



研究与开发

基于混合精度 ADC 量化的 大规模 MIMO 系统能效联合优化算法

曹海燕, 汪忠亮, 徐好, 陈千鸿, 许方敏
(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对在接收端采用混合精度的数模转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 的大规模 MIMO 系统上行链路, 提出一种能效优化算法。在采用最大比合并 (maximum ratio combining, MRC) 检测算法的基础上, 推导得到系统上行链路能效的近似闭式表达式。首先确定高精度 ADC 的占比率, 再以低分辨率 ADC 的量化精度、用户的发射功率和基站端天线数为优化目标的 3 个变量进行交替迭代得出最优的能效值; 并进一步通过调整高精度 ADC 的占比率分析其对能效和频效的影响。仿真结果表明, 所提算法具有较高的能效值, 并且可以通过调整占比率实现能效与频效更好地折中。

关键词: 大规模 MIMO; 混合精度 ADC; 能效; 频效; 联合优化

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022150

Energy efficiency joint optimization algorithm for mixed-ADC massive MIMO systems

CAO Haiyan, WANG Zhongliang, XU Hao, CHEN Qianhong, XU Fangmin
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: An energy efficiency optimization algorithm was proposed for the uplink of massive MIMO system with mixed precision analog-to-digital converter (ADC) at the receiver. Based on the maximum ratio combining detection algorithm (MRC), the approximate closed-form expression of system uplink energy efficiency was derived. Firstly, the proportion of high-precision ADC was determined, and then the quantization accuracy of low-resolution ADC, the user's transmission power and the number of antennas at the base station was taken as the optimization objectives to alternately iterate to obtain the optimal energy efficiency value. Furthermore, the influence on energy efficiency and spectrum efficiency was analyzed by adjusting the proportion of high-precision ADC. The simulation results show that the proposed algorithm has high energy efficiency, and can achieve a better balance between energy efficiency and spectrum efficiency by adjusting the proportion of high-precision ADC.

Key words: massive MIMO, mixed-ADC, energy efficiency, spectrum efficiency, joint optimization

收稿日期: 2021-12-17; 修回日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501158); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY20F010009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501158), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY20F010009)



0 引言

随着现代通信技术的发展,电子设备对网络容量以及数据吞吐率的需求日益提高。利用大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术可以很好地满足要求,并且MIMO技术可以极大地提高系统的频效(即频谱效率),同时,降低功耗以提高能效(即能量效率)^[1-3]。在大规模MIMO系统接收端,每根射频链上都会部署模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)将所接收的模拟信号转变成数字信号,再交由基带处理。其中,ADC的功率损耗会随着量化精度的提高以指数级增加,因此,怎样在保持ADC较高精度的情况下尽可能减小功率损失成为近年来的研究热点之一^[4]。文献[5]分析了在ADC量化比特数均为1 bit时的系统性能,文献[6]在ADC全为低分辨率的情况下阐明低精度ADC造成的性能损耗可以通过增加接收天线的数量来补偿。文献[7]同样也是在ADC全为低分辨率的情况下联合量化精度、导频长度和用户发射功率来优化能效。以上文献都是在ADC全部为低分辨率的情况下进行能效分析的。但在现实应用场景中,采用全低分辨率ADC会导致系统性能的损失,并且低精度ADC会导致接收端进行信道估计时出现信道失真的风险,因此学术界提出了混合精度ADC的系统架构^[8]。其中一部分天线采用高分辨率ADC,以此可以在信道估计时获得更加准确的信道状态信息(channel state information, CSI),剩余天线装配低分辨率ADC来降低系统的功耗和硬件成本。文献[9]研究了在混合精度ADC架构下,采用MRC检测算法分析了大规模MIMO系统的频效。由于文献的优化目标为频效,所得结论忽略了基站端天线数以及量化精度对于能效所产生的巨大影响,不具备应用可行性。文献[10]分析了单

小区大规模MIMO系统采用混合精度ADC架构时低精度ADC的量化位数对于系统能效和频效的影响,其中发射功率以常数代替。文献[11]针对中继系统中同时采用具有混合精度ADC和DAC的大规模MIMO系统架构,在固定发射功率的情况下分析了低精度ADC的量化比特数对系统能效和频效的影响。文献[10]和文献[11]均在固定功率的情况下分析量化精度对系统性能的影响,而未经过优化的发射功率会导致能效和频效的结果很差。文献[12]在文献[11]的基础上研究了以系统频效为目标的发射功率优化问题,同时观察量化精度对于系统能效的影响,而忽略了基站端天线数对系统能效的影响。

