

5. Черногор, Л.Ф. Экология геокосмоса [Текст] / Л.Ф. Черногор – Universitates. 2007 № 3, с 16–18.
6. Gerlach R., Amer N.M. Appl. Phys. – V.23. – 1980. – p.319.
7. P.L. Meyer, M.W. Sigrist. Atmospheris pollution using CO<sub>2</sub>-laser photoacoustic spectroscopy and other technigues. Rov. Sci. Instrum., 1990, v. 61, № 7, pp. 1779–1807.
8. Mehlhorn H., Wellburn A.R. Nature. – V.327. – 1987. – p.417.
9. Васильев, Б.И. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды [Текст] / Васильев, Б.И., Маннун, У.М. Квантовая электроника – 2006, т. 36, № 9, с. 801–820.
10. Hubert M.H., Ryan I.S., Crane RA. Report №83-715-1, National research Council Canada. – 1983.

*У даній статті запропоновано оцінку різних методів зменшення впливу міжсимвольної інтерференції (МСІ), таких як: захисний інтервал, парціальний відгук, коректувальний код, коректор з вирішуючим зворотнім зв'язком та частотно-ефективні методи модуляції, на основі критерію мінімальної бітової ймовірності помилки. Отримані результати дозволяють дати рекомендації щодо найбільш ефективних методів зменшення впливу міжсимвольної інтерференції у різних умовах*

*Ключові слова: міжсимвольна інтерференція, відношення сигнал/шум, D-критерій, ймовірність помилки біта, коректор з вирішальним зворотнім зв'язком*

*В данной статье предложена оценка различных методов уменьшения влияния МСИ, таких как: защитный интервал, парциальное кодирование, корректирующий код, корректор с решающей обратной связью, частотно-эффективное кодирование, на основе критерия минимальной вероятности битовой ошибки. Полученные результаты позволяют дать рекомендации о наиболее эффективных методах уменьшения влияния межсимвольной интерференции в различных условиях*

*Ключевые слова: межсимвольная интерференция, отношение сигнал/шум, D-критерий, вероятность ошибки бита, корректор с решающей обратной связью*

УДК 621.391

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

**Д. М. Розенвассер**

Старший преподаватель\*

E-mail: onas\_tes\_roden@mail.ru

**С. В. Коновалов\***

\*Кафедра теории электрической связи

им. А. Г. Зюко

Одесская национальная академия связи

им. А. С. Попова

ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина,

65023

## 1. Введение

Практически в любых системах передачи, как при беспроводной связи, так и в проводной и оптической, возникает межсимвольная интерференция (МСИ). МСИ – это искажения сигнала за счет откликов на соседние символы, которые могут проявлять себя как помехи. Существует несколько распространенных методов борьбы с МСИ. В работе [1] предложено использовать защитный интервал. В книге [2] анализируется применение корректора с решающей обратной связью (КРОС). В [3] речь идет о переходе на более частотно-эффективные методы модуляции. Предлагаются и другие методы [4, 5, 6].

Однако на сегодняшний день в литературе нет рекомендаций по выбору оптимального метода борьбы с межсимвольной интерференцией при заданных условиях в системе передачи. Каждый из этих методов имеет ряд преимуществ и недостатков. Например, при

использовании защитного интервала повышается необходимая скорость передачи сигнала, а применение КРОС приводит к задержке, необходимой на обработку поступившего на корректор сигнала.

При сравнении методов борьбы с МСИ будем использовать критерий минимума вероятности ошибки бита.

