

ОПИСАНИЕ РЕЖИМОВ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛЬНО-КОДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАДИОКАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

DESCRIPTION OF THE MODES OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE SIGNAL-CODE STRUCTURE IN THE SIMULATION MODEL OF A SATELLITE RADIO CHANNEL

**A. Tarasov
A. Kovalchuk**

Summary. Space systems integrate all input and output components capable of forming a communication module. They are located in the ground segment of the operations center and in the space segment on board the satellite. This, in turn, enables the control of space operations and other systems that support data distribution for applications. Since space missions collect huge amounts of scientific data, measurements, and images, high-speed transmission is of great importance. Issues related to information loss, interference during transmission, and the volume of data packets (frames) that can be sent deserve special attention. Given this, the requirements for the reliability of a single symbol during transmission are increasing significantly. In recent years, intensive research has been conducted to solve the problems of ensuring accurate transmission of information without distortion and to eliminate various types of interference in satellite communication systems. This research is based on the principle of creating command and measurement systems. Based on this principle, a new algorithm is being developed for evaluating signal parameters in the radio link of a command and measurement system, which allows selecting a particular radio link channel by first analyzing the interference environment not only at different speeds, but also using different coding methods for both received and transmitted data. During the research, various operating modes of the receiver were formalized, which supports the parallel operation of several channels using different signal-code structures, which allows for a wide range of data transmission speeds. Based on the results of modeling various modes of transmitter operation, it was found that the results obtained are consistent with the capabilities of using an adaptive data reception and transmission algorithm that supports automatic channel selection based on the data coding method and speed. It has been shown that the use of this method of information exchange between ground equipment and onboard equipment using a transmission speed selection algorithm, as well as various signal-code structures, provides not only significant time savings, but also a significant gain in the reliability of received and transmitted data compared to the traditional method, in which speeds are switched by commands in complex interference conditions.

Keywords: receiver, transmitter, information exchange methods, signal-code structures, radio link, ratio of useful signal to interference, command and measurement systems.

Тарасов Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»
amlang@mail.ru

Ковальчук Антон Сергеевич

аспирант, ФГОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»
tolstakoala@yandex.ru

Аннотация. Космические системы объединяют все компоненты входа и выхода, способные формировать коммуникационный модуль. Они находятся в наземном сегменте операционного центра и в космическом сегменте на борту спутника. Что в свою очередь позволяет управлять космическими операциями и другими системами, которые поддерживают распространение данных для приложений. Поскольку космические миссии собирают огромные объемы научных сведений, измерений и изображений, высокоскоростная передача имеет большое значение. Отдельного внимания заслуживают вопросы, связанные с потерей информации, помехами, возникающими в процессе передачи, и объемом пакетов данных (кадров), которые могут пересланы. С учетом отмеченного, существенным образом возрастают требования к достоверности единичного символа в процессе передачи. В последние годы интенсивно проводятся исследования, нацеленные на решение проблем обеспечения точности передачи информации без ее искажения и нивелирование различного рода помех в системах спутниковой связи. Эти исследования основаны на принципе создания командно-измерительных систем. На основе этого принципа разрабатывается новый алгоритм оценки параметров сигнала в радиолинии командно-измерительной системы, который позволяет выбирать тот или иной канал радиолинии, предварительно анализируя помеховую обстановку не только на различных скоростях, но и используя различные методы кодирования как принимаемых, так и передаваемых данных. В процессе исследования формализованы различные режимы работы приемника, который поддерживает параллельную работу нескольких каналов, используя при этом различные сигнально-кодовые конструкции, что позволяет обеспечивать широкий спектр скоростей передачи данных. По итогам моделирования различных режимов работы передатчика было установлено, что полученные результаты согласуются с возможностями использования адаптивного алгоритма приема и передачи данных, который поддерживает автоматический выбор канала по способу кодирования и скорости. Показано, что применение такого метода обмена информацией между наземной аппаратурой и бортовой с использованием алгоритма выбора скорости передачи, а также различных сигнально-кодовых конструкций, обеспечивает не только значительный выигрыш во времени, но и существенный выигрыш в достоверности принимаемых и передаваемых данных по сравнению с традиционным методом, в котором скорости в условиях сложной помеховой обстановки переключаются командами.

