

文章编号:1001-9081(2009)10-2614-03

3GPP 信道模型中 STBC-OFDM 系统性能分析

张红霞,戴居丰

(天津大学 电子信息工程学院,天津 300072)

(zhanghx@tju.edu.cn)

摘要:空时分组码(STBC)与正交频分复用(OFDM)相结合的 STBC-OFDM 技术可以有效对抗多径效应和频率选择性衰落,在复杂通信环境中提高传输效率,降低误码率,并且编译码简单。在 Matlab 中构建 STBC-OFDM 系统仿真平台,并模拟了其在第三代合作伙伴计划(3GPP)信道中传输的过程,进行了仿真系统参数的选择,并根据各种不同的信道环境,对系统误码特性进行了评估。

关键词:空时分组码;正交频分复用;多输入多输出;误比特率;第三代合作伙伴计划

中图分类号: TP393.03; TN915.04 **文献标志码:** A

Performance of STBC-OFDM system in 3GPP channel model

ZHANG Hong-xia, DAI Ju-feng

(College of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072 China)

Abstract: STBC-OFDM-combined Space Time Block Code (STBC) and Orthogonality Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology, may be effective against multi-path effect and frequency selective fading. It can improve transmission efficiency and reduce error rate, and has simple encoding and decoding. In this paper, the authors used Matlab to build system simulation platform, simulated its transmission process in 3GPP channel, chose parameters of simulation system, and evaluated bit error performance according to different channel environment.

Key words: Space Time Block Code (STBC); Orthogonality Frequency Division Multiplexing (OFDM); Multiple Input Multiple Output (MIMO); Bit Error Rate (BER); 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

0 引言

正交频分复用(Orthogonality Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[1-2]是一种无线环境下的高速传输技术,适合在多径传播和多普勒频移的无线移动信道中传输高速数据。OFDM 以强抗衰落能力和高频带利用率,成为下一代移动通信中的一种非常有竞争力的物理层技术。WMAN 标准草案 IEEE802.16^[3]以及 WWAN 标准提案 IEEE802.20^[4]也将使用 OFDM 作为物理层接入方案,预计第三代以后的移动通信的主流技术将是 OFDM。

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^[5-6]系统在发射端和接收端均采用多天线(或阵列天线)和多信道,将多径效应作为一个有利因素加以利用, MIMO 的多输入多输出是针对多径无线信道来说的,多天线接收机利用先进的空时编码(Space Time Code, STC)^[7]处理能够分开并解码这些数据子流,从而提高无线信道容量,在不增加带宽和天线发送功率的情况下,频谱利用率可以成倍地提高,同时也可以提高信道的可靠性,降低误码率。空时分组码(Space Time Block Code, STBC)^[8]利用空间和时间的联合编码,能获得有效的分集增益并且编译码简单,已被纳入第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)提案。

用 OFDM 技术提高传输速率,可以增加带宽、发送功率和子载波数目,但对带宽和功率受限的无线通信系统,这是不现实的,子载波数目的增加也会使系统更复杂。而 MIMO 技

术在不增加带宽的情况下成倍提高系统容量和频谱利用率^[9],因此将 MIMO 和 OFDM 技术结合是适应下一代无线通信系统发展要求趋势的。本文讨论了 STBC 编码这一 MIMO 系统针对多个发射天线的特有编码方式与正交频分复用相结合的 STBC-OFDM 系统,并在 3GPP 定义的三种信道模型中进行仿真分析比较其性能。

1 OFDM 和 MIMO 技术简介

1.1 OFDM 技术

在 OFDM 系统中,数据被分配到很多个带宽很小且正交的子载波上同时并行传送,每个子载波上传送的数据量比较小,在每个子载波上可以使用不同的调制方式。由于发送端会发送大量在频域上重叠的窄带子载波,如果在发送端使用大量的调制器对各子载波进行调制,在接收端使用大量的滤波器对信号进行解调,那么发送设备和接收设备都将变得非常复杂。随着现代信号处理技术的发展,采用快速傅里叶反变换/变换(IFFT/FFT)实现 OFDM 系统的调制和解调。其处理过程如图 1 所示。

OFDM 系统通过将输入的数据流并行分配到 N 个并行的子信道上,使得每个 OFDM 的符号周期可以扩大为原始数据符号周期的 N 倍,因此时延扩展与符号周期的比值也同样缩小了 N 倍。在 OFDM 系统中,为了最大限度地消除符号间干扰,在每个 OFDM 符号之间可以插入保护间隔(Guard Interval),而且该保护间隔长度 T_g 一般要大于无线信道中的最大时延扩展,这样一个符号的多径分量就不会对下一个符