基于以上分析,本文联合考虑用户发射功率、基站端天线数和低分辨率ADC量化比特数三变量的资源分配对系统能效进行优化。考虑在混合精度ADC架构中基站端配备高精度ADC的天线数目对系统性能会产生巨大的影响,本文首先在给定基站端配备高精度ADC天线占比率 z 的情况下,通过在基站接收端采用MRC检测算法接收用户的发射信号,基于加性噪声量化模型^[13](additive noise quantization model, ANQM)推导出具有混合精度ADC的单小区大规模MIMO系统上行链路的可达速率和系统功耗的近似闭式表达式。以发射功率和用户服务质量为约束条件建立能效优化模型,再将分数形式的能效表达式通过分式规划方式转变为减式,利用拉格朗日算法和梯度下降法对低精度ADC量化比特数、用户发射功率以及基站端天线数进行联合优化得出最佳能效值,并在此优化算法基础上分析占比率 z 对系统性能的影响。

1 系统模型

本文考虑的是单小区大规模MIMO系统的上

行链路。基站 (base station, BS) 端配备了 M 根天线, 每根天线由单个射频链驱动, 服务于小区内的 K 个用户, 每个用户设备均为单天线。其中, 有 M_0 根天线连接高分辨率 ADC, $M_1 = M - M_0$ 根射频链连接了低分辨率 ADC。其中, $M_0 = z \times M$, z 为高精度 ADC 在混合 ADC 架构中的占比。基于混合 ADC 精度架构的大规模 MIMO 上行链路系统模型如图 1 所示。

假设基站具有完美的 CSI 并服务于均匀分布在小区内各个位置的用户, 并且所有用户共享同一时频资源块。则 BS 接收的信号表示为:

$$y = \sqrt{p}Gx + n \quad (1)$$

其中, p 为 K 个用户的发射信号功率矩阵, $p = \text{diag}\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 。 $G = HD^{1/2}$ 代表基站和用户之间的信道矩阵, H 为 $M \times K$ 维的快衰落系数矩阵, $D = \text{diag}\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$ 表示大尺度衰落矩阵。 n 为 $M \times 1$ 维加性白高斯噪声, 满足 $n \sim \text{CN}(0, I)$ 。 x 作为 $K \times 1$ 用户发射数据满足 $E\{|x_k|^2\} = 1$ 。由于该系统采用的是混合精度 ADC 的系统架构, 则 $G = \begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \end{bmatrix}$, 定义 G_0 表示为用户与 M_0 根配备高精度 ADC 的天线之间的信道矩阵。同理, G_1 表示为用户与 M_1 根配备低精度 ADC 的天线之间的信道矩阵。可以得到:

$$y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{p}G_0x + n_0 \\ \alpha\sqrt{p}G_1x + \alpha n_1 + n_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

本文采用 AQNM 模型对量化过程进行分析。由于低精度量化存在量化误差, 假设输入信号为 y , 则输出信号 $y_q = \alpha y + n_q$ 。 $\alpha = 1 - \rho$, ρ 为量化信噪比的倒数, 大小取决于量化比特数 b , 当 $b=1 \sim 5$ bit 时, ρ 的参考值见表 1。当 b 大于 5 bit 时, $\rho \approx \sqrt{3}\pi 2^{-2b} / 2$ 。

表 1 不同量化精度对应的 ρ 值

b/bit	ρ
1	0.363 4
2	0.117 5
3	0.034 5
4	0.009 5
5	0.002 5

n_q 为系统的加性量化噪声, 其协方差函数可表示为^[11]:

$$R_{n_q} = E\{n_q n_q^H | G_1\} = \alpha(1 - \alpha)\text{diag}(pG_1G_1^H + I_{M_1}) \quad (3)$$

考虑所有低分辨率 ADC 的量化比特数相同, 并假设高精度 ADC 可实现完美量化, 则量化后的信号可表示为:

$$y_q = \begin{bmatrix} y_0 \\ Q(y_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{p}G_0x + n_0 \\ \alpha\sqrt{p}G_1x + \alpha n_1 + n_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

