

# 基于 HFSS 的智能天线自适应算法的研究

惠鹏飞, 夏颖, 苗凤娟, 陶佰睿

(齐齐哈尔大学通信与电子工程学院, 黑龙江省齐齐哈尔市 161006)

**摘要:**以 3G 基站系统智能天线阵列为研究对象, 在研究了常用智能天线自适应算法的基础上, 针对常用算法测向精度有限以及来波方向估计过程的复杂性等问题, 通过在接收机的输出端引入阵列导向矢量信号, 利用阵列导向矢量的特殊性质, 得出了一种改进后的自适应算法。采用该算法的智能天线阵列, 不仅具有较强的波束搜索能力和抗干扰性能, 而且不存在复杂的来波方向估计过程。最后通过对 8 元直线型智能天线阵列的 HFSS 仿真实验, 得出了 SINR、驻波比、方向图等特性曲线, 验证了该算法的可行性。

**关键词:**智能天线; 自适应算法; 阵列导向矢量; HFSS 仿真; 信干噪比; 方向图

**中图分类号:** TN820

## 0 引言

智能天线技术是 3G 系统的核心技术之一, 是当前无线通信领域研究的热点。智能天线除了能够大幅度提高系统容量和频谱利用率, 还具有良好的抗干扰性能, 它可以自适应地调整接收机天线的波束, 使天线方向图主波束对准期望信号, 零陷对准干扰方向。这样可以有效抑制干扰信号, 使其不能被接收机所接收<sup>[1-2]</sup>。智能天线研究的核心是自适应算法, 较普遍的算法有 MUSIC 算法、ESPRIT 算法等, 这些自适应算法, 都必须事先已知期望信号的准确方位信息, 而且方位误差必须低于门限值<sup>[3]</sup>。但在许多场合, 测向误差又是不可避免的, 测向算法的复杂性和测向误差之间形成了一对矛盾。

本文以 3G 基站系统智能天线为研究对象, 在对原有智能天线波束搜索算法研究的基础上, 通过引入阵列导向矢量信号, 利用阵列导向矢量信号的特殊性质, 有效地提高了算法的抗干扰性能及波束搜索能力, 利用电磁场设计平台 HFSS 对算法进行了仿真验证。

## 1 智能阵列天线波束基本原理

智能阵列天线在结构上已经采用了模块化设计, 大体分为天线阵列、模/数或者数/模转换、自适应处理器和波束形成网络 4 部分组成。假设天线阵列由  $M$  个全向阵元构成, 阵元  $m$  的位置矢量为  $r_m$ 。有一个窄带信号源从  $(\theta, \phi)$  的入射角到达天线阵列, 则在参考

点上接收到的信号为  $x(t) = s(t)e^{j\omega t}$ , 其中  $s(t)$  为信号的复振幅,  $\omega$  为信号的角频率。在阵元  $m$  上接收到的信号为<sup>[4,6]</sup>

$$x_m = s[t - \tau_m(\theta, \phi)] e^{j\omega[t - \tau_m(\theta, \phi)]} \quad (1)$$

式中:  $\tau_m(\theta, \phi)$  是阵元  $m$  相对于参考点的时延, 且有

$$\tau_m(\theta, \phi) = -r_m^T k(\theta, \phi) = \frac{2\pi}{\lambda} a(\theta, \phi) \quad (2)$$

式中:  $k(\theta, \phi)$  为波数矢量;  $a(\theta, \phi)$  为入射波的方向矢量, 对于窄带信号一般可以近似认为

$$s[t - \tau_m(\theta, \phi)] \approx s(t)$$

定义信号矢量为  $X(t)$ , 用复数矢量  $W$  表示权值,  $s(t)$  为阵列天线输出信号<sup>[4]</sup>。信号矢量  $X(t)$  由期望信号  $X_d(t)$ 、干扰  $X_i(t)$  和噪声  $X_n(t)$  3 部分组成。输出信号  $s(t)$  也由期望信号  $s_d(t)$ 、干扰  $s_i(t)$  和热噪声  $n(t)$  组成, 则有

$$s(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot w_i = X^T W = s_d(t) + s_i(t) + n(t) \quad (3)$$

