

Исследование корректирующих способностей помехоустойчивого кода системы остаточных классов

И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Аннотация: Данная статья рассматривает технологию мобильной связи для абонентов, движущихся с большими скоростями в поездах железнодорожного сообщения или метро (*Long-Term Evolution for Railways – LTE-R*), ключевое место в которой занимают системы мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (*Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM*), и указывает на необходимость разработки новых методов помехоустойчивого кодирования для обеспечения эффективной передачи данных в условиях железнодорожной инфраструктуры. Рассматриваются проблемы, связанные с передачей больших массивов информации в условиях высокой скорости передвижения поездов и непостоянства окружающей среды, а также особенности помех, связанных с железнодорожной инфраструктурой. В качестве помехоустойчивых кодов предлагается использование модулярных кодов, которые, в отличие от применяемых кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), являются арифметическими.

Ключевые слова: стандарт *LTE-R*, система *OFDM*, модулярные коды, помехоустойчивость, интервал попадания ошибки, коды БЧХ, пакет ошибок, доля ошибок.

Введение

Технология мобильной связи для абонентов, движущихся с большими скоростями в поездах железнодорожного сообщения или метро (*Long-Term Evolution for Railways - LTE-R*) основана на стандарте беспроводной высокоскоростной передачи данных для терминалов, работающих с данными (*Long-Term Evolution - LTE*). Это наиболее распространенная технология для мобильной связи четвертого поколения (*4G*).

LTE-R был разработан специально для удовлетворения требований железнодорожной отрасли, таких, как высокая скорость передачи данных, надежность и безопасность. Он позволяет передавать данные в реальном времени, включая голосовые сообщения, видео и данные о местоположении, что помогает операторам железнодорожной инфраструктуры управлять движением поездов и предоставлять пассажирам информацию о расписании и задержках. Данный стандарт также имеет особенности, которые

обеспечивают стабильную связь в условиях, характерных для железнодорожных магистралей, таких, как быстрое перемещение поездов и высокий уровень шума и вибрации.

В настоящее время система *LTE-R* внедряется в нескольких странах мира, в том числе, в Китае, Южной Корее, Индии и России. Ожидается, что в будущем она станет стандартом связи для железнодорожных перевозок [1, 2].

LTE-R предоставляет возможность передачи данных в реальном времени на железнодорожных маршрутах с высокой скоростью передачи, что может быть особенно полезно для передачи больших объемов данных, таких, как видео, аудио, сенсорные данные и другие данные. Использование *LTE-R* может быть перспективным в следующих областях [3]:

- бортовое и придорожное видеонаблюдение высокой четкости, которое поможет обеспечить безопасность на железнодорожном транспорте.
- быстрый доступ к ресурсам сети Интернет в вагонах поездов;
- видеопотоки, которые будут использоваться для связи поезда с диспетчером и передачи видео с камер, расположенных у дверных проемов;
- сервисы, доступные на мобильных устройствах, для поиска и оплаты железнодорожных билетов;
- системы сбора информации об инфраструктуре железнодорожного транспорта с помощью датчиков, связанных с Интернетом вещей, и передача этой информации в центр обработки данных для анализа и последующего принятия управленческих решений.

Таким образом, все перспективы использования *LTE-R* говорят об увеличении передаваемых объемов данных. Для передачи данных в реальном времени в *LTE-R* используется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM*), которая позволяет увеличить эффективность использования доступного спектра частот и повысить скорость передачи

данных. Также *OFDM* обеспечивает хорошую устойчивость к помехам и интерференции, где каждая поднесущая передается в виде короткого символа, что позволяет компенсировать эффекты канала и уменьшить межсимвольные интерференции.

Железнодорожный транспорт представляет собой сложную среду с различными видами помех, которые могут повлиять на качество передачи данных в системе *LTE-R*. Рассмотрим некоторые из них:

1. Помехи от движущихся объектов: в железнодорожном транспорте движущиеся поезда, вагоны и другие объекты могут создавать помехи, вызванные доплеровским сдвигом частоты. Это может привести к потере сигнала, искажению данных и снижению качества связи.

