

文章编号:1007-5321(2017)05-0050-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-073

# 大规模 MIMO 上行系统中的等增益合并技术

金思年, 高鑫鑫, 岳殿武  
(大连海事大学 信息与科学技术学院, 大连 116026)

**摘要:** 在非完美和完美信道状态信息(CSI)两种情况下,对多小区大规模多输入多输出(MIMO)上行系统进行分析,推导了等增益合并(EGC)方案的可达速率表达式,并与最大比合并(MRC)方案进行比较.仿真结果表明,所推导的 EGC 闭合表达式与蒙特卡洛仿真结果相吻合;在非完美 CSI 且功率收缩因子为 0.5 的情况和完美 CSI 且功率收缩因子为 1 的情况下,随着天线数不断增加,EGC 方案的频谱效率不断增加,并逐渐趋近于一个定值,说明了大规模 MIMO 中的 EGC 方案如 MRC 方案一样也具有有效节约能量的特点.

**关键词:** 大规模 MIMO; 等增益合并; 最大比合并; 功率收缩

**中图分类号:** TN911.23

**文献标志码:** A

## Equal Gain Combining Technique for Massive MIMO Uplink Systems

JIN Si-nian, GAO Xin-xin, YUE Dian-wu

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The uplink scenario of multi-cell massive multiple input multiple output with perfect and imperfect channel state information (CSI) is analyzed. The achievable rate of equal gain combining (EGC) scheme is deduced and compared with that of maximal-ratio combining (MRC) scheme. Simulation results show that the deduced EGC closed-form expression agrees well with Monte Carlo simulation results. In the two cases of imperfect CSI with the power scaling factor of 0.5 and perfect CSI with the power scaling factor of 1, as the number of antennas increases, the spectral efficiency of EGC scheme increases and gradually approaches to a fixed value. This implies that the EGC scheme in massive MIMO also has such a characteristic of efficient saving energy like the MRC scheme.

**Key words:** massive multiple input multiple output; equal gain combining; maximal-ratio combining; power scaling

在 2010 年,Marzetta 提出了大规模多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)技术<sup>[1]</sup>,该技术通过显著增加基站端天线数量,以深度挖掘空间维度无线资源,能更好地改善小规模 MIMO 的性能局限.由于大规模 MIMO 在能量效率、频谱效率、鲁棒性和可靠性等方面的巨大优势,目前已成为 5 G

无线通信中最具潜力且最具挑战的研究方向<sup>[2-3]</sup>.众所周知,在移动通信中,等增益合并(EGC, equal gain combining)和最大比合并(MRC, maximal-ratio combining)接收技术是两种最常用的抗衰落技术<sup>[4-5]</sup>.当前,已出现了很多基于 MRC 的大规模 MIMO 系统分析的论文<sup>[2,6]</sup>.可是,相应的涉及 EGC 的

收稿日期:2017-09-24

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20132125110006);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132016347);辽宁省自然科学基金项目(201602086)

**作者简介:** 金思年(1991—),男,博士生, E-mail: jinsinian@dlmu.edu.cn;岳殿武(1965—),男,教授.

研究结果却鲜有报道. EGC 虽比 MRC 性能略差,但在实际应用中具有低复杂度和低延时的特点,因此更为经济适用<sup>[5]</sup>.

鉴于此,本文深入研究了多小区大规模 MIMO 系统上行链路采用 EGC 的传输方案,推导了 EGC 系统的可达速率,并与 MRC 方案进行了比较. 最后给出了仿真结果和理论分析. 下文中出现的 $[\ ]^T$ 和 $[\ ]^H$ 分别代表转置和共轭转置; $[\mathbf{A}]_{mn}$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 $m$ 行 $n$ 列的元素. $E\{\}$ 和 $\text{Var}(\cdot)$ 分别代表期望函数和方差函数; $\mathbf{I}_M$ 和 $\mathbf{0}$ 分别表示单位矩阵和 $\mathbf{0}$ 矩阵; $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{\Sigma})$ 代表均值为 $\mathbf{0}$ ,协方差矩阵为 $\mathbf{\Sigma}$ 的循环对称复高斯向量 $\mathbf{z}$ .

