

莱斯信道下大规模 MIMO 系统混合模数转换器的随机向量量化方案^①

谢斌^② 刘述睿 谢舒闽

(江西理工大学信息工程学院 赣州 341000)

摘要 针对大规模 MIMO 系统用配置单精度模数转换器(ADC)来降低系统能耗会导致系统损失部分性能的问题,提出了一种莱斯信道下大规模 MIMO 系统的采用混合 ADC 的随机向量量化(RVQ)改进方案。该方案在频分双工模式下,首先在基站端采用高分辨率 ADC 和低分辨率 ADC 混合的接收方案处理信号,使接收的导频信号和有用信号具有较高的转换精度;系统对导频信号进行信道估计后,再对信道状态信息(CSI)进行 RVQ 处理,以此减小系统的反馈开销;最后运用最小均方误差(MMSE)信号检测算法减轻由量化误差引起的用户间干扰,从而达到降低能耗并减小系统性能损失的目的。实验结果表明,这种改进的 RVQ 方案能在降低系统能耗的基础上有效减小系统容量损失,并使其和速率接近传统的高分辨率 ADC 接收方案。

关键词 大规模 MIMO, 模数转换器(ADC), 能耗, 随机向量量化(RVQ), 和速率

0 引言

目前,由于无线移动通信设备的数量呈现快速增长的趋势,人们对无线移动通信系统的传输速率也提出了更高的要求。2010 年,贝尔实验室提出了一种大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术^[1],通过在基站端集成数量众多的天线来充分挖掘无线空间的自由度。与传统 MIMO 系统相比,大规模 MIMO 技术可以使系统的传输速率和频谱效率提升几个数量级^[2]。因此,大规模 MIMO 技术成为下一代 5G 移动通信系统的核心技术而受到了研究者的广泛关注。在大规模 MIMO 系统中,基站端集成了大规模天线阵列,每根天线射频(radio frequency, RF)端口配置的高分辨率的模数转换器(analog to digital converter, ADC),这将直接导致系统的能量消耗大幅增加,从而降低了大规模 MIMO 系统的适用性和经济性^[3]。另外,在时分双

工模式下,由于上下行链路具有信道互易性,系统通过上行信道的导频信号完成下行链路的信道状态信息(channel state information, CSI)估计^[4],使系统的反馈开销不会随着天线数增大而增加。然而在大规模 MIMO 频分双工(frequency division duplexing, FDD)系统中,因为上行链路和下行链路分别采用两个独立的信道进行信息传输,使基站需要通过接收端的反馈来获取信道状态信息(CSI)^[5],所以当基站端的天线数较多时,系统的反馈开销将处于较高水平,进而对系统性能产生不利影响。因此,如何在降低系统能耗基础上减小系统的性能损失,成为了人们的研究重点^[6]。本文针对这个重点问题进行了研究,并给出了相应研究结果。

1 相关工作

为有效降低大规模 MIMO 系统的能耗,一些学者采用了功率控制和资源分配等方法,文献[7]给

^① 国家自然科学基金(61363076)和江西省自然科学基金(20142BAB207020)资助项目。

^② 男,1977 年生,硕士,副教授;研究方向:大规模 MIMO 技术,信号处理;联系人,E-mail: xiebin-66@163.com
(收稿日期:2017-01-27)

出了一种基于瑞利衰落模型的单小区大规模 MIMO 系统,通过对用户的发送功率和导频功率进行有效分配来降低系统的能量消耗,然而瑞利信道模型只能作为一种特殊的信道模型,忽略了基于毫米波的大规模 MIMO 系统中存在较多直射信号的情况。文献[8]提出了一种基于联合用户分组及天线选择的算法,首先将用户按信道条件进行分组,再选择信道条件较好的一组用户来接收信号,并为每一个用户发送的信号选择最优的基站天线组合进行发射,以此减小大规模 MIMO 系统射频电路的成本与功耗。文献[9]在研究大规模 MIMO 系统资源分配问题的基础上,给出了能效最优的迭代算法,但该算法包含多层迭代,计算复杂度相对较高。

