

Построение кодирующих и декодирующих устройств для мультиплексирования с кодовым разделением

А.В. Рабин, А.А. Овчинников, С.В. Рабин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация: Разработан класс математических методов кодового разделения каналов на основе использования пар ортогональных кодирующих и декодирующих матриц, компонентами которых являются многочлены и целые числа. Представлены принципы построения схем реализации кодового объединения каналов на передающей стороне и арифметического кодового разделения каналов на приемной стороне системы связи и примеры таких схем. Предложенный подход позволит существенно упростить схемы построения кодирующих и декодирующих устройств, применяемых в системах космической и спутниковой связи.

Ключевые слова: системы телекоммуникаций, устройства телекоммуникаций, мультиплексирование, кодовое разделение каналов, матричный анализ, кодирующие матрицы, метод синтеза, ортогональные матрицы, целые числа.

Введение

Объем информации, передаваемый по коммутируемым каналам связи, в том числе космической и спутниковой, сильно возрастает. Также появляется отрыв в развитии и проникновении новых технологий телекоммуникаций и средств связи городов с большим населением от небольших населенных пунктов.

Поэтому возникает необходимость в разработке коммутационного оборудования, которое обеспечивало бы быстрое и качественное подключение устройств и абонентов, а также соответствовало бы современным стандартам коммутации цифровых каналов передачи [1 – 3].

Возникает задача разработки схем устройств коммутации с меньшим по сравнению с аналогами числом математических операций. Сложность передающих и приемных устройств можно снизить за счет использования простых схем разделения и объединения каналов.

Кодовое разделение каналов с применением ортогональных матриц

Для простоты технической реализации будем предполагать, что имеются N пользователей, которые хотят одновременно использовать двоичный канал связи [4 – 6].

Пусть каждый пользователь генерирует некоторый набор информационных символов (сообщение), который будем представлять как полубесконечный вектор [7].

В [8] показано, что, когда все N пользователей отправляют данные, общая скорость передачи информации равна скорости распределения времени. Однако, когда активны менее N пользователей, неиспользуемая пропускная способность канала может быть использована для выполнения обнаружения ошибок [9].

Кодовое объединение каналов на передающей стороне и кодовое разделение каналов на приемной стороне системы связи можно осуществлять благодаря использованию пар квадратных кодирующей и декодирующей матриц. В качестве кодирующих и декодирующих матриц рассматриваются матрицы порядка N , где N – число пользователей.

Элементами кодирующих и декодирующих матриц являются целые числа. Предполагается, что кодирующая матрица G является невырожденной.

Кодирующая матрица G и декодирующая матрица H связаны соотношением:

$$G \cdot H = d \cdot I, \quad (1)$$

где I – единичная матрица порядка N , а d – число вида p^q , p – простое число q – целое неотрицательное число.

В качестве входной последовательности рассмотрим вектор $U = (U_1, U_2, \dots, U_N)$. Компонентами вектора U являются целые числа. Вектор на выходе кодирующего преобразования определяется формулой:

$$V = U \cdot G. \quad (2)$$

Его компонентами также являются целые числа. Здесь выходной вектор $V = (V_1, V_2, \dots, V_N)$.

Устройство, осуществляющее операцию, описываемую уравнением (2), называется арифметическим кодирующим устройством. Результаты кодирования одного бита каждого источника складываются поразрядно и передаются последовательно, символ за символом, по некоторому каналу связи.

Операцию разделения каналов на приемной стороне системы связи можно записать в виде следующей формулы:

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_N) \cdot H = d \cdot U = (U_1, U_2, \dots, U_N). \quad (3)$$

В результате этой операции получим входную последовательность U , но с задержкой на q тактов, если $d = p^q$. Устройство, осуществляющее эту операцию, будем называть арифметическим декодирующим устройством.

Синтез ортогональных кодирующих и декодирующих матриц

В [8] предложен метод синтеза кодирующей матрицы G порядка ξ . Аналогичный подход применялся для синтеза ортогональных матриц с целью построения кодов и обеспечения помехозащищенности систем связи [10].

