

# 下行 MISO 系统基站侧天线在线型小区内的最优分布

李文君<sup>1,2</sup>

(<sub>1</sub>南京化工高级技工学校,江苏 南京 210000;<sub>2</sub>东南大学移动通信国家重点实验室,江苏 南京 210096)

**摘要:**分布式天线系统(DAS)跟传统的集中式天线系统(CAS)相比,具有覆盖面积广、发射功率低、传输质量好等优点,但关于DAS基站侧天线如何分布才能使覆盖性能达到最优一直是一个悬而未决的问题。本文在相对简单的线型单小区、单载波下行MISO系统的场景下,分别针对移动台可以使用1根(Bunch)或多根基站侧天线(DWCS)的情况,基于区域平均信道容量最大的原则,建立了基站侧天线最优分布的模型,并给出了一种较低复杂度的天线分配方案。

**关键词:**DAS; Bunch; DWCS

中图分类号:F062.4 文献标识码:A 文章编号:1008-4428(2011)002-106-03

本文分别对移动台可以使用1根或多根基站天线的情形,在优化的平均小区遍历容量(AAEC; Averaged Area Ergodic Capacity)的条件下,给出了基站侧天线的最优分布方案。

本章从最简单的线形小区入手,研究当系统的下行链路小区平均遍历容量达到最大时的天线分布。线形小区是可以用一个线段抽象的小区。典型的例子有街道、走廊和高速公路。在线形小区中,用户和从属于基站的分布式天线的位置可以用一维坐标表示。这使得天线位置优化变得相对容易。

为方便分析,我们假设单用户场景,但是这个假设对大多数实际的多用户系统是成立的。因为在时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)和正交频分多址(OFDMA)系统中,如果不同的用户使用固定的时隙或频率资源与基站通信,那么对该多用户系统的研究可以简化为对单用户系统的研究。

本章与文献<sup>[9]</sup>都是研究线形小区内天线的最优分布,但是两者的目标函数和系统配置不同。文献<sup>[9]</sup>的优化目标为小区平均BER,本章的优化目标为小区平均遍历容量。文献<sup>[9]</sup>设置基站天线数为2,并且考虑的是下行链路,传输方案是STBC-OFDM,用户均匀分布。本章考虑任意数目的基站天线,并且分别考虑上行链路和下行链路。

## 一、数学模型

考虑基站侧天线数为 $M$ ,移动台侧天线数为 $N$ 的分布式天线系统,用户处在单小区或者小区间干扰可以忽略不计的多小区中,用户在小区内均匀分布。同时考虑路径损耗、阴影衰落和快衰落对于基站分布的影响。

线型小区的示意图如图1所示。该模型的背景主要是高速公路、地铁、步行街等线型覆盖区域环境。

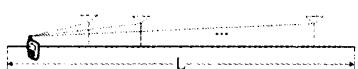


图 1 线型小区中的 DAS

假设小区的长度为 $L$ ,小区左端点记为零点,基站侧 $M$ 根天线的坐标为 $l_1, \dots, l_M$ ,移动台的坐标为 $l$ ,则第 $i$ 根天线到移动台的路径损耗可以建模为

$$p(l, l_i) = \sqrt{c |l - l_i|^\alpha} \quad (0.1)$$

其中 $\alpha$ 为路径损耗因子, $c$ 为常数。假设基站侧的天线发射相同的信号,则1处移动台接受到的信号可以建模为

$$y = \sum_{i=1}^M h_i \sqrt{s_i} \sqrt{c |l - l_i|^\alpha} \sqrt{P_i} x + n \quad (0.2)$$

其中 $h_i, s_i, p(l, l_i)$ 和 $P_i$ 分别为天线 $i$ 到移动台经历的快衰落、阴影衰落、路径损耗系数和发射功率,且 $P_i$ 满足 $\sum_i P_i \leq P$ , $n$ 为均值为0,方差为 $\sigma^2$ 的高斯白噪声, $x$ 为功率归一化为1的发射信号。