考虑到传统大规模 MIMO 系统中都配置了高精度模数转换器,随着基站天线数的增大,系统的能耗也随之增大。因此,在系统配置高精度模数转换器(ADC)的情况下,传统功率控制和资源分配等算法对降低系统功耗的能力较为有限。为解决这个问题,一些学者对模数转化器展开了相关研究^[10]。文献[11]、文献[12]提出了基于单精度 ADC 接收的大规模 MIMO 系统,由于可以在接收端省略自动增益控制器(automatic generation control, AGC),避免了大量的功率消耗,从而达到大幅降低系统能耗的目的,然而低分辨率的 ADC 将使系统存在非线性失真的问题,导致系统在高信噪比时损失容量。对于文献[11]、文献[12]中存在的问题,文献[13]提出了一种基于频分双工(FDD)模式下的混合 ADC 接收方案,通过采用高分辨 ADC 与低分辨率 ADC 相结合的接收方案来提高信号的转换精度,并通过最大比合并(maximum ratio combining, MRC)的信号检测算法减小用户间干扰,从而提高了系统容量,但 MRC 信号检测算法对消除用户间干扰的能力较差,并且没有考虑到 FDD 模式下系统反馈开销较大对系统容量产生的负面影响。文献[14]给出了一种有限反馈下的大规模 MIMO 频分双工系统,在传统的配置高分辨率 ADC 的情况下,通过对信道状态信息(CSI)进行随机向量量化(residual vector quantization, RVQ)来减小系统的反馈开销,并分析了反馈比特数对系统性能增益的影响。另外,考虑到文

献[11-14]都是基于瑞利衰弱信道模型下展开的相关研究,然而在大规模 MIMO 系统中,信号通常利用毫米波进行传输,由于毫米波的传播具有较高的方向性和准光特性^[15],使系统中存在较多的直射分量,因此基于瑞利信道模型下对大规模 MIMO 系统进行分析具有一定的局限性。

针对上述如何在降低能耗基础上减小性能损失的问题,本文提出了一种莱斯信道下大规模 MIMO 系统混合 ADC 的随机向量量化(RVQ)改进方案。假设基站端和接收端的信道为莱斯信道,在非理想 CSI 的情况下,本研究首先通过采用高分辨率 ADC 和低分辨率 ADC 混合的接收方案处理信号,从而使信号具有较高的转换精度,再对 CSI 进行 RVQ 来减小系统的反馈开销,最后运用 MMSE 信号检测算法来减轻用户间干扰。仿真结果表明,在 FDD 工作模式下,本文所提改进方案能有效减小反馈开销和提升系统容量,从而实现了在降低能耗基础上大幅减小系统的性能损失,并且使该改进方案的和速率接近传统的高精度 ADC 设计方案。

2 大规模 MIMO 系统模型

2.1 系统传输模型

大规模 MIMO 单小区混合 ADC 接收方案的通信系统模型如图 1 所示。本文仅考虑上行链路的情

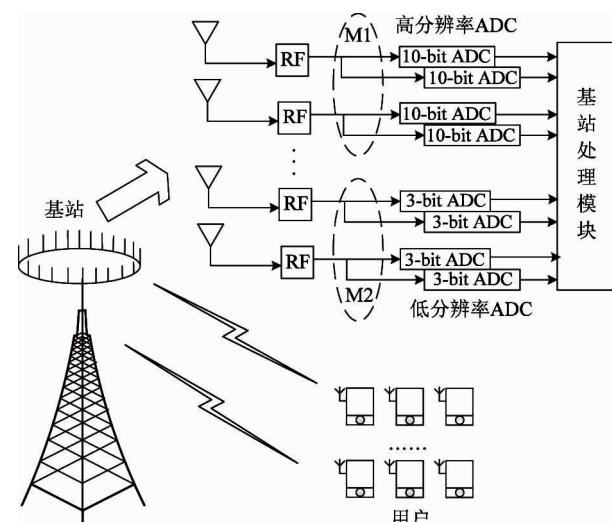


图 1 大规模 MIMO 单小区混合 ADC 通信系统

况,假设基站端的大规模天线阵列集成了 M 根发射天线,与 N 个单天线用户进行实时数据通信,并且存在 $M \geq N$ 的关系。另外,系统采用 FDD 的工作模式,即上行链路和下行链路采用不同的信道进行信息的传输,基站需要根据上行链路的反馈获知 CSI^[16]。

由图 1 可知,在目标小区中,基站处理模块通过配置高分辨率 ADC 和低分辨率 ADC 混合的接收装置来代替传统全部配置高分辨率 ADC 的接收机,其中 M_1 为配置高分辨率 ADC 的端口个数, M_2 为配置低分辨率 ADC 的端口个数。假设基站与用户之间的信道为快衰落莱斯信道,则信道矩阵 \mathbf{G} 表示为

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

式中,对角矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示信道的大尺度衰落因子,对角元素为 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$, $\boldsymbol{\beta} = Z_n r_n^{-\gamma}$ 表示信道模型的路径损耗和阴影衰弱系数,其中 Z_n 为对数正态随机变量, r_n 为用户至基站的距离, γ 为阴影衰弱系数。 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示信道的小尺度衰弱因子。另外,考虑系统采用混合 ADC 的架构模型,因此,信道矩阵 \mathbf{G} 可表示为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \mathbf{G}_1 为配置高分辨率 ADC 的信道矩阵, \mathbf{G}_2 为配置低分辨率 ADC 的信道矩阵。因此,基站端配置的 M_1 个高分辨率 ADC 接收的信号可表示为

$$y_1 = \sqrt{p_u} \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + n_1 \quad (3)$$

