

# 一种基于自适应天线的 OFDM 自适应比特分配算法<sup>\*</sup>

王丽娟<sup>1</sup>, 侯春萍<sup>1</sup>, 曹大仲<sup>1</sup>, 薛由贵<sup>2</sup>

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 广东省电信规划设计院数据所, 广东 广州 510630)

**摘要:**本文提出了一种利用自适应天线阵列实现自适应 OFDM 系统的方案。该方案利用抽样矩阵求逆(SMI)算法对天线阵列进行最优权值的估计, 并根据天线权值计算出的信噪比(SNR), 在各个子载波上进行自适应的比特分配。仿真结果表明, 与传统的 OFDM 系统相比, 利用此方案实现的自适应 OFDM 系统, 误码率性能可以得到有效的改善。

**关键词:**正交频分复用(OFDM); 自适应 OFDM(AOFDM); 自适应天线矩阵(AAA); 抽样矩阵求逆(SMI)算法

## An Algorithm for Adaptive Antenna Array with Adaptive OFDM

WANG Li-juan<sup>1</sup>, HOU Chun-ping<sup>1</sup>, CAO Da-zhong<sup>1</sup>, XUE You-gui<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Information Design, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** In this paper a method is put forward which combine adaptive antenna array (AAA) with the Adaptive OFDM (AOFDM). This method employs the sample matrix inversion(SMI) algorithm to estimate the most optimum weight of the antenna array. The signal-to-noise ratio (SNR) of the subcarriers, which can be derived from the SMI algorithm's weight, is used to control the modulation mode adaptation. Compared to the conventional OFDM system, the system BER performance is improved by using adaptive antenna array.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); adaptive OFDM; adaptive antenna array (AAA); sample matrix inversion(SMI) algorithm

### 1 引言

随着全球移动通信业务的迅速发展, 自适应天线技术作为未来个人通信系统最有可能采用的关键技术引起了人们极大的关注。在移动通信系统中, 信道的传输环境较恶劣, 消除同信道干扰(CCI)、多址干扰(MAI)与多径衰落的影响成为提高无线移动通信系统性能的主要因素。自适应天线阵列<sup>[1]</sup> (adaptive antenna array, AAA)利用数字信号处理技术在基带动态地产生空间定向波束, 将主瓣对准有用信号到达的方向, 低增益副瓣对准主要的干扰信号到达的方向, 借助有用信号和干扰信号在入射角度上的差异, 选择恰当的合并权值, 从而达到充分利用移动用户信号、抑制干扰信号的目的。自适应天线阵列是解决频率资源匮乏的有效途径, 同时还可以提高系统容量和通信质量。

近几年内几乎所有的先进通信系统都采用自适应天线阵列技术。研究表明自适应天线技术与 TDMA、CDMA 技术相结合都已经取得了较好的性能。但是, 目前研究自适应天线与 OFDM 技术相结合的报道甚少。由于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术<sup>[2]</sup>能有效地抑制码间干扰(ISI), 克服信道的频率选择性衰落, 因此是下一代移动通信系统的最有可能采用的调制技术。

本文将自适应天线阵列技术与 OFDM 技术有机的结合, 在 OFDM 系统的接收端采用自适应天线接收, 用抽样矩阵求逆(SMI)算法自适应地选择最优权值, 并根据每个子载波的信噪比(SNR)自适应进行比特分配和调制。仿真结果表明本文提出的系统方案能有效的降低信道间的干扰, 提高系统的接收性能。

\* 基金项目:国家自然基金项目“用于下一代移动通信系统的 OFOM 技术”

## 2 系统模型

在 OFDM 系统的接收端,采用  $M$  个阵元的天线阵列同时接受  $N$  个用户信号(一个期望用户和  $N - 1$  个不期望的用户),如图 1 所示。

在第  $k$  个 OFDM 符号间隔,天线在第  $l$  个子载波上接收到的信号表示为  $x(k, l)$ :

$$x(k, l) = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$$

$x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 为第  $i$  个天线阵元接收到的信号。

第  $n$  个用户发出信号的信道频率响应矢量为:

$$a_n(k, l) = [a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{Mn}]^T \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