## 2. Оценка вероятности ошибки

Вероятность ошибки в системе передачи (СП) с МСИ можно оценить по D-критерию. D-критерий имеет смысл наибольшего относительного прироста отсчета канального символа за счет МСИ. При МСИ в худшем случае все мешающие отсчеты уменьшают отсчет канального символа, который демодулируется, и отсчетное значение вместо амплитуды имеет амплитуду  $a \cdot (1-D)$ , где D – коэффициент, рассчитанный

с помощью D-критерия, который определяется по значениям ненулевых отсчетов [7]. В этом случае для СП с фазовой модуляцией ФМ-4 вероятность ошибки бита будет равна:

$$p = Q\left(\frac{a(1-D)}{\sigma}\right) = Q(\sqrt{2}h_1(1-D)), \quad (1)$$

где  $h_1^2$  – отношение сигнал/шум (ОСШ).

$$h_1^2 = \frac{E_1}{N_0},$$

где  $E_1$  – энергия бита,  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума.

$Q(z)$  - гауссов интеграл вероятности ошибки;

$\sigma$  - среднеквадратическое отклонение шума.

$$D = \frac{1}{P(0)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |P(nT)|, \quad (2)$$

где  $P(0)$  – значение амплитуды в значащий момент времени,

$P(nT)$  – амплитуды в другие отсчетные моменты времени.

Первый предлагаемый метод устранения МСИ – использование защитного интервала.

С целью уменьшения влияния МСИ длительность каждого символа уменьшается. Таким образом, между символами возникает защитный интервал. Такое определение защитного интервала соответствует использованию линейных кодов типа RZ [8,9].

При использовании защитного интервала вероятность ошибки рассчитывается в зависимости от величины интервала [1]:

$$P_{\text{защитн.}} = 0.65 \cdot \exp(-0.443 \cdot (\lambda \cdot h_1 \cdot \sqrt{D_{\text{мл}}} + 0.75)^2), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – параметр, который учитывает метод модуляции: для когерентного приема ФМ-М  $\lambda = 2,7 + 3$ ; для некогерентного приема  $\lambda = 2$ .

$D_{\text{мл}}$  – длина защитного интервала ( $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$  от длительности символа).

Рассчитанные по выражению (3) зависимости вероятности ошибки бита с различными значениями защитного интервала представлены на графике рис. 1.

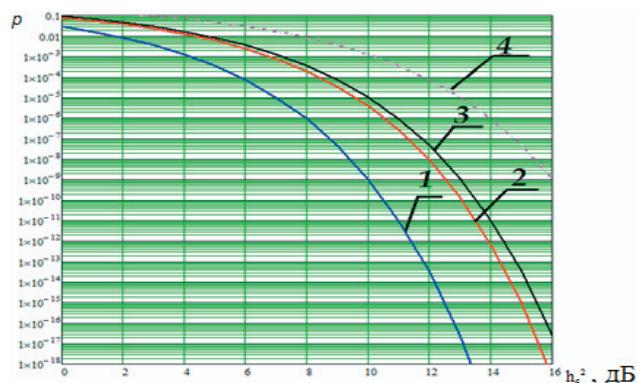


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ в канале с МСИ при использовании защитного интервала

где 1 – вероятность ошибки бита при использовании защитного интервала  $\frac{1}{2}$ ; 2 – вероятность ошибки бита в канале без МСИ; 3 – вероятность ошибки бита при использовании защитного интервала  $\frac{1}{4}$ ; 4 – вероятность ошибки бита при использовании защитного интервала  $\frac{1}{8}$ .

Следующий метод борьбы с МСИ – парциальное кодирование [4,5].

Парциальное кодирования – это техника, позволяющая вводить контролируемое количество МСИ для формирования передаваемого сигнала. Применение парциального кодирования позволяет передавать нам 2 символа на герц, используя полную теоритическую возможность канала.

Существует несколько классов такого кодирования, отличающихся методом формирования передаточной последовательности битов (табл. 1). Например, для формирования последовательности 1-го класса мы задерживаем 1-ый бит последовательности с дальнейшим использованием формулы для передаточного сигнала:

$X_i + X_{i-1}$ , то есть складываем текущий и предыдущий бит последовательности в соответствующих им полярных уровнях напряжения: 1 для 1 и -1 для 0. Как видно из этого алгоритма, в итоге мы получим 3-х уровневый сигнал, с соответствующим ему 9-ти точечным созвездием.

