

КОДОВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ

Е. А. Чистяков, И. А. Мартынов, Е. В. Самохина

В современном мире беспроводная передача информации является без преувеличения основным способом связи и навигации. При этом количество пользователей различных сетей связи растет ежедневно. В связи с этим встает актуальный вопрос наилучшего способа организации связи при ограниченных ресурсах частотного диапазона и растущих запросах к качеству и количеству передаваемой информации. В данной работе рассмотрены основные способы разделения каналов, их преимущества и недостатки. Особое внимание уделяется кодовому разделению каналов, так как данный метод является самым сложным в понимании, но в то же время самым эффективным. Принципы кодового разделения каналов до сих пор используются в современных сетях сотовой связи, но в усовершенствованном виде, тем самым подтверждая свою эффективность и актуальность. **Ключевые слова:** кодовое разделение каналов, CDMA, временное разделение каналов, TDMA, частотное разделение каналов, FDMA, частотно-временное разделение каналов, кодовая последовательность Уолша, расширение спектра.

Введение

Почти во всех современных сетях связи, а также в навигационных системах используется кодовое разделение каналов, которое основано на ортогональных кодовых последовательностях. Если предыдущие методы, а именно частотное и временное разделение каналов, основаны на дроблении доступного ресурса (частоты и времени), то при кодовом разделении дробления не происходит, но при этом можно с большой вероятностью распознать передаваемый сигнал [1, 2].

Понимание принципов формирования, обработки и выделения информации таких сигналов позволит лучше понимать методы организации связи. Кроме того, кодовое разделение каналов имеет ряд преимуществ, таких как устойчивость к узкополосным помехам, устойчивость к частотно-селективным замираниям, конфиденциальность и защищенность передаваемых данных, большая емкость системы.

Постановка задачи

В первую очередь рассмотрим ранние методы разделения каналов путем дробления частотно-временного ресурса, а также способ их комбинирования. Далее перейдем к наиболее эффективному методу кодового разделения каналов и рассмотрим его более подробно. Проведем сравнительный анализ для выявления наиболее эффективного метода.

1. Временное разделение каналов

Временное разделение каналов или TDMA (англ. Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени) (рис. 1) – это способ, при котором в одном частотном диапазоне f_H находятся несколько абонентов (1, 2, 3), использующих разные промежутки времени t для связи.

Ортогональность нескольких сигналов достигается путем дробления всего временного интер-

вала (кадра) $T_{\text{общ}}$ на M временных слотов, причем время T_M , выделяемое отдельному сигналу $s_n(t)$ должно удовлетворять первому условию [1, 2]:

$$T_M \leq \frac{T_{\text{общ}}}{M}. \quad (1)$$

По выражению (1) можно посчитать максимальное количество ортогональных сигналов, которые могут располагаться в пределах заданного частотно-временного ресурса, которое будет равно $M \leq \frac{T_{\text{общ}}}{T_M}$.

Второе условие – сдвиг ΔT между соседними сигналами, например $s_1(t)$ и $s_2(t)$, не менее чем длительность первого сигнала $s_1(t)$, то есть сигналы не должны накладываться друг на друга во времени:

$$\Delta T \geq T_M. \quad (2)$$

Так как сигналы не пересекаются по времени, они имеют нулевую корреляционную функцию, следовательно, являются ортогональными.

Плюсом данного метода является то, что любой сигнал в системе может использовать всю общую полосу частот, то есть $W_N = W_{\text{общ}}$.

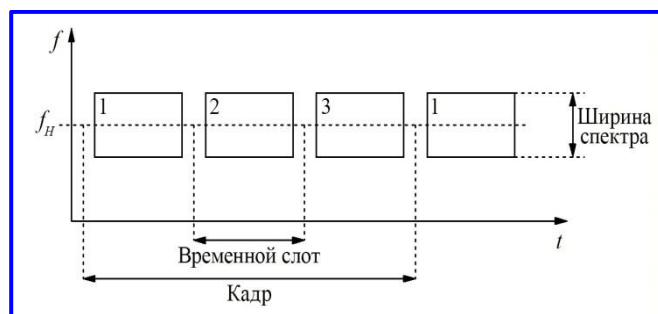


Рис. 1. Временное разделение каналов

2. Частотное разделение каналов

Частотное разделение каналов или FDMA (англ. Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по частоте) (рис. 2) – это способ, при котором несколько абонентов (1, 2, 3) одновременно используют разные полосы частот $f(f_1, f_2, f_3)$ для связи.