式中, p_u 为用户的平均发射功率, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为目标小区中 N 个用户的信号传输向量, $n_1 \sim CN(0, I_{M_1})$ 为服从独立分布的高斯白噪声。当采用低分辨率 ADC 接收信号时,信号需经过标准量化器来实现低分辨率转换,则基站端配置的 M_2 个低分辨率 ADC 接收的信号表示为

$$\begin{aligned} y_2 &= \mathbb{Q}(\tilde{y}_2) \approx \alpha \tilde{y}_2 + n_q \\ &= \sqrt{p_u} \alpha \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \alpha n_2 + n_q \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $n_2 \sim CN(0, I_{M_2})$ 为服从独立分布的高斯白噪声, n_q 表示加性高斯矢量量化噪声, $\mathbb{Q}(\cdot)$ 为标准量化函数, α 为量化比特数 b 相对应的量化精度值, 在量化比特数 $b \leq 5$ 时, 标准量化器为非线性量化, 其量化比特数 b 对应的量化精度值 α 如表 1 所示。

表 1 量化比特数 b 对应的量化精度值 α

b	1	2	3	4	5
α	0.6366	0.8825	0.9654	0.9905	0.9975

2.2 莱斯信道模型

在大规模 MIMO 系统中,考虑到基于毫米波传输的信道特点与具有丰富散射体环境的低频段信道不同。因此,为了体现毫米波信道具有较多直射分量的特性,文中采用莱斯信道模型^[17], 定义莱斯因子 K 为直射径分量与散射径分量的功率之比,假设目标小区中的第 n 个用户的莱斯因子为 K_n , 则信道的小尺度衰弱矩阵 \mathbf{H} 表示为

$$\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}}[\Omega(\Omega + \mathbf{I}_N)^{-1}]^{1/2} + \mathbf{H}_\omega[(\Omega + \mathbf{I}_N)^{-1}]^{1/2} \quad (5)$$

式中, \mathbf{I}_N 为单位矩阵, Ω 为对角矩阵, $\Omega_{nn} = K_n \bar{\mathbf{H}}$ 为信道中的直射径分量^[18], 可以表示为

$$\bar{\mathbf{H}} = \exp(-j \frac{2\pi\lambda}{d}(m-1) \sin\theta_{nk}) \quad (6)$$

式中, d 为基站天线之间的距离, $\lambda = 2d$ 表为波长, $\theta_{nk} \in (-\pi/2, \pi/2)$ 为目标小区中第 K 个用户到基站的到达角。另外,式(5)中的 \mathbf{H}_ω 为散射径分量, 并且为高斯随机变量, 矩阵 \mathbf{H}_ω 中的元素是服从独立分布, 其均值为 0, \mathbf{H}_ω 的实部与虚部的方差都为 $1/2$, 可以表示为^[19]

$$\mathbf{H}_\omega = \mathbf{C}^{\frac{1}{2}} \mathbf{A} \tilde{\mathbf{C}}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中, \mathbf{A} 为 $M \times 1$ 维的独立同分布高斯随机变量, 考虑到发射天线和接收天线空间相关性的影响, 矩阵 \mathbf{C} 和 $\tilde{\mathbf{C}}$ 都满足大于 0 的条件。

3 混合 ADC 的随机向量量化改进方案

很多学者对大规模 MIMO 系统的研究是在系统配置高分辨率数换转换器(ADC)的基础上进行的, 当系统基站端的天线数量增大到一定数量级时, 系统的能量消耗将大幅增加, 导致大规模 MIMO 系统的运行成本增大, 从而降低了系统的经济适用性。为降低系统能耗, 一方面部分算法通过传统功率控制方法减轻系统能耗, 或者采用优化的资源分配算法^[20], 但效果均不理想, 另一方面部分算法通过在

基站处理端配置单精度 ADC 来降低能耗,但由于单精度 ADC 转换精度较低,使系统存在误码率较大的问题,从而影响了系统容量。因此,部分学者提出了混合 ADC 的信号接收方案,通过采用高分辨率 ADC 与低分辨率 ADC 相结合的混合 ADC 架构来处理信号,以此提高信号的转换精度,但仅仅在瑞利信道模型下对混合 ADC 方案进行了性能分析,并且没有考虑到频分双工模式下系统反馈开销较大对系统性能产生的负面影响。另外,由于传统混合 ADC 接收架构中包含了低分辨率的模数转换器,与全高分辨率 ADC 接收相比,传统混合 ADC 接收信号的精确度更低,因此将使大规模 MIMO 系统的容量降低,从而降低了系统的和速率、频谱效率及能量效率。

基于上述考虑,本文提出了一种莱斯信道下大规模 MIMO 系统混合 ADC 的 RVQ 改进算法,在莱斯信道模型下,采用 10 位高分辨率 ADC 与 3 位低分辨率 ADC 相结合的接收方案处理信号,则基站接收的信号表示为

