

短 文

## 时分双工蜂窝系统的智能天线研究和性能评估 \*

孟维晓 张乃通

(哈尔滨工业大学 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 智能天线是移动多媒体通信亟待解决的关键技术,本文研究了一种适用于时分双工蜂窝系统,基于非线性判决反馈空间均衡器和递归最小平方算法的智能天线。提出了双向链路信号对干扰加噪声功率比的算法以及阵列波束方向增益和信干比累积分布函数两种性能评估方法。仿真结果表明,该智能天线可以抵消同波道干扰,改善信干比,减小频率复用系数。

**关键词** 智能天线 判决反馈均衡 递归最小平方算法 移动多媒体通信

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A 文章编号 1000-436X(2000)10-0073-08

## A scheme and performance evaluations of smart antenna in TDD cellular system

MENG Wei-xiao ZHANG Nai-tong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** Smart antenna is a core technique for mobile multimedia communications. In this paper, based on the non-linear decision feedback spatial equalizer and recursive least square algorithm, a solution of smart antenna is presented, which is suitable for time division duplex(TDD) system. Algorithms of signal to interference plus noise power ratio(SINR) for dual links are advanced, followed by beam pattern directional gain and SINR cumulative distribution function as the performance evaluations. Simulation results show that it is able to cancel co-channel interference(CCI), improve the performance of SINR, and decrease the reuse factor of frequency.

**Key words** smart antenna; decision feedback equalizer; recursive least square; mobile multimedia communications

### 1 引言

智能天线(smart antenna, SA)或自适应阵列天线(adaptive array antenna, AAA),又称为软件天线(software antenna)<sup>[1]</sup>,指由一组相关的天线元素在空间构成一定的几何形状,根据期望信号和干扰信号到达阵列的各个元素的角度和相位不同,通过相应的自适应算法和高速数字信号处理技术,自动形成对期望方向信号增益的加强和对干扰方向信号增益的削弱甚至抵消的天线<sup>[1,2]</sup>。它可以有效地抵消传播多径干扰和由于频率复用造成的同波道干扰(co-channel interference, CCI),并可以跟踪移动台的高速运动,十分适合小区制、大容量、高速率和传播环境复杂的蜂窝移动多媒体通信。研究表明,随着天线元素数量的增加,阵列对

收稿日期 1999-08-10 修订日期 2000-04-11

基金项目 哈尔滨工业大学与日本国电报电话公司移动通信网株式会社(NTT DoCoMo)合作研究项目

作者简介 孟维晓,哈尔滨工业大学通信技术研究所,副研究员,工学博士;张乃通,哈尔滨工业大学通信技术研究所,所长,教授,博导。

接收信干比的改善呈对数增加的趋势<sup>[3]</sup>

本文提出一种适用于 TDMA/TDD 系统和 QPSK 调制方式的智能天线和性能评估方法。对于上行链路信号，阵列通过期望和干扰信号到达角度(direction of arrival, DOA)的不同和训练序列的正交性为特征背景，判决反馈均衡器(decision feedback equalizer, DFE)通过递归最小平方(recursive least square)算法，逐码元对各天线元素的加权因子进行优化逼近，使阵列整体在干扰信号的到达方向上，对 CCI 形成抵消或衰耗。对于下行链路，本研究考虑短突发序列、收发紧密相连的时分双工(TDD)系统，利用收发转换时间相对信道的变化速度足够短的条件下，下行的信道参数和特征可以通过上行接收来建立的特点<sup>[1,4]</sup>，在下行信道参数未知情况下，使得阵列对其他移动台产生最小干扰为前提，将信号传给期望的移动台。

## 2 智能天线方案

### 2.1 阵列天线

基站采用的阵列天线选择环形平面阵，由  $N$  个同性的全向增益天线元素组成(本文中  $N = 8$ )，并均匀布于半径为  $R$  的圆上。令圆心为基站收发信号的参考点，相邻元素的间距  $D$  为射频波长  $\lambda$  的一半，即  $D = \lambda/2$ <sup>[3,5]</sup>。相对参考点，对于任意 DOA 的接收信号，天线元素对平面波的路程差  $L$  用公式 1 来表示

$$L = R\cos\gamma = \frac{\lambda\cos(\alpha - \beta)}{4\sin(\varphi/2)} \quad (1)$$