### 1. 移动台可以使用1根基站侧天线

此时,移动台只选择信道条件最好的那根天线通信,此时将所有的功率都分配给该天线,可以在此条件下获得最大的信道容量,那么处移动台的遍历容量为

$$C(l) = E_{h,p} \left\{ \log_2 \left( 1 + P \cdot \max \left\{ |h_1|^2 s_1 |l - l_1|^\alpha, \dots, |h_M|^2 s_M |l - l_M|^\alpha \right\} \right) \right\} \quad (0.3)$$

其中 $h=(h_1, h_2, \dots, h_M), S=(S_1, S_2, \dots, S_M)$ 为随机向量, $E\{\cdot\}$ 表示求期望。

在实际系统中,移动台到天线的距离必须大于某个常数 $\varepsilon$ ,即对于任意天线 $m$ ,以 $l_m$ 为中心,以 $\varepsilon$ 为半径的区域 $N_\varepsilon(l_m) \triangleq (l_m - \varepsilon, l_m + \varepsilon)$ 需要被“挖掉”,则整个小区被“挖掉”的区域为 $X = N_\varepsilon(l_1) \cup \dots \cup N_\varepsilon(l_M)$ ,记 $\Theta$ 为整个线性小区区域,则平均小区遍历容量可以表述为

$$\begin{aligned} C_{\text{av}} &= \int_{\Theta \setminus X} C(l) p(l) dl \\ &= \int_{\Theta \setminus X} E_{h,p} \left\{ \log_2 \left( 1 + P \cdot \max \left\{ |h_1|^2 s_1 |l - l_1|^\alpha, \dots, |h_M|^2 s_M |l - l_M|^\alpha \right\} \right) \right\} p(l) dl \end{aligned} \quad (0.4)$$

其中 $p(l)$ 为移动台在小区内分布的密度函数,本文假设为均匀分布,设为 $p$ 。

## 2. 移动台可以使用所有基站侧天线

此时要使容量最大, 必须使接收信噪比最大, 由于本文将噪声归一化为1, 也就是最大化信号接收功率, 即

$$\frac{\max_{1 \leq i \leq M} P_i}{\sum_{i=1}^M P_i} = \left( \sum_{i=1}^M h_i^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \sqrt{P_i} \right) \left( \sum_{i=1}^M h_i^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \sqrt{P_i} \right)^{-1} \quad (0.5)$$

其中 $\dagger$ 表示共轭。根据 Schwarz 不等式, (0.5)可以写为

$$\begin{aligned} & \left( \sum_{i=1}^M h_i^2 S_i \sqrt{c} |l - l_i|^{-\alpha} \sqrt{P_i} \right) \left( \sum_{i=1}^M h_i^2 S_i \sqrt{c} |l - l_i|^{-\alpha} \sqrt{P_i} \right)^{-1} \\ & \leq \left( \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \left( \sum_{i=1}^M P_i \right)^{-1} \\ & \leq P_0 \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \end{aligned} \quad (0.6)$$

等号成立的条件是

$$\frac{P_1}{|h_1|^2 S_1 |l - l_1|^{-\alpha}} = \dots = \frac{P_M}{|h_M|^2 S_M |l - l_M|^{-\alpha}} \quad (0.7)$$

此时基站侧各天线最优功率分配为

$$P_i = \frac{|h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha}} P \quad i = 1, \dots, M \quad (0.8)$$

此时处移动台的遍历容量为

$$C(l) = E_{h,S} \left\{ \log_2 \left( 1 + P_0 \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \right\} \quad (0.9)$$

假设其他条件等同于移动台可以使用1根基站侧天线, 则平均小区遍历容量可以表述为

$$\bar{C}_{LB} = \int_{\Omega_X} C(l) p(l) dl = \int_{\Omega_X} E_{h,S} \left\{ \log_2 \left( 1 + P_0 \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \right\} p(l) dl \quad (0.10)$$

本文化化天线位置的原则是在总功率约束下, 最大化平均小区遍历容量, 也就是寻求使得 AAEC 最大的那些天线位置, 紧化问题为

$$(l_1^*, \dots, l_M^*) = \arg \left\{ \max_{(l_1, \dots, l_M) \in \Theta} \bar{C} \right\} \quad (0.11)$$