2. Помехи от металлических поверхностей: железнодорожные пути, станции, мосты и другие металлические поверхности могут вызывать отражение, рассеяние и затухание радиосигналов, что также может привести к снижению качества связи.

3. Помехи от электромагнитных источников: в железнодорожном транспорте могут присутствовать различные электромагнитные источники, такие, как электрические линии передачи, электрические двигатели и трансформаторы, которые могут вызывать помехи на частотах, используемых для передачи данных в системе *LTE-R*.

4. Помехи от погодных условий: ветер, дождь, снег и другие погодные условия могут вызывать затухание и искажение радиосигналов, что также может повлиять на качество связи.

Для борьбы с этими и другими помехами в системе *LTE-R* используются различные технологии, такие, как антенны с высокой направленностью, алгоритмы обработки сигналов и кодирования, а также механизмы контроля ошибок и повторной передачи данных.

Одним из ключевых методов борьбы с помехами являются методы помехоустойчивого кодирования. Помехоустойчивое кодирование позволяет корректировать ошибки, которые могут возникнуть в процессе передачи данных, что повышает надежность и качество передачи. Одним из часто встречающихся видов помех на железнодорожном транспорте является импульсная помеха.

Импульсная помеха - это короткое и мощное возмущение электрического сигнала, которое может появляться из разных источников, например, из-за перегруженных линейных усилителей в системах передачи, неисправных контактов в электрических цепях, переключения аппаратуры и других операций, выполняемых персоналом линейных и стационарных сооружений связи, а также из-за воздействия грозовых разрядов, линий электропередачи и радиостанций. Амплитуда такой помехи может быть сравнима с амплитудой полезного сигнала, а время ее действия соответствует длительности одного элемента дискретной информации.

Цель исследования

Для устранения воздействий импульсных помех в системах *OFDM* технологии *LTE-R* могут применяться коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) [4, 5]. Железнодорожные системы управления и сбора данных, такие, как системы управления сигнализацией и системы диспетчерского управления, в основном используют радиочастотные связи для передачи информации между станциями. Коды БЧХ обеспечивают надежность передачи данных и уменьшают вероятность возникновения ошибок передачи, что особенно важно для систем управления безопасностью железнодорожных перевозок.

Однако, коды БЧХ не являются арифметическими. Преимущества арифметических кодов перед кодами БЧХ включают в себя:

1. Более высокую степень сжатия. Арифметическое кодирование обычно обеспечивает более высокую степень сжатия, чем кодирование БЧХ, что означает, что арифметическое кодирование может передавать ту же информацию в меньшем количестве бит.

2. Более гибкое использование памяти. Арифметическое кодирование может использовать меньшее количество памяти для хранения кодированных данных, поскольку оно не требует заранее определенного размера блоков для кодирования, как это делается в кодировании БЧХ.

3. Более эффективное использование канала связи. Арифметическое кодирование может использовать канал связи более эффективно, чем кодирование БЧХ, поскольку оно не требует передачи дополнительной информации для восстановления исходных данных в случае ошибок передачи.

Одним из направлений разработки методов арифметического кодирования может являться использование кодов системы остаточных классов (модулярных кодов), которые ранее применялись только для коррекции ошибок, возникающих в процессе вычислений. Также модулярные коды предлагалось использовать для увеличения скорости передачи в системах *OFDM* [6]. Применение дискретных вейвлет-преобразований, построенных в модулярных кодах, позволило увеличить скорость в 1,2 раза по сравнению с методами, используемыми в текущих стандартах беспроводной связи.

Таким образом, применение одной алгебраической системы для дискретных вейвлет-преобразований, а также для борьбы с ошибками, возникающими в результате воздействия помех при передаче по каналу связи, позволит сократить аппаратные затраты на реализацию системы *OFDM*. Поэтому, для достижения наилучшей производительности в системах *OFDM* на железнодорожном транспорте, необходимо проводить тщательные исследования и тестирования методов помехоустойчивого кодирования,

основанных на применении модулярных кодов, и сравнении их характеристик с кодами БЧХ.

