



MIMO 模式自适应及其性能验证 *

许 宁

(中国移动通信有限公司研究院无线技术研究所 北京 100053)

摘 要:TD-LTE 系统在下行支持多种 MIMO 传输模式,各个传输模式可以根据信道状态的变化进行自适应切换,提高系统的性能。针对 MIMO 模式自适应需解决的首要问题,给出如何使用实际系统提供的有限的信道信息,通过自适应算法,最大程度获取可能的系统增益。为评估自适应算法的合理性,给出了性能验证结果。

关键词:MIMO;模式自适应;时频块编码;空分复用;波束成形;信道信息

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.05.012

MIMO Transmission Mode Adaptation and Performance Verification

Xu Ning

(Wireless Technology Research Department, China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: TD-LTE supports several MIMO transmission modes in downlink. Different mode has its favored radio environment, so the system performance can be improved if MIMO modes can adapt to the dynamic of radio condition. Pointing at the necessary channel information for the MIMO mode adaptation, the way on how to get them in TD-LTE system and the adaptation algorithm using this information were introduced. The evaluation results show the efficiency of the adaptation algorithm.

Key words: MIMO, transmission mode adaptation, SFBC, spatial multiplexing, beamforming, channel information

1 引言

MIMO 技术与 OFDM 技术的结合,构成了下一代无线通信系统频谱效率大幅提升的基础。TD-LTE 的时分双工(TDD)特性,使其不仅可以适配非对称频谱,根据上下行业务需求进行灵活配置,更重要的是具有上下行信道状态互易性,为 MIMO 技术的应用提供了极大便利。MIMO 技术是空间分集、空分复用(SM)、波束成形(BF)等多种信号处理技术的统称,不同的 MIMO 技术可为无线传输提供不同的增益。TD-LTE 协议在下行规定了多种 MIMO 传输模式(TM),例如在 3GPP R8 协议中定义了用于发送分集的

TM2,用于空分复用的 TM3、TM4、TM5、TM6 以及用于单流波束成形的 TM7^[1];在 R9 协议中增加了用于双流波束成形的 TM8^[2];而在 R10 及后续版本中,新增了用于多流波束成形等更复杂的 MIMO 技术。在不同的无线传播环境、干扰情况和覆盖范围内,上述各类 MIMO 传输模式都有其适用的信道条件。TD-LTE 系统可以根据不同情况,在各 MIMO 模式间动态切换,使 MIMO 技术更加“智能”,从而进一步提升系统性能。

理论上,如果发送端(基站)可以获得实时的信道状态和干扰信息,则可以根据频谱效率最大化等原则,进行最优的 MIMO 模式自适应。而在实际系统中,获取实时且完

* “新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项基金资助项目(No. 2010ZX03002-009)

整的信道信息往往造成过高的系统开销。因此,如何利用有限方式,获取那些可以最大程度利用自适应带来系统增益的信道信息,是MIMO模式自适应研究需解决的首要问题。

MIMO技术在理论上已经得到了深入研究,并在实际系统中得到了广泛应用^[3],但关于MIMO模式自适应的研究并不多,且其中大多集中在频分双工(FDD)系统^[4]。本文将对TD-LTE系统的MIMO模式自适应进行介绍,重点关注的是TDD系统特有的波束成形TM7和TM8与其他模式的自适应切换。根据实际系统可提供的信道信息获取手段,笔者分析并给出了必要的输入信息、获取方法及相应的MIMO自适应算法。为评估自适应算法的合理性,进行了性能验证试验。

2 MIMO模式和自适应算法

MIMO技术是指参与通信的两端采用多个天线进行数据收发技术。由于物理上多天线的使用为信号传播和处理新增了“空间”这一维度,使通信的可靠性和效率得到大幅提升。根据MIMO技术为通信系统提供的3类增益将其分为3类。

- 空间复用技术:利用空间维度,在同一时频资源上传输多路不同的信号,利用空间特征在接收端或发送端将不同信号区分开来,形成“多流”传输,从而提高单位时间和单位频率上的传输速率,即提供复用增益。
- 波束成形技术:通过对发送或接收的各天线信号进行实时加权处理,形成成形波束“指向”目标用户,还可以对无用信号进行干扰抑制,达到提高链路质量的效果,即提供成形增益。
- 空间分集技术:类似于通信系统中经常采用的频率分集或时间分集,利用多个天线上信号衰落的不相关性,降低了所有信号都受深衰落影响而不能正常接收的可能性,从而提高无线链路的可靠性,即提供分集增益。