Как и в предыдущем случае, происходит дробление, но в этот раз общую полосу частот $W_{\text{общ}}$ разделяют на N полос W_N . Размеры полос определяются согласно условию [1, 2]:

$$W_N \leq \frac{W_{\text{общ}}}{N}. \quad (3)$$

Максимальное количество сигналов при таком методе кодирования будет равно $N \leq \frac{W_{\text{общ}}}{W_N}$.

Если при временном разделении каналов сигналы не должны были накладываться друг на друга во времени, то при частотном разделении они не должны накладываться друг на друга в частотной области:

$$\Delta W \geq W_N. \quad (4)$$

При этом сигналы будут пересекаться и накладываться во времени, то есть $T_M = T_{\text{общ}}$.

3. Частотно-временное разделение каналов

Частотно-временное разделение каналов – это способ, объединяющий FDMA и TDMA для увеличения емкости системы, при котором абоненты разделены как по частотным диапазонам, так и по временным интервалам (рис. 3).

Рассмотренные методы используют только одну составляющую частотно-временного ресурса для достижения ортогональности сигналов, но зачастую для увеличения количества каналов, их используют совместно [2]. При таком способе общие частотно-временные ресурсы $T_{\text{общ}}$ и $W_{\text{общ}}$ делятся между K каналами, каждому из которых присваивается свой временной слот T_M и полоса частот W_N . При этом условия (1) и (3) будут выполняться для соседних каналов, рассматриваемых во временной или частотной области соответственно.

Максимальное количество ортогональных сигналов при таком методе будет рассчитываться следующим образом:

$$K = MN = \frac{T_{\text{общ}}}{T_M} \frac{W_{\text{общ}}}{W_N}. \quad (5)$$

В такой системе для сигналов, рассматриваемых во временной области, условием ортогональности будет являться то, что они не пересекаются во времени, а для сигналов, рассматриваемых в частотной области, что они не накладываются по частоте:

$$\Delta T_M \geq T_M; \quad (6)$$

$$\Delta W_N \geq W_N. \quad (7)$$

4. Кодовое разделение каналов

Кодовое разделение каналов или CDMA (англ. Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением) – это способ, при котором все абоненты одновременно используют одну полосу частот, но разные кодирующие последовательности (рис. 4).