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \sqrt{p_u} \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + n_1 \\ \sqrt{p_u} \alpha \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \alpha n_2 + n_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知,系统采用混合 ADC 的接收方案使接收信号 y 具有较高的转换精度,从而减小了信道估计的误差。同时,为解决系统存在反馈开销过大的问题,本文采用基于码本的有限反馈技术来降低系统反馈开销,即对信道状态信息进行随机向量量化(RVQ),并将量化后的值反馈给基站端。该改进方案共采用 D 比特进行反馈,每个用户进行信道估计后采用 B/N 比特反馈信道信息至基站端。在有限反馈过程中,首先,在发射端和接收端需要预先定义一个包含多个码字的 RVQ 码本,共包含 2^M 个码字,分别为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{2^M}\}$,其中 $M = D/N$ 。然后用户端将信道状态信息按照特定的准则映射到 RVQ 码本中的某一个码字,并将码字的索引反馈至基站端。最后,选择 RVQ 码本中与信道矩阵 \mathbf{G} 角度相差最小的码字 c 作为对信道状态信息的量化,则量化值 g 表示为

$$g = \arg \max_{c \in C} \frac{\|\mathbf{G}c\|^2}{\|\mathbf{G}\|^2 \cdot \|c\|^2} \quad (9)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示取范数操作。本文所提改进算法

在对信道状态信息进行 RVQ 之后,基站端根据量化后的信道状态信息对信号进行检测,以此消除由量化误差引起的用户间干扰。考虑到基于最小均方误差(MMSE)准则的信号检测算法兼顾了用户间干扰和噪声放大的影响,从而能有效地克服噪声增强的问题,本文采用 MMSE 算法对信号进行检测,其信号检测矩阵 \mathbf{W} 表示为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{g}^H \mathbf{g} + \frac{N_0}{\sigma^2} \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{g}^H \quad (10)$$

式中, $\mathbf{I}_N \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为单位矩阵,信号检测矩阵 \mathbf{W} 和噪声与信号比 N_0/σ^2 相关。此时,基站端的用户信号可表示为

$$y = \mathbf{W}^H y = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \sqrt{p_u} \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + n_1 \\ \sqrt{p_u} \alpha \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \alpha n_2 + n_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)可以进一步表示为

$$y \approx \sqrt{p_u} (\mathbf{W}_1^H \mathbf{G}_1 + \alpha \mathbf{W}_2^H \mathbf{G}_2) \mathbf{x} + (\mathbf{W}_1^H n_1 + \alpha \mathbf{W}_2^H n_2) + \mathbf{W}_1^H n_q \quad (12)$$

根据式(12)可知,本文改进方案的上行近似可达和速率为

$$R_n \approx$$

$$E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{p_u \|\mathbf{w}_{n_1}^H \mathbf{w}_{n_1} + \alpha \mathbf{w}_{n_2}^H \mathbf{w}_{n_2}\|^2}{I_n + \|\mathbf{w}_{n_1}^H n_1 + \alpha \mathbf{w}_{n_2}^H n_2\|^2 + \|\mathbf{w}_{n_1}^H n_q\|^2} \right) \right\} \quad (13)$$

式中, p_u 为用户的发射功率, \mathbf{w}_{n_1} 表示信号检测矩阵 \mathbf{W}_1 的第 n_1 列, \mathbf{w}_{n_2} 表示信号检测矩阵 \mathbf{W}_2 的第 n_2 列, I_n 为用户间的干扰功率,表示为

$$I_n = p_u \sum_{i=1, i \neq n}^N \|\mathbf{w}_{n_1}^H \mathbf{w}_{i_1} + \alpha \mathbf{w}_{n_2}^H \mathbf{w}_{i_2}\|^2 \quad (14)$$

在莱斯信道下,考虑到传统配置全高分辨率 ADC 方案的系统能耗较大,本文所提的大规模 MIMO 系统混合 ADC 的 RVQ 方案通过配置的低分辨率 ADC 来降低系统能耗,因此,本文首先考虑混合 ADC 系统的通用能耗模型^[21],其中,系统的能量效率 η_{EE} 定义为

$$\eta_{EE} = \frac{RB}{P_{\text{total}}} \text{ bit/J} \quad (15)$$

式中, R 为系统的和速率, B 表示系统的传输带宽, $B = 1 \text{ GHz}$, P_{total} 为系统的总消耗功率,定义为

$$P_{\text{total}} = 2M_1(P_{\text{AGC}} + P_{\text{ADC}}^H) + 2M_2(P_{\text{AGC}} + P_{\text{ADC}}^L) + P_{\text{BS}} \quad (16)$$