Ключевые слова: приёмник, передатчик, методы обмена информацией, сигнально-кодовые конструкции, радиолиния, отношение полезного сигнала к помехе, командно-измерительные системы.

Введение

В современном мире ни один информационный обмен между элементами космической системы не обходится без различного рода помех. В случае воздействия большого количества помех может существенно упасть скорость обмена данными в радиолинии, а также исказиться и сама информация.

Ежегодно спутниковая отрасль выделяет значительные средства на прогнозирование, мониторинг и устранение известных помех, возникающих при передаче информации. Для предотвращения и устранения помех применяется множество методов, начиная с усовершенствованных схем коррекции ошибок, таких как LDPC, регулирования уровня реактивной мощности в неблагоприятных погодных условиях, регулирования скорости передачи символов и резервного спутникового соединения, и заканчивая многими другими.

Но, как правило, «можно быть хорошо подготовленным только к известным событиям». Неожиданное ухудшение качества связи и помехи по-прежнему возникают из-за местных погодных условий, неопределенной мощности радиочастотного излучения, недобросовестных операторов и неисправных соседних устройств, которые могут вызвать непредсказуемые искажения и шумы. Одним из таких примеров является нескоординированное тестирование приложений передачи 5G вблизи земной станции без надлежащего уведомления операторов станции. После этого техническая команда земной станции должна диагностировать проблему, произвести соответствующие настройки или переждать помехи до тех пор, пока событие не пройдет. В течение всего времени действия помех зрители могут наблюдать артефакты, микро- и макроблокировку, зависание кадров и полную потерю сигнала.

Однотонная гармоническая помеха может быть нивелирована в рамках сравнительно узкого диапазона частот. При этом полезная информация в полной мере восстанавливается на «незатронутых» участках спектра. Любая помеха, которая сосредоточена в спектре на выходе корреляционного приёмника трансформируется в широкополосную благодаря псевдошумовым сигналам, что позволяет обеспечить ее активное подавление.

Как известно, в условиях наличия помех, эффективная работа приемника определяется скоростью передачи данных, типом сигнально-кодовой конструкции, а также методами, которые применяются для обработки сигнала в приёмнике. В этой статье мы рассмотрим, как влияют различные методы кодирования при приёме и передаче данных в условиях возникновения помех, сформируем различные режимы, которые лягут в основу разработки алгоритма оценки параметров сигнально-кодовой конструкции.

Используемые в современных космических миссиях командно-измерительные системы (КИС), все в большей степени опираются на псевдошумовые сигналы [2]. Псевдошумовые сигналы генерирует двоичную последовательность, которая выглядит случайной, но остается детерминированной и повторяемой. Системы спутниковой навигации, такие как GPS, Galileo и BeiDou, а также различные коммуникационные приложения, полагаются на эти коды. Псевдошумовые сигналы обладают ключевыми характеристиками, которые делают их незаменимыми для навигации и связи. Они следуют детерминированному шаблону, поскольку генерируются алгоритмами, что обеспечивает точное воспроизведение. Несмотря на свою структурированную конструкцию, они обладают статистическими свойствами, схожими с белым шумом, что делает их случайными.

Используя указанные характеристики и принципы, в рамках проводимого исследования планируется разработать алгоритм адаптации в имитационной модели радиолинии КИС. Предполагается, что этот алгоритм, в зависимости от помеховой обстановки, даст возможность выбирать наиболее оптимальный и приемлемый информационный канал с учетом анализа параметра отношения сигнала к шуму не только на различных скоростях, но и с использованием различных сигнально-кодовых конструкций. Подключение каналов будет происходить автоматически, что весьма актуально для управления низкоорбитальными КА.

Описание режимов

В целях предотвращения влияния помех на передаваемую с Земли и получаемую информацию с БА в алгоритме оценки параметров сигнально-кодовой конструкции в имитационной модели радиоканала спутниковой связи предусмотрено 3 режима.

