

УДК 621.396

НОВЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ БЛОЧНЫЕ КОДЫ

Крейнделин В.Б., Варукина Л.А.

В последнее время у производителей оборудования и операторов беспроводного широкополосного доступа усилился интерес к технологии MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) [1], то есть к системам с несколькими антеннами на передающей стороне и несколькими антеннами на приемной стороне. В таких системах сигналы передаются и принимаются через несколько антенн одновременно и в одной полосе частот. Принцип работы системы MIMO иллюстрируется рис 1.

В системах MIMO предполагается пространственно-временное кодирование сигналов на передающей стороне, при котором передаваемые информационные символы разделяются на блоки из L символов и излучаются через M передающих антенн за заданное количество временных интервалов K . Переданные сигналы, после воздействия релеевских замираний и аддитивного белого гауссовского шума в радиоканале, поступают в N приемных трактов. В каждый из N приемных трактов поступает аддитивная смесь из M переданных потоков символов.

Спектральная эффективность каналов связи MIMO напрямую зависит от символической скорости R применяемых пространственно-временных кодов, то есть от отношения длины блока информационных символов L к количеству требуемых для передачи этого блока временных интервалов K :

$$R = L/K.$$

Чем выше символическая скорость R используемого пространственно-временного кода, тем выше эффективность использования частотных ресурсов беспроводного канала связи.

В стандарте IEEE 802.16e [2] рекомендуются для использования пространственно-временные коды

Предлагаются новые неортогональные пространственно-временные коды с символической скоростью 2 для систем с 4-мя передающими антеннами, которые по своим характеристикам превосходят аналогичный код, рекомендуемый стандартом IEEE 802.16e для использования в системах WiMax.

двух классов: ортогональные и неортогональные.

При ортогональном кодировании в системах MIMO можно получить значительный энергетический выигрыш по сравнению с традиционными системами с одной антенной на передающей и приемной сторонах за счет разнесения. Примером ортогонального кода является код, определяемый матрицей [2]:

$$\begin{pmatrix} s_1 & -s_2 \\ s_2 & s_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $s_i, i=1,2$ - комплексный информационный символ. В матрице (1) строки соответствуют передающим антеннам, а столбцы - временным интервалам передачи символов. Символическая скорость этого кода равна 1, так как за $K=2$ временных интервала передаются $L=2$ информационных символа.

При ортогональном пространственно-временном кодировании имеются ограничения на спектральную эффективность беспроводных каналов связи, поскольку символическая скорость ортогональных кодов для сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией (КАМ) не превышает 1 [1]. Повысить пропускную способность каналов связи можно с помощью неортогональных пространственно-временных кодов. Символическая скорость при неортогональном кодировании может достигать величины, соответствующей количеству передающих антенн [1], то есть за K временных интервалов можно передать блок из $K \cdot M$ информационных символов.

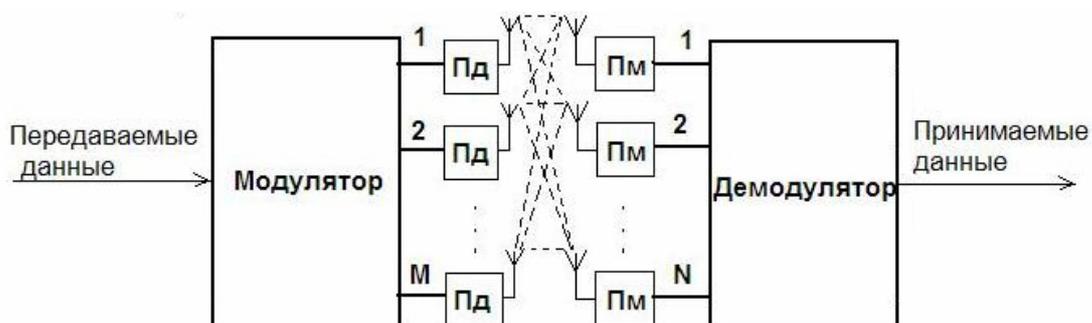
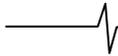


Рис. 1. Структурная схема системы MIMO



В стандарте [2] для систем с двумя передающими антеннами рекомендуются для использования два неортогональных кода, определяемых следующими матрицами:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_1 + jrs_4 & rs_2 + s_3 \\ s_2 - rs_3 & jrs_1 + s_4 \end{bmatrix}, \text{ где } r = \frac{\sqrt{5}-1}{2}. \quad (3)$$

Символьная скорость указанных кодов совпадает с числом передающих антенн, равным двум, то есть $R = M$.

