

询问反馈策略下的门限截断机会波束系统

苏佳, 张曙

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对目前多用户多输入单输出机会波束中存在的用户数和反馈量过多的问题,提出了一种询问反馈策略下的门限截断机会波束系统——询问截断机会波束. 以吞吐量最大化为原则设定截断门限,用户只有被基站询问且接收信干噪比大于系统截断门限时才进行反馈,一旦基站接收到反馈信息就停止对相应波束的询问,并分配给相应用户,重复此过程直到完成所有波束的分配. 若某一发射波束在询问所有用户后仍未有反馈,则截断此波束发射. 相对于传统机会波束系统,询问截断机会波束能够优选发射波束,降低反馈量. 在瑞利衰落信道中对系统性能进行分析和仿真,并与传统机会波束比较,结果表明合理设置截断门限能将反馈量降低到1%以下,并将用户较少时的吞吐量提高了约1.2 b/(s·Hz).

关键词: 截断门限;系统容量;机会波束;多输入单输出

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0072-06

A Threshold Truncated Opportunistic Beamforming System under Inquiring Feedback Strategy

SU Jia, ZHANG Shu

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problem that there are too many users and feedbacks in multi-user multiple-input single-output opportunistic beamforming (OBF) system, a threshold truncated OBF under inquiring feedback strategy (TTOBF-IF) is proposed. A truncating threshold is set based on maximizing the throughput. The user will feed back only when inquired and the ratio of the receiving signal to interference and noise is larger than the pre-set truncating threshold. Once the base station receives feedback information, it will stop inquiring the corresponding beam, and allocate the beam to the corresponding user. Repeat the process until the allocation of beams is completed. If a transmitting beam has no feedback after inquiring all users, it will be truncated. The TTOBF-IF can optimally select transmitting beams and reduce feedbacks. Analysis and simulations in the Rayleigh fading channel and comparisons with the OBF show that through setting threshold reasonably, TTOBF-IF reduces the feedbacks to 1%, and increases the throughput by 1.2 b/(s·Hz) when the number of users is less.

Keywords: truncating threshold; system capacity; opportunistic beamforming; multiple-input single-output

多天线技术能够有效对抗无线信道衰落,提高频谱效率和容量,是下一代无线通信的关键技术. 现有理论表明,在多天线系统中采用脏纸编码技术可

以达到信道容量,但要求发射端知道完整的信道状态信息,复杂度高,难于实现. 机会波束(OBF)技术^[1-4]不需完整的信道状态信息,只需根据接收信噪

比(SNR)或信干噪比(SINR)调度信道处于峰值状态的用户,利用多用户分集提高系统吞吐量,但所需用户数较多。为此, Kim 等人^[5]提出了导频微时隙方案。为了进一步提高吞吐量,文献^[6]不仅在导频阶段采用微时隙,数据阶段也采用多波束机制。虽然正交发射波束形成多个传输路径,提高了空间利用率,但同时也会带来波束间干扰,因而发射波束个数越多并不一定能使系统容量越大,而是存在最佳发射波束。文献^[7-9]提出了几种波束选择方式,其中最优选择法能得到最佳发射波束,但要进行全局搜索,过于复杂,其他几种方法只能在一定程度减小搜索范围,仍需迭代,都不现实。此外,即使只反馈 SNR(或 SINR),所有用户的反馈仍会占用大量资源,降低了通信系统的效率。

针对机会多波束中存在的这 2 个问题,本文提出了询问反馈策略下的门限截断机会波束技术(Threshold Truncated OBF under Inquiring Feedback strategy, TTOBF-IF)。思路一是改变用户主动向基站反馈的机制,采用随机询问用户要求反馈的策略,用户只有在被基站询问且信干噪比大于设定门限时,才向基站反馈。思路二是若某个波束对所有用户的信干噪比都低于设定门限,意味着此波束不仅对复用增益贡献极小,还会对其他波束形成干扰,因而截断此波束发射,同时将功率资源重新分配^[10],优化发射波束。通过分析询问反馈策略下的门限截断机会波束系统的信干噪比分布、吞吐量及反馈量,证明了本文方法能够有效降低反馈量,并提高用户数较少时的系统吞吐量。

