

# OFDM 系统智能天线设计中的波束综合算法

梁奂晖<sup>1</sup>, 肖明明<sup>2</sup>

(1. 中山大学 电子与通信工程系 广东 广州 510275; 2. 仲恺农业技术学院 信息工程系 广东 广州 510225)

**摘要:**基于自适应天线阵列理论,提出了一种新的可以应用于任意类型天线阵列的波束综合算法。根据与给定的参考波束的误差,引入虚拟干扰的概念,对目标波束图形形状进行调整。应用本文提出的新算法,在主瓣和旁瓣位置都可以对波束进行有效的调节。最终获得阵列的最优权矢量,能够最小化目标波束图与参考波束图间的差异。理论分析与仿真结果表明与现有的同类算法相比,本算法能更有效地获得与参考波束基本相符的波束。在设计应用于 OFDM 智能天线系统时,通过对不同子载波频率上信号进行单独处理,利用该算法,进行波束综合,能够在整个有效频段,所有子载波上获得基本一致的阵列输出。

**关键词:**波束综合; 自适应天线阵列; 虚拟干扰; OFDM; 宽带频不变智能天线

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1004-373X (2005) 17-005-04

## A New Pattern Synthesis Algorithm Using for the Design of OFDM Smart Antenna

LIANG Huanhui<sup>1</sup>, XIAO Mingming<sup>2</sup>

(1. Department of Electronics & Communication Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China;

2. Department of Information Engineering, Zhongkai Agrotechnical College, Guangzhou, 510225, China)

**Abstract:** Based on adaptive array theory, a new pattern synthesis algorithm for arbitrary arrays is presented. According to the differences between the synthesized pattern and the reference pattern, artificial interferers are introduced to adjust the pattern shape. The proposed algorithm can control the pattern shape in both the mainlobe and sidelobe regions, and obtain an optimal array weight vector that can minimize the difference between patterns. Comparison with the other algorithms, the new method can obtain a synthesized pattern that is the same as the reference pattern. In the designing of smart antennas for OFDM system, with the proposed algorithm, a constant pattern can be obtained over the different subcarriers. A frequency-invariant beamforming could be obtained.

**Keywords:** pattern synthesis; adaptive array; artificial interferers; OFDM; frequency-invariant smart antenna

## 1 引言

随着移动通信技术的发展,宽带无线通信技术受到广泛的关注。其中正交频分复用 (OFDM) 技术已经被公认为下一代无线通信系统中的核心技术。

为了进一步提高 OFDM 系统性能,降低干扰,人们引入了智能天线技术<sup>[1]</sup>。

智能天线通常又称为自适应天线,因为他具有适应多变信号环境的能力且能在这些信号环境中使信号得到优化。在无线通信中,智能天线带来的增益包括减小信号干扰、提高信号连接质量、增加系统容量等作用。

现在的智能天线系统大多数是窄带系统,也就是说假定入射信号是单频信号,信号能量都集中于中心频率。而宽带无线通信技术的发展,新一代无线通信系统将会是高速、宽带系统,这种单频信号的假设将不再合适。这时需

要考虑入射信号频率对天线阵列输出的影响。

在 OFDM 系统中,相同入射角,但位于不同子载波的入射信号,由传播时延引起的相位差也不同。因而有必要针对不同的子载波,求解出不同的阵列权矢量。现有的针对 OFDM 系统的智能天线,大多是对各个子载波单独采用现有的窄带算法优化,对导频信号的要求较高,需要使用较多的子载波作为导频信道,频谱利用效率不高。

为了提高 OFDM 系统的频谱利用率,本文利用中心子载波作为导频信道,求出一个最优权矢量,得到的波束作为参考波束。

在其他子载波上,则是利用一种新的波束综合算法,以根据参考波束,分别获得一个最优的阵列权矢量,得到跟参考波束基本一致的目标波束。从而使在整个有效频段范围内阵列的输出基本一致。

新的波束综合算法是基于自适应天线阵列理论,通过引入适当强度的虚拟干扰,调整阵列权矢量,使得目标波束趋向于参考波束。与其他同类的基于自适应天线理论的波束综合算法相比<sup>[2,3]</sup>,该算法能获得一个与参考波束最