式中， $\alpha$  是阵列天线中第  $i$  个天线元素的相位角  $2\pi i/N$ ， $\beta$  是任意一条多径信号的入射角， $\gamma = \alpha - \beta$ ， $\varphi$  是相邻天线元素与圆心夹角的一半为  $\pi/N$ ，所以对应参考点的相位差  $\theta$  用公式 2 来表示

$$\theta = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{\pi\cos(2\pi i/N - \beta)}{2\sin(\pi/N)} \quad (2)$$

对于 QPSK 调制方式，接收信号的同相信号和正交信号电平可以采用等圆坐标旋转变换来得到，参考点的接收矢量信号  $R(x, y)$ ，任意天线元素的接收信号  $R_i(x', y')$  转化通式可以由如下公式(3)矩阵的乘积来表示

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于  $\theta$  是  $i$  和  $\beta$  的函数，所以定义转移矩阵为

$$T(i, \beta) = \begin{bmatrix} \cos\theta(i, \beta) & -\sin\theta(i, \beta) \\ \sin\theta(i, \beta) & \cos\theta(i, \beta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.2 判决反馈均衡及递归算法

原理如图 1 所示，RLS 算法可以利用已知训练序列的正交性，逐码元均衡，调整加权因子，在数据序列到达前基本收敛，使数据的误比特率降低。而在接收数据时，靠过零判决误差信号的负反馈继续调整加权因子的重量，并在接收的最后达到最优化，从而形成接收信号的增益方向图样，该图样代表均衡器对不同的到达入射角的期望和干扰信号的增益和衰落的大小。这种递归算法适合于短时隙、结合紧密的 TDMA/TDD 的关键在于：在上下行突发时隙转换速度远大于时变信道参数的变化速度时，该图样在瞬间可以转化为发射信号在相应方向的阵列增益，这样就方便地找到了下行链路的空间选择特征<sup>[4]</sup>。

根据文献[6]的研究结果，得到具体递归算法如下：

假设 RLS 的输入向量为  $U(n)$ ，记忆因数为  $\lambda$ ，相关矩阵的递矩阵为  $P(n-1)$ ，输出向量

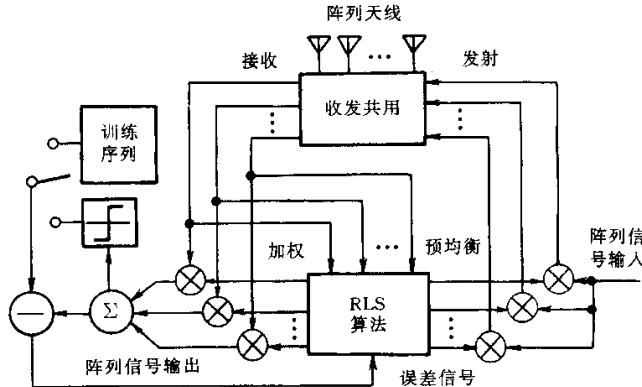


图 1 空间均衡原理示意图

为  $y(n)$ , 可以得到

$$X(n) = \frac{1}{\lambda} P(n-1) U(n) \quad (5)$$

$$\text{Kalman 序列为 } K(n) = \frac{X(n)}{1 + U^H(n) X(n)} \quad (6)$$

按码元(symbol)进行修正的加权因子重量为

$$W(n) = W(n-1) + K(n) \alpha^*(n) \quad (7)$$

由于加权因子重量可正可负, 因此假设初始值为:  $W(0) = [0 \ 0]^T$ 。

$$\text{重新修正的相关矩阵的逆矩阵为 } P(n) = \frac{1}{\lambda} P(n-1) - K(n) X^H(n) \quad (8)$$

初始化  $P(0) = \begin{bmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{bmatrix}$ ,  $\delta$  为较大实数, 本文选择 10000.0。

$$\text{误差信号为 } \alpha(n) = y(n) - W^H(n-1) U(n) \quad (9)$$

$$\text{变化的 Kalman 序列为 } K(n) = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 0 \\ 0 & 1-\lambda \end{bmatrix} U(n) \quad (10)$$

按码元  $t$  进行修正的  $W$  是复向量, 作用于各个天线元素, 因此,  $W$  是天线元素  $i$  和  $t$  的函数, 表示为  $W(i, t)$ , 而最佳加权因子重量仅是  $i$  的函数, 表示为  $W_{opt}(i)$ , 同样应用相位等圆坐标旋转变换原理, 得到阵列在任意角度  $\varphi$  上的增益为

$$\alpha(\varphi) = \sum_{i=1}^N W_{opt}^*(i) \cdot \pi(i, \varphi) \quad (11)$$

当  $\varphi$  取期望和干扰信号的入射角时,  $\alpha(\varphi)$  是代表一组阵列波束方向增益的离散值; 当  $\varphi$  取值足够小时, 生成连续的  $\alpha(\varphi)$  就代表自适应阵列天线的波束方向增益曲线, 可以从中看出其增强和削弱的属性。

