

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРИЕМА И ДЕКОДИРОВАНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ МПД ДЕКОДЕРА ДЛЯ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ С НИЗКООРБИТАЛЬНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Актуальность темы определяется необходимостью повышения скорости передачи данных в системах спутниковой телекоммуникации с помощью применения помехозащищенного кодирования. Скорость передачи данных в радиоканале фактически определяется уровнем помех, присутствующих в силу того, что среда передачи радиосигнала является средой общего пользования и в ней работают другие электронные устройства. Целью статьи является разработка алгоритма кодирования и декодирования входного сигнала с применением многопорогового декодера (МПД) жестких решений для абонентских терминалов (АТ), работающих с низкоорбитальными космическими аппаратами (НКА), и его сравнение с обычным РС декодером «Месси». Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о том, что применение разработанного алгоритма оправдано в системах, где предъявляются более жесткие требования к вероятности появления ошибки в канале связи, в то время как декодер «Месси» целесообразней применять при наличии ограничений на вычислительную сложность.

Ключевые слова: коды Рида—Соломона, многопороговые декодеры, системы спутниковой телекоммуникации, низкоорбитальные космические аппараты, декодер «Месси», средняя частота ошибок при передаче, маркерный сигнал.

Введение. АТ, работающие с НКА, предназначены для низкоскоростной передачи цифровой информации абонентам в виде коротких сообщений.

Для осуществления связи между АТ и бортовым радиотехническим комплексом (БРТК) необходимо произвести детектирование и прием маркерного сигнала (МС). МС содержит информацию о том, предназначены ли данные непосредственно для АТ. Правильный разбор полученного МС зависит от наличия ошибок при декодировании сигнала.

Снизить вероятности нахождения ошибки в полученных данных помогает помехоустойчивое кодирование [1–5].

Существует множество алгоритмов декодирования кодовых последовательностей, однако в разрабатываемом алгоритме было принято решение использовать МПД как оптимальный вариант по соотношению эффективности и сложности реализации [6].

Цель работы состоит в том, чтобы разработать алгоритм приема и декодирования входного сигнала с применением МПД декодера жестких решений для АТ, работающих с НКА, и провести сравнитель-

ный анализ МПД с декодером РС, сделать расчет затраченного времени на декодирование, построить график зависимости средней частоты ошибок при передаче (BER) от E_b/N_0 .

Теория. МПД является развитием простейшего порогового декодера «Месси» [7, 8]. МПД обладает важнейшим строго доказанным свойством — схожимостью к решению оптимального декодера [9].

Рассмотрим принцип работы МПД, который применяется для декодирования k двоичных символов (рис. 1).

Как видно из рис. 1, кодер формирует кодовое слово $C(X) = (U(X), V(X))$, где $U(X)$ и $V(X)$ — последовательности информационных и проверочных бит. На вход декодера подается информационная последовательность с шумами. Сначала вычисляется синдром $S = uH^T$ (здесь H — проверочная матрица кода) принятого сообщения и для каждого информационного символа U_j , $1 \leq j \leq k$, выделяется множество $\{S_{j\alpha}\}$ элементов синдрома ошибок [10].

Метод МПД заключается в том, что для произвольно взятого символа U_j вычисляется функция правдоподобия L_j , зависящая от относящихся



Рис. 1. Алгоритм многопорогового декодирования



Рис. 2. Блок-схема приема и декодирования входного сигнала на БРТК

к нему проверок $\{S_{j_m}\}$ и j -го элемента регистра d по формуле:

$$L_j = \sum_{\{j_m\}} S_{j_m} + d_j, \quad (1)$$

где $J = d - 1$ — количество проверок (ненулевых элементов порождающего полинома $g(x)$); d_j — символ разностного регистра, относящийся к декодируемому символу U_j (равный 0 или 1); $\{S_{j_m}\}$ — j -й элемент синдромного регистра, входящий в множество проверок относительно декодируемого символа U_j .

Число слагаемых в уравнении (1) равно минимальному кодовому расстоянию d . Если $L_j > T$, где $T = (d - 1) / 2$ — пороговое значение, то символ U_j , все проверки $\{S_{j_m}\}$ и символ d_j инвертируются, после чего выбирается другой символ U_m , $m \neq j$, для него снова вычисляется сумма L_m . Если же $L_j \leq T$,

то сразу осуществляется переход к декодированию следующего символа U_m [11].