Материалы и методы исследования

Модулярные коды (также известные как арифметические коды) [7, 8] – это непозиционные коды, в которых числа N_i представлены в виде наборов остатков $(N_{i1}, N_{i2}, \dots, N_{ik})$, где $N_{ik} = N_i \bmod p_i$, а $i = 1, 2, \dots, k$. В качестве оснований системы p_i берутся упорядоченные взаимнопростые числа. Рабочий диапазон рассматриваемой системы определяется выражением:

$$P_{\text{раб}} = \prod_{i=1}^k p_i \quad (1)$$

В целях определения местоположения ошибок и их исправления в модулярный код, как и в любой другой код, необходимо ввести дополнительную избыточность. В целях исправления однократной ошибки необходимо ввести два контрольных избыточных основания p_{k+1} и p_{k+2} удовлетворяющих условию:

$$p_{k+1}p_{k+2} > p_{k-1}p_k \quad (2)$$

Добавление в модулярный код избыточности приводит к расширению рабочего диапазона рассматриваемой системы и определяется выражением:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{раб}}p_{k+1}p_{k+2} \quad (3)$$

Если передаваемая кодовая комбинация на приеме не имеет ошибок, то она не превышает значения $P_{\text{раб}}$. Если же в процессе передачи по каналу связи в кодовой комбинации возникли ошибки и на приеме значение, выходящее за пределы $P_{\text{раб}}$, то комбинация является запрещенной. С использованием позиционных характеристик модулярного кода возможно определить местоположение и величину ошибки, а также в ряде случаев ее исправить [7, 8]. В работе [9] описан алгоритм определения интервального

номера числа, из которого известно, что значение интервала определяется, как:

$$L = \left\lfloor \frac{A}{P_{\text{раб}}} \right\rfloor \quad (4)$$

Из китайской теоремы об остатках известно, что:

$$N_i = \left| N_{i1}B_1 + N_{i2}B_2 + \dots + N_{ik}B_k \right|_{P_{\text{раб}}}^+ = \left| \sum_{i=1}^k N_{ik}B_k \right|_{P_{\text{раб}}}^+ \quad (5)$$

где B_k - ортогональный базис основания p_k .

Для вычисления интервала L с использованием свойства правдоподобия ортогональных базисов получаем:

$$B_k^* = B_k \text{ mod } P_{\text{раб}} \quad (6)$$

где B_k^* - ортогональный базис полной системы оснований.

Тогда ортогональный базис B_i определяется выражением:

$$B_i = \left\lfloor \frac{B_i}{P_{\text{раб}}} \right\rfloor P_{\text{раб}} + B_i^* = K_i P_{\text{раб}} + B_i^* \quad (7)$$

Известно, что значения интервала L находится в пределах $P_{\text{конт}} = p_{k+1}p_{k+2}$. Таким образом, равенство принимает вид:

$$L = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{k+2} N_i (K_i P_{\text{раб}} + B_i^*) - R P_{\text{полн}}}{P_{\text{раб}}} \right\rfloor = \left\lfloor \sum_{i=1}^{k+2} N_i K_i + R^* \right\rfloor_{P_{\text{полн}}} \quad (8)$$

где $R^* = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^k N_i B_i^*}{P_{\text{раб}}} \right\rfloor$ - ранг системы безызбыточного модулярного кода.

Таким образом, если значение кодовой комбинации, переданной по каналу связи $(N_{i1}, N_{i2}, \dots, N_{ik})$ не выходит за пределы $P_{\text{раб}} = \prod_{i=1}^k p_i$ и значение интервала $L=0$, то ошибок в ходе передачи не произошло, в противном

случае по значению интервала L возможно определить местоположение и исправить ошибку.

До настоящего времени все исследования модулярных кодов проводились с использованием целочисленных операций с использованием алгоритмов перевода СОК в позиционную систему счисления и обратно. Также данный вид кодов применялся в основном для повышения надежности, а именно для борьбы с отказами [7]. Вопросы применения модулярных кодов в качестве помехоустойчивых для борьбы с ошибками, возникающих при передачи данных по каналу связи, ранее практически не рассматривались. Таким образом, рассмотрев свойства модулярных кодов по обнаружению и исправлению ошибок в битах данных, возможно определить новые закономерности.