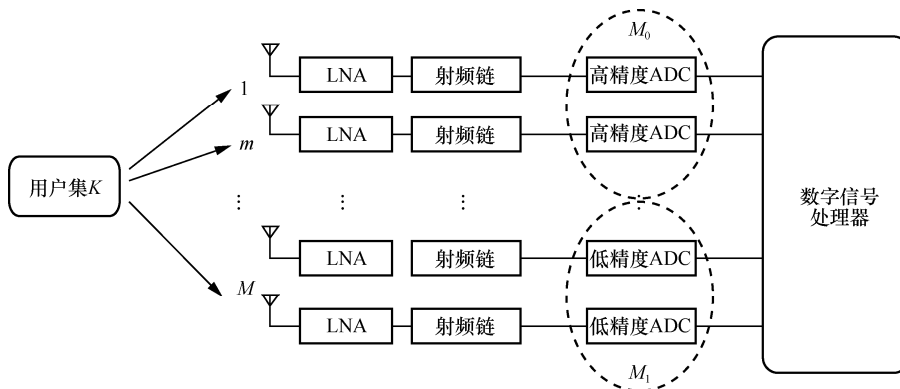


图 1 基于混合 ADC 精度架构的大规模 MIMO 上行链路系统模型



1.1 系统性能分析

本节将使用 MRC 接收算法推导出上行链路可达速率的近似闭式表达式。则根据式 (4)，可以推导得到检测后的信号向量：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{A}^H \mathbf{y}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_0^H & \mathbf{G}_1^H \end{bmatrix} \mathbf{y}_q = \\ & \sqrt{p} \mathbf{G}_0 \mathbf{G}_0^H \mathbf{x} + \mathbf{G}_0^H \mathbf{n}_0 + \alpha \sqrt{p} \mathbf{G}_1 \mathbf{G}_1^H \mathbf{x} + \\ & \alpha \mathbf{G}_1^H \mathbf{n}_1 + \mathbf{G}_1^H \mathbf{n}_q \end{aligned} \quad (5)$$

将式 (5) 展开，即可得到基站收到的第 k 个用户的信号：

$$\begin{aligned} r_k &= \underbrace{\sqrt{p_k} \mathbf{g}_{H,k}^H \mathbf{g}_{H,k}^H \mathbf{x}_k + \alpha \sqrt{p_k} \mathbf{g}_{L,k}^H \mathbf{g}_{L,k}^H \mathbf{x}_k}_{\text{期望信号分量}} + \\ & \underbrace{\mathbf{g}_{H,k}^H \mathbf{n}_0 + \alpha \mathbf{g}_{L,k}^H \mathbf{n}_1 + \mathbf{g}_{L,k}^H \mathbf{n}_q}_{\text{噪声信号分量}} + \\ & \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \sqrt{p_i} \mathbf{g}_{H,i}^H \mathbf{g}_{H,i}^H \mathbf{x}_i + \alpha \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \sqrt{p_i} \mathbf{g}_{L,i}^H \mathbf{g}_{L,i}^H \mathbf{x}_i}_{\text{干扰信号分量}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $\mathbf{g}_{H,i}$ 为第 i 个用户到配备高分辨率 ADC 天线的信道， $\mathbf{g}_{L,i}$ 为第 i 个用户到配备低分辨率 ADC 天线的信道， p_i 为第 i 个用户信号传输功率。根据香农公式，得到 k_{th} 用户的可达速率为：

$$R_k = E \left\{ \ln \left(1 + \frac{D_k}{J_k} \right) \right\} \quad (7)$$

根据詹森不等式可得到 R_k 的下界：

$$R_k \geq \tilde{R}_k = \ln \left\{ 1 + E \left(\frac{D_k}{J_k} \right) \right\} \quad (8)$$

其中， D_k 为期望信号功率，化简可得^[14]：

$$\begin{aligned} E\{D_k\} &= p_k \beta_k (M_0^2 + M_0) + \\ & \alpha^2 p_k \beta_k (M_1^2 + M_1) + 2\alpha p_k \beta_k^2 M_0 M_1 \end{aligned} \quad (9)$$

根据伽马分布可对量化噪声进行计算并化简^[15]：

$$\begin{aligned} E\{ \mathbf{g}_{L,k}^H \alpha (1-\alpha) \text{diag}(\mathbf{p} \mathbf{G}_1 \mathbf{G}_1^H + \mathbf{I}_{M_1}) \mathbf{g}_{L,k} \} &= \\ \alpha (1-\alpha) M_1 \left(\beta_k + p_k \beta_k \sum_{i=1}^K \beta_i + p_k \beta_k^2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中， J_k 为干扰信号功率与噪声功率^[15]。

$$\begin{aligned} E\{J_k\} &\approx \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K p_i \beta_i \beta_k M_0 + \alpha^2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K p_i \beta_i \beta_k M_1 + \\ & M_0 \beta_k + \alpha^2 \beta_k M_1 + \\ & (\alpha - \alpha^2) M_1 \left(\beta_k + p_k \beta_k \sum_{i=1}^K \beta_i + p_k \beta_k^2 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

考虑一般用户上行信号的信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) $\gg 1$ ，可将式 (11) 化简为：

$$\tilde{R}_k \approx \ln \left(E \left\{ \frac{D_k}{J_k} \right\} \right) \quad (12)$$

1.2 系统功耗模型

本节将介绍大规模 MIMO 系统的功率消耗，其主要由 3 个部分组成。

(1) 接收端功率放大器功耗 P_{PA} 的计算式为：

$$P_{PA} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^K p_k \quad (13)$$

其中， $\gamma \in [0,1]$ ，表示功率放大器的放大效率。

(2) 收发器功耗 P_{TR} 的计算式为：

$$P_{TR} = M P_{BS} + K P_{UE} \quad (14)$$

其中， P_{UE} 表示用户设备的功率损耗。 P_{BS} 表示每根天线中电子元器件的功率损耗，主要包括模数转换器 (ADC) 的功率损耗 P_{ADC} 、自动增益控制功率损耗 P_{AGC} 、低噪声放大器功率损耗 P_{LAN} 以及滤波器等其他电子器件的损耗。其中， $P_{ADC} = \text{FOM}_w f_s 2^b$ 。 b 为量化比特数， f_s 为奈奎斯特采样速率， FOM_w 为品质因数^[16]，用于评价 ADC 的功率效率，在 1 GHz 带宽时能量损耗一般为 5~15 fJ/conversion step (表示 ADC 每一次转换的步骤大约消耗 5~15 fJ 的能量)。 $\tilde{P}_{BS}$ 用于表示其他损耗功率。收发器链路的具体功耗可具体

