

基于自适应调制技术的 MIMO UWB 无线通信系统的研究

杜洪峰 周 正

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘 要 在对多输入多输出(MIMO)技术和超宽带(UWB)无线通信研究的基础上提出了一种基于自适应调制技术的时变多进制 MIMO UWB 系统。通过采用奇异值分解理论和速率分阶的方法对系统性能进行了分析,推导出了速率离散分阶情况下的功率和速率的分配公式,提出了相邻时隙平均功率控制(JTAPC)算法,并且对系统的性能进行了仿真。研究结果表明,功率控制算法的使用很大程度上提高了采用速率分阶的系统性能,并且降低了系统实现的复杂度。

关键词 移动通信, 超宽带, 多输入多输出, 功率控制, 自适应调制

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0213-04

System Considerations for MIMO UWB Wireless System Using Adaptive Modulation

Du Hong-feng Zhou Zheng

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Based on the investigation of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology and Ultra-Wide Band (UWB) wireless communication systems, a novel MIMO UWB system is proposed, which based on adaptive modulation technique in time varying channel. By using Singular Value Decomposition (SVD) theory and rate quantization methods, the joint time slot average power control algorithm to allocate power and rate is proposed. Simulations indicate that system performance is highly improved by using the power control algorithm.

Key words Mobile communication, Ultra WideBand (UWB), Multiple-Input Multiple-Out (MIMO), Power control, Adaptive modulation

1 引言

移动通信和互联网技术的快速发展对高速无线通信的需求迫在眉睫,由于无线频谱是有限的,如何提高无线频谱的利用率以便提高系统的容量成为重要的研究课题。就物理层而言,超宽带(UWB)通信技术和多输入多输出(MIMO)技术的研究在提高频谱利用率并且获得高速率的通信方面具有重要的意义。超宽带技术是一种基于超短脉冲的无线通信技术^[1-4],具有传输速率高,抗多径和窄带干扰能力强,截获率低,系统复杂度低并可与现有无线通信系统共存等一系列独特的优点,近年来已成为国内外研究的热点。多输入多输出技术在发射端和接收端使用多个天线^[5-8],通过使用分集和复用可以获得非常高的频谱利用率。在室内条件下,超宽带技术的多径信道为多输入多输出技术的应用提供可能,二者的结合可以获得非常高的传输速率,满足下一代短距离无线

通信的需求。

文章使用奇异值分解(SVD)理论分析了采用多输入多输出天线技术的超宽带通信系统的模型,为了提高系统的功率利用率,提出了相邻时隙平均功率控制算法来提高系统的性能,推导出了速率离散分阶的情况下的功率和速率的分配公式,并且对于不同情况下的系统的设置进行了仿真实验。

2 系统模型

2.1 信道模型

不失一般性,假设一个 MIMO 通信系统具有 M 个发射天线和 N 个接收天线,如图 1。假设接收天线完全掌握信道的状态,速率和功率分配的信息能够及时反馈到发射端。假设信道是随机准静态的 AWGN 信道,当传输一帧数据时信道参数是固定的,当传输不同帧数据时信道参数可能是变化的。令 $\mathbf{x}$ 表示 $M \times 1$ 维的发射信号向量, $\mathbf{y}$ 表示 $N \times 1$ 维的接