## 1 系统模型及信道估计

### 1.1 系统模型

假设共有 $L$ 个小区,每个小区中心配置一个具有 $M$ 根天线的基站,每个小区服务 $K$ 个单天线用户,小区间频率复用因子为1. 假定 $l$ 小区的 $K$ 个用户向基站 $i$ 发送的信号为 $\mathbf{x}_l = [x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lK}]^T \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ ,  $l = 1, \dots, L$ ,第 $i$ 个基站接收到的信号为 $\mathbf{y}_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iM}]^T \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ ,第 $i$ 个基站接收到的噪声为 $\mathbf{n}_i = [n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iM}]^T \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ ,其中 $\mathbf{n}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$ ,则第 $i$ 个基站的接收信号 $\mathbf{y}_i$ 为<sup>[2]</sup>

$$\mathbf{y}_i = \sum_{l=1}^L \sqrt{p_u} \mathbf{G}_{il} \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

假定系统用户之间是等功率发送的,并用 $p_u$ 表示用户的发射功率. $\mathbf{g}_{ilm} = [\mathbf{G}_{il}]_{mk}$ 代表 $l$ 小区的第 $k$ 个用户与 $i$ 小区的第 $m$ 根天线之间的信道增益. 因此 $\mathbf{g}_{ilm}$ 可以写为

$$\mathbf{g}_{ilm} = \sqrt{\beta_{ilk}} h_{ilm} \quad (2)$$

其中: $h_{ilm} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 代表小尺度衰落系数; $\beta_{ilk}$ 代表大尺度衰落系数; $\mathbf{G}_{il}$ 的第 $k$ 列元素 $\mathbf{g}_{ilk}$ 代表 $l$ 小区的第 $k$ 个用户与基站 $i$ 之间的信道增益,并服从 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_{ilk} \mathbf{I}_M)$ 分布. 在这里假设所有基站已知 $\{\beta_{ilk}; i, l = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K\}$ ,因此式(2)也可以表示为

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

其中: $\mathbf{H}_{il} \in \mathbf{C}^{M \times K}$ 为小尺度衰落矩阵且 $[\mathbf{H}_{il}]_{mk} = h_{ilm}$ , $\mathbf{D}_{il} \in \mathbf{C}^{K \times K}$ 为大尺度衰落对角矩阵且 $[\mathbf{D}_{il}]_{kk} = \beta_{ilk}$ .

### 1.2 基于导频信道估计

为了获取信道状态信息(CSI, channel state information),需要发送上行导频来进行信道估计. 在

上行系统模型中用户发送长度为 $\tau_p$ 的导频序列,然后基站根据用户发送的导频估计其信道. 通过MMSE估计可得<sup>[2,7]</sup>

$$\hat{\mathbf{g}}_{ilk} = b_{ilk} \sum_{l'=1}^L \mathbf{g}_{il'k} + \mathbf{w}_{ik} \quad (4)$$

其中 $b_{ilk} \triangleq \frac{\beta_{ilk}}{\left(\sum_{l'=1}^L \beta_{il'k} + \frac{1}{\tau_p p_p}\right)}$ 且 $\mathbf{w}_{ik} \sim \mathcal{CN}\left(\mathbf{0}, \frac{b_{ilk}^2}{\tau_p p_p} \mathbf{I}_M\right)$ ;

$p_p$ 是上行导频功率,在下文假定 $p_p = p_u$ ;记 $\mathbf{g}_{ilk} = \hat{\mathbf{g}}_{ilk} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}$ ,根据MMSE的特性<sup>[2,7]</sup>,可知 $\mathbf{g}_{ilk}$ 的信道估计 $\hat{\mathbf{g}}_{ilk}$ 和其信道估计误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}$ 是独立的(其中 $\hat{\mathbf{g}}_{ilk}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}$ 分别为信道估计矩阵 $\hat{\mathbf{G}}_{il}$ 与信道估计误差矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}_{il}$ 的第 $k$ 列),且 $\hat{\mathbf{g}}_{ilk} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ilk}}^2 \mathbf{I}_M)$ , $\boldsymbol{\varepsilon}_{ilk} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}}^2 \mathbf{I}_M)$ ,其中

$$\sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ilk}}^2 \triangleq \frac{\beta_{ilk}^2}{\sum_{l'=1}^L \beta_{il'k} + \frac{1}{\tau_p p_p}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}}^2 \triangleq \frac{\beta_{ilk} \left( \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \beta_{il'k} + \frac{1}{\tau_p p_p} \right)}{\sum_{l'=1}^L \beta_{il'k} + \frac{1}{\tau_p p_p}} \quad (6)$$

