



TD-LTE 电力无线专网中射频失配下 MIMO 功率分配算法

冯宝, 马涛, 蔡世龙, 李洋

(南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 210061)

摘要: 随着智能配电网的发展, 采用 TD-LTE 技术的电力无线专网逐渐成为了热门的研究课题。其中, 多输入多输出(MIMO)系统是 TD-LTE 电力无线专网的一项关键技术。在 TD-LTE 中, 常采用时分双工的方式估计信道信息, 进行合适的功率分配, 使得通信系统的频谱效率最大化。然而由于射频链路的不匹配, 在实际的通信系统中完整的上下行信道并不能实现完全的对称。分析了射频不匹配下 MIMO 系统的性能, 给出了次优的功率分配方案, 结合近似的容量表达式, 对比分析了射频失配和匹配下的系统频谱效率。仿真结果表明, 相比于最优功率分配, 次优功率分配算法下的系统容量会有一定的损失, 但是相对于等功率分配算法仍有一定的性能提升, 并且不需要复杂的校准过程, 便于操作实现, 证明了该次优功率分配算法的有效性。

关键词: 电力无线专网; TD-LTE; MIMO; 功率分配; 射频失配

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018022

Power allocation of MIMO system with RF mismatch in TD-LTE power wireless private network

FENG Bao, MA Tao, CAI Shilong, LI Yang

NARI Group Corporation (China Electric Power Research Institute), Nanjing 210061, China

Abstract: With the development of smart distribution network, the power wireless private network using TD-LTE technology has gradually become a hot research topic. Among them, multiple-input multiple-output (MIMO) system is a key technology of TD-LTE power wireless private network. In TD-LTE, time-division duplex is often used to estimate channel information and perform appropriate power allocation to maximize the spectral efficiency of the communication system. However, due to the mismatch of radio frequency link, the complete uplink and downlink channels in the actual communication system can not achieve complete symmetry. The performance of MIMO system under radio frequency mismatch was analyzed and the suboptimal power allocation scheme was given. Combining with the approximate capacity expression, the spectral efficiency of the system under radio frequency mismatch and matching was analyzed. Simulation results show that compared with the optimal power allocation, the system capacity will suffer some loss due to the sub-optimal power allocation algorithm, but there is still some performance improvement compared with the equal power allocation algorithm, and does not require complicated calibration process. The realization of the operation proves the validity of the sub-optimal power allocation algorithm.

Key words: power wireless private network, TD-LTE, multiple-input multiple-output, power allocation, RF mismatch

收稿日期: 2017-08-16; 修回日期: 2017-12-08

通信作者: 冯宝, fengbao9111@163.com



1 引言

分时长期演进 (time division long term evolution, TD-LTE) 是中国提出的 3G 标准时分同步码分多址接入 (time division-synchronous code division multiple access, TD-SCDMA) 的后续演进版本, 采用多输入多输出、正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 等技术, 能有效地提高系统的性能^[1]。TD-LTE 电力无线专网系统指的是采用 TD-LTE 为技术核心, 用于电力监控系统、电力通信及数据网络的专有通信网络。由于 TD-LTE 电力无线专网具有较高的数据吞吐量、频谱利用效率等优点, 已经逐渐成为了电力通信行业的热门研究课题^[2-4]。

其中, MIMO 技术作为 TD-LTE 电力无线专网的关键技术之一, 在近些年得到了迅速发展。Foschini G J 与 Telatar E 等人^[5]通过信息论的角度分析发现, 在 MIMO 系统中, 假设信道为独立且服从相同分布的瑞利衰落, 在固定的发射功率和带宽下, 系统的容量随着发射天线与接收天线数的最小值线性增加, 系统的频谱利用率也能得到显著的提高, 他们开发的贝尔实验室分层空时编码 (Bell Laboratories layer space-time, BLAST) 算法, 可以使得 MIMO 系统获得 42 bit/(s·Hz) 的频谱效率, 而传统的无线通信系统的频谱效率只能达到 1~5 bit/(s·Hz)。

MIMO 系统显著的容量优势吸引着越来越多的研究人员的关注^[16]。在功率有限的条件下, 为了最大化系统的容量, 功率分配算法就显得愈发重要。为了进行有针对性的功率分配, 需要发送端知道准确的信道状态信息。通常的做法是根据时分双工系统的信道互易性, 通过估计上行信道的信道状态信息 (channel state information, CSI) 近似作为下行信道的 CSI, 然而由于上下行信道的射频链路幅度增益矩阵并不能完全一致^[6-8], 信道的互易性会受到破坏, 功率分配方案也会有一