Синтез выполняется следующим образом.

Шаг 1. Присвоим $2z$ элементам главной диагонали значение равное 1, $2z \leq \xi$. Число z – это целое число. Важно отметить, что на главной диагонали всегда будет четное количество единиц ($2z$), так как при нечетном значении ($2z+1$) получим кодирующую матрицу G , определитель которой будет равен нулю. Данное свойство получается из-за того, что строки в матрице становятся линейно зависимыми [11].

Шаг 2. Последнему элементу главной диагонали присвоим значение 4.

Шаг 3. Оставшимся элементам главной диагонали присвоим значение 2.

Шаг 4. Вне главной диагонали элементы принимают следующие значения: на нечетных строках чередуются 1 и 0, на четных строках чередуются 0 и 1. Главную диагональ учитывать не будем.

Таким образом, кодирующая матрица G порядка ξ имеет вид

$$G(D) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 2 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 4 \end{pmatrix}.$$

Корректность полученных результатов подтверждается правильным применением математического аппарата и соответствием результатов имитационного моделирования теоретическим предложениям [12].

Кодирующие и декодирующие устройства

При обработке и передаче информации, использующей арифметические коды, кодирование и декодирование можно осуществлять с помощью специальных многотактных устройств – цифровых фильтров [13].

Цифровые фильтры являются многотактными схемами, построенными на сдвигающих регистрах с логическими связями. При этом цепи логической связи используют двоичные последовательные сумматоры, выполняющие арифметические операции.

В кодирующем устройстве, осуществляющем объединение каналов, должно быть реализовано умножение битов входных сообщений каждого

пользователя на элементы соответствующей строки. Причем номер строки является номером абонента, с которым хочет связаться пользователь. Операция умножения на элементы матрицы G , которыми являются целые числа, должна быть осуществлена с помощью цифровых фильтров, описанных выше. Результаты умножения складываются поэлементно и записываются в сдвигающий регистр для передачи последовательно по некоторому двоичному каналу связи.

Кодирующая матрица G для N пользователей может быть представлена в виде:

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & \dots & g_{NN} \end{pmatrix},$$

где g_{ij} – целые неотрицательные числа.

Общий вид схем кодирующих устройств, выполняющих операцию кодового объединения каналов, представлен на рис.1.

В декодирующем устройстве, осуществляющем разделение каналов, должно быть реализовано умножение разрядов сдвигающего регистра на элементы соответствующих строк матрицы H . После этого результаты умножения на элементы соответствующих столбцов матрицы H складываются и передаются соответствующим приемникам. Операция умножения на элементы матрицы H , которыми являются целые числа, должна быть осуществлена с помощью цифровых фильтров.

Декодирующая матрица H для N пользователей представляется, как:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \dots & h_{NN} \end{pmatrix},$$

где h_{ij} – целые числа, причем должно выполняться равенство (1).

