

# 基于随机波束成形 MIMO 系统的信道反馈算法

梁学俊 朱光喜 苏 钢 王德胜

(华中科技大学电子与信息工程系武汉光电国家实验室 武汉 430074)

**摘 要** MIMO 系统是未来移动通信发展的趋势。随机波束成形利用包含信道质量的反馈信息,可以开发多用户分集增益,进一步提高 MIMO 系统的容量。然而繁重的反馈信息会占据大量的无线资源,降低系统的实际效率。主要研究降低随机波束成形 MIMO 系统反馈开销的方法,提出了两种部分信道反馈算法:门限反馈和最优反馈。理论推导表明了系统平均容量与反馈率之间的权衡关系,仿真结果证明了只要恰当地选取反馈参数,这两种反馈算法可以在几乎不牺牲系统容量的前提下,极大节省反馈开销。其中,门限反馈在系统容量方面表现要好于最优反馈,而最优反馈在实现简便性方面要强于门限反馈,因此实际设计时要折中考虑。

**关键词** 随机波束成形, MIMO, 信道反馈

**中图法分类号** TN929 **文献标识码** A

## Channel Feedback Algorithms Based on Opportunistic Beamforming MIMO Systems

LIANG Xue-jun ZHU Guang-xi SU Gang WANG De-sheng

(Department of Electronics & Information Engineering HUST, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

**Abstract** MIMO is one of the most important techniques in the future wireless communication systems. Opportunistic beamforming can significantly improve the performance of MIMO systems by exploiting the feedback information that conveys the channel quality. But, the feedback information expenses a substantial amount of wireless resource and decreases system efficiency. To save the feedback load, two partial feedback algorithms were proposed and named threshold feedback and best feedback respectively. The theory expression explains the relationship of system average capability and feedback ratio. The simulation results prove that the proposed partial feedback algorithms can reduce the feedback overload greatly without sacrificing the system capability, only if the feedback parameters are chosen properly. Wherein, threshold feedback is better than best feedback in the aspect of system capability, but best feedback is simpler in practicality. Therefore, the tradeoff is considered in process of practical design.

**Keywords** Opportunistic beamforming, MIMO, Channel feedback

## 1 引言

信息论表明了多天线(MIMO)系统能获得巨大的容量增益,但如何接近或达到信道容量,取决于发射接收时的信号处理算法。MIMO 系统的发射方案主要分为波束成形、空时编码、空间复用 3 种类型。其中,当基站端已知用户的信道响应矩阵时,通常采用特征波束成形将 MIMO 信道分成平行的子信道,有效地抑制了共道干扰。如果基站端不知道用户的信道响应矩阵,在多用户的环境下,则可以采用随机波束成形技术。P. Viswanath 在文献[1]中首先提出了随机波束成形的概念,基站端利用随机产生的一个波束成形矢量将数据加权后从不同天线发送给同一用户,基站和用户间的慢衰落信道上叠加了人工的快变因子,形成人工快变信道,有利于开发多用户分集增益<sup>[2]</sup>。文献[3]将随机波束成形方法进行扩展,基

站端随机产生多个正交波束成形矢量,可灵活利用这些随机波束发送多个数据子流,数据子流可以独立地分配给任意用户。当随机波束成形矢量正好与某个用户的信道系数相匹配时,该用户具有最高的信噪比。

在随机波束成形 MIMO 系统中,各用户可以选择与之信道最匹配的波束成形矢量,但前提是基站端必须获取用户经过波束成形矢量加权后的信道的信噪比(SNR)信息,以便于比较。在 FDD 模式中,需要用户端测量 SINR 并反馈回基站。在多用户和多天线的环境下,反馈开销将严重影响系统的实际效率,因此设计高效的信道反馈算法是系统实现的关键。本文提出两种信道反馈算法,分别采用设置门限或排序的方法,从将要反馈的 SNR 信息中滤除价值较小的信息,从而实现减小系统反馈开销的目的。仿真结果表明,只要参数选取适当,这两种方法几乎不会造成系统容量的损失,因此具

到稿日期:2008-02-29 本文受国际科技合作项目(2008DFA11630),国家自然科学基金项目(60496315),国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2006AA01Z277)资助。

梁学俊(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为 MIMO-OFDM 系统多用户分集、信道反馈等,E-mail:liangxj\_shanxi@126.com;朱光喜(1945-),男,教授,主要研究方向为宽带多媒体通信等;苏 钢(1972-),男,讲师,主要研究方向为 MIMO-OFDM 自适应传输技术等;王德胜(1975-),男,副教授,主要研究方向为 MIMO 协同网络信息论、空时信道建模、公平性资源调度等。