1 系统模型

询问反馈策略下的门限截断机会波束系统可分为 2 部分,基站采用机会多波束模式,接收端采用带有门限的询问反馈机制。基站配置 M 个发射天线,系统中共有 K ($K \geq M$) 个单天线接收的用户,考虑下行链路的通信性能,系统的结构如图 1 所示。

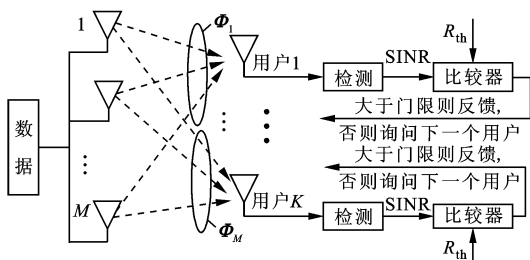


图1 随机询问策略下的门限截断机会波束系统

基站在每个时隙随机产生 M 个正交发射波束,

用户计算相应的信干噪比并存储。基站随机询问某个用户信干噪比,若此用户对于某一波束的接收信干噪比大于预先设定的系统截断门限 R_{th} ,则向基站反馈波束序号及信干噪比值,若低于 R_{th} ,则不反馈;不被询问的用户无反馈权。基站在规定时间内未接收到反馈信息便询问下一个用户,重复此过程直到发射波束均找到合适的通信用户。若某一发射波束在询问所有用户后仍未有反馈,截断此波束发射。

2 TTOBF-IF 系统性能分析

在瑞利块衰落信道中分析 TTOBF-IF 系统的性能。瑞利块衰落即在一帧内信道状态保持不变,各帧之间信道衰落独立,且服从瑞利分布。

2.1 训练序列阶段

训练序列阶段基站天线同时产生 M 个正交波束, $\Phi = [\Phi_1, \dots, \Phi_b, \dots, \Phi_M] \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为酉矩阵,其元素 Φ_b 为第 b 个发射波束的天线加权矢量, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为不同波束传输的信息,且 $|x_b|^2 = 1$ 。第 i 个用户的接收信号为

$$y_i = (\rho/M)^{1/2} \mathbf{H}_i \Phi \mathbf{x} + \omega_i = (\rho/M)^{1/2} (\mathbf{H}_i \Phi_b x_b + \sum_{j=1, j \neq b}^M \mathbf{H}_i \Phi_j x_j) + \omega_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 为第 i 个用户的信道矩阵,其元素为独立同分布的 0 均值、单位方差的复高斯随机变量; ρ 为所有用户的平均接收信噪比; ω_i 为 0 均值、单位方差的加性高斯噪声。

发射波束 Φ 为酉矩阵, $\Phi_b \Phi_j = 0, \forall j \neq b$,但由于发射波束随机产生,不能保证与信道矩阵完全匹配,即 $\mathbf{H}_i \Phi_j \neq 0$,因而产生了波束间干扰。若波束 b 传输用户 i 的信息,则式(1)中括号内第 1 项为用户 i 接收的有用信息,第 2 项为其他波束对用户 i 的干扰。用户 i 的接收信干噪比 $\gamma_{i,b}$ 为

$$\gamma_{i,b} = \frac{|(\rho/M)^{1/2} \mathbf{H}_i \Phi_b x_b|^2}{1 + \sum_{j=1, j \neq b}^M |(\rho/M)^{1/2} \mathbf{H}_i \Phi_j x_j|^2} = \frac{|\mathbf{H}_i \Phi_b|^2}{M/\rho + \sum_{j=1, j \neq b}^M |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2} \triangleq \frac{z}{M/\rho + y} \quad (2)$$

式中: $z = |\mathbf{H}_i \Phi_b|^2$ 表示用户 i 对于波束 b 的接收信号功率; $y = \sum_{j=1, j \neq b}^M |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2$ 表示其他波束对用户 i 的干扰功率。由式(2)可以看出,随着正交多波束个数的增加,干扰项增多,噪声 M/ρ 也增大,信干噪比降低,因而需要综合考虑干扰与空间复用,在增大空间利用率的同时将干扰控制在合理的范围。本文采