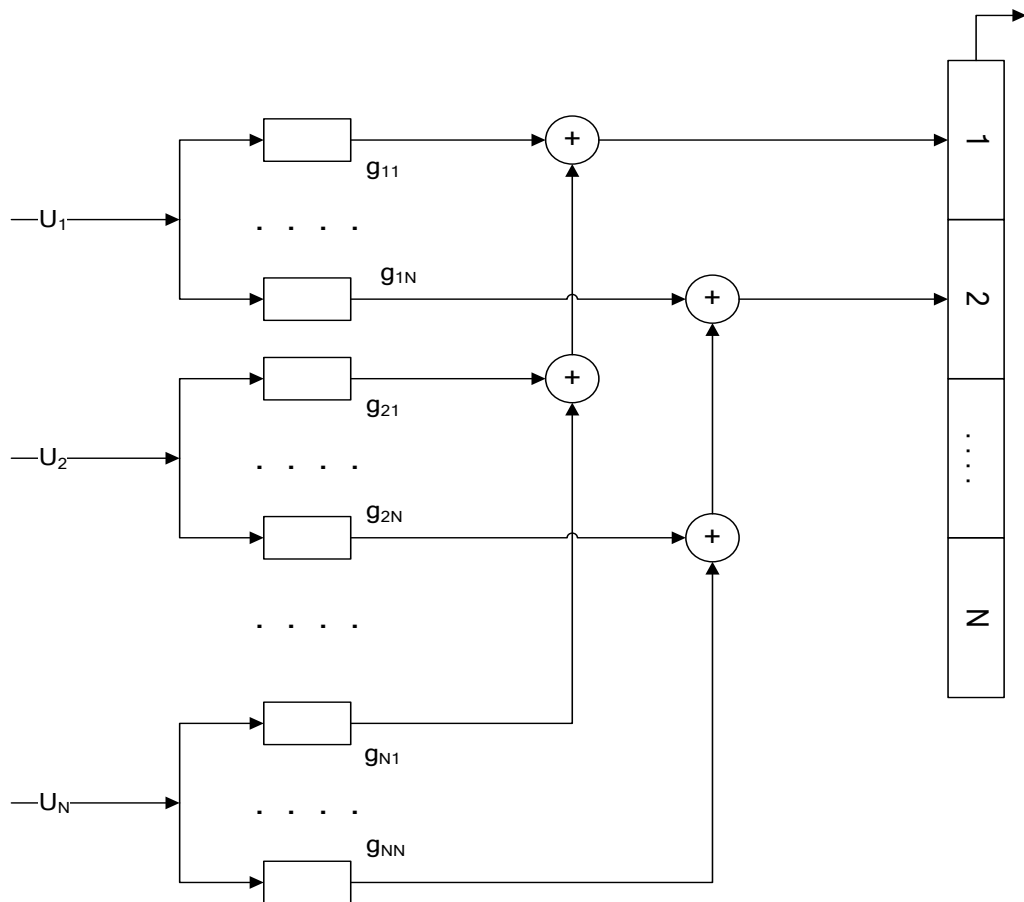


Рис. 1. – Общий вид схем кодирующих устройств

Общий вид схем декодирующих устройств, осуществляющих операцию кодового разделения каналов, представлен на рис.2.

Представим примеры пар кодирующих и декодирующих матриц для трех и девяти пользователей соответственно. Кодирующая матрица для трех пользователей имеет вид:

$$G_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Соответствующая ей декодирующая матрица может быть записана, как:

$$H_3 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 2 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \end{pmatrix}.$$