$a_{in}$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 为发送天线与第  $i$  个接收天线阵元之间的衰落。 $x(k, l)$  由  $N$  个独立衰落的信号和高斯噪声组成:

$$\begin{aligned} x(k, l) &= a_1(k, l)s_1(k, l) + \sum_{i=2}^N a_i(k, l)s_i(k, l) + n(k, l) \\ &= \sum_{i=1}^N a_i(k, l)s_i(k, l) + n(k, l) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $s_1(k, l)$  为期望用户发出的信号, $s_i(k, l)$  ( $i = 2, 3, \dots, N$ ) 为其他用户发出的干扰信号。 $n(k, l)$  为高斯白噪声。

$x(k, l)$  经过复加权系数  $w$  的加权合成,输出信号向量为:

$$y(k, l) = w^H(k, l)x(k, l) \quad (2)$$

$w(k, l) = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$  是阵列权向量。

## 3 SMI 算法

在 OFDM 系统接收端使用自适应天线阵列,可以提高系统的性能,实现的关键在于自适应算法的选择。自适应天线阵列相当于一个空时滤波器,通过适当的自适应算法调整复加权系数合并不同天线的信号,在信号的入射方向上增益最大,在干扰信号的入射方向上形成零陷,达到充分利用期望用户的信号、抑制干扰信号的目的,达到最佳的接收效果。天线阵方向图如图 2 所示。

一种典型的权值选择的准则是使信号干扰噪声比(SINR)最大,在第  $k$  个符号间隔,第  $l$  个子载波上的瞬时 SINR 为:

$$\text{SINR}(k, l) = \frac{w^H(k, l)\{\Phi_d(k, l)\}w(k, l)}{w^H(k, l)\{\Phi_u(k, l)\}w(k, l)} \quad (3)$$

其中, $\Phi_d(k, l) = a_1(k, l)a_1^H(k, l)$  为期望信号的空域协方差矩阵; $\Phi_u(k, l) = \sum_{i=2}^N a_i(k, l)a_i^H(k, l) + \sigma^2 I$  为不期望信号的空域协方差矩阵。 $\sigma^2$  是每个噪声元素的方差。

依据最大信噪比准则可以得到著名的 Wiener 解:

$$w = \Phi_x^{-1} \quad (4)$$

其中, $\Phi_x = E[x(k, l)x^H(k, l)]$ , $s = E[X(k, l) * d(k, l)]$ , $d(k, l)$  为参考信号。在实际的应用中  $\Phi_x$  和  $s$  难以获得,实现时可用  $\Phi_x$  的估计值代替真值来计算权的估值,这就是抽样矩阵求逆(SMI)算法。

SMI 算法对阵列信号的  $P$  个样本进行简单的平均即可得到  $\Phi_x$  的无偏估计: $\hat{\Phi}_x = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P x(k, l)x^H(k, l)$