Разработка алгоритма приема и декодирования входного сигнала с применением МПД декодера для АТ, работающих с НКА. При приеме входного сигнала для определения возможности работы с БРТК в сеансе связи обмена данными абонентский терминал (АТ) получает следующую необходимую информацию:

- БРТК в штатном состоянии;
- номер регионов, географических и спецрегионов, обслуживаемых в данном минутном кадре или субкадре для записи данных;
- наличие вызова на связь с БРТК для сброса данных;
- наличие ограничений на работу для определенных групп пользователей по полю «Флаги управления доступом»;
- параметры для доступа к БРТК по разрешенным для данного АТ типам канала доступа.

Вся вышеперечисленная информация становится доступной после декодирования полученного входного сигнала. Блок-схема декодирования входного сигнала представлена на рис. 2.

Описание разработанного алгоритма приема и декодирования сигнала для БРТК. Назначение блока «Вхождение в связь» — обнаружение и оценка параметров входного сигнала, а также определение начала кодированной информационной части канального блока (КБ).

При приеме КБ после обнаружения синхрорамбулы (СП) отсчеты сигнала СП на отрезке модулированной несущей (МН) сохраняются в памяти процессора и используются повторно для оценки доплеровского смещения и начальной фазы несущей частоты, а также для определения задержки по тактам.

Далее эти оценки вводятся в качестве начальных значений в схему восстановления несущей частоты и схему тактовой синхронизации.

Назначение блока «Демодуляция» — демодулятор в процессе своей работы должен выполнить три вида синхронизации сигнала: тактовую, частотную и фазовую. Также в демодуляторе присутствуют обнаружители, основанные на корреляторах. При правильно выполненной синхронизации на выходе демодулятора получаем уровни от нуля до семи (работа по мягким решениям), которые подаются на декодер.

Назначение блока «Сверточное декодирование» — сверточный декодер кроме определения декодированного бита по некоторому количеству предыдущих кодовых слов предусматривает возможность исправления как можно большего числа ошибок, если некоторые кодовые слова приняты некорректно. В основу декодера положен принцип максимального правдоподобия. Данный принцип применим, если все исходные последовательности равновероятны.

Назначение блока «Скремблирование» — преобразование входного сигнала в псевдослучайную последовательность, что является обработкой и шифрованием сигнала таким образом, что он может быть принят только приемником, оснащенным соответствующим дешифратором.

Назначение блока «МПД» — исправление информационной последовательности, полученной после скремблирования.

Назначение блока «CRC декодирование» — обнаружение неисправленных ошибок другими деко-

дерами. CRC декодер осуществляет деление кодового слова на порождающий многочлен кода, в случае если полученное значение остатка от деления отлично от нуля — это означает наличие ошибок в кодовом слове.

Назначение блока «Декодированные данные» — представляет из себя только блок данных, полученных в результате декодирования, а также информацию о наличии или отсутствии ошибок, полученных в результате невозможности декодирования.

Назначение блока «АПО» — представляет собой блок оценки зашумленности канала передачи данных

Назначение блока «Выбор режима работы» — предназначен для выбора работы АТ.

Описание эксперимента. С целью сравнения используемого метода декодирования в разработанном алгоритме с обычным РС декодером были промоделированы следующие варианты сигналов:

- некогерентный сигнал;
 - когерентный сигнал;
 - сигнал после РС декодера «Мессе» с жесткими решениями;
 - сигнал после МПД с жесткими решениями.
- Образующий полином РС кода:

$$g(x) = (x + a)(x + a^2)(x + a^3) \dots (x + a^{16}), \quad (2)$$

где a — элемент поля Галуа.

Полином поля Галуа $GF(2^8)$, определяющий арифметику поля:

$$p(z) = z^8 + z^4 + z^3 + z^2 + 1. \quad (3)$$

Информационная последовательность на входе кодера:

$$V_{инф}(X) = \sum_{i=0}^{119} a^i x^i, \quad (4)$$

где a^i — коэффициент при x^i — элемент поля Галуа, вычисленный с использованием $p(z)$.