定的性能损失。

为了提高 MIMO 系统的信道容量, 参考文献[9,10]分别提出了发送端已知 CSI 和未知 CSI 情况下的功率分配方案, 并给出了相应的信道容量的表达式, 但是没有考虑射频失配对功率分配的影响, 参考文献[11,12]对 MIMO 系统中射频失配的问题进行了分析。研究结果表明, 射频的失配会对系统性能造成一定的损失, 同时, 基站端的射频失配对系统性能影响更大, 而相比较之下, 用户端的射频失配几乎可以忽略不计。

综上所述, 目前对于 MIMO 系统中射频幅度失配下的功率分配及其对应的容量分析还是很少, 基于上述原因, 本文构造了一个基站端接收和发送射频幅度矩阵不匹配的 MIMO 系统模型, 给出了最优和次优的功率分配算法, 并基于系统容量的近似表达式对次优和最优功率分配算法的下行信道容量进行了对比, 最后对系统进行了仿真和分析。

$(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ 分别表示为转置和共轭转置, $E[\cdot]$ 表示取期望, $\text{diag}(\mathbf{v})$ 表示对角元素为向量 $\mathbf{v}$ 的对角矩阵。

2 系统模型

考虑采用时分双工 (time division duplexing, TDD) 模式的单用户 MIMO 系统, 其中, 基站端配置有 N 根天线, 移动台配置 M 根天线, 为了便于分析, 不妨假设 $N \leq M$ (该假设不影响结论, 分析过程类似), 即基站端天线数目不大于移动台天线数目, 由于移动端射频失配对系统性能影响很小, 所以本文只考虑基站端的射频幅度失配, 移动台天线的射频幅度增益矩阵设为单位矩阵 $\mathbf{I}_M$ 。令 $\mathbf{C}_T$ 和 $\mathbf{C}_R$ 分别表示基站端的射频发送和射频接收幅度增益对角矩阵, 有:

$$\mathbf{C}_T = \text{diag}\{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N\} \quad (1)$$

$$\mathbf{C}_R = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_n, \dots, r_N\} \quad (2)$$

其中, t_n 和 r_n 分别为基站端第 n 根天线的射频发送幅度增益因子和接收幅度增益因子, 二者服从对数正态分布^[11], 即 $\ln(t_n) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{RF}}^2)$, $\ln(r_n) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{RF}}^2)$, 其中, σ_{RF}^2 为幅度增益因子变量的对数的方差。所以, 在考虑射频幅度增益矩阵后, 上下行链路完整的信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{G}_{\text{UL}} = \mathbf{C}_{\text{R}} \mathbf{H}^{\text{T}} \mathbf{I}_{\text{M}} = \mathbf{C}_{\text{R}} \mathbf{H}^{\text{T}} \quad (3)$$

$$\mathbf{G}_{\text{DL}} = \mathbf{I}_{\text{M}} \mathbf{H} \mathbf{C}_{\text{T}} = \mathbf{H} \mathbf{C}_{\text{T}} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{G}_{\text{UL}} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为完整的上行信道矩阵, $\mathbf{G}_{\text{DL}} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 为完整的下行信道矩阵, $\mathbf{H} = \{h_{ij}\} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示下行链路无线部分的信道矩阵, 其元素 h_{ij} 表示基站第 j 根发送天线到移动台第 i 根接收天线间的无线信道等效基带脉冲响应, 将其建模为瑞利衰落, 即 $h_{ij} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。由式(3)和式(4)可知, 在 TDD 系统中, 由于 $\mathbf{G}_{\text{UL}}^{\text{T}} \neq \mathbf{G}_{\text{DL}}$, 导致上下行的信道不匹配, 从而对系统的功率分配算法造成影响, 进而会降低 MIMO 系统的容量。

移动台接收到的信号矢量表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_{\text{DL}} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为 $N \times 1$ 维的发送信号矢量, $\mathbf{n}$ 为 $M \times 1$ 维的等效基带加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 矢量, 其元素服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的复高斯分布。