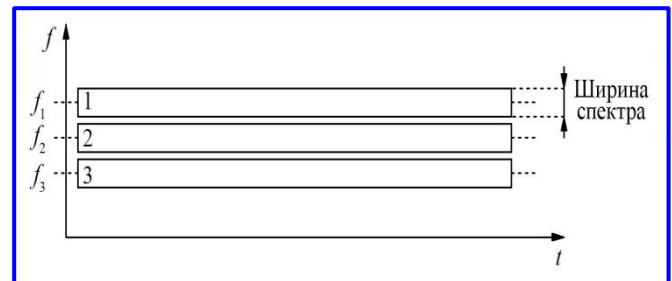


Рис. 2. Частотное разделение каналов

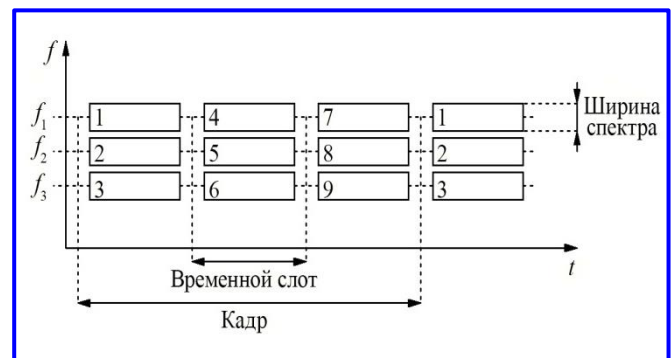


Рис. 3. Частотно-временное разделение каналов

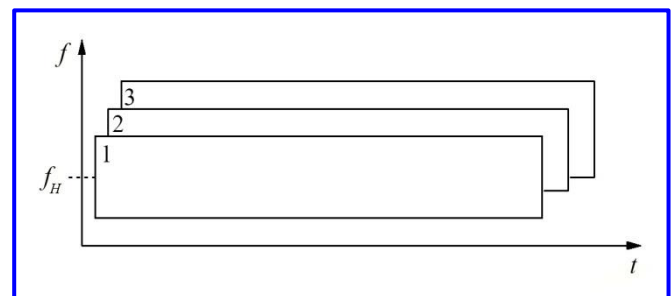


Рис. 4. Кодовое разделение каналов

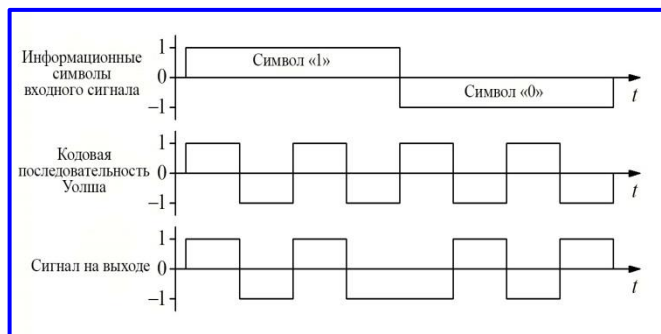


Рис. 5. Формирование сигнала при CDMA

Кардинальное отличие кодового разделения каналов от всех предыдущих заключается в том, что данный метод позволяет сохранить все достоинства рассмотренных методов, а именно: неограниченность по времени, частоте и количеству каналов. При этом все сигналы накладываются друг на друга как во временном, так и в частотном диапазонах [1, 3]:

$$T_M = T_{\text{общ}}; \quad (8)$$

$$W_N = W_{\text{общ}}. \quad (9)$$

5. Формирование сигнала при CDMA

Стоит отметить, что при помощи кодового разделения каналов возможно передавать только бинарные последовательности: «1» и «0». Для удобства будем полагать, что они принимают значения «1» и «-1» [2, 4].

Первоначальный информационный сигнал перемножается с циклически повторяющейся функцией Уолша, которую также называют кодовой последовательностью Уолша (КП Уолша), основанной на матрице Адамара [1, 3]. Причем длина функции Уолша должна укладываться в длину одного символа сигнала ($T_{\text{симв}} = T_{\text{Уолша}}$). Итоговую последовательность подают на фазовый манипулятор, а затем передают по каналу связи (рис. 5).

Любые пары строк, взятые из матрицы Адамара, имеют нулевую корреляцию, следовательно, являются ортогональными. Это ключевой момент в формировании сигнала при CDMA.

Матрицу Адамара любой размерности можно вычислить по двум следующим формулам:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$H_{2M} = \begin{bmatrix} H_M & H_M \\ H_M & -H_M \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В качестве примера рассчитаем матрицу H_4 :

$$H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Если информационный сигнал на входе принимает значение «1», то после перемножения с кодовой последовательностью на выходе будет сигнал, идентичный кодовой последовательности Уолша, а если сигнал на входе принимает значение «-1», то сигнал на выходе будет иметь вид кодовой последовательности, взятой с противоположным знаком, как показано на рис. 5.

6. Прием и обработка сигнала в приемнике

На приемник поступает пачка сигналов, которые накладываются и перекрывают друг друга. Этот групповой сигнал подают на фазовый демодулятор, получая, на первый взгляд, хаотичную последовательность прямоугольных импульсов с разными амплитудами и знаками. Чтобы выделить нужный сигнал, необходимо знать кодовую последовательность, использованную для его формирования [3].

Рассмотрим на первом примере (рис. 6). Четыре передатчика одновременно передают «1», кодовые последовательности разные, взятые из матрицы Адамара H_4 . Групповой сигнал будет иметь следующий вид: 4 0 0 0. Для выделения нужного сигнала, например второго, перемножим групповой сигнал с нужной последовательностью Уолша (1 -1 1 -1), получим: 4 0 0 0. Посчитаем сумму, она будет равна 4. Поделив сумму на длину кодовой последовательности, получим передаваемый символ «1». Формула для определения передаваемого символа имеет следующий вид:

$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N s_j, \quad (13)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots N$ – номер отдельного бита сигнала, полученного после перемножения группового сигнала с КП Уолша, а $N = 4$ – длина кодовой последовательности.