收稿日期:2009-04-24;修回日期:2009-07-14。

作者简介:张红霞(1975-),女,天津人,博士研究生,主要研究方向:服务质量保障、无线城域网、宽带无线接入;戴居丰(1944-),男,湖北宜昌人,教授,博士生导师,主要研究方向:通信网理论与技术、移动通信关键技术、MMIC 与 SoC 电磁仿真技术。

号产生干扰,能够消除多径传输造成的符号间干扰 (ISI)。如果在这段保护间隔内不插入任何信号,即一段空闲的传输时段,那么由于多径传播的影响,各个子信道之间的正交性会受到破坏,将产生子信道间干扰 (ICI)。在保持子载波正交性的前提下,一种有效的填充保护间隔的方法就是将原来时间宽度为 T 的 OFDM 符号进行周期性扩展,用扩展的符号来填充保护间隔,并且使保护间隔中的信号与 OFDM 尾部宽度为 T_g 的部分相同,我们将保护间隔内 (持续时间用 T_g 表示) 的信号称为循环前缀。

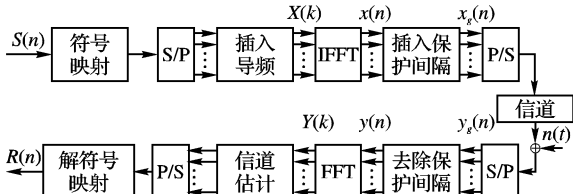


图 1 基于 FFT 的 OFDM 系统处理过程

在 OFDM 系统中,影响系统性能的关键参数有以下几种。

- 1) 有用符号持续时间: 为保持数据的吞吐量,有用符号持续时间应该较长,但这又会导致子载波数目和 FFT 长度的增加,因此它的选择应保证信道的稳定性。
- 2) 子载波的数目: 由信道带宽、数据吞吐量和有用符号持续时间决定。
- 3) 调制方式: 它的选择可以基于功率或频谱的要求,应用到等比例子载波的调制方式的选择只能是数据速率需求与稳定性之间的折中。

1.2 MIMO 技术

MIMO 技术是近年来无线通信技术上的一个重大突破,它是分集技术和现代信号处理技术的结合,可以得到极高的频谱利用率。它的主要理论基础是在复杂的环境下,多径信道中不同的路径彼此不相关,因此有可能通过信号处理技术,将不同天线发出的同频、同时、同码的不同信号在接收端区分开来,从而把一条无线信道变为多条,大大提高了频谱利用率。

MIMO 信道的传输可以用式 (1) 表示:

$$Y = HX + N \quad (1)$$

其中: X 为 $n_r \times 1$ 维的发送信号向量, Y 为 $n_r \times 1$ 维的接受信号向量; H 为 $n_r \times n_t$ 维的信道转移函数。即:

$$H = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,n_t} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,n_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{n_r,1} & H_{n_r,2} & \cdots & H_{n_r,n_t} \end{bmatrix}$$

其中元素 H_{ij} 表示从第 j 个发射天线到第 i 个接收天线的信道转移函数, N 为零均值高斯噪声。

如果各个发射天线发射的信号是等功率且不相干的,则 MIMO 信道的容量为:

$$C = \text{lb det} \left(I_N + \frac{\rho}{n_r} H H^x \right) \quad (2)$$

2 STBC-OFDM 技术

2.1 STBC-OFDM 系统的编码方法

本文采用 2 个发送天线和 1 个接收天线的 STBC 方法。图 2 为基于 STBC 的 OFDM 发射分集系统。下面将以 2 个发送天线和 1 个接收天线 (2Tx-1Rx) 的系统为例,对 STBC-OFDM 系统的编码方法进行具体说明。

考虑 OFDM 系统有 L 个子载波,每帧由两个 OFDM 符号

组成,每个子载波上发射 2 个数据符号的情况。第 m 个数据帧,第 l 个子载波上的编码信号 $x_{m,l}^1, x_{m,l}^2$ 经过 IFFT 变换并加入 CP 后,同时从两根发射天线上发射出去。



图 2 基于 STBC 的 OFDM 发射分集系统

系统采用 QPSK 调制, $4L$ 个连续输入的比特格雷映射为 $2L$ 个 QPSK 符号 $x_m(1), \dots, x_m(L)$ 和 $x_{m+1}(1), \dots, x_{m+1}(L)$, 写成矩阵的形式为:

$$\begin{cases} x_m = [x_m(1), \dots, x_m(L)]^T \\ x_{m+1} = [x_{m+1}(1), \dots, x_{m+1}(L)]^T \end{cases} \quad (3)$$

x_m 和 x_{m+1} 分别是第 m 个和第 $m+1$ 个 OFDM 复调制信号。然后 x_m 和 x_{m+1} 连续输入到 STBC 编码器中,生成空时编码矩阵 X ,显然,矩阵 X 是一个正交矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} x_m & -x_{m+1}^* \\ x_{m+1} & x_m^* \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \text{time} \\ \downarrow \text{space} \end{matrix} \quad (4)$$

