

大规模 MIMO 系统中用户分层变长时隙分配*

周志超^{1,2}, 王东^{1,2}

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院信息科学研究所, 北京 100044;

2. 北京市先进信息科学和网络技术重点实验室, 北京 100044)

摘要:大规模 MIMO 系统时分双工模式中分配的物理时隙长度是固定的, 不能根据不同时长的信道相干时间灵活地调整长度, 二者长度的不匹配导致部分时频资源的浪费, 因此, 系统的总体容量不能达到最优。针对此问题提出一种用户分层变长时隙分配方法, 即根据不同终端的流动性对终端进行分层, 并为不同层中的移动终端灵活地分配不同时长的物理时隙, 使物理时隙长度与移动终端所对应信道的相干时长相匹配, 从而减少时频资源的浪费, 提高资源利用率。同时, 避免了低速移动终端过频繁的信道估计, 降低了信道训练序列开销, 使系统的总体数据容量得到很大的提升。实验仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:大规模 MIMO 系统; 用户分层; 变长时隙; 时频资源效率

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)04-110-06

Variable-length slots allocation for hierarchical users in the massive MIMO systems

ZHOU Zhichao^{1,2}, WANG Dong^{1,2}

(1. Institute of Information Science, School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Advanced Information Science and Network Technology, Beijing 100044, China)

Abstract: The length of physical slot is stationary in the time division duplex mode of the Massive MIMO system. Consequently, the length of the allocated physical slots cannot be adjusted according to different lengths of coherence intervals. The mismatch between slot and coherence leads to a waste of the time-frequency resource. Therefore, the whole network capacity of the system is not optimal. A variable-length slot allocation scheme based on hierarchical users was proposed to make the allocated physical slots match their corresponding coherence intervals well. In the proposed scheme, terminals were divided into different categories according to their mobility, and variable length slots were assigned to terminals in different categories flexibly. So the waste of time-frequency resource waste and the excessive channel estimation can be alleviated. The resource efficiency and the sum rate of the system are verified to be optimized and the simulation validates the proposed scheme.

Key words: massive MIMO system; hierarchical users; variable-length slot; efficiency of time-frequency resources

大规模 MIMO (massive MIMO) 技术被认为是下一代 5G (the fifth generation) 移动蜂窝网通信中提高系统容量和频谱利用率的关键技术^[1-4]。其特点是在基站处配置 M 根天线阵元形成庞大的天线阵列利用同一时、频资源同时服务本小区内 $K(1 < K < M)$ 个独立的单天线用户。庞大的天线阵列提供了较大的天线自由度 (Degree of Free, DoF), 从而极大地提高了频谱利用率、数据传输的稳定性和可靠性, 同时使整个系统的数据容量也得到很大提升^[4]。

文献 [5-7] 中证明, 在理想的信道下,

Massive MIMO 系统的整体性能远优于点对点 MIMO (point-to-point MIMO) 系统的性能。并且阐述了 Massive MIMO 的两个优势: 在视距 (Line-Of-Sight, LOS) 传输环境下, 不同终端的空间角度仍远大于 Massive MIMO 基站处天线阵列的瑞利分辨率 (即当一个艾里斑的边缘与另一个艾里斑的中心正好重合时, 此时对应的两个物点刚好能被人眼或光学仪器所分辨, 即可分辨的最小范围^[9]), 不同的终端能够被很好地分辨开; 基站处的天线阵列配置越多的天线阵元, 对单天线终端的发射功率的要求就越低。文献 [6] 中证明, 随

* 收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61574013); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (KKJB16006536)

作者简介: 周志超 (1989—), 男, 河北衡水人, 博士研究生, E-mail: zczhou@bjtu.edu.cn;

王东 (通信作者), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangdong@bjtu.edu.cn

着基站天线阵元的增加,信号的信噪比呈线性增长。文献[7]中指出,基站处配置大量天线阵元对频谱和能量利用率总是有益的。文献[8]在文献[7]的基础上定量地分析了 Massive MIMO 系统在频谱利用率和能量利用率两方面的优势并得出结论,即使使用简单的线性编、解码,Massive MIMO 系统的频谱效率仍比传统通信系统高 1 到 2 个数量级,而能量效率提升 3 到 4 个数量级。文献[9]中首次指出,由于终端的移动速度对其信道的相干时间长度产生影响,相干时长和物理时隙长度的不匹配造成时频资源的浪费,但是本文并没有深入地探索解决此问题的方法。

