

# 一维小区中 MIMO 分布式发射天线的最优位置

丁一<sup>1</sup>, 唐友喜<sup>2</sup>

电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 四川成都 610054

<sup>1</sup>[dy1985@uestc.edu.cn](mailto:dy1985@uestc.edu.cn), <sup>2</sup>[tangyx@uestc.edu.cn](mailto:tangyx@uestc.edu.cn)

**摘要** 在传播环境为自由空间且不考虑近场的一维小区中,本文从接收功率方差的角度分析了两根多入多出(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)分布式发射天线的最优位置。分析结果表明:将两根发射天线分别置于一维小区的两端时,接收功率的方差最小,接收功率达到最优。

**关键词** MIMO 分布式发射天线, 接收功率方差, 最优位置

## Optimal Antenna Location for MIMO Distributed Transmit Antennas in Linear Cell

Ding Yi<sup>1</sup>, Tang You-xi<sup>2</sup>

(The Key Laboratory of Communication in UESTC Sichuan Chengdu 610054)

<sup>1</sup>[dy1985@uestc.edu.cn](mailto:dy1985@uestc.edu.cn), <sup>2</sup>[tangyx@uestc.edu.cn](mailto:tangyx@uestc.edu.cn)

**Abstract** For a linear cell under the free space without near-field, this letter focuses on where to place the two MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) distributed transmit antennas as to obtain the optimal received-power from the aspect of variance of received-power. Finally the conclusion is that: respectively placing the two MIMO distributed transmit antennas at the both ends of the linear cell, the variance of received-power is the minimum value, then we can obtain the optimal received-power.

**Key words** MIMO Distributed Transmit Antennas, Variance of Received-Power, Optimal Location

### 1 引言

近年来,分布式无线通信系统<sup>[1]</sup>(Distributed Wireless Communication System)受到越来越多的关注。而分布式天线系统<sup>[2]</sup> (DAS, Distributed Antenna System)作为其中的重要组成部分,对它的研究也日趋火热。采用分布式天线结构的多入多出(Distributed MIMO)系统(本文简称为分布式MIMO),可以使得收发天线间的链路更加独立,空间相关性更弱,能达到更高的系统容量<sup>[3]</sup>;还可以获得宏分集效果,不仅可以有效的抗多径衰落,同时阴影衰落也可以得到补偿;由于天线分布于小区中不同地理位置,能有效缩短信号的接入距离,降低发射信号功率,提高小区覆盖率,减少远近效应带来的不利影响<sup>[1][4][5]</sup>。分布式MIMO具有的高容量、低功耗、更好的覆盖、对人体的低电磁损害等优点,是第四代移动通信系统的显著特征<sup>[1][6]</sup>。

文献错误!未找到引用源。[8]对分布式MIMO系统中发射天线的位置做了一些研究。文献错误!未找到引用源。证明了分布式天线的位置很大程度上影响着系统的性能。文献错误!未找到引用源。从区域平均误码率(AABEP, Area Averaged Bit Error Probability)最优的角度给出了一维情况下两根分布式发射天线的最优位置。而本文拟在传播环境为自由空间且不考虑近场的一维小区中,从接收功率方差的角度给出两根MIMO分布式发射天线的最优位置。

### 2 一维小区中两根 MIMO 分布式发射天线的最优摆放位置的分析

#### 2.1 简化发射端与接收端

MIMO 发射天线功率的分配方法有等功率分配法和注水法(Water-filling)<sup>[9]</sup>,两者分别适合信噪比较高和较低的信道。本文中 MIMO 发射天线采用等功率分配法。

如图 1 所示, 假设发端天线之间距离远小于收发天线簇之间距离, 由于采用的等功率分配法, 则发端每根天线对于收端都是等效的, 于是分析发端任一根天线即可。假设收端天线之间距离远小于收发天线之间距离, 则收端各根天线接收到的同一根发射天线功率是相等的, 于是分析收端任一根天线即可。于是 MIMO 的分析可以等效于 SISO(Single-Input Single-Output)的分析。

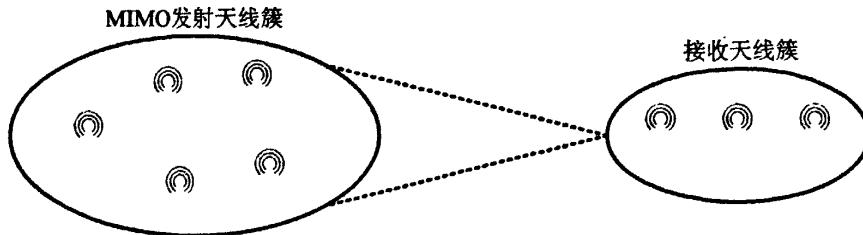


图 1 收发天线间距离示意图

## 2.2 一维小区中单个发射天线簇的最优摆放位置

用户(接收端)在一维小区中的位置是一个随机变量, 所以接收功率也是一个随机变量。如果发射天线簇有一个摆放位置使接收功率均值和方差同时达到最优(均值最大方差最小), 就称这个位置为发射天线的最优摆放位置。

设发射天线簇的覆盖半径为  $r_0$ , 发射功率为  $P_0$ , 摆放位置为  $b$ , 一维小区为  $\{x | 0 \leq x \leq a\}$ 。当小区范围  $a < 2r_0$  时, 仅需要一个发射天线簇。如图 2 所示:

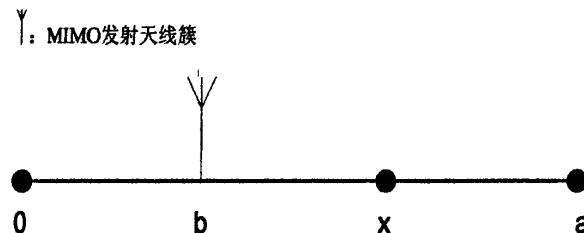


图 2 单个 MIMO 发射天线簇数学模型

由电磁波在自由空间的传播,  $x$  处的接收功率为<sup>[10][11]</sup>:

$$P = \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{(x-b)^2} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为工作波长。 $x$  为在  $\{x | 0 \leq x \leq a\}$  上服从均匀分布的随机变量, 由全覆盖条件(天线系统要覆盖整个一维小区)可以得出其均值为<sup>[12]</sup>:

$$E(P) = \int_0^{b-\delta} \frac{1}{a} \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{(x-b)^2} dx + \int_{b+\delta}^a \frac{1}{a} \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{(x-b)^2} dx \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为一个远小于  $a$  的正数。最后得出:

$$E(P) = \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2 a} \left( \frac{2}{\delta} - \frac{1}{b} + \frac{1}{b-a} \right) \quad (3)$$

对  $\frac{2}{\delta} - \frac{1}{b} + \frac{1}{b-a}$  求  $b$  的一阶导数, 令其等于 0 可以发现在  $b = a/2$  处有一个极值点。取  $\delta = 0.001$ ,  $a = 50$  进行仿真, 结果如图 3 所示:

可以看到当  $b = a/2$  时  $E(P)$  取得最大值。可见, 当单个发射天线簇在一维小区中点时, 接收功率均值可达到最大。

下面分析接收功率的方差。由均值和方差的关系有<sup>[12]</sup>:

$$D(P) = E(P^2) - E^2(P) \quad (4)$$

其中<sup>[12]</sup>:

$$E(P^2) = \int_0^{b-\delta} \frac{1}{a} \left( \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{(x-b)^2} \right)^2 dx + \int_{b+\delta}^a \frac{1}{a} \left( \frac{P_0 \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{(x-b)^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

最后得出:

$$D(P) = \frac{P_0^2 \lambda^4}{a(4\pi)^4} \left( \frac{1}{3} \left( \frac{2}{\delta^3} + \frac{1}{(b-a)^3} - \frac{1}{b^3} \right) - \frac{1}{a} \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{b-a} - \frac{1}{b} \right)^2 \right) \quad (6)$$

对(6)式求  $b$  的一阶导数并使其等于 0 可以发现, 在  $b = a/2$  处有一个极值点。取  $\delta = 0.1$ ,  $a = 50$  对:

$$\frac{1}{3} \left( \frac{2}{\delta^3} + \frac{1}{(b-a)^3} - \frac{1}{b^3} \right) - \frac{1}{a} \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{b-a} - \frac{1}{b} \right)^2 \quad (7)$$

进行仿真, 结果如图 4 所示:

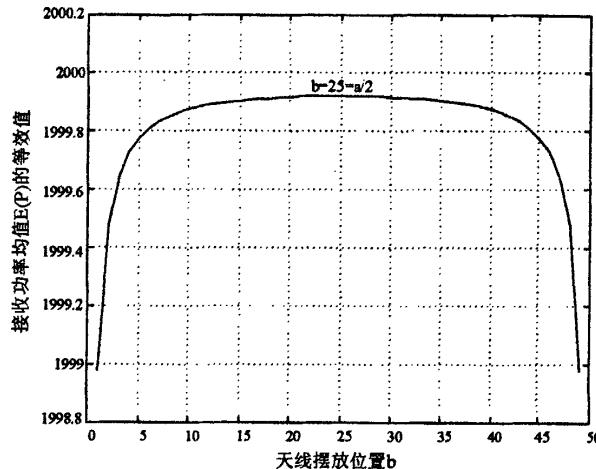


图 3 接收功率均值等效值与天线摆放位置关系图

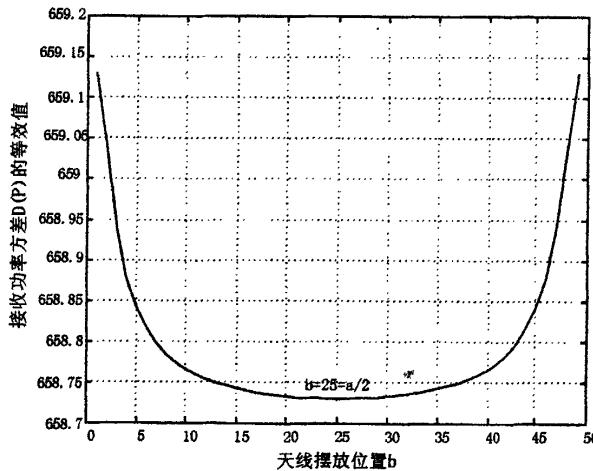


图 4 接收功率方差等效值与天线摆放位置关系图

可以看到当  $b = a/2$  时  $D(P)$  取得最小值。可见, 当单个发射天线簇在一维小区中点时, 接收功率方差达到最小。

综合接收功率均值和方差的分析可以得出结论：当一维小区适合单个发射天线簇摆放时，其最优摆放位置为一维小区中点。

### 2.3 一维小区中两个发射天线簇的最优摆放位置

当一维小区范围为  $2r_0 < a < 4r_0$  时，需要两个发射天线簇。如图 5 所示有小区 OA 适合两个发射天线簇摆放，把它分成两部分 OB 和 BA(每部分长度小于单个发射天线簇覆盖范围)，按照前面分析在每部分中点(设为 C 和 D)分别摆放一个发射天线簇即可使每个部分接收功率最优，从而整个小区接收功率最优。

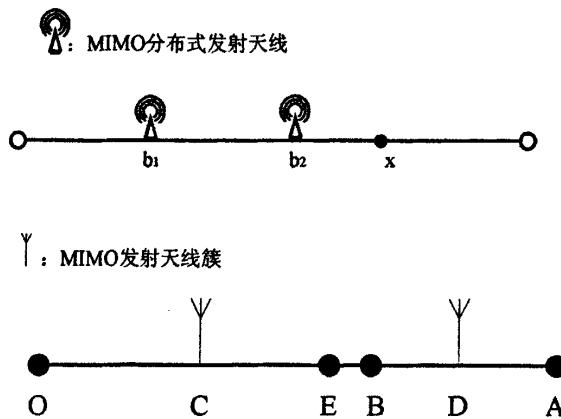


图 5 按照单个 MIMO 发射天线簇分析结果摆放的两个 MIMO 发射天线簇

但是注意到交叉区域(有多个发射天线簇同时覆盖的区域称之为交叉区域)的存在使这种摆放方法发生了错误。按照对交叉区域的处理(如果用户同时接收到多个发射天线簇的发送信号，只接收功率最大者，其余忽略不计)，每个区域摆放的发射天线簇实际覆盖范围为 OE 和 EA(E 为两个发射天线簇摆放位置的中点，OE 部分由于用户接收到的 C 点发射天线簇的功率比 D 点的大，按照对交叉部分的处理，D 点发射天线簇无法覆盖到 OE，同样 C 点发射天线簇无法覆盖到 EA)。如图 6 所示：

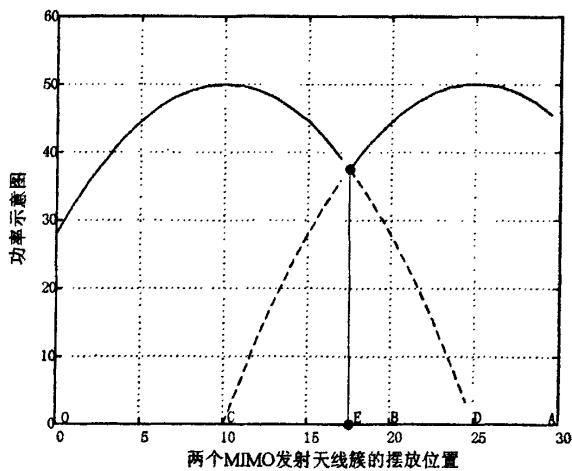


图 6 交叉区域使摆放方法发生错误示意图

一般情况下 C 不是 OE 中点，D 也不是 EA 中点，这种摆放方法不能使每个部分功率最优，发生了错误。但是当 B 的选择使得 C 是 OE 中点，D 也是 EA 中点(B 与 E 重合)时，它可以让这种摆放方法正确。B, C, D, E 满足如下方程组：

$$\begin{cases} OC = OB / 2 \\ OD = (OB + OA) / 2 \\ OE = (OC + OD) / 2 \end{cases} \quad (8)$$

可得:

$$OE = (2OB + OA) / 4 \quad (9)$$

同时 C, D, E 三点满足如下方程组:

$$\begin{cases} OC = OE / 2 \\ OD = (OE + OA) / 2 \\ OE = (OC + OD) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

可得:

$$OE = OA / 2 \quad (11)$$

(11)式联合(9)式可得:

$$OB = OA / 2 \quad (12)$$

所以当分点为 OA 中点时, 按照单个发射天线簇分析结果所摆放的位置是正确的。由此得出结论: 当一维小区适合两个发射天线簇摆放时, 其最优摆放位置为将小区两等分后每一部分的中点。如图 7 所示:

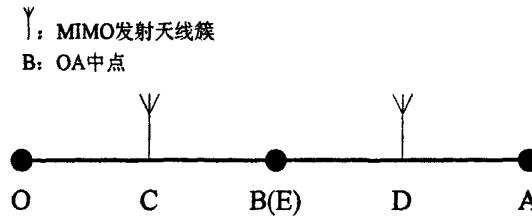


图 7 两个 MIMO 发射天线簇的最优摆放位置示意图

## 2.4 一维小区中 N 个发射天线簇的最佳摆放位置

当一维小区范围为  $(N-2)r_0 < a < Nr_0$  时, 需要 N 个发射天线簇。如图 8 所示有小区 OA 适合 N 个发射天线簇摆放, 把它分为 N 部分(每部分长度小于单个发射天线簇覆盖范围), 然后在每部分中点分别摆放一个发射天线簇即可使每个部分接收功率最优, 从而整个小区功率最优。

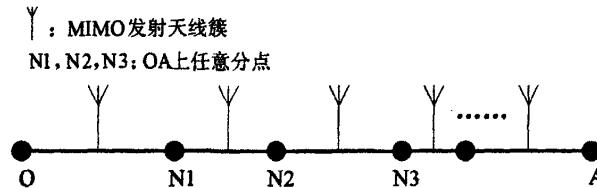


图 8 按照单个 MIMO 发射天线簇分析结果摆放的 N 个 MIMO 发射天线簇

按照两个发射天线簇的分析结果, 必须使  $ON_1 = N_1N_2$ , 同理  $N_1N_2 = N_2N_3$ , 以此类推, 最后可以得出:

$$ON_1 = N_1N_2 = N_2N_3 = \dots = N_{N-1}A \quad (13)$$

可得:

$$ON_1 = N_1N_2 = N_2N_3 = \dots = N_{N-1}A = OA / N \quad (14)$$

由上得出结论：当一维小区适合 N 个发射天线簇摆放时，其最优摆放位置为将小区 N 等分后每一部分的中点。如图 9 所示：

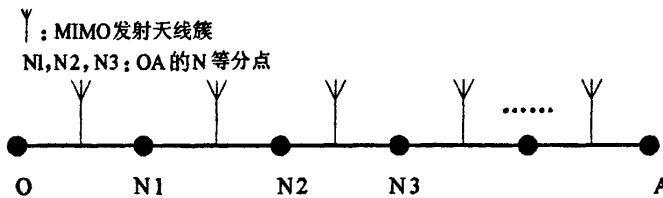


图 9 N 个 MIMO 发射天线簇的最优摆放位置示意图

### 3 结论

本文从接收功率的角度分析了在理想情况(传播环境为自由空间且不考虑近场)下多个互相独立的 MIMO 发射天线簇的最优摆放位置。本文首先分析了单个发射天线簇情况下接收功率的均值及方差，发现当发射天线簇位置为一维小区中点时，接收功率的均值最大同时方差最小，由此得出结论：单个发射天线簇的最优摆放位置为一维小区中点。然后在对交叉区域做了近似实际情况的处理后，利用此结果推导出了两个发射天线簇在一维小区中的最优摆放位置，进一步推导出了 N 根天线的最优摆放位置为：将小区 N 等分后每一部分的中点。

### 参考文献

- [1] Zhou Shidong, Zhao Ming, Xu Xibin, Jing Wang, and Yan Yao. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [2] Saleh A, Rustako A, Roman R. Distributed antennas for indoor radio communication. *IEEE Trans. on Communications*, 1987, 35(12): 1245-1251.
- [3] Clark M. V., III Willis T. M., Greenstein L. J., et al.. Distributed versus centralized antenna arrays in Broadband wireless networks[A]. Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf., Rhodes Island, Greece, 2001, Vol.1: 33-37.
- [4] Schuh R E and Sommer M. W-CDMA coverage and capacity analysis for active and passive distributed antenna systems[A]. Proc. 2002 Spring IEEE Veh. Tech. Conf., 2002, Vol.1: 434-438.
- [5] Xia H, Herrera A B, Kim S and Rico F S. A CDMA-distributed antenna system for in-building personal communications services[J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1996, 14(4):644-650.
- [6] Tao Xiaofeng, Ni Li, Dai Zuojun, Liu Baoling and Zhang Ping. Intelligent group handover mode in multicell infrastructure, *IEEE PIMRC 2003*, 2003, vol.1: 351-354.
- [7] H. Zhuang, L. Dai, L. Xiao, et al. Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout. *Electron Lett*, 2003, vol. 39, No. 6: 495-496
- [8] Ying Shen, Youxi Tang, Ting Kong, and Shihai Shao . Optimal Antenna Location for STBC-OFDM Downlink with Distributed Transmit Antennas in Linear Cells. *Communication Letters, IEEE*, 2007, Vol.11: 387-389.
- [9] 杨大成。现代移动通信中的先进技术。北京，机械工业出版社，2005, 266-288。
- [10] 李仲令，李少谦，唐友喜。现代无线与移动通信技术。北京：科学出版社，2006, 20-22。
- [11] 噬钢，王文博，常永宇。移动通信原理与应用。北京：北京邮电大学出版社，2005, 43。
- [12] 电子科技大学应用数学学院。概率论与数理统计。成都：电子科技大学出版社，2004。

## 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，一直致力于专注于微波、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>