

## 基于阵列域大尺度衰落模型的1-bit大规模MIMO系统性能的分析

刘 留<sup>\*①②</sup> 李泳志<sup>①</sup> 陶 成<sup>①②</sup> 陈后金<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(北京交通大学宽带无线移动通信研究所 北京 100044)  
<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 211189)

**摘 要:** 该文研究在阵列域大尺度衰落模型下, 基站端天线仅仅配备了1-bit精度的模数转换器时大规模MIMO系统的性能。首先给出了系统采用最大比合并接收机时, 用户上行可达速率的闭式表达式。然后分析了1-bit系统的功率效率性能, 并将该1-bit系统与传统的具有无穷精度模数转换器的系统性能相比较。通过计算机仿真验证了该文的分析结果。该文指出基站端可以安装更多的天线来弥补1-bit精度的模数转换器所造成的性能损失。

**关键词:** 大规模MIMO; 1-bit量化; 阵列域大尺度衰落模型; 最大比合并; 可达速率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)06-1515-05

DOI: 10.11999/JEIT161248

## Performance Analysis for One-bit Massive MIMO Systems Based on Large Scale Fading Model in Antenna-array Domain

LIU Liu<sup>①②</sup> LI Yongzhi<sup>①</sup> TAO Cheng<sup>①②</sup> CHEN Houjin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Broadband Wireless Mobile Communications, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Based on the large scale fading channel model in antenna-array domain, this paper investigates the uplink performance for a massive MIMO system, where each antenna is equipped with one-bit Analog-to-Digital Converters (ADCs). A closed-form expression for the uplink achievable rate with Maximum Ratio Combining (MRC) receiver is derived, and the power efficiency performance, as well as the comparison between the one-bit systems and the conventional system with infinite resolution ADCs are investigated. Numerical results are presented to verify the analytical results.

**Key words:** Massive MIMO; One-bit quantization; Large scale fading model in antenna-array domain; Maximum ratio combining; Achievable rate

### 1 引言

目前, 大规模MIMO技术得到了研究人员的广泛关注<sup>[1]</sup>。该技术主要是通过通过在基站端配备上百根天线来同时服务数十个用户。文献[2]指出增加天线数量对大规模MIMO的信噪比的影响和对传统的无线通信系统信噪比的影响作用不同。当满足“适宜传播”<sup>[2]</sup>时, 基站天线趋近于无穷多时, 利用简单的

线性接收机可以消除系统热噪声、多用户干扰噪声, 增强系统信噪比。

至今, 已有大量的文献对大规模MIMO技术进行了详尽的分析, 包括上行链路接收机和下行链路预编码设计, 同时, 研究人员也正在对系统从降低成本角度展开研究和探索, 其中, 低精度量化已经成为重要的研究方向。目前已经有部分文献研究了1-bit MIMO系统的性能<sup>[3-5]</sup>。文献[4]中证明在低信噪比下, 1-bit MIMO系统的功率损失仅为具有无穷量化精度的MIMO系统的 $2/\pi$ 倍(约1.96 dB)。由于大规模MIMO技术可以使得系统在较低的信噪比下获得较高的频谱效率。因此, 将1-bit精度的ADC和大规模MIMO技术相结合, 不会使系统遭受严重的量化噪声干扰。

文献[6,7]已经分析了1-bit大规模MIMO系统在典型传播场景的性能, 然而, 已发表文献中, 部分文献仅考虑了信道的小尺度衰落, 部分文献假设每根天线阵元经历了相同的大尺度衰落。在实际系统中, 由于基站端配备了超过100副的天线阵元,

收稿日期: 2016-11-16; 改回日期: 2017-03-06; 网络出版: 2017-04-06

\*通信作者: 刘留 liuliu@bjtu.edu.cn

基金项目: 北京市科技新星计划(Z161100004916068), 中央高校基本科研业务费专项资金(2017JBM306), 国家自然科学基金(61471027), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2014D05, 2017D01), 北京市自然科学基金(4152043)

