

多用户MISO系统中的最优机会多波束技术

侯卫民, 苏佳, 王静

(河北科技大学信息工程学院 石家庄 050026)

【摘要】机会波束技术通过形成随机波束达到了与信道奇异值分解相同的吞吐量,不需要准确地信道状态信息,反馈量少。在正交波束提供的复用增益与各波束间的干扰间折衷而需要最优的发射波束数,为了获得不同情况下的最优波束个数,该文采用数值分析的方法,分析了多用户多输入单输出机会波束系统中选择不同发射波束个数时的容量,通过比较不同波束个数时系统的容量,得到最优发射波束个数。结果表明,最佳波束的个数随用户数增加而加大,随平均信噪比增加而下降。

关键词 波束选择; 多输入单输出系统; 机会波束; 系统容量

中图分类号 TN911.4

文献标识码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.005

Opportunistic Multi-Beamforming in Multiuser MISO System

HOU Wei-min, SU Jia, and WANG Jin

(Institute of Information Science&Engineering, Hebei University of Science and Technology Shijiazhuang 050026)

Abstract The opportunistic beamforming system can achieve the same throughput with channel singular value decomposition, and doesn't need perfect channel-state information. Opportunistic multi-beamforming improve system throughput by transmitting orthogonal beam, when increasing transmit beam number, the space-reuse gain will improve and the interference between beams will increase, which is contradict. To obtain the optimum number of transmitting beams, the paper analyze the throughput of MISO opportunistic beamforming system's capacity when adopt different number of transmitting beams. The results show that the optimum transmitting beam number is increased with users number, decreased with the average SNR.

Key words beam selection; multi-input single-output(MISO); opportunistic beamforming; system capacity

多天线技术充分利用了空间资源,能有效对抗无线信道的衰落,提高频谱利用率和容量,是下一代无线通信的关键技术。智能天线技术通过在有用信号方向形成波束,有效地减少用户间干扰,成功地应用于TD-SCDMA系统中,但它需要精确知道信号方位角,计算复杂度高。多用户分集技术利用信道的随机衰落,调度处于最佳信道状态的用户进行传输,获得分集增益,但受限于信道变化的范围和速度,信道的波动范围大,分集增益才大。2002年首次提出了机会波束(opportunistic beamforming, OBF)的概念,即多个天线采用波束成形模式进行信息传输,天线加权系数独立随机产生,且每个时隙天线加权系数进行更新。OBF技术通过在发射端随机形成正交波束,解决了信道波动范围小的问题,同时不需要反馈完整的信道状态信息,用户只需反馈接收信干噪比(SINR),就能显著提高系统吞吐量,

得到了广泛的关注^[1-4]。

波束单机会形成技术通过始终与接收信噪比(SNR)最大的用户通信提高了吞吐量,在用户数较大时接近于相干波束的吞吐量^[5],但未完全利用多天线提高的空间复用度。正交多波束传输技术通过同时发射正交波束提供了多个独立信号输出路径增加了吞吐量。机会多波束(opportunistic multi-beamforming, OMB)每个时隙形成彼此正交的多个波束,利用多个独立传输路径提高了吞吐量^[6-7]。文献[8]分析了使用全波束时多用户MISO(multi-input single-output)系统的近似容量,得到使用全波束时4根发射天线最为合理。由于增加波束带来的空间复用增益与干扰加大的矛盾,存在一个使容量最大的最优发射波束子集,文献[9-10]分析了不同的波束子集选择方式:逐步增加波束、逐步减少波束以及贪婪的波束选择方式。在不确定最优波束个数时,