1 режим предполагает использование классического алгоритма передачи данных в радиолинии с автоматическим изменением скорости передачи данных без использования сигнально-кодовых конструкций.

В таком случае корректность сообщения определяется сравнением полученной 16-битной контрольной суммы, идущей в конце каждой КПИ, с посчитанной. В случае совпадения контрольной суммы бортовая аппаратура отправляет на Землю обратное сообщение о выполнении той или иной КПИ-квитанции. Если квитанция не пришла за 1 секунду, то считается, что сообщение не было получено бортовой аппаратурой и передатчик автоматически уменьшает свою скорость. Более подробно алгоритм, а также логика переключения между режимами будут описаны в следующей статье.

2 режим предполагает использование кодирования Хэмминга. Вся информация, передаваемая с Земли,

перед отправкой делится на блоки разрядностью n бит (в том числе и контрольная сумма). Каждый блок называется кодовым словом (КС). КС, в свою очередь, состоит из данных, состоящих из $n-m$ бит и синдрома, состоящего из m бит. Каждый бит синдрома контролирует определённый бит данных. Для того, чтобы определить, какими битами синдрома контролируется нужный нам бит, необходимо разложить номер бита данных по степеням числа 2. В случае возникновения помех при передаче информации приёмник способен исправить единичную ошибку. Если после декодирования данных контрольная сумма совпала, то БА также отправляет квитанцию на Землю. Если в течение 1 секунды квитанция на Землю не пришла, НА автоматически понижает скорость.

Необходимое условие автокоррекции задаёт соотношение n и m [3]:

$$2^m \geq n + 1 \quad (1)$$

Тогда эффективность передачи данных с помощью такого кода равна:

$$\text{КПД: } \frac{\text{данные}}{\text{всё КС}} = \frac{n-m}{n} = 1 - \frac{m}{n} \quad (2)$$

Любая физическая линия связи (ЛС) характеризуется определённым уровнем сигнал/шум, потенциально способного исказить любые разряды сообщения [3]. При построении модели были сделаны два допущения:

1. Уровень шума $p = \text{const}$ (вероятность искажения одного разряда);
2. Одиночные помехи распределены случайно

В этом случае мы сможем оценить не только эффективность (2), заданную самим КС, но и воспользоваться классическим определением вероятности [3]. Таким образом, формула оценки эффективности кода приобретает следующий вид:

$$\text{КПД: } \eta = \eta_{\text{КС}} P_{\text{без повторной передачи}} = \frac{n-m}{n} (P_{\text{без ошибок}} + P_{\text{с 1 ошибкой}}) \quad (3)$$

Правая часть формулы является КПД при идеальной линии с отсутствием шума, левая часть — учитывает только благоприятные вероятности, когда в КС не произошло ошибок, или произошла всего 1 ошибка, которую можно сразу исправить. В остальных случаях придется запрашивать повторную пересылку данных.

Из данной формулы следует, что КПД при передаче информации с использованием кодов Хэмминга выше, чем при использовании классического алгоритма передачи данных.

3 режим предполагает использование кодов Рида-Соломона. Коды Рида-Соломона работают над конечны-

ми полями, что означает, что все операции выполняются с элементами поля $\mathbf{GF}(2^m)$, где m — целое число.

Подобно второму режиму, данные перед отправкой разбиваются на блоки, каждый из которых представляет собой элемент конечного поля. К исходным данным добавляются контрольные символы. Число добавленных символов определяет способность кода исправлять ошибки. Например, код $RS(n, k)$ имеет n символов в кодовом слове, из которых k — это количество символов исходных данных, а $n-k$ — **синдром**.

