

功率约束条件下 MIMO-OFDM 下行广播信道自适应资源分配

宋 绯 吴启晖 潘成康 王金龙
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 该文分析了功率约束条件下 MIMO-OFDM 系统广播信道的发送优化问题, 提出了两种不同准则下的多用户传输策略和功率分配方案, 即最优空间距离 OSD-DPC(Optimal Space Distance Dirty Paper Coding)方案和最大化信噪比波束成形 MSNR-DPC(Max Signal to Noise Ratio Dirty Paper Coding)方案。数据结果表明, 两种传输策略与理论上的最优传输方案性能非常接近, 可以显著提高功率约束条件下的系统性能与容量。

关键词: 多输入多输出系统; 脏纸编码; 广播信道; 干扰消除

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1185-04

Transmission Strategy and Power Allocation for MIMO-OFDM Broadcast Channels with Power-limited Constraints

Song Fei Wu Qi-hui Pan Chen-kang Wang Jin-long
(Institute of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China)

Abstract: Transmission optimization for Multiple-Input Multiple-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO-OFDM) broadcast channel with power-limited constraints is analyzed in this paper. Applying different optimization rules, two different transmission strategies are proposed. One is Optimal Space Distance Dirty Paper Coding(OSD-DPC), the other is Max Signal to Noise Ratio Dirty Paper Coding (MSNR-DPC). Numerical results show that proposed schemes have the similar performance to the optimal schemes and are capable of improving the system capacity and performance with power-limited constraints.

Key words: MIMO; Dirty paper coding; Broadcast channel; Interference cancellation

1 引言

多输入多输出(MIMO)系统采用多个收发天线, 综合利用时域与空域二维信息, 可以在不增加带宽的情况下, 成倍提高系统的容量^[1, 2]。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)则被认为是对抗多径衰落影响的有效技术。MIMO-OFDM 系统将两种技术相结合^[3], 进一步增强了各自优势, 从而成为新一代移动通信系统最具竞争力优选方案之一。如何应用自适应传输策略调整 MIMO-OFDM 系统中的多维资源, 例如功率、子载波以及用户等等, 从而获得最高的系统容量, 一直是人们关注的问题。文献[4-6]给出了 MIMO 广播信道的理论容量, 文献[7]给出了多用户 OFDM 系统中 C-OFDMA 方案, 各用户独占子载波限制了系统的性能。脏纸编码^[8]通过用户之间的依次预减方法进行干扰避免, 文献[9]提出了一种固定速率的 DPC 方案, 该方案会引入某些质量较差的信道。文献[10]提出了贪婪迫零 DPC 方案。

针对 MIMO OFDM 下行广播链路, 根据不同的优化准则, 本文提出了两种联合脏纸编码的传输策略, 即优化空间距离(OSD)方案和最大化信噪比(MSNR)方案。所提方案根据各用户的信道状态信息, 在发送端进行自适应资源分配及

预编码优化设计, 允许多个用户同时接入一个子载波, 其目标是在总功率受限条件下, 最大化系统容量。

2 系统模型

图 1 为 MIMO 广播信道模型。设基站具有 N_T 个发送天线, 系统中具有 k 个用户, 每个用户具有 N_k 个接收天线, 总发射功率为 P_T , 子载波数为 N 。令 $\Phi_n, n = 1, \dots, N$ 为共享第 n 个子载波的用户集合, 假设用户 k 属于 Φ_n , 则其接收信号为

$$\mathbf{y}_{k,n} = \sum_i \mathbf{H}_{k,n} \mathbf{F}_{i,n} \mathbf{x}_{k,n} + \mathbf{w}_{k,n}, \quad i \in \Phi_n \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k,n} = \text{dec}(\mathbf{D}_{k,n} \mathbf{y}_{k,n}) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{x}_{k,n}, \mathbf{y}_{k,n}, \mathbf{H}_{k,n}, \mathbf{F}_{k,n}, \mathbf{D}_{k,n}, \hat{\mathbf{x}}_{k,n}$ 分别为用户 k 在第 n 个载波上的待传信息符号、接收信号、信道频域响应矩阵、预编码矩阵、译码矩阵和信息符号的估计。预编码矩阵满足 $\text{Tr} \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{F}_{k,n} \mathbf{F}_{k,n}^H \right) \leq P_T$ 。 $\mathbf{w}_{k,n}$ 为循环对称复高斯高斯噪声, 满足 $\mathbf{w}_{k,n} \mathbf{w}_{k,n}^H \sim N(0, \delta^2 \mathbf{I})$ 。

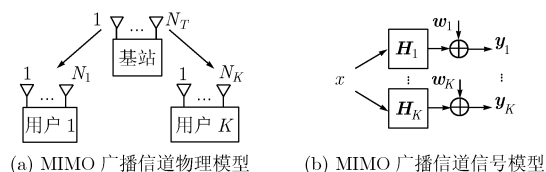


图 1 MIMO 广播信道模型

3 功率约束下的自适应资源分配

3.1 脏纸编码方案

脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)是MIMO系统下行链路最大容量的一种获取策略,如何选择用户最佳的编码顺序是脏纸编码应用的关键。编码顺序一旦确定,则位置靠后的用户不会受到前面用户的干扰。假定 K 个用户的编码顺序为 $(\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(K))$,则经脏纸编码后第 n 个子载波上用户 k 可以达到的传输速率为^[8]

$$R_{\pi(k),n} = \log_2 \frac{\left| \delta^2 \mathbf{I} + \sum_{i=k}^K \mathbf{H}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n}^H \mathbf{H}_{\pi(i),n}^H \right|}{\left| \delta^2 \mathbf{I} + \sum_{i=k+1}^K \mathbf{H}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n}^H \mathbf{H}_{\pi(i),n}^H \right|} = \log_2 \left| \mathbf{I} + \mathbf{B}_{\pi(k),n}^{-1} \mathbf{H}_{\pi(k),n} \mathbf{F}_{\pi(k),n} \mathbf{F}_{\pi(k),n}^H \mathbf{H}_{\pi(k),n}^H \right| \quad (3)$$

其中 $\mathbf{B}_{\pi(k),n} = \delta^2 \mathbf{I} + \sum_{i=k+1}^K \mathbf{H}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n} \mathbf{F}_{\pi(i),n}^H \mathbf{H}_{\pi(i),n}^H$ 。最大化和容量的关键在于如何获得最佳编码矩阵 $\mathbf{F}_{k,n}$,通过对用户信道状态信息的SVD分解以及功率注水策略,可以得到最优矩阵集 $\{\mathbf{F}_{k,n} | k=1, \dots, K, n=1, \dots, N\}$:

$$\mathbf{F}_{k,n} = \mathbf{U}_{k,n} \mathbf{\Delta}_{k,n}^{1/2} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{\Delta}_{k,n} = \text{diag}(P_{k,n,1}, \dots, P_{k,n,L})$, $\mathbf{U}_{k,n}$ 通过对 $\bar{\mathbf{H}}_{k,n} = \mathbf{H}_{k,n}^H \cdot \mathbf{B}_{k,n}^{-1} \mathbf{H}_{k,n}$ 进行SVD分解得到:

$$\bar{\mathbf{H}}_{k,n} = \mathbf{U}_{k,n} \text{diag}(h_{k,n,1}^2, \dots, h_{k,n,L}^2) \mathbf{U}_{k,n}^H \quad (5)$$

其中 $P_{k,n,l}$ 为功率注水后特征子信道中分配的功率值。利用这种最优集作为传输策略的资源分配方案,简称为O-DPC(Optimal DPC)方案。对于特定的子载波而言,在已知最优的用户排序时,其计算复杂度为 $O(K \times p' \times K')$,其中 K 表示SVD分解的次数, p' 为子信道功率注水的次数, K' 为式(4)计算次数,此处 $K' = K$ 。但在DPC之前确定最佳用户排序非常困难,最直接的一种方法是采用穷举搜索法,共有 $K!$ 种可能,相当于对上述方案执行 $K!$ 次,从中选出最大容量对应的用户排序,当用户数较大时,计算复杂度过高。

3.2 最优空间距离(OSD-DPC)方案

由于O-DPC方案复杂度过高,很难实用化。本文采用QR分解,给出了两种次最优方案,来简化最优方案中的用户排序问题。基于最优空间距离的联合脏纸编码方案步骤如下:

(1)确定子信道集合 Q_n 令 $N_m = \min(N_T, N_R)$,对 $\mathbf{H}_{k,n}$ 进行SVD分解。 $\mathbf{H}_{k,n} = \mathbf{U}_{k,n} \mathbf{\Lambda}_{k,n} \mathbf{V}_{k,n}^H$ 。其中 $\mathbf{\Lambda}_{k,n}$ 为对角阵,且 $\mathbf{\Lambda}_{k,n} = \text{diag}(h_{k,n,1}, \dots, h_{k,n,N_m})$,其对角元素为第 n 个子载波上用户 k 的空间特征子信道增益。并不是所有的子信道都将用于传输信息,利用功率注水原理对所有子信道进行功率注水,假设第 n 个子载波上用户 k 的第 l 个特征子信道功率分配的结果为 $P_{k,n,l}$,若 $P_{k,n,l} > 0$,则该子信道属于 Q_n ,假定属于 Q_n 的子载波个数为 N_n 。注意同一个子载波上不同用户之间的子信道存在相互干扰。

(2)对 Q_n 中的子信道进行选择及编码排序 初始时, $S_n = \Phi$, $N_s = \min(N_n, N_m)$ 。

(a)选择第一个用户 $\pi(1) = \arg \max_{k,n,l} h_{k,n,l}^2$, $h_{k,n,l} \in Q_n$ 。 $S = S \cup \{\pi(1)\}$ 。令 $\bar{\mathbf{V}}_n = \mathbf{V}_{\pi(1)}$, $\mathbf{V}_{\pi(1)}$ 为所选的第一个子信道对应的 $\mathbf{V}_{k,n}^T$ 行向量。

(b)选择第 i 个用户

$$\pi(i) = \arg \max_{i,l} h_{i,n,l}^2 \|\mathbf{V}_{i,n,l}^T P(\bar{\mathbf{V}}_n)\|^2 \quad (6)$$

$i \in Q_n \setminus S_n$, 令 $\bar{\mathbf{V}}_n = [\bar{\mathbf{V}}_n^T; \mathbf{V}_{\pi(i)}^T]^T$, $S = S \cup \{\pi(i)\}$ 。

(c)重复步骤(b),直至 N_s 个子信道全部选完。

其中 $A \setminus B$ 为从集合 A 中排除集合 B 。 $P(\mathbf{X})$ 为由矩阵 \mathbf{X} 的行向量张成子空间的正交投影矩阵。 $P(\mathbf{X}) = \mathbf{I} - \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T$, $\|\cdot\|$ 为向量对应的Euclidean范数。上述算法中 $\|\mathbf{V}_{i,n,l}^T P(\bar{\mathbf{V}}_n)\|^2$ 表征了待选子信道与已选子信道张成子空间之间的距离,物理意义上反映了两者之间的相关性,即干扰程度。

(3)干扰消除 令 $\bar{\mathbf{H}}_n$ 为第 n 个子载波上所有选中子信道的初步预编码矩阵, $\bar{\mathbf{H}}_{n,l} = h_{n,\pi(l)} \mathbf{V}_{n,\pi(l)}^T$ 。对 $\bar{\mathbf{H}}_n$ 进行QR分解。 $\bar{\mathbf{H}}_n = \mathbf{G}_n \mathbf{B}_n^H$,其中 \mathbf{G}_n 为一个 $N_s \times N_s$ 的下三角矩阵, \mathbf{B}_n 是一个 $N_T \times N_T$ 的酉矩阵。令 $g_{j,n}$ 为 \mathbf{G}_n 的第 j 个对角元素, $j=1, \dots, N_s$ 。对这些子信道进行功率注水可得 $P_{j,n} = \left(\xi - \frac{\delta^2}{g_{j,n}^2} \right)_+$,其中 ξ 表示注水水位,满足 $\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{N_s} P_{j,n} = P_T$,

$(x)_+ = \max(x, 0)$ 。假定用户 k 有 $L_{k,n}$ 子信道选中,其功率分别为 $P_{k,n,l}$,则 $\mathbf{\Delta}_{k,n} = \text{diag}(P_{k,n,1}, \dots, P_{k,n,L_K})$ 为用户 k 的功率分配矩阵,则其预编码矩阵为

$$\mathbf{F}_{k,n} = \mathbf{B}_{k,n} \mathbf{\Delta}_{k,n}^{1/2} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{B}_{k,n}$ 为用户 k 对应的 $L_{k,n}$ 维列向量。通过预编码矩阵 $\mathbf{F}_{k,n}$,使得当 $k > i$ 时,各用户之间无干扰。