式中, P_{AGC} 、 P_{ADC}^H 、 P_{ADC}^L 、 P_{BS} 分别表示系统中自动增益控制器(AGC)、高分辨率 ADC、低分辨率 ADC、基站处理模块的能量功耗。其中, 模数转换器的能量功耗 P_{ADC} 表示为

$$P_{\text{ADC}} = FOM_B \cdot f_s \cdot 2^b \quad (17)$$

式中, f_s 为奈奎斯特取样速率, b 为模数转换器的比特数, FOM_B 为模数转换器中分辨率、速率及功率效率的评估参数。

4 实验仿真及结果分析

为了说明文中所提莱斯信道下大规模 MIMO 混合 ADC 的 RVQ 改进方案的有效性, 在系统未完全已知信道状态信息时, 分别在不同天线发射功率、不同天线数、不同用户数及不同莱斯因子情况下对本文改进方案的性能进行仿真分析, 并与全单精度 ADC 接收方案、文献[13]所提混合 ADC 接收方案及全高精度 ADC 接收方案相比较。以此证明本文改进方案在降低系统能耗的基础上能有效减小系统的性能损失。

图 2 所示为不同接收方案在不同用户发射功率下所对应的系统和速率曲线。考虑到传输信号的毫米波波长较短, 在天线的设计过程中, 可以有效减小天线的尺寸, 从而使基站端可以大规模集成天线而

不受空间范围的限制。另外, 由于毫米波在传输过程中的衍射能力较差, 导致信号的传输距离较短, 因此, 在大规模 MIMO 系统中需要减小蜂窝小区的半径。考虑到微小区中的覆盖范围较小, 小区内的移动用户也将变少, 所以仿真环境设置为: 基站天线数 M 为 300, 用户配置单根天线, 小区用户数 N 为 10 个, 莱斯因子 K 为 10dB, 发射端到接收端之间由传播环境造成的损耗为 3.8dB, 用户发射功率的变化范围为 0dB 到 25dB。

由图 2 可知, 传统全高精度 ADC 接收方案具有最优的系统和速率, 然而它需要与天线数相同的自动增益控制器(AGC), 从而导致巨大的系统实现成本和能耗。而配置单精度 ADC 的接收方案降低了系统的能耗, 但导致系统损失了部分性能。在用户的发射功率较低时, 不同算法的和速率差别不大, 这主要是由于较低的用户发射功率使基站接收的信号较弱, 因此, 在不同转换精度接收方案的处理下, 信号的强度差别较小。但是, 随着用户发射功率的增大, 不同接收方案的差异也随之放大, 所以不同方案下的系统和速率相差较大。另外, 在相同的配置情况下 ($M_1 = 100, M_2 = 200$), 本文所提改进方案在不同用户发射功率时的和速率都要优于文献[13]所提的混合 ADC 方案, 并且非常接近传统全高精度 ADC 接收方案的性能。图 2 仿真结果表明, 文中所提改进方案在不同用户发射功率时均能有效降低能耗并且减小性能损失。

图 3 所示为不同接收方案在不同 ADC 量化比特数时的系统和速率曲线。仿真环境设置为: 基站天线数 M 为 300, 用户配置单根天线, 小区用户数 N 为 10 个, 用户发射功率为 15dB, 莱斯因子 K 为 10dB, 混合 ADC 架构中的低分辨率 ADC 的量化比特数范围为 1 至 5。由图 3 可知, 全高分辨率 ADC 接收方案的和速率在不同量化比特数时保持不变, 是因为该接收方案的基站端都采用高精度的 ADC, 与混合 ADC 架构中的低分辨率 ADC 的量化比特数无关。本文改进算法和文献[13]所提算法的和速率都随着 ADC 量化比特数的增大而增大。同时, 在混合 ADC 架构的两种配置情况下(情况 1: $M_1 = 100, M_2 = 200$; 情况 2: $M_1 = 200, M_2 = 100$), 本

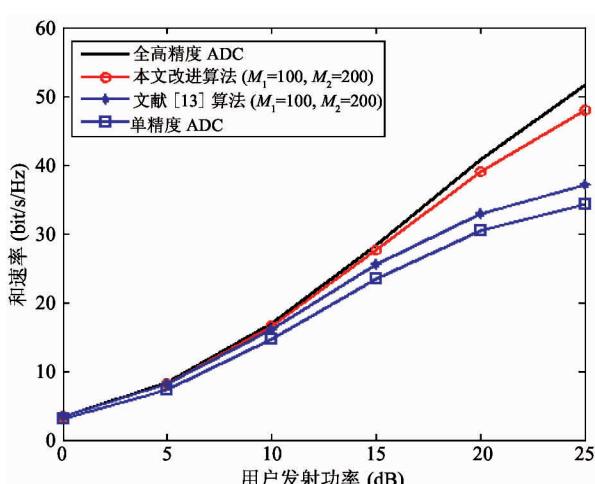


图 2 不同接收方案在不同用户发射功率下的和速率

文改进方案在不同 ADC 量化比特时的性能都要优于文献[13]所提的混合 ADC 方案。图 3 仿真结果表明,文中所提改进方案能在不同 ADC 量化比特数的情况下有效减小系统的性能损失。