Известно, что при добавлении двух контрольных оснований в модулярный код возможно исправить одну ошибку [7, 8]. Представив кодовые конструкции, передающиеся по каналу связи в виде «0» и «1», получается, что модулярный код может бороться с пакетами ошибок, то есть группированием ошибок в одной ограниченной области кодового слова [10], начинающегося и заканчивающегося ошибочными битами (рис. 1). Красным цветом выделен пакет ошибочных бит в кодовой комбинации.



Рис. 1. – Пакет ошибок в кодовой комбинации

Рассмотрим возможности исправления пакетов ошибок, возникающих в результате воздействия помех при передаче по каналу связи, модулярным кодом. Сравнение исправляющей способности модулярного кода будем проводить с одним из типов помехоустойчивых кодов, применяемых в системах $LTE-R$, циклическим кодом БЧХ, который использует двоичный алфавит и блок кодового слова длиной $n = 2^m - 1$, где $m = 3, 4, \dots$. Возьмем в

качестве примера код БЧХ с $n = 31, k = 21, t = 2$. Для адекватности проводимого эксперимента и полученных результатов проведем исследование с использованием модулярного кода с системой оснований: $p_1 = 27, p_2 = 29, p_3 = 47, p_4 = 53, p_5 = 59, p_6 = 61$, где основания с первого по четвертое – информационные, а основания с пятого по шестое – контрольные. Объем передаваемой информации данных кодов приблизительно совпадает ввиду того, что не все кодовые комбинации в модулярном коде являются разрешенными.

Таблица 1

Параметры рассматриваемых помехоустойчивых кодов

№ п/п	Тип помехоустойчивого кода	n , длина кодовой комбинации, бит	k , длина информационной части, бит	Объем передаваемой информации
1.	БЧХ-код	31	21	2097152
2.	Модулярный код	34	22	2239049

Из [10-12] известно, что код БЧХ (31,21) способен исправить любую однократную или двукратную ошибки в кодовой комбинации. Коды БЧХ – это двоичные коды, которые строятся с помощью определения корней многочлена, который порождает эти коды. В отличие от циклических кодов, особенностью БЧХ-кодов является возможность группирования ошибок в пакеты для их обнаружения. Однако, исправление трехкратных ошибок БЧХ-кодом с заданными параметрами невозможно, так как все вектора пакетов ошибок из трех бит совпадают с векторами для двукратных ошибок.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием интервального метода по нахождению и исправлению ошибок в модулярном коде в *MATLAB* в целях оценки результатов эксперимента разработано программное обеспечение [13], где с

использованием алгоритма [9] вычислялись интервалы попадания ошибок для одиночных, двукратных и трехкратных пакетов ошибочных бит. Были рассмотрены все места попадания одиночной ошибки и пакета ошибок в разрешенную кодовую комбинацию $N = (0,0,0,0,0,0)$, которая при представлении в виде «0» и «1» принимает вид, представленный на рис. 2.

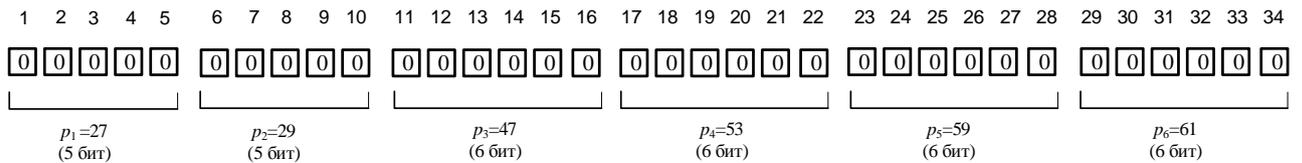


Рис. 2. – Представление разрешенной кодовой комбинации в виде «0» и «1»

Визуальное представление попадания одиночной ошибки и пакетов ошибок разной кратности отражено на рис. 3.