有很强的实用价值。

本文第2节介绍随机波束成形 MIMO 系统模型;第3节讲述信道反馈算法,推导系统平均容量和反馈率的数学表达式;第4节是仿真结果与分析。

## 2 系统模型

系统框图如图1所示,基站具有  $M$  个发射天线,为  $K$  个用户服务。受体积和功耗限制,用户端只有一个接收天线。用户均匀分布在小区中,这样各个用户所经历的信道看作是相互独立的。为了同时服务多个用户,构造随机波束成形矩阵  $W=[w_1, w_2, \dots, w_M]$ ,其中  $w_m (m=1, 2, \dots, M)$  是  $M \times 1$  的正交波束成形矢量,其元素服从各向同性分布<sup>[4]</sup>。基站端为每个波束成形矢量安排最匹配的用户,数据经加权后从不同的天线上发射出去,波束匹配由反馈的 SNR 信息决定。系统总功率为  $P$ ,均匀分配到各个发射天线上。第  $k (1 \leq k \leq K)$  个用户(下文中表述为用户  $k$ )的接收信号可表示为

$$y_k = \sqrt{\frac{P}{M}} \sum_{\mu=1}^M h_k w_{\mu} x_{\mu} + n_k, k=1, \dots, K \quad (1)$$

$x_{\mu}$  为发射信号且  $E[|x_{\mu}|^2]=1$ ;  $h_k$  为用户  $k$  的  $1 \times M$  信道响应矢量,其元素为均值为 0、实部与虚部方差均为 0.5 的复高斯随机变量;  $n_k$  为均值为零、方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。设  $x_m$  为用户  $k$  的期望数据,其他发射信号  $x_{\mu}, \mu \neq m$  可视为干扰,式(1)又写成

$$y_k = \sqrt{\frac{P}{M}} h_k w_m x_m + \sqrt{\frac{P}{M}} \sum_{\mu \neq m} h_k w_{\mu} x_{\mu} + n_k, k=1, \dots, K \quad (2)$$

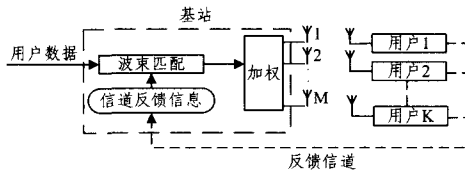


图1 随机波束成形 MIMO 系统框图

## 3 算法描述与性能分析

由式(2)知,用户  $k$  的即时 SNR 可表示为

$$\gamma_{k,m} = \frac{|h_k w_m|^2}{\rho + \sum_{\mu \neq m} |h_k w_{\mu}|^2} = \frac{z}{\rho + s} \quad (3)$$

其中,  $\rho = P/\sigma^2$  为系统的平均信噪比,  $z$  服从  $\chi^2(2)$  分布,  $s$  服从  $\chi^2(2M-2)$  分布。根据文献[5]的推导, SNR 的概率密度函数(PDF)和累计分布函数(CDF)分别为

$$f_{\text{SNR}}(\gamma) = \frac{e^{-\frac{M}{1+\gamma}}}{(1+\gamma)^M} \left( \frac{M}{\rho} (1+\gamma) + M - 1 \right) \quad (4)$$

$$F_{\text{SNR}}(\gamma) = 1 - \frac{e^{-\frac{M}{1+\gamma}}}{(1+\gamma)^{M-1}} \quad (5)$$

用户  $k$  将  $\gamma_{k,m} (m=1, \dots, M)$  作为反馈信息。当基站端没有反馈信息时,波束  $w_m (1 \leq m \leq M)$  任意地分配给用户,此时系统的平均容量表示为

$$R = E \left\{ \sum_{m=1}^M \log_2(1 + \text{SNR}_{k,m}) \right\} = M \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) dF_{\text{SNR}}^K(\gamma) \quad (6)$$

当基站端掌握了反馈信息时,会为波束  $w_m$  选择最匹配

的用户:

$$k = \underset{k=1, \dots, K}{\text{argmax}} \{ \text{SNR}_{k,m} \} \quad (7)$$

结合概率论的知识,此时系统的平均容量为

$$R = E \left\{ \sum_{m=1}^M \log_2(1 + \max_{1 \leq k \leq K} \text{SNR}_{k,m}) \right\} = M \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) dF_{\text{SNR}}^K(\gamma) \quad (8)$$

