

上下行信道不对称性对 TDD-MIMO 系统的影响

代康^① 宋荣方^{①②③}

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

^③(中兴通讯股份有限公司 南京 210012)

摘要: 时分双工和多输入多输出技术均是超三代移动通信中的关键技术。在传统的关于时分双工的文献中,发送端信道状态信息均通过上下行信道的对称性获得。然而实际中由于受温度、湿度等影响,射频电路增益会缓慢变化,于是关于上下行信道对称的假设不再成立,这必定会对性能产生影响。本文详细分析了该影响并提出通过采用射频电路参数反馈法来解决这一问题。仿真结果表明,相对于传统的上行信道重用法,采用射频参数反馈法提高了系统信道容量。

关键词: 时分双工; 多输入多输出; 上行信道; 下行信道; 多天线

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1903-03

Effect of the Asymmetry between Downlink and Uplink on TDD-MIMO Systems

Dai Kang^① Song Rong-fang^{①②③}

^①(College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^③(ZTE Corporation, Nanjing 210012, China)

Abstract: Time-Division Duplex (TDD) and Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) are the key techniques in the beyond third generation (B3G) mobile communication systems. In the conventional literatures on TDD, the channel state information at transmitter is obtained by assuming the reciprocity between uplink and downlink. However, affected by the unbalance of the Radio-Frequency (RF) circuitries in practice, the reciprocity between uplink and downlink can not be maintained, which will cause a decrease of the performance. In this paper, the asymmetry effect is analyzed in detail and the RF feedback strategy is proposed to eliminate it. Simulation results show that the RF feedback strategy performs much better than the conventional uplink reuse and the capacity of the MIMO systems is greatly improved.

Key words: Time-Division Duplex(TDD); Multiple-Input Multiple-Output(MIMO); Uplink; Downlink; Multi-antenna

1 引言

蜂窝移动通信中常用的双工复用模式有时分双工(TDD)和频分双工(FDD)两种。FDD通过两个不同频段来区分上下行信号,一个频段用于上行信号,另一个频段用于下行信号;在TDD中上下行信号采用同一频段,而通过时间上的分隔来区分,即某一时刻用于发送信号,另一时刻用于接收信号。在FDD系统中,由于发射机和接收机同时处于活动状态,因此必须使用高性能带通滤波器来分离上行信道和下行信道,以避免设备单元发送和接收之间的相互干扰。而在TDD

系统中,用户不会同时进行发射和接收,从而不再需要带通滤波器,并且TDD系统非常适用于可变速率,非对称带宽系统。

在高速无线通信系统中,克服信道衰落、提高频带利用率一直是人们关注的焦点。MIMO系统通过灵活的设计方式,可以在系统误码率和频带利用率等方面得到显著改善,因此成为无线通信领域的研究热点。已经证明,当发射机知道发送端信道状态信息(CSIT)时可以提高MIMO系统的信道容量^[1]。这种在发送端利用CSIT的传输技术称为闭环传输法,能让发送信号特性与当前信道状态信息相适应,改善链路性能。为了获得CSIT,目前常用的方法有两种:反馈法和上行信道重用法。反馈法通常用于FDD系统中^[2-4];上行信道重用法即基站估计上行信道状态信息并利用之,其中隐含

2006-04-06收到,2006-09-18改回

国家自然科学基金(60572130)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(N200603)资助课题

了上下行信道对称的假设,通常用于TDD系统中^[5,6]。然而在实际的TDD系统中,由于收发端受到射频电路的影响^[7],上下行信道将不再对称,采用上行信道重用必然会带来性能损失。针对这一问题,本文提出TDD系统中采用反馈法与上行信道重用相结合的闭环传输方法,接收端仅反馈给发送端接收端的射频电路参数,发送端利用估计出的上行信道状态信息以及反馈信息计算出下行信道的参数。由于射频电路受温度、湿度等影响缓慢变化,因此可以隔较长的时间才反馈一次,而不会造成系统的太大开销。