Рассмотрим второй пример (рис. 7). По каналу 2 передается «-1». Тогда сигнал изменит знак, а групповой сигнал будет равен: 2 2 -2 2. Перемножим с оригинальной кодовой последовательностью (1 -1 1 -1) и получим: 2 -2 -2 -2. Сумма будет равна -4. Поделим сумму на длину последовательности, получим «-1».

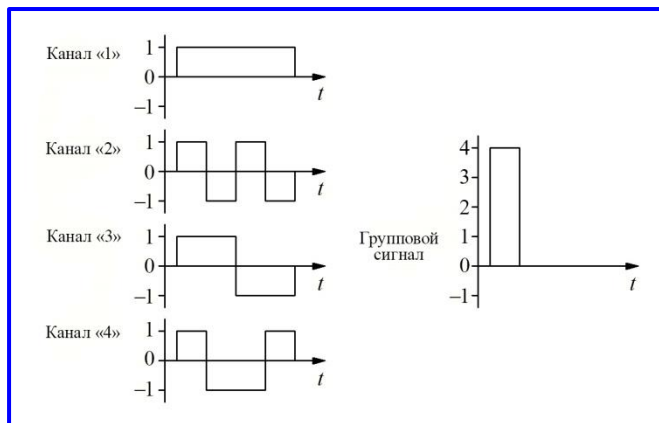


Рис. 6. Выделение сигнала со второго канала (пример 1)

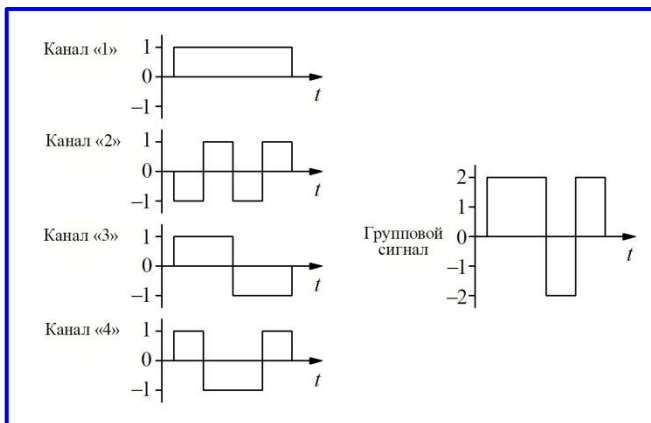


Рис. 7. Выделение сигнала со второго канала (пример 2)

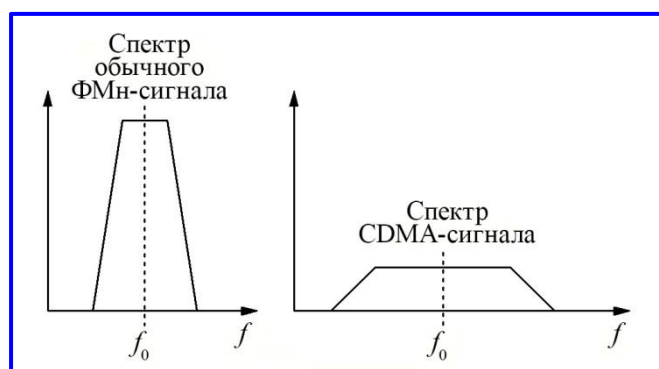


Рис. 8. Расширение спектра

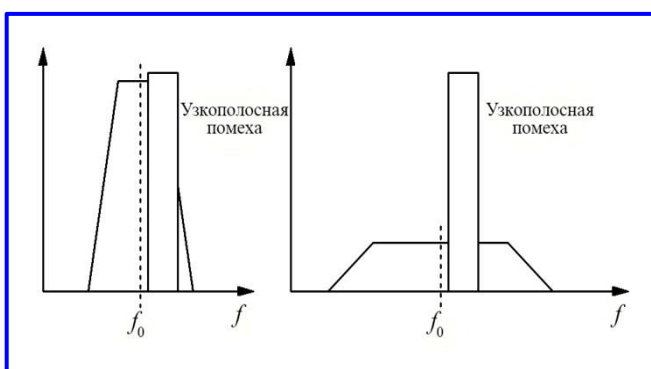


Рис. 9. Узкополосная помеха

7. Расширение спектра

Расширение спектра в сигналах при CDMA происходит из-за перемножения с КП Уолша. Так как один символ сигнала передается N -символами последовательности Уолша, следовательно, фаза изменяется в N раз чаще. Вследствие этого спектр передаваемого сигнала становится в N раз шире. При этом мощность сигнала не изменяется, из-за чего амплитуда спектра уменьшается (рис. 8) [1, 3].

