

一种基于多天线选择的新型多用户 MIMO-OFDM 自适应子载波组分配算法^{*})

郭磊 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 针对于多用户 MIMO-OFDM 下行传输,本文提出了一种基于用户信道特征,利用多天线选择和子载波组分配相结合的新型自适应算法。该算法在不明显降低系统整体性能的前提下可大大降低发射端计算复杂度,使之更适用于实时信道传输环境。仿真结果表明,该算法在计算复杂度大幅减小的情况下仍能保证系统性能无明显损失。

关键词 天线选择, MIMO, OFDM, 自适应, 多用户

An Adaptive Subcarrier Band Allocation Based on Antenna Selection for Multiuser MIMO-OFDM Transmission

GUO Lei ZHU Guang-Xi

(Dept. of Electronics & Information Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract In this paper, we propose a real-time adaptive subcarrier band allocation algorithm combined with antenna selection in multiuser MIMO-OFDM downlink transmission based on channel characteristic of users. This algorithm can significantly reduce the computing complexity of transmitter without apparent performance attenuation, which is more suitable for real-time environment. Simulation results showed that our proposed algorithm can obtain the approximate optimal performance with significant computing complexity reduction.

Keywords Antenna selection, MIMO, OFDM, Adaptive, Multiuser

新一代宽带高速无线通信系统对传输速率和传输可靠性提出了更高的要求。MIMO 技术作为一种潜力巨大的新型技术成为下一代无线通信的热点技术,它通过在发射端和(或)接收端配置多根天线的方式来提高系统整体性能和系统整体容量^[1,2]。与传统的单发单收系统相比较,其具有更吸引人的传输效果,因此在移动通信领域获得学者的密切关注和大量研究。

但是, MIMO 技术的应用也存在其自身的缺陷,这来源于 MIMO 对频率选择性衰落信息引起的符号间干扰(ISI)敏感造成。为了使 MIMO 技术能更好地应用于实际系统, OFDM 技术的引入成为一种很好的补充^[3], MIMO-OFDM 相结合的研究可望成为下一代无线通信系统的关键技术。

在目前针对 MIMO-OFDM 系统进行的自适应传输研究中, MIMO 算法和多用户资源分配算法的复杂性是影响其在实际系统应用的重要问题。在一个快变信道环境中,如果发射或接收端采用运算量很大的算法时,将使系统的实时性受到很大影响,甚至无法应付,这就很大程度上限制了 MIMO-OFDM 技术在实际系统中的应用。因此我们有必要针对快变实时信道对这两个算法进行优化,使之能更好地适应实际信道环境。

本文中,我们将一种新型天线选择的次优算法与多用户自适应子载波组分配算法相结合,使波束成型和子载波分配以天线选择的结果为基础实现多用户自适应资源分配。本算法在天线维和频率维两种自由度上分别采用了次优的简化算法,可在不明显损失系统整体性能的同时可进一步降低 MIMO-OFDM 系统自适应传输的计算复杂度和运算量。

1 系统模型

在本文中,一种下行自适应多用户 MIMO-OFDM 系统将被作为算法研究的平台,系统框图描述如下:系统在发射端

配置 M 根天线,在接收端配置 N 根天线, ($M > N$)。OFDM 子载波数为 N_c ,总用户数为 L 。

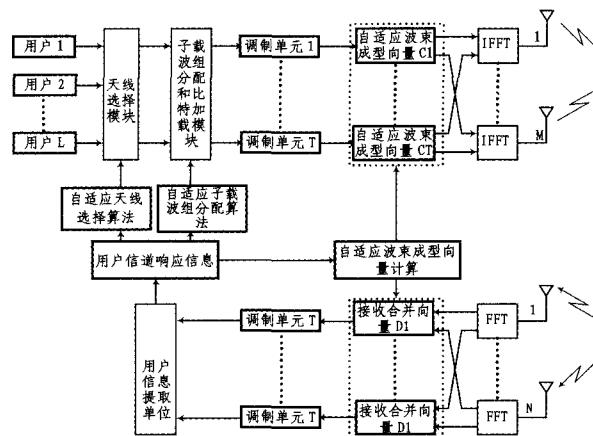


图1 多用户自适应 MIMO-OFDM 系统模型

我们仅使天线选择策略应用于基站端,而使移动端保持固定数目接收天线。即每个用户在每个子载波上选择的发射天线满足 $M_m^l = N, l=1, 2, \dots, L, m=1, 2, \dots, N_c$ 。