3 性能分析

对于上述模型的 MIMO 无线通信系统, 其信道容量可以表示为^[10]:

$$C = \text{lb} \left\{ \det \left[\mathbf{I}_{\text{M}} + \frac{\mathbf{G}_{\text{DL}} \mathbf{R}_{\text{X}} \mathbf{G}_{\text{DL}}^{\text{H}}}{\sigma_n^2} \right] \right\} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{R}_{\text{X}}$ 为发送自相关矩阵。对式(6)进行奇异值分解, 可以得到容量表达式的另外一种形式:

$$C = \sum_{i=1}^N \text{lb} \left(1 + \frac{P_i}{\sigma_n^2} \lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i} \right) \quad (7)$$

其中, $\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, 1}, \lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, 2}, \dots, \lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, N}$ 为 $\mathbf{G}_{\text{DL}}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{DL}}$ 降序排列的特征值, $P_1, P_2, \dots, P_N$ 为发送自相关矩阵 $\mathbf{R}_{\text{X}}$ 的特征值, 即功率分配大小。

在时分双工系统中, 由于存在射频不匹配, 导致 $\mathbf{C}_{\text{T}} \neq \mathbf{C}_{\text{R}}$, 所以 $\mathbf{G}_{\text{UL}}^{\text{T}} \neq \mathbf{G}_{\text{DL}}$ 。在这种情况下, 可以对基站发送天线进行次优的功率分配方案, 以达到最大化信道容量的目的。通过拉格朗日乘子法, 根据总功率约束 $\sum_{i=1}^N P_i = P_{\text{T}}$, 可以得到次优的功率分配:

$$P_i^{\text{sub}} = \left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\text{G}_{\text{UL}}, i}^{\text{T}}} \right)^+ \quad (8)$$

其中:

$$(s)^+ = \begin{cases} s, & s > 0 \\ 0, & s \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, φ 的值由总功率约束 P_{T} 决定, 将式(9)代入式(7)即可得到次优的功率分配方案对应的信道容量:

$$C^{\text{sub}} = \sum_{i=1}^K \text{lb} \left(1 + \left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\text{G}_{\text{UL}}, i}^{\text{T}}} \right)^+ \frac{\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}}{\sigma_n^2} \right) \quad (10)$$

若在基站端进行了天线的校准, 使得 $\mathbf{C}_{\text{T}} = \mathbf{C}_{\text{R}}$, 即 $\mathbf{G}_{\text{UL}}^{\text{T}} = \mathbf{G}_{\text{DL}}$, 所以 $\lambda_{\text{G}_{\text{UL}}, i}^{\text{T}} = \lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}$, 此时式(10)就等效为最优功率分配算法下的信道容量:

$$C^{\text{opt}} = \sum_{i=1}^N \text{lb} \left(1 + \left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}} \right)^+ \frac{\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}}{\sigma_n^2} \right) \quad (11)$$

对应的最优功率分配表示为:

$$P_i^{\text{opt}} = \left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}} \right)^+ \quad (12)$$

为了对比次优和最优的功率分配对应的信道容量, 考虑到式(11)和式(12)不方便直接进行比较, 所以尝试将特征值用近似值表示。对于 $\lambda_{\text{G}_{\text{DL}}, i}$, 为矩阵 $\mathbf{G}_{\text{DL}}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{DL}}$ 即 $\mathbf{C}_{\text{T}}^{\text{H}} \mathbf{H}^{\text{H}} \mathbf{H} \mathbf{C}_{\text{T}}$ 的特征值, 根据矩阵乘积的性质, $\mathbf{C}_{\text{T}}^{\text{H}} \mathbf{H}^{\text{H}} \mathbf{H} \mathbf{C}_{\text{T}}$ 和 $\mathbf{C}_{\text{T}} \mathbf{C}_{\text{T}}^{\text{H}} \mathbf{H}^{\text{H}} \mathbf{H}$ 具



有相同的特征值。显然, $\mathbf{C}_T \mathbf{C}_T^H$ 为厄尔米特正定矩阵, $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ 为厄尔米特半正定矩阵, 此时可以运用参考文献[13]中的推论 1.8, 得到:

$$\sqrt{\lambda_{H,N} \lambda_{C_T,N}} \sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} \leq \lambda_{G_{DL},i} \leq \sqrt{\lambda_{H,1} \lambda_{C_T,1}} \sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} \quad (13)$$

取 $\lambda_{G_{DL},i}$ 符合上述条件的近似值 $\tilde{\lambda}_{G_{DL},i} = \sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}}$. $\sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} = \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}$, 同理, 取 $\lambda_{G_{UL},i}$ 的近似值 $\tilde{\lambda}_{G_{UL},i} = \sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \sqrt{\lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} = \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}$. 同时, 为了方便分析二者的区别, 不妨假设总功率约束 P_T 足够大, 使得每个子信道分配的功率都大于零, 没有信道被中断, 即:

$$\left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{G_{DL},i}} \right)^+ = \varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{G_{DL},i}} \quad (14)$$

$$\left(\varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{G_{UL},i}} \right)^+ = \varphi - \frac{\sigma_n^2}{\lambda_{G_{UL},i}} \quad (15)$$