传统的系统将时频资源均等地切成若干资源块,所有终端在服务时间上同等对待,没有考虑终端的移动速度对信道相干时间的影响。而高速移动的终端会引起严重的多普勒效应^[10-11],极大地压缩信道的相干时长,导致由于系统分配的固定物理时隙与信道的相干时间不匹配造成的时频资源的浪费。而低速移动的用户与基站之间的信道在较长的时间内保持不变。信道的相干时间很长甚至可以跨越多个系统分配的固定时隙。当分配的定长时隙结束时,即使信道没有恶变,仍然能支持收、发数据,频带的使用权也不得不转移给其他的用户。对该用户,基站必须进行新一轮的信道估计。由于频带使用权的频繁转移,导致了过频繁的信道估计,信道训练序列开销的增加,压缩了有效数据的传输时间。

本文探索了用户分层变长时隙分配的方案。由于信道相干时长受终端移动速度的影响,所以只能通过灵活的分配物理时隙长度使二者匹配,从而降低时频资源的浪费。对小区中的用户根据不同的移动速度进行分层,为不同层中移动用户灵活地分配物理时隙,使时隙长度与不同层终端信道的相干时间尽量匹配,提高时频资源的利用率,同时,降低基站对低速终端信道估计的频率,减少信道导频训练序列的开销。从而能够提高 Massive MIMO 系统整体的数据容量。

1 相干时间分析

在一个信道相干时长 T 内基站的操作如图 1 所示。①接收上行导频序列 τ_p ;②根据接收到的上行导频估计信道、设计预编码矩阵的时间为 p ;③根据步骤 2 中预编码矩阵处理将发送的信号并发送,占用 $T-p-\tau_p$ 。

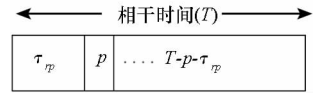


图 1 一个相干时隙内基站完成接收导频序列、信道估计、预编码和发送数据到终端

Fig. 1 Base station receives pilots, estimates the forward channel and sends data in a coherence interval

2 定长物理时隙接入方法

传统系统中时间资源被均等地划分为固定长度的时隙作为基本的数据传输单元,如图 2 所示。而在划分时隙时没有考虑用户移动性的差异,因此高速和低速移动对应的物理时隙长度是相同的。但是高速移动用户对应的信道相干时长短,慢速移动的用户对应的信道相干时间更长。所以,信道的相干时间和分配的物理时隙长度不匹配,造成时频资源的浪费,如图 3 阴影部分所示。

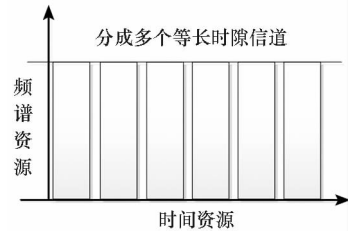


图 2 均等定长时隙分配

Fig. 2 Permanent length time-slot allocation

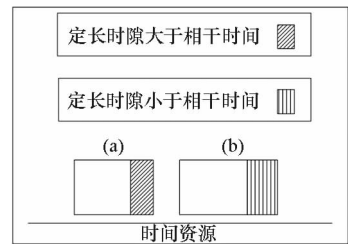


图 3 均等时间资源分配时的时间资源利用图
Fig. 3 Time resources efficiency with the mode of permanent length time-slot allocation

引用文献[7]中小区总容量的计算公式,小区的总容量为:

$$C_m^p = \left(\frac{T_{\text{slot}} - p - \tau_p}{T_{\text{slot}}} \right) \cdot K \log_2 \left\{ 1 + \frac{\rho_f \left(\frac{\rho_r \tau_p}{1 + \rho_r \tau_p} \right) E^2 \{ \varphi \}}{1 + \rho_f \left[\frac{1}{1 + \rho_r \tau_p} + \frac{\rho_r \tau_p}{1 + \rho_r \tau_p} \text{VAR} \{ \varphi \} \right]} \right\} \quad (1)$$

其中: T_{slot} 为定长时隙; φ 是信道的随机特性因子, φ 的值由式(2)计算可得; $E \{ \varphi \}$ 表示道信特性因

子的均值; $VAR\{\varphi\}$ 表示道信特性因子的方差; ρ_r 为上行发送功率; ρ_f 为下行数据发送功率。

$$\varphi = \{\text{diag}[(\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H)^{-1}]\}^{-1/2} \quad (2)$$