如前所述, 入射到天线阵列上的期望信号为窄带信号, 且可以表示为

$$X_d = A_d(t) \exp\{j[\omega_d t + \Psi_d + \varphi_d(t)]\} U_d \quad (4)$$

式中:  $A_d(t)$  表示信号复振幅;  $\Psi_d$  表示相位的初值;  $\varphi_d(t)$  表示信号相位调制;  $U_d$  为期望信号的方向矢量。由式(3)定义天线阵的信号干扰噪声功率比(简称信干噪比)为:

$$\text{SINR} = \frac{P_d}{P_i + P_n} = \frac{\frac{1}{2} E[|s_d(t)|^2]}{\frac{1}{2} E[|s_i(t) + n(t)|^2]} = \frac{E[|W^T X_d|^2]}{E[|W^T X_i + W^T X_n|^2]} \quad (5)$$

收稿日期: 2010-08-05。

基金项目: 齐齐哈尔市科技局科研项目(GYGG-090011-2)。

可以依据最大 SINR 准则得出智能天线阵的稳态最优权值矢量为

$$W = \mu \Phi^{-1} U_d^* \quad (6)$$

式中:  $U_d^*$  表示  $U_d$  的共轭;  $\mu$  是比例常数;  $\Phi$  是信号的协方差矩阵。根据智能天线理论,天线的自由度和阵元数目存在相关性,自由度为阵元数目减 1。因此,只要阵的自由度大于干扰的数目,天线阵就可以在干扰方向形成方向图零点,这样可以保证接收机输出端的 SINR 最大,从而使阵列天线的抗干扰性能最佳。

## 2 基于导向矢量信号的波束搜索算法

### 2.1 波束搜索算法存在的问题

目前常用的超分辨 DOA 估计方法是 MUSIC 算法,属于特征结构子空间算法,是比较典型的智能天线算法。MUSIC 算法是以几何观点考查信号参数估计的问题,假设有  $K$  个信号入射到阵列上,则  $M$  元阵列接收到的输入数据向量可以表示为  $K$  个人射波形与噪声的线性组合<sup>[7-8]</sup>,即

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \alpha(\theta_k) S(t) + n(t) \quad (7)$$

式中:  $S(k) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)]$  是入射信号向量;  $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_k(t)]$  是噪声向量。通过前面分析知道,在求解式(6)的最优权值矢量时,必须有式(4)的假设条件。即必须先已知来波信号的方向矢量  $U_d$ ,工程上获得来波信号的方向矢量是通过测向方法得到。一般的测向算法通常运算量较大,测向精度也受到诸多因素的限制。在许多场合,测向误差又是不可避免的,测向算法的复杂性和测向误差之间形成了一对矛盾,测向误差如果超过门限值,将导致智能天线阵列无法正常工作,这是许多学者着力研究的问题。

### 2.2 阵列导向矢量信号的引入

导向矢量是阵列天线的所有阵元对具有单位能量窄带信源的响应。由于阵列响应在不同方向上是不同的,导向矢量与信源的方向是相互关联的,这种关联的独特性依赖于阵列的几何结构。对于同一性阵元阵列,导向矢量的每一元素具有单位幅度。它的第  $i$  个元素的相位与第  $i$  个阵元感应的信号及参考阵元感应的信号间的相位差相同。

导向矢量的协方差矩阵为

$$R_\alpha = E[\alpha(\theta)\alpha^H(\theta)] = \frac{1}{2\varepsilon_\theta} \int_{\theta_0-\varepsilon_\theta}^{\theta_0+\varepsilon_\theta} \alpha^H(\theta) d\theta \quad (8)$$

式中:  $\alpha(\theta)$  表示波达方向为  $\theta$  的信号对应的导向矢量。对  $R_\alpha$  进行特征值分解,即  $R_\alpha = U\Gamma U^H$ 。

我们将阵列导向矢量信号引入智能天线阵列系

统,对上述自适应算法稍作改进,构造如图 1 所示的自适应天线阵列。具体实现方法是,在接收机输出端的信噪比检测和自适应处理器之间引入阵列导向矢量信号  $V$ ,方向性因子  $X_v(t)$  和阵列导向矢量  $V$  的关系如式(9)。