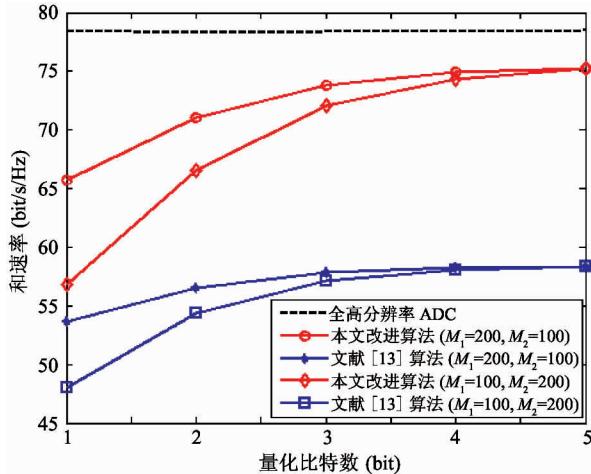


图 3 不同接收方案在不同 ADC 量化比特数时的和速率

图 4 所示为不同接收方案在不同基站天线数时的和速率比较结果,仿真环境设置为:基站天线数的变化范围为 10 至 1000,小区用户数为 10 个,莱斯因子 K 为 10dB,用户发射功率为 15dB。由图 4 可知,不同接收方案的和速率都随着天线数增大而增大。当 $M_1 = M_2$ 时,本文所提改进方案的和速率在天线数变化范围内均优于文献[13]的混合 ADC 接收方案以及全单精度 ADC 接收方案,并且非常接近

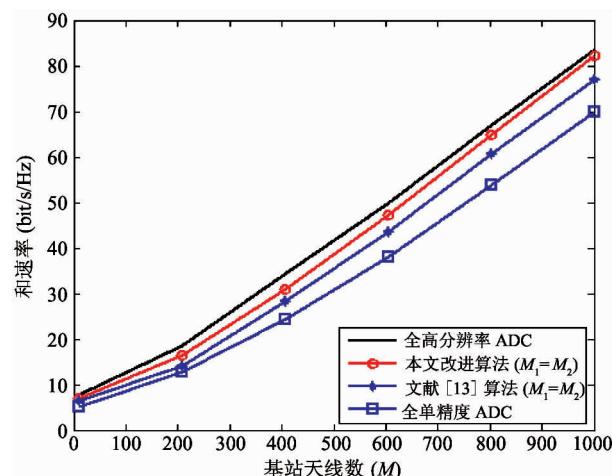


图 4 不同接收方案在不同基站天线数时的和速率

传统全高精度 ADC 接收方案。图 4 所示仿真结果表明,文中所提改进方案在不同的基站天线时的性能均优于文献[13]所提的接收方案。

图 5 所示为不同接收方案的和速率随基站天线数及用户数变化的比较结果,仿真环境设置为:基站端天线数 M 的变化范围为 10 至 1000,小区用户数分别考虑 $N = 10$ 、 $N = 20$ 、 $N = 30$ 三种情况,莱斯因子 K 为 10dB。由图 5 可知,本文所提改进方案和文献[13]方案的和速率都随着基站天线数和用户数的增大而增大,当 $N = 20$ 时,本文所提改进方案的和速率比文献[13]所提算法提升了约 0.5 dB。图 5 所示仿真结果表明,文中所提改进方案在不同用户数时的性能均优于文献[13]所提接收方案。

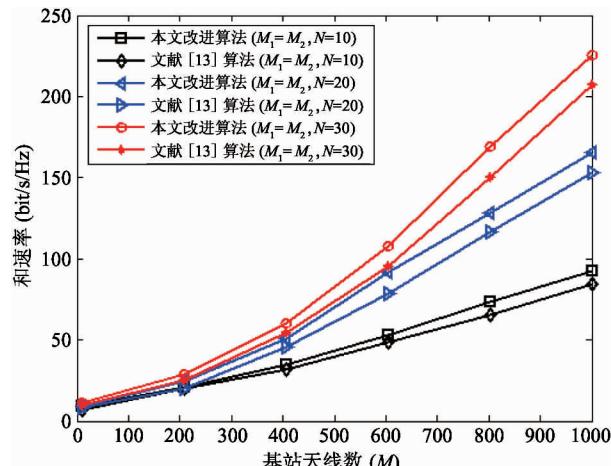


图 5 不同接收方案在不同基站天线数及用户数时的和速率

图 6 所示为不同接收方案的和速率在不同莱斯信道因子下的比较结果。仿真环境设置为:基站天线数为 300,小区用户数为 10 个,莱斯因子 K 的变化范围为 0dB 至 30dB。由图 6 可知,不同接收方案的和速率都随着莱斯因子的增大而增大。当 K 为 20dB 时,本文所提改进算法的和速率比文献[13]所提算法提高了约 0.4dB,比全单精度接收方案提高了约 1 dB。图 6 所示仿真结果表明,本文所提改进算法在不同莱斯因子下的和速率均优于文献[13]所提方案,并且接近传统全高精度 ADC 接收方案。