Таблица 1

Формирования классов парциального кодирования

Класс	Формула	Передаточная функция	Количество уровней (L)
1	$x_i + x_{i-1}$	$2 \cos \frac{T}{t}$	3
2	$x_i + 2x_{i-1} + x_{i-2}$	$4 \cos^2 \frac{T}{t}$	5
3	$2x_i + x_{i-1} + x_{i-2}$	$2 + \cos T - \cos 2T$	5
4	$x_i + x_{i-2}$	$2 \sin T + j(\sin T - \sin 2T)$	3
5	$x_i + 2x_{i-2} + x_{i-4}$	$4 \sin^2 \frac{T}{t}$	5

Вероятность ошибки бита в случае применения парциального кодирования рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$P_{\text{парц.код.}} = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{L^2}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\log_2 L} \cdot \left(10^{0.1h} \cdot \frac{6}{L^2 - 1}\right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (4)$$

где  $L$  – параметр, который зависит от сигнального созвездия на выходе парциального кодера,  $L = 3$  для 9-ти точечного сигнала и  $L = 5$  для 25-ти точечного сигнала;

$\operatorname{erfc}(x)$  – дополнительная функция ошибок, определяется через функцию ошибок:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$$

График вероятностей ошибки бита в случае применения парциального кодирования для разноуровневых сигналов ( $L = 3, L = 5$ ), рассчитанных по выражению (4) представлен на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ в канале с МСИ при использовании парциального кодирования

где 1 – вероятность ошибки бита при использовании парциального кодирования ( $L=3$ ); 2 – вероятность ошибки бита при использовании парциального кодирования ( $L=5$ ).

Также для уменьшения влияния МСИ возможно использовать корректирующий код. Рассмотрим эффективность этого метода на основе кода БЧХ [10].

Вероятность ошибки в системе передачи с БЧХ можно оценить по следующей формуле:

$$P_{\text{вчх}} = \sum_{q=q_{\text{исп}}+1}^n C_n^q \cdot p^q (1-p)^{n-1} \quad (5)$$

где  $n$  – длина кода,  $q$  – число исправляющих ошибок;

$C_n^q$  – число сочетаний из  $n$  по  $q$ .

$p$  – вероятность ошибки, рассчитанная с D-критерием.

График на рис. 3 показывает нам зависимости ошибки бита при использовании БЧХ с различными значениями длины кода и числом исправляющих ошибок.

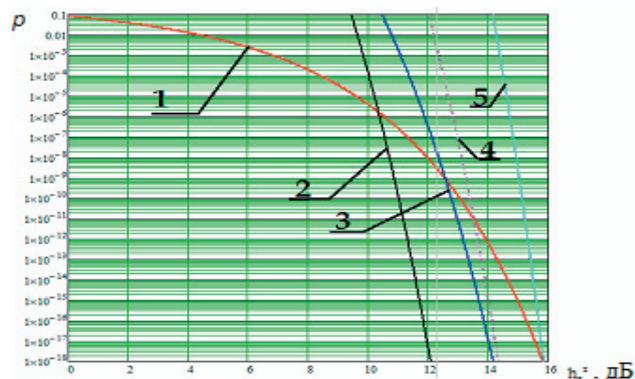


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ в канале с МСИ при использовании кода БЧХ

где 1 – вероятность ошибки бита в канале без МСИ; 2 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(-63,45); 3 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(90,45); 4 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(120,90); 5 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(255,233).

Как видно из графика, вероятность ошибки бита напрямую зависит от количества исправляемых кодом ошибок. БЧХ с большим числом исправлений является более привлекательным.

Ещё одним методом борьбы с МСИ является переход на более частотно-эффективные методы модуляции. Для радиоканалов и проводных СП на металлическом кабеле такое решение является общеизвестным. В последнее время проводятся исследования для многопозиционных методов модуляции и в СП на оптическом кабеле [11].