在下面的章节中, 我们将分析如何获得最优的天线位置 $l_1^*, \dots, l_M^*$ 。

### 2. 最优分析

通过优化(0.4)和(0.10)来寻求天线的最优位置, 实际上是一个非线性随机规划问题, 解决该问题一般有两个思路, 其一为建模为随机规划问题, 通过数值方法求解; 其二为寻求次最优解, 使两者差距在一个容许的范围内。前者虽然精确, 但计算量比较大, 特别是在天线数较多的时候, 后者计算量较少, 但有一定误差, 本文偏向于后者的分析, 再通过前者来验证后者的结果。

#### 1. 移动台可以使用1根基站侧天线

根据 Jensen 不等式, (0.4)满足

$$\begin{aligned} \bar{C}_{LB} &= \int_{\Omega_X} E_{h,S} \left\{ \log_2 \left( 1 + P_0 \max \left\{ |h_1|^2 S_1 |l - l_1|^{-\alpha}, \dots, |h_M|^2 S_M |l - l_M|^{-\alpha} \right\} \right) \right\} dl \\ &\leq \int_{\Omega_X} \left\{ \log_2 \left( 1 + E \left[ |h|^2 \right] E[S] P_0 \max \left\{ |l - l_1|^{-\alpha}, \dots, |l - l_M|^{-\alpha} \right\} \right) \right\} dl \end{aligned} \quad (0.12)$$

我们把最优化  $\bar{C}_{LB}$  的上界来确定天线的位置作为问题(0.11)的次最优解

$$\bar{C}_{Up,LB} = \int_{\Omega_X} \left\{ \log_2 \left( 1 + E \left[ |h|^2 \right] E[S] P_0 \max \left\{ |l - l_1|^{-\alpha}, \dots, |l - l_M|^{-\alpha} \right\} \right) \right\} dl \quad (0.13)$$

对于  $\bar{C}_{Up,LB}$  的最优解, 我们有如下定理:

M 根分布式天线的最优分布为: 将街道平均分成 M 份, 取每份的中点放置基站天线, 可以使得整个街道的平均信道容量最大。

证明: 令街道的起点为零坐标, 假设所有的天线都是一样的, 则每根天线都有自己的服务范围, 先假设根天线没有两两不重合, 在街道上的最优服务区域分别为  $[0, a_1], [a_1, a_2], \dots, [a_{M-1}, L]$ , 如果其不是均匀分布的, 我们将证明均匀分布的情况下所获得的性能比该分布要好。

下面证明对于某个区域, 天线在服务区域的中点可以获得该服务区域的最优值。如图所示, (a) 表示天线放置在中心的情形, (b) 表示天线位置偏离中心的情形。假设(b)中天线偏离中心的距离为  $\Delta l$ , B 和 C 区域的长为  $\Delta l$ 。显然, A 和 D 区域积分的结果是一样的。(a)和(b)的区别在于区域 B 和 C, 设 x 为到区域 B 和 C 起点的距离, 则

$$\begin{aligned} C_B(x) &= \log \left( 1 + \frac{NP}{\sigma^2} I(d_1 - \frac{\Delta l}{2} + x) \right) \\ C_C(x) &= \log \left( 1 + \frac{NP}{\sigma^2} I(d_2 - \frac{\Delta l}{2} + x) \right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

由于  $d_1 < d_2$ , 则易得  $C_B(x) > C_C(x)$ , 从而

$$\begin{aligned} \bar{C}_B - \bar{C}_C &= \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\Delta l} C_B(x) - C_C(x) dx \\ &\geq \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\Delta l} 0 dx \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