子集有多种选择方式,要逐一分析得到最优子集是一个复杂的过程。

为了解决该问题,本文研究了多用户MISO系统中机会多波束的吞吐量,通过数值分析得到了在不同信噪比及用户个数时的最优波束个数,从而指导波束子集选择,简化选择过程。

1 系统模型

考虑下行链路无线通信,基站有 M 个发射天线,可形成 M 个正交波束,存在 $K(K \geq M)$ 个接收端单天线用户。系统结构如图1所示。

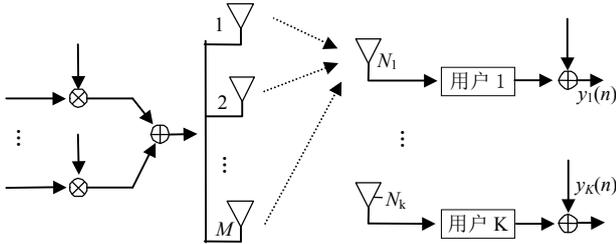


图1 多用户MISO系统

基站设置 M 个发射天线,通过正交波束发送不同的信息,提本文中假设使用 M 个波束的子集来发送信息,选择 $B(B \leq M)$ 个正交波束。令 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_B]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为不同波束发送的信息, $\Phi=[\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_B] \in \mathbb{C}^{M \times B}$ 为酉矩阵,其元素 Φ_b 为第 b 个发射波束。那么第 i 个用户的接收信号为:

$$y_i = \sqrt{\frac{\rho}{B}} \sum_{b=1}^B \mathbf{H}_i \Phi_b x_b + w_i = \sqrt{\frac{\rho}{B}} \mathbf{H}_i \Phi_b x_b + \sqrt{\frac{\rho}{B}} \sum_{j=1, j \neq b}^B \mathbf{H}_i \Phi_j x_j + w_i \quad (1)$$

式中, ρ 为平均接收信噪比; $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 为第 i 个用户的信道矩阵,本文设为块衰落,即一帧内信道保持不变,各帧独立变化。信道元素为零均值单位方差的独立同分布(I.I.D)的复高斯随机变量; $w_i \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 为零均值单位方差的加性高斯噪声。式(1)中第一项为用户 i 的有用信息,第二项为其他波束的干扰。可以看出,随着机会波束中正交多波束个数的增加,干扰会增多,干扰加大,因而希望通过容量分析得到最佳的发射波束个数。

2 正交多波束系统容量

通过式(1)中的有用信号和干扰信号项可以得到用户 i 对于波束 b 的接收SINR为:

$$\text{SINR}_{i,b} = \frac{|\mathbf{H}_i \Phi_b|^2}{B/\rho + \sum_{k=1, k \neq b}^B |\mathbf{H}_i \Phi_k|^2} \triangleq \frac{z}{B/\rho + y} \quad (2)$$

由于信道矩阵元素为 $\text{CN}(0,1)$ 的复高斯随机变量,且 Φ_b 服从等方性,因而随机变量 z 、 y 分别服从自由度为2和 $(2B-2)$ 的 χ^2 分布,即:

$$\begin{cases} f_z(z) = e^{-z} \\ f_y(y) = \frac{y^{M-2} e^{-y}}{(M-2)!} \end{cases} \quad (3)$$

SINR的概率密度函数与累积分布函数分别为:

$$f_{\text{SINR}}(x) = \int_0^\infty \left(\frac{B}{\rho} + y \right) f_{yz}(y, yz) dy = \int_0^\infty \left(\frac{B}{\rho} + y \right) e^{-\left(\frac{B}{\rho} + y\right)x} \cdot \frac{y^{B-2} e^{-y}}{(B-2)!} dy = (1+x)^{-B} e^{-\frac{B}{\rho}x} \left(\frac{B}{\rho}(1+x) + B-1 \right) \quad (4)$$

$$F_{\text{SINR}}(x) = 1 - (1+x)^{-(B-1)} e^{-Bx/\rho} \quad (5)$$

其中,式(4)是根据 $B! = \int_0^\infty y^B e^{-y} dy$ 化简得到。

2.1 多用户机会波束中多波束选择的容量

本文挑选波束的策略是从可以发送的 M 个正交波束中选择前 B 个SINR最大的波束-用户对进行通信。设最大的信噪比为 $\Gamma_1 \geq \Gamma_2 \geq \dots \geq \Gamma_B$ 。

Γ_1 可以从 KM 个独立的SINR中选出最大值,故其累积分布函数为:

$$F_{\Gamma_1}(x) = F_{\text{SINR}}(x)^{KM} = \left[1 - \frac{e^{-Bx/\rho}}{(1+x)^{B-1}} \right]^{KM} \quad (6)$$

