

# MIMO系统中的部分信道状态信息反馈

## Partial Feedback for Channel State Information in MIMO System

初宝喜/CHU Bao-xi<sup>1</sup>, 王道远/WANG Dao-yuan<sup>2</sup>

(1. 北京普天和平通信技术有限公司, 北京 100016;

2. 北京邮电大学, 北京 100876)

(1. Potevio Corp, Beijing 100016, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

中图分类号: TN911 文献标识码: A 文章编号: 1009-6868 (2009) 02-0043-03

**摘要:** 根据有关多输入对输出(MIMO)系统的相关特征可知,在发射端完全知道信道状态信息(CSI)的情况下,遵循注水定理可以实现最优的发射设计。对于有线通信系统来说,这种情况是完全合理的。但是,在无线通信中,基于完全的信道状态信息的自适应发送仅仅在信道变化足够慢的情况下才有效。现有的关于MIMO的研究,主要集中于信道状态未知的情况下发射端的设计,这种设计并不能获得太令人满意的性能。然而为了减低信道信息反馈带来的信令开销,实时地更新完全信道状态信息对于MIMO系统来说是不太现实的。近来,越来越多的研究更集中于部分信道状态信息,该技术具有极大的应用价值,因为它为上述两种情况提供了一个很好的折衷。

**关键词:** 多输入多输出系统; 部分状态信息; 反馈

**Abstract:** According to related characteristics of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system, optimal transmission design could be achieved based on water filling theory, with the knowledge of Channel State Information (CSI) in transmitter. However, in wireless communication system, such information only makes sense in slowly changing environment. On one hand, signal design without CSI provides intensive insight for system performance, but does not exploit much of potential in MIMO system. On the other hand, complete information acquisition in transmitter side is not practical due to large signaling overhead. Therefore, more effort has been put into the research of partial CSI feedback, which provides good tradeoff for the above two mechanisms.

**Key words:** MIMO; partial CSI; feedback

简单的发射分集带来的巨大增益为多输入多输出(MIMO)的研究带来了更多的关注<sup>[1]</sup>。在MIMO系统中,能够准确地获得并能有效地利用信道状态信息对系统容量的提升有着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。在得到信道完整

的状态信息之后,可以遵循注水定理实现最优的发射设计。但是,基于这种完整信道状态信息的最优发射设计只有在信道状态变化足够慢的情况下才能实现,而这种条件往往是不能满足的。所以,更加符合实际系统

需要的部分状态信息反馈成为一个研究的重点。部分信息的反馈设计一般需要考虑信道状态的统计模型,对模型中的相关参数进行反馈,在发送端可以灵活地使用接收到的反馈信息进行一定的预处理,有效地提高链路质量和系统容量<sup>[4-8]</sup>。

### 1 部分状态信息反馈系统的一般模型

如图1所示,一个具有 $N_t$ 根发射天线和 $N_r$ 根接收天线的MIMO系统,信道为平坦瑞利衰落信道。

设 $h_{\nu\mu}$ 为第 $\nu$ 根发射天线到第 $\mu$ 根接收天线之间的信道响应系数。对应每一根接收天线 $\nu$ ,定义 $N_t \times 1$ 的向量 $\mathbf{h}_\nu = [h_{\nu 1} \ h_{\nu 2} \ \cdots \ h_{\nu N_t}]$ ,并且定义信道响应矩阵为式(1):

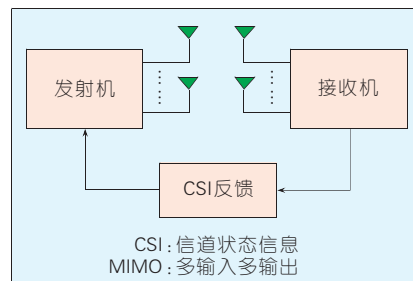
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{N_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在接收端,接收机估计出信道状态,并且通过反馈信道将相关信息送至发射端。在理想状态下,发射机确切地知道 $\mathbf{H}$ 中每一个元素的信息。

然而,在实际的无线链路中,由于存在信道估计错误,量化误差和反馈时延等一系列不确定因素,要获得完整的信道状态信息是比较困难的。建立一个部分信道状态信息的模型对于实际系统的应用十分重要。