Моделирование декодирования произведено в программе MATLAB¹, в интегрированной в него графической среде Simulink².

Результаты и обсуждение эксперимента.

Построение кривых BER.

При моделировании будем использовать GMSK модуляцию, вероятность ошибки находится по формуле:

$$P_{ош} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (5)$$

где E_b — энергия сигнала на бит; N_0 — энергетическая спектральная плотность шума; Q — функция Гаусса, которая находится по формуле:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \quad (6)$$

где $\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ — функция ошибок, которая находится по формуле:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du. \quad (7)$$

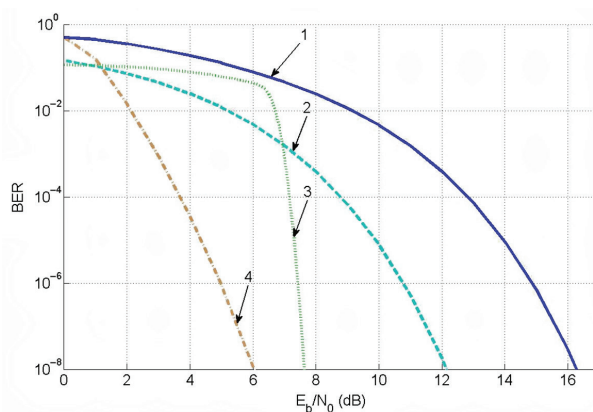


Рис. 3. Зависимость средней частоты ошибок при передаче (BER) в зависимости от E_b/N_0 для GMSK модуляции, где:

- 1 — некогерентный сигнал; 2 — когерентный сигнал;
- 3 — когерентный сигнал после РС декодера;
- 4 — когерентный сигнал после МПД

Таблица 1

Характеристики моделируемого сигнала

Информационная последовательность	Метод декодирования	Вносимые ошибки, шт.
Длина кодового блока (n) — 136 Б.; Длина информационного блока (k) — 120 Б.; Длина проверочного блока ($2l$) — 10 Б.	РС декодер «Мессе» с жесткими решениями	0
		1
		3
		6
Длина кодового блока (n) — 136 Б.; Длина информационного блока (k) — 120 Б.; Длина проверочного блока ($2l$) — 10 Б.; Кодовое расстояние, (d) — 9; Итераций декодирования, (l) — 20	МПД с жесткими решениями	0
		1
		3
		6

Используя формулы (5)–(7), построим графики зависимости средней частоты ошибок при передаче (BER) в зависимости от E_b/N_0 для GMSK модуляции некогерентного сигнала, когерентного сигнала, когерентного сигнала после помехоустойчивого МПД и когерентного сигнала после помехоустойчивого РС декодера. Полученные графики представлены на рис. 3.

Из полученных графиков, приведенных на рис. 3, найдем значение $P_{ош}$ и определим величину E_b/N_0 для найденного значения $P_{ош}$:

$$P_{ош} = 10^{-3}, \text{ а величина } E_b/N_0 = 3 \text{ дБ.}$$

Расчет затраченного времени на декодирование.

Характеристики моделируемого сигнала представлены в табл. 1.

Фиксация затраченного времени на декодирование проводилась посредством встроенной в Simulink функции tic и toc. Для получения более точного результата моделирования была собрана статистика по 100 итерациям и посчитано среднее время, затраченное на декодирование.

Результаты исследований

Метод декодирования	Число итераций	Вносимые ошибки, шт.	Исправленные ошибки, шт.	Среднее затраченное время, мс
РС декодер «Мессии» с жесткими решениями	100	0	Исправлений нет	0,061
		1	1	0,21
		3	3	0,758
		6	6	2,14
МПД с жесткими решениями	100	0	Исправлений нет	0,096
		1	1	1,185
		3	3	3,81
		6	6	12,31

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Из полученных данных видно (табл. 1), что при исправлении шести ошибок лучшее время декодирования показал РС декодер «Мессии» с жесткими решениями.

Заключение. В ходе работы проведен сравнительный анализ МПД в разработанном алгоритме с обычным РС декодером.

