

平坦瑞利衰落信道下 MIMO 系统性能

王建峰¹, 黄国策¹, 陈茂², 朱蒙¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 兰州军区通信网络技术管理中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:分析了瑞利衰落对普通无线系统的影响,在此基础上重点从空间复用提高容量和空间分集对抗衰落两方面研究了瑞利衰落信道下 MIMO 系统的性能。分析和仿真结果表明,采用 V-BLAST 算法实现空间复用增益时,随着收发天线数目的增加,复用系统的符号错误概率增加;不同的分集结合方式对分集系统性能的影响不一样,随着天线数目的增加,分集系统的符号错误概率都递减。

关键词:瑞利衰落; 符号错误概率; V-BLAST 算法

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)01-0066-04

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术利用来自一个信道的多个输入和多个输出(即多天线)来抑制信道衰落,是无线移动通信领域智能天线技术的重大突破^[1-4]。该技术能在不增加带宽的情况下成倍的提高通信系统的容量和频谱利用率,并且可以提高信道的可靠性,降低误码率^[5-7]。采用空间复用,MIMO系统能在一个频率上同时传输一个以上的空间数据流,容量的增加与发送天线的数量线性相关。空间分集能改善信号质量,并在接收端达到更高的信噪比。本文从信道模型和瑞利衰落信道对普通无线系统的性能影响分析着手,重点从空间复用提高系统容量(V-BLAST算法)和空间分集对抗衰落提高信号质量两方面,来研究瑞利衰落信道下 MIMO 系统的性能。

1 瑞利衰落对无线系统的影响

在不同条件下,无线信道具有不同的统计特性,如瑞利特性、莱斯特性等,这里主要考虑在平坦的瑞利衰落信道下 MIMO 系统的性能。为了更好的描述,作如下假设:

- 1) 不同收发天线对之间的衰落为独立同分布的瑞利衰落;
- 2) 信道衰落为非频率选择性衰落,即在频率域是平坦的;
- 3) 发射机能够通过接收机反馈或其他方式完全获知信道状态信息。

本文在考虑 MIMO 系统性能时,采用的都是 QAM 调制机制,因此在这个假设的前提下,首先考虑瑞利衰落对 QAM 调制系统的影响。对于 QAM 调制,系统的符号错误概率可由下式表示^[8]:

$$P_L = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{L}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{2(L-1)}} kE_b/N_0\right) \times \left[1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{L}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{2(L-1)}} kE_b/N_0\right)\right] = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{L}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{2(L-1)}} kE_b/N_0\right) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{L}}\right)^2 \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{3}{2(L-1)}} kE_b/N_0\right) \quad (1)$$

式中: $\operatorname{erfc}(x)$ 为互补误差函数, L 为调制阶数(对于 16-QAM, $L=16$); E_b/N_0 是每比特(位)的平均信噪比, E_b 为信号的功率, N_0 为噪声的功率谱密度; k 为每复合符号的位数(对于 16-QAM, 每个复合符号为 4 位)。

收稿日期: 2006-10-18

作者简介: 王建峰(1978-), 男, 陕西武功人, 助教, 硕士生, 主要从事短波、移动通信研究; E-mail: wjf4206@126.com
黄国策(1962-), 男, 陕西高陵人, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星通信、移动通信研究。

在图 1 中,给出了采用 16-QAM 调制的 SISO (Single-Input Single-Output) 的符号错误概率与每位信噪比之间的 MATLAB 仿真结果。从图中可以看出,在瑞利衰落信道中 SISO 系统的符号错误概率性能严重劣化。

2 瑞利衰落信道下 MIMO 空间复用系统的性能

通过一个以上的天线发送多组数据流称为空间复用,其优势是容量的增加与发送天线的数量线性相关。实现空间复用增益的算法主要有贝尔实验室的 BLAST 算法、ZF 算法、MMSE 算法、ML 算法。ML 算法具有很好的译码性能,但是复杂度比较大,对于实时性要求较高的无线通信不能满足要求。ZF 算法简单易实现,但对信道的信噪比要求较高。性能和复杂度最优的就是 V-BLAST (Vertical Bell 实验室分层空间-时间) 算法。因此,这里主要考虑 V-BLAST 算法。

