

一种结合频率扩展编码的 空时码 MIMO OFDM 系统性能及实现¹

郑夏宇 邱 玲 朱近康

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘 要: 该文利用 MIMO OFDM 系统中宽带信道的频率选择性衰落对不同窄带子载波上传输信号的不同影响,提出了一种结合频率扩展编码(FSC)的空时码设计.仿真结果表明,与其它的 MIMO OFDM 系统比较,该方法不仅可以有效地利用选择性信道内在的频率分集及保证系统频谱利用率,而且结构简单,容易实现.

关键词: MIMO, OFDM, 频率选择性衰落, 空时码, 频率扩展编码(FSC)

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)11-1799-06

Performance and Implementation of a Space-Time Coded MIMO OFDM System Using Frequency Spread Coding

Zheng Xia-yu Qiu Ling Zhu Jin-kang

(Univ. of Sci. and Tech. of China, Hefei 230027, China)

Abstract In this paper, a space-time coded MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) OFDM (Orthogonal Frequency Diversion Multiplexing) system using frequency spread coding is proposed based on the fact that the fading effects of the transmitted signals on each sub-carrier are different owing to the frequency-selective fading property. The simulation results indicate that the proposed scheme not only effectively exploits the inherent frequency diversity of the frequency-selective channel and maintains the spectrum efficiency of system, but also has a low complexity and is easy to realize compared to other MIMO OFDM systems.

Key words MIMO, OFDM, Frequency-selective fading, Space-time coding, Frequency Spread Coding(FSC)

1 引言

高速、可靠和频谱利用率高的无线传输技术是目前移动通信领域的一个研究热点.正交频分复用(OFDM)技术是一种有效的高速数据传输技术,它将宽带的频率选择性衰落信道分成了多个并行的平坦衰落信道,因此,均衡变得简单了^[1].多输入多输出(MIMO)天线技术通过在发射和接收端都采用多个天线,可以利用空间分集或空间复用,提高系统性能及增加系统容量^[2].空时编码 MIMO 系统将空间分集和编码技术结合在一起,它在平坦衰落信道下有极好的性能^[3,4].空时编码 MIMO OFDM 技术不仅能提高数据传输速率,而且能提高数据传输的可靠性.然而,在宽带频率选择性衰落信道中,处于深衰落的子载波上信号的传输性能变差,一般的空时编码 MIMO OFDM 并不能有效地利用频率选择性衰落信道内在的频率分集,因此,并不能很好地改善频率选择性衰落信道中 MIMO OFDM 系统的性能.

¹ 2003-06-12 收到, 2003-12-16 改回
国家 863(2001AA123011) 资助项目

空频编码^[5,6]是一种在各天线和正交子载波间进行编码的编码方法，它的构造包括内码和线性外码，内码利用空时编码获得空间分集，线性外码的构造获得了选择性信道的频率分集。如果在相干带宽间隔子载波上循环发送相同数据，把正交子载波与天线结合，在天线间采用空时编码，在不同的子载波之间进行循环重复编码，构造一种新型的空时频编码^[7]，不仅利用了空间分集，而且获得了部分频率增益。把正交子载波等效成天线，在不同的子载波与天线间进行联合空时编码也是提高系统性能的一种方式，而对 OFDM 系统的所有子载波之间进行编码是非常困难的。对于频率选择性信道来说，由于在相干带宽内的各正交子载波彼此具有相关性，文献^[8]中提出一种简化的空时频编码方法，在具有相干带宽间隔的正交子载波上进行空时编码，能达到接近于在所有子载波上进行空时频编码系统的容量，得到频率分集和空间分集增益，而编解码复杂度大大降低。但上述方法在提高系统性能的同时，都会降低发送信息速率，牺牲频谱利用率。

本文提出一种 MIMO OFDM 系统中结合频率扩展编码 (FSC)^[9]的空时码设计，在接收机理想同步及理想信道估计的情况下，结合 FSC 的空时码 MIMO OFDM 系统不仅可以有效地利用选择性信道内在的频率分集，而且保证系统频谱利用率。当我们采用多重 FSC 编解码时，还可以使系统计算复杂度大大降低，容易实现。