式(8)体现出多用户分集效果带来的系统容量增益,但前提是要求用户反馈所有的 SNR 信息,这并不现实。因此,设计高效的信道反馈算法是实现随机波束成形 MIMO 系统的关键技术之一,以极小的反馈开销来开发极大的多用户分集增益是算法设计的目的。

### 3.1 门限反馈

考虑部分反馈策略。将用户  $k$  的  $\gamma_{k,m}$  与事先设置的门限值  $\gamma_{th}$  进行对比,只反馈大于  $\gamma_{th}$  的 SNR 信息。这样,基站端波束  $w_m$  上的用户反馈数将是一个随机变量。当出现没有用户反馈信息的情况时,波束  $w_m$  不用于传输任何数据。用  $Pr(x)$  表示波束  $w_m$  上有  $x$  个用户反馈信息的概率

$$Pr(x) = \binom{K}{x} (1 - F_{\text{SNR}}(\gamma_{th}))^x (F_{\text{SNR}}(\gamma_{th}))^{K-x} \quad (9)$$

波束  $w_m$  从  $x$  个用户反馈信息中选取最匹配的用户,此时系统平均容量仍以式(8)的形式表示,但要作适当的调整。

$$C_{\gamma_{th}}(x) = M \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) dF_{\gamma_{th}}^x(\gamma) \quad (10)$$

其中,  $F_{\gamma_{th}}^x(\gamma)$  为 SNR 的条件 CDF:

$$F_{\gamma_{th}}(y) = Pr\left(\frac{\gamma \leq y}{\gamma > \gamma_{th}}\right) = \begin{cases} \frac{F_{\text{SNR}}(y) - F_{\text{SNR}}(\gamma_{th})}{1 - F_{\text{SNR}}(\gamma_{th})}, & y > \gamma_{th} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

系统的平均容量为

$$C_{\gamma_{th}} = \sum_{x=1}^K Pr(x) C_{\gamma_{th}}(x) = \sum_{x=1}^K \binom{K}{x} (1 - F_{\text{SNR}}(\gamma_{th}))^x (F_{\text{SNR}}(\gamma_{th}))^{K-x} M \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) dF_{\gamma_{th}}^x(\gamma) = M \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \log_2(1 + \gamma) dF_{\text{SNR}}^K(\gamma) \quad (12)$$

系统的反馈开销以反馈率这个参数来表征,反馈率定义为 SNR 信息的实际反馈量与总量的比值。采用门限反馈时的平均反馈率为

$$\beta_{\gamma_{th}} = 1 - F_{\text{SNR}}(\gamma_{th}) \quad (13)$$

由式(13)可知,系统的反馈开销将是一个随机变量,反馈信道的容量不易控制,因此给出另外一种部分信道反馈算法。

### 3.2 最优反馈

最优反馈的基本思想是,用户  $k$  对  $\gamma_{k,m} (m=1, \dots, M)$  从大到小进行排序,只反馈最大的  $n$  个 SNR 信息。由统计学理论可知,  $M$  个随机变量中第  $l$  个最大的随机变量的 PDF 可表示为

$$f_{l,M}(\gamma) = \frac{M!}{(M-l)! (l-1)!} F_{\text{SNR}}^{M-l}(\gamma) f_{\text{SNR}}(\gamma) [1 - F_{\text{SNR}}(\gamma)]^{l-1} \quad (14)$$

从  $M$  个随机变量中选择最大的  $n$  个,这  $n$  个中任意一个随机变量的 PDF 为

$$f_n(\gamma) = \sum_{l=1}^n \frac{1}{n} f_{l,M}(\gamma) \quad (15)$$

推导出采用最优反馈时 SNR 的条件 CDF 表达式:

$$F_n(\gamma) = \int_0^\gamma f_n(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \frac{M!}{(M-i)!(i-1)!} \int_0^\gamma F_{SNR}^{M-i}(t) [1 - F_{SNR}(t)]^{i-1} dF_{SNR}(t) \quad (16)$$

运用二项式系数公式,将式(5)代入式(16)并化简,得

$$F_n(\gamma) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{M!}{(M-i)!(i-1)!} \sum_{j=0}^{M-i} \binom{M-i}{j} \frac{(-1)^j}{i+j} \left( 1 - \frac{e^{-\frac{M}{1+\gamma}(i+j)}}{(1+\gamma)^{(M-1)(i+j)}} \right) \quad (17)$$