Необходимое условие автокоррекции имеет следующий вид:

$$t = \frac{n-k}{2} \quad (4)$$

Где n — всё КС, а k — количество символов исходных данных, t — максимальное число ошибок, которое может исправить код. КПД будет вычисляться аналогично формуле (2).

$$\text{КПД: } \frac{\text{данные}}{\text{всё КС}} = \frac{n-k}{n} = 1 - \frac{k}{n} \quad (5)$$

В свою очередь, формула оценки эффективности применения кодов Рида-Соломона будет равна:

$$\text{КПД: } \eta = \eta_{\text{КС}} P_{\text{без повторной передачи}} = \frac{n-k}{n} (P_{\text{без ошибок}} + P_{\text{с } t \text{ ошибками}}) \quad (6)$$

Итак, поскольку коды Рида-Соломона способны исправлять большее количество ошибок по сравнению с кодами Хэмминга, вероятность того, что сообщение с Земли дойдёт с первой попытки выше. А, следовательно, коды Рида-Соломона наиболее надёжны для использования в условиях плохого соотношения сигнал\шум.

Экспериментальная часть

Согласно рекомендациям CCSDS [6], структура передаваемой информации выглядит следующим образом: вначале идёт **стартовая последовательность**, состоящая из 31 символа, далее идут **закодированные данные**, имеющие динамическую длину, последней передаётся **завершающая последовательность**, которая, как правило, содержит в себе контрольную сумму. По завершающей последовательности модель командно-измерительной системы принимает решение о правильности принятого массива.

Как было упомянуто выше, каждому блоку КПИ предшествует некая стартовая последовательность, которая передаётся с той же скоростью, что и информация. В качестве примера выберем последовательность максимально возможной длины (М-последовательность) длиной 31 символ с соответствующим порождающим полиномом 5-й степени и сравним время, за которое

эта последовательность передаётся на разных скоростях в разных режимах предлагаемой системы, и время, за которое эта последовательность передаётся в уже использующихся системах.

На таблице 1 представлен пример М-последовательности. Стоит отметить, что эта последовательность выбрана неслучайно, так как впоследствии предполагается, что решение о выборе канала и, следовательно, переключение используемого кодирования, а также смена скорости передачи информации будет при надобности происходить именно после передачи стартовой последовательности.

С помощью программы, написанной на языке программирования Python, была составлена модель, кото-

Таблица 1.

М-последовательность	
М-последовательность	Порождаемый полином $h(x)$
1001000010101110110001111100110	$h(x) = x^5 + x^2 + 1$

рая учитывает вероятность ошибки и время передачи данных для разных скоростей. Результаты моделирования представлены на рисунках 1 и 2.

Из рисунков следует, что использование систем с кодами автокоррекции обеспечивает существенный выигрыш во времени за счёт минимизации вероятности ошибки при передаче во время неудовлетворительной помеховой обстановки.