### 2 统计模型

由于只能获得部分信道状态信息,所以发射机并不能确切地知道信道的当前状态。在这种情况下,发射机将信道视为随机的,统计特性从反



▲ 图1 有反馈的MIMO通信系统

馈信息获得。为了于实际的信道状态相区别,设这种信道状态矩阵为 $\mathbf{H}'$ ,很明显, $\mathbf{H}$ 与 $\mathbf{H}'$ 有完全不同的统计特性,因为 $\mathbf{H}'$ 在每一次反馈信息到来之时才发生变化。发射机所利用的就是 $\mathbf{H}'$ 的统计特性。<sup>[9]</sup>

通常所用的分布为高斯分布,用它的一阶和二阶统计特性来描述。 $\mathbf{H}'$ 的分布如式(2):

$$\text{CN}(\bar{\mathbf{H}}, \Sigma_{\mathbf{H}}) \quad (2)$$

其中 $\bar{\mathbf{H}}$ 表示均值, $\Sigma_{\mathbf{H}}$ 为方差,当 $\Sigma_{\mathbf{H}}=0$ 时,发射端获得的即位完整的信道状态信息。在实际的通信系统中,并不总是满足高斯分布。但是这种假设大大简化了系统设计,并且为基于部分信道状态信息的发射机的优化提供了很好的参考价值。

式(2)的高斯模型可以为任意的均值和方差。下面考虑它的两个简化模型,分别为均值反馈和方差反馈。

### 2.1 均值反馈

在均值反馈中, $\mathbf{H}'$ 的分布如式(3):

$$\text{CN}(\bar{\mathbf{H}}, \sigma_{\epsilon}^2 \mathbf{I}_{N,N}) \quad (3)$$

其中 $\sigma_{\epsilon}^2 \mathbf{I}_{N,N}$ 为信道响应的协方差矩阵, $\sigma_{\epsilon}^2$ 为 $\mathbf{H}'$ 中每一个元素的方差。下面是一个均值反馈的例子。

考虑如下的情形:

- 天线相隔较远,信道响应系数是独立同分布的,如式(4):

$$\text{CN}(0_{N,N}, \sigma_{\epsilon}^2 \mathbf{I}_{N,N}) \quad (4)$$

- 信道响应系数符合Jakes模型,并且变化速度较慢,即最大多普勒频偏 $f_d$ 较小。

- 接收机准确地估计出信道状态信息,并且通过无噪信道反馈到发送端,时延为 $\tau$ 。

假设接收机反馈的信道状态信息为 $\mathbf{H}'_r$ 和 $\mathbf{H}$ 都服从复高斯分布,并且来自同一个随机过程。因此 $\mathbf{H}'_r$ 、 $\mathbf{H}$ 为联合高斯分布,如式(5):

$$\text{E}\{\mathbf{H}\mathbf{H}'_r\} = \rho \sigma_{\epsilon}^2 \mathbf{I}_{N,N} \quad (5)$$

其中 $\rho = J_0(2\pi f_d \tau)$ 为相关系数。基于 $\mathbf{H}'_r$ 的对 $\mathbf{H}$ 的最小均方误差估计(MMSE)为 $\text{E}\{\mathbf{H}\mathbf{H}'_r\} = \rho \mathbf{H}'_r$ ,估计误差的方差为 $\sigma_{\epsilon}^2 (1-\rho^2) \mathbf{I}_{N,N}$ 。对于每一

个 $\mathbf{H}'_r = \mathbf{H}'_{r,0}$ ,发射机得到的参数信息为 $\bar{\mathbf{H}} = \rho \mathbf{H}'_{r,0}$ 和 $\sigma_{\epsilon}^2 = \sigma_{\epsilon}^2 (1-\rho^2)$ 。每一次反馈时, $\bar{\mathbf{H}}$ 得到更新。

在上述的延迟反馈模型中,参数 $\rho$ 代表了反馈的质量。当 $\rho=0$ 时,没有反馈任何有用信息,当 $\rho=1$ 时,发射机得到完整的信道状态信息。