即区域 B 的平均容量大于区域 C 的, 因此, 只有当天线位于该区域的中点时, 方能获得该区域的最大值。

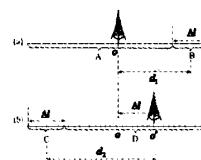


图2 基站在某个区域的分布图

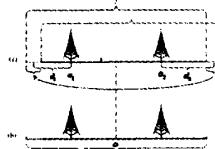


图3 天线在某个区域的分布图

对于两个不同的区域, 我们证明只有当两个区域长度相等时, 才能让这两个区域的总容量最大。如图所示, (a) 表示天线的服务区域不等的情形, (b) 表示天线的服务区域等分线段的情形。如果将(a)中长区域两边多出来的部分补给短区域, 即由状态①变为状态②, 而状态②也就是将线段等分的情形(b)。由图中可以看到, 因为  $d_1 < d_2$ , 所以对移过来区域的积分将大于原区域的积分。因此, 当将线段等分时, 对整个区域的总容量最大。

假设 M 根天线存在若干天线重合的时候取到最优, 不妨设重合的天线有 n 根, 此时的效果就相当于 M-n 天线最优分布的效果了。显然此时的平均信道容量不是最大的, 故不可能在天线重合的时候取到最优值。

#### 2. 移动台可以使用所有基站侧天线

最优化  $\bar{C}_{Up,LB}$  是一个非线性最优化问题, 需要通过数值方

法求解,即使这样,仍可以通过求其极点发现一些规律,对(0.10)求偏导:

$$\frac{\partial}{\partial l_j} \int_{\sigma \setminus X} E_{h,S} \left[ \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \right] \rho dl = 0 \quad j = 1, \dots, M \quad (0.14)$$

将  $j = 1, \dots, M$  的表达式相加有

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^M \frac{\partial}{\partial l_j} \int_{\sigma \setminus X} E_{h,S} \left[ \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \right] \rho dl \\ &= \int_{\sigma \setminus X} E_{h,S} \frac{\left( |h_1|^2 S_1 P_c \ln 2 \right)}{1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha}} \sum_{j=1}^M \frac{\partial |l - l_j|^{-\alpha}}{\partial l_j} \rho dl \\ &\approx \rho E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right)^2 \\ &= \rho E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l_i|^{-\alpha} \right) \\ &- \rho E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) = 0 \end{aligned} \quad (0.15)$$

第二个约等式是因为假设  $\epsilon$  相对于小区长度  $L$  非常小,保护区间  $N_\epsilon(l_m)$  很小,所以  $E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right)$  在  $l = l_m - \epsilon$  和  $l = l_m + \epsilon$  的时候的取值近似认为是相等的。

根据(0.15),我们可以得到如下结论:

$$E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l_i|^{-\alpha} \right) = E_{h,S} \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |L - l_i|^{-\alpha} \right) \quad (0.16)$$

从(0.16)可以看出,若基站侧只有一根天线,那么该天线放在小区中心是最优的,对于多根天线的情况,如果天线的位置关于小区中心对称放置,则  $P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l_i|^{-\alpha}$  和  $P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |L - l_i|^{-\alpha}$  具有相同的概率密度函数,即(0.16)成立。据此我们假设最优情况下,天线的分布也应该是对称分布的。

类似于移动台使用 1 根基站侧天线,这里也仅仅考虑其上界,即

$$\begin{aligned} C_{LD} &= \int_{\sigma \setminus X} E_{h,S} \left[ \log_2 \left( 1 + P_c \sum_{i=1}^M |h_i|^2 S_i |l - l_i|^{-\alpha} \right) \right] \rho dl \\ &\leq \int_{\sigma \setminus X} \log_2 \left( 1 + E \left\{ |h|^2 \right\} E \{S\} P_c \sum_{i=1}^M |l - l_i|^{-\alpha} \right) \rho dl \end{aligned} \quad (0.17)$$

我们把最优化  $C_{LD}$  的上界来确定天线的位置作为问题(0.17)的次最优解

$$\bar{C}_{UP, LD} = \int_{\sigma \setminus X} \log_2 \left( 1 + E \left\{ |h|^2 \right\} E \{S\} P_c \sum_{i=1}^M |l - l_i|^{-\alpha} \right) \rho dl \quad (0.18)$$