假设有 M 个发送天线和 N 个接收天线,其中 $M \leq N$ 。假设每个发射器都采用 16-QAM 调制方式,总的发射功率为常数,这样,每个发射器发射的功率就占总功率的 $1/M$ 。V-BLAST 算法实际上是使用 ZF 算法加上干扰删除技术得出的,它发送空间未编码的数据流,不需要考虑在接收器上对信号进行均衡处理,算法的具体实现可参见文献[9]。

MATLAB 仿真中,在 3 种结构(即发送天线 \times 接收天线)中使用 V-BLAST 算法: $4 \times 8, 8 \times 12, 12 \times 16$ 。考虑瑞利衰落的影响,这 3 种不同的仿真结构下的符号错误概率与每比特信噪比的关系如图 2 所示。

从图 2 可看出,V-BLAST 算法下,随着每比特信噪比的增加,符号错误概率降低;而且对 3 种发送天线和接收天线结构的每比特信噪比比较后可知,随着收发天线数目的增加,符号错误概率增加,即性能下降。

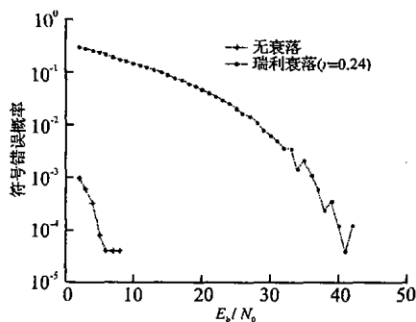


图 1 瑞利衰落对 16-QAM SISO 系统的符号错误概率的影响

Fig. 1 Effect of rayleigh fading on the probability of bit error for 16-QAM SISO system

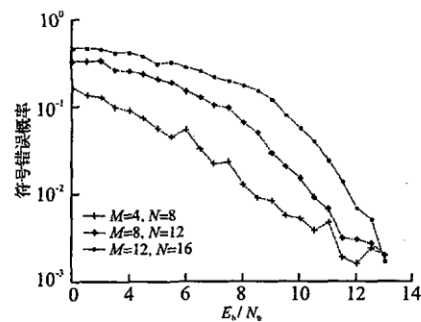


图 2 V-BLAST 算法下不同的收发天线数目对符号错误概率的影响

Fig. 2 Effect of different number of antennas on probability of bit error in V-BLAST algorithm

3 瑞利衰落信道下 MIMO 天线分集系统的性能

前边分析了瑞利衰落对其普通无线系统的影响,当信道频率进入深度衰落时,通信就变得不可靠。分集是一种对抗深度衰落的最有效的方法,它能改善信号质量,并在接收端达到更高的信噪比。

假设接收机能够提供相同信息方位信号的多个副本,用 p 表示在一个单分集分支的瞬时信噪比低于接收门限的概率。如果接收机提供 l 个与衰落无关的副本,则相同时间内所有分支都在或低于该门限的概率是 p_l 。Proakis 提出最重要的分集技术包括频率分集、时间分集和天线分集^[8]。

其中,天线分集可以通过以下方法获得^[8]:①空间分集:这是最常用的方法,可以通过使用多个发送和/或接收天线获得,天线元间的空间间隔至少要大于半个波长。②方向分集:要求要有一定数目的具有方向性的天线。③极化分集:使用散射的属性去极化信号,使用垂直和水平的极化接收天线。

这里重点考虑空间分集。在接收机上结合不同的分集分支有许多的方法,其中最重要的且应用最广泛的是:最大比率结合(MRC, Maximal Ratio Combining),等增益结合(EGC, Equal Gain Combining)和选择性结合(SC, Selective Combining)^[8]。假设在这个点上有 K 个接收机(分集分支),分别记为 $\gamma_i, i=1, 2, \dots, K$,表