同样,最优反馈下基站端波束  $w_m$  上的用户反馈数仍为随机变量,为  $x$  的概率是

$$Pr(x) = \binom{K}{x} \left(\frac{n}{M}\right)^x \left(1 - \frac{n}{M}\right)^{K-x} \quad (18)$$

当波束  $w_m$  上有  $x$  个用户反馈 SNR 时,系统的平均容量表示为

$$C_n(x) = M \int_0^\infty \log_2(1+\gamma) dF_n^x(\gamma) \quad (19)$$

系统总的容量为

$$\begin{aligned} C_n &= \sum_{x=1}^K Pr(x) C_n(x) \\ &= \sum_{x=1}^K \binom{K}{x} \left(\frac{n}{M}\right)^x \left(1 - \frac{n}{M}\right)^{K-x} M \int_0^\infty \log_2(1+\gamma) dF_n^x(\gamma) \\ &= Kn \int_0^\infty \log_2(1+\gamma) f_n(\gamma) \left[ \frac{n F_n(\gamma)}{M} + 1 - \frac{n}{M} \right]^{K-1} d\gamma \end{aligned} \quad (20)$$

反馈率是

$$\beta_n = \frac{n}{M} \quad (21)$$

由式(21)知,系统设计最优反馈算法时,用户的反馈信道容量随着  $n$  值的确定而固定。

式(12)和式(20)的推导为确定反馈参数提供了数学参考。假设系统要求容量相对损失百分比为  $\eta$ ,利用式(8)的结果,反馈参数  $\gamma_{th}$  和  $n$  应该满足下式:

$$C_{\gamma_{th}} = \eta R, C_n = \eta R \quad (22)$$

得到  $\gamma_{th}$  和  $n$  值后,依据式(13)和式(21)可确定反馈信道的容量。

## 4 仿真结果与分析

设仿真系统的总功率  $P=10$ dB。图2所示为不同天线数  $M=4, 8, 16$  时系统的平均容量曲线。虚线部分为已知 SNR 信息采用波束匹配时所取得的平均容量,实线部分为波束任意地分配给用户时取得的平均容量。两者差距明显,并且这种差距随着用户数的增加而不断加大,这便是多用户分集的效果。可见,利用多用户分集可以将 MIMO 系统的性能提升一个档次,因此反馈 SNR 信息是必要的。另外,从图中代表不同天线数的曲线看出,系统的平均容量会随着天线数的增加而有所减小。这个也不难理解,由于系统的总功率有限,随着发射天线数的增加,分配到每个天线的功率就会减少,因此总体容量略有下降,但换来的好处是系统可以同时服务更多的用户。

图3为不同天线数  $M=4, 8$  和不同用户数  $K=20, 40$  时系统平均容量与反馈门限的关系曲线。从图中曲线的特性可以看出,多用户分集增益依然显著。并且在各个曲线的初始

阶段,例如当  $M=4, K=40$  时,反馈门限在  $[0, 0.8]$  的范围内,系统的平均容量基本上没有下降;又如  $M=8, K=40$  时,反馈门限在  $[0, 0.4]$  的范围内,容量曲线只略有下滑。与反馈门限相对应的反馈率曲线显示于图4,在  $M=4$  的系统中,反馈门限  $\gamma_{th}=0.8$  对应的反馈率在 13% 左右;而在  $M=8$  的系统中,反馈门限  $\gamma_{th}=0.4$  对应的反馈率大约为 8%,换句话说,合理地设置反馈门限,可以使系统反馈率大幅下降,同时并不会造成容量的损失。另外需要说明的是,最佳的反馈门限设置应该随着系统中的用户数变化而自适应调整。同样在  $M=4$  的系统中,用户数  $K=40$  时反馈门限应为 0.8,而  $K=20$  时反馈门限应为 0.6。