用询问反馈策略下的门限截断技术来优选发射波束和通信用户。

首先分析系统用户端状态。由于信道矩阵元素为服从 $(0, 1)$ 分布的复高斯随机变量,发射波束为酉矩阵,因而 z, y 分别服从自由度为2和 $(2M-2)$ 的 χ^2 分布, z 和 y 的概率密度函数分别为

$$f_z(z) = \exp(-z); f_y(y) = \frac{y^{M-2} \exp(-y)}{(M-2)!} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3),可得任意用户接收信干噪比 γ 的概率密度函数和累积分布函数分别为

$$\begin{aligned} f_\gamma(\gamma) &= \int_0^\infty f_{\gamma|y}(\gamma|y) f_y(y) dy = \\ &= \int_0^\infty \left(\frac{M}{\rho} + y\right) \exp\left(-\left(\frac{M}{\rho} + y\right)\gamma\right) \frac{y^{M-2} \exp(-y)}{(M-2)!} dy = \\ &= (1+\gamma)^{-M} \exp\left(-\frac{M}{\rho}\gamma\right) \left(\frac{M(1+\gamma)}{\rho} + M-1\right) \quad (4) \\ F_\gamma(\gamma) &= 1 - (1+\gamma)^{-(M-1)} \exp(-M\gamma/\rho) \quad (5) \end{aligned}$$

基站随机询问的用户依次记作1, 2, ..., K. 对于波束 b ,只要被询问的用户接收信干噪比大于预先设定的截断门限 R_{th} ,就向基站反馈,并确定与该波束通信。在这种情况下,反馈的信干噪比 γ_F 为

$$\left. \begin{aligned} \gamma_F &= \gamma_{1,b}, & R_{th} < \gamma_{1,b} \\ \gamma_F &= \gamma_{2,b}, & (R_{th} < \gamma_{2,b}) \cap (\gamma_{1,b} < R_{th}) \\ &\vdots & \vdots \\ \gamma_F &= \gamma_{K,b}, & (R_{th} < \gamma_{K,b}) \cap (\gamma_{1,b} < R_{th}) \cap \dots \\ && \cap (\gamma_{K-1,b} < R_{th}) \\ \gamma_F &= 0, & \gamma_{i,b} < R_{th}, i \in 1, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\gamma_F=0$ 表示波束被截断,即所有用户对波束 b 的信干噪比 $\gamma_{i,b}$ 均小于 R_{th} ,其概率为

$$P_{th} = (F_\gamma(R_{th}))^K \quad (7)$$

根据式(6)和(7)得到反馈信干噪比 γ_F 的累积分布函数和概率密度函数分别为

$$\begin{aligned} F_{\gamma_F}(\gamma_F) &= P\{R_{th} < \gamma_{1,b} \leq \gamma_F\} + \\ &P\{R_{th} < \gamma_{2,b} \leq \gamma_F\} P\{\gamma_{1,b} < R_{th}\} + \dots + \\ &P\{R_{th} < \gamma_{K,b} \leq \gamma_F\} P\{\gamma_{K-1,b} < R_{th}\} \dots P\{\gamma_{1,b} < R_{th}\} + P_{th} = \\ &[F_\gamma(\gamma_F) - F_\gamma(R_{th})] \frac{1 - (F_\gamma(R_{th}))^K}{1 - F_\gamma(R_{th})} + \\ &(F_\gamma(R_{th}))^K \quad (8) \end{aligned}$$

$$f_{\gamma_F}(\gamma_F) = \frac{dF_{\gamma_F}(\gamma_F)}{d\gamma_F} = f_\gamma(\gamma_F) \frac{1 - (F_\gamma(R_{th}))^K}{1 - F_\gamma(R_{th})} \quad (9)$$

2.2 正式通信阶段信干噪比分析

训练序列阶段结束后存在2种情况:一是基站没收到反馈信息,即所有波束接收信干噪比均低于门限值,此时改变随机发射波束回到训练序列阶段,其概率为 $P_T = P_{th}^M$;二是存在合适的用户,进入正式通信阶段。由于可能存在被截断的发射波束,减小了波束间干扰,因而正式通信时的信干噪比不低于训练序列阶段的反馈值。假设经过波束优选后存在 $B(1 \leq B \leq M)$ 个通信波束,若波束 b 选定用户 i 通信,则正式通信时的信干噪比为

$$\gamma_C = \frac{(\rho/B)^{1/2} \mathbf{H}_i \Phi_b x_b|^2}{1 + \sum_{j=1, j \neq b}^B |(\rho/B)^{1/2} \mathbf{H}_i \Phi_j x_j|^2} = \frac{|\mathbf{H}_i \Phi_b|^2}{B/\rho + \sum_{j=1, j \neq b}^B |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2} \quad (10)$$