Foundation Items: Beijing Nova Programme (Z161100004916068), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017JBM306), The National Natural Science Foundation of China (61471027), The Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2014D05, 2017D01), Beijing Natural Science Foundation Project (4152043)

若采用线性阵列将大大增加基站端天线的尺寸,从而使不同天线阵元所经历的大尺度衰落不同,这种现象也从现场实测数据中得到验证,并提出了阵列域大尺度衰落模型<sup>[8]</sup>。

为了更准确地分析 1-bit 大规模 MIMO 系统的性能,本文考虑使用阵列域大尺度衰落模型,研究 1-bit 大规模 MIMO 系统的上行链路的传输性能。本文首先利用 Bussgang 分解法将非线性量化函数转换为线性函数。然后通过严格地推导,得出了基站端采用最大比合并接收机时,用户上行可达速率的闭式表达式。基于该闭式表达式,本文对 1-bit 大规模 MIMO 系统的功率效率进行分析。最后,通过与传统的大规模 MIMO 系统相对比,本文指出:1-bit 系统中由量化噪声引起的性能损失可以通过在基站端安装更多的天线来弥补。

## 2 系统模型

### 2.1 系统构架与信道模型

本文考虑如图 1 所示的大规模 MIMO 系统的上行链路。该系统中有  $K$  个单天线用户和一个配备有  $M$  根接收天线的基站,其中  $M \gg K$ 。不同于传统的大规模 MIMO 系统,本文假设基站端每根接收天线均配备了两个 1-bit 量化的模数转换器(ADC)来分别对接收信号的实部和虚部进行量化。

假设  $K$  个用户在同一个时频资源上向基站端传递信号,则基站端所接收到的模拟信号向量为

$$\mathbf{y}_u = \sqrt{p_u} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n}_u \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  表示基站端到  $K$  个用户之间的信道矩阵,  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$  表示  $K$  个用户同时发送的信号向量,  $p_u$  表示每个用户的平均发射功率,  $\mathbf{n}_u$  表示均值为 0 的加性高斯白噪声。为了便于分析且不失一般性,本文假设噪声向量中每个元素的方差为 1。

由于基站端每根接收天线都配备了 1-bit 量化的 ADC,因此基站端所得到的数字信号可以表示为

$$\mathbf{r}_u = \mathcal{Q}(\mathbf{y}_u) = \mathcal{Q}(\sqrt{p_u} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n}_u) \quad (2)$$

其中,  $\mathcal{Q}(\cdot)$  函数表示 1-bit 量化函数。

### 2.2 阵列域大尺度衰落模型

一般地,大规模 MIMO 系统的信道矩阵包含了相互独立的小尺度衰落和大尺度衰减(路损和阴影),可表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} \bar{\mathbf{D}}^{1/2} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{H} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I}) \in \mathbb{C}^{M \times K}$  表示基站端与  $K$  个用户之间的小尺度衰落矩阵,  $\bar{\mathbf{D}} \in \mathbb{C}^{K \times K}$  表示大尺度对角阵,包含了  $K$  个用户的路损和阴影衰落。

在实际系统中,由于大规模 MIMO 系统中的天线阵列尺寸较大,不同的天线阵元将经历不同大尺度衰落、功率损失和阴影衰落。针对这个问题,文献[8,9]提出了一种阵列域大尺度衰落模型,表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} \circ \mathbf{D}^{1/2} \quad (4)$$