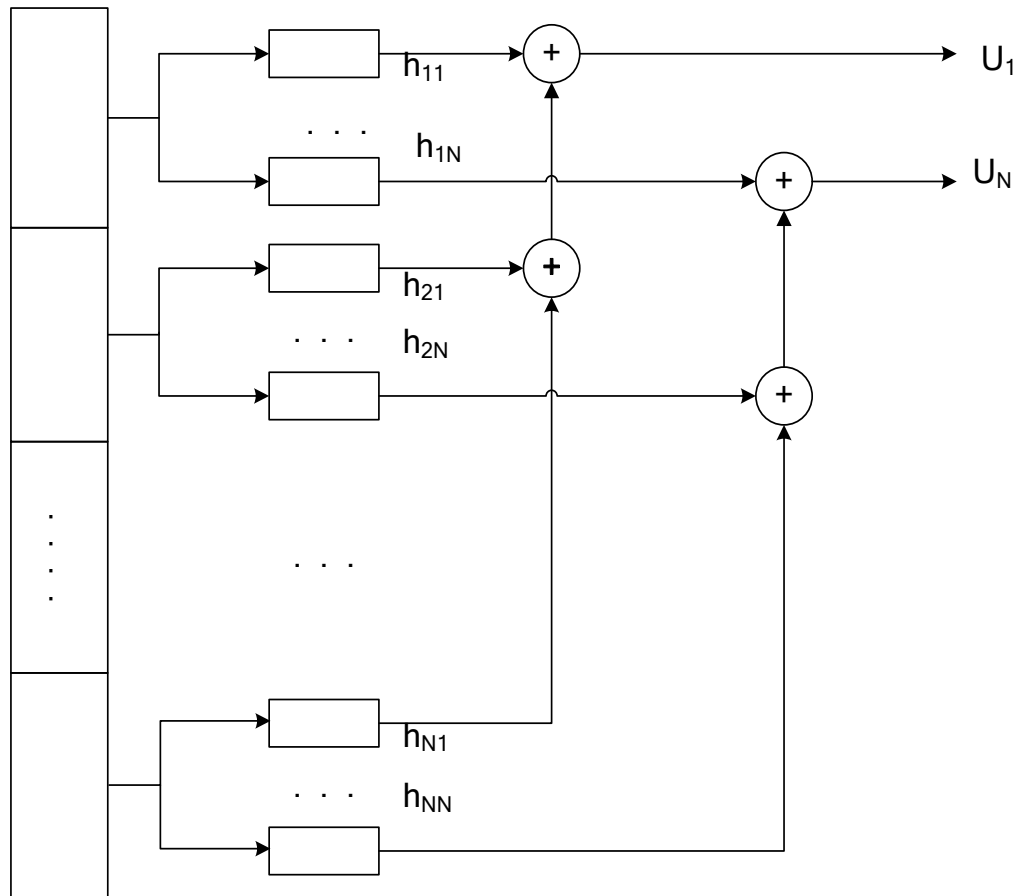


Рис. 2. – Общий вид схем декодирующих устройств

Операции (2) и (3) H для данной пары матриц и входного вектора $U = (1 \ 1 \ 0 \ \dots)$ будут осуществлены следующим образом:

$$U = (1 \ 1 \ 0 \ \dots), \quad V = U \cdot G_3 = (1 \ 1 \ 2 \ \dots), \\ V \cdot H_3 = (0 \ 3 \ 3 \ 0 \ \dots) = 3^1 \cdot (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ \dots).$$

Пример пары кодирующей и декодирующей матриц для девяти пользователей приведены ниже.

В этом случае операции (2) и (3) для входного вектора $U = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots)$ могут быть записаны, как:

$$U = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots), \quad V = U \cdot G = (4 \ 2 \ 5 \ 3 \ 4 \ 2 \ 5 \ 2 \ 7 \ \dots), \\ V \cdot H = (0 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 3 \ \dots) = 3^1 \cdot (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots).$$

$$G_9 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \quad H_9 = \begin{pmatrix} 13 & 0 & -3 & 0 & -3 & 0 & -3 & 0 & -1 \\ 0 & 12 & 0 & -3 & 0 & -3 & 0 & -3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тем самым показано, что при использовании указанных выше пар матриц как для трех, так и для девяти пользователей, результат деления каналов совпадает с информационными сообщениями, но будет получен с задержкой во времени на один такт.

Кодирующее устройство для трех пользователей, построенное в соответствии с описанным выше способом на основе кодирующей матрицы G_3 , имеет вид, представленный на рис.3.

Схема декодирующего устройства для трех пользователей, спроектированного в соответствии с описанным выше способом на основе матрицы H_3 , приведена на рис.4.

Легко проверить, что последовательности на выходе декодирующих устройств совпадают с информационными последовательностями, но задерживаются на один такт.