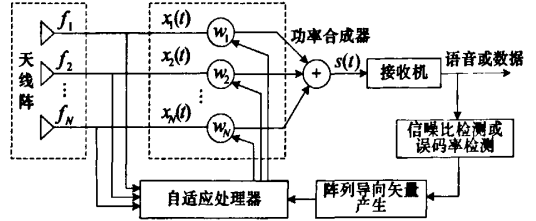


图 1 具有波束搜索能力的自适应阵

$$X_v(t) = A_v \exp[j(\omega_d t + \Psi_v + \varphi_v(t))] V \quad (9)$$

式中:  $A_v$  表示信号幅度,一般情况下为常数;  $V$  表示  $X_v(t)$  的方向性因子,即波束导向矢量。信号  $X$  既包括期望信号  $X_d(t)$ 、干扰  $X_i(t)$  和随机噪声  $X_n(t)$ ,也包括波束导向矢量信号  $X_v(t)$ ,  $X$  的表达式可以写为

$$X(t) = X_v(t) + X_d(t) + X_i(t) + X_n(t) \quad (10)$$

为了使算法更接近工程实际,假设系统的热噪声为功率为  $\sigma^2$  的随机过程,均值和互相关系数均为零。在此假设条件下,协方差矩阵  $\phi$  可以表示为

$$\phi = E(X^* X^T) =$$

$$A_v^2 U_v^* U_v^T + A_d^2 U_d^* U_d^T + A_i^2 U_i^* U_i^T + \sigma^2 I \quad (11)$$

这时,式(6)就可以写为

$$W = \mu \Phi^{-1} V^* \quad (12)$$

令  $A_v$  为高阶小量(取很小的值),这样可以使  $X_v(t)$  在天线系统输出端产生的功率  $P_v \ll P_i + P_n$ 。利用式(5)计算天线阵输出端 SINR 值,把式(12)、(11)代入式(5)就得到了  $X_v(t)$  在入射角度为  $\theta + m \times \text{step}$  时的天线阵输出端 SINR 值,step 为迭代步长。

为得到多点的 SINR 值,需要多次迭代运算,即变量  $m$  的取值依次加 1,重复上述计算过程,得到  $m+1$ 、 $m+2$  等时的 SINR 值,对应的入射角度为  $\theta + (m+1) \times \text{step}$ 、 $\theta + (m+2) \times \text{step}$  等。这样,最终依次得到区间  $[\theta, \theta + 2k\pi]$  内间隔步长为 step 的所有角度的 SINR 值。

## 3 算法的 HFSS 仿真验证及分析

### 3.1 算法抗干扰性能验证

SINR 曲线是衡量智能天线阵列抗干扰能力的最主要指标,为了验证文中所提出算法的抗干扰性能,我们对智能阵列天线进行了电磁仿真实验,程序运行环境为 HFSS,在 HFSS 环境下构建了 8 元直线型智能天线物理模型。在验证系统的抗干扰过程中,我们使用

在话音接收机输出端进行语音端点检测的方法检测是否出现最大 SINR。

为了得出智能天线阵系统输出端的 SINR 参数曲线,这里设定到达接收天线的期望信号为连续波信号,其角频率为  $\omega_d$ ,入射信号和天线阵列测射方向的夹角为  $\theta_d$ 。阵元之间相距为半波长(相对于频率  $\omega_d$ )。干扰信号频率为  $\omega_d$ 、入射角度为  $\theta_i$ ,迭代步长  $step$  尽量小,有利于提高运算精度,这里选择  $step = 0.5^\circ$ 。为了充分验证算法的抗干扰性能,我们在如下两种情况下得出两组 SINR 曲线。

1) 天线阵列为直线阵列,期望信号入射角度为  $-15^\circ$ ,干扰信号入射角度为  $85^\circ$ ,干扰功率与期望信号功率之比为 40 dB,假定噪声为窄带随机过程,仿真计算所得的 SINR 参数曲线如图 2 所示。