### 3 双向链路信干比算法

#### 3.1 上行码元增益累积加权

对于上行链路, 提出一种码元增益累积加权(symbol gain cumulative weighting, SGCW)信干比算法。如图 2 所示, 假定多径突发序列码元同时传输, 不考虑传播时延差, 那么,  $M$  条路径(包括期望源和干扰源)的第  $i-1$  个码元同时达到阵列天线, 阵列输入电平复向量记为  $A_{in}^{i-1} =$

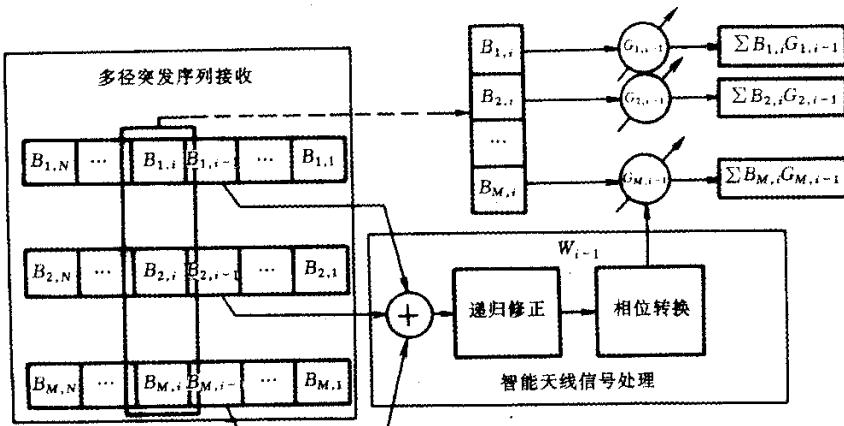


图 2 码元累积加权原理示意图

$\{B_{1,i-1}, B_{2,i-1}, \dots, B_{M,i-1}\}$  经过 RLS 运算得到  $N$  个天线元素加权复向量因子, 表示为  $W_{i-1} = \{W_{1,i-1}, W_{2,i-1}, \dots, W_{N,i-1}\}$ , 并根据阵列元素与参考点的相位差和等圆坐标旋转变换原理, 逆运算得到阵列在各个路径上对第  $i-1$  个码元形成的瞬态电平增益复向量, 记为  $G_{i-1} = \{G_{1,i-1}, G_{2,i-1}, \dots, G_{M,i-1}\}$ , 同时作为接收第  $i$  个码元的方向增益。当  $M$  条路径的第  $i$  个码元同时达到阵列天线时, 阵列得到的输入信号电平复向量记为  $A_{\text{in}}^i = \{B_{1,i}, B_{2,i}, \dots, B_{M,i}\}$ , 阵列输出信号电平复向量可表示为

$$A_{\text{out}}^i = \{B_{1,i}G_{1,i-1}, B_{2,i}G_{2,i-1}, \dots, B_{M,i}G_{M,i-1}\} \quad (12)$$

这样就得到阵列对于全部突发序列码元在所有路径上的增益累积输出的电平复向量, 记为

$$A_{\text{out}} = \sum_i A_{\text{out}}^i = \left\{ \sum_i B_{1,i}G_{1,i-1}, \sum_i B_{2,i}G_{2,i-1}, \dots, \sum_i B_{M,i}G_{M,i-1} \right\} \quad (13)$$

当区分开期望路径和干扰路径后, 也就得到了上行链路, 基站接收任意突发序列的码元增益累积加权信干比, 见式(14)。任意码元的接收功率信号可以用对各自路径上接收电平复向量先求和、后取模、再平方的办法来得到。整个突发序列的接收功率信号为有效码元接收功率信号的和。

$$\Gamma_B = \frac{\sum_{j=b_1}^{b_N} \left| \sum_{i=1}^{p_d} (B_{i,j}^d G_{i,j-1}^d) \right|^2}{\sum_{j=b_1}^{b_N} \left| \sum_{i=1}^{p_u} (B_{i,j}^u G_{i,j-1}^u) \right|^2} \quad (14)$$