其中,  $\circ$  表示 Hadamard 乘积,  $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  表示大尺度对角阵。与传统信道模型不同的是,式(4)中的大尺度矩阵  $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  考虑了每个天线阵元所经历的大尺度衰落,其第  $(m, k)$  个元素可以表示为  $[\mathbf{D}]_{m,k} = \eta_{mk}$ 。通过使用对数正态阴影衰落和路径损耗模型,可以将  $\eta_{mk}$  表示为

$$\eta_{mk} = X_k \left[ (r_0)^n / (r_{mk})^n \right] \quad (5)$$

其中,  $X_k$  为第  $k$  个用户到基站端的阴影衰落,  $r_{mk}$  表示第  $k$  个用户到基站端的距离,  $r_0$  为参考距离,  $n$  为路径衰落指数。使用基于阵列域大尺度衰落模型可以更准确地分析该系统的性能。

## 3 频谱效率性能分析

目前已经有大量文献对大规模 MIMO 系统的

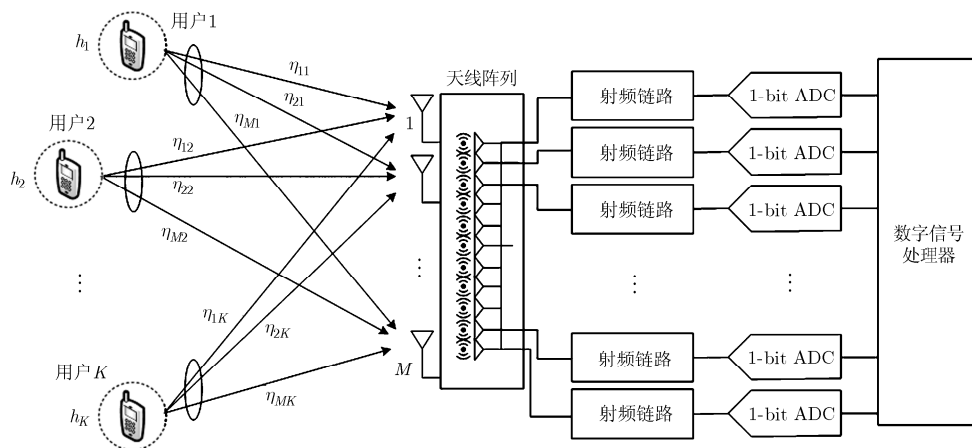


图 1 基于阵列域大尺度衰落模型的 1-bit 大规模 MIMO 系统构架

性能进行分析研究。但是这些文献均忽略了实际系统中1-bit精度模数转换器对系统性能的影响。本节将采用2.2节中的阵列域大尺度衰落模型，研究基站端采用最大比合并接收机情况下时，1-bit量化大规模MIMO系统中用户上行可达速率。

假设 $\mathbf{W}$ 表示基站端采用的线性接收机矩阵。根据式(2)，基站端所检测出的信号可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}\mathbf{r}_u = \mathbf{W}\mathcal{Q}(\sqrt{p_u}\mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{n}_u) \quad (6)$$

由于1-bit量化仅仅保留了输入信号的正负符号值，因此 $\mathcal{Q}(\cdot)$ 是一个非线性函数。为了方便分析，可以将该非线性函数分解为线性函数，即

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}(\sqrt{p_u}\mathbf{A}_u\mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{A}_u\mathbf{n}_u + \mathbf{q}_u) \quad (7)$$

接下来，本文将介绍一种有效的分解方法，即Bussgang分解法。

### 3.1 下行可达速率

Bussgang分解法的主旨在于，选择一个增益矩阵 $\mathbf{A}_u$ ，使得量化噪声 $\mathbf{q}_u$ 功率最小，即

$$\arg \min_{\mathbf{A}_u} \mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{q}_u\|_2^2 \right\} = \arg \min_{\mathbf{A}_u} \mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{r}_u - \mathbf{A}_u\mathbf{y}_u\|_2^2 \right\} \quad (8)$$