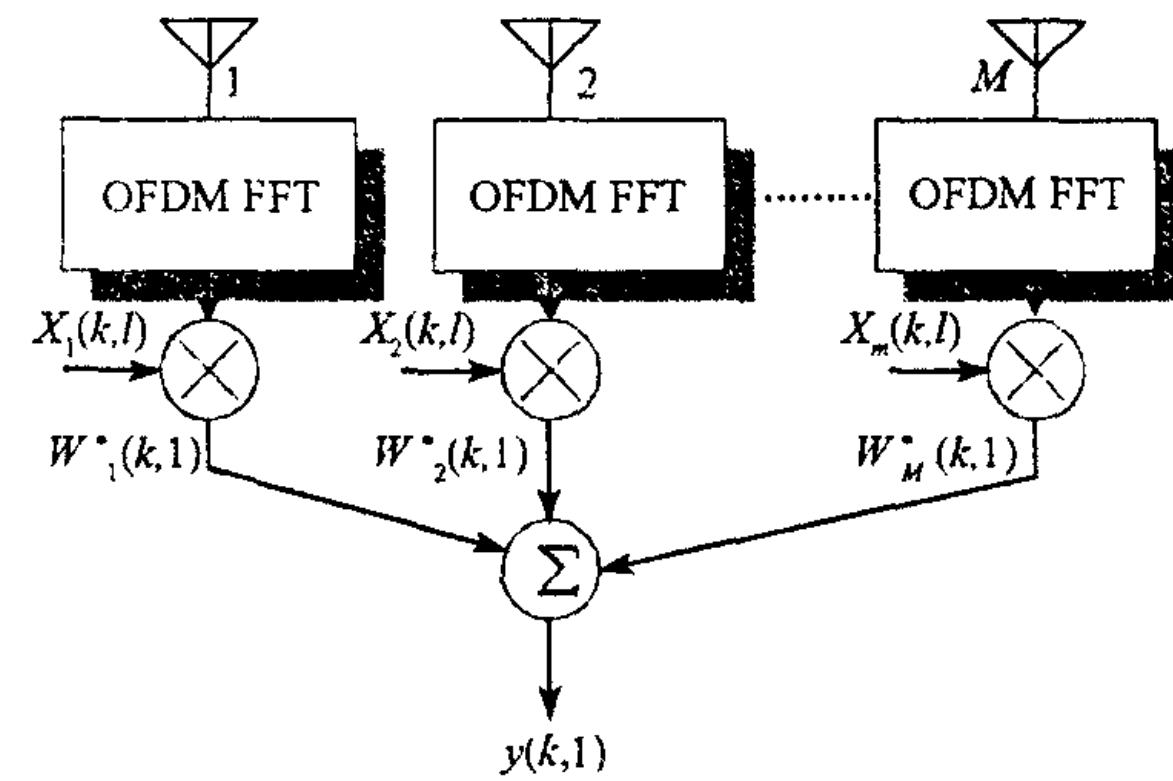


图 1 OFDM 中使用的自适应天线阵列

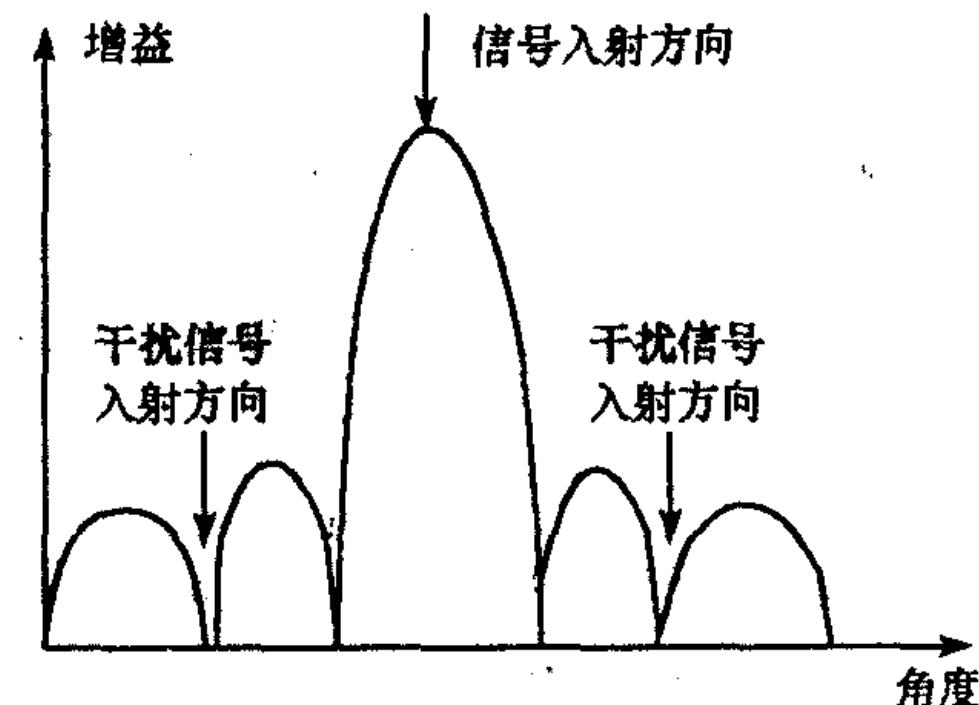


图 2 天线阵的方向图

为取样协方差矩阵。

$s_l = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P x(k, l) r^*(k, l)$  为引导向量。其中,  $r(k, l)$  为已知的导频信号或是在第  $k$  个符号间隔里由期望信号发出的参考符号。

#### 4 适应比特分配算法

接收端采用自适应天线的 OFDM 收发系统如图 3 所示。每个天线阵元接收到的信号经过快速傅里叶变换(FFT)后的并行信号用 SMI 算法加权合并, 输出后第  $l$  个子载波的 SNR 可以用 SMI 算法得出的天线的权值表示为:

$$\text{SNR} = \frac{w^H(k, l)\{\Phi_d(k, l)\}w(k, l)}{w^H(k, l)(\sigma^2 I)w(k, l)} \quad (5)$$