## 2 非完美 CSI 系统性能分析

对于多小区多用户大规模 MIMO 系统,在非完美 CSI 的情况下,基站通过 EGC 和 MRC 两种线性接收方法得到的信号为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{A}^H \mathbf{y}_i = \sqrt{p_u} \sum_{l=1}^L \mathbf{A}^H \mathbf{G}_{il} \mathbf{x}_l + \mathbf{A}^H \mathbf{n}_i \quad (7)$$

其中 $\mathbf{r}_i \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ 表示经过线性处理得到的信号, $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{M \times K}$ 为两种线性接收方法的处理矩阵. 将 $\mathbf{g}_{ilk} = \hat{\mathbf{g}}_{ilk} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ilk}$ 代入式(7)可得基站 $i$ 接收到的第 $k$ 个用户的信号 $r_{ik}$ 为

$$r_{ik} = \sqrt{p_u} \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{ik} x_{ik} + \sqrt{p_u} \sum_{j \neq k}^K \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{ij} x_{ij} + \sqrt{p_u} \mathbf{a}_k^H \boldsymbol{\varepsilon}_{ik} x_i + \sqrt{p_u} \sum_{l \neq i}^L \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{G}}_{il} \mathbf{x}_l + \sqrt{p_u} \sum_{l \neq i}^L \mathbf{a}_k^H \boldsymbol{\varepsilon}_{il} \mathbf{x}_l + \mathbf{a}_k^H \mathbf{n}_i \quad (8)$$

其中: $\mathbf{a}_k^H$ 为 $\mathbf{A}^H$ 的第 $k$ 行元素, $x_{ik}$ 为 $\mathbf{x}_i$ 的第 $k$ 个元素. 接收信号可以分为6个部分,分别为有用信号、本小区其他用户干扰、本小区估计误差、其他小区干扰、其他小区估计误差和噪声. 由于信道估计矩阵 $\hat{\mathbf{G}}_{il}$ 与信道估计误差矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}_{il}$ 在统计上相互独立,所以 $i$ 小区第 $k$ 个用户的信干噪比(SINR, signal to inter-

ference plus noise ratio) 为

$$S_{ik} = \frac{p_u | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik} |^2}{\left( p_u \sum_{j \neq k}^K | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{ij} |^2 + p_u \sum_{l \neq i}^L \| \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{G}}_{il} \|^2 + p_u \mathbf{a}_k^H \mathbf{R}_\varepsilon \mathbf{a}_k + \| \mathbf{a}_k \|^2 \right)} \quad (9)$$

其中<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{R}_\varepsilon \triangleq \sum_{l=1}^L E \{ \boldsymbol{\varepsilon}_{il} \boldsymbol{\varepsilon}_{il}^H \} = \sum_{l=1}^L \gamma_{il} \mathbf{I}_M \quad (10)$$

其中:  $\gamma_{il}$  可根据  $\boldsymbol{\varepsilon}_{il}$  的统计规律得到, 并表示为

$$\gamma_{il} = \sum_{k=1}^K \sigma_{\varepsilon_{ilk}}^2 \quad (11)$$

通过式(9)可得  $i$  小区第  $k$  个用户的遍历可达速率表达式为<sup>[7]</sup>

$$R_{ik} = E \{ \text{lb}(1 + S_{ik}) \} \quad (12)$$

### 2.1 等增益合并接收

当基站采用 EGC 接收技术接收信号时, 其加权矩阵  $\mathbf{A}$  中的元素为  $[\mathbf{A}]_{mk} = \frac{[\hat{\mathbf{G}}_{ii}]_{mk}}{|[\hat{\mathbf{G}}_{ii}]_{mk}|}$  且  $\mathbf{a}_k$  为  $\mathbf{A}$  的

第  $k$  列. 将  $\mathbf{a}_k$  代入式(9), 即可得  $i$  小区的第  $k$  个用户的 SINR<sub>ik</sub>, 其中  $\mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik}$  为  $\hat{\mathbf{g}}_{iik}$  中每个元素的绝对值相加, 根据瑞利分布的统计特性<sup>[4]</sup>, 可得  $E \{ \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik} \} = M \sqrt{\frac{\pi}{4} \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2}$  且  $\text{Var}(\mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik}) = M \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2$ , 所以

$$E \{ | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik} |^2 \} = \left( \frac{\pi(M^2 - M)}{4} + M \right) \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2 \quad (13)$$