示在第 i 个分集分支上接收到的瞬时符号的能量噪声比。具有瑞利衰落的 γ_i 的概率分布函数(pdf), 即

$$f_{\gamma_i}(x) = \frac{1}{\gamma_c} e^{-x/\gamma_c} \quad (2)$$

式中: γ_c 是接收到的分支上的平均符号能量噪声比。

3.1 选择性结合

采用选择性结合时,总是选择能产生最高平均信噪比的分集分支。此时,选择性结合器的输出为

$$\gamma_s^{SC} = \max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_K\} \quad (3)$$

如果分支经过无关的衰落,则其 γ_s^{SC} 的累积分布函数(cdf)可以表示如下^[8]:

$$F_{\gamma_s^{SC}}(x) = [1 - e^{-x/\gamma_c}]^K \quad (4)$$

前边讨论的概率 p 就等于 $F_{\gamma_s^{SC}}(x)$ 。从式(4)可以得出,随着 K 的增加,分集增益递减。

使用连续传输的 SC 对于系统来说是不现实的,因为它需要监视所有的分集分支。如果这样的监视可以执行的话,那么它就能够获得比使用 MRC(其被认为是最优的)更好的性能。

3.2 最大比结合

采用最大比结合,分集分支将由他们各自的复杂衰落增益加权和结合。MRC 给出了最优的性能。用 γ_c^{MRC} 表示 MRC 结合器的输出,则其 cdf 函数如下:

$$F_{\gamma_c^{MRC}}(x) = 1 - e^{-x/\gamma_c} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{x}{\gamma_c}\right)^i \quad (5)$$

随着 K 的增加, cdf 递减,比较式(4)和式(5),可以得出 MRC 比 SC 具有更好的性能。

3.3 等增益结合

等增益结合和 MRC 类似,唯一的不同在于,分集分支是不加权的。正如文献[10]中所提到的,EGC 结合器的输出的 cdf 和 pdf,在 $K > 2$ 时, γ_c^{EGC} 不能得到闭合的形式。EGC 对于调制技术是非常有用的,它具有相等的能量符号。

为了研究当使用 16-QAM 调制时天线分集系统的性能,进行了 MATLAB 仿真。图 3 给出了瑞利衰落条件下双分集系统(2 个接收到的信号都具有闭合形式)的符号错误率性能。从图中可以看到, MRC 具有最好的性能,其次是 EGC, SC 性能最差。图 4 给出了瑞利衰落条件下,当天线数目 N 分别为 2, 4, 6, 8 时, EGC 的符号错误率性能。可以看到,随着天线数目的增加,符号错误率递减,这说明 MIMO 系统中天线的数目越多,分集系统的性能越好。

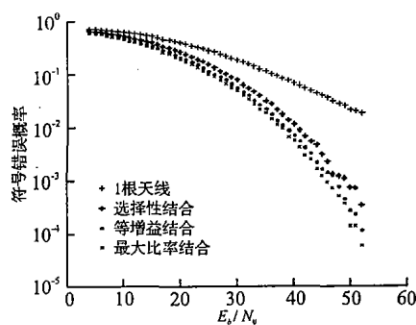


图3 不同双接收天线分集系统性能比较
Fig. 3 Performance comparison of different dual antenna diversity systems

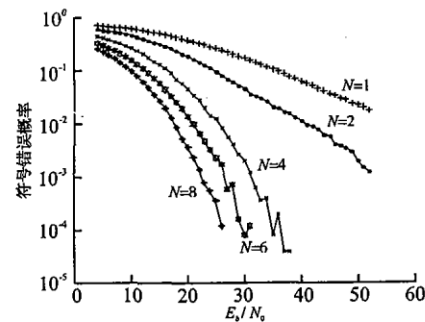


图4 不同数目天线的 EGC 分集系统性能比较
Fig. 4 Performance comparison of equal gain combining with different number of antennas