2 信道模型

假设频率选择性衰落信道可以看成是一个有 L 抽头的 FIR 滤波器^[7,10]，它的冲击响应为

$$g(t) = \sum_{i=0}^{L-1} h(t)\delta(t - \tau_i) \tag{1}$$

其中 $\delta(t)$ 是狄拉克函数， $h(t)$ 是零均值、方差为 1 的复高斯变量。

经过快速傅立叶变换 (FFT) 后在每个子载波上的衰落因子为

$$G(\Omega_k) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=0}^{L-1} h(i)e^{-j\frac{2\pi}{N}ki} \tag{2}$$

其中 $0 \leq k \leq N - 1$ ，代表第 k 个子载波。由上式可知， $|G(\Omega_k)|$ 是方差为 1 的瑞利分布。

3 多重 FSC 空时码 MIMO OFDM 系统

一个具有 N_t 发射天线， N_r 接收天线， N 个子载波的结合 FSC 的空时码 MIMO OFDM 系统如图 1 所示。

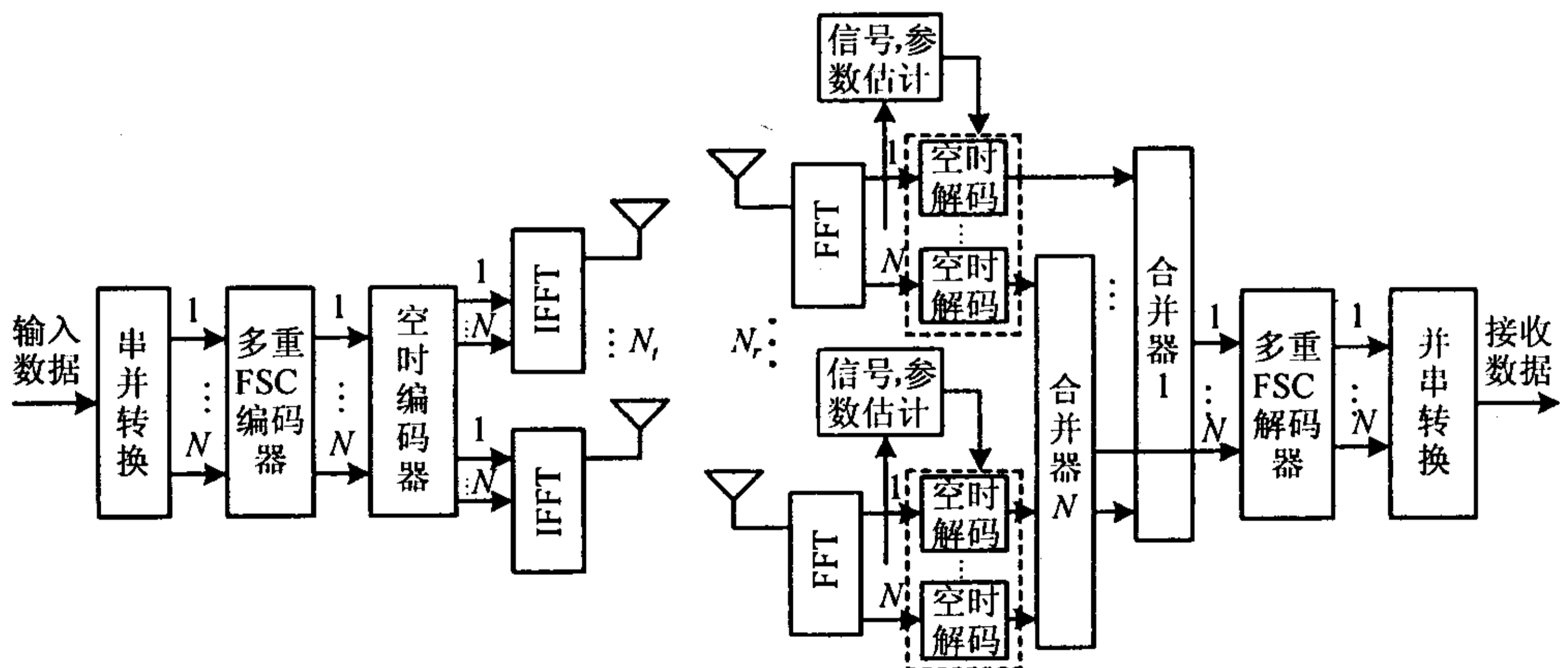


图 1 多重 FSC 空时码 MIMO OFDM 系统框图

在发送端, 针对每个天线, 把输入数据串并转换成 N 路数据, 每路数据经过一个多重 FSC 编码器, 把每路数据扩展到 N 个子载波上, N 路数据在每个子载波上的信号再进行叠加, 对每个子载波上叠加后数据在 N_t 个天线间进行空时分组编码, 每个天线支路上编码后的数据与一般的 MIMO OFDM 系统一样, 经过快速傅立叶逆变换 (IFFT)、加循环前缀后通过各发射天线发送出去。

