



研究与开发

低精度 ADC 大规模 MIMO 系统的 能效联合优化算法

曹海燕, 胡文娟, 智应娟, 许方敏, 方昕
(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对配置低精度模数转换器 (ADC) 的大规模多输入多输出 (MIMO) 系统, 提出一种基于交替优化算法的上行链路能效优化算法。即在基于最大比合并 (MRC) 接收的基础上, 建立以能效最大化为目标的优化模型, 再根据分数规划的性质, 把原始的分式形式最优问题转换成等价的减式形式, 在量化比特数一定的情况下, 对发射功率和导频长度进行交替迭代优化。仿真结果表明, 所提算法有较好的频谱效率与能量效率。

关键词: 大规模 MIMO; 模数转换器; 交替优化; 能效

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020167

Energy efficiency joint optimization algorithm for low-precision ADC massive MIMO systems

CAO Haiyan, HU Wenjuan, ZHI Yingjuan, XU Fangmin, FANG Xin
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: An uplink energy efficiency optimization algorithm based on alternating optimization algorithm was proposed for large-scale multiple-input multiple-output (MIMO) systems with low-precision analog to digital converters (ADC). That is, based on the maximum ratio combining (MRC) reception, an optimization model aiming at maximizing energy efficiency was established, and then the original fractional form optimization problem was converted into an equivalent subtractive form according to the nature of the fractional programming. In the case where the number of quantization bits was constant, the iterative optimization of the transmission power and the pilot length were performed. Simulation results show that the proposed algorithm has better spectral efficiency and energy efficiency.

Key words: massive MIMO, ADC, alternate optimization, energy efficiency

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2020-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501158, No.61379027); 浙江省教育厅科学基金资助项目 (No.LY14F010019, No.LQ15F01004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501158, No.61379027), The Education Department Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY14F010019, No.LQ15F01004)

1 引言

近年来,随着无线通信的发展以及多媒体业务要求的提高,大规模多输入多输出技术能够充分利用空间资源,大幅提高系统的频谱效率和能量效率^[1-2]。在大规模 MIMO 系统中,由于在接收端的每根天线上部署的数模转换器(analog to digital converter, ADC)的功率消耗会随着量化精度的提高而呈指数级增长。因此,有效降低系统的硬件成本和功耗的低精度 ADC 成为当下学术界的研究热点之一。参考文献[3]表明通过增加接收天线数可以补偿使用低精度 ADC 造成的系统速率损失。参考文献[4]提出了将低精度 ADC 产生的量化噪声建模成加性量化噪声模型(additive quantization noise model, AWQN)。参考文献[5]提出具有 1 位 ADC 的宽带大规模 MIMO 系统。参考文献[6]分析了使用低精度 ADC 的上行大规模 MIMO 的可达和速率的解析表达式,并研究了量化比特数对系统可达和速率的影响。参考文献[7]针对大规模 MIMO 系统,在采用不同精度的 ADC 以及发射功率的情况下,研究了以系统频谱效率为目标的导频长度优化问题,但没有将它们联合起来考虑。参考文献[8]研究了在系统总功耗约束下的大规模 MIMO 系统中,导频长度对频谱效率和能量效率的影响,但在做能效分析时,并没有考虑实际的功率消耗,而是用常数来替代。参考文献[9]针对信道状态信息未知的多小区大规模 MIMO 系统,研究了导频符号长度、导频功率和数据功率的资源分配问题,但没有考虑到低精度 ADC 对能效的影响。

基于以上分析,本文针对单小区低精度 ADC 大规模 MIMO 系统的能效问题进行了研究。在大规模 MIMO 上行链路中采用 MRC 接收用户发送信号,并推导出系统频谱效率和系统总功耗的解析式,然后以用户的最高发射功率作为约束条件建立起能效优化模型,再根据分数规划的性质,

将分数形式的优化问题转化为等价的减式形式优化问题,在此基础上,本文采用交替优化算法,在量化比特数一定的情况下,对发射功率和导频长度进行交替优化迭代更新。

2 系统模型

考虑一个单小区大规模 MIMO 上行通信系统,小区基站配有 M 根天线,服务于小区内的 K 个单天线用户,所有用户共享同一个时频资源块,为降低系统功耗,为每根天线配备低精度 ADC,大规模 MIMO 上行系统模型如图 1 所示。