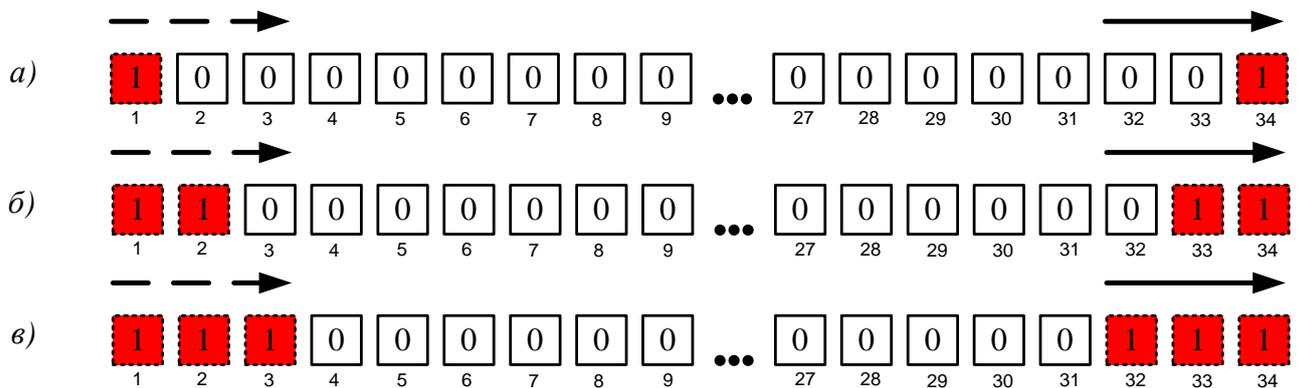


Рис. 3. – Места попадания пакетов ошибок в разрешенную кодовую комбинацию: а) однократная ошибка, б) пакет ошибок 2 бит, в) пакет ошибок 3 бит

Рассчитанные значения интервалов попадания пакетов ошибок различной кратности для модулярного кода приведены в таблице № 2, где значения интервалов, совпадающих со значениями других интервалов выделены зеленым цветом.

Таблица 2

Значения интервалов попадания ошибок разных кратностей для модулярного
кода

№ п/п	Однократная ошибка	Пакет ошибок 2 бита	Пакет ошибок 3 бита
1.	133	61	248
2.	266	122	496
3.	339	244	538
4.	533	382	630
5.	679	399	933
6.	933	413	992
7.	1003	475	1154
8.	1220	488	1309
9.	1281	620	1342
10.	1358	765	1711
11.	1454	799	1759
12.	1475	826	1769
13.	1525	950	2067
14.	1531	976	2266
15.	1613	995	2298
16.	1833	1018	2308
17.	1866	1227	2376
18.	1969	1241	2482
19.	2006	1365	2655
20.	2109	1420	2684
21.	2220	1533	2828
22.	2301	1652	2841
23.	2440	1990	2932
24.	2526	1999	2945
25.	2537	2037	2986
26.	2562	2308	2987
27.	2606	2482	3127
28.	2716	2799	3292
29.	2854	3009	3363
30.	2909	3042	3445
31.	2950	3226	3522
32.	3050	3304	3538
33.	3062	3364	-
34.	3226	-	-

В случае совпадения значения интервалов для пакетов ошибок разной кратности исправление ошибочной кодовой комбинации невозможно, так как декодер отдает предпочтение исправлению ошибки меньшей кратности. Таким образом, исходя из значений таблицы, модулярный код не может исправить 100% пакетов ошибок рассматриваемой кратности.

В качестве показателя для оценки корректирующих способностей кода БЧХ и модулярного кода выбран показатель $K(\gamma)$ - доля ошибок, исправляемых кодом:

$$K(\gamma) = \frac{N_1(\gamma)}{N_2(\gamma)} \quad (9)$$

где: $N_1(\gamma)$ – количество ошибочных комбинаций, для которых декодер однозначно может построить вектор ошибки, $N_2(\gamma)$ – общее количество ошибочных комбинаций.