所以, 最优和次优功率分配的遍历信道容量又可以近似表示为:

$$\mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{opt}}] \approx \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\text{lb} \left(\varphi \frac{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}}{\sigma_n^2} \right) \right] \quad (16)$$

$$\mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{sub}}] \approx \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\text{lb} \left(1 + \varphi \frac{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}}{\sigma_n^2} - \frac{\lambda_{C_T,i}}{\lambda_{C_R,i}} \right) \right] \quad (17)$$

从式 (17) 和式 (18) 可以看出, 如果不考虑射频幅度增益, 即 $\mathbf{C}_T = \mathbf{C}_R = \mathbf{I}_N$ 时, $\lambda_{C_T,i} = \lambda_{C_R,i} = 1$, 次优和最优功率分配算法相一致, 都等效为最基础的注水算法的容量计算式, 可以得到式 (18):

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{opt}}] - \mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{sub}}] &\approx \sum_{i=1}^K \mathbb{E} \left[\text{lb} \left(\frac{\varphi \frac{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}}{\sigma_n^2}}{1 + \varphi \frac{\lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}}{\sigma_n^2} - \frac{\lambda_{C_T,i}}{\lambda_{C_R,i}}} \right) \right] \\ &= \sum_{i=1}^K \mathbb{E} \left[\text{lb} \left(\left(1 + \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} - \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \right)^{-1} \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

因为 $\text{lb}(x^{-1})$ 为凸函数, 根据 Jensen 不等式,

可以得到:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left[\text{lb} \left(\left(1 + \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} - \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \right)^{-1} \right) \right] &\geq \\ \text{lb} \left(\mathbb{E} \left[\left(1 + \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} - \frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \right)^{-1} \right] \right) &= \\ \text{lb} \left(\left(1 + \mathbb{E} \left[\frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} \right] - \mathbb{E} \left[\frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \right] \right)^{-1} \right) & \end{aligned} \quad (19)$$

因为 $\mathbf{C}_T$ 、 $\mathbf{C}_R$ 的对角元素服从相同的分布, 所以:

$$\mathbb{E} \left[\frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_T,i}} \right] = \mathbb{E} \left[\frac{\sigma_n^2}{\varphi \lambda_{H,i} \lambda_{C_R,i}} \right] \quad (20)$$

代入式 (19) 与式 (20) 可得:

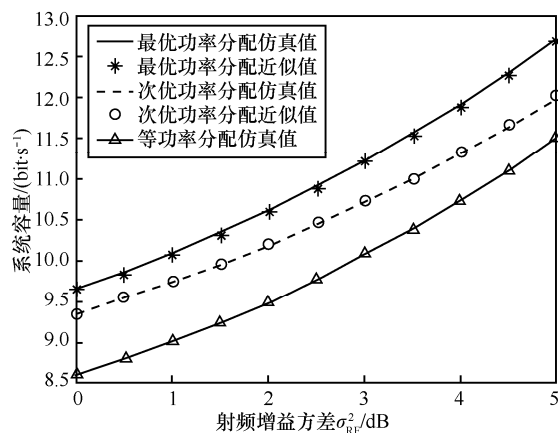
$$\mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{opt}}] - \mathbb{E}[\mathbf{C}^{\text{sub}}] \geq \sum_{i=1}^K \text{lb}(1) = 0 \quad (21)$$

也就是说, 除非 $\mathbf{C}_T$ 和 $\mathbf{C}_R$ 完全一致, 射频匹配 (最优) 的功率分配算法的信道容量总是比射频失配 (次优) 的功率分配算法高。但是, 若要实现最优功率分配算法, 则需要在基站端进行天线的射频失配校准, 操作复杂、代价较大, 相比较之下, 次优的功率分配算法不需要额外的成本, 更加便于操作实现。

4 仿真结果

本节对上述最优和次优功率分配算法的信道容量进行了仿真和分析, 并比较了次优功率分配和最优功率分配的区别。在不同功率分配方案下对系统容量的影响如图 1 所示。在仿真中, 令噪声方差归一化为 1。接收天线数 $M = 4$, 发送天线数 $N = 4$, 总信噪比为 5 dB。