由于 MIMO OFDM 系统子载波的个数 N 满足: 正交子载波的个数为 $N = 2^M$, M 为任意正整数. 这样, FSC 编码器可以采用长度为 2 的沃尔什码作为频率扩展码进行多重编码, 对每路数据进行 M 次编码, 使之调制到 N 个正交子载波上. 长度为 2 的沃尔什码由下面的哈德码矩阵产生:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 M 次编码由下列过程完成:

初始值: $S_I[n, k] = s[n, k]$;

$S_{j+1}[n, k] = \sum_{i=1}^2 S_j[n, k + t_I(i, k)] \times c_{t_2(i, k), t_3(i, k)}$, $1 \leq j \leq M$ 表示第 j 次编码后数据; $S[n, k] = S_{M+1}[n, k]$. 其中

$$t_1(i, k) = \begin{cases} (i-1) \times 2^{j-1}, & k(\bmod 2^j) \leq 2^{j-1}; \\ -(i-1) \times 2^{j-1}, & \text{其他}; \end{cases} \quad t_2(i, k) = \begin{cases} i, & k(\bmod 2^j) \leq 2^{j-1}; \\ 3-i, & \text{其他}; \end{cases}$$

$$t_3(i, k) = \begin{cases} 1, & k(\bmod 2^j) \leq 2^{j-1}; \\ 2, & \text{其他}; \end{cases} \quad 1 \leq i \leq 2 \text{ 表示每次长度为 2 的 FSC 编码的第 } i \text{ 支路};$$

$n = 1, 2, \dots, N_s$, N_s 为平坦衰落的窄带子载波上数据块的长度; $1 \leq k \leq N$, 表示第 k 个子载波; $s[n, k]$ 表示串并转换后的第 k 个子载波上的数据; $c_{m,l}$ 表示式 (3) 中对应的第 m ($1 \leq m \leq 2$) 行, 第 l ($1 \leq l \leq 2$) 列沃尔什码。

对 N 个子载波上的数据在各个发射天线间分别进行空时编码^[4], 则在第 k 个子载波上的空时编码数据由 $\{S[n, k], n = 1, 2, \dots, N_s, k = 1, 2, \dots, N\}$ 及其共轭值组成。

以两天线发射的 Alamouti 码^[3]为例, 空时编码后的数据为

$$\begin{bmatrix} S[n, k] & S[n+1, k] \\ -S^*[n+1, k] & S^*[n, k] \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中矩阵的行表示空时块内某个码元周期, 对应列上的数据表示某个码元周期内子载波 k 在某个天线上发送的数据序列。

在接收端, 对于某天线来说, 首先对经过快速傅立叶变换 (FFT) 后每个子载波上的数据信号在空时块内进行空时分组解码, 得到第 j ($1 \leq j \leq N_r$) 个接收天线, 第 k 个子载波的空时解码数据为 $\{\tilde{S}^{(j)}[n, k], n = 1, 2, \dots, N_s; k = 1, 2, \dots, N\}$, 当发送端采用两天线 Alamouti 空时编码时, 空时解码后的数据可表示成

$$\tilde{S}^{(j)}[n, k] = S[n, k] + \eta_1 \quad (5)$$

$$\tilde{S}^{(j)}[n+1, k] = S[n+1, k] + \eta_2 \quad (6)$$

其中 η_1, η_2 分别是接收天线在空时块两个码元周期内的复噪声, 幅度由信道响应决定。

对 N_r 个接收天线上的 N 路空时解码数据做最大比合并, 得到合并后数据:

$$\{\tilde{S}[n, k], n = 1, 2, \dots, N_s; k = 1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