表示为:

$$P_{\text{TR}} = M_0 (P_{\text{AGC}} + P_{\text{HADC}} + P_{\text{LAN}} + \tilde{P}_{\text{BS}}) + M_1 (cP_{\text{AGC}} + P_{\text{LADC}} + P_{\text{LAN}} + \tilde{P}_{\text{BS}}) + KP_{\text{UE}} \quad (15)$$

(3) 基站端进行信号处理、信道编解码等线性处理过程产生的功率损耗 P_{LP} 以及其他未计算的特定功耗 P_{site} 的计算式为:

$$P_{\text{LP}} = 2\frac{B}{L}M_1Kb_{\text{LADC}} + 2\frac{B}{L}M_0Kb_{\text{HADC}} \quad (16)$$

其中, B 为系统传输带宽, L 为基站的运算效率, 假设高精度 ADC 可以实现信号的完美量化, 则理论上 b_{HADC} 应趋于无穷大。

依据式 (13) ~ 式 (16), 可得出系统最终消耗的总功率 P_{total} :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = & P_{\text{PA}} + P_{\text{TR}} + P_{\text{LP}} + P_{\text{site}} = \\ & \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^K p_k + M_0 (P_{\text{AGC}} + P_{\text{HADC}} + P_{\text{LAN}} + \tilde{P}_{\text{BS}}) + \\ & M_1 (cP_{\text{AGC}} + P_{\text{LADC}} + P_{\text{LAN}} + \tilde{P}_{\text{BS}}) + \\ & KP_{\text{UE}} + 2\frac{B}{\mu}M_1Kb_{\text{LADC}} + 2\frac{B}{\mu}M_0Kb_{\text{HADC}} + P_{\text{site}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, c 的数值与量化精度相关, 表示为:

$$c = \begin{cases} 0, b=1 \\ 1, b>1 \end{cases} \quad (18)$$

2 能效优化算法

本节将具体描述配备混合精度 ADC 的大规模 MIMO 系统的能效优化算法, 依据该算法优化低分辨率 ADC 的量化比特数、用户的最佳发射功率以及基站端天线数, 以此得到系统的最佳能效值。

2.1 问题描述

通信系统的能效 (energy efficiency, EE) 可以定义为:

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{R_{\text{sum}}}{P_{\text{total}}} (\text{bit/J}) \quad (19)$$

依据式 (12)、式 (18) 和式 (19), 同时考虑实际系统运行中所需的最低数据传输速率和单用户的最高发射功率, 可以建立以系统能效最大化为目标的目标函数:

$$\begin{aligned} \text{EE} = & \frac{\sum_{k=1}^K \tilde{R}_k (b_{\text{LADC}}, M, p)}{P_{\text{total}} (b_{\text{LADC}}, M, p)} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } \tilde{R}_k \geq R_{\min} \\ & \text{C2: } p_k \leq p_{\max} \end{aligned} \quad (20)$$

2.2 问题转化

从式 (20) 可以看出, 这是一个具有三变量 $(b_{\text{LADC}}, M, p_k)$ 的复杂非线性函数, 并且含有两个线性约束条件, 为了解决这个含有约束条件的非凸优化问题, 需要对目标函数进行简化处理以方便计算。

首先, 先对 $\tilde{R}_k$ 进行处理, 根据对数函数计算规则, 可知:

$$\tilde{R}_k \approx \text{lb} \left(\frac{E\{D_k\}}{E\{J_k\}} \right) = \text{lb}(E\{D_k\}) - \text{lb}(E\{J_k\}) \quad (21)$$

其次, 利用分数规划将式 (20) 的分数形式化为等价的减式形式, 目标函数转变为:

$$\begin{aligned} \max_{\{b_{\text{LADC}}, p, M\}} \quad & \sum_{k=1}^K \text{lb}(E\{D_k\}) - \sum_{k=1}^K \text{lb}(E\{J_k\}) - qP_{\text{total}} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1} \sim \text{C2} \end{aligned} \quad (22)$$

其中, q 为表示能效值的辅助变量。

从式 (22) 中可以证明这是一个关于变量 M 和 p 的联合凸函数, 因此可以采用凸优化理论来进行求解。由于这是一个具有三变量的目标函数, 为了简化计算, 首先应初始化量化精度 b_{LADC} , 在此基础上再对 p 和 M 进行优化, 之后利用迭代的方式确定最优的量化精度。