式中,  $b_1$  至  $b_N$  为有效接收码元位;  $p_d$  和  $p_u$  分别代表期望和干扰信号路径数量;  $B_{i,j}^d$  和  $B_{i,j}^u$  分别代表期望和干扰信号在第  $i$  条路径的第  $j$  个码元位的接收信号电平复向量。

### 3.2 下行路径增益累积加权

对于下行链路, 提出路径增益累积加权(path gain cumulative weighting, PGCW)信干比算法。利用上行链路阵列天线在第  $b_N$  个接收码元上形成的最佳修正加权向量因子  $W_{b_N} = \{W_{1,b_N}, W_{2,b_N}, \dots, W_{N,b_N}\}$  阵列将形成与接收同样的波束辐射方向图, 对应的阵列电平增益复向量可表示为  $G_{b_N} = \{G_{1,b_N}, G_{2,b_N}, \dots, G_{M,b_N}\}$ , 将按 DOA 作用于各个路径方向, 使得基站发射信号以对其他移动台产生最小的 CCI 为前提, 到达期望的移动台。相应的移动台接收信干比也是

按照传播路径增益进行累积得到, 见式(15)。由于在整个下行的突发序列的发射过程中, $G_{b_N}$ 是不变的, 对于功率信号增益则采用先取模、后平方的办法得到。

$$\Gamma_M = \frac{\sum_{i=1}^{p_d} P_d L_i^d |G_{i,b_N}^d|^2}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{p_u} P_u^j L_{j,i}^u |G_{j,i,b_N}^u|^2} \quad (15)$$

式中, $P_d$  和  $P_u^j$  分别代表期望基站和第  $j$  个干扰基站的发射功率;  $G_{i,b_N}^d$  和  $G_{j,i,b_N}^u$  分别代表期望和第  $j$  个同频干扰基站在第  $i$  条路径上形成的方向电平增益复向量;  $|G_{i,b_N}^d|^2$  和  $|G_{j,i,b_N}^u|^2$  是对应的功率增益; $L_i^d$  和  $L_{j,i}^u$  分别表示期望和第  $j$  个同频干扰基站在第  $i$  条路径上的衰耗, 包括路径衰耗、阴影效应和瑞利衰落。

## 4 系统仿真及性能评估

### 4.1 仿真参数

本文研究建立在 19 个同频全向、中心激励小区、同步最大 19 个 CCI 的基础上, 采用了同频复用系数  $r_f$  为 3、4 和 7 的三种小区结构, 如图 3 所示。中心小区位于坐标的中心, 阴影部分为同频小区, 位于三个同心圆上。主要仿真参数见表 1。

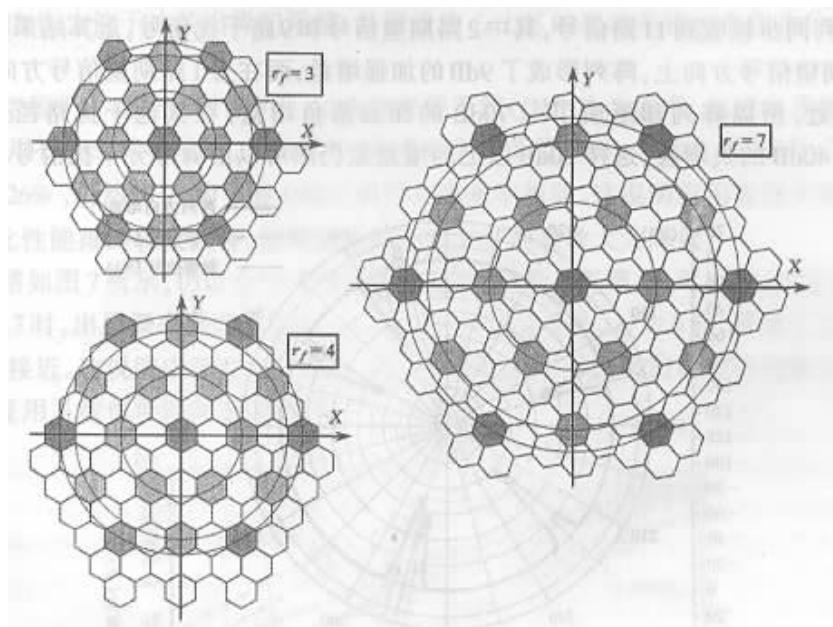


图 3  $r_f$  为 3、4 和 7 三种小区结构

系统参数设定

表 1

仿真参数	设置结果
调制方式	QPSK
射频频率	8 GHz
码元传输速率	12 Mbit/s
路径传播衰耗	Okumura-Hata 经验公式

续表

仿真参数	设置结果
阴影衰落	对数正态分布
阴影衰落标准方差	6.5dB
快衰落模型	瑞利衰落
FDTF	1.0E - 8
传播路径	随机 最大 5 条
DOA 标准方差	期望信号 60° , 干扰信号 30°
反射体数量	随机 最大 2 个
反射损耗	10dB