因而正式通信阶段选定用户的信干噪比增益为

$$\frac{\gamma_C}{\gamma_F} = \frac{M + \rho \sum_{j=1, j \neq b}^M |\mathbf{H}_i \Phi_b|^2}{B + \rho \sum_{j=1, j \neq b}^B |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2}, \quad M \geq B \geq 1 \quad (11)$$

若令随机变量 $A_1 = \sum_{j=1, j \neq b}^M |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2, A_2 = \sum_{j=1, j \neq b}^B |\mathbf{H}_i \Phi_j|^2$,显然恒有 $A_1 \geq A_2$ 。根据式(3)的 χ^2 分布,可得 A_1, A_2 的均值为

$$\bar{A}_1 = M-1; \quad \bar{A}_2 = B-1 \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),得到截断后信干噪比增益的统计均值为

$$E\left[\frac{\gamma_C}{\gamma_F}\right] = \frac{M + \rho(M-1)}{B + \rho(B-1)} = \frac{1 + \rho - \rho/M}{[1 - (F_\gamma(R_{th}))^K](1 + \rho) - \rho/M} \triangleq \frac{1}{\lambda} \quad (13)$$

将 $E[\gamma_F/\gamma_C]$ 定义为 λ ,则正式通信阶段信干噪比 γ_C 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_C}(\gamma_C) = \lambda f_{\gamma_F}(\lambda \gamma_C) = \lambda f_\gamma(\lambda \gamma_C) \frac{1 - (F_\gamma(R_{th}))^K}{1 - F_\gamma(R_{th})} \quad (14)$$

询问反馈策略下门限截断技术带来的信干噪比增益由两方面产生:一是设定截断门限,使通信信干噪比得到一定保证;二是通过截断状态差的发射波束,减少了用户间干扰。根据 γ_C 的概率密度函数,可以得到询问反馈策略下的门限截断机会波束系统的容量为

$$C = M \int_{R_{th}}^{\infty} \text{lb}(1 + \gamma_c) f_{\gamma_c}(\gamma_c) d\gamma_c =$$
$$M \lambda \frac{1 - (F_{\gamma}(R_{th}))^K}{1 - F_{\gamma}(R_{th})} \int_{R_{th}}^{\infty} \left[\text{lb}(1 + \gamma_c) (1 + \lambda \gamma_c)^{-M} \cdot \right.$$
$$\left. \exp\left(-\frac{M \lambda \gamma_c}{\rho}\right) \left(\frac{M(1 + \lambda \gamma_c)}{\rho} + M - 1\right) \right] d\gamma_c$$

(15)

对式(15)采用数值积分的方法,可得到询问反馈策略下门限截断机会波束系统的容量。

2.3 系统的截断门限

若截断门限设置较低,被询问的用户接收信干噪比大都满足大于门限的条件,不能达到优选通信用户与发射波束的目的;若门限值过大,导致被截断的波束增加过快,以至于不能充分利用空间自由度。因而,需要根据实际通信环境,按照式(15)计算不同截断门限下的系统吞吐量,将系统吞吐量达到最大时的门限值设定为系统的截断门限。

以基站配置 6 个发射天线、平均接收信噪比 ρ 为 10 dB 为例进行说明。图 2 给出了用户数为 20、40、80、160 时系统吞吐量随截断门限变化的曲线,理论值由容量式(15)计算得到。由图 2 可以看出,仿真与计算结果基本一致,存在使系统吞吐量最大的最优截断门限。