对于确定 b_{LADC} 之后, 采用拉格朗日方法消去约束条件, 即:



$$L(\mathbf{p}, \mathbf{M}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega}) = \sum_{k=1}^K \ln(E\{D_k\}) - \sum_{k=1}^K \ln(E\{J_k\}) - qP_{\text{total}} + \sum_{k=1}^K \lambda_k (p_{\max} - p_k) + \sum_{k=1}^K \omega_k (\tilde{R}_k - R_{\min}) \quad (23)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K)$, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K)$, 且 $\lambda_k \geq 0$ 、 $\omega_k \geq 0$ 分别表示约束传输速率和发射功率的拉格朗日乘子。

2.3 问题求解与算法优化

对于式(23)给定的优化问题, 首先采用 KKT 条件, 对 p_k 进行求导, 即令: $\frac{\partial L}{\partial p_k} = 0$, 可得此时的最优发射功率:

$$p_k = \frac{-f + \sqrt{f^2 - 4eg}}{2e} \quad (24)$$

其中, $e = \alpha(1-\alpha)M_1 \left(\sum_{i=1}^K \beta_i + \beta_k \right)$, $f = \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i M_0 +$

$$\alpha^2 \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i M_1 + \alpha M_1 + M_0 + 2\alpha \sum_{i=1, i \neq k}^K \beta_i \beta_k \sqrt{M_0 M_1},$$

$$g = -\frac{f(1-\omega_k)}{\ln 2 \left(\frac{q}{\gamma} - \lambda_k \right)}.$$

关于天线数 M 的优化, 在此系统模型中, 考虑利用 $\frac{\partial L}{\partial M} = 0$, 难以求得天线数 M 的具体表达式, 也就无法再利用拉格朗日算法求得, 但可以将 M 看作一个难以求导的参量, 且 $\frac{\partial^2 q}{\partial M^2} < 0$, 于是可以利用梯度下降法对天线数 M 进行优化, 具体的计算式为:

$$M^{n+1} = M^n + \delta \frac{\partial q}{\partial M} \quad (25)$$

其中, δ 为学习率, 决定了天线数 M 的变化快慢, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号, n 为迭代次数。然而实际情况是, 梯度下降法适用于无约束的情况。所以需要

判断在优化 p_k 后, 每次所取的 M 值是否满足 C1, 但是可以观察到 D_k 中存在 M 的二次方, J_k 中只存在 M 的一次方。由于该系统是一个大规模 MIMO 系统, 天线数一般为上百根。所以在正常情况下, D_k 的值是远大于 J_k 的, 并且在之后对天线数量的仿真调试中, 可以得到本文的仿真结果均满足 C1, 这也验证了天线数 M 的优化是可以利用梯度下降法来解决的。

依据式(23)~式(25)的计算分析, 本文基于 Dinkelbach^[17]方法提出了一种能效优化方案, 通过不断地对能效值 q 进行迭代使之最终收敛在一个阈值内。具体算法步骤如下, 其中, $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\omega$ 为拉格朗日算子的迭代步长, τ 为终止循环的阈值, $[x]^+ = \max\{0, x\}$ 。

具体算法:

输入: K 、 M 、 $\mathbf{p}$ 、 $z=0$ 、 $q_n^*=0$ 、 $\boldsymbol{\lambda}^n=\boldsymbol{\omega}^n=0$ 、

$n=0$

输出: q^* 、 M^* 、 $\mathbf{p}^*$

初始化:

for $b_{\text{LADC}}=1:1:16$

计算此时的 q_{n+1}^* 、 q_{n+1}^* 值

while $q_{n+1}^* - q_n^* > \tau$

$q_n^* = q_{n+1}^*$

依据式(25)更新天线数 M

更新拉格朗日算子:

$$\lambda_k^{n+1} = [\lambda_k^n - \Delta\lambda(\tilde{R}_k^n - R_{\min})]^+$$

$$\omega_k^{n+1} = [\omega_k^n - \Delta\omega(p_{\max} - p_k^n)]^+$$

依据式(24)更新用户发射功率 p_k

$n=n+1$

返回步骤(3)

end while

end for

return (q^* , M^* , $\mathbf{p}^*$)

3 仿真与分析

本节所给出的仿真结果将验证所提算法在

能效优化方面地优越性以及其计算结果的准确性。假设信道具有完美的 CSI，并且小区内部用户均匀地分布在基站周边。部分仿真参数见表 2。

表 2 部分仿真参数

系统参数	数值
放大器效率 γ	0.38
单用户功耗 P_{UE}/mW	10
低噪声放大器功耗 P_{LNA}/mW	10
基站单根天线其他功耗 $\tilde{P}_{BS}/\text{mW}$	50
其他剩余功耗 P_{site}/W	2
关于 ADC 的固定值 $FOM_w \cdot f_s / (\text{W} \cdot \text{conv-step}^{-1})$	10^{-7}
单用户最低速率要求 $R_{\min}/(\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1})$	3
单用户最高发射功率 $P_{\max}/\text{W}$	0.5
计算效率 $L/B/(\text{bit} \cdot \text{W}^{-1})$	20 480
阈值 τ	0.01