Расширенный спектр имеет ряд преимуществ, первое из которых – это устойчивость к узкополосным помехам (рис. 9). Узкополосная помеха – помеха, у которой ширина спектра намного уже, чем ширина спектра сигнала.

Как уже известно, мощность сигнала не меняется, поэтому отношение мощности сигнала к мощности шума в обоих случаях будет одинаковой, но, как видно на рис. 9, в первом случае помеха оказывает большее влияние на спектр, чем во втором случае.

Второе преимущество – устойчивость к частотно-селективным замираниям (рис. 10). Замирания проявляются при многолучевом распространении, когда сигналы отражаются от множества объектов и в приемник приходит пачка лучей с разными

сдвигами фаз, вследствие чего амплитуда спектра может уменьшаться или увеличиваться.

В первом случае замирания могут внести значительные искажения в сигнал, из-за чего он может потеряться в шумах и не будет возможности его распознать и выделить полезную информацию.

Когда спектр сигнала широкий, десятки мегагерц, замирания происходят не на всех частотах, поэтому такой сигнал можно принять и обработать.

8. Синхронизация сигналов

Чтобы сигналы при CDMA оставались ортогональными, важным условием будет точная синхронизация всех приемников и передатчиков по времени, то есть передача сигналов по всем каналам должна происходить одновременно. При неточной синхронизации сигналы будут мешать друг другу [5, 6].

Рассмотрим на примере (рис. 11). По двум каналам передаются произвольные символы, перемноженные с соответствующими ортогональными кодовыми последовательностями. В первом случае синхронизация корректная, а во втором имеется сдвиг по времени. Проверим ортогональность сигналов в обоих случаях.