Для систем с четырьмя передающими антеннами стандартом IEEE 802.16e [2] определены три типа пространственно-временных кодов:

1) Ортогональный код с символьной скоростью $R = 1$:

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & -s_4 \\ 0 & 0 & s_4 & s_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) Неортогональный код с символьной скоростью $R = 2$:

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & s_5 & -s_7 \\ s_2 & s_1 & s_6 & -s_8 \\ s_3 & -s_4 & s_7 & s_5 \\ s_4 & s_3 & s_8 & s_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) Неортогональный код с символьной скоростью $R = 4$:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

При возрастании символьной скорости пространственно-временных кодов повышается эффективность использования частотных ресурсов беспроводного канала связи. Однако ценой повышения спектральной эффективности является усложнение процедур обработки сигналов на приемной стороне и снижение энергетической эффективности [1], [5]. В системах с четырьмя антеннами на передающей стороне в качестве компромисса между спектральной эффективностью и сложностью приемника может рассматриваться пространственно-временное кодирование со скоростью $R = 2$.

Целью данной работы является синтез новых неортогональных пространственно-временных кодов с символьной скоростью 2 для систем с четырьмя передающими антеннами, обеспечивающих более высокую помехоустойчивость по сравнению с системами, использующими код (5).

Предлагается формировать новые коды как комбинацию ортогонального кода (1) и неортогонального кодов (3):

1) Составим из матриц (1) и (3) следующую матрицу:

$$A = \begin{bmatrix} c_{1-4} & c'_{5-8} \\ c_{5-8} & -c'_{1-4} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где

$$c_{1-4} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_1 + jrs_4 & rs_2 + s_3 \\ s_2 - rs_3 & jrs_1 + s_4 \end{bmatrix},$$

$$c_{5-8} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_5 + jrs_8 & rs_6 + s_7 \\ s_6 - rs_7 & jrs_5 + s_8 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, первый предлагаемый пространственно-временной код примет вид:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_1 + jrs_4 & rs_2 + s_3 & -s_5 + jrs_8 & -rs_6 - s_7 \\ s_2 - rs_3 & jrs_1 + s_4 & rs_7 - s_6 & jrs_5 - s_8 \\ s_5 + jrs_8 & rs_6 + s_7 & s_1 - jrs_4 & rs_2 + s_3 \\ s_6 - rs_7 & jrs_5 + s_8 & s_2 + rs_3 & -jrs_1 + s_4 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

2) Составим из матриц (3) и (1) следующую матрицу:

$$B = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} D_1 + jrD_4 & rD_2 + D_3 \\ D_2 - rD_3 & jrD_1 + D_4 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$D_1 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ s_2 & -s_1 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} s_3 & s_4 \\ s_4 & -s_3 \end{bmatrix},$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} s_5 & s_6 \\ s_6 & -s_5 \end{bmatrix}, \quad D_4 = \begin{bmatrix} s_7 & s_8 \\ s_8 & -s_7 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, второй пространственно-временной код примет вид:

$$B = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_1 + jrs_7 & s_2 + jrs_8 & rs_3 + s_5 & rs_4 + s_6 \\ s_2 + jrs_8 & -s_1 - jrs_7 & rs_4 + s_6 & -rs_3 - s_5 \\ s_3 - rs_5 & s_4 - rs_6 & jrs_1 + s_7 & jrs_2 + s_8 \\ s_4 - rs_6 & -s_3 + rs_5 & jrs_2 + s_8 & -jrs_1 - s_7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Для сравнения характеристик предлагаемых кодов (8) и (10) с кодом (5) было проведено статистическое моделирование в среде MATLAB. Моделирование проводилось при использовании демодуляции по методу максимального правдоподобия [3] для сигналов с модуляцией QPSK для системы MIMO с 4 передающими и 2 приемными антеннами (система 4x2).

В результате моделирования были получены зависимости вероятности ошибки на бит (Роб) от отношения сигнал/шум на символ (ОСШ), которые приведены на рисунке 2.