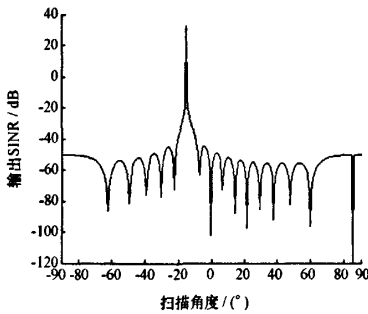


图 2 试验 1 SINR 曲线图

2) 天线阵列为直线阵列,期望信号入射角度为  $25^\circ$ ,干扰信号入射角度为  $75^\circ$ ,干扰功率与期望信号功率之比为 60 dB。仍然假定噪声为窄带的随机过程,仿真计算所得的 SINR 参数曲线如图 3 所示。

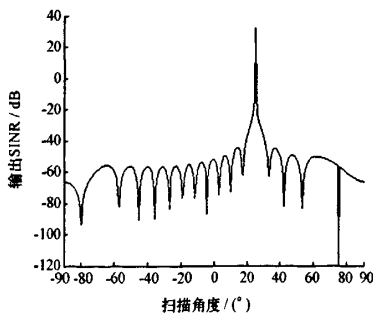


图 3 试验 2 SINR 曲线图

通过仿真曲线可以看出,两组 SINR 曲线图均出现一个很尖锐的最大峰值,该峰值正好对应来波方向(期望信号方向),这说明该智能天线系统能够搜索到来波方向,改进后的自适应算法是可行的。当在输出端出现最大 SINR 值时停止迭代,此时,自适应阵的主波束就对准了期望信号的方向。最大值波峰非常尖锐(一般高于其他值达 50 ~ 60 dB 左右),天线的方向性

良好。

### 3.2 算法波束搜索性能验证

在 TD-SCDMA 系统的 SDMA(空分多址)技术中,要求天线阵列方向图的主瓣自适应地对准 MS(移动台),控制系统一般采用具有高速数据运算能力的 DSP 芯片实现。为了验证智能天线对 MS 的波束搜索能力,即天线系统对 MS 的捕获能力,利用 HFSS 建立了基于上述自适应算法的天线物理模型,定义了天线体的材料参数,设置了电磁场边界条件和激励源,利用 HFSS 提供的宏定义优化天线的尺寸,天线单元采用印刷振子的结构,通过微带网络进行互联。通过数据后处理得到方向图、近远场增益方向图、S 参数、VSWR(通带内驻波比)等特性曲线,分别如图 4 ~ 图 7 所示。