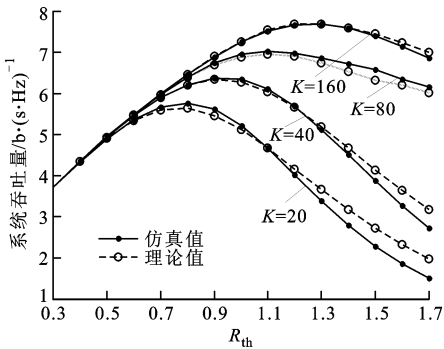


图 2 不同截断门限下系统容量的仿真值与理论值

根据仿真和公式计算结果中系统吞吐量随截断门限的变化情况,将系统吞吐量达到最大时对应的值设置为最优截断门限。表 1 对不同信噪比及用户

表 1 不同信噪比及用户数时的最优截断门限

平均信噪比/dB	R_{th}^*				
	$K=7\sim22$	$K=23\sim50$	$K=51\sim90$	$K=91\sim193$	$K=194\sim300$
0	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.4	≤ 0.4
10	0.8~0.9	1.0	1.1~1.2	1.3	1.4
20	1.1~1.2	1.3	1.4	1.5	1.5~1.6

注: R_{th}^* 为最优截断门限。

数时的最佳截断门限进行了总结。比较表中不同用户数时的最优门限,可看出最优门限随着用户数增加而加大,但变化量较小。在实际应用中,可根据信道环境、系统用户数的情况设定截断门限。在通信过程中若监测到通信环境发生变化,可根据表 1 改变截断门限值。

2.4 询问反馈策略下的开销分析

在询问反馈策略下,符合要求用户反馈的信息包括相应的波束编号、用户编号和瞬时信干噪比,反馈这些信息比特带来一定的延迟和容量损失。在 K 个用户的多用户系统中,配置 M 个发射天线,此时波束编号与用户编号共需 $\text{lb}(MK)$ b,另外信干噪比量化为 n b。在吞吐量限制下,此时的通信速率设为 c' ,在忽略传播时延的情况下,一个用户反馈造成的时延为

$$\tau' = \frac{\text{lb}(MK) + n}{c'W}$$

(16)

式中: W 为通信带宽。在随机询问反馈策略中,反馈用户的个数不多于 M 个,因而 TTOBF-IF 系统总时延为

$$\tau \leq M\tau'$$

(17)

多波束 OBF 系统中,每个用户都要反馈所有波束的信息,因而时延为 $\tau_{\text{OBF}} = KM\tau' \triangleq \tau$ 。

若系统中时隙的长度为 T ,那么反馈信息带来的容量损失为

$$\delta = \frac{\tau}{T}$$

(18)

式(17)、(18)分别根据系统的传输带宽、时隙长度分析了 TTOBF-IF 系统中由反馈带来的时延和容量损失。与多波束 OBF 系统相比,随机询问策略下的门限截断机会波束技术减少了反馈用户个数,降低了反馈造成的时延和容量损失。

3 性能仿真与数值分析

设基站配置 6 根发射天线,信道服从瑞利块衰落。数值分析和仿真中平均接收信噪比 ρ 为 10 dB。

图 3 给出了存在不同用户数时询问反馈策略下的门限截断机会波束与传统机会波束系统的反馈量的比值曲线,其中截断门限设置为最优值(见表 1)。询问反馈策略下系统的反馈用户数等于最优发射波束个数,增加系统用户数则最优的发射波束个数随着增加,反馈用户数也增加,同时传统机会波束反馈量随系统用户数线性增加。从图 3 可以看出,两者反馈量之比呈现先增加再迅速降低的趋势。因为在用

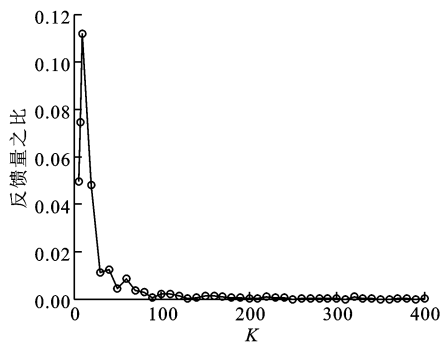


图3 TTOBF-IF 与 OBF 系统反馈量的比值曲线

户数较少时,最优发射波束个数的增加速度快于用户数的增加速度,因而 TTOBF-IF 系统增加的反馈量大于 OBF 系统增加的反馈量,故反馈量之比的曲线先随着用户数的增加而加大(如图中 10 个用户时),随着用户数继续增多,OBF 系统反馈量随用户数线性增加,而 TTOBF-IF 系统的反馈用户数始终不大于阵元个数,因而反馈量之比迅速降低.当系统中用户数大于 50 时,采用询问反馈下的门限截断技术后系统的反馈量低于传统机会波束系统反馈量的 1%,TTOBF-IF 系统显著降低了系统反馈量,提高了效率.