Результаты моделирования эксперимента отражены на рис. 4, где по оси абсцисс расположена информация о кратности пакета ошибок, а по оси ординат доля ошибок, исправляемых кодом $K(\gamma)$ модулярным кодом и кодом БЧХ, соответственно.

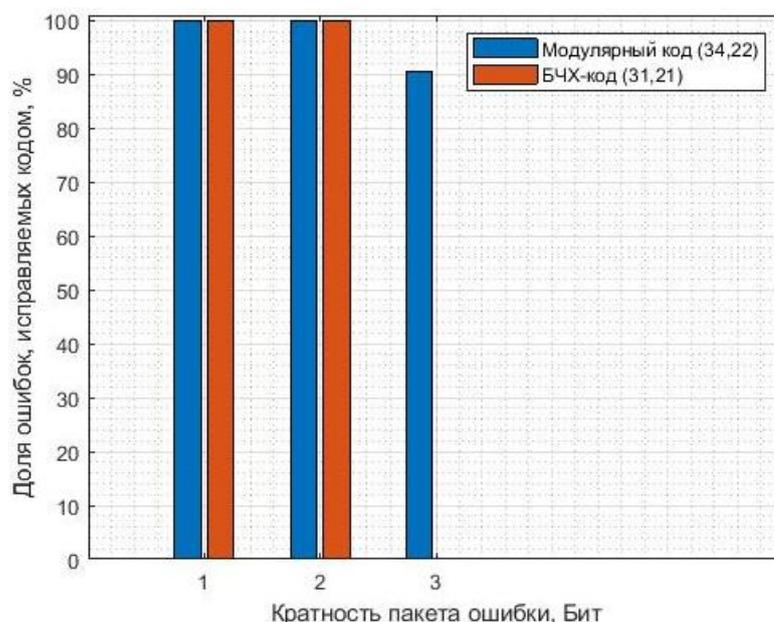


Рис. 4. – Сравнение доли ошибок, исправляемых кодами

Из рисунка видно, что доля исправленных ошибок однократной ошибки и пакета ошибок, состоящих из 2 ошибочных бит у модулярного кода и у кода БЧХ равны. Код БЧХ (31, 21), исходя из особенностей своего построения, не может исправить ошибки кратностью больше двух, так как $t = 2$. В то время, как с использованием модулярного кода возможно исправить 90,63 % пакетов ошибок, состоящих из трех бит.

Заключение

Таким образом, модулярные коды, а также принципы их построения целесообразно применять при построении систем *LTE-R* для блоков помехоустойчивого кодирования. Также применение модулярных кодов позволит упростить реализацию кодеров и декодеров, так как данный вид кодов не требует больших вычислительных затрат по сравнению с кодами БЧХ, что в свою очередь значительно ускорит процесс кодирования и декодирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00036, rscf.ru/project/23-21-00036/.

Литература

1. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 1 // Беспроводные технологии. 2020. №1. С. 48-56. URL: wireless-e.ru/gsm/gsm-r/radioset-upravleniya-chast-1/?ysclid=lmrs9mvkhv446272521
2. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 2 // Беспроводные технологии. 2020. №2. С. 48-56. URL: wireless-e.ru/application/railway/radioset-upravleniya-chast-2/?ysclid=lmrsavmoi953961837
3. Шнепс-Шнеппе М.А., Федорова Н.О., Суконников Г.В., Куприяновский В.П. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к

LTE-R и 5G-R – состоится ли он? // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 5, no. 1, 2017. С. 71-79.

4. Ghasan Ali Hussain, Lukman Audah. BCH codes for 5G wireless communication systems over multipath fading channel. // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol. 17, No. 1, January 2020, pp. 310-316.

5. Ghasan Ali Hussain, Lukman Audah. BCH codes in UFMC: A new contender candidate for 5G communication systems. // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. Vol. 10, No. 2, April 2021, pp. 904-910.

6. Гиш Т.А. Разработка математических и структурных моделей целочисленных дискретных вейвлет-преобразований для повышения скорости передачи информации в системах OFDM. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2019. 178 с.

7. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах / М.: «Советское радио», 1968. 440 с.