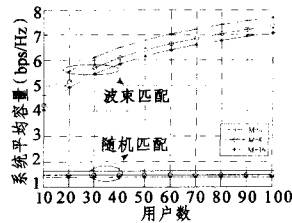


图2 用户数与系统容量的关系曲线

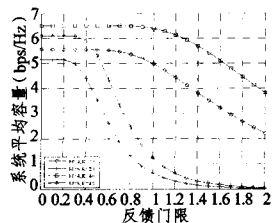


图3 反馈门限与系统容量的关系曲线

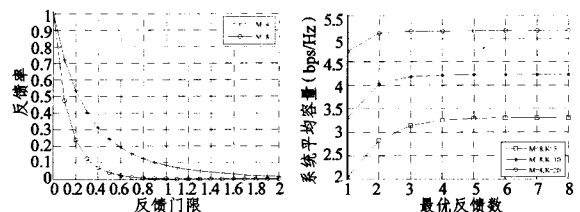


图4 反馈门限与反馈率的关系曲线

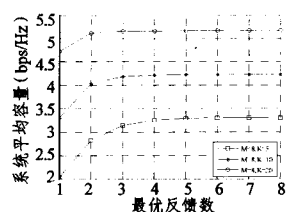


图5 最优反馈数与系统容量的关系曲线

图5所示为最优反馈时系统的平均容量曲线。当最优反馈数大于某一数值时,图5中的容量曲线就不再上升。例如,在  $M=8, K=10$  的系统中,  $n>3$  时,系统容量基本保持不变。这样的曲线特性为设计最优反馈算法提供了可能。结合式(21),  $n=3$  时的系统反馈率为 37.5%,这样不但节省了反馈开销,也没有造成系统容量的下降。此外,比较图3与图5中代表  $M=8, K=20$  时系统容量的曲线,当反馈率同为 12.5%,采用门限反馈的系统取得的平均容量为 5bps/Hz,而最优反馈取得的平均容量为 4.7bps/Hz,最优反馈的性能略逊于门限反馈。但最优反馈下,用户的反馈信道容量固定,系统的控制开销小。而门限反馈时的反馈信道容量是随机变化的,需要额外的控制信息。因此这两种部分反馈算法各有优缺点,实际设计时要权衡考虑。

**结束语** 本文主要解决多用户随机波束成形 MIMO 系统中需要反馈大量 SNR 信息的问题。文中结合统计学的知识,推导了基于门限反馈和最优反馈算法下的系统平均容量及反馈率的数学表达式,为反馈参数的确定提供了理论指导。仿真用于评估这两种反馈算法的性能,结果表明,利用多用户分集效果,通过设置合理的反馈参数,这两种部分反馈算法可以在大幅减少反馈量的同时,使系统容量保持在较高水平。需要说明的是,实际系统中的用户数是时变的,反馈参数要根据系统服务的用户数自适应地作出调整,这样才会更有效。

(下转第95页)

2)对明文敏感:对同一密钥,明文的微小变化将产生完全不同的密文。

3)明文到密文的映射是随机的:一个好的密码系统,密文中不应该存在任何固定模式。

由于本节的加密算法的密钥是由  $x_0, K$  两部分组成的,因此我们将从两个方面来进行密钥敏感性测试。

1)保持  $x_0$  不变,改变密钥  $K$  的最后一位。修改后的密钥  $K' = \text{"Cryptiom"}$ 。然后用密钥  $K'$  和  $x_0$  解密图 1(c),实验结果如图 3(c)所示。

2)保持  $K$  不变,改变  $x_0$  的最后一位。修改后的密钥  $x_0' = 0.476567340535645$ 。然后用密钥  $K$  和  $x_0'$  解密图 1(c),实验结果如图 3(d)所示。

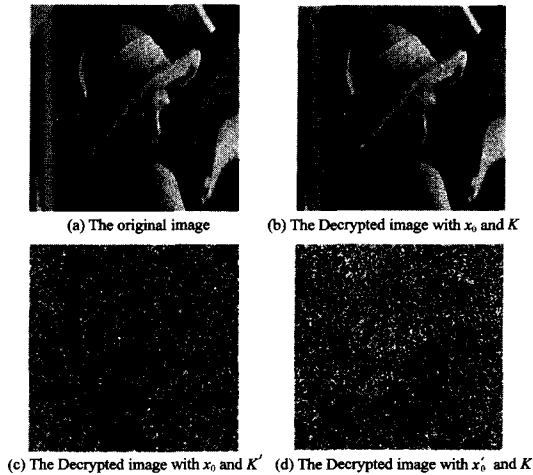


图 3 密钥敏感性测试

实验结果表明,尽管密钥只有微小的差异,但也导致了解密的失败。因此,这个新的加密算法保持了密钥敏感性。同时,我们在实验中也发现,两个只有  $2^{-15}$  微小差异的初值  $x_0$  和  $x_0'$ ,按照第 2.2 节算法构造的双射映射也几乎完全不同。