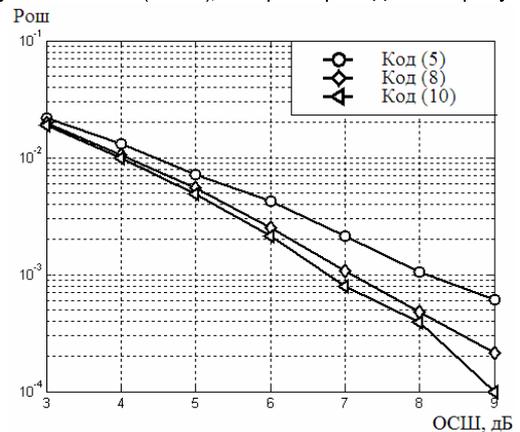


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

Требуемая вероятность ошибки на бит на входе канального декодера приемника системы IEEE 802.16e составляет 10^{-3} [2]. Из графика видно, что для системы 4x2 предлагаемые коды (8) и (10) превосходят по характеристикам код (5) и позволяют получить выигрыш при $\text{Рош}=10^{-3}$ 0,9 и 1,2 дБ, соответственно. Причем лучшими характеристиками обладает код (8). Таким образом, применение новых кодов позволит улучшить помехоустойчивость систем с пространственно-временным кодированием без снижения их спектральной эффективности.

Следует отметить, что улучшение энергетического баланса радиоканала позволяет увеличить дальность связи, соответственно, увеличить площадь радиопокрытия базовой станции в сотовой сети, что в конечном итоге приведет к сокращению количества базовых станций для обслуживания территории заданной площади.

Потери на распространение радиоволн в городских условиях для сетей подвижной связи, работающих в диапазоне 2 ГГц (корневой диапазон частот для систем подвижной связи IMT-2000 [7]), вычисляются с использованием модели распространения радиоволн COST-Hata [6]:

$$L_p = K_1 + K_2 \cdot \lg(d), \quad (11)$$

где L_p – потери на распространение радиоволн в радиоканале, дБ;

$$K_1 = 46.3 + 33.9 \cdot \lg(f) - 13.82 \cdot \lg(H_b) - a(H_m), \text{ дБ};$$

$$K_2 = 44.9 - 6.55 \cdot \lg(H_b), \text{ дБ};$$

f - частота, МГц;

H_b - высота антенны базовой станции, м;

H_m - высота антенны подвижной станции, м;

d - дальность связи, км;

$$a(H_m) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot H_m - (1,56 \cdot \lg(f) - 0,8), \text{ дБ}.$$

Увеличение дальности связи при снижении потерь на распространение радиоволн на линии связи можно вычислить, преобразовав выражение (11):

$$\Delta d = (10^{\frac{\Delta L_p}{K_2}} - 1) \cdot 100, \quad (12)$$

где:

Δd – увеличение дальности связи, %

ΔL_p – снижение потерь на распространение радиоволн, дБ,

$$K_2 = 35,22 \text{ дБ, при } H_b = 30 \text{ м}.$$

Полагая, что зона радиопокрытия каждого сектора трехсекторной базовой станции представляет собой

шестиугольник с диагональю d , площадь радиопокрытия базовой станции вычисляется по формуле:

$$S = 3 \frac{\sqrt{3}}{8} d^2. \quad (13)$$

Используя формулы (11) – (13), были вычислены приращения дальности связи Δd , приращения площади радиопокрытия трехсекторной ячейки ΔS и сокращения количества базовых станций ΔN_b для обслуживания заданной территории при улучшении энергетического баланса линии связи ΔL_p на 0,9 – 1,2 дБ. Результаты вычислений сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Сокращение количества базовых станций при улучшении энергетического баланса радиоканала

ΔL_p , дБ	Δd , %	ΔS , %	ΔN_b , %
0,9	6,1	12,5	11,1
1	6,8	14,0	12,3
1,1	7,5	15,5	13,4
1,2	8,2	17,0	14,5

Таким образом, применение предлагаемых кодов в сети сотовой связи с использованием технологии MIMO в системе 4x2 позволит увеличить энергетический баланс радиоканала на 0,9 – 1,2 дБ и сократить количество базовых станций для обслуживания заданной территории на 11 – 15 %.

Литература

1. Hamid Jafarkhani. Space-Time Coding: theory and practice. - Cambridge University Press 2005 - 320 с.
2. IEEE P802.16e. Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. February 2005.
3. В.И. Тихонов. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982 – 624 с.
4. Б.Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989 – 656 с.
5. Space-Time Processing for MIMO Communications. Edited by A.B. Gershman and N.D. Sidiropoulos. USA, NJ, John Wiley & Sons, 2005.
6. С.Н. Шабунин, Л.Л. Лесная. Распространение радиоволн в мобильной связи. Методические указания по курсу "Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи". Екатеринбург: УГТУ, 2000 - 38 с.
7. Report ITU-R M.2074. Radio aspects for the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000. 2006.