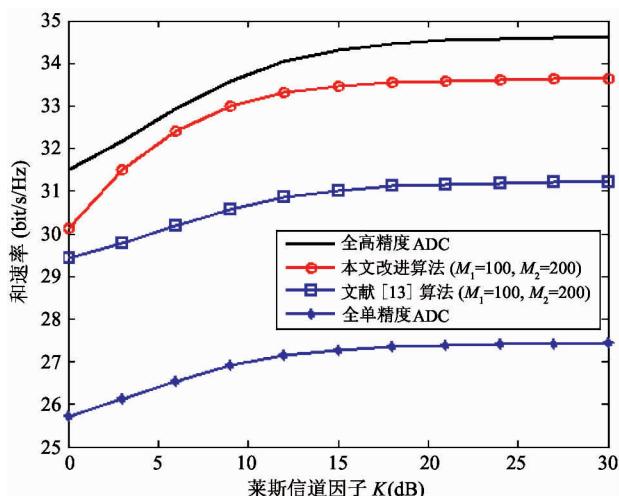


图 6 不同接收方案在不同莱斯因子下的和速率

图 7 所示为不同接收方案的能量效率随基站天线数变化的比较结果, 仿真环境设置为: 基站端天线数 M 的变化范围为 10 至 1000, 小区用户数为 10 个, 莱斯因子 K 为 10dB, 用户发射功率为 0 dB。由图 7 可知, 本文中不同接收方案的能量效率在基站天线数较小时随着天线数增大而增大, 但当基站天线数增大到一定数量级时, 系统的能量消耗将大幅增大, 从而导致不同接收方案的能量效率随之下降。同时, 传统全高精度 ADC 接收方案的能量效率最低, 而全单精度 ADC 接收方案的能量效率最高, 主要是因为单精度 ADC 可以大幅降低系统的能量消耗。并且, 本文所提改进方案在不同基站天线数下的能量效率均优于文献[13]所提算法。图 7 所

示仿真结果表明, 本文所提改进方案能在降低系统能耗的同时提高系统性能。

5 结论

大规模 MIMO 系统的能量消耗将会对系统的性能产生重要影响。因此, 为解决在降低系统能耗时系统将损失部分性能的问题, 本文提出了一种莱斯信道下大规模 MIMO 系统混合 ADC 的随机向量量化改进方案: 首先在基站端采用高分辨率 ADC 与低分辨率 ADC 混合的接收机制来降低系统的能耗, 另外考虑到在频分双工模式下的传统混合 ADC 接收方案将使系统存在损失部分性能的问题, 通过对信道状态信息进行随机向量量化来降低系统反馈开销, 最后利用 MMSE 信号检测算法来减小由量化误差导致的多用户干扰, 从而达到了降低系统性能损失的目的。通过对本文所提改进方案与传统接收方案在不同实验仿真环境下的比较结果表明, 本文所提改进方案在未完全已知信道状态信息情况下的系统性能均优于传统混合 ADC 接收方案, 说明本文改进算法能有效降低系统能耗, 并且能有效解决由降低能耗而导致系统性能损失的问题。

考虑到在大规模 MIMO 系统中预编码及信号检测算法存在运算量较大的问题, 如何在不影响系统性能的情况下减小大规模 MIMO 系统的运算复杂度将是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590-3600
- [2] Zhang B, Bai Z Q, Li J H, et al. Artificial fish swarm algorithm based pilot allocation in massive MIMO system. In: Proceedings of the on Communications and Information Technologies (ISCIT), Qingdao, China, 2016. 82-86
- [3] Zhang Q, Lu Z, Jin S, et al. Power scaling of massive MIMO systems with arbitrary-rank channel means and imperfect CSI. In: Proceedings of the IEEE Global Commu-