2004-08-05 收到, 2005-03-28 改回

国家 863 计划(2003AA123240), 国家自然科学基金(60372097)和教育部科学技术研究重点项目(03035)资助课题

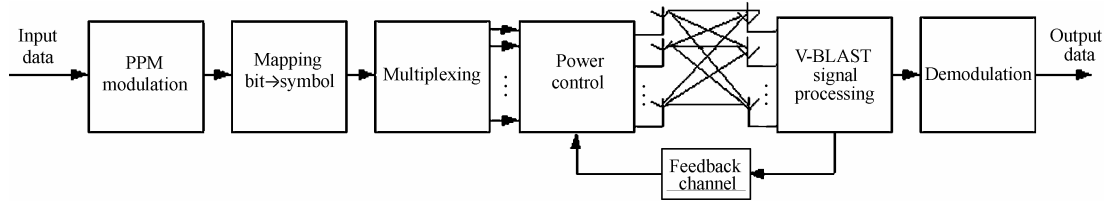


图1 采用多天线技术的 UWB 系统模型

Fig. 1 System model of UWB wireless system using multiple antennas

收信号向量, $\mathbf{H}$ 表示 $N \times M$ 维的包含独立高斯随机变量的信道矩阵, $\mathbf{n}$ 表示均值为 0 的高斯白噪声向量, 其协方差矩阵是单位矩阵与 σ^2 的乘积, 为了分析简单假定 $\sigma^2=1$, 信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的每个元素的方差为 1。接收端的向量 $\mathbf{y}$ 可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 $E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \mathbf{I}_N$, 其中 $\mathbf{H}$ 表示共轭转置, $\mathbf{I}_N$ 表示 $N \times N$ 的单位矩阵。

利用矩阵的奇异值分解理论, 信道矩阵 $\mathbf{H}$ 可以表示为

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^* \quad (2)$$

其中 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别是 $N \times N$ 和 $M \times M$ 矩阵, $\mathbf{A}$ 是 $N \times M$ 维非负的对角矩阵, 其对角线上的元素为 $\lambda_1^{1/2}, \dots, \lambda_L^{1/2}$, 这些非负的平方根是 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值, 其中 $L = \min(M, N)$ 。令 $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$, $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V}^H \mathbf{x}$, $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$, 式(1)可以变化为

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (3)$$

其中 $\tilde{\mathbf{n}}$ 和 $\mathbf{n}$ 具有相同的分布, $E[\tilde{\mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}}^H] = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$ 。于是, 信道可以分解为 L 个独立的子信道

$$\tilde{y}_m = \lambda_m^{1/2} \tilde{x}_m + \tilde{n}_m, \quad 1 \leq m \leq L \quad (4)$$

2.2 发射机

考虑传统的时变脉位调制无线脉冲多址接入 (PPM-IRMA) 的 UWB 系统^[1], 假设第 m 个用户发射的数据为 $s_m(q)$, 任意时刻从 $\{0, 1, \dots, D-1\}$ 中选择一个数据重复发送 N_f 帧, 每帧信号的发射时间为 T_f 。 $s_m(q)$ 在发射的 N_f 次过程中通过序列 $\tilde{c}_m(k)$ 区别在不同帧的时间位置, $\tilde{c}_m(k) \in [0, N_c-1]$, 在每帧数据中有 N_c 种可能的选择, 不同用户数据在同一帧数据中具有不同的时间位置表示。假设 T_c 和 T_g 分别表示码片时间和保留时间, 可以得到 $T_f = N_c T_c + T_g$ 。单脉冲信号 $\omega(t)$ 在脉位调制的时候位置偏移 $\tau_{s_m(q)}$, 其中脉冲宽度满足 $T_\omega \ll T_c$, $0 \leq \tau_{s_m(q)} \leq T_c - T_\omega$ 。于是, 第 m 个用户的发射信号可以表示为

$$v_m(t) = A \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \omega(t - kT_f - \tilde{c}_m(k)T_c - \tau_{s_m(\lfloor k/N_f \rfloor)}) \quad (5)$$

其中 A 表示功率系数, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 下取整。经过调制和映射, 输入数据被复用为 M 个子数据流, 每一个对应一个发射

天线。发射端可以根据从接收端反馈的信道信息对发射天线进行功率控制, 从而提高系统的功率利用率, 关于功率控制将在第 3 节详细分析。

2.3 接收机

在接收端, N 个接收天线中的每一个接收天线分别接收到来自 M 个发射天线的发射信号, 发射端的信号速率为 $1/T_c$, 在接收端我们使用相同的速率抽样。考虑到脉位调制, 让信号在接收端抽样前通过 D 个平行的匹配滤波器 $\omega_a(t) = \omega(t - \tau_a)$, 这种接收端的结构可以使用在单用户的情况下, 考虑到信道的传播特性, 假设第 m 个用户的脉冲相应为 $h_m(t)$, 可以得到第 m 个用户的第 b 个匹配滤波器的输出可以表示为

$$y_{m,b}(n) = \sum_{a=0}^{D-1} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} u_{m,a}(k) h_{m,b,a}(n-k) + \eta(n) \quad (6)$$