求导,得概率密度函数:

$$f_{\Gamma_1}(x) = KM \left[1 - \frac{e^{-Bx/\rho}}{(1+x)^{B-1}} \right]^{KM-1} f_{\text{SINR}}(x) \quad (7)$$

同样得到第 b 个最大值的分布函数。由于不能重复使用波束-用户对,故第 b 个最大值需要在剩下的波束及用户中选择,即在 $(K-b)(M-b)$ 个值中寻求最大值,其CDF与pdf分别为:

$$F_{\Gamma_b}(x) = F_{\text{SINR}}(x)^{(K-b+1)(M-b+1)-1} = \left[1 - \frac{e^{-Bx/\rho}}{(1+x)^{B-1}} \right]^{(K-b+1)(M-b+1)-1} \quad (8)$$

$$f_{\Gamma_b}(x) = (K-b+1)(M-b+1) \times$$

$$\left[1 - \frac{e^{-Bx/\rho}}{(1+x)^{B-1}} \right]^{(K-b+1)(M-b+1)-2} f_{\text{SINR}}(x) \quad (9)$$

分析第 b 个信干噪比的概率密度函数,可以看到,相对于原始的信干噪比 $f_{\text{SINR}}(x)$,采用机会波束后的增益即衰减包括3部分: $(K-b+1)$ 多用户分集增益、 $(M-b+1)$ 多波束空间复用增益和

$\left[1 - \frac{e^{-Bx/\rho}}{(1+x)^{B-1}}\right]^{-(K-b+1)(M-b+1)-1} < 1$ 为波束间的干扰造成的衰减。

分析衰落信道多用户MISO系统的容量, 对 B 个最大信干噪比的概率密度函数求统计平均, 得:

$$C = \sum_{b=1}^B \int_0^\infty \lg(1+x) f_{\Gamma_b}(x) dx = \sum_{b=1}^B \int_0^\infty \lg(1+x) f_{\text{SINR}}(x) a_b F_{\text{SINR}}(x)^{a_b-1} dx = \sum_{b=1}^B \sum_{k=0}^{a_b-1} (-1)^k \binom{a_b-1}{k} a_b \times \int_0^\infty \lg(1+x) \frac{B/\rho(1+x) + B-1}{(1+x)^B} \frac{e^{-B(k+1)x/\rho}}{(1+x)^{k(B-1)}} dx \quad (10)$$

其中, $a_b=(K-b+1)(M-b+1)$ 为第 b 个最大值时可供选择的独立SINR个数。从式(10)可以看出, 系统变量容量包含对数函数, 指数函数及有理多项式, 无法得到闭合的表达式, 故首先分集公式分析极限情况, 再通过数值仿真得到不同情况下的最优发射波束个数。

2.2 特殊情况分析

当平均接收信噪比 ρ 趋于零时, 此时用户接收端信干噪比为:

$$\text{SINR}_{i,b} = \frac{|H_i \Phi_b|^2}{B/\rho + \sum_{k=1, k \neq b}^B |H_i \Phi_k|^2} \quad \underline{\underline{\rho \rightarrow 0}} \frac{\rho}{B} |H_i \Phi_b|^2 \quad (11)$$

此时容量为:

$$C = \sum_{b=1}^B \int_0^\infty \lg(1+x) \frac{a_b}{\rho} B e^{-\frac{B}{\rho}x} dx \quad (12)$$

假设 B 为连续值, 容量关于波束个数 B 的导数为:

$$\frac{dC}{dB} = \sum_{b=1}^B \int_0^\infty \lg(1+x) \frac{a_b}{\rho} \left(1 + \frac{Bx}{\rho}\right) e^{-\frac{B}{\rho}x} dx > 0 \quad (13)$$