合并后的信号传输到自适应解调器。OFDM 系统根据公式(4)得到的 SNR 为下一个传输的 OFDM 信号选择合适的调制方式并自适应地为每个子载波分配不同的比特。OFDM 采用以下几种调制模式: 不调制、BPSK、QPSK、8-QAM、16-QAM、32-QAM、64-QAM、128-QAM、256-QAM。分别对应每个子载波 0、1、2、3、4、5、6、7、8 比特。假设采用格雷编码, 误符号率与误码率近似相等。对于某一给定的误码率, 各种调制方式所需的 SNR 如图 4 所示。从图中可见, 带宽效率  $C'$  与 SNR(dB) 成线性关系。在误比特率为  $P_e = 10^{-5}$  时, 这个关系可以用下列方程式表示:

$$C' = 0.31(10\lg \frac{S}{N} - 6.7) \quad (6)$$

自适应比特分配算法首先根据每个子载波的 SNR 和系统的目标误码率算出  $C'_i$  ( $i = 1, 2, \dots, L$ ),  $L$  为子载波数。设  $m_i$  为小于  $C'_i$  的最大整数,

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L m_i \quad (7)$$

当每个 OFDM 符号上传输  $m_{\Sigma}$  比特时, 系统的误码率比目标误码率小。

表 1 仿真的参数

天线阵元数	$M = 4$
接收信号	期望:1; 不期望:3
子载波数	512
信号持续时间	$6.4\mu\text{s}$
保护间隔	一个 OFDM 符号的 20%
衰落模型	6 路径瑞利衰落