OFDM 的多载波传输把经过调制映射的信息数据调制在多个子载波上并行发射出去,各个子载波相互正交,其基带多载波信号的表达式是:

$$x(t) = \sum_{l=1}^L x_m(l) \exp(j2\pi ft) \quad (5)$$

其中:子载波频率 $f = f_0 + l \cdot \Delta f$, f_0 为实际发射频率, Δf 为子载波间隔, T 为符号周期, $\Delta f = 1/T$ 。

为了消除时延扩展带来的符号间串扰,在每个复调制符号前加入长度为 T_b 的保护间隔,假设有 L_b 个数据,因此实际的符号周期是 $T + T_b$ 。

在相邻的周期内,编码后的每路信号以 $(T + T_b)/L$ 为间隔进行抽样,即对 $x_m(l)$ 求取 L 点 IFFT。这样,经过 IFFT 和附加 CP 后的 OFDM 符号同时从两根发射天线上发射出去。

在第 m 时间分别从天线 1 和天线 2 同时发送:

$$\begin{cases} X_m^1(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_m(l) \exp(j \frac{2\pi k l}{L}) \\ X_{m+1}^1(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_{m+1}(l) \exp(j \frac{2\pi k l}{L}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $k = -L_b, \dots, -1, 0, 1, \dots, L_b$ 。

在第 $m+1$ 时间分别从天线 1 和天线 2 同时发送:

$$\begin{cases} X_{m+1}^2(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (-x_{m+1}^*(l)) \exp(j \frac{2\pi k l}{L}) \\ X_m^2(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_m^*(l) \exp(j \frac{2\pi k l}{L}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $k = -L_b, \dots, -1, 0, 1, \dots, L_b$ 。

2.2 STBC-OFDM 系统的译码处理

两个发射天线到达同一接收天线的信道是相互独立的,并且假设发送端与接收端之间达到载波同步和采样同步。在理想 CSI 的情况下,接收信号为两根天线同一时刻发送的信号经过衰落与加性噪声的叠加,则第 m 时间接收端的接收信号是:

$$y_m(k) = \sum_{p=1}^P [h_m^1(p) X_m^1(k-p) + h_m^2(p) X_{m+1}^1(k-p) + w_m(k)] \quad (8)$$

同样,在第 $m+1$ 时间内,接受端接受到的信号是:

$$y_{m+1}(k) = \sum_{p=1}^P [h_{m+1}^1(p)X_{m+1}^2(k-p) + h_{m+1}^2(p)X_m^2(k-p) + w_{m+1}(k)] \quad (9)$$

其中 $w_m(k)$ 和 $w_{m+1}(k)$ 是加性高斯白噪声。接收端对接受信号进行采样,经过 FFT 和去循环前缀 CP 得到:

$$\begin{cases} Y_m = H_m^1 x_m + H_m^2 x_{m+1} + W_m \\ Y_{m+1} = -H_{m+1}^1 x_{m+1}^* + H_{m+1}^2 x_m^* + W_{m+1} \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$H_m^1(n) = \sum_{p=1}^P h_m^1(p) \exp(j \frac{2\pi p n}{L}); n \in L$$

$$H_m^2(n) = \sum_{p=1}^P h_m^2(p) \exp(j \frac{2\pi p n}{L}); n \in L$$

$$W_m(n) = \sum_{k=1}^L w_m(k) \exp(j \frac{2\pi k n}{L}); n \in L$$

$$W_{m+1}(n) = \sum_{k=1}^L w_{m+1}(k) \exp(j \frac{2\pi k n}{L})$$

由 STBC 编码正交性,对接受信号做线性合并运算可得:

$$\begin{cases} \hat{x}_m = H_m^{1*} Y_m + H_{m+1}^2 Y_{m+1}^* \\ \hat{x}_{m+1} = H_m^2 Y_m - H_{m+1}^1 Y_{m+1}^* \end{cases} \quad (11)$$

对于 \hat{x}_m ,信噪比(SNR) 可以表示为:

$$SNR = \frac{E[(|H_1|^2 + |H_2|^2)x_m]^2}{E[H_1^* W_m + H_2 W_{m+1}^*]^2} \quad (12)$$