从图 1 中可以看出, 随着基站天线射频幅度增益因子的分布方差 σ_{RF}^2 的提高, 3 种功率分配方案对应的系统信道容量也随之上升, 这是因为,

图1 σ_{RF}^2 在不同功率分配方案下对系统容量的影响

σ_{RF}^2 的升高会导致射频幅度增益的功率上升, 等效于系统平均信噪比上升, 根据香农定理, 系统信道容量也会相应上升; 图1中次优功率分配和最优功率分配的近似值都能很好地贴合对应的仿真值, 这验证了文中给出的信道容量近似表达式的有效性; 另外, 次优功率分配的确要比最优功率分配方案的容量低, 且随着系统射频幅度增益方差的增大, 二者的差距越来越大, 这是由于方差越大, 上下行信道的不匹配程度就越高, 所以次优功率分配算法的损失也就越大, 但是可以看出, 在 σ_{RF}^2 不太大的时候, 两种算法的信道容量都高于等功率分配算法的信道容量, 考虑到在实际的系统中 σ_{RF}^2 不可能太大, 所以次优的功率分配方案有一定的有效性。

图2、图3分别为射频幅度增益因子的分布方差 $\sigma_{RF}^2 = 3\text{dB}$ 和 $\sigma_{RF}^2 = 0$ 的条件下, 平均信噪比在不同功率分配方案下对系统容量的影响。从图2中可以看出, 随着平均信噪比的增加, 两种功率分配方案的信道容量也随之上升, 并且随着天线数目的 M 和 N 的增加, 信道容量也会上升, 这与一般的功率分配的结论是一致的; 另外, 由于射频不匹配的原因, 次优功率分配方案的信道容量总是要稍低于最优功率分配方案, 验证了式(20)的结论。图3中的曲线趋势和图2中的一致, 不过可以看出, 因为 $\sigma_{RF}^2 = 0$, 即 $\mathbf{C}_T = \mathbf{C}_R = \mathbf{I}_N$, 所

以次优和最优的功率分配没有区别, 和不考虑射频幅度增益失配的信道容量相一致, 符合式(15)和式(16)的结论。

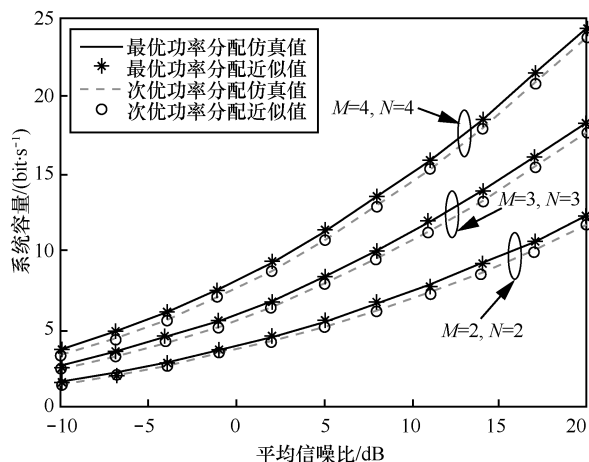


图2 平均信噪比在不同功率分配方案下对系统容量的影响

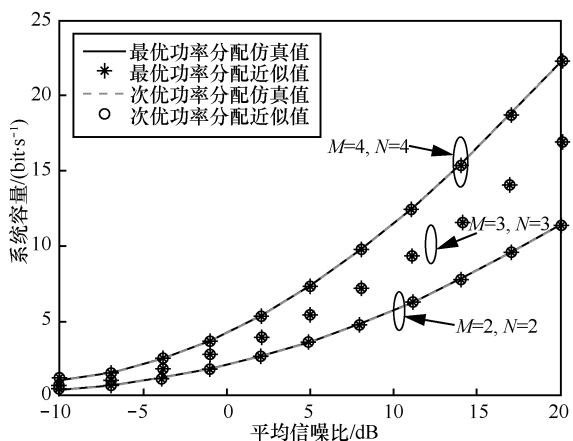


图3 平均信噪比在不同功率分配方案下对系统容量的影响

5 结束语

本文针对 TD-LTE 电力无线专网中的关键技术之一的 MIMO 技术进行了研究, 分析了采用 TDD 方式的射频幅度增益矩阵影响下的 MIMO 系统功率分配, 提出了基于基站射频幅度增益不匹配的功率分配方案, 该方案在基站进行天线校准后, 等效于最优的功率分配。在 TD-LTE 电力无线专网中, 采用次优的功率分配算法既能保证智能配电网的需求, 又能有效地降低硬件成本, 便于操作实现, 为电力无线专网的建设提供了一