### 5.5 排列分析

正如在文献[14]中所述,PRN 是独立同分布的。除非知道混沌系统的初始值  $x_0$  和控制参数  $\mu$ ,否则很难从 PRN 序列的前面位来预测下一位。同时,只有混沌实值轨道  $\tau^t(x)$  的部分位参与了构造 PRN 序列。因此,在进行密码分析时,对  $x_0$  的猜测和加密系统的重构变成了不可能。

排列几乎是所有的传统密码系统的基本操作。在许多的密码系统中,排列只是根据设计者预先定义的方式重新排列输入元素,是与密钥无关的。在实际的密码分析过程中,由于这种排列很容易被差分分析攻破,因此它对算法安全性几乎没有什么意义。然而,在本文提出的加密算法中,排列是与密钥相关的,不同的消息块有不同的排列方式,从而增加了密码分析的难度。

**结束语** 本文提出了一种基于混沌映射和群上代数运算的分组密码算法。该算法中的密文依赖于明文、由 Logistic 映射产生的伪随机序列、置换运算和代数群上的运算。它弥补了一些纯混沌密码算法的缺陷。大的密钥空间、三种群运算的扩散与混淆和排列置换运算保证了新的密码系统对统计攻击及其选择明文攻击等常用密码分析方法都有很好的抗攻击能力。

### 参考文献

- [1] Yang Huaqian, Liao Xiaofeng, Wong Kwok-wo, et al. A new block cipher based on chaotic map and group theory. *Chaos, Solitons and Fractals*, Impress (doi:10.1016/j.chaos.2007.07.056)
- [2] Tang G, Liao XF. A method for designing dynamical S-boxes based on discretized chaotic map[J]. *Chaos, Solitons & Fractals* 276, 2005, 23:1901-1909
- [3] Xun Y, How T C, Kheong S C. A new block cipher based on chaotic tent maps[J]. *IEEE Trans Circuits Syst I* 278, 2002, 49(12):1826-1829
- [4] Jakimoski G, Kocarev L. Chaos and cryptography; block encryption ciphers based on chaotic maps[J]. *IEEE Trans Circuits Syst I* 280, 2001, 48(2):163-288
- [5] Stojanovski T, Kocarev L. Chaos-based random number generators—Part I: Analysis [J]. *IEEE Trans Circuits Syst I* 282, 2001, 48(3):281-288
- [6] Stojanovski T, Kocarev L. Chaos-based random number generators—Part II: Practical realization[J]. *IEEE Trans Circuits Syst I* 284, 2001, 48(3):382-385
- [7] Kohda T, Tsuneda A. Statistics of Chaotic Binary Sequences[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1997, 43(1):104-112
- [8] Li Shujun, Mou Xuanqin, Cai Yuanlong. Pseudo-random bit generator based on couple chaotic systems and its applications in stream-cipher cryptography[C]// *Progress in cryptology-Indo-Crypt 2001, Lecture notes in computer science*. vol. 290 2247, December 2001:316-329
- [9] Wheeler D D. Problems with chaotic cryptosystems[J]. *Cryptologia*, 1989, XIII(3):243-250
- [10] Wheeler D D, Mathews R A J. Supercomputer investigations of a chaotic encryption algorithm[J]. *Cryptologia*, 1991, XV(2):140-152
- [11] Wei Jun, Liao Xiaofeng, Wong Kwok-wo, et al. A new chaotic cryptosystem[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2006, 30:1143-1252
- [12] Fridrich J. Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps[J]. *Int J Bifurcat Chaos*, 1998, 8(6):1259-1284
- [13] Goldberg D, Priest D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic[J]. *ACM Comp Surv* 295, 1991, 23(1):5-48
- [14] Knuth D E. *Seminumerical algorithms. The art of computer programming*, 3rd ed. vol. 2, Reading, (MA): Addison Wesley, 1998

(上接第 87 页)

### 参考文献

- [1] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2002, 48(6):1277-1294
- [2] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications [C] // *IEEE Internet Communicaiton Conference*. 1995:331-335
- [3] Sharif M, Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channel with partial side information [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2005, 51(2):506-522
- [4] Hassibi B, Marzetta T L. Multiple-antennas and isotropically random unitary inputs: The received signal density in closed form [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2002, 48(6):1473-1484
- [5] Vicario J L, Bosisio R, Haro C A. A throughput analysis for opportunistic beamforming with quantized feedback. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2006: