

# LTE分布式天线系统中的增益失衡性能分析

邓 单 京信通信技术(广州)有限公司

【摘 要】文章首先介绍了LTE系统多天线系统模型,然后从理论上分析了分布式天线系统中上下行链路增益失衡对LTE基带系统带来的影响,最后通过仿真对这一影响作了定量分析。结果表明:当增益差异为3dB时,上下行链路性能恶化约为1dB。

【关键词】LTE 分布式多天线 增益失衡 BER SNR

## 1 引言

LTE系统在空中接口方面用正交频分多址(OFDM/FDMA)替代了码分多址(CDMA)作为多址接入技术,采用OFDM、MIMO技术和智能天线作为物理层关键技术<sup>[1]</sup>。

目前的LTE室内商用系统中,一般采用 $2 \times 2$ 天线配

置<sup>[2]</sup>。下行BS采用双天线分集或者复用发射,UE采用双天线接收;上行UE采用单天线发射,BS采用双天线接收,即接收分集<sup>[3-4]</sup>。理论分析中,大多假设多天线阵列中各天线单元增益相同及时延相等。但在实际工程应用中,由于馈线及器件制造工艺的差异,会引入天线单元的增益与时延的差异。中国移动企业标准<sup>[5]</sup>中,对于宏基站天线有明确的规定:各天线端口的幅度偏差不大于

收稿日期:2011-03-22



张 欣:北京邮电大学副教授,博士毕业于北京邮电大学通信与信息系统专业,主要研究方向是:移动通信系统的理论和技术。



田英男:北京邮电大学无线理论与技术研究实验室硕士研究生,专业为通信与信息系统,主要研究方向为3G及B3G系统间干扰共存的理论分析与系统仿真。

0.7dB, 相位偏差不大于5度。

本文将分析分布式天线系统中增益失衡对LTE基带系统带来的影响。

## 2 多天线系统模型

传统的单天线无线通信系统中, 收发两端各使用一根天线, 这种单天线系统称之为单输入单输出(SISO)系统。对于此类系统, Shannon提出信道容量的公式:

$$C=W \cdot \log_2(1+S/N) \quad (1)$$

式中,  $W$ 表示信道带宽,  $S/N$ 表示接收端信噪比。

香农公式确定了在有噪信道条件下, 能够进行可靠通信的极限速率。信道容量对信道带宽归一化后, 得到频谱效率:

$$\eta = \log_2(1+S/N) \quad (2)$$

移动通信系统中, UE通常工作在比较复杂的地理环境中, 发射信号经过各种物体的反射与散射, 形成多径传播, 使得到达接收端的信号是由多个幅度和相位都不相同的信号叠加而成。分集接收是克服信道衰落、提高系统性能的重要技术, 常用的分集技术有: 空间分集, 时间分集, 极化分集, 极化分集, 频率分集, 角度分集。

对于多输入多输出(MIMO)系统<sup>[6]</sup>, 当多天线信道完全独立时, 文献[3]给出了信道容量公式:

$$C=W \cdot \log_2 \det[\rho/n_T \mathbf{H} \mathbf{H}^*] \quad (3)$$

式中,  $\rho$ 表示每根接收天线的平均信噪比,  $n_T$ 表示发射端天线数,  $\mathbf{H}$ 表示归一化信道衰落系数。

对上述推导, 下面分析几种特殊情景:

(1) 当天线数目较多时

平均容量为:

$$C=\min(n_T, n_R) \cdot \log_2[1+\rho] \quad (4)$$

(2) 接收分集,  $n_T=1$ 、 $n_R=n$ 时

即时容量为:

$$C=W \cdot \log_2[1+\rho \cdot \sum_{j=1}^n |h_j|^2] = W \cdot \log_2[1+\rho \cdot \chi_{2n}] \quad (5)$$

式中,  $\chi_{2n}$ 表示自由度为 $2n$ 的卡方分布随机变量。

(3) 发射分集, 发射端无信道状态信息时

各发射天线平均分配信号总功率, 其信道平均容

量为:

$$C=W \cdot \log_2[1+\rho/n \cdot \chi_{2n}] \quad (6)$$

上述推导表明, 在使用智能天线(发射分集)时, 信道容量随着天线数目对数增长; 在使用MIMO技术时, 信道容量随着天线数目线性增长。

智能天线(波束成形)技术, 对于多径传播是抑制而不是利用; MIMO则充分利用多径传播所产生的独立并行传输信道, 能有效提升信道容量。在具备丰富散射的环境下, 智能天线并非最佳, 因为波达信号数目远大于天线数目。与智能天线相比, MIMO需要将天线尽可能空间分开, 以降低信道的相关性。因此MIMO只有在丰富散射环境下才能有效工作, 在直射环境下性能会大幅下降。

## 3 增益失衡分析

### 3.1 接收端天线间增益失衡的影响

LTE基站的接收端主要对上行信号进行双天线接收分集。

对于上行 $1 \times 2$ 的SIMO, 上行链路的信号模型可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} \\ h_{2,1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $y_n$ 表示第 $n$ 根接收天线的信号,  $x$ 表示发送信号,  $h_{n,m}$ 表示第 $m$ 根发送天线与第 $n$ 根接收天线之间的信道响应,  $n_n$ 表示第 $n$ 根接收天线的均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的白噪声。

若上行两天线之间存在增益差异, 则等效为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} y_1 \\ \sqrt{\beta} y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} h_{1,1} \\ \sqrt{\beta} h_{2,1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} n_1 \\ \sqrt{\beta} n_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\alpha$ 、 $\beta$ 均为正数。

接收端进行MRC:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} h_{1,1}^* & \sqrt{\beta} h_{2,1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} \\ &= (\alpha |h_{1,1}|^2 + \beta |h_{2,1}|^2) x + \alpha h_{1,1}^* n_1 + \beta h_{2,1}^* n_2 \end{aligned} \quad (9)$$

由于 $h_{n,m}$ 是独立同分布的, 接收信号的信噪比表示为:



$$\begin{aligned}
 SNR &= \frac{E\{(\alpha|h_{1,1}|^2 + \beta|h_{2,1}|^2)x^2\}}{E\{\alpha h_{1,1}^* n_1 + \beta h_{2,1}^* n_2\}^2} \\
 &= \frac{((\alpha^2 + \beta^2)E\{|h|^4\} + 2\alpha\beta)E\{|x|^2\}}{(\alpha^2 + \beta^2)\sigma^2} \\
 &= (E\{|h|^4\} + \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2}) \cdot \frac{E\{|x|^2\}}{\sigma^2} \\
 &\leq (E\{|h|^4\} + 1) \cdot \frac{E\{|x|^2\}}{\sigma^2}
 \end{aligned} \quad (10)$$

上式当且仅当 $\alpha = \beta$ 时等号成立,也就是说,当两天线不存在增益差异时,接收端进行MRC可获得最大的信噪比增益。当两天线存在增益差异时,即 $\alpha \neq \beta$ 时,MRC信噪比增益会有一定程度的下降。

### 3.2 发送端天线间增益失衡的影响

当下行采用 $2 \times 2$ MIMO复用传输模式时,其信号模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $y_n$ 表示第 $n$ 根接收天线的信号, $x_m$ 表示第 $m$ 根天线发送信号, $h_{n,m}$ 表示第 $m$ 根发送天线与第 $n$ 根接收天线之间的信道响应, $n_n$ 表示第 $n$ 根接收天线的均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的白噪声。

若下行两发送天线之间存在增益差异,则可以等效为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{a}x_1 \\ \sqrt{b}x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

此处假设 $a > b$ ,在保证总发送功率一定时,相对于无增益差异的情况,有 $a > 1 > b > 0$ 。

在下行接收端:

$$\tilde{H}^{-1} = \begin{bmatrix} \sqrt{a}h_{1,1} & \sqrt{b}h_{1,2} \\ \sqrt{a}h_{2,1} & \sqrt{b}h_{2,2} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{a}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{b}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \tilde{H}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{a}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{b}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

两接收天线接收信号的信噪比分别为没有增益差异情况下的 $a$ 倍和 $b$ 倍,按照前面的假设,第一根天线上的信噪比得到了增强,第二根天线上的信噪比降低了。这样一来,当系统处于低信噪比区间时,会由于第二根天线的信号质量的降低而对系统整体性能有较大影响。

## 4 仿真结果与分析

为验证增益失衡理论分析结果的正确性,本文将在不同信道环境下,针对LTE典型业务进行仿真,并对结果进行分析比较。仿真系统采用10MHz带宽,15.36MHz采样。上行链路仿真参数如下:仿真信道采用AWGN信道和LTE标准中EPA 5Hz信道;仿真业务采用LTE标准的FRC A4-6;信道估计算法采用LS平均算法;天线配置为 $1 \times 2$ SIMO;接收合并采用MRC算法。下行链路仿真参数如下:仿真信道采用EPA 5Hz;仿真业务中块长5736,调制方式为16QAM;信道估计采用LS线性插值;天线配置为 $2 \times 2$ MIMO;发送模式:两天线不带CDD的空间复用。

### 4.1 接收端增益失衡

首先分析在高斯白噪声信道、不同信噪比环境下,增益差异不同时系统性能的恶化情况。图1是AWGN信道下的BER仿真结果:

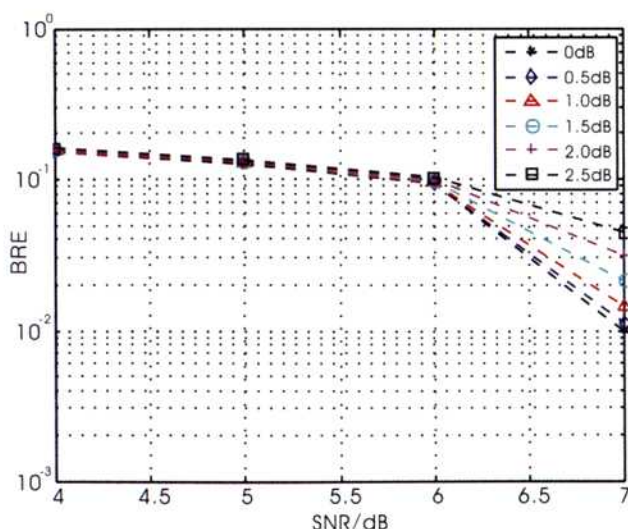


图1 AWGN信道下的接收天线增益失衡性能

从图1可以看出,当天线之间的增益差异在2dB时,系统BER性能恶化约为0.5dB。

下面分析在衰落信道EPA 5Hz环境下,系统性能恶化的情况。图2是EPA 5Hz信道下的仿真结果:

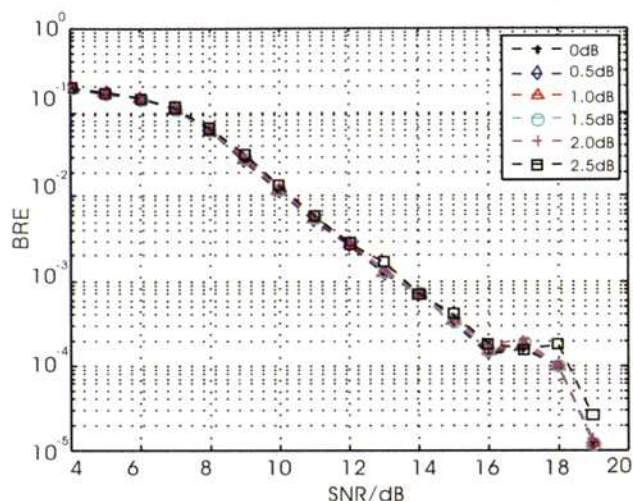


图2 EPA 5Hz信道下的接收天线增益失衡性能

从图1和图2的BER仿真曲线可以看出,随着天线间的增益差异逐渐增大,系统的BER性能会有所下降;在两种信道环境下,增益差异在2dB以下时,系统性能损失极小。

#### 4.2 发送端功率失衡

图3是EPA 5Hz信道下,发送端天线间功率失衡的仿真结果:

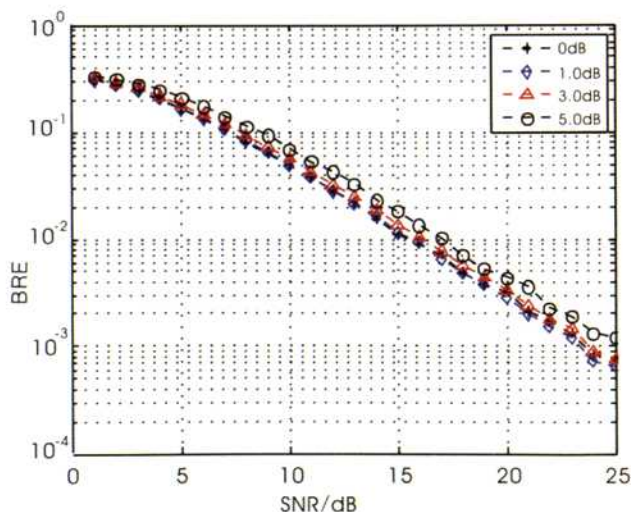


图3 发送端天线间功率失衡性能分析

从图3可以看出由于发送端天线间功率失衡导致系统BER性能下降的情况,在BER为0.1时,增益差异为3dB性能下降约为1dB,增益差异为5dB性能下降约为2dB。

#### 参考文献

- [1]沈嘉,等. 3GPP长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [2]胡宏林,徐景. 3GPP LTE无线链路关键技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [3]3GPP TS 36.211 v8.6.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA); Physical Channels and Modulation(Release8)[S]. 2009.
- [4]3GPP TS 36.104 v8.6.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA); Base Station(BS) radio transmission and reception(Release 8)[S]. 2009.
- [5]中国移动通信集团公司. TD-LTE双极化智能天线阵列设备规范v1.3.0[S].
- [6]Gerard J Foschini. Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas[J]. Bell Labs Technical Journal,1996(9): 41-59. ★

#### 【作者简介】



邓 单:一级高级工程师,博士毕业于中国科学技术大学,现任职于京信通信技术(广州)有限公司,主要研究方向为通信信号处理、MIMO、空时编码等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>





## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>