值得注意的是,对于不同的 Φ_n ,用户 k 的编码顺序以及所选中的子信道个数 $L_{k,n}$ 并不一定相同,且 $L_{k,n}$ 最终决定了用户在第 n 个子载波上可传的信息符号数。对于特定的子载波,相对O-DPC方案而言,OSD-DPC方案的计算复杂度只为 $O(K \times p' \times K'' \times K'_1)$,其中前两部分的复杂度与DPC-OFDMA相同, K'' 表示式(6)计算的次数, K'_1 为式(7)计算次数,此处 $K'_1 \leq N_T$ 。OSD-DPC方案主要降低了O-DPC方案用户选择策略的计算复杂度。

3.3 最大化信噪比(MSNR-DPC)方案

从用户 k 的接收信号入手,若不采用DPC,则同一子载波上用户 k 的信号检测问题是一个典型的多用户信号检测问题,检测用户 k 的信号时视其它信号为干扰。引入DPC后,对于用户 k 被选中的子信道只受到排在 k 之前的子信道干扰。在接收端其信噪比为

$$\text{SNR}_{k,n,l} = \frac{h_{i,n,l}^2 P_{i,n,l}}{\delta^2 + \sum_{j=1}^{i-1} \eta_{j,i,n,l} P_{j,n,l} h_{i,n,l}^2} \quad (8)$$

其中 $\eta_{i,n,l}$ 为用户 k 的第 l 个子信道与其余用户被选中中的子信道之间的相关系数, $\eta_{i,n,l} = |V_{k,n,l}^H V_{i,n,l}|$, $P_{k,n,l}$ 为通过注水算法得到的功率。若假定用户 k 有 $L_k \leq N_m$ 个子信道被选中, 则在第 n 个子载波上, 用户 k 可以获得的速率为

$$r_{k,n} = \sum_{l \in Q_n} \log_2(1 + \text{SNR}_{k,n,l}) \quad (9)$$

通过式(9)的最大化来确定 DPC 用户编码顺序。由于 MSNR-DPC 方案与 OSD-DPC 方案的第一步及最后一步完全相同, 因此在此只给出 MSNR-BF-DPC 方案的用户排序算法。

(1)初始化 $S_n = \Phi$, $N_s = \min(N_n, N_m)$ 。

(2)选择第 1 个用户 $\pi(1) = \arg \max_{l \in Q_n} \frac{h_{k,n,l}^2 P_{k,n,l}}{\delta^2}$, $S = S \cup \{\pi(1)\}$ 。

(3)选择第 i 个用户 $\pi(i) = \arg \max_{l \in Q_n \setminus S} \text{SNR}_{k,n,l}$, $S = S \cup \{\pi(i)\}$ 。

(4)重复步骤 3, 直至 N_s 个子信道全部选完。

对于特定的子载波, MSNR-DPC 方案的计算复杂度只为 $O(K \times p' \times K_1'' \times K_2')$, 其中前两部分的复杂度与 DPC-OFDMA 相同, K_1'' 表示式(8)计算的次数, K_2' 为式(7)计算次数, 此处 $K_2' \leq N_T$ 。从分析中可以看出, 所提两种方案的计算复杂度区别在于式(6)与式(8)的计算复杂度不同。MSNR-DPC 方案避免了矩阵投影以及范数的计算, 仅仅需要完成内积运算, 相对于 OSD-DPC 方案其计算复杂度更低。

4 仿真结果与分析

考虑一个多用户 MIMO-OFDM 系统, 用户数为 80, 带宽为 5MHz, 子载波数为 128, 基站具有 4 根发射天线, 各用户均配有 4 根接收天线。接收天线之间衰落非相关, MIMO 信道的相关性取决于发送端的发射角。仿真时, 功率延迟剖面为 GSM6 径简化模型, 发射角扩散为 20° , 均方根时延扩散为 1000ns, 信噪比 SNR 为 20dB。虽然 O-DPC 方案因其高复杂度, 在实际中是不可行的, 但可以提供和速率所能达到的理论上限。

仿真图分别给出了不同SNR、用户数、RMS时延扩散以及不同天线数下, 各传输策略的和速率性能比较。从图中可以看出所提出的两种方案的性能要远远优于传统的C-OFDMA方案, 并能很好地逼近O-DPC方案所能达到的理论上限, 而OSD-DPC方案的性能要略优于MSNR-DPC方案。从图2中可以看出在高信噪比情况下, OSD-DPC与MSNR-DPC两种方案的性能要远远优于C-OFDMA方案的性能, 但在低信噪比情况下, 性能比较接近。随着SNR的提高, 可以有更高的功率分配给质量较好的子信道, 因此各方案的性能都将得到提高。