## 4.2 阵列波束方向增益

### 1) 干扰数量小于阵列元素数量

假定 8 元素阵列接收同步到 7 路信号, 其中 1 路期望信号和 6 路干扰信号, 运算结果如图 4 所示。在期望信号方向上, 阵列形成了 10dB 的加强增益, 而在干扰路径上却均形成了强于 -40dB 的衰落负增益, 这样 50dB 的增益差足以抵消干扰信号的能量。

### 2) 干扰数量大于阵列元素数量

假定阵列同步接收到 11 路信号, 其中 2 路期望信号和 9 路干扰信号, 运算结果如图 5 所示。在其中 1 路期望信号方向上, 阵列形成了 9dB 的加强增益, 而在另 1 路期望信号方向上, 由于与干扰 DOA 接近, 所以阵列却形成了 -70dB 的深衰落负增益, 在其他干扰路径上也形成了 -20dB 至 -40dB 的负增益, 这样 30dB 以上的增益差仍然可以削弱部分干扰信号的能量。

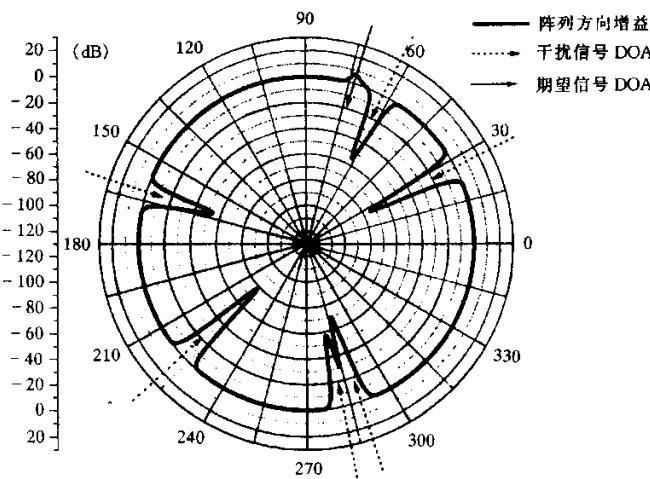


图 4 六干扰时阵列方向增益图

## 4.3 信干比性能改善

应用信干比累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)来评估采用智能天线后, 对比中心小区信干比性能改善情况。CDF 指在测试通信系统的整个计算过程中, 小于等于某一信干比  $\Gamma$  取值  $x$  范围之内的累积统计数字  $N(\Gamma \leq x)$  占总统计数字  $N$  的百分比, 可用式(16)表示。它可以 <sup>从统计数据</sup> 为从统计数据的角度衡量系统的通信质量。

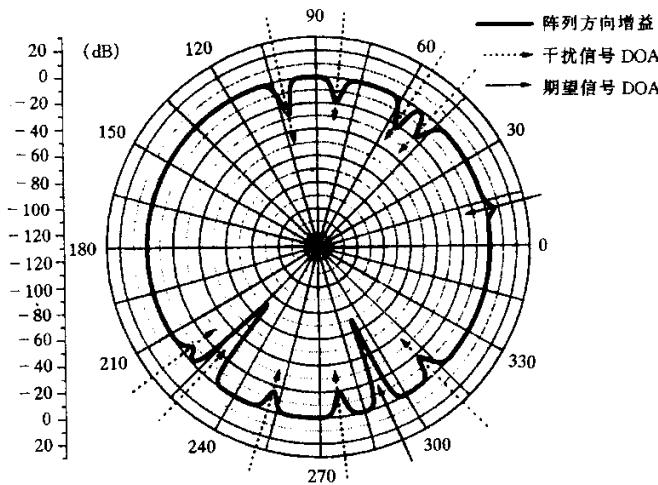


图5 九干扰时阵列方向增益图

$$\gamma(x) = \gamma(\Gamma \leq x) = \frac{N(\Gamma \leq x)}{N} \times 100\% \quad (16)$$

当移动台处于小区边缘时,信干比降低至越区切换时的监界值,该值称为信干比的出界门限。而当移动台未到达小区边缘,由于干扰信号的加强,信干比仍有可能达到这个出界门限,本文假定10dB作为信干比的出界门限值,并假设中心小区的基站和移动台作为分析信干比改善的参考。