其中 $u_{m,a}(k)$ 可以从第 m 个用户的信号表示形式和跳时序列的表达式推导出, $h_{m,b,a}(n) = \omega_a(t) \otimes h_{m,b,a}(t) \otimes \omega_b(t)|_{t=nT_c}$ 和 $\eta_b(n) = \eta(t) \otimes \omega_b(t)|_{t=nT_c}$, $\otimes$ 表示卷积。

3 功率控制分析

为了使上述系统获得最大的系统容量, 节省发射功率, 需要对发射功率和速率的分配进行优化。假设发射端可以得到即时的信道信息, 由于不同发射天线发射的信号是相互独立的, 于是 $\mathbf{x}$ 的相关矩阵可以表示为对角矩阵

$$E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \text{diag}\{P_1, P_2, \dots, P_M\} \quad (7)$$

假设分配到天线 m 上的功率为 P_m , 用 P_T 表示平均发射功率, 于是满足

$$E\left[\sum_{m=1}^M P_m\right] \leq P_T \quad (8)$$

假设用 R_i 表示第 i 个天线的数据传输速率, $\mathbf{h}_m$ 表示信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的第 m 列, $\mathbf{H}(m)$ ($m=1, 2, \dots, M$) 表示 $N \times (M-m+1)$ 矩阵 $[h_m \ h_{m+1} \ \dots \ h_{M-1} \ h_M]$, 同时假设用 $\mathbf{P}(m)$ 表示 $(M-m+1) \times (M-m+1)$ 矩阵 $(P_m \ P_{m+1} \ \dots \ P_M)$ 。根据文献[9]中的 OSD 算法, 第 m 个天线的发射速率为

$$R_m = \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma} P_m \mathbf{h}_m^H (\mathbf{H}(m+1) \mathbf{P}(m+1) \mathbf{H}(m+1)^H + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{h}_m \right) \quad (9)$$

其中 $(m=1,2,\dots,M)$, Γ 是误码率和编码方式的函数, 取值大于 1。在多进制跳时脉位调制的 UWB 系统中, 通过合理的设置 N_f , 在不影响多进制信号整体带宽的情况下, 可以得到

$$R_M = \frac{\log_2 M}{T_s} \quad (10)$$

这里 $T_s \triangleq N_f T_f$ 表示字符的传输时间, M 表示对应于传统的 UWB 系统的 M 进制。

本文提出一种相邻时隙平均功率控制算法(JTAPC), 其基本思想是: 选择一组离散的传输速率, 例如 $\{0, q, 2q, 3q, 4q\}$, q 表示基本的速率单元。在一个时隙的开始, 比如是第 i 个时隙, 将发射功率平均分配到每一个发射天线, 通过式(9)反向计算出每一个发射天线的发射速率, 将该速率归一化到某一个离散速率, 利用式(9)计算出发射天线发射该速率时需要的发射功率, 该天线的剩余功率平均分配到没有进行功率分配的发射功率, 由于前面天线剩余功率的存在, 有时会使一些天线的发射速率会增加。当所有的天线被分配一个发射速率和发射功率时, 计算出时隙 i 的剩余功率, 并且将其作为时隙 $i+1$ 的附加功率: $P_{re}(i) = P_T - \sum_{\lambda=1}^m P_{\lambda}(i)$ 。 $P_{\lambda}(i)$ 表示第 i 时隙分配到 λ 天线的功率。在一个时隙中该功率控制算法如图 2 表示, 图中 P_{re} 表示剩余功率, P_T 表示发射功率。