除用于单用户链路外,MIMO技术还可以将多个用户复用在同一时频资源上进行传输,即MU-MIMO模式,因篇幅所限,本文重点关注下行的单用户MIMO技术。

2.1 TD-LTE中的MIMO模式

在LTE协议中,根据下行物理业务信道(PDSCH)所用MIMO技术的不同,定义了不同的传输模式。网络通过RRC信令告知终端当前PDSCH采用的MIMO模式和相关配置参数,终端则进行相应的信号处理和接收。除单天线

模式TM1外,R8协议版本定义了TM2(发送分集空频分组编码(SFBC))、TM3(开环空分复用)、TM4(闭环空分复用)、TM5(闭环MU-MIMO)、TM6(闭环单流)、TM7(单流波束成形)共6种MIMO传输模式。R9版本新增了TM8(双流波束成形)。

TM4、TM5、TM6为基于码本的闭环传输模式,即协议规定有限的预编码码本(相当于量化后的空间信道信息),基站根据终端反馈的码本编号(PMI),进行码本的选择和预编码处理。这几种模式在目前的TD-LTE系统中应用很少,因此本文未予考虑。TD-LTE具有TDD系统的上下行无线信道相关互易的特性,直接通过上行参考信号可以估计下行信道状态,省去了终端反馈开销,更容易实现开环的TM3、TM7、TM8。TD-LTE协议支持2天线端口和4天线端口的MIMO传输,这里以广泛采用的2天线端口系统为基础,重点介绍TD-LTE采用的TM2、TM3、TM7和TM8。

(1) 发送分集(TM2)

LTE系统采用时频块编码(SFBC)实现空间发送分集。SFBC将两个连续的调制符号 S_i 和 S_{i+1} 映射到两个连续的子载波上,在天线端口0发送;而在天线端口1,则将上述两个符号进行处理和翻转,在同样的两个子载波上,发送符号 $-S_{i+1}^*$ 和 S_i^* 。SFBC不需要发送端获知信道信息,而接收端只需简单的线性合并,就可以获得分集增益。

除TM2采用SFBC外,其他MIMO模式(TM3~TM8)在本模式都可以回退到SFBC。这一设计是为了在不改变传输模式的情况下,由物理层信令指示传输方式快速切换到SFBC,避免了由RRC信令控制传输模式切换带来的开销和时延。

(2) 开环空分复用(TM3)

在发送端没有信道状态信息的情况下,可以使用开环的预编码实现空分复用,即用TM3同时传输两个不同的数据流。对于第 i 个子载波,TM3的预编码矩阵为:

$$W_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi i/2} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi i/2} \end{bmatrix}$$

该矩阵对第二个天线端口的频域信号进行了相位旋转,相当于时域上的循环时延发送(CDD)^[5]。相比TM2发送分集,TM3的频谱效率翻倍。

(3) 单流波束成形(TM7)

R8协议定义了TM7以及下行专用导频DRS和上行参考信号(SRS)实现单流波束成形。所谓单流是指在多根发送天线上传输同一数据流 x (TD-LTE的基站物理天线采用



4 对交叉极化天线,即 8 个物理天线)。首先,基站通过检测终端在上行发送的 SRS 估计下行信道矩阵 H ;然后,根据 H 计算预编码矩阵 w ,对 x 进行预编码处理。理想情况下,发送端对 H 进行 SVD 分解,即 $H=U\Sigma V^H$,获得发送端预编码矩阵 $w=V$,并采用 water-filling 功率分配;而接收端用矩阵 U^H 进行接收,可以最大化 MIMO 信道容量。然而,实际系统中终端大部分并不支持天线选择性发送技术^[9],即只用单天线发送 SRS,这样基站获得的信道为一向量 $h=[h_1, h_1, \dots, h_8]$,最优的预编码矩阵为 $w=h^*/\|h\|$,即最大比发送。理论上, N 根发送天线可以获得 $10\lg N$ dB 的成形增益。实际中,由于信道估计误差和功率分配限制等因素,成形增益一般低于理论值。

TM7 具有成形增益,可提高链路质量,但只能单流发送;TM3 的双流发送提高了频谱效率,但无成形增益。为同时获取成形增益和复用增益,R9 协议针对 TD-LTE 系统的特点,增加了 TM8。

(4) 双流波束成形(TM8)