对空时解码后的信号进行 M 次长度为 2 的 FSC 解码, 其解码过程为

初始值: $S_1[n, k] = \bar{s}[n, k]$;

$$\tilde{S}_{l+1}[n, k] = \sum_{i=1}^2 \tilde{S}_l[n, k + g_1(i, k)] \times c_{g_2(i, k), g_3(i, k)}, 1 \leq l \leq M$$

表示第 l 次编码后数据; $\tilde{S}[n, k] = \tilde{S}_{M+1}[n, k]$. 其中

$$g_1(i, k) = \begin{cases} (i-1) \times 2^{M-l}, & k(\bmod 2^{M-l+1}) \leq 2^{M-l}; \\ -(i-1) \times 2^{M-l}, & \text{其他}; \end{cases}$$

$$g_2(i, k) = \begin{cases} i, & k(\bmod 2^{M-l+1}) \leq 2^{M-l}; \\ 3-i, & \text{其他}; \end{cases} \quad g_3(i, k) = \begin{cases} 1, & k(\bmod 2^{M-l+1}) \leq 2^{M-l}; \\ 2, & \text{其他}; \end{cases}$$

$1 \leq i \leq 2$ 表示每次长度为 2 的 FSC 编码的第 i 支路.

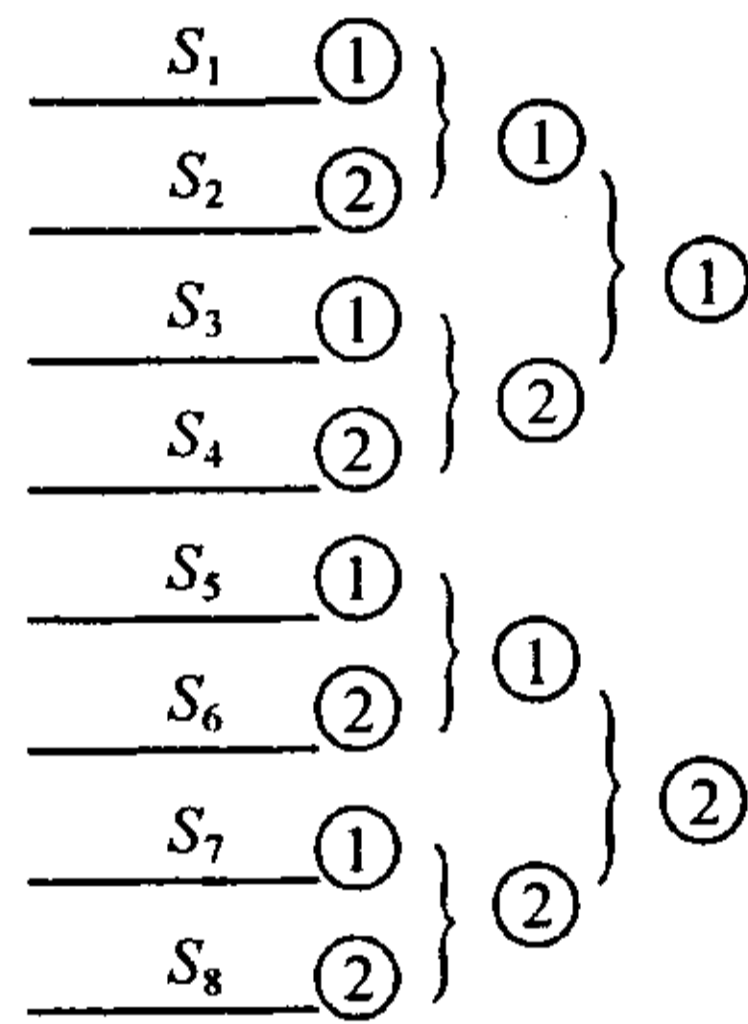


图 2 $N(=8)$ 个正交子载波上沃尔什码的分配

最后得到 N 个子载波上数据块内的解码数据 $\{s[n, k], n = 1, 2, \dots, N_s; k = 1, 2, \dots, N\}$, 并进行并串转换, 解调恢复出原始发送数据.

以 8 个正交子载波为例, 沃尔什码的分配如图 2 所示:

图中①, ②分别表示式 (3) 中第 1 行, 第 2 行对应的沃尔什码, 利用图 2 的分配方案, 对各路数据在 N 个子载波上进行 FSC 编码, 则编码器结构如图 3 所示.