8. Червяков Н.И., Коляда А.А., Ляхов П.А. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 400 с.

9. Калмыков М.И., Бабенко Л.К., Калмыков И.А., Ефременков И.Д., Мирошников Д.А. Использование избыточных модулярных кодов при разработке отказоустойчивых запросно-ответных систем распознавания спутника. Фундаментальные исследования № 12. 2017. С. 292-296.

10. Максимов М.Н. Помехоустойчивое кодирование. Технологический институт южного федерального университета в г. Таганроге. г. Таганрог. 2011. 123 с.

11. Дж. Проакис, Цифровая связь, Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского. - М.: Радио и связь. 2000. - 800 с: ил. ISBN 5-256-01434-X.

12. Бернард Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1104 с. : ил. – Парал. тит. Англ.

13. Ефременков И.Д., Калмыков И.А., Юрданов Д.В., Волошин Е.А., Проворнов И.А., Пехов Ю.С. Программа вычисления интервалов для коррекции пакетов ошибок модулярного кода. Свидетельство о регистрации № 2023619671. Бюллетень № 5 от 15.05.2023. 2023. URL: fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=9ae2512e1f1d0caa7ee4c53270b399cb

References

1. Margaryan S. Besprovodnye texnologii. 2020. №1. pp. 48-56. URL: wireless-e.ru/gsm/gsm-r/radioset-upravleniya-chast-1/?ysclid=lmrs9mvkhv446272521

2. Margaryan S. Besprovodnye texnologii. 2020. №2. pp. 48-56. URL: wireless-e.ru/application/railway/radioset-upravleniya-chast-2/?ysclid=lmrsavmoi953961837

3. Shneps-Shneppe M.A., Fedorova N.O., Sukonnikov G.V., Kupriyanovskij V.P. International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 5, no. 1, 2017. pp. 71-79.

4. Ghasan Ali Hussain, Lukman Audah. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol. 17, No. 1, January 2020, pp. 310-316.

5. Ghasan Ali Hussain, Lukman Audah. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. Vol. 10, No. 2, April 2021, pp. 904-910.

6. Gish T.A. Razrabotka matematicheskix i strukturnyx modelej celochislennyx diskretnyx vejvlet-preobrazovanij dlya povysheniya skorosti peredachi informacii v sistemax OFDM [Development of mathematical and structural models of integer discrete wavelet transformations to increase the speed

of information transfer in OFDM systems]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk. 2019. 178 p.

7. Akushskij I.Ya., Yudiczkiy D.I. Mashinnaya arifmetika v ostatochnyx klassax [Machine arithmetic in residual classes]. M.: «Sovetskoe radio», 1968. 440 p.

8. Chervyakov N.I., Kolyada A.A., Lyaxov P.A. Modulyarnaya arifmetika i ee prilozheniya v infokommunikacionnyx texnologiyax [Modular arithmetic and its applications in infocommunication technologies]. M.: FIZMATLIT, 2017. 400 p.

9. Kalmykov M.I., Babenko L.K., Kalmykov I.A., Efremkov I.D., Miroshnikov D.A. Fundamentalnye issledovaniya № 12. 2017. pp. 292-296.

10. Maksimov M.N. Pomexoustojchivoe kodirovanie [Noise-resistant coding]. Texnologicheskij institut yuzhnogo federalnogo universiteta v g. Taganroge. g. Taganrog. 2011. 123 p.

11. Dzh. Proakis, Cifrovaya svyaz [Digital communication], Per. s angl. Pod red. D.D. Klovskogo. M.: Radio i svyaz. 2000. 800 p.

12. Bernard Sklyar. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Izd. 2-e, ispr.: Per. s angl. M.: Izdatelskij dom «Vilyams», 2004. 1104 p.: il. Paral. tit. Angl.

13. Efremkov I.D., Kalmykov I.A., Yurdanov D.V., Voloshin E.A., Provornov I.A., Pexov Yu.S. Svidetelstvo o registracii № 2023619671. Byulleten № 5 ot 15.05.2023. 2023. URL: fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=9ae2512e1f1d0caa7ee4c53270b399cb