对于 \hat{x}_{m+1} ,SNR 可以表示为:

$$SNR = \frac{E[(|H_1|^2 + |H_2|^2)x_{m+1}]^2}{E[H_2^* W_m - H_1 W_{m+1}^*]^2} \quad (13)$$

可以得出 SNR 的表示式(14):

$$SNR = \frac{(|H_1|^2 + |H_2|^2)E|x|^2}{E|W|^2} \quad (14)$$

可以看出,由于发送分集技术,2×1 的 STBC-OFDM 系统比 OFDM 系统有更高的信道增益。若对 2×2 的 STBC-OFDM 系统,SNR 可以表示为:

$$SNR = \frac{(|H_{11}|^2 + |H_{12}|^2 + |H_{21}|^2 + |H_{22}|^2)E|x|^2}{E|W|^2} \quad (15)$$

可见,它的信道增益将会比 2×1 的 STBC-OFDM 系统更好。

3 STBC-OFDM 在 3GPP 信道中的传输

本文分别在市郊宏小区、市区宏小区和市区微小区三种环境下做了 OFDM 系统和 2×2 STBC-OFDM 系统性能仿真,在仿真中,调制方式为 QPSK,调制使用 $L = 256$ 个子载波,为了对抗符号间串扰,在每个符号时间前端加入长度是 32 的保护间隔。信道使用 $P = 6$ 多径信道模型,均采用最大似然译码算法得到 BER 曲线。

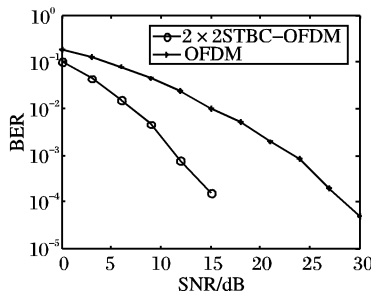


图 3 市区微小区两种系统性能比较

通过仿真结果图 3~5 可以看出:在三种小区环境下,OFDM 系统和 2×2 STBC-OFDM 系统,都能达到传输所需要的误比特率,但 2×2 STBC-OFDM 的信道传输性能要明显优

于优于 OFDM 系统。

4 结语

本文介绍了 STBC 与 OFDM 相结合的 STBC-OFDM 系统。在 Matlab 中构建 STBC-OFDM 系统仿真平台,并模拟了其在 3GPP 信道中传输的过程,根据不同的信道环境,对系统误码特性进行了评估,为正确评价实际 STBC-OFDM 系统的性能提供了有效的理论依据。

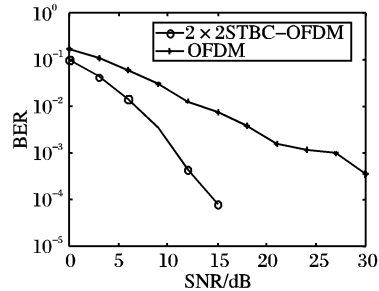


图 4 市区宏小区两种系统性能比较

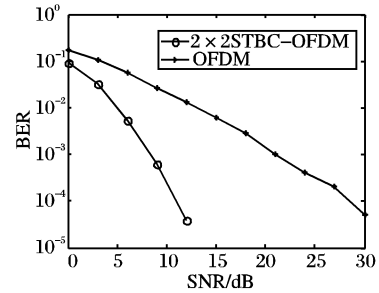


图 5 市郊宏小区两系统传输性能比较

参考文献:

- [1] FRANCO G A, LACHS G. An orthogonal coding technique for communications[J]. IRE International Convention Record, 1961, 9: 126 - 133.
- [2] WEINSTEIN S, M. EBERT P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communications, 1971, 19(5): 628 - 634.
- [3] IEEE Std 802.16e-2005, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access System - Amendent2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands [S]. 2005.
- [4] IEEE 802.20.3 Approved PAR: Standard for Minimum Performance Characteristics of IEEE P802.20 Terminals and Base Stations/Access [S].
- [5] STUBER G L, BARRY ET AL J R. Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications[EB/OL]. [2009 - 01 - 01]. <http://users.ece.gatech.edu/~stuber/nsf3/pubs/stuber/proc-ieee.pdf>.
- [6] ALAMOUTI S M. A simple transmitter diversity scheme for wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16: 1451 - 1458.
- [7] GESBERT D, SHAFI M, SHIU D-S, et al. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 281 - 302.
- [8] TAROKH V, JAFARLHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5): 1456 - 1467.
- [9] PAULRAJ A, NABAR R, GORE D. Introduction to space-time wireless communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.