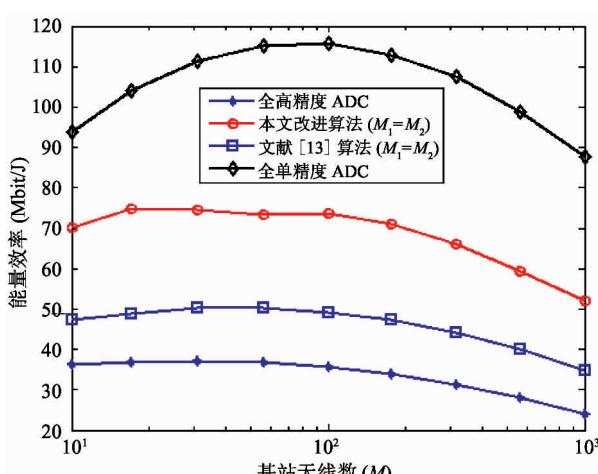


图 7 不同接收方案在不同基站天线数时的能量效率

- nlications Conference, Atlanta, USA, 2013. 4157-4162
- [4] Song N, Sung Y, Love D J. Pilot beam pattern design for channel estimation in massive MIMO systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 8 (5) : 787-801
- [5] Zhang J, Wiesel A, Haardt M. Low rank approximation based hybrid precoding schemes for multi-carrier single-user massive MIMO systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai, China, 2016. 3281-3285
- [6] Xin Y X, Wang D, Zhu H, et al. Area spectral efficiency and area energy efficiency of massive MIMO cellular systems of massive MIMO cellular systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65 (5) : 3243-3254
- [7] Cheng H V, Björnson E, Larsson E G. Uplink pilot and data power control for single cell massive MIMO systems with MRC. *Mathematics*, 2015. 310-315
- [8] 王倩, 华权, 周应超等. 基于联合用户分组及天线选择的大规模MIMO波束成形. 电信科学, 2016, 32 (8) : 61-68
- [9] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 11(9) : 3292-3304
- [10] Jacobsson S, Durisi G, Coldrey M, et al. One-bit massive MIMO: channel estimation and high-order modulations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Workshop, London, UK, 2015. 1304-1309
- [11] Choi J, Mo J, Heath R W. Near maximum-likelihood detector and channel estimator for uplink multiuser massive MIMO systems with one-bit ADCs. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 64 (5) : 2005-2018
- [12] Risi C, Persson D, Larsson E G. Massive MIMO with 1-bit ADC. *Mathematics*, 2014
- [13] Tan W, Jin S, Wen C K, et al. Spectral efficiency of mixed-ADC receivers for massive MIMO systems. *IEEE Access*, 2016, 4: 7841-7846
- [14] 徐国珍, 蒋伟, 刘安等. 有限反馈下大规模MIMO系统性能仿真. 重庆邮电大学学报自然科学版, 2012, 24 (5) : 589-594
- [15] 李泳志, 陶成, 刘留等. 莱斯信道下分布式大规模MIMO系统基站选择算法的研究. 电子与信息学报, 2016, 38 (4) : 856-862
- [16] Wang Y, Li C, Huang Y, et al. Energy-efficient optimization for downlink massive MIMO FDD systems with transmit-side channel correlation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65 (9) : 7228-7243
- [17] Zhang J, Dai L, Sun S, et al. On the spectral efficiency of massive MIMO systems with low-resolution ADCs. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20 (5) : 842-845
- [18] Zhang Q, Jin S, Wong K K, et al. Power scaling of uplink massive MIMO systems with arbitrary-rank channel means. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8 (5) : 966-981
- [19] Dumont J, Hachem W, Lasaulce S, et al. On the capacity achieving covariance matrix for Rician MIMO channels: an asymptotic approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56 (3) : 1048-1069
- [20] 李春国, 仲崇显, 杨绿溪等. 提高中继辅助的MIMO系统通信可靠性的联合功率分配方法. 高技术通讯, 2010, 20 (10) : 1020-1026
- [21] Mo J, Alkhateeb A, Abusurra S, et al. Hybrid architectures with few-bit ADC receivers: achievable rates and energy-rate tradeoffs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 6 (4) : 2274-2287

A residual vector quantization scheme using fixed precision analog to digital converter for massive MIMO systems over Rician fading channels

Xie Bin, Liu Shurui, Xie Shumin

(Information Engineering Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract

To solve the problem that a massive MIMO system will bring about partial performance loss if it uses single-precision analog to digital converter(ADC) to reduce its energy consumption, an improved residual vector quantization (RVQ) scheme using fixed ADC for massive MIMO systems over Rician fading channels was proposed. In the frequency division duplexing (FDD) mode , the scheme uses a reception mixing the high resolution ADC and the low resolution ADC to perform signal processing in the based station to achieve the high conversion accuracy for the received pilot signal and the useful signal. After channel estimation of the pilot signal , the channel state information is processed by RVQ to lighten the feedback overhead. Finally , the minimum mean square error (MMSE) signal detection algorithm is adopted for the purpose of reducing the inter user interference caused by quantization error so as to reduce the energy consumption and the performance loss of the system. The simulation results show that the improved scheme can effectively reduce the loss of the energy consumption and the loss of system capacity , and the sum-rate performance of the proposed scheme is close to the traditional high resolution ADC receiving scheme.

Key words: massive MIMO , analog to digital converter (ADC) , energy consumption , residual vector quantization (RVQ) , sum rate