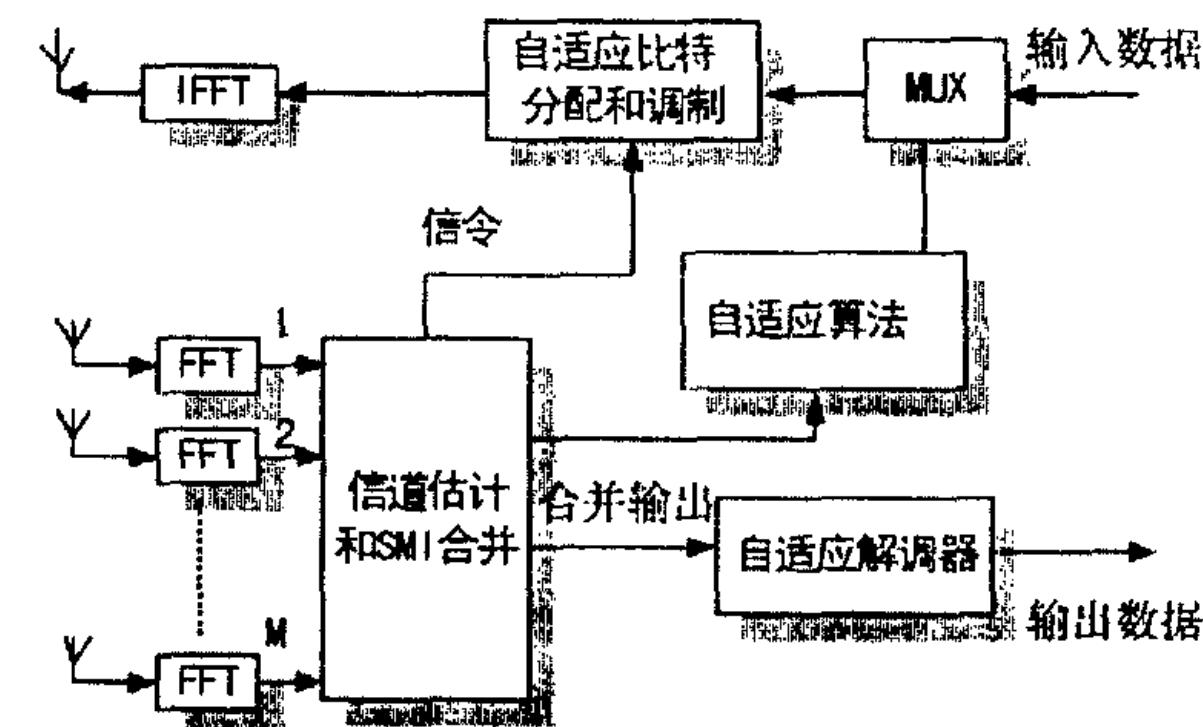


图 3 采用自适应天线的自适应 OFDM 系统模型

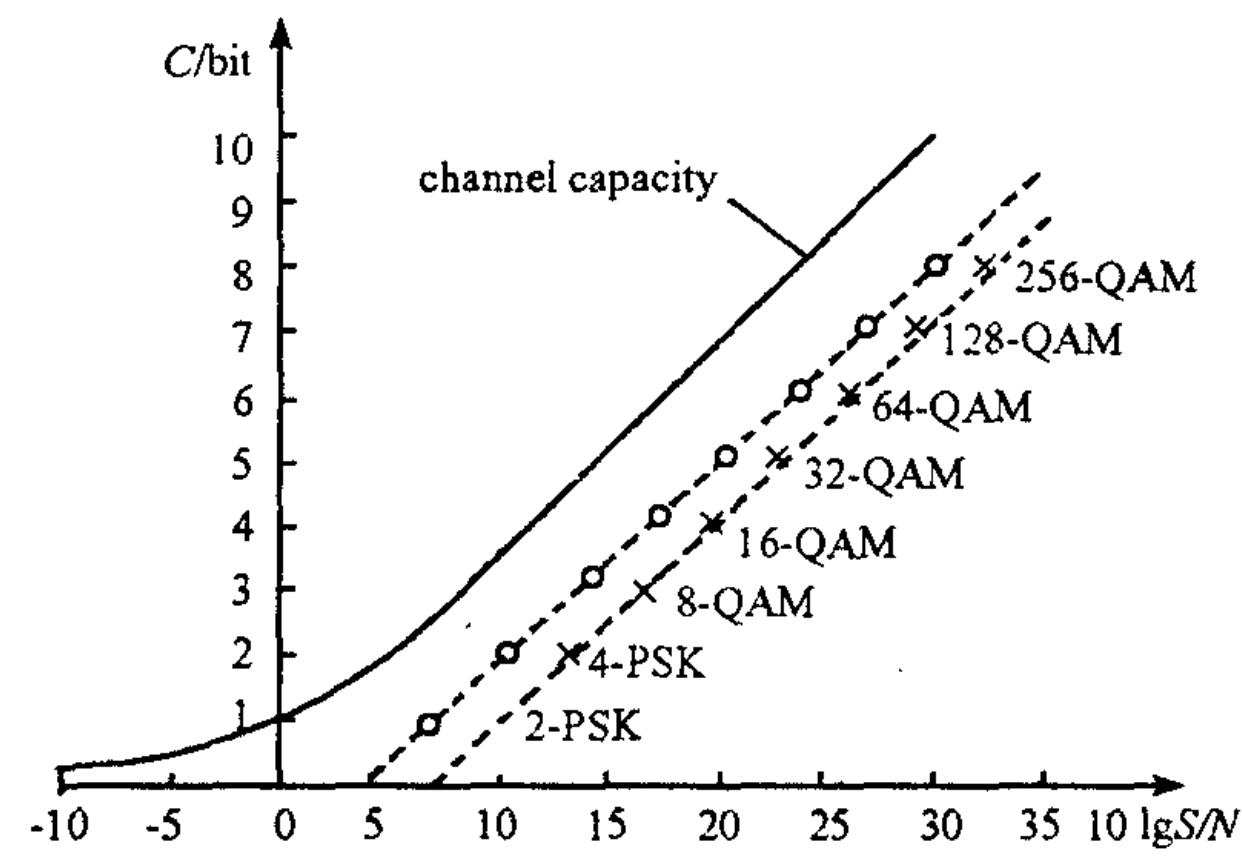


图 4 在  $P_e = 10^{-5}$  (叉号表示) 和  $P_e = 10^{-3}$  (圆圈表示) 时, 不同调制方式的带宽效率随 SNR 的变化曲线