上行链路信干比改善如图6所示,以全向天线系统(OMNI)为参考,比较出界概率的大小。可以看出,应用智能天线技术后, $r_f$ 为7时,出界概率降低了18%; $r_f$ 为4时,降低了23%; $r_f$ 为3时,降低了26%,仍然和 $r_f$ 为7的OMNI累积分布概率相同。这说明应用智能天线技术后,上行链路信干比性能得到较大改善,使蜂窝系统的频率复用系数大大降低。

下行链路如图7所示,仍以全向天线系统为参考,比较出界概率。可以看出,应用智能天线技术后, $r_f$ 为7时,出界概率降低了19%; $r_f$ 为4时,降低了24%; $r_f$ 为3时,降低了25%,仍和 $r_f$ 为7的OMNI接近。这说明应用智能天线技术后,下行链路信干比性能同样得到较大改善,蜂窝系统的频率复用系数也可同时大大降低。

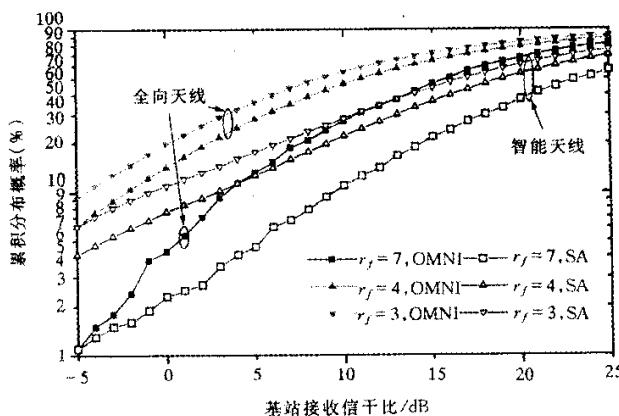


图6 上行链路信干比性能的改善

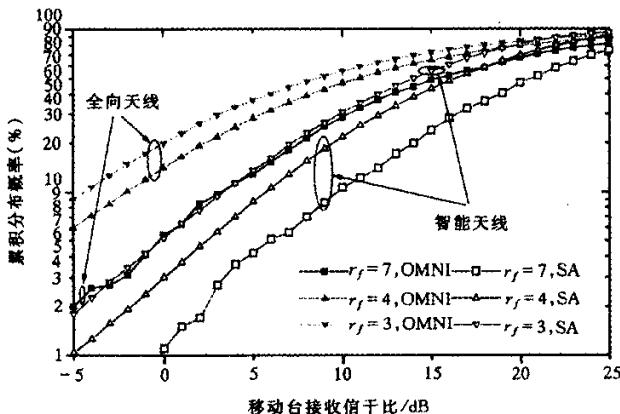


图 7 下行链路信干比性能的改善

## 5 结论

本文以非线性判决反馈均衡器和递归最小平方算法为关键技术的智能天线解决方案,通过对阵列波束方向增益和信干比累积分布性能的仿真和分析,证明了本方案可以对同波道干扰形成抵消或较深的抑制;而对期望信号的加强则取决于它与干扰信号 DOA 差的大小;应用智能天线技术后改善了双向链路的接收信干比,等价于降低了系统对传输信道载干比的要求,使得蜂窝系统的同频复用系数可以由 7 降低到 3,从而提高了频谱的利用效率。

致谢:本研究得到了日本国电信电报公司移动通信网株式会社(NTT DoCoMo)富里繁主任研究员的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] KOHNO R. Spatial and temporal communication theory using adaptive antenna array[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(1): 28-35.
- [2] MODESTINO J W, EYUBOGLU V M. Integrated multielement receiver structures for spatially distributed interference channels[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1986, 32(2): 195-219.
- [3] CARG V K, HUNTINGTON L. Application of adaptive array antenna to a TDMA cellular/PCS system[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(10): 148-152.
- [4] TOMISATO S, FUKAWA K, MATSUMOTO T. A space/time pre-equalization technology for down-link signal transmission in time-division-duplex(TDD) mobile multimedia communication[A]. EUSIPCO '98[C], 1998, 1349-1352.
- [5] WINTERS J H. Smart antenna for wireless system[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(1): 23-27.
- [6] HAYKIN S, LITVA J, SHEPHERD T J. Radar Array Processing[M]. Springer-Verlag, 1993, 154-243.

## 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>