4 结论

在瑞利衰落信道下,采用 V-BLAST 算法实现空间复用增益时,系统的符号错误率随着收发天线数目的增加而增加;接着重点研究了瑞利衰落信道下 MIMO 天线分集系统的性能仿真结果表明,不同的分集结合方式对系统性能的影响不一样, MRC 具有最好的性能,其次是 EGC, SC 的性能最差;而且不同的收发天线数目对分集系统的性能影响不一样,天线的数目越多,系统的性能越好。

参考文献:

- [1] TR - 2004 - 014, MIMO Systems with Antenna Selection - An Overview [S].
- [2] 王永民, 苟彦新, 孟相如. 基于 Kalman 滤波的自适应 MIMO 信道估计 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2004, 5 (6): 34 - 39.
WANG Yongmin, GOU Yanxin, MENG Xiangru. Adaptive MIMO Channel Estimation Based on Kalman Filtering [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5 (6): 34 - 39. (in Chinese)
- [3] Tim C W, Bas Driesen. Backwards Compatibility for MIMO Systems Based on IEEE 802. 11a; Proc. of the 10th International OFDM Workshop [C]. Hamburg, Germany: [s. n.], 2005: 109 - 113.
- [4] 王 君, 朱世华, 王 磊. 多输入多输出系统信道容量研究 [J]. 电子与信息学报, 2005, 27 (4): 588 - 591.
WANG Jun, ZHU Shihua, WANG Lei. On Channel Capacity of MIMO Systems [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27 (4): 588 - 591. (in Chinese)
- [5] 徐 凯, 罗 涛, 尹长川, 等. 发送天线选择对 MIMO 系统性能的影响 [J]. 重庆邮电学院学报, 2005, 17 (1): 6 - 10.
XU Kai, LUO Tao, YIN Changchuan, et al. Transmit Antennas Selection Influence on Performance of MIMO Systems [J]. Journal of Chongqing of Posts and Telecommunications, 2005, 17 (1): 6 - 10. (in Chinese)
- [6] Angel Lozano, Farrokhi F R, Valenzuela R A. Lifting the Limits on High - Speed Wireless data Access Using Antenna Arrays [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39 (9): 156 - 162.
- [7] 饶文元, 戴利云, 王军选. MIMO 通信中的分集与复用 [J]. 北京电子科技学院学报, 2004, 12 (4): 14 - 17.
RAO Wenyuan, DAI Liyun, WANG Junxuan. Diversity and Multiplexing in MIMO Communication [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2004, 12 (4): 14 - 17. (in Chinese)
- [8] John G, Proakis. Digital Communications [M]. 4th edition, New York: McGraw Hill, 2000.
- [9] Golden G, Foschini G, Valenzuela R, et al. Wolniasky. Detection Algorithm and Initial Laboratory Results Using The V - Blast Space - Time Communication Architecture [J]. Electronics Letters, 2001, 35 (1): 14 - 15.
- [10] Gordon L. Stuber. Principles of Mobile Communication [M]. 2nd edition, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 124 - 124.

(编辑: 田新华, 徐楠楠)

Performance of MIMO System In Slow Flat Rayleigh Fading Channels

WANG Jian - feng¹, HUANG Guo - ce¹, CHEN Mao², ZHU Meng¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Communication Network Control Center of Lanzhou Military Area, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The channel model of MIMO system is introduced first, then the effect of Rayleigh fading on the symbol error probability for 16 - QAM and the performance on the capacity of MIMO system are analyzed based on this. The performance of MIMO system in slow flat Rayleigh fading channel is studied from these two aspects including spatial multiplexing and spatial diversity. The results of analysis and simulation show that the symbol error probabilities of spatial multiplexing system realized by V - BLAST algorithm increase with the increase of the number of transmitting and receiving antennas. And different diversity combining techniques have different influence on the system performance in which MRC is the best, EGC takes second place and SC is bad; and the symbol error probabilities of spatial diversity system decrease with the increase of the number of transmitting and receiving antennas.

Key words: MIMO; Rayleigh fading; symbol error probability; V - BLAST algorithm; antenna diversity