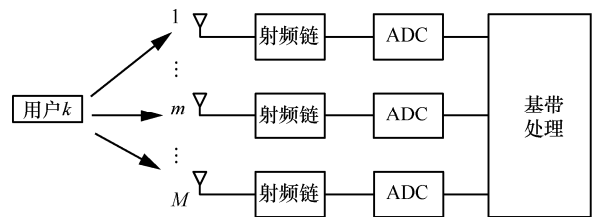


图 1 大规模 MIMO 上行系统模型

基站接收到的信号 $\mathbf{y}$ 可以表示为:

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

其中, p 表示每个用户的发射功率, $\mathbf{G} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{D}^{1/2}$ 表示基站和 K 个用户之间的信道矩阵, $\mathbf{H}$ 表示 $M \times K$ 维的快衰落系数矩阵, $\mathbf{D} = \text{diag}\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K\}$ 表示大尺度衰落矩阵, 其元素 β_k 表示用户 k 到基站的大尺度衰落系数, $\mathbf{x}$ 表示 $K \times 1$ 维发射信号向量, $\mathbf{n}$ 表示 $M \times 1$ 维的加性高斯白噪声。

采用 AQWN 模型^[4]对 ADC 的量化过程建模,将量化后的信号表示为理想信号和与 ADC 输入信号不相关的失真两个部分,则经过低精度 ADC 量化器后的输出信号可以表示为:

$$\mathbf{r} = \alpha \mathbf{y} + \mathbf{n}_q \quad (2)$$

其中, $\alpha = 1 - \rho$, ρ 为量化信噪比的倒数, $\mathbf{n}_q$ 代表与输入信号 $\mathbf{y}$ 无关的量化噪声, ADC 的量化比特数为 b , 当 $b \leq 5$ 时, 其对应的 α 见表 1。当 $b > 5$

时, 其对应的 α 值可以表示为 $\alpha = 1 - \frac{\pi\sqrt{3}}{2} 2^{-2b}$ 。

表 1 不同量化精度 b 下 α 的近似值

b	1	2	3	4	5
α	0.636 6	0.882 8	0.965 46	0.990 503	0.997 501

量化噪声的协方差矩阵为^[10]:

$$\mathbf{R}_{n_q} = E\{\mathbf{n}_q \mathbf{n}_q^H\} = E\{(\mathbf{r} - \alpha \mathbf{y})(\mathbf{r} - \alpha \mathbf{y})^H\} = \alpha(1 - \alpha) \text{diag}(\mathbf{R}_y) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{R}_y = E\{\mathbf{y} \mathbf{y}^H\}$, 经计算可以得出:

$$\mathbf{R}_{n_q} = \alpha(1 - \alpha) \text{diag}(\mathbf{I} + p \mathbf{G} \mathbf{G}^H) \quad (4)$$

2.1 上行导频

假设信道状态信息未知, 并且在符号长度为 T symbol 的连续时间间隔内, 信道状态信息保持不变, 相干时间间隔内信号传输过程如图 2 所示, 在一个相干时间间隔内, 基站采用用户发送的一组长度为 τ symbol 的导频序列对信道进行估计, 用 $(T - \tau)$ symbol 的符号长度进行数据传输。

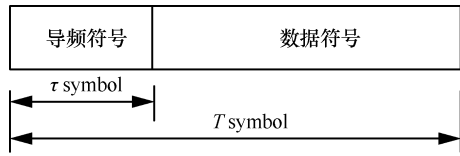


图 2 相干时间间隔内信号传输过程

采用最小均方误差 (MMSE) 对信道进行估计, 则信道矩阵 $\mathbf{G}$ 可以表示为:

$$\mathbf{R}_k = \text{lb} \left[1 + \frac{\alpha^2 p_d \|\hat{\mathbf{g}}_k \hat{\mathbf{g}}_k^H\|^2}{\alpha^2 p_d \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\hat{\mathbf{g}}_i^H \hat{\mathbf{g}}_i\|^2 + \alpha^2 p_d \sum_{i=1}^K \|\hat{\mathbf{g}}_k^H \tilde{\mathbf{g}}_i\|^2 + \alpha^2 \|\hat{\mathbf{g}}_k^H\|^2 + \|\hat{\mathbf{g}}_k^H \mathbf{n}_q \mathbf{n}_q^H \hat{\mathbf{g}}_k\|} \right] = \text{lb} \left[1 + \frac{\tau \alpha^3 p_d p_t (M+1) \beta_k^2}{\tau \alpha^2 \left(p_d p_t \beta_k \sum_{i=1}^K \beta_i + (1-2\alpha) p_d p_t \beta_k^2 + p_t \beta_k \right) + (\alpha^2 + \sigma_t^2) \left(p_d \sum_{i=1}^K \beta_i + 1 \right)} \right] \quad (9)$$