Из полученных графиков зависимостей BER видно, что энергетический выигрыш, при использовании алгоритма «МПД с жесткими решениями», повышается на 4 дБ в сравнении с алгоритмом «РС декодер «Мессии» с жесткими решениями» при том же значении $P_{\text{ош}}$.

При одинаковом количестве внесенных ошибок наименьшее время декодирования было зафиксировано у алгоритма «РС декодер «Мессии» с жесткими решениями», равное 10,14 мс, в то время как алгоритм «МПД с жесткими решениями» потребовал в пять раз больше времени. Данный результат обусловлен тем, что для алгоритма «МПД с жесткими решениями» необходимо произвести в пять раз больше операций, чем для алгоритма «РС декодер «Мессии» с жесткими решениями».

Из полученных результатов видно, что алгоритм «РС декодер «Мессии» с жесткими решениями» лучше использовать в системах, где имеются ограничения на вычислительную сложность. Применение алгоритма «МПД с жесткими решениями» оправданно в системах, где предъявляются более жесткие требования к вероятности появления ошибки в канале связи.

Полученные результаты планируется внедрить в 2021–2022 годах на носимые АТ для уверенного приема коротких сообщений и текстовых файлов в условиях Крайнего Севера посредством НКА.

Примечания

¹Номер лицензии 923416.

²Номер лицензии 923417.

Библиографический список

1. Питерсон У. У. Коды, исправляющие ошибки / пер. с англ. Москва: Мир, 1976. 594 с.
2. Morelos-Zaragoza R. H. The Art of Error Correcting Coding. 1st ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002. 221 p. ISBN 100471495816.
3. Blahut R. E. Theory and Practice of Error Control Codes. Boston: Addison-Wesley, 1983. 500 p. ISBN 0201101025; 978-0201101027.
4. Майстренко В. А., Привалов Д. Д., Седунов Д. П. Сравнительный анализ временных характеристик декодирования полноразмерных и укороченных кодов Рида–Соломона // Техника радиосвязи. 2018. № 1 (36). С. 103–111.
5. Майстренко В. А., Седунов Д. П. Сравнительный анализ декодирования каскадных укороченных кодов Рида–Соломона в адаптивных системах обмена данными с обычным декодированием // Техника радиосвязи. 2019. № 3 (42). С. 60–68. DOI: 10.33286/2075-8693-2019-42-60-68.
6. Золотарев В. В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования: моногр. / под ред. Ю. Б. Зубарева. Москва: Радио и связь; Горячая линия – Телеком, 2006. 274 с. ISBN 5-256-01815-9; 5-93517-343-3.
7. Мессии Дж. Л. Пороговое декодирование / пер. с англ. Ю. Л. Сагаловича; под ред. Э. Л. Блоха. Москва: Мир, 1966. 207 с.
8. Зубарев Ю. Б., Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 1. С. 1–12.
9. Самойленко С. И., Давыдов А. А., Золотарев В. В., Третьякова Е. И. Вычислительные сети. Адаптивность, помехоустойчивость, надежность / отв. ред. Ю. Г. Дадаев. Москва: Наука, 1981. 277 с.
10. Демидов Д. С. Применение многопороговых декодеров в системах адаптивного кодирования // Вестник науки и образования. 2016. № 10 (22). С. 28–32.
11. Золотарев В. В. Обобщение алгоритма МПД на недвоичный код // Мобильные системы. 2007. № 2. С. 36–39.

СЕДУНОВ Денис Петрович, начальник сектора аналитики и проектирования программно-аппаратных

средств отдела по разработке продукции гражданского назначения.

SPIN-код: 7909-3593

AuthorID (РИНЦ): 874443

Адрес для переписки: pokki122@mail.ru

ЖУНУСОВА Алия Сегизбаевна, инженер-конструктор 2-й категории отдела по разработке продукции гражданского назначения.

SPIN-код: 7048-8489

Адрес для переписки: aliya_jakina90@mail.ru

Для цитирования

Седунов Д. П., Жунусов А. С. Разработка алгоритма приема и декодирования входного сигнала с применением МПД декодера для абонентских терминалов, работающих с низкоорбитальными космическими аппаратами // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 59–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-59-63.

Статья поступила в редакцию 29.11.2020 г.

© Д. П. Седунов, А. С. Жунусова