式中, \mathbf{Z} 是一个 $K \times M$ 的随机信道矩阵, $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角元素。矩阵 \mathbf{Z} 经过奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)^[12], $\mathbf{Z} = \mathbf{U}\mathbf{Q}\mathbf{V}^H$, \mathbf{Q} 为 $K \times M$ 的对角矩阵, \mathbf{U} 为 $K \times K$ 的酉矩阵, \mathbf{V}^H 为 $M \times M$ 的酉矩阵。对角矩阵 \mathbf{Q} 的对角元素 q_{km} 为第 m 根天线到第 k 个终端的大尺度信道增益 β_{km} 。

对于目标小区而言, 因分配时隙与信道相干时长不匹配造成的总的资源浪费的判断标准为:

$$R_{\text{waste}} = \sum_{k=1}^K |T^k - T_{\text{slot}}| \quad (3)$$

其中, T^k 为第 k 个终端对应的信道相干时长。

当天线数 M 大于 2 倍移动终端数 K 时, 小尺度衰落的影响弱化, 大尺度衰落的影响起关键作用^[13-14]。由前面分析可知, 天线阵列中所有阵元对第 k 个终端的大尺度衰落趋于同一值 β_k , 所以信道特性因子 φ 与大尺度衰落直接相关。

3 用户分层变长时隙接入方法

为解决定长时隙分配和信道的相干时长不匹配造成时间资源的利用率较低的问题。本文提出一种用户分层变长时隙分配方法。根据终端不同的移动性对终端分层, 并给不同层终端分配不同时长的物理时隙, 使分配的物理时隙长度匹配信道的相干时长, 从而减轻了时间资源的浪费和过度的导频开销, 如图 4 和图 5 所示。

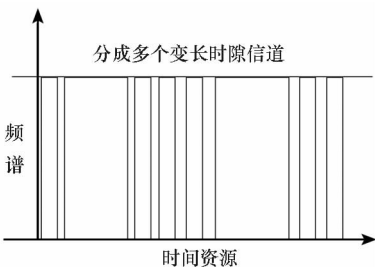


图 4 用户分层变长时隙资源分配

Fig. 4 Variable length time-slot allocation for different users

图 4 中显示给快速移动的用户层分配短时隙, 给慢速移动的用户层分配长时隙。图 2 和图 4 仅说明物理时隙资源的分配情况, 并非代表时间上串行出现的先后顺序。因此, 横轴代表的仅是时间资源而不代表先后顺序的时间轴。图 3 和图 5 只是说明本文提出的方法和传统方法不同的资源利用率。

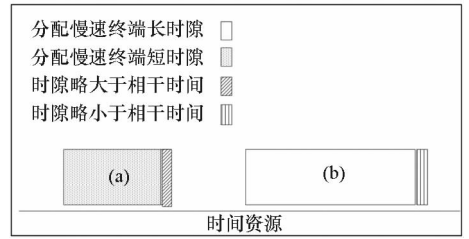


图 5 用户分层变长时隙分配时的时间资源利用图

Fig. 5 Time resources efficiency with the mode of variable length time-slot allocation for different users

文献[15]中指出终端与基站间信道的相干时长 T 与终端的移动速度 v 是负相关的, 利用文献中的结论建立二者之间的关系。信道的相干时间间隔 T 与最大多普勒频移的关系为:

$$T = 0.423 / \Delta f_m \quad (4)$$

其中, $\Delta f_m = |f - f^*|$ 表示最大多普勒频移, f 为原始频率, f^* 为接收时的频率, f 和 f^* 之间的关系如式(5)所示。

$$f^* = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos\theta \right) \quad (5)$$

式中, θ 为基站与移动终端的连线到速度方向的夹角, c 为电磁波速, v 是移动终端的移动速度。结合式(4)和式(5), 可以得出相干时间间隔 T 与终端的移动速度 v 之间的关系如式(6)所示。

$$T = 0.423 \left[f \left(v \times \frac{\cos\theta}{c} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

根据式(6), 可以计算出终端移动速度和其对应信道相干时长的对应关系, 然后依据此对应关系, 对用户进行分层。按照用户的移动速度把用户终端分成若干层, 再根据分层用户的相干时长为该层移动终端灵活地分配匹配长度的物理时隙。为了表达方便和表述清楚, 在时隙的分配过程中, 设定固定的时隙长度 B 为标准基本时隙长度阈值, 为用户分配的实际物理时隙长度是该阈值的整数值。使分配的物理时隙与移动用户的相干时长尽可能匹配。