TD-LTE 中,基站的 8 个发送天线和终端的 2 个接收天线组成一个 2×8 的信道矩阵,理论上最多可以传输两路不同的数据流。R9 协议定义了新的专用导频信号(DMRS),同一用户可分配两个正交的 DMRS,使终端可以估计两流的信道,从而实现双流传输。理论上最优的预编码矩阵可由上述 SVD 分解方式获取,但实际应用中,因复杂度因素和 SRS 单天线发送等限制,往往采用其他次优的预编码方式。由于 TM8 的预编码矩阵是 2×8 的,相比 TM3 的 2×2 预编码矩阵,每流信号可以利用多出的 3 个发送空间维度来获取成形增益,因此, TM8 可以同时获取复用增益和成形增益。需要指出的是, TM8 的 DMRS 占用了比 TM3 所用的通用导频信号(CRS)更多的子载波,在接收信干噪比(SINR)足够高时,受限调制编码方式的上限,成形增益不能带来性能提升,而导频开销反而使 TM8 的峰值速率略低于 TM3。

注意 TM8 模式也包括单流波束成形,除专用导频不同外,基本原理和性能与 TM7 单流是一样的。

2.2 MIMO 模式自适应

MIMO 技术所提供的增益依赖于无线信号的“空间”特性。无线信道环境的不同,加上 LTE 系统采用的自适应调制编码(AMC)技术,会导致上述各个天线模式的性能增益不同。例如,虽然空分复用可以成倍提高系统容量和频谱效率,但并非在任何环境下都可以使用:在 SINR 较低时,

空分复用的流间相互干扰严重,每流的有效 SINR 很低,只能采用低阶的调制编码(MCS)方式,性能反而不如采用单流 MIMO 和较高阶的 MCS。除不同用户的信道特性不同外,对于移动用户,其信道环境也经常发生变化。因此,需根据信道特性选择合适的传输模式,并根据信道特性的变化而切换模式,即 MIMO 模式自适应,以使网络性能最优。

与 MIMO 技术密切相关的信道特性包括接收信号质量和信道空间相关性。接收信号质量由大尺度衰落和干扰情况等决定,而信道空间相关性则与发送和接收天线的相关性、多径衰落、有无直射径等因素相关。MIMO 模式与信道特性的关系可归纳如下:

- TM3 双流适用于高 SINR、低空间相关的环境,获取空分复用增益;
- TM8 双流适用于高 SINR、高空间相关的环境,获取空分复用和波束成形增益;
- TM7 波束成形适用于低 SINR、高空间相关的环境,获取成形增益;
- TM2(或其他模式的 SFBC 子模式)适用于低 SINR 或信道变化较快的高速移动场景,获取较稳定的分集增益。

TD-LTE 系统的下行信道信息有以下两种获取方式。

- 通过终端反馈(CQI 和 RI):CQI 为终端根据自身接收信噪比和接收机能力估计的调制编码等级,可以反映接收信号质量;RI 为信道矩阵的秩数,表示了信道的空间相关性。
- 通过上下行信道互易性:如果终端支持上行选择性轮流发送,则基站可以通过上行 SRS 信号估计信道空间相关性(即信道矩阵的秩数)。需要指出的是,由于下行干扰的存在,不能采用上行 SRS 估计下行的接收信号质量。若终端只用单天线发送 SRS,虽不能估计秩数,但仍可估计单流波束成形的可能增益以及信道变化的快慢,这也是 MIMO 模式自适应需考虑的因素。

综合考虑上述可用的信道信息和 MIMO 模式的适用特点,笔者给出 TD-LTE 的 MIMO 模式自适应算法,如图 1 所示。在实际网络中,R8 协议终端为 TM2/3/7 模式自适应,R9 协议终端则采用 TM2/3/8 自适应。为统一描述算法,下面将 TM2 和其他 MIMO 模式的 SFBC 子模式统称为 SFBC, TM3 和 TM8 的双流模式统称为空分复用(SM), TM7 和 TM8 的单流模式统称为单流 BF。算法根据终端上报的