不同量化比特数对能效的影响如图 2 所示。对 3 种情况进行了仿真：高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0$ 、高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.25$ 以及高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.5$ 。从图 2 可以看出，随着配备高精度 ADC 天线占比的增加，能效反而下降，这是因为高精度 ADC 意味着需要更高的能耗才能达到完美量化。不同量化比特数与占比率 z 对能效的影响如图 3 所示。

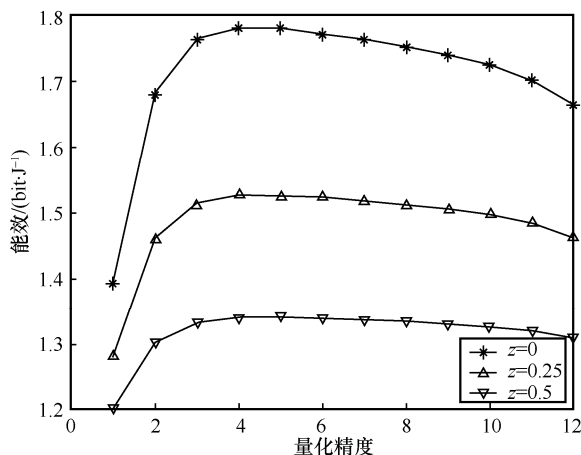
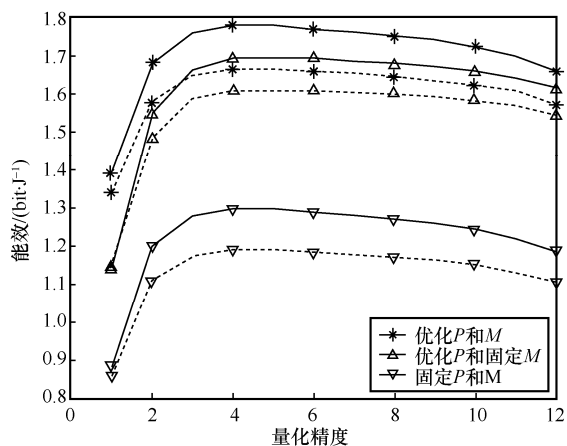


图 2 不同量化比特数对能效的影响

图 3 不同量化比特数与占比率 z 对能效的影响

在图 3 中，由于同时优化了用户的发射功率和基站端天线数，尽管基站端配备了高精度 ADC，其能效仍比文献[18]中所采用等功率分配的纯低分辨率 ADC 天线系统要高，其中虚线代表 $z=0.1$ 时的能效仿真，实线代表 $z=0$ 的能效仿真。

不同量化比特数对频效的影响如图 4 所示，分别对 3 种情况进行了仿真：高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0$ 、高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.25$ 以及高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.5$ 。仿真表明，虽然纯低精度 ADC 的能效性能较之混合精度量化的系统架构更好，但后者可以带来更高的频效。此外，混合精度量化结构中的高精度 ADC 可以在信道估计时降低信号失真的风险，获得更完善的 CSI。综上所述，混合精度量化的系统架构可以在损失一部分能效为代价的情况下获得更好的频效。

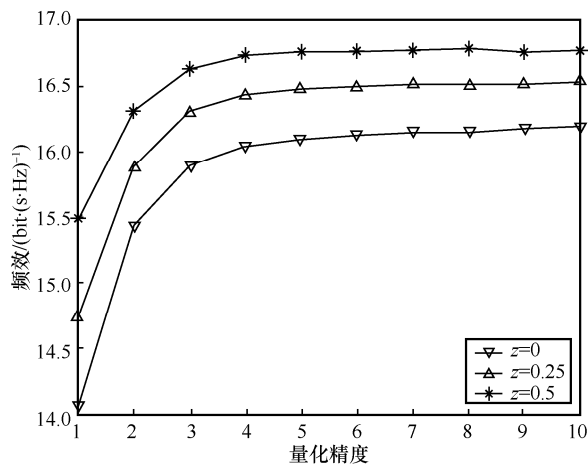


图 4 不同量化比特数对频效的影响



不同用户数对能效、频效的影响分别如图 5、图 6 所示。可以发现,使能效最优的比特数大约为 5 bit。能效值会随着用户数的增多呈现先上升后下降的趋势,这是因为系统的可达速率会随着用户数的增加而提高,但同时用户端的功耗也会随之逐渐增加,且变化量会逐渐大于同比增加的可达速率。同时由于 $SE = R/B$ ($\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$),在固定量化比特数的情况下所以频效会随着用户的增加而不断提高。图 6 中, $b=5$ 和 $b=10$ 时的 SE 相同是因为随着量化精度的提高,对应的 α 值会趋向于 1,使得其 SE 不再提高。从图 5 和图 6 可以看出,优化后的 EE 和 SE 值远高于文献[10]所提的等功率分配。