3 功率消耗模型

大规模 MIMO 系统中功率消耗主要由以下 3 个

$$\mathbf{G} = \hat{\mathbf{G}} + \tilde{\mathbf{G}} \quad (5)$$

其中, $\hat{\mathbf{G}}$ 为估计的信道, $\tilde{\mathbf{G}}$ 代表信道估计误差。信道估计误差矩阵的方差为^[8]:

$$\sigma_{\tilde{g}_{mk}}^2 = \frac{(\alpha^2 + \sigma_t^2) \beta_k}{\tau \alpha^2 p_t \beta_k + \alpha^2 + \sigma_t^2} \quad (6)$$

其中, $\sigma_t^2 = \alpha(1 - \alpha) \text{diag} \left(\mathbf{I} + p_t \sum_{k=1}^K \beta_k \right)$, p_t 为导频功率, τ 为导频长度。

2.2 数据传输

假设基站端对用户发送信号采用 MRC 接收, 考虑信道估计影响, 则检测后的信号向量为:

$$\mathbf{r} = \hat{\mathbf{G}}^H \mathbf{y} = \hat{\mathbf{G}}^H (\alpha \sqrt{p_d} \mathbf{G} \mathbf{x} + \alpha \mathbf{n} + \mathbf{n}_q) = \hat{\mathbf{G}}^H (\alpha \sqrt{p_d} (\hat{\mathbf{G}} + \tilde{\mathbf{G}}) \mathbf{x} + \alpha \mathbf{n} + \mathbf{n}_q) \quad (7)$$

其中, p_d 表示每个用户的数据功率。

将式 (7) 展开, 可以得到第 k 个用户的信号为:

$$r_k = \underbrace{\alpha \sqrt{p_d} \hat{\mathbf{g}}_k^H \hat{\mathbf{g}}_k x_k}_{\text{期望信号}} + \underbrace{\alpha \sqrt{p_d} \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\mathbf{g}}_k^H \hat{\mathbf{g}}_i x_i + \alpha \sqrt{p_d} \sum_{i=1}^K \hat{\mathbf{g}}_k^H \tilde{\mathbf{g}}_i x_i + \alpha \hat{\mathbf{g}}_k^H \mathbf{n} + \hat{\mathbf{g}}_k^H \mathbf{n}_q}_{\text{干扰分量}} \quad (8)$$

其中, $\hat{\mathbf{g}}_k$ 表示第 k 个用户到基站的估计信道, $\tilde{\mathbf{g}}_i$ 表示用户到基站的信道估计误差, x_k 、 x_i 分别表示第 k 个用户和第 i 个用户的发送信号。

第 k 个用户的频谱效率及化简如下^[8]:

方面组成。

(1) 用户端的功率放大

若 η 代表用户端的功率放大效率, 则导频和

数据传输所需的总功率为:

$$P_1 = \frac{K}{\eta T} (\tau p_t + (T - \tau) p_d) \quad (10)$$

(2) 传输链功率^[11]

传输链的功率消耗主要由链路上的信号传输功耗、ADC 功耗、信号的编解码功耗等构成:

$$P_2 = MP_{bs} + KP_u + MP_{ADC} \quad (11)$$

其中, P_{bs} 表示接收链路的信号传输功耗, P_u 表示发送链路的信号传输功耗及信号的编解码功耗, $P_{ADC} = D2^{\varphi b}$ 表示 ADC 的功耗, 其中 $D \in [10^{-8}, 10^{-7}]$, $\varphi \in [1, 2]$ 。

(3) 其他特定功率消耗

如信道估计功率、回程操作等, 这部分利用一个固定值 P_{site} 代替。根据式 (10) 和式 (11) 可以得到大规模 MIMO 系统总功耗的表达式为:

$$P_{tot}(b, \tau, p_d) = \frac{K}{\eta T} (\tau p_t + (T - \tau) p_d) + MP_{bs} + KP_u + MP_{ADC} + P_{site} \quad (12)$$