我们定义所获得的 T 组子载波组分别对应 T 组自适应统计波束成型向量,以 C^i 表示,其中 $i=1, 2, \dots, T$ 。 $C^i = [C^{i1}, C^{i2}, \dots, C^{iM_m^l}]^T$, $D^i = [D^{i1}, D^{i2}, \dots, D^{iN}]^T$ 分别代表第 i 个子载波组上发送 $M_m^l \times 1$ 维波束成型统计向量和 $N \times 1$ 维统计接收合并向量。 $M_m^l \times N$ 的方阵 H_m^l 为用户 l 在第 m 个子载波上的信道响应矩阵。

假定基站端可以准确的获得所有用户的信道反馈信息 H_m^l ,并且各个用户将以独占方式占有子载波组,这就是说任何一个子载波不会被一个以上的用户分享。我们定义布尔变

^{*})本课题来源于国家 863 计划研究项目(No. 2003AA12331005) & (No. 2006AA01Z277),国家自然科学基金项目(No. 60496315)。郭磊 博士研究生,研究方向为多用户 MIMO-OFDM 自适应传输;朱光喜 教授,博士生导师,研究方向为宽带多媒体通信。

量 ξ_i^l 表示第 l 个用户是否被分配第 i 组子载波组, ξ_i^l 的取值为 1 或者 0, 1 代表该子载波组被 l 用户占用。

在该多用户 MIMO-OFDM 系统平台下, 我们的目标是在指定误码率和发射速率为常速率的前提下, 使各个用户在发射端所提供的天线组中选择各自最优的 M_m^l 个天线作为一个天线组子集, 并在所选择的天线组子集中利用自适应子载波组分配和统计波束成型来实现系统整体发射功率最小。将上述目标描述为以下表达式:

$$\text{Select: } Ant_m^l = \underset{M_m^l}{\text{SELECT}_{\text{optimal}}} [Ant_{\text{total}} | H_m^l] \quad (1)$$

$$Ant_{\text{total}} = \{1, 2, \dots, M\}$$

$$\text{And minimize: } P_{\text{total}} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{N_c} \xi_m^l P_m^l \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } BER_m^l = BER_c \quad (3)$$

$$R_c = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{N_c} \xi_m^l b_m^l \quad (4)$$

$$N_c = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{N_c} \xi_m^l \varphi^l \quad (5)$$

Ant_{total} 是基站端发射天线的集合, Ant_m^l 为第 l 个用户在第 m 个子载波上所选择的发射天线集合, 其数量为 M_m^l 。 P_m^l 为分配给第 l 个用户的第 m 个子载波上的功率, P_{total} 为每个 OFDM 符号总的发射功率, BER_c 是目标误码率, BER_m^l 和 b_m^l 分别是第 l 个用户在第 m 个子载波上的误码率和比特数, R_c 是每个 OFDM 符号的发送的总速率, φ^l 是第 l 个用户子载波组中子载波的个数。

2 自适应天线选择和多用户子载波组分配算法

2.1 自适应天线选择算法

根据对现有天线选择算法的研究^[4], 本文提出一种在 MIMO-OFDM 系统中使用的多用户天线选择算法, 该算法是基于文^[5]中天线选择算法的思想, 利用一种简化的算法从第 l 个用户在第 m 个子载波上所对应的信道矩阵中挑选出满足某一范数规则要求的 M_m^l 行, 这 M_m^l 行都满足其范数值分别是该行对应矩阵列中幅值最大的要求, 这些行相应的发射天线即是该用户在第 m 个子载波上的发射天线组的分配结果。

我们定义 $\bar{H}^l = [H_1^l, H_2^l, \dots, H_m^l, \dots, H_{N_c}^l]$ 为用户 l 在 N_c 个子载波上的信道响应矩阵, H_m^l 是用户 l 在第 m 个子载波上的信道响应矩阵。我们的目标是根据每个子载波 m 上的信道响应来选择对应于每个用户在子载波 m 上的最佳发射天线组。

算法描述如下:

①首先在 H_m^l 中第一列中选择范数 $|h_{n1}^l|^2$ 最大的数值对应的一行作为第一个被选出的发射天线, 即满足 $p_1 = \arg \max_{1 \leq n \leq N_c} |h_{n1}^l|^2$ 并同时从 H_m^l 中消去 p_1 这一行, 完成 H_m^l 的更新;

②与①相似, 在更新后的 H_m^l 中的下一列起开始寻找范数 $|h_{n\theta}^l|^2$ 最大的数值对应的一行作为第二个被选出的天线, 即满足 $p_\theta = \arg \max_{1 \leq n \leq N_c - \theta + 1} |h_{n\theta}^l|^2$, 并同时从 H_m^l 中消去 p_θ 这一行, 完成 H_m^l 的更新;

③对②进行循环直至挑选出数量为 M_m^l 的发射天线为止。

上述算法可选择出用户 l 在第 m 个子载波上可使用的发射天线组 Ant_m^l , 从而可得到的所有用户在所有子载波上的天线组矩阵表示如下:

$$Ant = \begin{bmatrix} Ant_1^1 & Ant_1^2 & \dots & Ant_{N_c}^1 \\ Ant_1^2 & Ant_2^2 & \dots & Ant_{N_c}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Ant_1^L & Ant_2^L & \dots & Ant_{N_c}^L \end{bmatrix} \quad (6)$$

矩阵 Ant 中的天线组元素下标代表子载波, 上标代表用户,

其每个元素的含义为该用户在该子载波上适合传输的发射天线集合。

2.2 基于用户信道反馈信息的自适应多用户子载波组分配算法

本算法的基本思想是以传统逐子载波分配算法为基础^[5~7], 结合各个用户反馈的相关信道带宽信息, 利用相邻子载波在相关带宽内呈现强相关性的特点, 将子载波分配由逐子载波分配变为以组为单位进行连续分配的方式。在这里, 我们从使发射功率最小的目的出发, 将发射功率最小化的问题转换为接收信噪比最大的计算。

对用户 l 在第 m 个子载波上的天线选择元素 $Ant(l, m)$ 多对应的简化的信道响应矩阵 $\bar{H}_m^l$, 我们可以得到用户 l 在第 m 个子载波上的接收符号为:

$$y_m = \bar{H}_m^l C_m^l s_m^l + n_m^l \quad (7)$$

其中, n_m^l 为 $M_m^l \times 1$ 的复高斯向量, 其每个元素都为均值为 0, 方差为 $N_0/2$ 的复高斯随机变量。故进行 MRC 处理后接收信号信噪比为:

$$\begin{aligned} SNR_m^l &= \frac{E\{ |(C_m^l)^H (\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l C_m^l s_m^l|^2 \}}{E\{ |(C_m^l)^H (\bar{H}_m^l)^H n_m^l|^2 \}} \\ &= \frac{E_s}{N_0} (C_m^l)^H (\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l C_m^l \end{aligned} \quad (8)$$

我们对 Hermite 矩阵 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 进行特征值分解:

$$(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l = U_m^l \Lambda_m^l (U_m^l)^H \quad (9)$$

其中 Λ_m^l 是一个对角阵, 其对角线上的元素是矩阵 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 的特征值, U_m^l 是一个酉矩阵, 它的列由矩阵 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 的特征向量组成。

将(9)式代入(8)式得到:

$$SNR_m^l = \frac{E_s}{N_0} [(U_m^l)^H C_m^l]^H \Lambda_m^l (U_m^l)^H C_m^l = \frac{E_s}{N_0} (\tilde{C}_m^l)^H \Lambda_m^l \tilde{C}_m^l \quad (10)$$

从(10)式可以看出, 为了使该子载波上的接收信噪比最大, $\tilde{C}_m^l$ 应该满足以下关系: $\tilde{C}_m^l = [0, \dots, 1, \dots, 0]^T$, 其中为 1 的第 i 个元素对应的 $\lambda_{m,i}^l$ 是 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 的最大特征值。

故, 最佳波束成型向量可选择为^[9]:

$$\tilde{C}_m^l = \vec{u}_{m,\max}^l \quad (11)$$

其中 $\vec{u}_{m,\max}^l$ 为 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 的最大特征值 $\lambda_{m,\max}^l$ 所对应的特征向量。