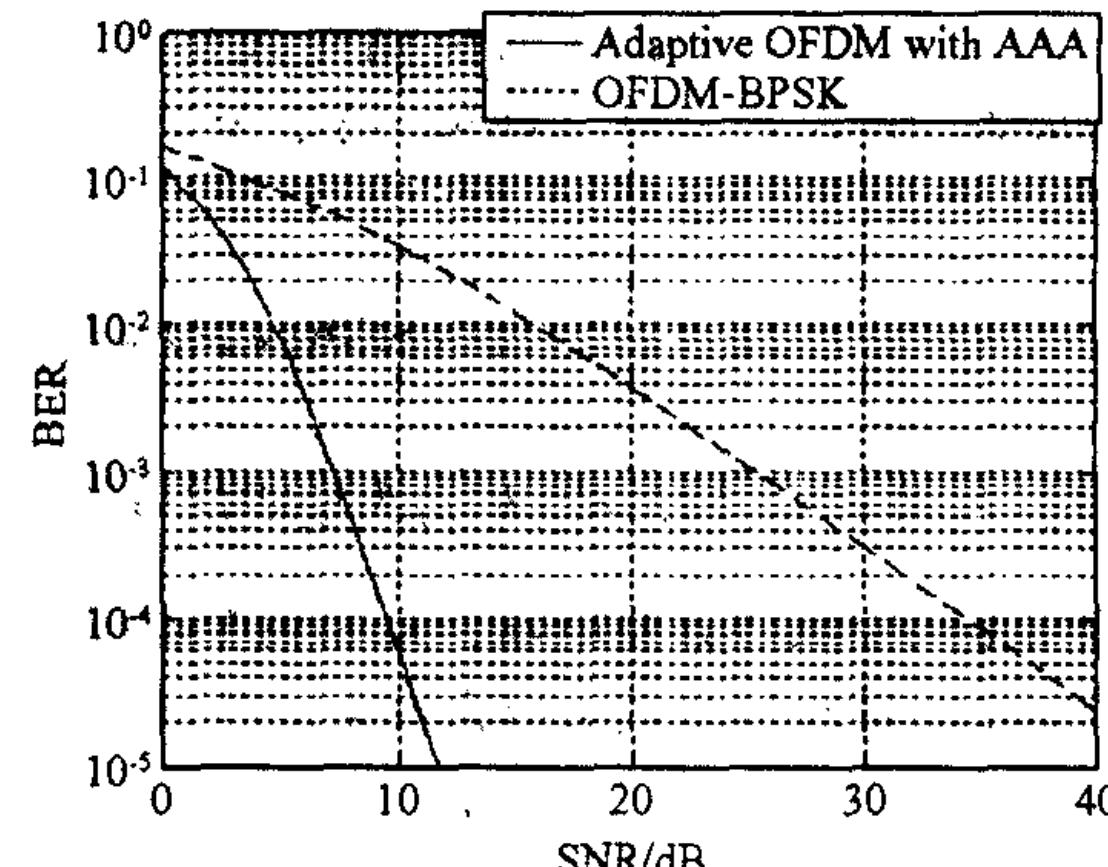


图 5 1bit/(s·Hz) 带宽利用率 OFDM 系统的误比特性能曲线

假设每个 OFDM 符号需要传输  $M$  比特的信息,  $m_{\Sigma}$  一般和  $M$  不相等。当  $m_{\Sigma}$  小于  $M$  时, 每个子载波上的

$m_i$  连续的增加到使得  $m_i - C_i$  最小; 当  $m_{\Sigma}$  大于  $M$  时, 每个子载波上的  $m_i$  连续的减小到使得  $C_i - m_i$  最小。

## 5 仿真结果及分析

本节利用计算机仿真对本文提出的采用自适应天线阵列的自适应 OFDM 系统和采用固定的调制方式单个天线接收的 OFDM 系统的误码率性能进行比较。

表 1 给出仿真中用到的参数。在仿真中假设期望用户发出的信号和不期望用户发出的信号同时到达接收端。接收端有较好的信道参数信息和理想的信道估值和同步。图 5 给出了带宽利用率为  $1\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  时采用自适应天线的自适应 OFDM 系统与传统的系统的误比特率(BER)随信噪比的仿真曲线。由图 5 可见, 在 BER 为  $10^{-4}$  的条件下, 采用自适应天线的自适应 OFDM 系统与传统的系统相比约有  $28\text{dB}$  的自适应增益。