为了能够实时地跟踪信道的状态,均值反馈适用于信道变化较慢的情况。

### 2.2 协方差反馈

在方差反馈中,我们假设信道变化太快以致发射机不能实时地获取信道状态信息。在这种情况下,设信道响应系数的均值为0,协方差矩阵为 $\Sigma_{\mathbf{H}}$ ,式(2)变为式(6):

$$\text{CN}(0_{N,N}, \Sigma_{\mathbf{H}}) \quad (6)$$

如果信道是广义平稳的,那么协方差矩阵就保持不变,也就意味着信道状态信息不需要频繁的更新。

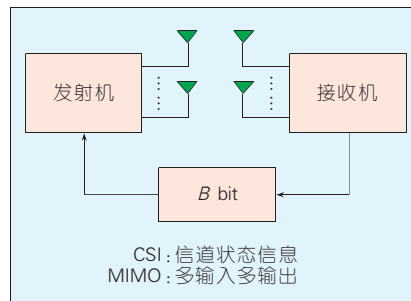
通过实际的测量,射线跟踪,或者使用物理信道模型,发射机可以预先知道上述的信道状态信息。对于固定的无线通信系统,信道在空间上的相关性可以由天线间隔、天线排列、到达角和角度扩散等一系列参数获得。对于接收端,接收机可以对信道长期的状态信息进行平均,并通过低速反馈信道送至接收机。

### 3 有限速率反馈模型

对于Partial CSI的建模,另一个比较实际的考虑就是对反馈信道带宽的限制。例如,反馈信道只能传送有限长度的反馈比特,如图2所示。

对于这种有限速率的反馈模型,很自然的要对信道状态信息进行量化,接收机只能反馈 $N=2^B$ 种不同的信道状态。在接收端,信道状态被分为 $N$ 个互不重叠的区域。发射机根据这种反馈得到的信息来确定当前信道状态属于哪一个区域。

根据得到的反馈信息,发射机自动的调整当前的发射模式,其中每种发射模式包含了一系列的发射参



▲图2 有限速率信道状态反馈

数——调制阶数,发射功率,空时编码格式等。根据上述的反馈格式,发射端需要有 $N$ 种不同的发射模式。

一般来说,基于有限速率反馈的系统设计是比较复杂的,需要考虑众多的因素,对于给定的性能,我们需要对以下两个方面进行联合设计:

- 将信道空间划分为 $N=2^B$ 个互不重叠的区域,每个区域用一个码字来表示。
- 对上述划分的每一个区域选取合适的发射模式。

### 4 基于部分信道状态信息的发射端资源配置

信道状态信息的获取,对于发射端信号发射的优化设计有着至关重要的作用<sup>[10]</sup>。在单用户MIMO场景中,利用接收端反馈的信道信息,在发射端可以实现预处理矩阵(加权系数)的优化设计,以取得较好的分集效果或者达到较高的复用增益;在多用户MIMO场景下,利用从不同用户端反馈的信道状态信息,是现在发射端信号的联合优化设计,在保证每条链路QoS要求的情况下尽量提高系统资源的使用效率。

部分信道状态信息反馈的实现为发射端进行资源的优化配置提供了一个长期的、统计意义上的指导。相对于瞬时状态信息反馈机制,部分反馈不能够实现资源分配对信道状态的实时自适应,但是针对瞬时信息较难获取的快变信道应用场景下,部分信息的获取对于发射端进行资源分配能够进行一定程度的指导,能够

在统计意义上实现系统性能的优化。

## 5 结束语

在无线通信中,基于完全的信道状态信息的自适应发送仅仅在信道变化足够慢的情况下才有效。现有的关于MIMO的研究,主要集中于信道状态未知的情况下发射端的设计,这种设计并不能获得太令人满意的性能。然而实时地更新信道状态信息对于无线通信系统来说是不太现实的。本文简单介绍了部分信道状态信息的两种模型。由于部分CSI更侧重实际的考虑,因此具有很好的研究和应用前景。