通过对式(8)求解，增益矩阵 $\mathbf{A}_u$ 可以表示为

$$\mathbf{A}_u = \mathbf{C}_{r_u y_u} \mathbf{C}_{y_u}^{-1} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{C}_{r_u y_u}$ 表示量化信号 $\mathbf{r}_u$ 和接收信号 $\mathbf{y}_u$ 的相关矩阵， $\mathbf{C}_{y_u}$ 表示接收信号 $\mathbf{y}_u$ 的协方差矩阵。进一步地，对于高斯随机输入信号，量化输出信号与量化输入信号之间的协方差矩阵可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{C}_{r_u y_u} = \sqrt{2/\pi} \text{diag}(\mathbf{C}_{y_u})^{-1/2} \mathbf{C}_{y_u} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)，因此对于高斯随机输入信号，增益矩阵 $\mathbf{A}_u$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_u &= \sqrt{2/\pi} \text{diag}(\mathbf{C}_{y_u})^{-1/2} \\ &= \sqrt{2/\pi} \text{diag}(p_u \mathbf{G}\mathbf{G}^H + \mathbf{I})^{-1/2} \cong \sqrt{2/\pi} \mathbf{Z}^{-1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

其中，矩阵 $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为对角矩阵，其第 $m$ 个对角元素可以表示为 $z_m = p_u \sum_{k=1}^K \eta_{mk} + 1$ 。需要注意的是，由于通常假设在大规模MIMO系统中，基站端天线数和用户数很大，即 $M \gg K \gg 1$ ，因此式(11)中的近似符号成立。

### 3.2 上行可达速率分析

由于上行可达速率是衡量小区性能的一个重要指标，本节中假设基站端具有完整的信道状态信息，并分别给出了基站端采用最大比合并接收机时的上行可达速率表达式。

根据Bussgang分解法和式(7)，基站端检测出第 $k$ 个用户的数据符号可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \sqrt{p_u} \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k x_k + \sqrt{p_u} \mathbf{w}_k^H \sum_{l \neq k}^K \mathbf{A}_u \mathbf{g}_l x_l \\ &\quad + \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{n}_u + \mathbf{w}_k^H \mathbf{q}_u \end{aligned} \quad (12)$$

其中， $x_l$ 表示向量 $\mathbf{x}$ 的第 $l$ 项， $\mathbf{w}_k$ 表示矩阵 $\mathbf{W}$ 的第 $k$ 列。文献[10]已经证明，呈高斯分布的噪声将最小化输入信号与输出信号的互信息。因此本文将量化噪声 $\mathbf{q}_u$ 建模为协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_{q_u} = \mathbf{C}_{r_u} - \mathbf{A}_u \mathbf{C}_{y_u} \mathbf{A}_u^H \quad (13)$$

的高斯噪声，以此来得到系统上行可达速率的下界。因此第 $k$ 个用户的遍历可达速率可以表示为

$$R_k = \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{p_u |\mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k|^2}{p_u \sum_{l \neq k}^K |\mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_l|^2 + \|\mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u\|_2^2 + \mathbf{w}_k^H \mathbf{C}_{q_u} \mathbf{w}_k} \right) \right\} \quad (14)$$

为了得到上行可达速率的闭式表达式，我们采用文献[11]中的方法，通过使用这种方法，式(12)中的检测信号可以重写为一个已知的平均信道增益乘以该用户的数据符号，加上一个非相关的有效噪声信号，如式(15)所示。

$$\hat{x}_k = \sqrt{p_u} \mathbb{E} \left\{ \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k \right\} x_k + \tilde{n}_k \quad (15)$$

其中， $\tilde{n}_k$ 为非相关的有效噪声信号，表示为

$$\begin{aligned} \tilde{n}_k &= \sqrt{p_u} \left( \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k - \mathbb{E} \left\{ \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k \right\} \right) x_k \\ &\quad + \sqrt{p_u} \mathbf{w}_k^H \sum_{l \neq k}^K \mathbf{A}_u \mathbf{g}_l x_l + \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{n}_u + \mathbf{w}_k^H \mathbf{q}_u \end{aligned} \quad (16)$$