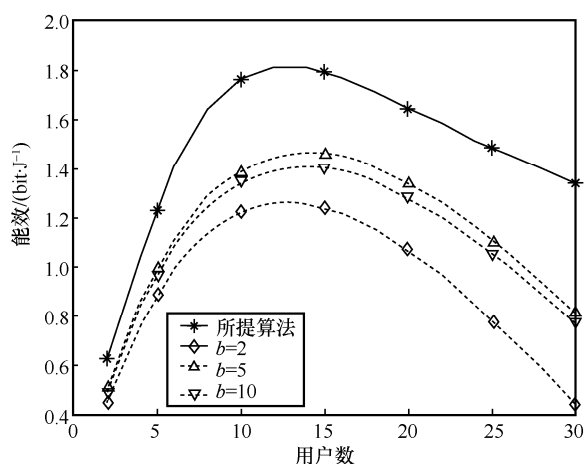


图 5 不同用户数对能效的影响

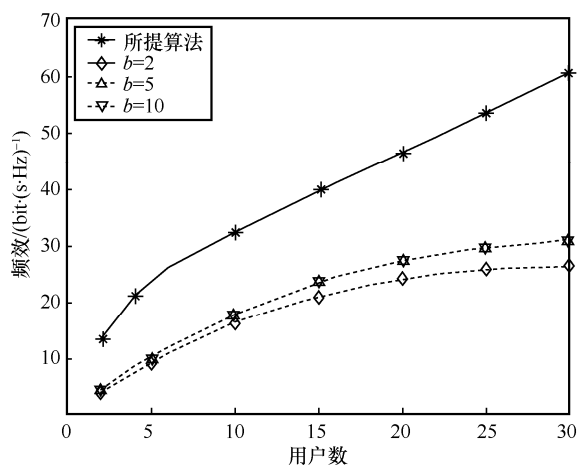


图 6 不同用户数对频效的影响

量化比特数对频效和能效的影响如图 7 所示。从图 7 可以更直观地看出占比率 z 可以作为一个自适应的参量,通过调整 z 的值来权衡系统能效和频效的值。分别对以下 3 种情况进行仿真:高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0$ 、高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.25$ 以及高分辨率 ADC 天线占比率 $z=0.5$ 。从图 7 可以看出,在不同情况下,当量化比特数为 5 bit 左右时,此时系统性能均可以大致达到最优状态,即最优的能效以及相对较高的频效。

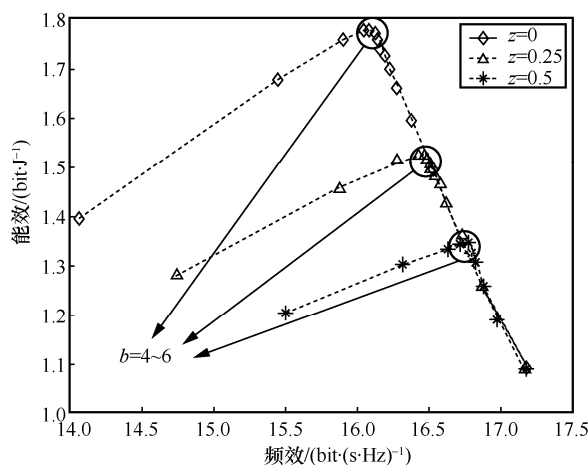


图 7 量化比特数对频效和能效的影响

系统频效与接收机功耗的关系如图 8 所示,可以看出混合精度 ADC 架构的接收端功耗要高于低精度 ADC 架构。但是经过优化后,在相同的能量消耗情况下,频效得到很大的提高,且在较低量化位数的情况下,例如在 1~3 bit 时,系统频效增加较为显著,而接收机的功耗增加量几乎可以忽略不计。利用优化算法后,能量消耗甚至出现了下降,这是因为优化了天线数,使得资源分配更合理,使其达到更少的功耗。随着继续提高分辨率量化器的量化比特数,系统的功耗会有明显的提高且频效几乎不再增加。这表明,适当选择低分辨率 ADC 的量化比特数(约为 5 bit),使得系统可以在频效和功耗之间得到更好的折中。