## 6 参考文献

- [1] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 16(8):1451-1458.
- [2] GOLDSMITH A, JAFAR S A, JINDAL N, et al. Capacity limits of MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in
- Communications, 2003, 21(5): 684-702.
- [3] TELATAR I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6): 585-595.
- [4] VISOTSKY E, MADHOW U. Space-time transmit precoding with imperfect feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(6): 2632-2639.
- [5] LOVE D J, HEATH R W J. Limited feedback precoding for spatial multiplexing systems[C] //Proceedings of IEEE Military Communications Conference(MILCOM' 03): Vol 1, Oct 13-16, 2003, San Francisco, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 627-632.
- [6] BLUM R S. MIMO with limited feedback of channel state information[C]//Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing: Vol 4, Apr 6-10, 2003, Hong Kong, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 89-92.
- [7] JORSWIECK E A, BOCHE H. Optimal transmission with imperfect channel state information at the transmit antenna array[J]. Wireless Personal Communications, 2003, 27 (1): 33-56.
- [8] LAU V, LIU Y, CHEN T A. On the design of MIMO block-fading channels with feedbacklink capacity constraint[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52 (1): 62-70.
- [9] GERSHMAN A B, SIDIROPOULOS N D. Space-time processing for MIMO communications[M]. New York, NY, USA:

John Wiley & Sons, 2005.

- [10] LAU V K N, YU KWONG RICKY KWOK. Channel-adaptive technologies and cross-layer designs for wireless systems with multiple antennas[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2006.

收稿日期:2008-05-06

## 作者简介



初宝喜,毕业于长春邮电学院通信工程专业,现任北京普天和平通信技术有限公司总经理助理兼工程技术服务部总经理、高级工程师。



王道远,北京邮电大学在读博士研究生,研究方向为移动通信自组织网络。

## 中兴通讯2009年GSM发货量锁定全球三甲

2009年2月,中兴通讯对外透露2008年GSM全球出货载频同比增长近100%,预计占全球新增市场份额增至约15%。同时,中兴通讯将2009年GSM发展目标锁定全球三甲,体现了其对GSM产品和新增市场发展前景的信心。

中兴通讯是基站同时支持GSM/UMTS双模制式的少数设备商之一,同时,中兴通讯也是最早通过增加基带板和软件升级就能实现未来4G演进的设备商之一。

中兴通讯目前采用的基于SDR的系列基站产品,为无线通信的未来演进和发展注入了新的活力,也为客户建设融合叠加网络、实现平滑升级和投入产出收益最大化提供了最优解决方案。

2008年,中兴通讯开发出完备的产品系列和最优TCO的GSM/UMTS解决方案,大大提升了产品在业界的竞争力。目前,中兴通讯的SDR产品已经在亚太和南亚等地区率先商用,成为新平台应用的领先者。

统计数据显示,继2007年中兴通讯GSM出货量大幅增长且首次跻身全球前四以来,中兴通讯GSM产品2008年继续发力,与爱立信等老牌厂商差距进一步缩小,在GSM领域的地位继续巩固。

## 中兴通讯交付100城市C网,基站交付率超90%

2009年1月,中国电信189号段盛大放号,作为中电信C网一期招标中最大份额的供应商,中兴通讯出色完成24个省份的100个城市的工程交付,包括成都、重庆、福州、泉州、石家庄和三亚等大中城市。中兴通讯共向中国电信出色交付超过11 000座基站,交付率高达91.3%。截至目前,中兴通讯是交付城市最多和交付率最高的厂家,也是工程进展最迅速的厂家。

1月6日夜,中兴通讯同时在7个省17个业务区操作,一夜共完成2 700多座基站割接,单四川就有843座基站。这是中国电信C网一期工程绝无仅有的光辉工程案例。

中兴通讯无线经营部副总经理刘鹏介绍:“凭借7年的C网工程经验、快捷完善的工程系统管理以及双方的密切合作关系,中兴通讯将继续以争分夺秒的精诚服务精神,争取在春节前后完成24个省份157个城市的一期重大工程。”

中国电信一期C网招标中,中兴通讯获得三分之一强的基站数新增份额,并在金额、新增载扇数、累计载扇数、累计基站数、大中城市数和省份数等重要份额指标方面均稳居第一。