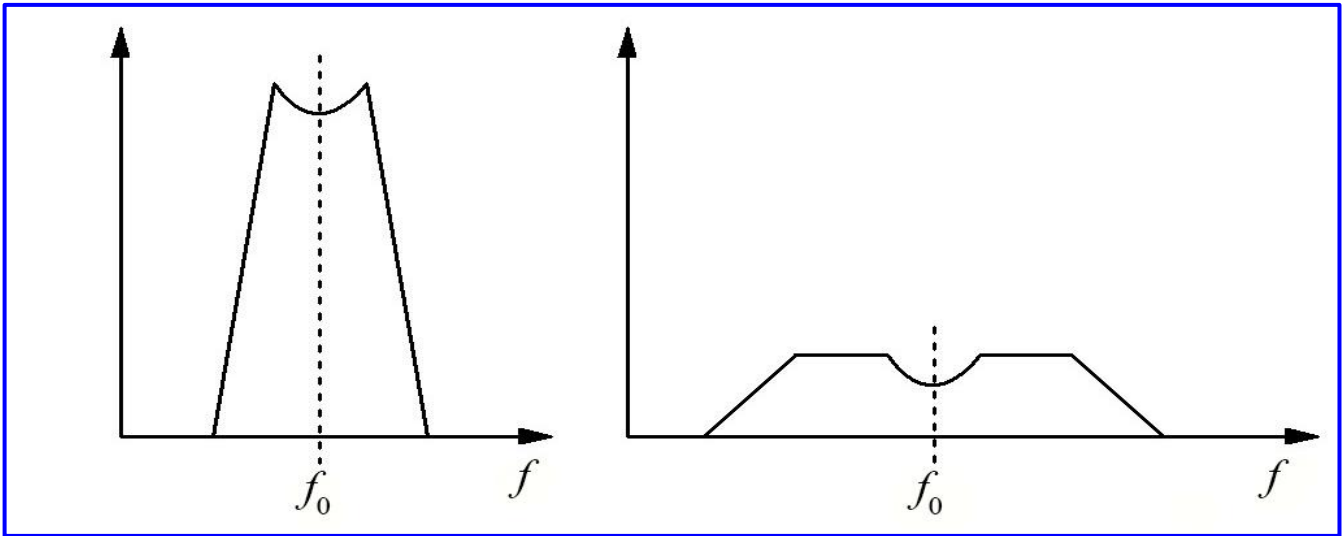


Рис. 10. Частотно-селективные замирения

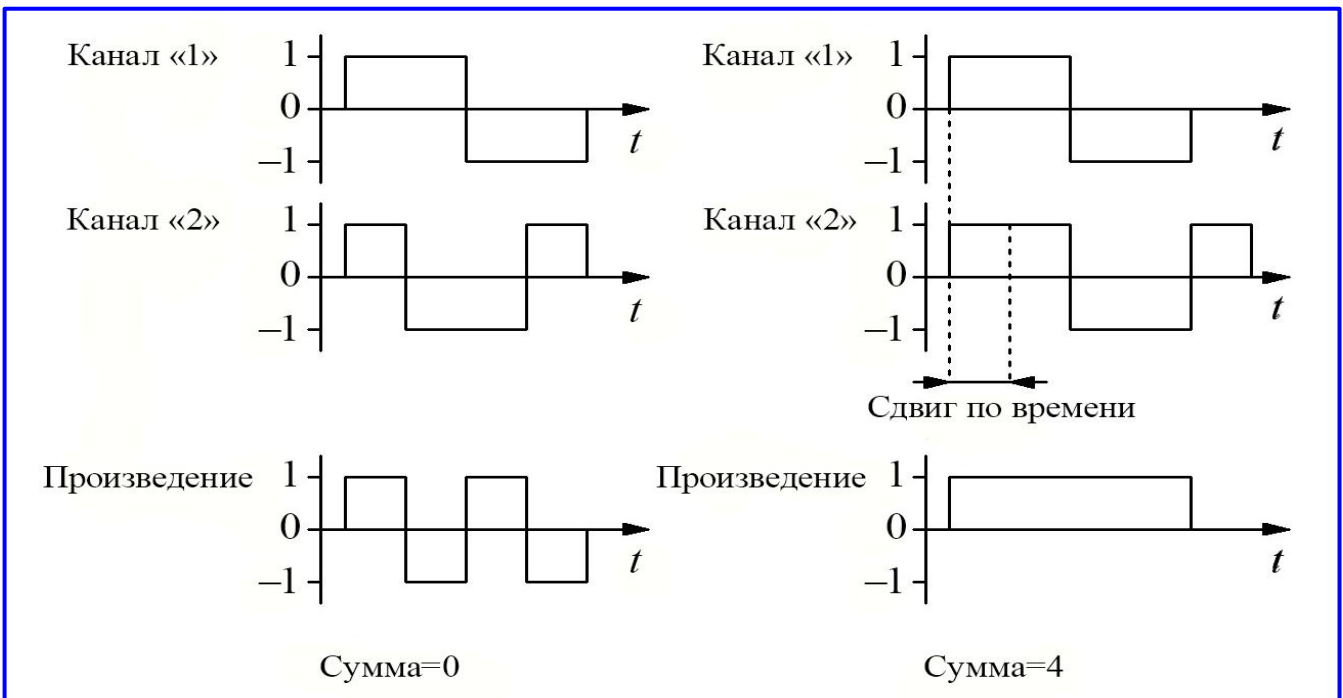


Рис. 11. Синхронизация сигналов

Как видно на рис. 11, во втором случае, когда синхронизация нарушена, сигналы не только создают помехи друг другу, но также их невозможно различить.

9. Недостатки

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, CDMA имеет два основных недостатка, которые можно решить, усовершенствовав структуру сети [2, 3, 5].

Первый – увеличение необходимой ширины спектра с увеличением количества пользовате-

лей. Это связано с матрицей Адамара, в которой для добавления строк (кодовых последовательностей для новых пользователей) необходимо увеличить количество столбцов, а, следовательно, увеличится длина КП Уолша, которая напрямую влияет на расширение спектра.

Второй недостаток связан с местоположением пользователя относительно передающей станции. Дело в том, что пользователи, находящиеся ближе всего к передающей станции, создают помехи пользователям, находящимся далеко по объективным причинам.

Заключение

CDMA является уникальным в своем роде методом, который, в отличие от TDMA и FDMA, не использует дробление частотно-временного ресурса для увеличения количества каналов в сети, а также имеет наибольшую емкость системы. Обобщая все вышесказанное, данный метод является наиболее эффективным в применении, использовании имеющихся ресурсов и имеет большой потенциал для развития.