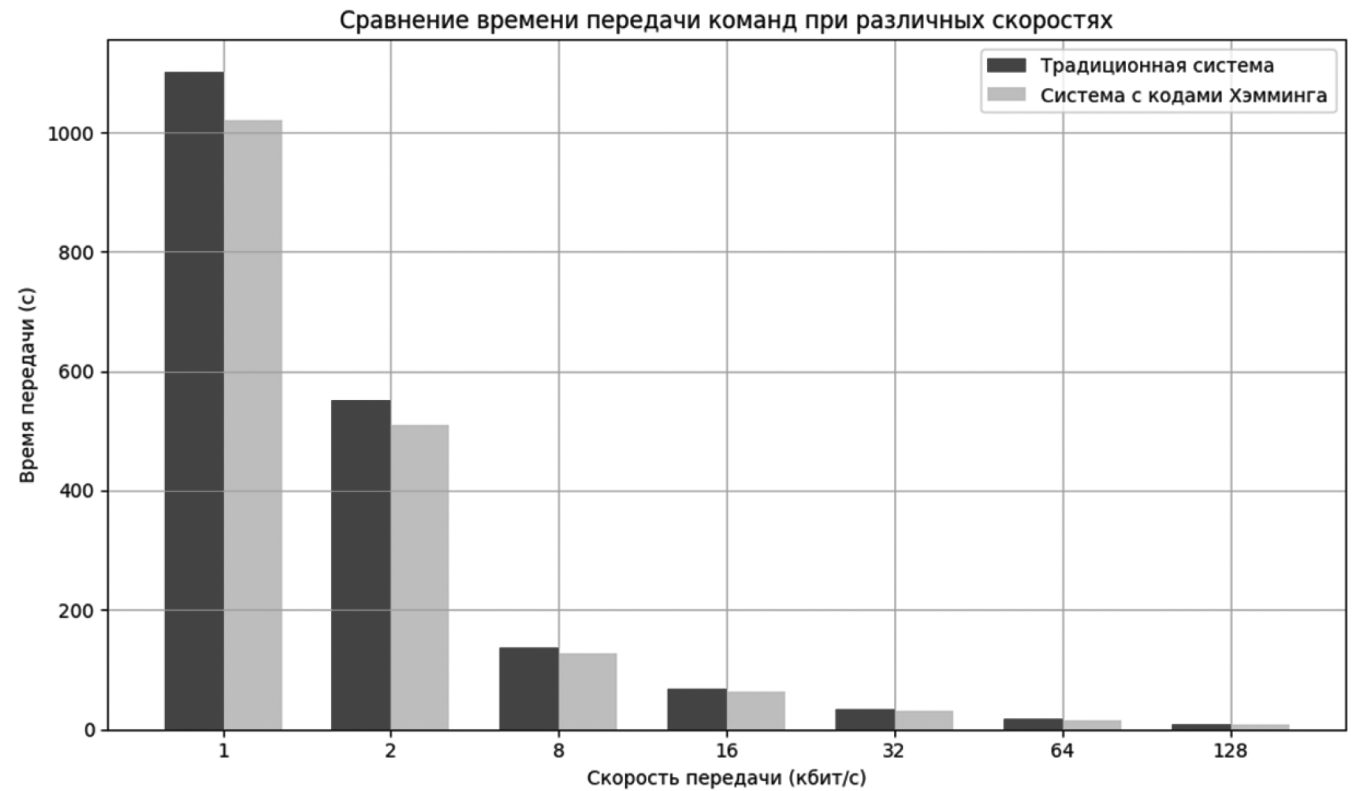


Рис. 1. Результаты моделирования системы с использованием кодов Хэмминга

ЛИТЕРАТУРА

1. Невдяев Л. CDMA: Борьба с помехами //Сети/Network world: электронный журнал. 2000. №10. <https://www.osp.ru/nets/2000/10/141420> (дата обращения 15.05.2025)
2. Формирование обобщённых данных. Экспериментальная спецификация CCSDS 551.1-0-1 //Научные разработки и исследования в области стандартов космических систем связи. Оранжевая книга.2015, вып. 1. 48 с. [https://public.ccsds.org/Pubs/551x1o1e1\(R\).pdf](https://public.ccsds.org/Pubs/551x1o1e1(R).pdf) (дата обращения 17.05.2025)
3. Тарасов А.Г., Алгоритм выбора оптимальной длины слова помехоустойчивого кода при передаче данных по линии связи с постоянным уровнем шума/ X-ая научная конференция МГТУ «СТАНКИН» Учебно-научного центра Математического моделирования МГТУ «СТАНКИН» — ИММ РАН. Программа, Сборник докладов. М.: Янус-К ИЦ ГОУ МГТУ «СТАНКИН», 2007 г., стр.68–70 (дата обращения 18.05.2025)
4. Мальцев Г.Н., Травкин В.С. Оптимальный приём сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных структурных помех// Информационно управляющие системы, 2006, №5(24). С.36–42. (дата обращения 19.05.2025)
5. Telecommand Part 1 Channel service. Recommendation for Space Data System Standarts CCSDS 201.0-B3. Текст: электронный //Blue Book. Washington, DC: CCSDS. 2000. 42 p. <https://public.ccsds.org/Pubs/201x0b3s.pdf> (дата обращения 21.05.2025)