因此, 根据变长时隙分配方案分配时隙与相干时长尽量匹配的原则, 对于任一个终端 k 而言式(3)可以写成:

$$R_{\text{waste}}^k = \min \{ |T^k - T_{\text{slot}}^k| \} \quad (7)$$

其中, T_{slot}^k 表示根据终端移动速度为第 k 个终端分配的时隙长度。为低速移动终端分配较长的时隙, 从而延长了此类用户的频带使用时间, 减少信道估计的频率和导频序列的开销。为快速移动终端分配短的时隙以匹配其较短的相干时长从而避免了分配的固定物理时隙长度大于信道相干时长

时,造成的时频资源的浪费。

因此,根据传统的定长时隙分配系统和本文提出的可变长时隙分配系统的原则,比较定长和变长时隙分配方案中的资源浪费情况,由式(3)和式(7)可以得到二时隙分配方案中资源不匹配情况的比较可表示为:

$$R_{\text{waste}}^{\text{sum}} = R_{\text{waste}}^1 + R_{\text{waste}}^2 + \dots + R_{\text{waste}}^K < R_{\text{waste}} \quad (8)$$

即在变长时隙分配方案中总的资源不匹配量少于传统定长时隙分配方案中的资源不匹配情况。

4 实验仿真分析

实验进行 2000 次计算机仿真,将得到的结果取平均值,以消除单次实验的误差,验证本文所提出的大规模 MIMO 中用户分层变长时隙分配方法在提高系统时频资源利用的有效性。实验中先根据移动终端的速度和其所对应信道的相干时长,为不同层用户灵活地分配物理时隙长度,然后对实验仿真结果进行分析。实验参数配置情况如表 1 所示。

表 1 实验参数配置

Tab.1 Experiment parameters configuration

参数	实验值
天线数	32
终端总数	8
下行功率/dBm	20
上行功率/dBm	10
信号载频/MHz	1900
阈值 B /ms	0.1
导频处理 p /ms	0.025
补充时隙因子 n	2

实验设计如下:基站处配置的天线数为 32,小区内 有 8 个独立的单天线用户,其中包括高速移动和低速移动用户,实验中用户的移动速度在 $[0, 300 \text{ km/h}]$ 之间随机均匀分布。按照图 6 的结果,本文设定 0.1 ms 为基本时隙阈值单元,根据不同终端的相干时长,按比例调整分配给不同终端的物理时隙长度,即 $T_{\text{slot}}^i = NB$, $N = 1, 2, 3, \dots, i = 1, 2, 3, \dots, K$ 例如,当移动终端以 100 km/h 移动时,由图 6 可知,对应信道的相干时长为 0.26 ms ,所以为该用户分配的物理时隙长度为 3 倍基本时隙。由图 6 可知,移动速度大于 200 km/h 的高速移动用户(比如动车上的终端),信道的相干时长仅为 0.1 ms ,与其匹配的物理时隙仅为基本的时隙长度 B ,考虑到上下行切换时控制信令的交互,从上、下行切换的稳健性角度考

虑,为移动速度大于 70 km/h 终端分配补充时隙 $T_0 = nB$ 。因此,为此类终端分配的最终实际的时隙长度为匹配时隙 T_{slot} 和补充时隙 T_0 长度之和。

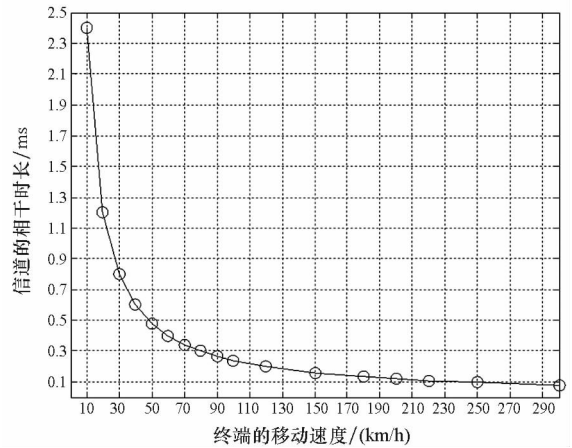


图 6 终端移动速度与对应信道相干时长的关系

Fig. 6 Relationship between user's mobility and channel coherence interval

为了获得最大多普勒频移 Δf_m 情况,基站与移动终端的连线到速度方向的夹角 θ 取为 0 。按照图 6 终端的移动速度和其所对应信道的相干时长的关系,根据信道不同的相干时长为不同速度的用户层动态地设定不同长度的时隙(以阈值 B 为衡量基准)。