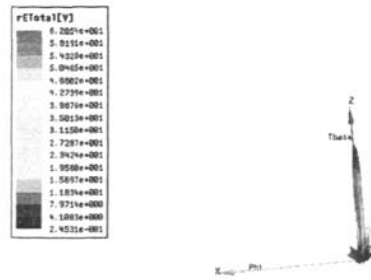


图 4 全向电场方向图

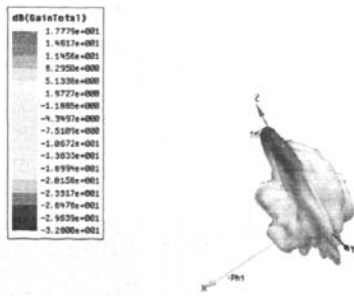


图 5 全向增益方向图

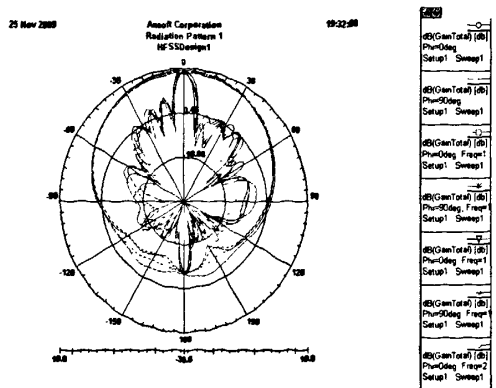


图 6 S 参数曲线

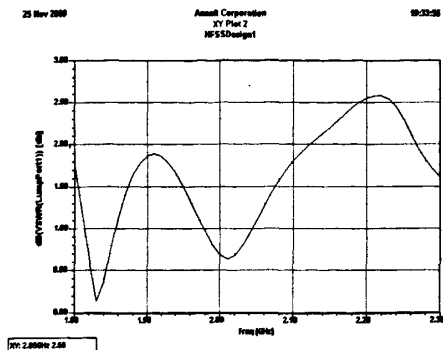


图7 VSWR曲线

对于阵列天线系统的波束搜索能力,我们可以通过分析天线系统的全向方向图、主瓣宽度、方向性等参数来判断。通过上述仿真曲线可以看出,主瓣方向上电场强度  $E$  的最大值可达 62 V,最大增益约为 18 dB,可以实现远距离覆盖。主瓣宽度非常窄,方向性非常强,配合 DSP 控制器,可以对 MS 等目标进行有效探测和追踪,实现 SDMA,  $VSWR < 1.5$ ,反射系数  $S_{11} < -25$  dB,可以满足实际天线工程需要。

#### 4 结束语

本文以 3G 基站系统智能天线技术为研究背景,对智能天线自适应波束搜索算法进行了深入研究,针对波束搜索中的来波方向估计复杂性以及运算量大等问题,对智能天线自适应算法进行了改进,通过阵列导向向量信号的引入,使自适应阵列具有了波束搜索能力,简化了来波方向估计过程。利用电磁场设计平台

HFSS 对算法进行了验证,通过仿真结果可知,该自适应算法具有较强的抗干扰能力和波束搜索能力,是行之有效的智能天线自适应算法。

#### 参考文献

- [1] 王靖,施钢,李娟. 一种基于自适应阵列天线的波束赋形算法[J]. 电讯技术,2007,4(47):138-142.
- [2] KIM W, HANSEN J H L. Feature compensation in the cepstral domain employing model combination[J]. Speech Communication,2009,51(2):83-96.
- [3] 吴宏瑞,惠晓威,姜仑. 移动通信中智能天线技术的研究[J]. 通信技术,2009,5(42):265-268.
- [4] 李斌,黄张裕. 自适应抗干扰 GPS 智能天线的算法和仿真[J]. 测绘通报,2009(10):9-11.
- [5] LI J H. Study of adaptive antenna array for GPS interference mitigation[D]. Master's thesis, National Cheng Kung University, 2005:102-110.
- [6] 王丽娜,王兵. 一种新的卫星智能天线自适应波束形成算法[J]. 电讯技术,2009,4(49):97-102.
- [7] RIPA H, LARSSON M. A software implemented receiver for satellite based augmentation systems: an enhancement to global navigation satellite systems[J]. Master's thesis, Department of Computer Science and Electrical Engineering, Luleå University of Technology, 2005,6(28):52-66.
- [8] AKOS D M. A software radio approach to global navigation satellite system receiver design [D]. Ph. D. dissertation, Ohio University, 1997,12(56):198-207.

惠鹏飞(1980-),男,讲师,硕士,研究方向为雷达极化信息处理,微波无源器件及电路设计。

## Research of Smart Antenna Adaptive Algorithm by HFSS

HUI Pengfei, XIA Ying, MIAO Fengjuan, TAO Bairui

(School of Communication and Electronic Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** With 3G base station smart antenna array system as the research objective, based on the researches of common smart antenna adaptive algorithms, in order to solve the problems of the estimation error of DOA and the complexity of the algorithm, this paper introduces the array steering vector signal to the receiver output. Using the properties of the array steering vector, an improved adaptive algorithm is obtained. The smart antenna array using this algorithm not only has better beam search capabilities and anti-jamming performance, but also has no complex DOA estimation. Finally, the HFSS simulation for the 8-units linear smart antenna array is carried out, producing SINR, VSWR, directional pattern, etc. The feasibility of the algorithm is verified.

**Keywords:** smart antenna; adaptive algorithm; array steering vector; HFSS simulation; SINR; directional pattern

## HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

### 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，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

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



### 更多 HFSS 视频培训课程:

#### ● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

#### ● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

#### ● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

#### ● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

## 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相关培训课程和 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讲授,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>