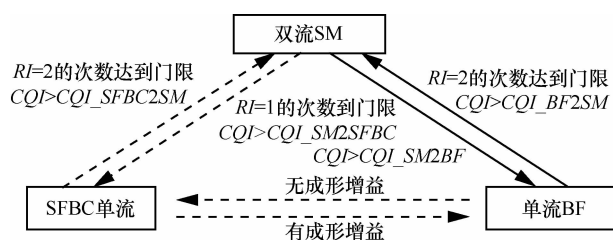


图1 MIMO模式自适应

CQI和RI以及基站通过SRS估计的成形增益和信道变化速度,在SFBC、SM和BF间进行自适应切换。

- SFBC和SM:工作在SFBC模式时,当终端上报 $RI=2$ 的次数达到一个门限,且 CQI 高于门限 $CQI_{SFBC2SM}$ 时,切换到SM模式;而工作在SM模式时,当终端上报 $RI=1$ 的次数达到一个门限,且 CQI 低于门限 $CQI_{SM2SFBC}$ 时,切换到SFBC模式。
- SM和BF:工作在SM模式时,当终端上报 CQI 低于门限 CQI_{SM2BF} 时,切换到BF模式;而工作在BF模式时,当终端上报 $RI=2$ 的次数达到一个门限,且 CQI 高于门限 CQI_{BF2SM} 时,切换到SM模式。
- BF和SFBC:工作在BF模式时,当基站估计的成形增益低于门限值(可设为3 dB),且不满足切换到SM模式的条件,则切换到SFBC模式;另外基站估计的信道变化速度较快,例如等效信道速度超过90 km/h,则切换到SFBC模式;而工作在SFBC模式时,当基站估计的成形增益高于门限值,且不满足切换到SM模式的条件,则切换到BF模式。
- 支持R9协议的终端,还存在TM8双流SM和TM3双流SM间的切换:基站根据估计的成形增益,计算两种模式下的MCS以及频谱效率,若TM8 SM下的频谱效率高于TM3 SM,则切换到TM8 SM,反之则使用TM3 SM。

如前面指出,模式间切换需要RRC信令配置,以秒为单位,时延较大,而模式内切换可以每毫秒配置,因此TM2一般用于初始接入阶段,其他时间根据终端版本能力不同,进行TM3/7切换或TM3/8切换。

3 性能验证

为评估考虑上述因素的多天线模式自适应算法是否合理有效,笔者进行了相关试验验证。

首先,验证TM2/3/7自适应算法是否合理有效。由于自适应的目的是在各种不同的信道条件下都能使用最优

的MIMO模式,那么合理性可以通过对MIMO模式自适应的性能与固定MIMO模式的性能进行比较,如果MIMO自适应的性能在各种环境下相比任何固定模式都是最优的,就可以验证自适应算法的合理性。

实验采用了真实TD-LTE基站设备、终端和商用信道模拟仪,使用不同信道模型和不同SNR,在单用户占用20 PRB下,对各种MIMO模式的下行PDCP层吞吐量性能进行了比较,结果如图2所示。从结果可以看到,模式自适应TM3/7在各个信道模型和SNR下的吞吐量,都是各固定MIMO模式可获得吞吐量的最优值,因此,该自适应算法是合理有效的。

其次,对TM3/8自适应在外场环境下进行了试验验证。外场试验可更准确地反映自适应算法的能力,通过对比TM3/7自适应与TM3/8自适应的性能,验证TM3/8自适应是否能合理地在TM3双流、TM8单流、TM8双流间进行选择,试验结果如图3所示。在单用户试验中,分别将终端放置在距离基站的不同位置(即图3(a)中的极好、好、中、差点,其接收SINR依次下降),进行下载业务,比较下行吞吐量性能。从结果看到,TM3/8自适应下,在基站近旁的信号质量极好点,算法采用了TM3,避免了TM8导频开销问题,可以获得最高峰值速率;在小区内部的好点和中点,信号质量中等处,由于波束成形增益,选择TM8双流,性能要好于TM3双流;在小区边缘,信号质量较差处,无法进行双流传输,此时算法选择了TM8的单流,性能与TM7单流相当。还进行了多用户试验,即在极好点、好点、中点、差点各放置2、8、6、4部终端(共20部终端),同时进行下载业务。结果显示TM3/8自适应相比TM3/7自适应可将小区吞吐量提升20%,如图3(b)所示,该增益主要来自TM8双流所带来的性能优势。

4 结束语

MIMO模式自适应是TD-LTE系统中提高频谱效率和用户体验的重要技术。本文在对MIMO模式进行简要回顾的基础上,重点分析了MIMO模式自适应需要的信道信息获取方式以及利用这些信息的自适应算法。通过测试验证了自适应算法的性能和合理性。结果显示,MIMO自适应可以适配变化的无线传播环境,选择最优的MIMO模式进行数据传输,对系统性能有明显提升。