通过式(4)可得  $E \{ | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik} |^2 \} = \frac{\beta_{iik}^2}{\beta_{iik}^2} \times E \{ | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{iik} |^2 \}$ , 并且可知  $\| \mathbf{a}_k \|^2 = M$ . 当  $j \neq k$  时, 可知  $\mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{ij}$  为  $M$  个服从  $\mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ij}}^2)$  分布的独立元素相加, 因此  $E \{ | \mathbf{a}_k^H \hat{\mathbf{g}}_{ij} |^2 \} = M \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ij}}^2$ . 根据詹森(Jensen)不等式<sup>[2]</sup>, 并将上述结果代入式(12), 化简可得到 EGC 的遍历可达速率近似下限为

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{ik}^{\text{EGC}} = \text{lb} \left\{ 1 + \frac{p_u \left( \frac{\pi(M-1)}{4} + 1 \right) \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2}{\frac{p_u \pi(M-1)}{4} \sum_{l \neq i}^L \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ilk}}^2 + p_u \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \beta_{ilj} - p_u \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2 + 1} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

通过式(14)可以看出, 当固定基站天线数和用户数时, 不断增加用户发送功率并不能有效地增加传输速率, 这是由于随着发送功率的增加, 有用信号和干扰部分的功率一起增加. 然而当固定用户发送功率和用户数时, 不断增加天线数, 用户的发送速率

将会不断增加, 最后逐渐趋近于一定值. 可以发现

当发送能量  $p_u = \frac{E_u}{\sqrt{M}}$  且  $E_u$  固定时, 随着天线数  $M$  趋于无穷大, 可得

$$\tilde{R}_{ik}^{\text{EGC}} \rightarrow \text{lb} \left\{ 1 + \frac{\pi \tau_p E_u^2 \beta_{iik}^2}{\pi \tau_p E_u^2 \sum_{l \neq i}^L \beta_{ilk}^2 + 4} \right\}, \quad M \rightarrow \infty \quad (15)$$

### 2.2 最大比合并接收

当基站采用 MRC 接收时, 其加权矩阵变为  $\mathbf{A} = \hat{\mathbf{G}}_{ii}$ , 即  $\mathbf{a}_k = \hat{\mathbf{g}}_{iik}$ . 可知  $i$  小区第  $k$  个用户的可达速率下限  $\tilde{R}_{ik}^{\text{MRC}}$  为<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{ik}^{\text{MRC}} = \text{lb} \left\{ 1 + \frac{p_u (M-1) \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{iik}}^2}{p_u (M-1) \sum_{l \neq i}^L \sigma_{\hat{\mathbf{g}}_{ilk}}^2 + p_u \sum_{l=1}^L \sum_{j \neq k}^K \beta_{ilj} + p_u \sum_{l=1}^L \sigma_{\varepsilon_{ilk}}^2 + 1} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

## 3 完美 CSI 系统性能分析

对于完美 CSI 情况, 其速率表达式与非完美 CSI 情况类似, 不同的是完美 CSI 情况下其信道估计误差  $\boldsymbol{\varepsilon}_{il} = \mathbf{0}$  且  $\hat{\mathbf{G}}_{il} = \mathbf{G}_{il}$ . 当采用上述两种不同接收方式时, 可得到  $i$  小区第  $k$  个用户的遍历可达速率为<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} R_{ik} = E \left\{ \text{lb} \left\{ 1 + \frac{p_u | \mathbf{a}_k^H \mathbf{g}_{iik} |^2}{p_u \sum_{j \neq k}^K | \mathbf{a}_k^H \mathbf{g}_{ij} |^2 + p_u \sum_{l \neq i}^L \| \mathbf{a}_k^H \mathbf{G}_{il} \|^2 + \| \mathbf{a}_k \|^2} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

### 3.1 等增益合并接收

在完美 CSI 情况下, 采用 EGC 接收, 其加权矩阵  $\mathbf{A}$  中的元素为  $[\mathbf{A}]_{mk} = \frac{[\mathbf{G}_{ii}]_{mk}}{|[\mathbf{G}_{ii}]_{mk}|}$  且  $\mathbf{a}_k$  为  $\mathbf{A}$  的第  $k$  列. 运用与证明式(14)类似的方法, 可得  $i$  小区第  $k$  个用户的可达速率下限为

$$\hat{R}_{ik}^{\text{EGC}} = \text{lb} \left\{ 1 + \frac{p_u \left( \frac{\pi(M-1)}{4} + 1 \right) \beta_{iik}}{p_u \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \beta_{ilj} - p_u \beta_{iik} + 1} \right\} \quad (18)$$