2 系统模型

为简化分析,本文考虑TDD模式下的单小区系统。假定在小区中,基站端有 n_{BS} 根天线,移动终端有 n_{MS} 根天线,天线之间相互独立,用 $n_{MS} \times n_{BS}$ 的复矩阵 \mathbf{H} 描述下行信道。 h_{ij} 表示矩阵 \mathbf{H} 的第 ij 个元素,代表从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线之间的信道衰落系数,其幅度服从瑞利(Rayleigh)分布,相位服从均匀分布。在传统的分析中,根据信道的对称性,上行信道矩阵表示为 \mathbf{H}^H ,上标 H 表示共轭转置。上下行信道的接收信号分别表示为

$$\mathbf{y}_{BS} = \mathbf{H}^H \mathbf{x}_{MS} + \mathbf{z}_{BS} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{MS} = \mathbf{H} \mathbf{x}_{BS} + \mathbf{z}_{MS} \quad (2)$$

其中 \mathbf{x}_{MS} 为 $n_{MS} \times 1$ 维向量,表示上行信道中终端的发送信号, \mathbf{x}_{BS} 为 $n_{BS} \times 1$ 维向量,表示下行信道中基站的发送信号, \mathbf{y}_{BS} 和 \mathbf{z}_{BS} 均为 $n_{BS} \times 1$ 维向量,分别表示上行信道中基站接收的信号和噪声, \mathbf{y}_{MS} 和 \mathbf{z}_{MS} 均为 $n_{MS} \times 1$ 维向量,分别表示下行信道中终端接收的信号和噪声。 \mathbf{z}_{BS} 和 \mathbf{z}_{MS} 的元素为相互统计独立,均值为0,方差为 σ_z^2 复高斯随机变量。

实际中由于射频电路受温度、湿度等影响,使得射频电路增益缓慢变化,于是关于上下行信道对称的假设不再成立。不失一般性,本文假设射频电路增益的幅度和相位都发生变化。对发送端,用复对角矩阵 Θ_t 来描述发端射频电路增益变化;对接收端,用复对角矩阵 Θ_r 来描述收端的射频电路增益变化。于是上下行信道所接收到的信号重写为

$$\mathbf{y}_{BS} = \Theta_r^{BS} \mathbf{H}^H \Theta_t^{MS} \mathbf{x}_{MS} + \mathbf{z}_{BS} \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{MS} = \Theta_r^{MS} \mathbf{H} \Theta_t^{BS} \mathbf{x}_{BS} + \mathbf{z}_{MS} \quad (4)$$

其中 Θ_r^{BS} 为 $n_{BS} \times n_{BS}$ 的复对角矩阵,表示上行信道中基站接收射频增益变化, Θ_t^{MS} 为 $n_{MS} \times n_{MS}$ 的复对角矩阵,表示上行信道中终端发射射频增益变化, Θ_r^{MS} 为 $n_{MS} \times n_{MS}$ 的复对角矩阵,表示下行信道中终端接收射频增益变化, Θ_t^{BS} 为 $n_{BS} \times n_{BS}$ 的复对角矩阵,表示下行信道中基站发射射频增益变化。

引入矩阵 \mathbf{H}_u 和 \mathbf{H}_d 分别表示等效的上下行信道

$$\mathbf{H}_u = \Theta_r^{BS} \mathbf{H}^H \Theta_t^{MS} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_d = \Theta_r^{MS} \mathbf{H} \Theta_t^{BS} \quad (6)$$

比较式(5)和式(6)知,仅当 $\Theta_r^{MS} = \Theta_t^{MSH}$ 且 $\Theta_t^{BS} = \Theta_r^{BSH}$ 时, $\mathbf{H}_u = \mathbf{H}_d^H$ 成立,即上下行信道对称,然而这在

实际中是很难满足的。

3 射频参数反馈

如果接收端将所估计出的下行信道参数完全反馈,反馈量为 $2 \times n_{MS} \times n_{BS}$,且由于信道的时变性需要每帧反馈一次,开销太大。可以利用TDD系统的特点,只反馈接收端的射频电路增益变化的参数,再结合估计出的上行信道参数(由于文中重点考虑射频电路的影响,故假设估计出的上行信道参数是完全正确的),计算出下行信道参数,下面详细讨论这种方法。