种有效可靠的功率分配方案。

参考文献:

- [1] 汪丁鼎, 龚追飞. TD-SCDMA 的长期演进——TD-LTE[J]. 移动通信, 2008, 32(17): 33-38.
WANG D D, GONG Z F. Long-term evolution of TD-SCDMA - TD-LTE[J]. Mobile Communications, 2008, 32(17): 33-38.
- [2] 田波. 4G 无线移动专网在电力通信中的应用前景解析[J]. 通讯世界, 2016(22): 218-219.
TIAN B. The application prospect of wireless mobile network in power communication[J]. Telecom World, 2016(22): 218-219.
- [3] 李金友, 闫磊, 齐欢, 等. 基于 LTE230 系统的电力无线通信专网研究与实践[J]. 电气技术, 2014, 15(1): 132-134.
LI J Y, YAN L, QI H, et al. Research and practice of power wireless communication private network based on LTE230 system[J]. Electrical Engineering, 2014, 15(1): 132-134.
- [4] YU J, CAI S L, GAO X. LTE wireless private network planning in electric power system[C]//IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), Oct 14-17, 2016, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 3020-3024.
- [5] PAULRAJ A J, GORE D A, NABAR R U, et al. An overview of MIMO communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 198-218.
- [6] HAN S, YANG C, WANG G, et al. Coordinated multi-point transmission strategies for TDD systems with non-ideal channel reciprocity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(10): 4256-4270.
- [7] WEI H, WANG D, WANG J, et al. Impact of RF mismatches on the performance of massive MIMO systems with ZF precoding[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(2): 1-14.
- [8] HUANG F, GENG J, WANG Y, et al. Performance analysis of antenna calibration in coordinated multi-point transmission system[C]//Vehicular Technology Conference, May 16-19, 2010, Taipei, Taiwan, China. Piscataway: IEEE Press, 2010:1-5.
- [9] GOLDSMITH A, JAFAR S A, JINDAL N, et al. Capacity limits of MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 21(5): 684-702.
- [10] KHALIGHI M A, RAOOF K, JOURDAIN G. Capacity of wireless communication systems employing antenna arrays, a tutorial study[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [11] HUANG F, WANG Y, GENG J, et al. Antenna mismatch and calibration problem in coordinated multi-point transmission system[J]. IET Communications, 2012, 6(3): 289-299.
- [12] ALCATEL-LUCENT. Channel reciprocity modeling and performance evaluation[C]//3GPP TSG RAN WG1 #59bis Meeting, Jan 18-22, 2010, Valencia, Spain. [S.l.:s.n.], 2010: 1-10.
- [13] 宋永忠. 矩阵乘积的特征值的估计[J]. 南京师大学报自然科学版, 1994(2): 10-13.
SONG Y Z. Estimation of eigenvalues of matrix product[J]. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition), 1994(2): 10-13.
- [14] 李文字, 宋丽娜, 何秀森. LTE 产业发展分析和展望[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 6-11.
LI W Y, SONG L N, HE X M. Development analysis and perspective on LTE current status[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 6-11.
- [15] 毕奇, 谢伟良, 陈鹏. LTE 多天线技术发展趋势[J]. 电信科学, 2014, 30(10): 1-7.
BI Q, XIE W L, CHEN P. Progress and trends of multiple antennas technology in LTE network[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(10): 1-7.
- [16] 蒋涉权, 王晶, 彭超. MIMO 系统中空时编码性能仿真和分析[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 35-41, 51.
JIANG S Q, WANG J, PENG C, et al. Simulation and analysis on performance of space-time coding in MIMO[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 35-41, 51.

【作者简介】



冯宝(1984-), 男, 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院)工程师, 主要从事电力系统通信和量子通信技术研究工作。



马涛(1983-), 男, 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院)高级工程师、技术标准管理委员会委员, 国家电网公司优秀专家人才, 江苏省科学技术协会首席专家, 江苏省微型电脑应用协会秘书, 长期从事电力系统通信、电力 LTE 宽带无线应用技术研究工作。



蔡世龙(1975-), 男, 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院)高级工程师, 主要从事电力无线通信技术研究工作。

李洋(1975-), 男, 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院)高级工程师, 主要从事电力系统通信技术研究工作。