因为容量是关于波束个数的单调递增函数, 此时最佳波束个数 $B=M$ 。

当平均接收信噪比无限大时, 根据式(1)可知,

此时系统中噪声相对于干扰 $\sqrt{\frac{\rho}{B}} \sum_{j=1, j \neq b}^B H_i \Phi_j x_j$ 很小,

为干扰受限系统, 此时只采用一个波束时, 系统中的所有功率都可以用来传输有用信息, 因而其容量趋于无限, 故此时采用一个波束传输最佳。

3 数值分析

现通过数值仿真说明不同情况波束个数的选择。图1~图3分别给出了发射端为6根天线, 在平均信噪比为10、0、20 dB时的系统吞吐量曲线。

综合这3幅图, 首先分析系统吞吐量与用户个数之间的关系, 可以看到, 在任何平均信噪比下, 多波束的吞吐量都随着用户数的增加而增加, 增加的速率变慢。在平均信噪比为10 dB时, 用户数需要达到7 000个, 6个发射波束的系统吞吐量才开始优于其他发射波束个数的情况。而且从图1和图2可以看出, 6个波束达到最优时带来的吞吐量增益很小, 仅为0.1 bps/Hz, 远小于系统增加用户带来的复杂度。比较100个用户时, 3种信噪比下的最优发射波束个数, 当 ρ 为0 dB时, 最优发射波束为5个; 当 ρ 为10 dB时, 最优发射波束为4个; 当 ρ 为20 dB时, 最优发射波束为2个。说明随着平均信噪比的加大, 最优发射波束个数减少。

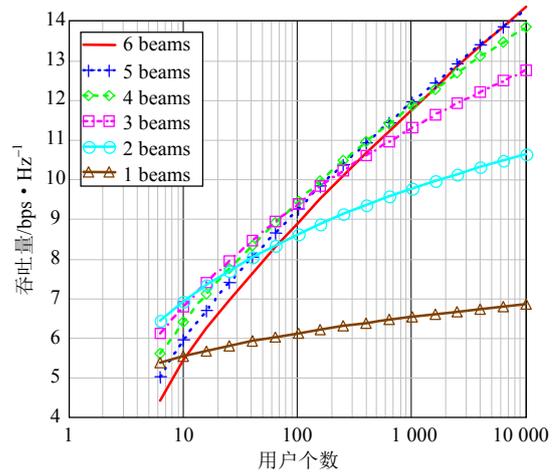


图1 6阵元, 不同发射波束下的吞吐量(平均信噪比为10 dB)

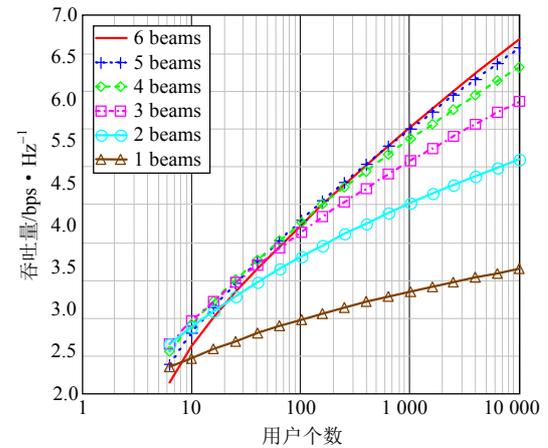


图2 6阵元, 不同发射波束下的吞吐量(平均信噪比为0 dB)

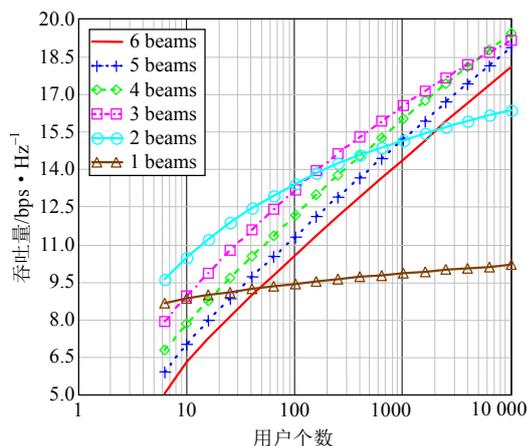


图3 6阵元,不同发射波束下的吞吐量(平均信噪比为20 dB)