$\bar{C}_{UP, LD}$  最大值处必定也是极值点的位置,即

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial l_j} \int_{\sigma \setminus X} \log_2 \left( 1 + E \left\{ |h|^2 \right\} E \{S\} P_c \sum_{i=1}^M |l - l_i|^{-\alpha} \right) \rho dl \\ &= \int_0^L \frac{E \left\{ |h|^2 \right\} E \{S\} P_c}{1 + E \left\{ |h|^2 \right\} E \{S\} P_c \sum_{i=1}^M |l - l_i|^{-\alpha}} \frac{\partial |l - l_j|^{-\alpha}}{\partial l_j} dl = 0 \end{aligned} \quad (0.19)$$

类似前面推导,我们对(0.19)进行累加,可得

$$\sum_{i=1}^M |l_i|^{-\alpha} = \sum_{i=1}^M |L - l_i|^{-\alpha} \quad (0.20)$$

若基站侧只有一根天线,那么该天线放在小区中心是最优的,若基站侧有两根天线,天线必须对称分布,这和文献<sup>9</sup>中的结论是一致的。

### 三、仿真分析

本文假设用户在线性小区上均匀分布,线性小区的长度为  $L=1000m$ ,保护区域半径为  $\epsilon=20m$ ,阴影衰落的方差为  $\sigma_w^2=8dB$ ,路径损耗中的  $\alpha=3.7$ ,快衰落服从均值为 0,方差为  $\sigma_w^2$  的复高斯分布,常数  $c$  的取值为当  $d=100m$  时,  $\frac{c}{d^\alpha}$  为  $-78dB$  的值。噪声和发射功率的取值可以通过改变最差信噪比  $\gamma=\frac{cP}{L^\alpha}$  的不同取值来决定发射功率。

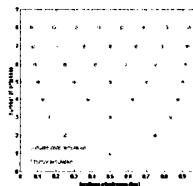


图 4 天线分布图

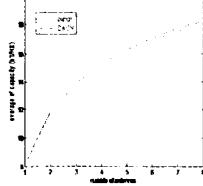


图 5 平均容量对比图四、结束语

本文分别对 Bunch 和 DWCS 两种分布式天线系统在线形和圆形两种宏蜂窝小区结构中建立优化模型并给出一种较低复杂度的天线分配方案。优化的目的是求得在平均小区遍历容量最大下的基站位置。数值仿真表明该方案下的天线分布和实际结果相当吻合。

### 参考文献:

- [1] Cong Shen, Shidong Zhou and Yan Yao. Comparison of channel capacity for MIMO-DAS versus MIMO-CAS. in Proc. 9th Asia-Pacific Conference. vol.4. pp.113–118.
- [2] W.Roh and A. Paulraj. Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channels. in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. '02. vol. 3. pp. 1520–1524. 2002.
- [3] H. Zhuang, L. Da, L. Xiao, and Y. Yao. Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout. Electron. Lett. vol. 39, no.6. pp. 495–496. Mar. 2003.
- [4] Ying Shen, Youxi Tang and shihai Shao. Optimal antenna location for STBC-OFDM downlink with distributed Transmit Antennas in linear cells. IEEE Communications Letters. vol. 11,no. 5. pp. 387–389.. May. 2007.
- [5] S. Catteux, P. F. Driessens, and L. J. Greenstein. Data throughputs using multiple–input multiple–output (MIMO) techniques in a noise–limited cellular environment. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. vol. 1. no. 2. pp. 226–235. April. 2002.
- [6] I. E. Telatar. Capacity of Multi–antenna Gaussian Channels. European trans. Telecomm. ETT. vol. 10. no. 6. pp. 585–595. 1999.
- [7] W. Roh. High performance distributed antenna cellular networks. Ph.D. dissertation. Dept. Elect. Eng., Stanford Univ. Stanford, CA. 2003.
- [8] V. Erceg, et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. IEEE J. Sel. Areas Commun. vol. 17. no.7. pp. 1205–1211. Jul. 1999.
- [9] D. Wang, X. You, J. Wang, and X. Hou. Spectral efficiency of distributed MIMO cellular systems in a composite fading channel. in Proc. IEEE Int. Conf. Communicational (ICC'08). pp. 1259–1264.. May. 2008.

### 作者简介:

李文君,南京化工高级技工学校,东南大学移动通信国家重点实验室。

## 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>