Литература

1. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA: Principles and Applications / V. P. Ipatov. – Hoboken, New Jersey, U. S. : John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 400 p.
2. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы

и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. Е. Е. Грозы и др. – 2-е изд. – Москва [и др.] : Вильямс, 2016. – 1099 с. : ил.

3. Бабков В. Ю. Системы мобильной связи с кодовым разделением каналов / В. Ю. Бабков, А. Н. Никитин, К. Н. Осенний. – Санкт-Петербург : Триада, 2003. – 239 с.
4. Zigangirov K. Sh. Theory of code division multiple access communication / K. Sh. Zigangirov. – Hoboken, New Jersey, U. S. : John Wiley & Sons, 2004. – 416 p.
5. Синхронизация в системах с прямым расширением спектра / А. В. Тихомиров, Е. В. Омелянчук, А. Ю. Семёнова [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9 (60). – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6203>.
6. Li Daoben. The perspectives of large area synchronous CDMA technology for the fourth-generation mobile radio / Li Daoben // IEEE Communications Magazine. – 2003. – Vol. 41 (№ 3). – P. 114 – 118.

Поступила в редакцию 14.02.2023

Егор Алексеевич Чистяков, ассистент кафедры РЭСК, т. +7 (936) 666-22-75, e-mail: chistyakov@mirea.ru.

Илья Александрович Мартынов, студент 4-го курса РЭСК, т. +7(926) 925 45 82, e-mail: ilia.martinov01@gmail.com.

Елена Викторовна Самохина, доцент кафедры телекоммуникаций, т. +7(909) 623-40-77, e-mail: samohina@mirea.ru. (МИРЭА – Российский технологический университет).

CODE DIVISION OF CHANNELS

E. A. Chistyakov, I. A. Martynov

In the modern world, wireless transmission of information is, without exaggeration, the main method of communication and navigation. At the same time, the number of users of various communication networks is growing daily. In this regard, the actual question arises of the best way to organize communication with limited resources of the frequency range and growing demands for the quality and quantity of transmitted information. In this paper, the main ways of channel separation, their advantages and disadvantages are considered. Particular attention is paid to the code division of channels, since this method is the most difficult to understand, but at the same time the most effective. The principles of code division of channels are still used in modern cellular networks, but in an improved form, thereby confirming their effectiveness and relevance.

Keywords: code division of channels, CDMA, time division of channels, TDMA, frequency division of channels, FDMA, frequency-time division of channels, Walsh code sequence, spectrum spreading.

References

1. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications / V. P. Ipatov. – Hoboken, New Jersey, U. S. : John. Wiley & Sons Ltd, 2004. – 400 p.
2. Sklyar B. Digital communication: theoretical foundations and practical application / B. Sklyar ; transl. from English E. E. Grozy and others. – 2nd ed. – Moscow [et al.] : Williams, 2016. – 1099 p. : ill.
3. Babkov V. Yu. Mobile communication systems with code division of channels / V. Yu. Babkov, A. N. Nikitin, K. N. Autumn. – St. Petersburg : Triada, 2003. – 239 p.
4. Zigangirov K. Sh. Theory of code division multiple access communication / K. Sh. Zigangirov. – Hoboken, New Jersey, U. S. : John Wiley & Sons, 2004. – 416 p.
5. Synchronization in direct spread spectrum systems / A. V. Tikhomirov, E. V. Omelyanchuk, A. Yu. Semenova [at al] // IVD. – 2019. – No. 9 (60). – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6203>.
6. Li Daoben. The perspectives of large area synchronous CDMA technology for the fourth-generation mobile radio / Li Daoben // IEEE Communications Magazine. – 2003. – Vol. 41 (№ 3). – P. 114 – 118.

Egor Alekseevich Chistyakov, assistant of Department of RSC, tel. +7 (936) 666-22-75, e-mail: chistyakov@mirea.ru.

Iliya Aleksandrovich Martynov, student of Department of RSC, tel. +7(926) 925 45 82, e-mail: ilia.martinov01@gmail.com.

Elena Victorovna Samohina, docent of the Department of Telecommunications, tel. +7(909) 623-40-77, e-mail: samohina@mirea.ru. (MIREA – Russian Technological University).