因为 Θ_t^{BS} , Θ_r^{BS} , Θ_t^{MS} 和 Θ_r^{MS} 都是对角矩阵,所以 \mathbf{H}_d , \mathbf{H}_u 的元素可以写为

$$h_{d(ij)} = \theta_{ri}^{MS} h_{ij} \theta_{tj}^{BS} \quad (7)$$

$$h_{u(ij)} = \theta_{ri}^{BS*} h_{ij}^* \theta_{tj}^{MS} \quad (8)$$

其中上标 $*$ 表示取共轭运算,由式(7),式(8)可知 \mathbf{H}_d 的元素与 \mathbf{H}_u^H 对应元素的比值(用 C_{ij} 表示)为

$$C_{ij} = \frac{\theta_{ri}^{MS}}{\theta_{ii}^{MS*}} \cdot \frac{\theta_{tj}^{BS}}{\theta_{tj}^{BS*}} = \theta_{ii}^{MS} \cdot \frac{1}{\theta_{jj}^{BS}} \quad (9)$$

其中 θ_{ii}^{MS} 表示终端第 i 根天线对应的收发射频增益变化的比值, θ_{jj}^{BS} 表示基站第 j 根天线对应的收发射频增益变化的比值。

可见,终端只要反馈回 θ_{ii}^{MS} ,基站结合自己的 θ_{jj}^{BS} ,便可计算出 C_{ij} ,再根据 C_{ij} 和估计出的 \mathbf{H}_u^H 的元素便可完全计算出 \mathbf{H}_d 。与传统的完全反馈法相比较,反馈量仅为 $2 \times n_{MS}$,大大降低了反馈的开销。同时环境影响的缓慢变化也决定了这些对角矩阵的元素是缓慢变化的,所以隔较长时间才需要反馈一次,因此不会给系统带来较大的开销。

发送端完全获得CSIT时,下行信道的遍历容量为^[8]

$$C = E \left[B \log_2 \left(\mathbf{I}_{n_{BS}} + \frac{\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d \boldsymbol{\rho}}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (10)$$

其中 $E(\cdot)$ 为求期望运算, B 为信道带宽, σ_z^2 为噪声功率, $\mathbf{I}_{n_{BS}}$ 为 $n_{BS} \times n_{BS}$ 的单位矩阵, $\boldsymbol{\rho}$ 为发送端根据 \mathbf{H}_d 所确定的自适应矩阵,为使信道容量最大, $\boldsymbol{\rho}$ 应为^[4]

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{W} \boldsymbol{\Lambda}^2 \mathbf{W}^H \quad (11)$$

其中 \mathbf{W} 为酉矩阵, $\boldsymbol{\Lambda}^2$ 为由注水法^[9]得到的对角功率分配矩阵

$$\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d = \mathbf{W} \boldsymbol{\varphi} \mathbf{W}^H \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\Lambda}^2 = \left[\frac{\mathbf{I}}{\lambda} - \sigma_z^2 \boldsymbol{\varphi}^{-1} \right]^+ \quad (13)$$

其中 $[x]^+ = \max(x, 0)$, λ 为注水常数,系统的总发射功率 P_0 满足

$$P_0 = \text{Tr}(\boldsymbol{\Lambda}^2) \quad (14)$$

其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹。

而对于传统的上行信道重用法,由于受射频电路增益变化的影响,发送端获得的是不正确的CSIT,此时信道的遍历容量为

$$C = E \left(B \log_2 \left(\mathbf{I}_{n_{\text{BS}}} + \frac{\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d \tilde{\rho}}{\sigma_z^2} \right) \right) \quad (15)$$