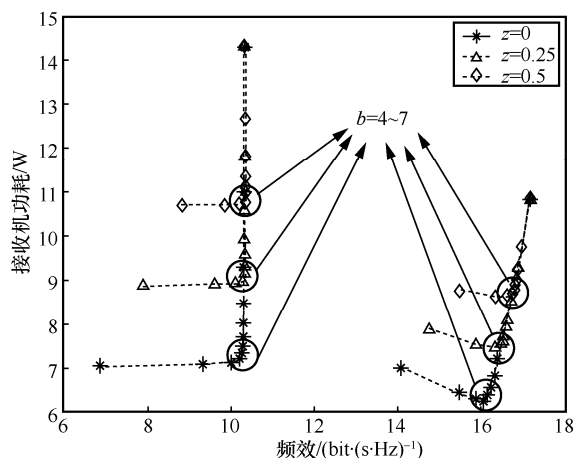


图 8 系统频效与接收机功耗的关系

4 结束语

针对配备混合量化精度 ADC 的大规模 MIMO 系统所带来的功耗过大的问题, 本文提出了联合用户发射功率、低分辨率 ADC 量化比特数和基站端天线数进行优化的算法。采用交替迭代的优化方式得到最优的能效值。仿真结果验证了该优化算法对于能效和频效均有一定程度的优化。进一步分析了配备高分辨率 ADC 的天线占比 z 对系统能效和频效的影响, 发现 z 可以看作一个自适应的参量, 通过改变 z 的大小对能效和频效在系统中所占的权重进行动态调整, 以满足不同工作场景的需求。后续的研究将进一步考虑在未知信道状态信息的情况下能效的优化情况。

参考文献:

- [1] ZHANG R, LI Y Z, WANG C X, et al. Energy-spectral efficiency trade-off in underlaying mobile D2D communications: an economic efficiency perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4288-4301.
- [2] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [3] 梁宁. 低位宽量化下大规模天线系统接收机设计的若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
LIANG N. Research on massive MIMO receivers under low-resolution quantization[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [4] LARSSON E G, EDWARDS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [5] ZHANG Y, CAO H T, ZHOU M, et al. Rate analysis of cell-free massive MIMO with one-bit ADCs and DACs[C]// Proceedings of 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [6] ORHAN O, ERKIP E, RANGAN S. Low power analog-to-digital conversion in millimeter wave systems: impact of resolution and bandwidth on performance[J]. 2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2015: 191-198.
- [7] 曹海燕, 胡文娟, 智应娟, 等. 低精度 ADC 大规模 MIMO 系统的能效 联合优化算法[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 90-96.
CAO H Y, HU W J, ZHI Y J, et al. Energy efficiency joint optimization algorithm for low-precision ADC massive MIMO systems[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 90-96.
- [8] FAN L, JIN S, WEN C K, et al. Uplink achievable rate for massive MIMO systems with low-resolution ADC[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2186-2189.
- [9] ZHANG M J, TAN W Q, GAO J H, et al. Power allocation for multicell mixed-ADC massive MIMO systems in Rician fading channels[C]//Proceedings of 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [10] 刘凯, 陈贵潮, 陶成, 等. 基于混合精度模数转换器的大规模 MIMO-OFDM 系统性能分析[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(11): 2541-2548.
LIU K, CHEN G C, TAO C, et al. Performance analysis of massive MIMO-OFDM system with mixed-precision analog-to-digital converter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(11): 2541-2548.
- [11] SAID S, SAAD W, SHOKAIR M, et al. Spectral and energy efficiency for massive mimo relaying systems with double resolution ADC receivers[C]//Proceedings of 2019 36th National Radio Science Conference (NRSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 135-144.
- [12] ZHANG J Y, DAI L L, HE Z Y, et al. Mixed-ADC/DAC multi-pair massive MIMO relaying systems: performance analysis and power optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 140-153.
- [13] BAI Q, MEZGHANI A, NOSSEK J A. On the optimization of ADC resolution in multi-antenna systems[C]//Proceedings of IEEE ISWCS 2013. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [14] SAID S, SAAD W, SHOKAIR M, et al. Spectral and energy efficiency for massive mimo relaying systems with double resolution ADC receivers[C]//Proceedings of 2019 36th National Radio Science Conference (NRSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 135-144.
- [15] ZHANG M J, TAN W Q, GAO J H, et al. Spectral efficiency and power allocation for mixed-ADC massive MIMO system[J]. China Communications, 2018, 15(3): 112-127.
- [16] ZHANG J Y, DAI L L, HE Z Y, et al. Performance analysis of mixed-ADC massive MIMO systems over Rician fading channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1327-1338.



- [17] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.
- [18] XU L Y, LU X T, JIN S, et al. On the uplink achievable rate of massive MIMO system with low-resolution ADC and RF impairments[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 502-505.

[作者简介]



曹海燕（1975-），女，博士，杭州电子科技大学通信工程学院副教授，主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测、信道估计、能效优化等。



汪忠亮（1997-），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为大规模 MIMO 系统功率优化算法。



徐好（1996-），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为大规模 MIMO 系统的能效优化。



陈千鸿（1997-），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为毫米波大规模 MIMO 系统中混合预编码。



许方敏（1980-），女，杭州电子科技大学通信工程学院讲师，主要研究方向为先进移动通信系统及其关键技术，包括干扰抑制策略、无线资源管理策略。