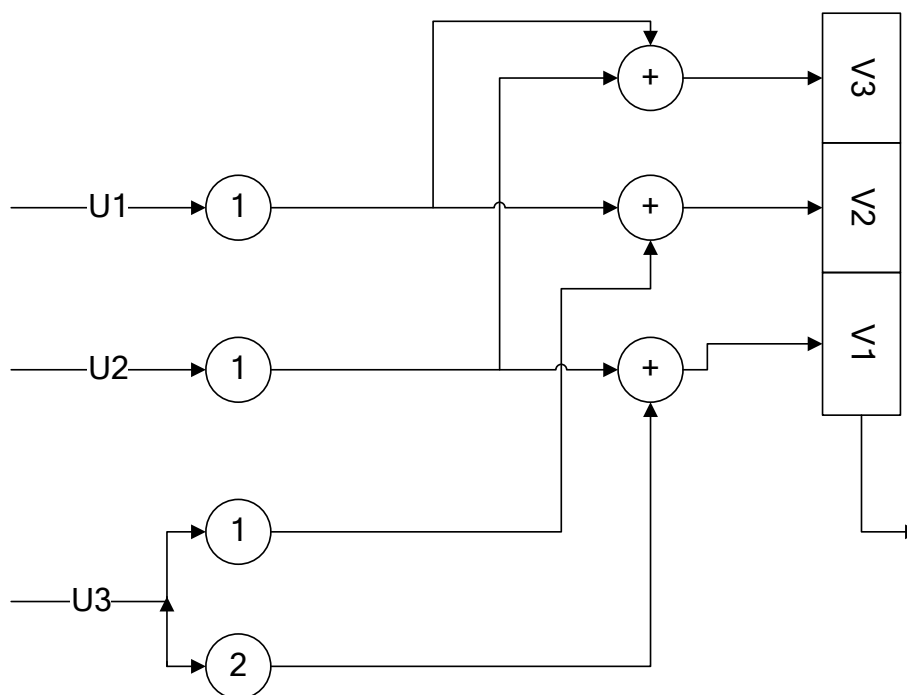


Рис. 3. – Пример схемы кодирующего устройства для трех пользователей

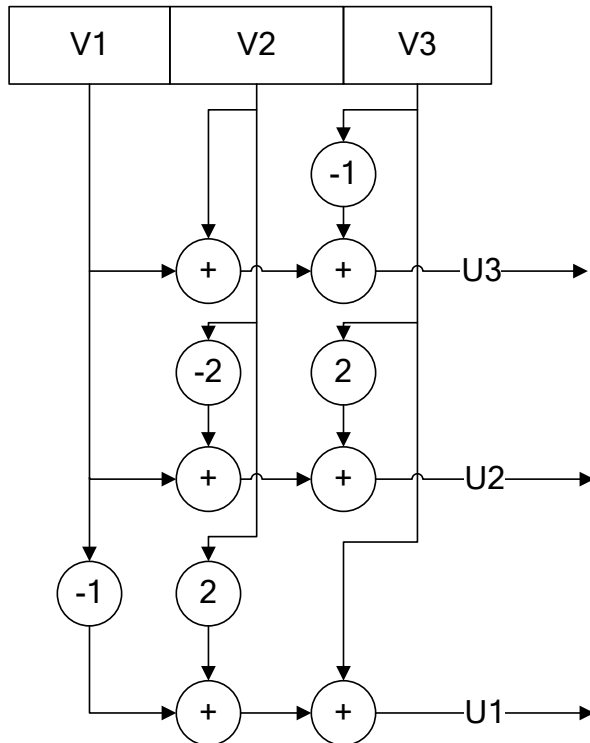


Рис. 4. – Пример схемы декодирующего устройства для трех пользователей

Заключение

Предложена разработка ортогональных кодирующих и декодирующих матриц, обеспечивающих реализацию кодового разделения каналов. Показано, что при использовании указанных пар матриц результат разделения каналов совпадает с информационными сообщениями.

Синтез и использование вышеуказанных пар матриц значительно упростят схемы построения устройств кодирования и декодирования. Для построения устройств, реализующих арифметическое объединение и разделение каналов, достаточно использовать сдвигающие регистры, набор сумматоров и инвертирующих каскадов. Техническая реализация таких схем кодового разделения достаточно проста для различных применений. Простота этих схем позволяет надеяться на широкое внедрение такого способа разделения каналов на многих линиях связи.

Преимущество по сравнению с существующими решениями – низкая сложность и стоимость устройств, высокая скорость передачи, высокая помехозащищенность, адаптируемость к отечественной элементной базе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 23-29-01005, «Исследование и разработка математических методов кодового разделения каналов в системах космической и спутниковой связи с помехоустойчивым кодированием и многопозиционной кодированной модуляцией».

Литература

1. Johannesson R, Zigangirov K.Sh. Fundamentals of convolutional coding. IEEE Press, 1999. 442 p.
2. Proakis J.G. Digital communications. New York: McGraw Hill, 2007. 1150 p.



3. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2017. 1104 p.