当发送能量  $p_u = \frac{E_u}{M}$  且  $E_u$  固定时,随着天线数  $M$  趋于无穷大,可得

$$\hat{R}_{ik}^{\text{EGC}} \rightarrow \text{lb} \left\{ 1 + \frac{\pi E_u \beta_{iik}}{4} \right\}, M \rightarrow \infty \quad (19)$$

### 3.2 最大比合并接收

在完美 CSI 情况下,采用 MRC 接收,其加权矩阵变为  $\mathbf{A} = \mathbf{G}_{ii}$ ,即  $\mathbf{a}_k = \mathbf{g}_{iik}$ . 可得到  $i$  小区第  $k$  个用户的可达速率下限为<sup>[2]</sup>

$$\hat{R}_{ik}^{\text{EGC}} = \text{lb} \left\{ 1 + \frac{p_u (M-1) \beta_{iik}}{p_u \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \beta_{ilj} - p_u \beta_{iik} + 1} \right\} \quad (20)$$

通过比较式 (18) 和式 (20) 中的 SINR, 可知  $S_{ik}^{\text{EGC}}/S_{ik}^{\text{MRC}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{M-1}$ , 可以发现在完美 CSI 的情况下,当天线数不断增加时,EGC 与 MRC 的 SINR 成一定比例,并且随着天线数的增加,EGC 与 MRC 间的性能差距逐渐变小.

## 4 仿真性能与对比讨论

笔者研究的是多小区多用户大规模 MIMO 的经典场景,首先介绍下本文的仿真环境:小区个数  $L = 7$ ;频率复用因子为 1;每个小区用户数  $K = 10$ ;噪声功率为 1;导频序列长度  $\tau_p = 10$ ;每帧的符号长度  $T = 196$ . 为了方便实现,假定  $\beta_{iik} = 1$  和  $\beta_{ilk} = 0.1$ ,  $\forall l \neq i, k = 1, \dots, K$ . 用户发送功率  $p_u$  表示为  $p_u = E_u/M^\alpha$ ,其中  $E_u$  为固定功率,  $\alpha$  表示功率收缩因子. 定义系统频谱效率为<sup>[2]</sup>

$$C_{\text{sum}}^U = \lambda_p \sum_{k=1}^K R_{ik}^U \quad (21)$$

其中:  $U \in \{\text{EGC}, \text{MRC}\}$  代表不同接收方法的标注,

在非完美 CSI 情况下取  $\lambda_p = 1 - \frac{\tau_p}{T}$ ,完美 CSI 时取为  $\lambda_p = 1$ . 笔者主要仿真了在非完美和完美 CSI 情况下分别采用 EGC 和 MRC 这两种线性接收技术的频谱效率,并对其性能进行了分析.

图 1 在  $M = 150$  和  $\alpha = 0$  对完美和非完美 CSI 这两种情况下,信噪比与频谱效率之间的关系进行了仿真,将式 (14) (16) (18) 和 (20) 代入式 (21) 即可得到在非完美 CSI 和完美 CSI 情况下采用 EGC

和 MRC 处理方式的理论值,将式 (12) 和式 (17) 代入式 (21) 即可得到仿真值. 通过观察可以看出闭合形式的理论结果与基于蒙特卡洛仿真得到的结果基本相匹配(由于理论结果是实际仿真结果的下限,所以存在一定偏差);完美 CSI 情况下两种接收技术的频谱效率性能要优于非完美 CSI 情况下的性能,这是因为完美情况下没有信道估计误差和导频污染的影响;当基站天线数值固定时,随着信噪比逐渐增加,EGC 和 MRC 的频谱效率不断增加并且逐渐趋近于一定值,尤其是在高信噪比的情况,增加用户发送功率并不能显著提高系统频谱效率,这与相应公式的分析结果一致,所以在实际应用中过度提高用户发送功率不能有效改善系统性能;EGC 与 MRC 相比,性能略差,但总体相差不大,但在实际实施过程中,EGC 具有硬件实现复杂度低的优势,所以将两方面相权衡,可以看出 EGC 同样是一种不错的线性处理方式. 由于推导的理论结果与仿真值十分吻合,所以在理想化假设的条件下,在后面的仿真中采用理论值对系统性能进行分析.