根据上述分析, 接收端采用的最大比合并方式, 相应的接收信噪比可以表示如下:

$$SNR_m^l = \frac{E_s \lambda_{m,\max}^l}{N_0} \quad (12)$$

由此, 可以看到为了使总的功率消耗最小, 就应该将特定的 OFDM 子载波分配给其上接收信噪比最大的用户。

根据如上分析, 我们给出了子载波组分配的算法:

①通过计算每个用户得到的 $M \times N$ 个多径时延扩展值 $\Delta_{u,v}^l$, 计算出时延扩展值 Δ^l , 即

$$\Delta^l = \text{MAX}_{M,N} \Delta_{u,v}^l \quad (13)$$

进而获得相关带宽内的子载波数为:

$$\varphi^l = \text{Floor}[B^l / bw_c] \quad (14)$$

其中, $B^l = 1/2\pi\Delta^l$, $bw_c = BW/N_c$, BW 是系统带宽。

②分别计算出在第 m 个子载波上各个用户的简化信道矩阵 $(\bar{H}_m^l)^H \bar{H}_m^l$ 的最大特征值 $\lambda_{m,\max}^l$, 对所有 $\lambda_{m,\max}^l$ 进行比较后得到最大特征值最大的用户 l 。根据①中得到的 φ^l , 将从 m 起连续 φ^l 个子载波作为一组分配给用户 l 作为该用户独占的子载波组, 同时将子载波分配的起始位置更新到第 $(m + \varphi^l)$ 个子载波的位置, 等待下一轮分配。重复上述步骤直至所有的子载波都被分配完毕;

上述的分配办法可用公式表示为:

$$\xi_i^l = \begin{cases} 1 & l = \operatorname{argmax}(\lambda_{l+}^1 + \sum_{\theta=0}^{\theta=i-1} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max, \dots, \lambda_{l+}^{\theta=i-1} + \sum_{\theta=0}^{\theta=i-1} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

第 i 组子载波组中发射波束成型向量和接收最大比合并向量为:

$$C_{l+}^{i, \theta=i-1} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega} = \frac{1}{\varphi} \sum_{\theta=0}^{\theta=i-1} u_{l+}^{\theta\omega} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max \quad (16)$$

$$D_{l+}^{i, \theta=i-1} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega} = \frac{1}{\varphi} \sum_{\theta=0}^{\theta=i-1} (\bar{H}_{l+}^{\theta\omega} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max)^H u_{l+}^{\theta\omega} u_{l+}^{\theta\omega} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max \quad (17)$$

第 i 组子载波上的最大接收信噪比可表示为:

$$\text{SNR}_{\max}^{i, \theta=i-1} = \frac{E_s}{N_0} \cdot \lambda_{l+}^{\theta=i-1} \sum_{\omega=1}^L \xi_{\theta\omega}^{\theta\omega}, \max \quad (18)$$

我们在其后进行的仿真中都采用以传统贪婪算法为基础的自适应比特加载方式,在此不再赘述。

3 仿真结果

我们采用了 Cadence 公司的 SPW4.8 仿真工具。信道模型使用 IMT2000 vehicular mode A 信道,该信道是一个六径模型,用于模拟室外高速移动车载环境。系统载频为 2GHz,传输带宽 10M,采用 512 点 FFT。仿真中引入 8 个用户,4 根发射天线,2 根接收天线。

为了验证本文中提出的算法在实际信道中的性能并便于比较,我们在都使用自适应波束成型的前提下分别仿真了无天线选择传统动态子载波分配算法(NAS-TSA),最优天线选择子载波组分配算法(OAS-SBA),次优天线选择子载波组分配算法(SOAS-SBA)以及无天线选择子载波组分配算法(NAS-SBA)四种情况的性能表现。

根据 10^5 个点的仿真,我们得到了图 2 中所示的性能曲线:

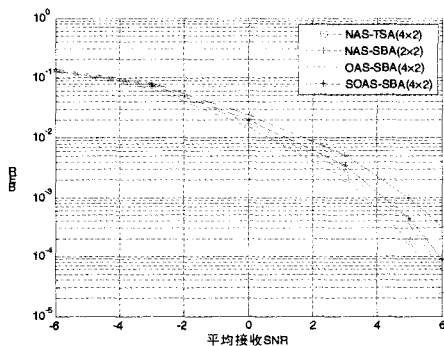


图 2 4 发 2 收系统中的性能比较

从图 2 中我们可以看到,性能最好的是 NAS-TSA 系统,性能次优的是 OAS-SBA 和 SOAS-SBA 系统,从性能曲线上看,二者在性能上比较接近,故可说明本文中所提的次优天线选择算法在大量简化天线选择算法复杂度的基础上,也保证了系统性能与最优天线选择算法系统性能无明显差异。SOAS-SBA 系统较 NAS-TSA 系统性能弱化的原因是前者使用了基于子载波组分配的算法将可分配给用户的最小单位由单个子载波变为由数个连续子载波组成的子载波组,使用统计信道信息来同一表征在同一相关带宽内整个子载波组上的信道特性,因此该自适应子载波分配的方法性能显然要弱于逐子载波分配的最优性能。但是通过上文中的描述可以看到,这种次优算法在算法计算量上要大大低于逐子载波分配的算法,因此可以认为该算法实现了以较小性能损失的代价

获得了运算量大幅降低的目的。图 2 中性能最差的是 2 发 2 收的 NAS-SBA 系统,与 SOAS-SBA 系统比较,后者虽然在实际传输时也使用了 2 发 2 收的结构,但是因为通过天线选择算法,挑选出信道性能最好的 2 组发射接收天线作为传输通道,因此获得了比单纯采用 2 发 2 收方式更好的性能,通过仿真曲线,我们可以看到,天线选择算法可获得 1-2dB 的增益。为了进一步说明问题,我们又给出了 8 发 4 收系统中的曲线,如图 3 所示。

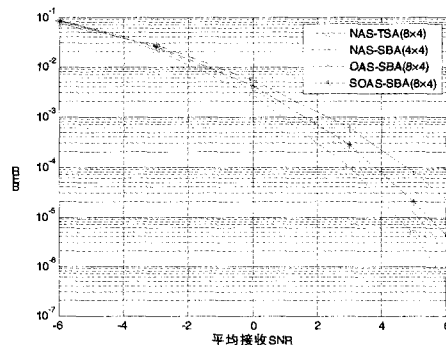


图 3 8 发 4 收系统中的性能比较

可以看到,8 发 4 收的系统中,本算法获得了与图 2 相似的结论。

结论 本算法借鉴了原有的 MIMO 系统天线选择算法和传统 OFDM 逐子载波动态分配算法,提出了一种基于范数的简化天线选择与基于相关带宽的子载波组分配相结合的新型 MIMO-OFDM 自适应算法。算法利用用户反馈的 H_m^H 选择出各个用户最佳的发射天线组 Ant_m^l ,再以 Ant_m^l 为基础,通过将子载波组动态分配给在其上具有最大 $(\bar{H}_{l+}^{\theta\omega})^H \bar{H}_{l+}^{\theta\omega}$ 特征值的用户来达到使发射功率最小化的目的。该算法组性能上稍弱于最优算法,但是与最优算法性能相差不大,其优势在于天线选择和子载波组分配算法的结合大大简化了传统算法的复杂度和运算量(以本仿真中的计算量为例,运算量减小 3~6 倍),且不明显影响系统整体性能,从仿真曲线中可以得到验证。因此可以认为本算法达到了预期的目标,是一种更贴近实用的算法。

参考文献

- 1 Foschini G J Jr, Gans M J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Commun*, 1998, 6: 311~335
- 2 Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. AT&T Bell Labs, Internal Tech. Memo, June 1995
- 3 Yang Hongwei. A road to future broadband wireless access: MIMO-OFDM-based air interface. *IEEE commun. Magazine*, 2005, 43: 53~60
- 4 Gorokhov A. Antenna selection algorithms for MEA transmission systems. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 2002, 3: 2857~2860
- 5 Chen Zhuo, Branka V, Yuan Jinhong, Leong L K. Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels. *Communication Technology Proceedings*, April 2003, 2: 1532~1536
- 6 Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, Murch R D. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, 1999
- 7 Keller T, Hanzo L. Adaptive orthogonal frequency division multiplexing schemes. In: *Proc. ACST*, Rhodes, Greece, 1998, 794~799
- 8 Rhee W, Cioffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation. In: *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2000)*, Tokyo, Japan, May 2000, 1085~1089
- 9 Wong K, Cheng R, Letaief K, Murch R. Adaptive antennas at the mobile and base stations in an OFDM/TDMA system. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(1): 195~206