4. Prucnal P.R. Optical code division multiple access: fundamentals and applications. CRC Press, 2019. 400 p.

5. Yousif A.H., Zeghid M., Imtiaz W.A. and Sharma T. Two-dimensional permutation vectors' (PV) code for optical code division multiple access systems // Entropy, 2020. No. 22. Issue 5. 576 p.

6. Morsy A., Morsy I., Abdulaziz A. and Osama H.G. Performance analysis of optical code division multiple access networks for multimedia applications using multilength weighted modified prime codes // Optical Engineering, 2019. Volume 58. Issue 3. Paper No. 035101.

7. Stanley R.P. Smith normal form in combinatorics // Journal of Combinatorial Theory, Series A, 2016. No. 144. P. 476-495.

8. Рабин А.В., Овчинников А.А., Рабин С.В., Зюльков А.А. Метод синтеза ортогональных кодирующих и декодирующих матриц на основе целых чисел, обеспечивающих реализацию кодового разделения каналов // Наукоемкие технологии, 2023. Том 24. №8. С. 54-60.

9. Telang V.P. and Herro M.A. Error control coding for the N-user mod-2 multiple-access channel // IEEE Transactions on Information Theory, 1998. No. 44. Issue 4. pp. 1632-1642.

10. Рабин А.В. Реализация кодирующих и декодирующих устройств в телекоммуникационных системах с ортогональным кодированием // Успехи современной радиоэлектроники, 2018. № 12. С. 116-120.

11. Ланкастер П. Теория матриц. М.: Наука, 1982. 272 с.

12. Рабин А.В., Рабин С.В., Овчинников А.А. Программный комплекс обеспечения реализации коммутационных устройств для p^q пользователей. Свидетельство о регистрации №. 2024669854. 22.08.2024 Бюл. № 9. URL:



fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=826460326be505f56b79ef9fcb
c816ca.

13. Баркун М., Ходасевич О. Цифровые системы синхронной коммутации. Эко-Трендз, 2001. 280 с.

References

1. Johannesson R, Zigangirov K.Sh. Fundamentals of convolutional coding. IEEE Press, 1999. 442 p.
2. Proakis J.G. Digital communications. New York: McGraw Hill, 2007. 1150 p.
3. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2017. 1104 p.
4. Prucnal P.R. Optical code division multiple access: fundamentals and applications. CRC Press, 2019. 400 p.
5. Yousif A.H., Zeghid M., Imtiaz W.A. and Sharma T. Entropy, 2020. No. 22. Issue 5. 576 p.
6. Morsy A., Morsy I., Abdulaziz A. and Osama H.G. Optical Engineering, 2019. Volume 58. Issue 3. Paper No. 035101.
7. Stanley R.P. Journal of Combinatorial Theory, Series A, 2016. No. 144. pp. 476-495.
8. Rabin A.V., Ovchinnikov A.A., Rabin S.V., Zyulkov A.A. Naukoemkie tekhnologii, 2023. Tom 24, 2023. Volume 24. No. 8. pp. 54-60.
9. Telang V.P. and Herro M.A. IEEE Transactions on Information Theory, 1998. No. 44. Issue 4. pp. 1632-1642.
10. Rabin A.V. Uspekhi sovremennoj radioelektroniki, 2018. No. 12. pp. 116-120.
11. Lancaster P. Teoriya matric. [Theory of matrices]. M.: Nauka, 1982. 272 p.



12. Rabin A.V., Rabin S.V., Ovchinnikov A.A. Programmnyj kompleks obespecheniya realizacii kommutacionnyh ustrojstv dlya pⁿq pol'zovatelej. Svidetel'stvo o registracii [Software package for the implementation of switching devices for pⁿq users. Certificate of registration No. 2024669854]. 22.08.2024. Byulleten' No. 9. URL: fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=826460326be505f56b79ef9fcbcb816ca.

13. Barkun M., Khodasevich O. Cifrovye sistemy sinhronnoj kommutacii [Digital synchronous switching systems]. Eco-Trendz, 2001. 280 p.

Дата поступления: 09.11.2024

Дата публикации: 10.12.2024