图 4 给出了采用最佳门限值时询问反馈策略下门限截断机会波束系统的容量随用户数变化的曲线,从图 4 可看出仿真与数值结果基本一致.与传统的 OBF 系统容量进行比较,由于随机询问反馈策略只要求通信用户的信干噪比大于预设门限,而非传统 OBF 中选择所有用户中具有最大信干噪比的用户,因而在用户数较多时存在一定的吞吐量损失,但是门限截断机会波束通过设置合理的截断门限可以优化发射波束.从图 4 可以看出,当用户数较低时,截断机会波束机制提高了系统吞吐量,如在用户数为 6 时,吞吐量提高了约 $1.2 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$,这是相当可观的.随着用户数的增加(大于 60 个用户时),询问反馈策略下的系统吞吐量低于传统的 OBF 系统,这是因为增加用户个数使最优的发射波束数也增加,此时门限截断机制带来的容量增益变小,且随机询问反馈的机制选择用户的信干噪比可能略低于传统 OBF 系统中的最大信干噪比,因而此时吞吐量低于传统 OBF 系统.

通过以上对随机询问策略下门限截断机会波束技术反馈量和吞吐量的分析以及与传统机会波束系统的比较,可以看出 TTOBF-IF 提高了系统中用户数较少时的吞吐量,并且反馈用户数也始终限制在天线阵元数以内,有效降低了系统反馈,提高了系统

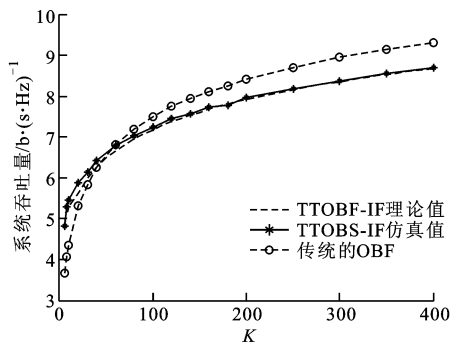


图4 TTOBF-IF 与 OBF 系统的容量比较

效率.

4 结 论

本文提出了询问反馈策略下的门限截断机会波束系统,用户只有在基站询问且波束信干噪比大于截断门限值时才能反馈,接收到反馈信息后基站停止对该随机发射波束的询问,确定其与第 1 个反馈的用户进行通信.通过合理设定截断门限,基站截断匹配度差的发射波束,降低了系统反馈量和波束间干扰.对询问反馈策略下的门限截断机会波束系统的信干噪比分布和容量进行了分析、仿真,结果证明询问反馈策略下的门限截断机会波束系统在用户数较少时能够明显提高系统容量,而且反馈量低于传统机会波束系统的 1%,大大降低了反馈链路的负担.

参考文献:

- [1] VISWANATH P, TSE D N C, LARROIA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [2] SHARMA N, OZAROW L H. A study of opportunism for multiple-antenna systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(5): 1804-1814.
- [3] XIA Minghua, ZHOU Yuanping, HA J, et al. Opportunistic beamforming communication with throughput analysis using asymptotic approach [J]. IEEE Transactions on Technology, 2009, 58(5): 2608-2614.
- [4] 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.
- [5] IL-MIN K H, HONG S C, GHASSEMZADEH S S, et al. Opportunistic beamforming based on multiple

- weighting vectors [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 4(6): 2683-2687.
- [6] 吴杏芬,宋荣方. 多波束机会波束成形系统性能比较 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2008, 28(6): 30-33.
- WU Xingfen, SONG Rongfang. 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] VICARIO J L, Bosisio R, SPAGNOLINI U. Adaptive beam selection techniques for opportunistic beamforming [C]//Proceedings of International Symposium on PIMRC' 06. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-5.
- [8] VICARIO J L, BOSISIO R, ANTON-HARO C, et al. Beam selection strategies for orthogonal random beamforming in sparse networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3385-3396.
- [9] ZHANG Kai, NIU Zhisheng. Random beamforming with multi-beam selection for MIMO broadcast channels [C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4191-4195.
- [10] SU Jia, ZHANG Shu. Bit truncated OFDM-CDMA in multiuser Rayleigh fading channel [C]//Proceedings of 2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 867-871.

(编辑 刘杨)