4 能效优化算法

由式 (9) 和式 (12) 可知, 同时考虑实际通信系统中的功率限制和导频序列长度限制, 可以得出上行通信系统的 EE 表达式为:

$$Q_1 = \max_{\{b, \tau, p_d\}} \frac{\left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau, b, p_d)}{P_{tot}(\tau, b, p_d)} \quad (13)$$

s.t. C1: $0 < p_d \leq P_{max}$
C2: $K \leq \tau \leq T$

根据分数规划的性质, 可以将式 (13) 中的非线性分数规划问题转化成等价的减式形式^[9]:

$$Q_2 = \max_{\{b, \tau, p_d\}} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau, b, p_d) - q^* P_{tot}(\tau, b, p_d) \quad (14)$$

s.t. C1-C2

其中, q 为一个辅助变量。若 q^* 为 Q_1 的解, 则 q^*

可以表示为:

$$q^* = \frac{\left(1 - \frac{\tau^*}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau^*, b^*, p_d^*)}{P_{tot}(\tau^*, b^*, p_d^*)} = \max_{\{b, \tau, p_d\}} \frac{\left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau, b, p_d)}{P_{tot}(\tau, b, p_d)} \quad (15)$$

其中, τ^* 、 b^* 、 p_d^* 分别表示能效达到最大时的导频长度、量化比特数以及数据传输功率。

当给定 q^* 时, 以 Q_2 为目标函数难以求出能效最优时的导频长度、数据功率和量化比特数, 因此本文采用交替优化算法, 将目标函数进行分解, 在量化比特数 b 固定的情况下, 将 Q_2 转化成以下形式:

$$Q_3 = \max_{\{\tau, p_d\}} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau, p_d) - q^* P_{tot}(\tau, p_d) \quad (16)$$

s.t. C1-C2

依次固定 τ 、 p_d 中的一个, 对另一个单变量进行优化, 循环至收敛, 收敛性证明见参考文献[12], 返回使 Q_3 最大时的 (τ, p_d) , 最后比较不同量化比特数下的 EE, 返回使 EE 最大的一组 (τ, b, p_d) 。

因此, 采用 Dinkelbach^[13]方法, 本文提出一种 EE 能效优化方案, 在每次迭代过程中计算出新的 q_i 值, 与上一次迭代计算出的 q 值进行对比, 当两次计算的 q 值差小于阈值 δ 时, 循环结束, 具体算法描述如下。

1) 初始化: $q = 0$, $q_i = q_0$, $\tau = \tau_0$, $p_d = p_{d_0}$,

$b = 1$

2) for $b = 1:16$

3) while $q_i - q > \delta$

4) $q = q_i$

5) 输入 p_{d_0} , 以 Q_2 为目标函数优

化 τ 从而更新 τ_0 , $\tau_0 \leftarrow \arg\max \{Q_3(\tau, p_{d_0})\}$;

6) 输入 τ_0 , 以 Q_2 为目标函数优化

p_d 从而更新 p_{d_0} , $p_{d_0} \leftarrow \arg\max \{Q_3(\tau_0, p_d)\}$;

7) 利用更新后的 (τ, b, p_d) , 重新



计算 q_i 的值:

$$q_i = \frac{\left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K R_k(\tau, b, p_d)}{P_{\text{tot}}(\tau, b, p_d)}$$

8) 返回步骤 3)

9) end while

10) end for

11) return (τ, b, p_d)

其中, 步骤 5) ~ 步骤 6) 可以由牛顿迭代法求解。以步骤 5) 为例, 给定初始值 $p_d = p_{d_0}$, 以 Q_3

为目标函数优化 τ , 证明如下。

将 $p_d = p_{d_0}$ 代入式 (15) 得:

$$Q_4(\tau, p_{d_0}) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \sum_{k=1}^K \ln \left(1 + \frac{A_k \tau}{B_k \tau + C_k}\right) - D_1 \tau + D_2 \quad (17)$$

其中, $A_k = \alpha^3 p_{d_0} p_t (M+1) \beta_k^2$,

$B_k = \alpha^2 p_t (p_{d_0} \beta_k \sum_{i=1}^K \beta_i + (1-2\alpha) p_{d_0} \beta_k^2 + p_t \beta_k)$,

$C_k = (\alpha^2 + \sigma_t^2) \left(p_d \sum_{i=1}^K \beta_i + 1\right)$, $D_1 = \frac{K}{\eta T} (p_t - p_{d_0})$,

$D_2 = \frac{K p_{d_0}}{\eta} + M P_{\text{bs}} + K P_{\text{u}} + M P_{\text{ADC}} + P_{\text{site}}$ 。