图 7 中显示的根据图 6 的对应关系给不同运动速度的终端层动态地分配不同长度的时隙。图 7 所示的分配的时隙长度不含补充时隙部分。在大规模 MIMO 系统中,基站配置大量天线的一个优势在于能够很好地分辨小区内终端的位置,因此,基站根据终端相邻两次发送上行的导频时的位置能够判断出终端的移动速度。对于室内或者慢速用户,其移动速度 10 km/h 以下,由图 6 可知,对应信道的相干时长达 2.5 ms 以上,故为其

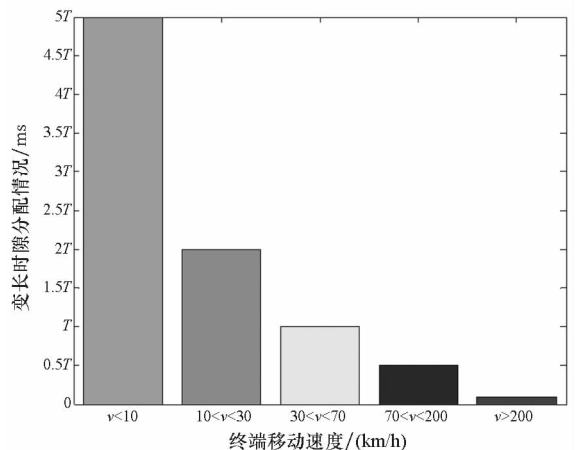


图 7 根据终端速度分配变长时隙

Fig. 7 Various slot intervals based on users movement speed

配 25 倍基准时隙长度,其余也按照用户的移动情况,即所对应信道的相干时长灵活地为其分配物理时隙长度,如图 7 所示。因此,通过对用户进行分层,然后灵活地为其分配变长度的物理时隙以最大化匹配其所对应信道的相干时长,从而大大地提高系统时频资源的利用率。

如图 8 所示,在传统的定长物理时隙,本文提出的用户分层变长时隙和用户的物理时隙与其所对应的相干信道理想匹配的情况下,小区在单位时间内的总体数据速率的分布图 (Cumulative Distribution Function, CDF)。由图 8 可知,根据终端对应的信道相干时间灵活地分配时隙长度的方法,取得的单位时间内小区数据速率和定长时隙分配的传统方法相比有明显的提升。而且,本文提出的方法可以取得与理想的时隙匹配时非常接近的数据速率结果,即当对用户分层并为其灵活地分配变长时隙时,时频资源的利用率逼近理想的时隙分配时的时频资源利用率。

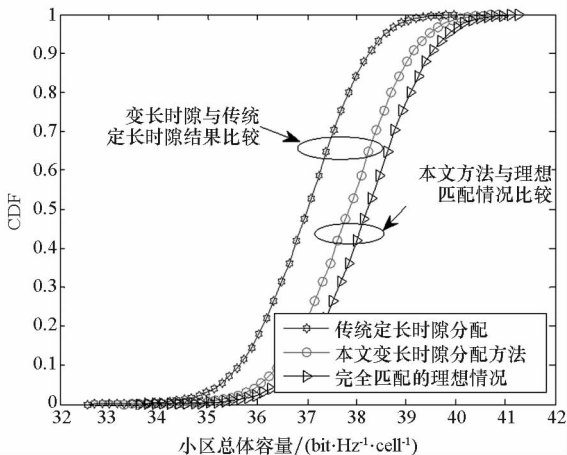


图 8 不同情况下小区总体容量的分布

Fig. 8 CDF of the cell capacity under different conditions

图 9 所示为当基站对终端的移动速度存在错误估计情况下的小区总容量的统计图,由图可知,在当前实验配置情况下,存在 5% 和 10% 终端速度估错时和理想的全部正确估计的情况相比,小区总体容量有细微的减少。因为当终端的移动速度估错时,根据估计速度计算得到的相干时长和终端实际的相干时长存在偏差,导致为其分配的时隙长度和实际应该匹配的长度不同,从而造成一定量的时频资源的浪费,所以小容量会有所降低。

此外,由于不同终端分配的时隙长度不同,而导致不同终端上、下行切换的时间点不同,终端之间上、下行数据的异步性。根据文献[1,4],即使采用简单的线性预编码方法(最小均方误差,