此外，根据文献[7]得知，在低信噪比下，量化噪声可以近似为一个方差为 $1 - 2/\pi$ 的高斯随机向量。基于此，第 $k$ 个用户的上行可达速率可以表示为<sup>[7]</sup>

$$\tilde{R}_k = \log_2 \left( 1 + \frac{p_u \left| \mathbb{E} \left\{ \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k \right\} \right|^2}{p_u \text{Var} \left\{ \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_k \right\} + \text{UI} + \text{AQN}_k} \right) \quad (17)$$

其中， $\text{UI} = p_u \sum_{l \neq k}^K \mathbb{E} \left\{ |\mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_u \mathbf{g}_l|^2 \right\}$ ， $\text{AQN}_k = \mathbb{E} \left\{ \mathbf{w}_k^H \left( \mathbf{A}_u^2 + (1 - 2/\pi) \mathbf{I} \right) \mathbf{w}_k \right\}$ 。

本文首先给出引理1。

**引理 1** 当天线数 $M$ 趋于无穷大时，根据大数定理，有

$$\frac{1}{M} \mathbf{G}^H \mathbf{A}_u \mathbf{G} \xrightarrow{\text{a.s.}} \frac{1}{M} \mathbf{F} \quad (18)$$

其中， $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 是一个对角矩阵，第 $k$ 个对角项可以表示为 $\lambda_k = \sum_{m=1}^M \alpha_{u,m} \eta_{mk}$ ，其中 $\alpha_{u,m} = \sqrt{2/(\pi z_m)}$ 。

本文研究的是最大比合并线性接收机，其接收机矩阵表达式为 $\mathbf{W}_{\text{MRC}}^H = \mathbf{G}^H$ 。本文下一步给出第 $k$ 个用户的上行可达速率的闭式表达式。

**定理 1** 当系统采用最大比合并接收机时，第 $k$ 个用户的上行可达速率可以表示为

$$\tilde{R}_k = \log_2 \left( 1 + \frac{p_u \left( \sum_{m=1}^M \alpha_{u,m} \eta_{mk} \right)^2}{p_u \sum_{l=1}^K \sum_{m=1}^M \alpha_{u,m}^2 \eta_{ml} \eta_{mk} + \sum_{m=1}^M (\alpha_{u,m}^2 + 1 - 2/\pi) \eta_{mk}} \right) \quad (19)$$

### 3.3 性能分析

本节将利用 3.2 节所得到的上行可达速率表达式来对 1-bit 大规模 MIMO 系统性能进行分析。

**定理 2** 当基站端天线数  $M$  趋于无穷大时, 每个基站的发射功率可以降低  $M$  倍, 同时维持固定的系统频谱效率。此时, 系统的频谱效率收敛于

$$S \rightarrow \log_2 \left( 1 + \frac{2E_u}{\pi M} \sum_{m=1}^M \eta_{mk} \right) \quad (20)$$

其中,  $E_u$  表示某一固定值。

通过定理 2 可以看出, 即使在基站端配备简单的 1-bit 量化 ADC, 其仍可以通过配备大量的天线阵元来降低用户的发射功率同时维持固定的系统频谱效率不变。

此外, 本节还将研究如何来弥补 1-bit 精度模数转换器所带来的系统损失。

本文假设传统大规模 MIMO 系统中的基站天线数为  $M_\infty$ , 1-bit 大规模 MIMO 系统中的基站端天线数为  $M_1$ 。由于传统大规模 MIMO 系统中没有考虑不同天线所经历的不同大尺度衰落, 因此本文考虑将文献[2]中所得到的上行可达速率闭式解作为基准, 可以表示为

$$S_\infty = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{p_u M_\infty \beta_k}{p_u \sum_{l=1}^K \beta_l + 1} \right) \quad (21)$$