TD-LTE除支持本文重点讨论的单用户MIMO模式外,还支持多用户MIMO模式。单用户和多用户MIMO模式之

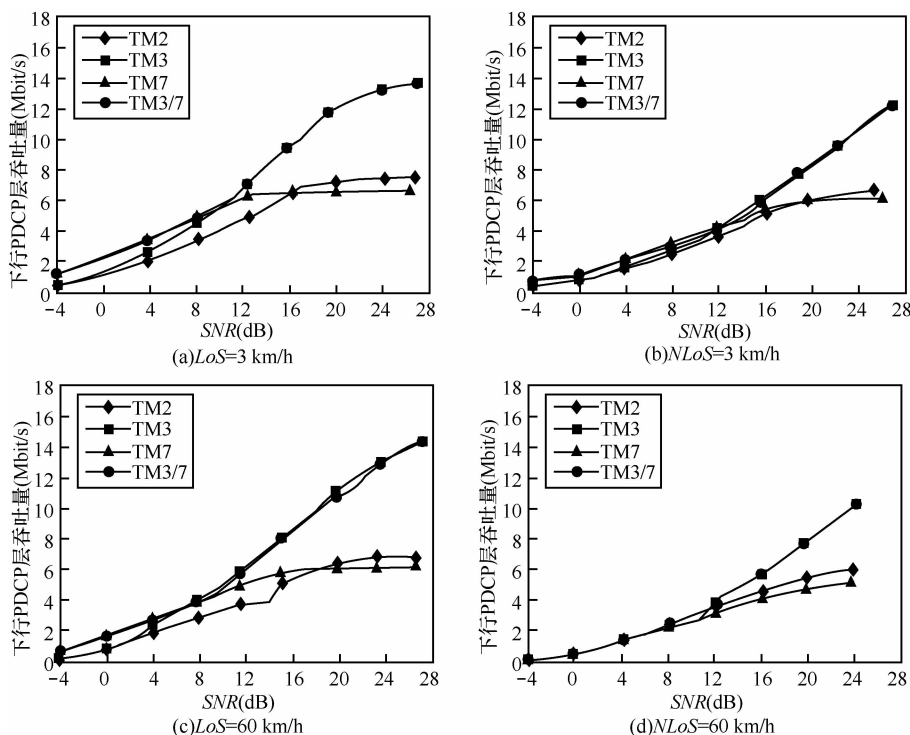


图2 TM2/3/7 自适应性能

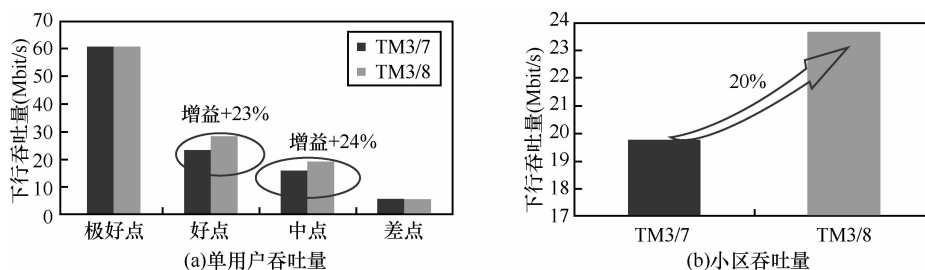


图3 TM3/8 自适应相对 TM3/7 自适应的性能提升

间的自适应,除这里讨论的几种信道信息外,还需要考虑用户间信道的相关性和业务需求等因素,有待进一步研究。

参考文献

- 1 3GPP Technical Specification 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 8.9.0), Dec 2009
- 2 3GPP Technical Specification 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 9.1.0), Mar 2010
- 3 Hottinen A, Kuusela M, Hugi K, *et al.* Industrial embrace of smart antennas and MIMO. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(4): 8~16
- 4 Shubhdeep A. Downlink transmission mode selection and switching algorithm for LTE. Proceedings of the Third International Conference on Communication Systems and

Networks (COMSNETS), Bangalore, India, 2011

- 5 Li Y, Chuang J, Sollenberger N. Transmitter diversity for OFDM systems and its impact on high-rate data wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(7): 1233~1243
- 6 Mehta N B. Antenna selection in LTE: from motivation to specification. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(10): 144~150

[作者简介]



许宁,男,博士,现就职于中国移动通信有限公司研究院无线技术研究所,主要研究方向为无线通信、IP 网络。

(收稿日期:2013-04-20)