从图3中可以看出随着用户数的增加, 各方案所获得的性能增益非常小, 这主要是因为当用户数较大时, 多用户分集所能带来的性能增益逐渐变小。由于C-OFDMA方案只能

从单用户获得增益, 而OSD-DPC与MSNR-BF-DPC方案均可从多用户获得增益, 因此两者的性能要优于C-OFDMA方案的性能。OSD-DPC与MSNR-BF-DPC方案所能提供的增益取决于允许多少个用户共享同一子载波。从图4中可以看出, 随着均方根(RMS)时延扩散的增加, 各方案的性能都将得到提高, 这主要是因为大的RMS时延扩散可以降低信道空域和频域上的相关性, 这样可以减少各子信道之间的干扰。从图5中可以看出, 各方案的性能随着收发天线数的增加显著提高。由于限定具有最好信道条件的用户独占子载波, 因此当收发天线数增加时, C-OFDMA方案性能的提升比较慢。

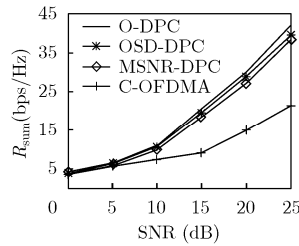


图2 不同SNR下性能比较

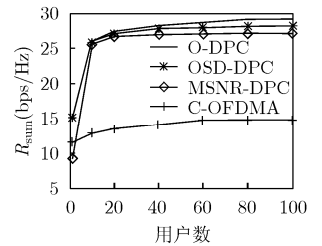


图3 不同用户数下性能比较

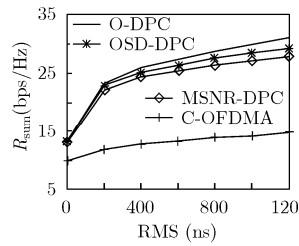


图4 不同RMS时延扩散下性能比较

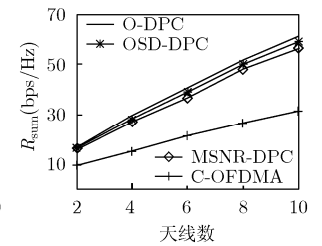


图5 不同天线数下性能比较

5 结束语

本文通过对MIMO-OFDM系统下行广播信道传输优化问题的分析, 结合不同的优化准则, 给出了功率约束下两种不同的传输策略, OSD-DPC方案与MSNR-DPC方案。两种方案有效地解决了最优方案(O-DPC)中用户脏纸编码排序复杂度过高以及传统C-OFDMA方案所能提供的多用户分集增益有限的问题。数据仿真结果表明, 在功率约束条件下, 所提出的两种方案的性能要远远优于C-OFDMA方案, 并能逼近O-DPC方案。

参考文献

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Trans on Telecommunication*, 1999, 10(6): 585-595.
- [2] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communication*, 1998, 6(3): 311-335.
- [3] Stüber L, Barry R, Mclaughlin W, Li Ye, and Pratt G. Broadband MIMO-OFDM wireless communications. In

- Proceedings of the IEEE, 2004: 271-294.
- [4] Sato H. An outer bound on the capacity region of broadcast channel. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1978, IT-24(5): 374-377.
- [5] Viwanath P and Tse D. Sum capacity of the multiple antenna Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, submitted for publication.
- [6] Gaire G and Shamai S. On the achievable throughput of a multi-antenna Gaussian broadcast channel. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2003, 49(7): 1691-1706.
- [7] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, and Murch R D. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [8] Costa M H M. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1983, IT-29(3): 439-441.
- [9] sTu Zhenyu and Rick S Blum. Multiuser diversity for a dirty paper approach. *IEEE Comm. Letters*, 2003, 7(8): 370-372.
- [10] Chengkang Pan, Yueming Cai, and Youyun Xu. On the downlink transmission strategies for MIMO-OFDM systems. *IEICE Trans. on Communication*, 2006, E89-B(3): 837-844.
- 宋 绯: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 系统中均衡、资源分配等.
- 吴启晖: 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为短波通信、数字信号处理、移动通信、软件无线电等.
- 潘成康: 男, 1978 年生, 博士, 主要研究方向为 MIMO 系统容量分析、传输策略等.
- 王金龙: 男, 1963 年生, 解放军理工大学首席教授, 博士生导师, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员, 研究方向为短波通信、数字通信、数字信号处理、移动通信、软件无线电等.