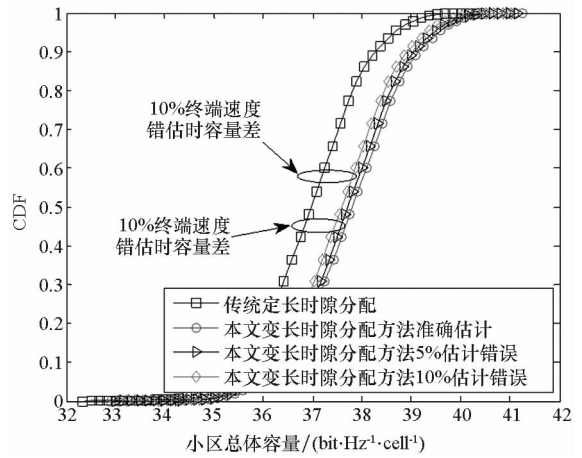


图 9 存在终端速度错误估计时小区总体容量的分布

Fig. 9 CDF of the cell capacity with wrong estimation of rate

迫零等算法)发送信号,利用匹配滤波器算法接收信号,当基站处天线数量增多时,不同终端发送的同向信号之间不相关的干扰和热噪声很容易被平均掉。在本文方法中,由于不同终端上、下行两个方向之间信号的相关性不会大于不同终端同向信号间的相关性。所以,本文方案中可能出现的不同终端上、下行信号间的不相关的干扰在大规模 MIMO 系统中很容易被滤除掉。

5 结论

本文提出了一种用户分层变长时隙分配方法,即根据终端的移动速度进行分层,进而根据终端对应信道的相干时长灵活地为终端分配变长的物理时隙,从而提高了时频资源的利用率。仿真结果证明,本文提出的变长时隙分配方案比传统的定长时隙分配方案有着明显的小区整体容量的提升,而且时频资源的利用率逼近物理时隙和相干时长在理想匹配情况下的系统时频资源的利用率。即使当对终端的移动速度存在一定比例的错估时,本文方法仍然比传统方法有很大的优越性。

参考文献 (References)

- [1] Marzetta T L. Massive MIMO: an introduction[J]. Bell Labs Technical Journal, 2015, 20(2): 11-22.
- [2] Ma Z, Zhang Z Q, Ding Z G, et al. Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives [J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(4): 1-20.
- [3] Björnson E, Larsson E G, Marzetta T L. Massive MIMO: 10 myths and one grand question [J]. IEEE Communications Magazine, arXiv preprint arXiv:1503.06854, 2015.
- [4] Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless system [J]. IEEE Journal on Communication Magazine, 2014, 52(2): 186-195.

- [5] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD system [J]. *IEEE Transaction on Wireless Communication*, 2011, 10 (8): 2640 – 2651.
- [6] Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 160 – 171.
- [7] Thomas L M. How much training is required for multiuser MIMO? [C]//*Proceedings of Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2006: 359 – 363.
- [8] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61 (4): 1436 – 1449.
- [9] Marzetta T L. Non-cooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590 – 3600.
- [10] Zhang J H, Yin X F, Cheng X. Theoretical analysis and measurements: Doppler spectra of vehicular communication channels [C]//*Proceedings of 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2012: 98 – 102.
- [11] Gomadam K S, Papadopoulos H C, Sundberg C E W. Techniques for multi-user MIMO with two-way training [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communication*, 2008: 3360 – 3366.
- [12] 王海红, 王欣, 魏急波. 时分双工 MIMO 放大转发中继系统中下行链路的联合鲁棒设计 [J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(4): 87 – 92.
WANG Haihong, WANG Xin, WEI Jibo. Joint robust design for TDD MIMO amplify-and-forward relay downlink systems [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(4): 87 – 92. (in Chinese)
- [13] Ngo H Q. Massive MIMO: fundamentals and system designs [M]. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2015: 1 – 67.
- [14] Li L B, Ashikhmin A, Marzetta T. Pilot contamination precoding for interference reduction in large scale antenna systems [C]//*Proceedings of Fifty-first Annual Allerton Conference Allerton House*, 2013: 226 – 232.
- [15] 高鹏, 赵培, 陈庆寿. 3G 技术问答 [M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
GAO Peng, ZHAO Pei, CHEN Qingshou. Query and answer for 3G [M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011. (in Chinese)