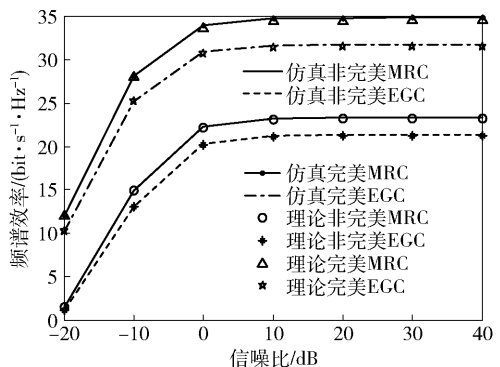


图 1 EGC 和 MRC 频谱效率与信噪比的关系

图 2 在  $E_u = 8$  dB 和不同的功率收缩因子下,对完美和非完美 CSI 这两种情况的下频谱效率与天线数之间的关系进行了仿真. 可以发现当功率收缩因子为 0.5 时,对于完美 CSI 情况,随着天线数的增加,用户的频谱效率不断增加;对于非完美 CSI 情况,由于导频污染的影响,随着天线数的增加,用户的频谱效率也不断增加,但增幅逐渐变缓,最后趋近于一个定值. 当功率收缩因子为 1 时,对于完美 CSI 情况,随着天线数的增加,用户的频谱效率不断增加,但增幅逐渐变缓,最后趋近于一个定值;对于非完美 CSI 情况,随着天线数的增加,用户的频谱效率先增加,然后在一定天线数后衰减,并逐渐趋近于 0. 随着天线数的不断增加,EGC 和 MRC 的性能差

距始终相差不大,而且两者之间的差距并没有随  $M$  变大而变大,这与理论分析一致.

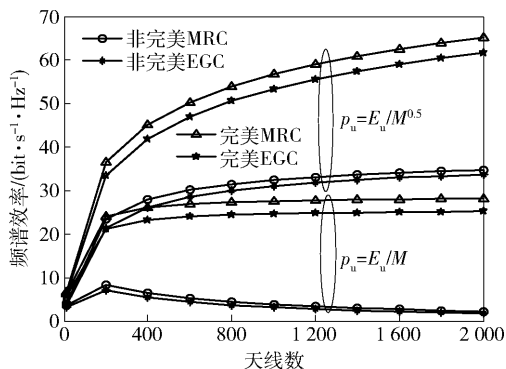


图2 EGC 和 MRC 的频谱效率与天线数的关系

## 5 结束语

首先介绍了上行多小区大规模 MIMO 的系统模型,接着介绍了非完美 CSI 情况下基于导频的信道估计,然后分别在非完美和完美 CSI 情况下对 EGC 这种接收技术进行了系统可达速率理论分析,最后在特定系统模型和参数设置下对不同接收技术进行蒙特卡洛仿真,并与理论结果进行对比,验证了理论分析结果的正确性. 理论分析与仿真结果表明:对于 EGC 这种接收技术,完美 CSI 情况下的性能要优于非完美 CSI 情况下的性能;随着用户发送功率的增加,频谱效率也随之增加,但增幅逐渐变缓,最后趋于一个定值,因此提高发送功率不是提高频谱效率的有效方法. 不同的功率收缩因子对完美和非完美 CSI 情况下的系统性能影响也不同,在非完美 CSI 且功率收缩因子为 0.5 的情况和完美 CSI 且功率收缩因子为 1 的情况,随着天线数不断增加,系统频谱效率不断增加,并逐渐趋近于一个定值,说明了大规模 MIMO-EGC 系统也如 MRC 一样具有有效

节约能量的特点. EGC 与 MRC 接收技术的性能相差不大,而 EGC 具有低复杂度和低延时的特点,更为经济适用,因此可以考虑在大规模 MIMO 系统中进行应用.

## 参考文献:

- [1] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [2] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Trans on Commun, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [3] Shafi M, Molisch A F, Smith P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [4] Ying D W, Vook F W, Thomas T A, et al. Hybrid structure in massive MIMO: achieving large sum rate with fewer RF chains[C] // 2015 IEEE International Conference on Communication (2015ICC). London: IEEE Press, 2015: 2344-2349.
- [5] Yang F C, Xiong W, Song J. Equal gain combining based maximum likelihood detector for FFH/MFS K systems[J]. IEEE Commun letters, 2017(99): 1-4.
- [6] Li Y, Fan P Z, Leukhin A, et al. On the spectral and energy efficiency of full-duplex small-cell wireless systems with massive MIMO[J]. IEEE Trans on Veh Technol, 2017, 66(3): 2339-2353.
- [7] Guo K F, Guo Y, Foder G, et al. Uplink power control with MMSE receiver in multi-cell MU-massive-MIMO systems[C] // 2014 IEEE International Conference on Communication (2014ICC). Sydney: IEEE Press, 2014: 5184-5190.