图 3 中, $\{s, i = 1, 2, \dots, 8\}$ 表示串并转换后的 N 路数据, $\{f_i, i = 1, 2, \dots, 8\}$ 表示经过多重 FSC 编码后送到 N 个子载波上的编码数据.

对应于图 3 的多重 FSC 编码器, 可以得到相应的多重 FSC 解码器如图 4 所示.

图 4 中, $\{\tilde{f}_i, i = 1, 2, \dots, 8\}$ 表示最大比合并后 N 个子载波上的数据, $\{s_i, i = 1, 2, \dots, 8\}$ 表示多重 FSC 解码后的 N 路数据. 在采用多重 FSC 空时编码 MIMO OFDM 系统中, FSC 编解码器所需要的复数加法运算减少为

$$N_{\text{add}} = 2N \times (\log_2 N) - N \tag{9}$$

常数乘法运算减少为

$$N_{\text{multi}} = 2N \times (\log_2 N) \tag{10}$$

而一般 FSC 编解码器的复数加法运算为: $N_{\text{add}} = N \times N - N$; 乘法运算为: $N_{\text{multi}} = N \times N$; 这样, 当 N 较大时, 本系统中 FSC 编解码器的运算量大大小于现有 FSC 编解码器的运算量.

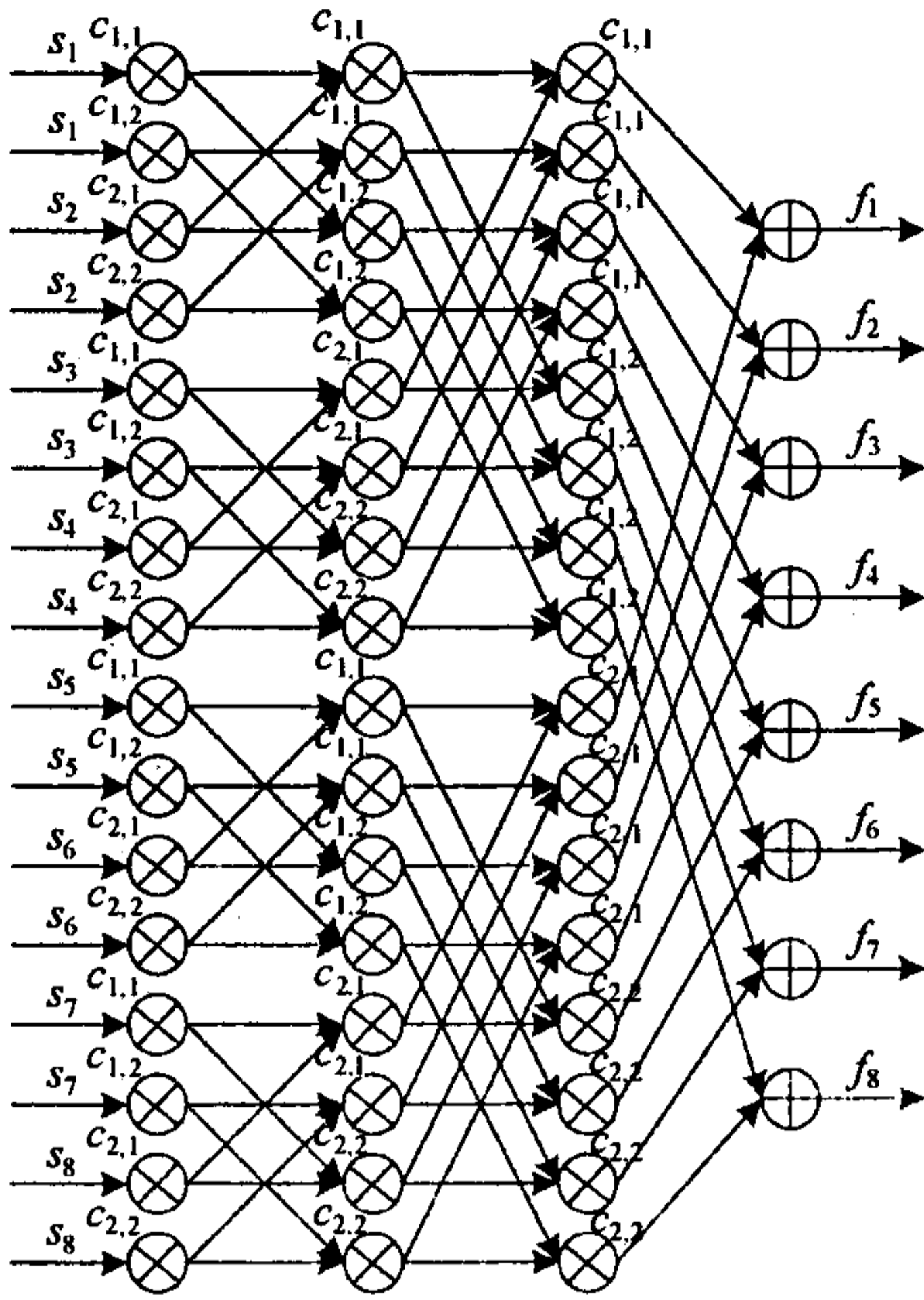


图 3 $N(=8)$ 个子载波的多重 FSC 编码器结构

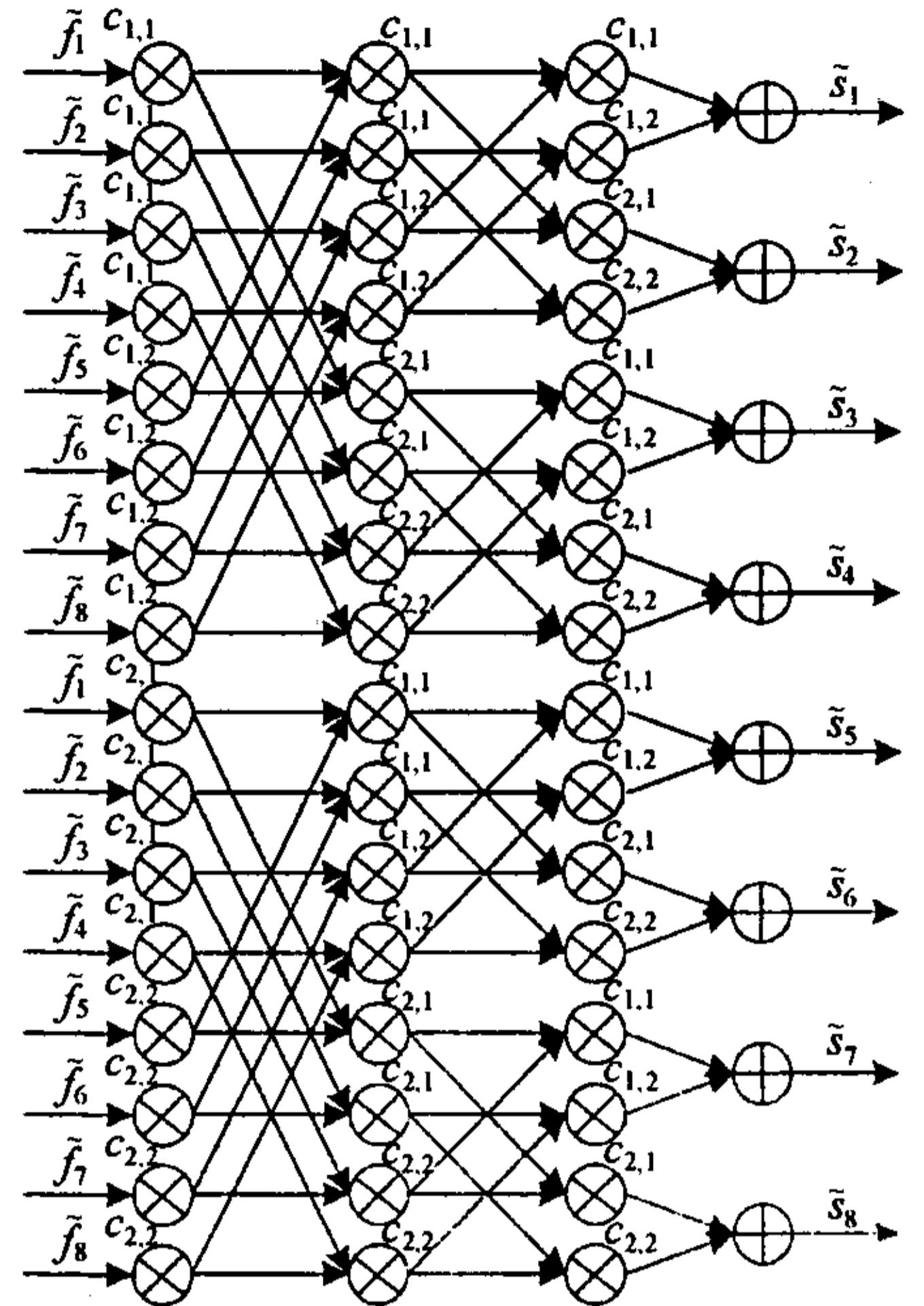


图 4 $N(=8)$ 个子载波的多重 FSC 解码器结构

4 性能仿真

为了评估我们提出的结合 FSC 的空时码 MIMO OFDM 系统的性能，我们进行了计算机仿真，仿真中采用的无线信道模型如本文第 2 节所述。

采用 $L=2$ 的抽头 FIR 信道，正交子载波数 $N=8$ 个，假设每个 OFDM 数据块长度为 800，即每个子载波上的数据块长度 $N_s=100$ 。设定发射天线 $N_t=2$ ，接收天线分别采用 $N_r=1, 2$ ，数字调制为 16QAM，在仿真过程中，我们假定理想的信道估计及同步。仿真结果如图 5 所示。

由于多重 FSC 空时码 MIMO OFDM 系统中每个子载波上发送的信息经过了所有频率，对接收机来说，经过了所有子载波所在的路径，所以较有效地获得了各频率的部分增益，而且不降低发送信息速率。相对于一般空时分组编码 OFDM 系统，多重 FSC 空时分组码 OFDM 系统取得了较大的性能提高。