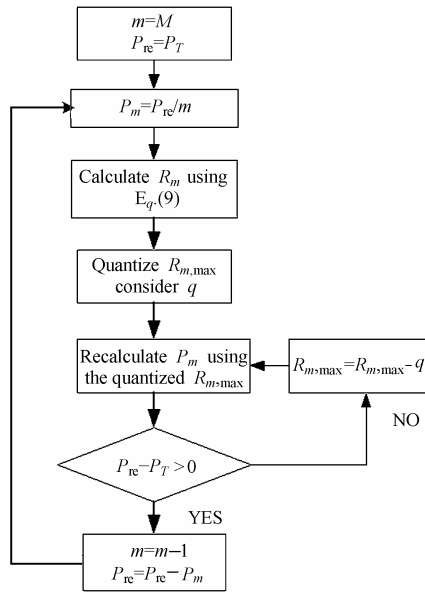


图2 一个时隙中相邻时隙平均功率控制算法

Fig.2 JTAPC algorithm in a time slot

假设 $P_{\text{total}}(i)$ 表示第 i 时隙的发射功率, $P_{re}(i)$ 表示第 i 时

隙的剩余功率, $R_m(i)$ 表示第 i 时隙时第 m 个天线根据发射功率计算出的速率, $q \lfloor R_m(i)/q \rfloor$ 表示 $R_m(i)$ 量化后的速率, 算法的具体描述如下:

(1)初始化: 时隙 $i=0$, 发射功率 $P_{\text{total}}(i) = P_T$;

(2)时隙 i 内初始化: $m=M$;

(a)将发射功率 $P_{\text{total}}(i)/M$ 分配到每个天线;

(b)用式(9)计算出第 m 个天线的发射速率 $R_m(i)$;

(c)采用取整的方式量化 $R_m(i)$ 为 $R_{qm}(i) = q \lfloor R_m(i)/q \rfloor$;

(d)用式(9)计算发射速率为 $R_{qm}(i)$ 时所需要的实际发射功率 $P_m(i)$;

(e) $m=m-1$, 如果 $m>0$, 转到(b);

(3)计算时隙 i 的剩余发射功率 $P_{re}(i) = P_{\text{total}}(i) - \sum_{m=1}^M P_m(i)$;

(4)计算时隙 $i+1$ 的发射功率 $P_{\text{total}}(i+1) = P_{re}(i) + P_T$, $i=i+1$, 转到(2);

4 数值仿真

基于上述的跳时多进制MIMO UWB系统模型和自适应调制算法, 我们使用Matlab进行数值仿真。假设离散的速率为 $\{0,1,2,3,4\}$ 分别对应着没有数据传输, 以及采用 2-PPM, 4-PPM, 8-PPM 和 16-PPM进行数据传输。频谱利用率是通过 1000 次独立的运算获得, 误码率选择为 10^{-3} 和 10^{-6} 。

图 3 给出了连续速率情况下和采用相邻时隙平均功率控制算法时的系统的频谱利用率和信噪比的比较。当发射端和接收端的天线数量均为 3 时, 两者的性能基本相同。不同误码率时的系统的性能同时在图中表示出来, 为了达到相同的频谱利用率, 较低的误码率需要大约 4dB 多的发射功率。

图 4 中给出了在发射端和接收端的天线数量不同时系统的性能比较。图中可以看出, 采用 5 个离散速率的相邻时隙

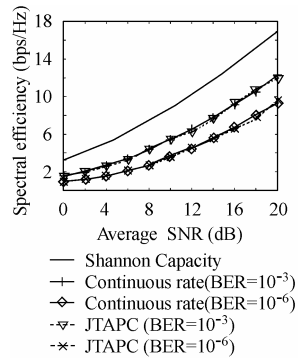


图3 $M=N=3$ 时频谱利用率与信噪比的关系

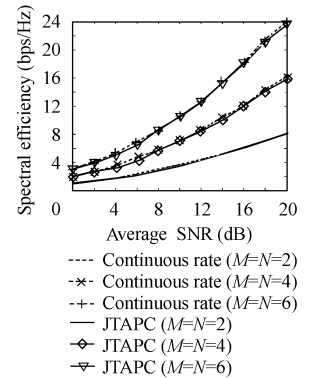


图4 不同发射天线数量时系统性能比较

Fig.3 Spectral efficiency vs. average SNR when $M=N=3$ Fig.4 Performance comparison using different antennas