其中 $\tilde{\rho}$ 是根据 \mathbf{H}_u^H 所确定的自适应矩阵，对式(11)–式(14)作相应的修改可得。

4 仿真结果和讨论

由于实际中温度、湿度等因素对射频电路的影响有限且变化缓慢，在用 Matlab 仿真中，本文取射频电路增益变化的幅度在 0.9~1.1 之间均匀分布，相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布，并假设其在 50 “帧” 的时间内保持不变，总的仿真的时间为 1000×50 “帧”。不失一般性，本文考虑归一化的信道容量，即 C/B ，单位为 $\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

图1、图2、图3分别比较了不同收发天线配置下，采用传统的上行信道重用法和射频参数反馈法的信道容量。可见由于射频电路的影响，如果仍按照传统的上行信道重用法会降低信道的容量。当发射天线数大于接收天线数时，更加明显。而在实际应用中，由于移动终端的限制，发射天线数都要大于接收天线数。

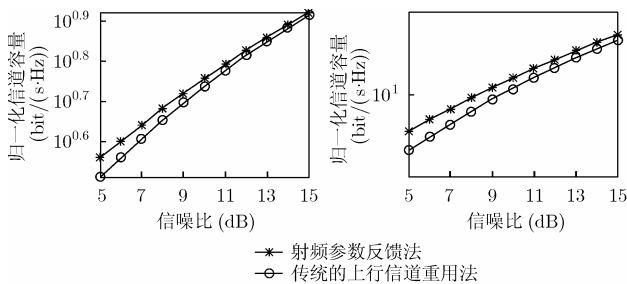


图1 收发天线均为2时采用不同方法获取CSIT的信道容量比较 图2 收发天线均为4时采用不同方法获取CSIT的信道容量比较

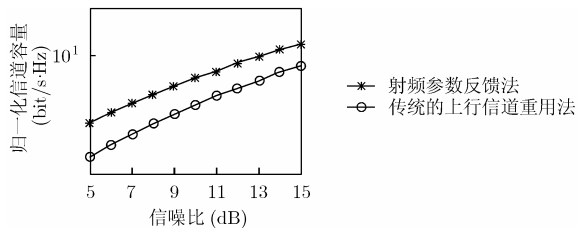


图3 发射天线为4接收天线为2时采用不同方法获取CSIT的信道容量比较

5 结束语

关于TDD的传统文献都是利用上下行信道的对称性来获取CSIT，并没有考虑实际中射频电路所带来的影响。本文通过分析指出射频电路由于受温度、湿度等影响所产生的射频电路增益变化会对MIMO系统的信道容量带来一定的影响，并提出了射频电路参数反馈的方法来消除这一影响。由前面的分析可以，该方法不会对系统带来过多的开销。

参 考 文 献

- [1] Vucetic B and Yuan J H. Space-Time Coding. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003: 8-22.
- [2] Love D J and Health R W Jr. Limited feedback precoding for spatial multiplexing systems using linear receivers. Proceedings of MILCOM2003, Boston, USA, 2003: 627-632.
- [3] Love D J, Health R W Jr and Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10): 2735-2747.
- [4] Lau V, Liu Y J and Chen T A. On the design of MIMO block-fading channels with feedback-link capacity constraint. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(1): 62-70.
- [5] Esmailzadeh R, Nakagawa M and Sourour E A. Time-division duplex CDMA communications. *IEEE Personal Communications*, 1997, 4(2): 51-56.
- [6] Povey G J R. Capacity of a cellular time division duplex CDMA system. *IEE Proc.-Communications*, 1994, 141(5): 351-356.
- [7] Feldhake G and Russell T. Statistical combination of attenuations by multiple atmospheric effects. Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, Baltimore, USA, 1996: 1864-1867.
- [8] Larsson E G and Stoica P. Space-Time Block Coding for Wireless Communications. UK: Cambridge University Press, 2003: 22-38.
- [9] Cover T M and Thomas J A. Elements of Information Theory. New York: John Wiley & Sons, 1991: 347-349.

代 康： 男，1982年生，硕士生，研究方向为未来宽带移动通信中的关键技术。
 宋荣方： 男，1964年生，教授，博士生导师，研究方向为未来宽带移动通信中的关键技术。