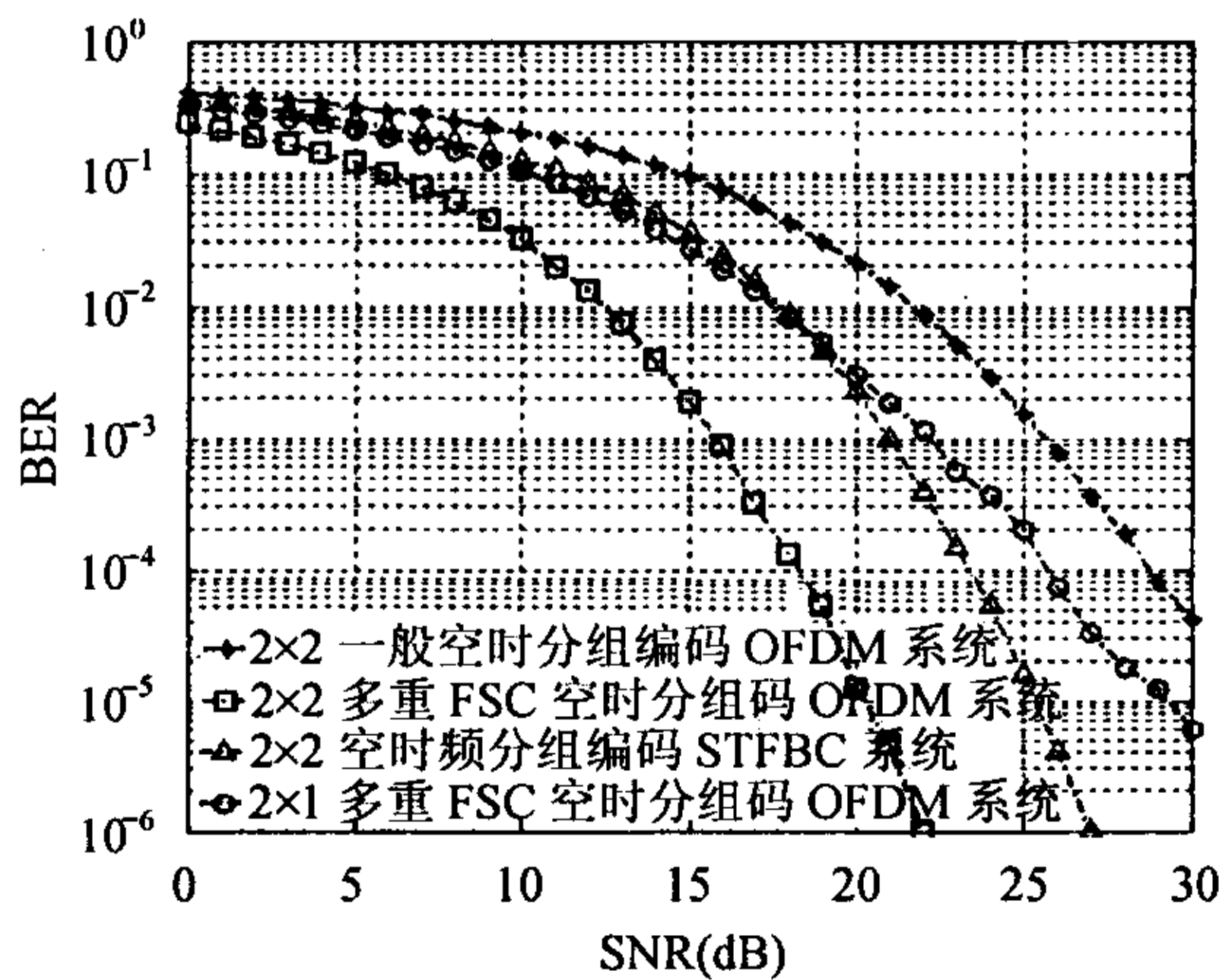


图 5 多重 FSC 空时码 MIMO OFDM 与其它 MIMO OFDM 系统性能比较

空时频分组编码 (STFBC)^[7] 利用在相干带宽子载波上重复分组编码, 获得相干带宽子载波上的路径增益, 从图 5 中可以看出, STFBC 的性能优于一般空时分组编码 OFDM 系统, 也优于 2×1 多重 FSC 编码, 这说明它对某个子载波上频率增益的获得优于多重 FSC 编码。但是 STFBC 在相干带宽上的重复编码降低了发送信息速率, 牺牲了频带利用率。从图中还可以看出, 本文提出的 2×2 多重 FSC 空时分组编码性能大大优于 2×2 空时频分组编码的性能。而且, 本文提出的新方法不降低系统频带利用率。

5 结论

本文提出了一种简单的结合 FSC 空时码 MIMO OFDM 系统设计, 该方法提高了频率选择性衰落信道中 MIMO OFDM 系统的性能, 而且不降低系统频谱利用率。对 FSC 编码采用长度为 2 的沃尔什码作为频率扩展码进行多重编解码, 还可以使系统计算复杂度大大降低, 易于实现。在 MIMO 系统中, 这种扩展编码的思想也可以用在多个天线上, 利用时间块的概念来区分各个天线上的数据, 在保证系统发送信息速率的条件下提高系统性能, 这方面的研究成果将在以后的文章中给出。

参 考 文 献

- [1] Thoen S, Perre L V, Engels M, Man H D. Adaptive loading for OFDM/SDMA-based wireless networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 50(11): 1798-1810.
- [2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6: 311-335.
- [3] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [4] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications: performance result. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(3): 451-460.
- [5] Bölcskei H, Paulraj A J. Space-frequency coded MIMO-OFDM with variable multiplexing diversity tradeoff. *IEEE Int. Conf. on Communications(ICC)*, Anchorage, Alaska, May 2003, vol.4: 2837-2841.
- [6] Bölcskei H, Paulraj A J. Space-frequency codes for broadband fading channels. *ISIT2001*, Washington, DC, June 24-29, 2001: 219.
- [7] Pan Yuh Joo, Dae Eop Kang. Novel design of STBC for OFDM/OFDMA using frequency diversity. *IEEE 802.16abc-01/59* 2001: 11
- [8] Molisch A F, Win M Z, Winters J H. Space-time-frequency(STF) coding for MIMO-OFDM systems. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(9): 370-372.
- [9] Matsutani H, Nakagawa M. Multi-carrier DS-CDMA using frequency spread coding. *IEICE Transactions Fundamentals*, 1999, E82-A(12): 2634-2642,
- [10] Proakis J G. *Digital Communications*. Fourth edition, New York: McGraw-Hill, 2001, Chapter 14.

郑夏宇: 男, 1978 年生, 硕士生, 研究方向: 无线通信及其信号处理、统计信号处理。

邱 玲: 女, 1963 年生, 副教授, 研究方向: 无线通信、移动通信中的信号处理、扩频通信等。

朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 移动通信及个人通信、扩频通信、通信中的信号处理等。