其中,  $\beta_k$  表示采用传统的平面波模型时, 第  $k$  个用户与基站端之间的大尺度衰落系数(这里认为天线阵列上面所有阵元经历的路损衰落和阴影衰落都相同)。为了比较传统大规模 MIMO 系统和 1-bit 大规模 MIMO 系统中的基站端天线数, 本文给出如式(22)所示优化问题:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\text{given } M_\infty} M_1 \\ \text{s.t. } S_1 = S_\infty \end{array} \right\} \quad (22)$$

其中,  $S_1$  可以通过式(19)得到, 即  $S_1 = \sum_{k=1}^K \tilde{R}_k$ 。

虽然无法得出式(22)中优化问题的闭式解, 但由于该优化问题仅仅包含单个变量, 因此本文使用线性搜索算法来对该问题进行求解。

## 4 计算机仿真与结果分析

本节将利用计算机仿真来验证上一节所得到的分

析结果。假设  $K = 10$  个用户均匀随机分布在一个半径 1000 m 的正六边形小区中, 且每个用户与基站端的距离不小于 100 m。假设传播信道的阴影衰落系数  $X_k$  服从标准差为 8 dB 的对数正态分布, 且路径损耗因子  $n = 3.8$ 。

图 2 比较了 1-bit 大规模 MIMO 系统中, 基站端采用最大比合并接收机时, 不同接收天线数与系统上行可达和速率的关系。图 2 中实线部分是由蒙特卡洛法, 即式(14)得到, 而虚线部分由本文所得到的上行可达速率闭式表达式, 即式(19)得到。从图 2 中可以看出, 虚线仿真曲线几乎与实线重合。这验证了本文所得到上行可达速率的闭式表达式的正确性, 并表明该闭式表达式可以用来衡量并分析 1-bit 大规模 MIMO 系统所能达到的频谱效率性能。

图 3 揭示了当用户端发射功率随天线数增加而呈比例降低时, 系统上行可达速率与天线数的关系。本文假设  $E_u = 0$  dB。图中的实线通过将  $p_u = E_u / M$  代入(19)式得到, 而“收敛和速率”则是通过(20)式得到。从图中可以看出, 即使基站端配备了 1-bit 量化的模数转换器, 且用户端的发射功率随着基站天线数的增加而降低, 系统仍可以维持一个固定的可达和速率。

图 4 比较了当 1-bit 大规模 MIMO 系统达到传统系统所能达到的和速率时, 基站端需要配备的天线数的累积分布概率。其中实线、点线、点-虚线分别表示  $M_\infty = \{32, 64, 128\}$  的情况。从图 4 可以看出, 为了达到传统系统所能达到的和速率, 需要在 1-bit 大规模 MIMO 系统中至少安装 1.58 倍(即  $M_1$  分别等于 51, 101, 202)的天线, 以此来消除 1-bit 量化模数转换器所造成的性能损失。此外, 从图 4 还可以看出, 若在基站端安装 2.50 倍(即  $M_1$  分别等于 90, 155, 301)的天线, 1-bit 大规模 MIMO 系统可以以 90% 的概率来达到传统系统的和速率。

## 5 结束语

本文研究了基于阵列域大尺度衰落模型的 1-bit 大规模 MIMO 系统中用户上行可达速率的性能。文中利用阵列域大尺度衰落模型, 通过利用 Bussgang 分解法, 推导出采用最大比合并接收机的系统上行可达速率的闭式表达式。根据该闭式表达式, 本文分析了系统的功率效率。最后通过将 1-bit 系统