平均功率控制算法的系统性能接近连续情况下系统的性能。

不同数量的离散速率分阶对系统性能的影响在图5中给出。图中给出了连续速率的情况以及在 $M=N=3$, $BER=10^{-3}$ 时, 采用3, 4和5阶速率时, 也就是速率采用 $\{0,1,2\}$, $\{0,1,2,3\}$ 和 $\{0,1,2,3,4\}$ 时系统性能比较。在较低的信噪比时, 本文提出算法的性能接近于连续速率的情况; 在较高的信噪比时, 本文提出算法的性能只有在系统采用5阶速率时才接近于连续速率的情况。

图6给出了本文提出的算法在采用5阶速率, 误码率为 $BER=10^{-3}$ 时, 不同数量收发天线对系统的性能影响。在较低的信噪比的情况下, 评估的误码率要高于目标误码率, 在较高的信噪比的情况下, 评估的误码率要低于目标的误码率。

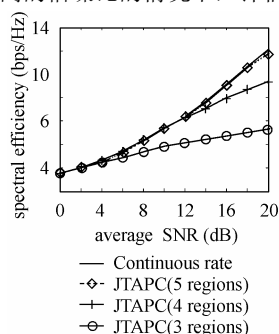


图5 不同速率分阶时系统性能比较

Fig.5 System performance using different rate levels

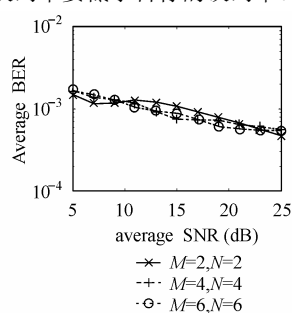


图6 不同天线数量时误码率与信噪比的关系

Fig.6 BER vs. average SNR for different antennas

5 结束语

本文分析了跳时多进制 MIMO UWB 无线通信系统的模型, 为了提高系统的性能, 降低系统的复杂度, 提出了基于相邻时隙平均功率控制的自适应算法, 并且对系统在不同的天线数量, 不同的误码率以及不同的自适应调制参数下的性能进行了仿真。将多天线技术引入到 UWB 的研究是一个探索, 多天线的引入在很大的程度上提高了系统的性能, 同时势必增加系统的复杂度, 因此有时需在系统的复杂度和系统的性能之间权衡, 自适应调制技术的应用在很大程度上降低了系统的复杂度。

参考文献

- [1] Win Moe Z. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications. *IEEE Trans on Commun.*, 2000, 48(4): 679 – 691.
- [2] Scholtz R. Multiple access with time-hopping impulse modulation. In MILCOM, Bedford, MA, 11–13, Oct. 1993: 447 – 450.
- [3] Welborn M L. System considerations for ultra-wideband wireless networks. Radio and Wireless Conference, 2001. RAWCON 2001. IEEE, Boston, 19–22, Aug., 2001: 5 – 8.
- [4] Yang Liuqing, Giannakis B. Ultra-wideband multiple access: unification and narrowband interference analysis. IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, Virginia, on November 16–19, 2003: 320 – 324.
- [5] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311 – 335.
- [6] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas. *Bell Lab. Tech. J.*, 1996, 1(2): 41 – 59.
- [7] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585 – 595.
- [8] Golden G D, Foschini G J, Valenzuela R A. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture. *Electronics Letters*, 1999, 35(1): 14 – 16.
- [9] Varanasi M K, Guess T. Optimum decision feedback multiuser equalization with successive decoding achieves the total capacity of the Gaussian multiple access channel. Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Monterey, CA, 1998: 1404 – 1409.

杜洪峰: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为智能天线、无线通信。

周正: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、信号处理。