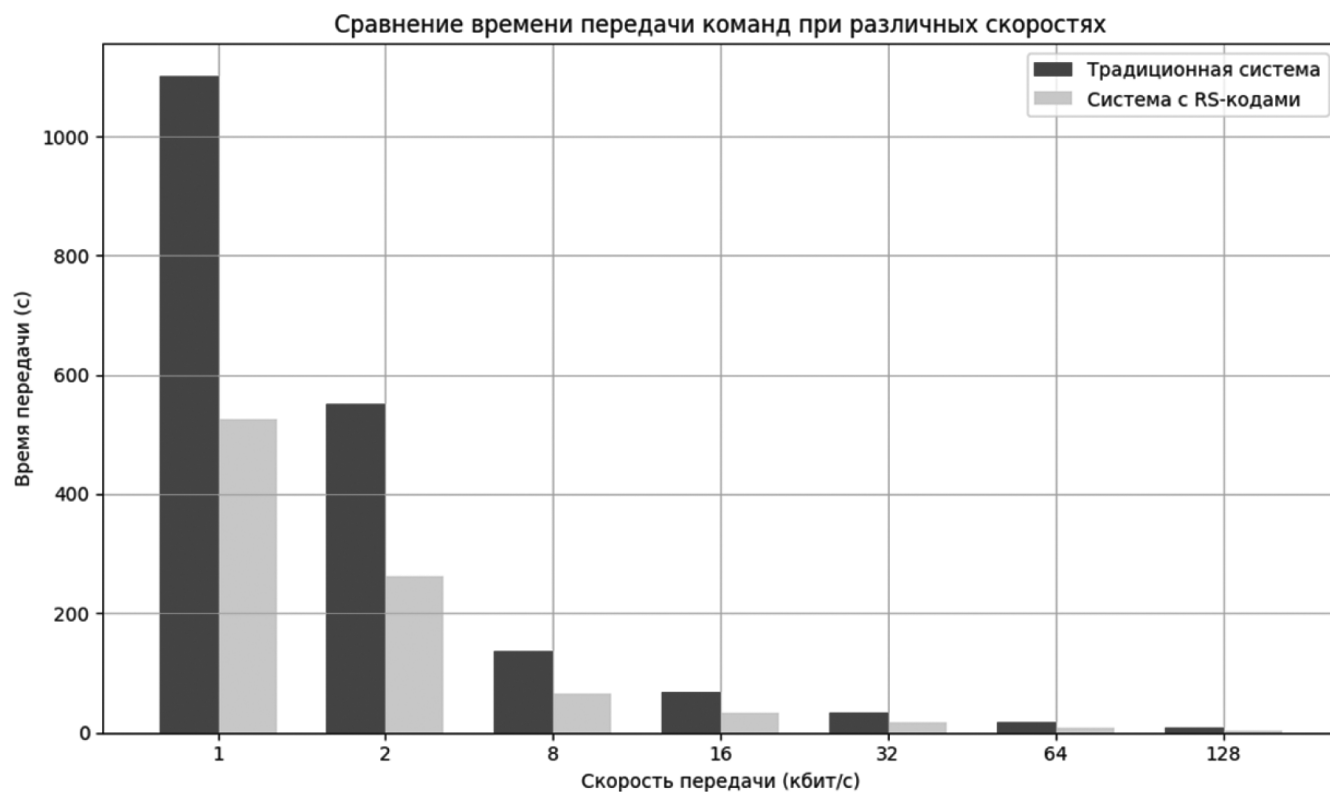


Рис. 2. Результаты моделирования системы с использованием кодов Рида-Соломона

6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с (дата обращения 25.05.2024)
7. Бортовая аппаратура командно-измерительной системы для космических аппаратов ГЛОНАСС: результаты эксплуатации и перспективы развития/ Н.Н. Булгаков, В.Г. Глыбин, А.А. Кривошеин, А.С. Семочкин, журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2014, том 1, выпуск 2, с.65–73. (дата обращения 27.05.2024)
8. Методы управляемого разнесённого приёма данных телеизмерений / Воронцов В.Л., журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2019, том 6, выпуск 4, с. 66–74 (дата обращения 27.05.2024)

© Тарасов Алексей Геннадьевич (amlang@mail.ru); Ковальчук Антон Сергеевич (tolstakoala@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»