к снижению энергии, приходящейся на символ на входе демодулятора, что в свою очередь приводит к увеличению числа ошибок в ходе демодуляции принятого сигнала. При этом ухудшение верности передачи кодовых символов прямо пропорционально вносимой кодом избыточности в исходное информационное неизбыточное сообщение.

Во-вторых, использование помехоустойчивых кодов позволяет исправить часть ошибок в сообщении после демодуляции, причём способность кода возрастает с уменьшением скорости кода.

Рассматривая оба этих фактора совместно, можно сделать вывод о том, что при использовании помехоустойчивого кодирования для обеспечения требуемой помехоустойчивости каналов связи определение параметров кода является нетривиальной задачей, решение которой зависит от ресурсов, предоставленных радиолинии, условий её функционирования и предъявляемых требований к её помехоустойчивости. Также необходимо отметить, что использование помехоустойчивого кодирования при обеспечении той же скорости передачи информации приводит к расширению занимаемой радиолинией полосы частот.

Из представленного анализа следует, что применение помехоустойчивого кодирования в радиолиниях возможно лишь при наличии некоторого запаса между выделенной ей полосой частот и занимаемой радиолинией полосой частот, при которой обеспечивается необходимая скорость передачи полезной информации без использования помехоустойчивого кодирования. Этот запас может быть получен посредством увеличения полосы частот предоставляемой радиолинии канала связи. В случае недопустимости расширения занимаемой радиолинией полосы частот единственным способом компенсации, вносимой помехоустойчивым кодированием избыточности, является снижение скорости передачи информации. Возможность использования данного способа ограничена допустимостью снижения скорости передачи информации.

Исследование проведено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14В37.21.2067

Список литературы

1. Аношкин А.В., Горшков В.В., Журавлёв В.И. Методы обеспечения помехозащищённости радиолиний передачи дискретных сообщений. – М. : МО, 1988. – 64 с.
2. Аношкин А.В., Зайцев Ю.А., Куприйчук Д.И. Современное состояние и перспективы развития зарубежных информационно-телеметрических средств. – М. : РВСН, 1995. – Вып. 1. – 86 с.
3. Аношкин А.В., Куприйчук Д.И. Принципы построения информационно-телеметрических средств. – М. : РВСН, 1995. – Вып. 1. Бортовые информационно-телеметрические системы для телеметрирования медленноменяющихся параметров. – 78 с.
4. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. – М. : Радио и связь, 1988. – 280 с.
5. Системный анализ измерительных комплексов / В.В. Васильев [и др.]. – М. : РВСН, 1994. – 512 с.
6. Скляр Берн. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Изд. 2-е, испр. ; пер. с англ. – М. : ИД «Вильямс», 2003. – 628 с.

Рецензенты

Габриэльян Дмитрий Давидович, профессор кафедры «Радиоэлектроника», Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» Минобрнауки России, г. Ростов-на-Дону.

Звезда Марина Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Радиоэлектроника», Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» Минобрнауки России, г. Ростов-на-Дону.