В этом случае вероятность ошибки бита будет рассчитываться по формуле [3]:

$$P = \frac{1}{\log_2 M} \cdot \operatorname{erfc} \left[ \left( \sqrt{10^{0,1h_1}} \cdot \sqrt{\log_2 M} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right) \right], \quad (6)$$

где  $M$  – количество уровней сигнала. Функция  $\operatorname{erfc}$  была описана выше в выражении (4).

График зависимостей вероятности ошибки бита, рассчитанных по выражению (6), представлен на рис. 4.

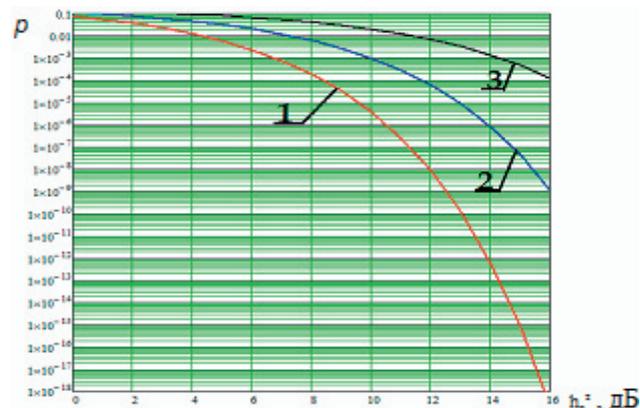


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ в канале с МСИ при использовании более частотно-эффективных методов модуляций

где 1 – вероятность ошибки бита при использовании ФМ-4 модуляции; 2 – вероятность ошибки бита при использовании модуляции ФМ-8; 3 – вероятность ошибки бита при использовании ФМ-16 модуляции.

Также для борьбы с МСИ используются корректоры с обратной связью по решению (КРОС) [12].

Идея использования КРОС заключается в том, что мы исключаем влияние МСИ путём вычитания значений проверенных символов обратной цепи корректора, неискажённых шумом, решения о которых принимаются истинными, из выходной последовательности.

Вероятность ошибки бита в этом случае рассчитывается согласно формуле [1]:

$$P = \left[ 1 - F\left(\sqrt{2 \cdot h_1^2}\right) \right] + \left[ 1 - F\left(\sqrt{4 \cdot h_1^2 (1 - R\sqrt{\beta})}\right) \right], \quad (7)$$

где  $R$  и  $\beta$  – параметры описывающие импульсную реакцию канала.

Функция  $F(x)$  – функция распределения вероятностей,  $F(x) = 1 - Q(x)$ .

### 3. Сравнение различных методов уменьшения влияния МСИ

Зависимости вероятности ошибок с лучшими показателями для каждого метода, рассчитанные по выражениям (1), (3)–(7) представлены на графике рис. 5.

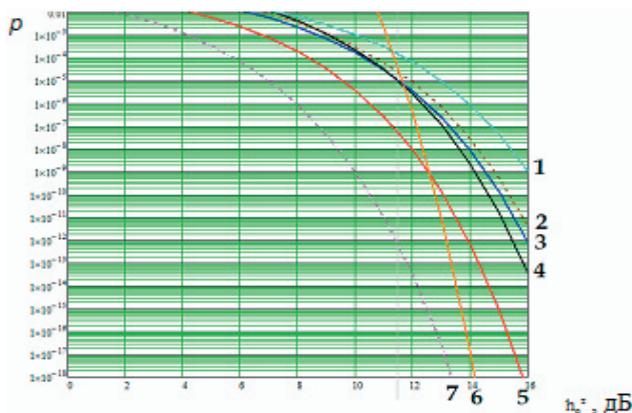


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ для различных методов, рассчитанная по формулам (1), (3)–(7)

где 1 – вероятность ошибки бита при использовании модуляции ФМ-8; 2 – вероятность ошибки бита при использовании КРОС; 3 – вероятность ошибки бита рассчитанная с D-критерием; 4 – вероятность ошибки бита при использовании парциального кодирования ( $L=3$ ); 5 – вероятность ошибки бита в канале без МСИ; 6 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(63,45); 7 – вероятность ошибки бита при использовании защитного интервала  $\frac{1}{2}$ .