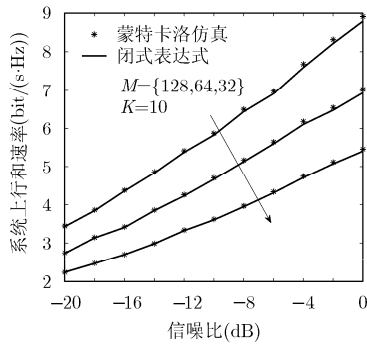


图2 系统上行和速率随信噪比的变化曲线

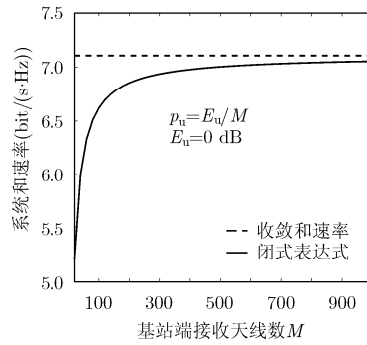


图3 系统上行和速率随基站端天线数的变化曲线

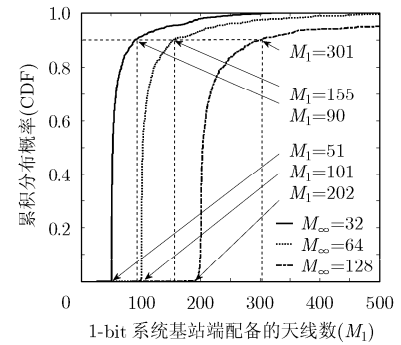


图4 1-bit大规模MIMO系统达到传统大规模MIMO系统的和速率时，基站端需要配备的天线数的累积分布概率

的性能与传统的具有无穷精度模数转换器的系统的性能相对比，本文指出：1-bit系统可以通过在基站端安装1.58~2.50倍的天线数来弥补由量化噪声所造成的性能损失。大规模MIMO巨幅提高基站端的空间自由度，以此提高基站端的天线增益，从而提高系统的频谱效率和功率利用率。

### 参考文献

- [1] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590-3600. doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [2] NGO H Q, LARSSON E G, and MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(4): 1436-1449. doi: 10.1109/TCOMM.2013.020413.110848.
- [3] MEZGHANI A and NOSSEK J A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output[C]. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, 2008: 260-264.
- [4] NOSSEK J A and IVRLA M T. Capacity and coding for quantized MIMO systems[C]. *International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*, ACM, 2006: 1387-1392.
- [5] SINGH J, DABEER O, and MADHOW U. On the limits of communication with low-precision analog-to-digital conversion at the receiver[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 52(12): 3629-3639. doi: 10.1109/TCOMM.2009.12.080559.
- [6] MOLLÉN C, CHOI J, LARSSON E G, et al. Uplink performance of wideband massive MIMO with one-bit ADCs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(1): 87-100. doi: 10.1109/TWC.2016.2619343.
- [7] LI Y, TAO C, LIU L, et al. Channel estimation and uplink achievable rates in one-bit massive MIMO systems[C]. *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, Rio de Janeiro, 2016: 1-5.
- [8] LIU L, MATOLAK D W, TAO C, et al. Geometry based large scale attenuation over linear massive MIMO systems[C]. *European Conference on Antennas and Propagation*, Davos, 2016: 1-5.
- [9] LIU L, MATOLAK D W, TAO C, et al. Channel capacity investigation of a linear massive MIMO system using spherical wave model in LOS scenarios[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2): 1-15. doi: 10.1007/s11432-015-5512-6.
- [10] HASSIBI B and HOCHWALD B M. How much training is needed in multiple-antenna wireless links?[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(4): 951-963. doi: 10.1109/TIT.2003.809594.
- [11] JOSE J, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2640-2651. doi: 10.1109/TWC.2011.060711.101155.

刘 留：男，1981年生，副教授，研究方向为大规模MIMO、信道测量与建模、1-bit量化。

李泳志：男，1990年生，博士生，研究方向为大规模MIMO、1-bit量化、信号处理。

陶 成：男，1963年生，教授，博士生导师，研究方向为无线通信、MIMO、扩频通信。

陈后金：男，1965年生，教授，博士生导师，研究方向为数字信号处理、复杂系统建模与仿真。