Q_4 关于 τ 分别求一次导数和二次导数, 经计算可以得到 $\left. \frac{\partial Q_4(\tau, p_{d_0})}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} \geq 0$,

$\left. \frac{\partial Q_4(\tau, p_{d_0})}{\partial \tau} \right|_{\tau=T} \leq 0$, $\frac{\partial^2 Q_4(\tau, p_{d_0})}{\partial \tau^2} < 0$ 。由此可知,

Q_4 随着 τ 的增加先增加再减少, 在 $\frac{\partial Q_4(\tau, b, p_{d_0})}{\partial \tau} = 0$ 时取得最优解, 因此可以利用牛顿迭代法求得最优解时对应的 τ 值。

同理可证得步骤 6)。

5 仿真结果与分析

假设一个单小区大规模 MIMO 系统的小区半径均为 500 m。连续时隙的长度 $T=196$ symbol。

小区用户随机且均匀地分布在距离基站 $d_0=100$ m 外的位置。大尺度衰落系数 $\beta_k = z_k / \|d_k / d_0\|^v$, 其中 z_k 是误差为 10 dB、服从对数正态分布的随机变量, d_k 表示第 k 个用户到基站之间的距离, $v=3.8$ 为路径损耗因子, 循环阈值 δ 为 0.01, 参考参考文献[8]与参考文献[11]中的参数设置, 仿真中的主要参数见表 2。

表 2 仿真参数值

参数	值
与 ADC 相关的固定值 $\mathcal{D}$	10^{-7}
与 ADC 相关的固定值 ϕ	1
功率放大效率因子 η	0.3
BS 端每根天线的传输链消耗功率 P_{b}	1 W
每个用户端传输链消耗功率 P_{u}	0.2 W
其他特定消耗功率 P_{site}	5 W
用户数 K	10

图 3 给出了基站天线数为 100 和 200 两种情况下不同量化比特数 b 对频谱效率的影响。从图 3 中可以看出, 随着量化比特数的提高, 系统频谱效率先提高, 然后趋向于稳定, 这是由于当量化比特数提高到一定值时, 其对应的量化精确度几乎不再提高, 也就导致了频谱效率不再提高。还可以看出在相同量化精度和基站天线数的情况下, 本文算法的频谱效率明显高于只优化导频长度的参考文献[8]的频谱效率。

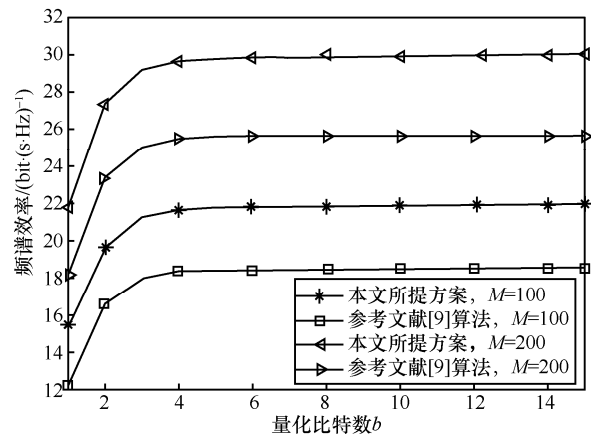


图 3 不同量化比特数 b 对频谱效率的影响

图4给出了不同量化比特数 b 对应的能量效率。从图4中可以看出,随着量化比特数的提高,系统能量效率先提高,当量化比特数大于4时,能量效率开始下降,这是由于量化所需功耗随量化精度的增加而增加,当量化精度提高到一定值时,其对应的频谱效率不再提高,但是其对应的量化器功耗还呈指数增长,使得系统总功耗增加,能量效率降低。还可以看出在相同量化精度和基站天线数的情况下,本文算法的能量效率明显高于参考文献[8]的能量效率。