表1 最优波束个数与平均信噪比下用户数的关系

平均信噪比/dB	最佳波束个数				
	2	3	4	5	6
0	7~8	7~15	15~100	100~500	500~
10	7~15	15~60	60~700	700~7×10 ³	7×10 ³ ~
20	7~150	250~4×10 ³	4×10 ³ ~10 ⁴		

表1总结了针对不同用户数和平均SNR时的最优波束个数。应用时可根据实际情况对波束个数做出选择,而且在实际中用户数目一般都在几十个,从表可以看出,选取2或3个波束时最好。

图4给出了平均SNR分别为0 dB、10 dB时,3至6根发射天线中选择2个发射波束时系统吞吐量与用户数的关系。可以看出天线由3个增加到4个时获得的容量增益较明显,随着天线个数增加获得的增益也逐步减少,因而可根据实际在增加天线付出的代价与获得增益之间取均衡。

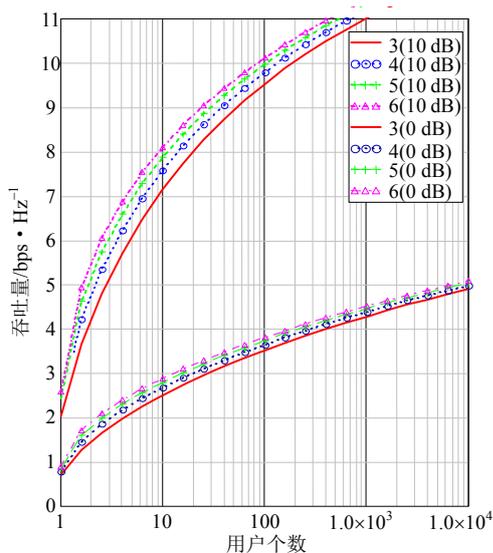


图4 2个发射波束OBS中增加发射天线数对容量的影响

4 结束语

本文分析了多用户MISO系统中机会多波束形成技术,通过容量公式及数值结果分析,总结了在不同情况下的最佳的多波束个数,结果表明最佳波束的个数随用户数增而加大,随平均信噪比增加而下降。并且通过分析得出在一般情况下,选取2~3个发射波束会时最合适的。

参考文献

- [1] VISWANATH P, TSE D N C, LAROIA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [2] 苏佳,张曙. 机会波束中的发射波束自适应截断[J]. 高技术通讯, 2011, 21(2): 132-136.
SU Jia, ZHANG Shu. Adaptive truncating of transmitting beams in opportunistic beamforming[J]. China High Technology Letters, 2010, 21(2): 132-136.
- [3] 苏佳,张曙. 询问反馈策略下的门限截断机会波束系统[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 72-77.
SU Jia, ZHANG Shu. A threshold truncated opportunistic beamforming system under inquiring feedback strategy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8): 72-77.
- [4] SHARMA N, OZAROW L H. A study of opportunism for multiple-antenna systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(5): 1804-1814.
- [5] SHARIF M, HASSIBI B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(2): 506-522.
- [6] 吴杏芬,宋荣方. 多波束机会波束成形系统性能比较. 南京邮电大学学报(自然科学版)[J]. 2008, 28(6): 30-33.
WU Xing-fen, SONG Rong-fang. Performance comparison of multi-beam opportunistic beamforming system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2008, 28(6): 30-33.
- [7] IL-MIN K, SEUNG-CHUL H, GHASSEMZADEH S, et al. Opportunistic beamforming based on multiple weighting vectors[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2005, 4(6): 2683-2687.
- [8] MINGHUA X, YUANPING Z, HA J. Opportunistic beamforming communication with throughput analysis using asymptotic approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular technology, 2009, 58(5): 2608-2614.
- [9] VICARIO J, BOSISIO L R, ANTON-HARO C. Beam selection strategies for orthogonal random beamforming in sparse networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3385-3396.
- [10] Vicario J, BOSISIO L R, Spagnolini U. Adaptive beam selection techniques for opportunistic beamforming[C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on International Symposium on. NJ, USA: IEEE, 2006.

编辑 税红