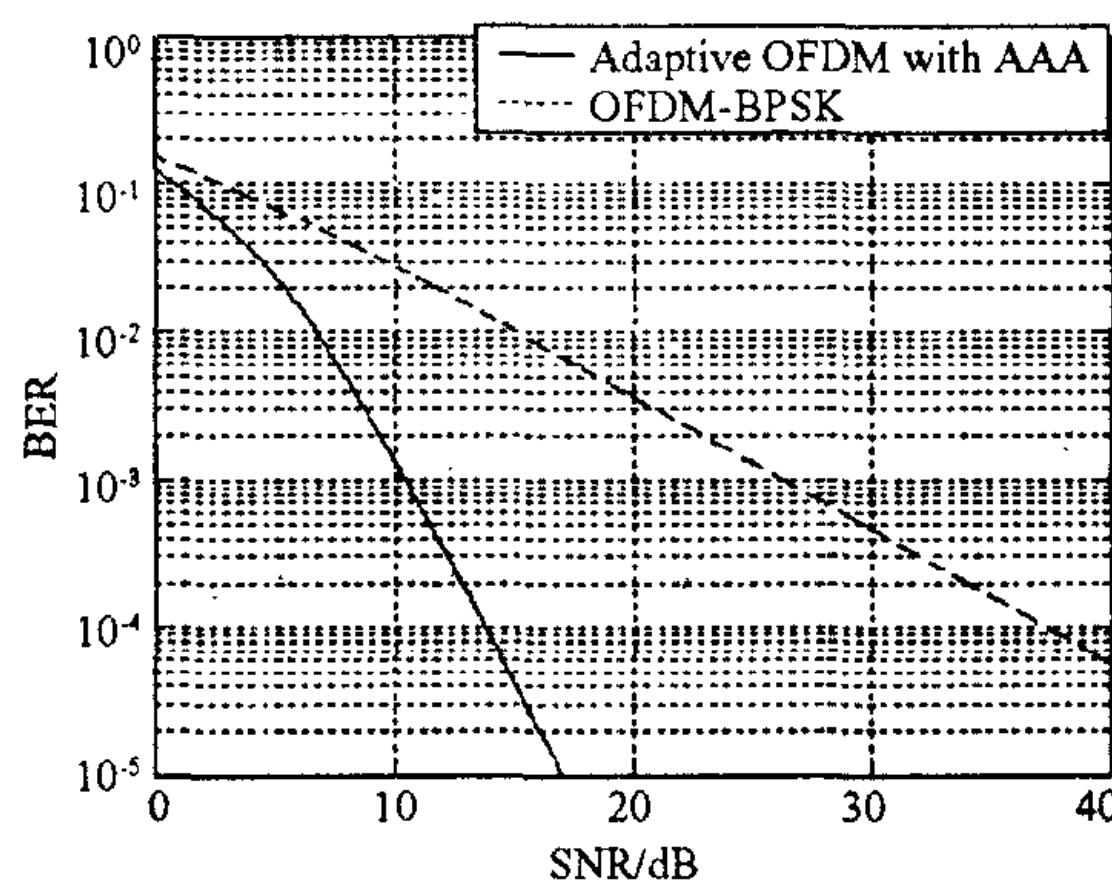


图 6  $4\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  带宽利用率 OFDM 系统的误比特率性能曲线

图 6 给出了利用率为  $4\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  时两个系统的 BER 仿真曲线。由图 6 可见, 在 BER 为  $10^{-4}$  的条件下, 采用自适应天线的自适应 OFDM 系统与传统的系统相比约有  $24\text{dB}$  的自适应增益。

## 6 结 论

自适应天线阵列技术和自适应调制技术是进一步增强 OFDM 系统抗衰落传输性能的有效技术。本文将两者结合起来, 从理论分析和数值分析来看, 在接受端采用自适应天线接收并根据信道的质量进行自适应的比特分配, 可以大大的提高 OFDM 系统的抗衰落性能。自适应天线与 OFDM 技术相结合必将成为未来 OFDM 的发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] Applebaum S P. Adaptive Arrays. *IEEE Trans. on AP*, 1976, 24: 585 – 598.
- [2] Van Nee R, Prasad R. *OFDM Wireless Multimedia Communication*. Artech House, Boston, London, October 1999.
- [3] Cimini L. Analysis and Simulation of a Digital Mobil Channel Using OFDM. *IEEE Trans. on Comm.*, 1985, 33: 666 – 675.
- [4] Munster M, Keller T. Co-channel Interference Suppression Assisted Adaptive OFDM in Interference Limited Environments. *Vehicular Technology Conference, VTC 1999 – Fall, IEEE VTS 50<sup>th</sup>*, 1999, 1: 284 – 288.
- [5] Vook F W, Baum K L. Adaptive Antennas for OFDM. In *Vehicular Technology Conference, IEEE*, 1998, 2: 606 – 610.
- [6] Li Y, Sollenberger N R. Adaptive Antenna Arrays for OFDM Systems with Co-channel Interference. *IEEE Trans. on Comms.*, 1999, 47: 217 – 229.

## 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>