Из графика видно, что наибольший эффект дает применение защитного интервала ( $D_{мл} = \frac{1}{2}$ ) на малых отношениях сигнал/шум и корректирующий код на больших ОСШ.

На графике рис. 5 не учтены недостатки каждого из предложенных методов, т.к. их применение позволяет уменьшить влияние МСИ за счет ухудшения других параметров системы передачи.

На графике 6 представлены скорректированные зависимости ошибки бита для всех рассматриваемых методов.

Из графика рис. 6 видно, что при вероятности ошибки бита  $10^{-3}$ , что характерно для радиосвязи,

применение защитного интервала  $D_{мл} = \frac{1}{2}$  позволяет уменьшить ОСШ на 1дБ, что позволяет получить результат, который отличается от СП без МСИ менее, чем на 1дБ. Для  $p = 10^{-12}$ , что характерно для оптической связи, применение защитного интервала оказывается не столь эффективным. В этом случае рекомендуется корректирующий код.

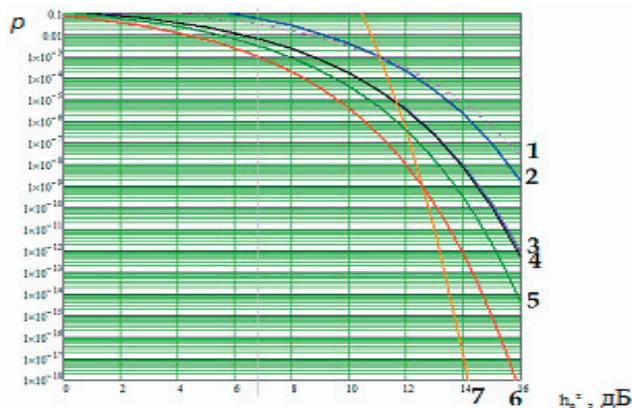


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки бита от ОСШ, скорректированная с учетом одинаковых параметров

где 1 – вероятность ошибки бита при использовании КРОС; 2 – вероятность ошибки бита при использовании парциального кодирования ( $L=3$ ); 3 – вероятность ошибки бита, рассчитанная с D-критерием; 4 – вероятность ошибки бита при использовании модуляции ФМ-8; 5 – вероятность ошибки бита при использовании защитного интервала  $\frac{1}{2}$ ; 6 – вероятность ошибки бита в канале без МСИ; 7 – вероятность ошибки бита при использовании БЧХ(63,45).

### 4. Заключение

Проблема борьбы с межсимвольной интерференцией является актуальной сегодня для любой системы передачи.

По результатам расчетов и сравнения различных методов борьбы с МСИ можно сделать вывод об их эффективности при тех или иных условиях. Так, наиболее эффективными являются применение защитного интервала и корректирующего кодирования. Применение кода БЧХ позволяет получить выигрыш по отношению сигнал/шум на 3 дБ.

Использование более эффективных и популярных на сегодня кодов (таких как коды Рида-Соломона, коды с малой плотностью проверок на четность, турбо-коды, коды с многопороговым декодированием) позволит получить еще больший выигрыш.

### Литература

1. Теория электрической связи [Текст]: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
2. Proakis, John G. Digital Communications [Text] / J.G. Proakis – 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 801 с.
3. Sklar, Bernard. Digital Communications. Fundamentals & Applications [Text] / B.Sklar – 2nd edition – Prentice-Hall, 2001. – 1104 p.