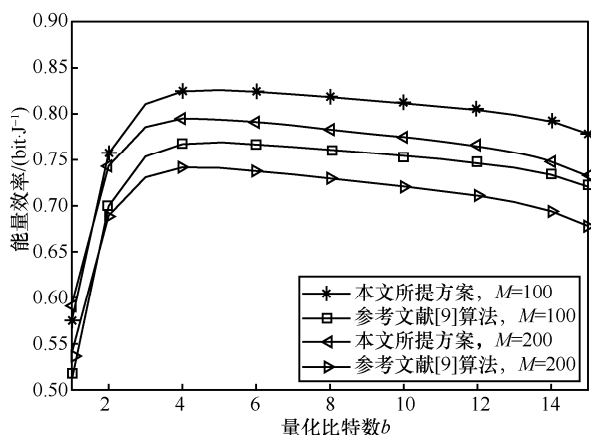


图4 不同量化比特数 b 对能量效率的影响

图5给出了不同基站天线数情况下系统的能量效率。从图5中可以看出,随着基站天线数的提高,系统能量效率先提高,然后呈下降趋势,这是由于当天线数量增加到一定程度后,信道趋于正交化,再增加天线数也不能使系统频谱效率提高,但是会使系统总功耗增加,造成能量效率降低。还可以看出在相同天线数的情况下,本文算法的能量效率明显高于参考文献[8]的能量效率。

6 结束语

本文研究了单小区低精度ADC的大规模MIMO系统能效最大化的资源分配问题,提出了一种对量化精度、数据功率以及导频长度进行联合优化算法,其主要思想是将复杂的多变量优化问题分解为单变量优化问题进行交替优化,实现

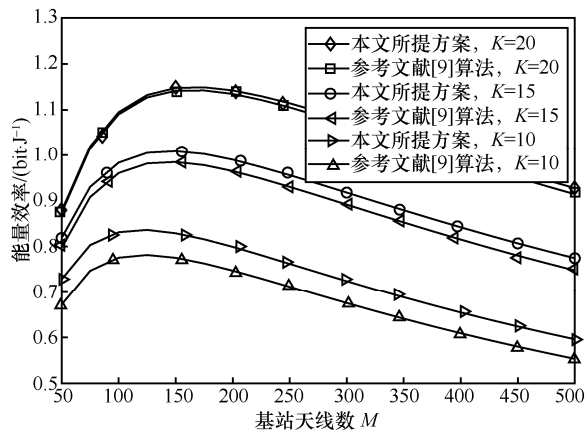


图5 能量效率随基站天线数变化情况

信道状态信息未知情况下的能效最大化。后续的研究将进一步考虑混合精度ADC对能效的影响。

参考文献:

- [1] ALKHATEEB A, NAM Y H, ZHANG J, et al. Massive MIMO combining with switches[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(3): 232-235.
- [2] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antenna[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [3] ORHAN O, ERKIP E, RANGAN S. Low power analog-to-digital conversion in millimeter wave systems: impact of resolution and bandwidth on performance[Z]. 2015.
- [4] 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.
- [5] SINGH J, DABEER O, MADHOW U. On the limits of communication with low-precision analog-to-digital conversion at the receiver[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [6] FAN L, JIN S, WEN C, et al. Uplink achievable rate for massive MIMO systems with low-resolution ADC[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2186-2189.
- [7] FAN L, QIAO D, JIN S, et al. Optimal pilot length for uplink massive MIMO systems with low-resolution ADC[C]//Proceedings of Sensor Array & Multichannel Signal Processing Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [8] QIAO D, YANG X, TAN W, et al. Low-cost massive MIMO: pilot length and ADC resolution[J]. Journal of Communications & Information Networks, 2018, 3(2): 23-36.
- [9] 曹海燕, 冯瑞瑞, 方昕, 等. 大规模MIMO系统中基于能效最大化的资源联合优化算法[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 84-90.

CAO H L, FENG R R, FANG X, et al. A joint optimization al-



- gorithm based on energy efficiency maximization for massive MIMO systems[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 84-90.
- [10] 乔丹, 温朝凯, 高飞飞, 等. 基于低精度量化的无线传输理论最新研究进展[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 21-33.
- QIAO D, WEN C K, GAO F F, et al. An overview of low resolution quantization in wireless communication system[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 21-33.
- [11] YANG H, MARZETTA T L. Total energy efficiency of cellular large scale antenna system multiple access mobile networks[C]//Proceedings of 2013 IEEE Online Conference on Green Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [12] BEZDEK J C, HATHAWAY R J. Convergence of alternating optimization[J]. Neural Parallel & Scientific Computations, 2003, 11(4): 351-368.
- [13] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.

[作者简介]



曹海燕 (1975-), 女, 博士, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测、LTE 物理层标准等。



胡文娟 (1994-), 女, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信系统、大规模 MIMO 系统中的能效优化技术。



智应娟 (1995-), 女, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信系统、大规模 MIMO 系统中的能效优化技术。



许方敏 (1980-), 女, 杭州电子科技大学讲师, 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。

方昕 (1975-), 女, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为 4G/5G 移动通信物理层算法。