4. Langton, Charan. Partial Response signaling and Quadrature Partial Response (QPR) modulation. Tutorial 16 [Text] / C. Langton – Signal Processing and Simulation Newsletter, 2011.
5. Сукачев, Э.А. Введение в теорию сигналов с управляемой межсимвольной интерференцией : Монография [Текст] / Э.А. Сукачев, П.А. Шкулипа – Одесса: ВМВ, 2011. – 200 с.
6. Золотарев, В.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник [Текст] / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин – М.: Горячая Линия-Телеком, 2004. – 126 с.
7. Когновицкий, Л.В. Межсимвольная и межканальная интерференция в системах передачи цифровой информации [Текст] / Л.В. Когновицкий, Л.О. Ржига – М.: Изд-во МЭИ, 1998.
8. Брескин, В.А. Спектральная эффективность линейного кода RZ [Текст] / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – Одеса, 2011. – №2.
9. Breskin V.A. Effect of optical channel bandwidth on the immunity of NRZ and RZ linear codes / V.A. Breskin, A.D. Mazur, D.M. Rozenvasser // TCSET-2012 – Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. – p. 365.
10. Tapp, T. L. Extended hamming and BCH soft decision decoders for mobile data applications [Text] / T. L. Tapp, A. A. Luna, X. Wang, S. B. Wicker // IEEE Transactions Communications. – 1999. – Vol. 47, no. 3. – p. 333–338.
11. Брескин В.А. Увеличение пропускной способности оптического канала волоконно–оптической системы передачи [Текст] / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Электроника и связь. – Киев, 2012. – №6.
12. Chen, S. Decision-feedback equalization using multiple-hyperplane partitioning for detecting ISI-corrupted M-ary PAM signals [Text] / S. Chen, L. Hanzo, B. Mulgrew // IEEE Transactions Communications. – 2001. – Vol. 49, no. 5. – p. 760–764.

*Представлена задача аналізу алгоритму багатостанційного доступу для систем CSMA/TDMA із зостосуванням у сенсорних мережах. Використання комбінованого методу доступу дозволяє мінімізувати конфліктні ситуації. Проведений аналіз показав характерне повільне зменшення коефіцієнту використання каналу при збільшенні активних абонентських датчиків*

*Ключові слова: абонентський вузол, доступ, заявка, таймслот, конфлікт, коефіцієнт використання каналу*

*Представлена задача анализа алгоритма многостанционного доступа для систем CSMA/TDMA применительно к сенсорным сетям. Использование комбинированного метода доступа позволяет минимизировать конфликтные ситуации. Проведенный анализ показал характерное плавное снижение коэффициента использования канала при увеличении активных абонентских датчиков*

*Ключевые слова: абонентский узел, доступ, заявка, таймслот, конфликт, коэффициент использования канала*

УДК 621.391

## ANALYSIS OF STOCHASTIC CHARACTERISTICS FOR CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS

Yu. A. Vasilenko

Deputy Director for Technical Issues

Branch of CJSC «Kyivstar GSM»

ul. Kosmicheskaya, 21, Kharkiv, Ukraine, 61166

E-mail: sunright@yandex.ru

Ya. T. Hussein

Graduate

Department of «Telecommunications systems»

Kharkiv National University of Radio Electronics

Lenina 14, Kharkov. Ukraine, 61166

E-mail: tks2006@ukr.net

### 1. Introduction

In wireless communication systems, Wi-Fi, WiMAX, in the cellular and sensor systems throughput, link utilization, quality of service QoS largely depend on the choice of multiple access method (MA) (MAC Access Protocol). Over recent years MA is usually developed within modernization techniques with carrier sense (CSMA Carrier Sense Multiple Access), derived from the ALOHA method [1-3]. In its simplest form, this method is based on the fact that subscriber stations or sensor nodes scan in the selected frequency band

and time window size  $T$  they start to send information, if the access point, the base station (BS) or a node, that collects sensor information, are in standby mode [4-6]. Otherwise, the attempt to transmit is repeated. Such MA method is simple and reliable in implementation, it does not require clock synchronization. However, ALOHA has some drawbacks: the actual capacity of the system reduces proportionally to the number access elements and their activity, coefficient of channel utilization is reduced as well.

Combined MA method is more promising [7], it is based on the union of CSMA TDMA (Time Division Multiple