收稿日期: 2005-05-09

项目基金: 广东省自然科学基金资助课题 (036593)

万方数据

为接近, 差异最小的目标波束。而这一点, 在 OFDM 系统的智能天线设计中, 有着重要的意义。

## 2 算法描述

### 2.1 OFDM 智能天线系统结构

在以往文献中所提到的 OFDM 智能天线, 往往是对各个子载波单独处理, 将子载波当作独立的窄带智能天线系统。而这种做法, 需要大量的导频信息, 导致系统的频谱利用率下降<sup>[4]</sup>。

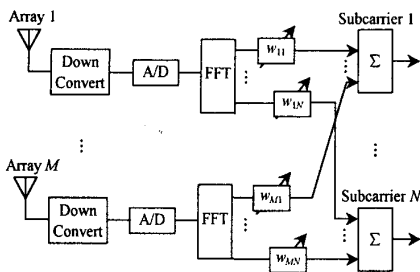


图1 OFDM 智能天线结构

在本文中, 只需要对中心子载波  $f_0$  采用窄带智能天线算法。得到一个参考波束:

$$P_r(\theta) = |V(f_0, \theta)' W_k(f_0)|$$

而其他子载波则是根据参考波束, 应用文中提出的波束综合算法, 求出一个响应的阵列权矢量。

### 2.2 波束综合算法

为了能够获得跟中心子载波一致的目标波束, 本文提出了一种新的波束综合算法, 分别应用于不同子载波。

本文所提出的算法, 就是基于自适应阵列理论, 通过引入虚拟干扰, 最小化目标波束与参考波束间的差异在整个入射角范围的平方加权, 如公式 (1) 所示, 对目标波束形状进行调整。

$$E = \sum_{m=1}^M f(\theta_m) (V'(f_s, \theta_m) W(f_s) - P_r(\theta_m))^2 \quad (1)$$

式中:  $V(f_s, \theta_m) = [g_1(\theta_m)e^{j\phi_1(\theta_m)}, \dots, g_N(\theta_m)e^{j\phi_N(\theta_m)}]'$  为阵列的导向矢量, 其中“ $'$ ”代表了共轭转置运算;

$g_i(\theta)$  为阵元  $i$  的波束;

$P_r(\theta)$  表示了参考波束, 而  $f(\theta_m)$  则是不同入射角  $\theta_m$  上引入的虚拟干扰强度, 是阵元间的相位差。  $m=1, 2, \dots, M$  表示了入射角的下标。

本文所提出的波束综合算法, 在第  $s$  个子载波中, 就是为了找出一个最优的阵列权矢量  $W(f_s)$ , 使得  $E$  最小。为了能够有效地根据参考波束图, 调整目标波束在主瓣和旁瓣范围的形状, 本文引入了新的虚拟干扰。其中虚拟干扰  $f(\theta_m)$  的迭代更新变化在很大程度上取决于目标波束与参考波束间在入射角  $\theta_m$  上的差异。

$$f_{k+1}(\theta_m) = \begin{cases} f_k(\theta_m), & |P_k(\theta_m) - P_r(\theta_m)| \leq \epsilon_m \text{ 且 } \theta_m \text{ 在主瓣范围} \\ f_k(\theta_m) + K_m |P_k(\theta_m) - P_r(\theta_m)|, & |P_k(\theta_m) - P_r(\theta_m)| \geq \epsilon_m \text{ 且 } \theta_m \text{ 在主瓣范围} \\ \max \left\{ 0, \left[ f_{k+1}(\theta_m) + K_p f_k(\theta_m) \frac{P_k(\theta_m) - P_r(\theta_m)}{P_r(\theta_m)} \right] \right\}, & \theta_m \text{ 在旁瓣范围} \end{cases} \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $k$  表示了迭代次数。而  $K_p$  和  $K_m$  是迭代常数。  $P_k(f_s, \theta) = |V(f_s, \theta)' W_k(f_s)|$  是在子载波  $s$  上通过本算法在第  $k$  次迭代中所获得的目标波束。定义:

$$F_k(\theta) = [\text{diag}(f_k(\theta_i))]_{M \times M} \quad (3)$$

$$V = [V'(f_s, \theta_1); V'(f_s, \theta_2); V'(f_s, \theta_3); \dots; V'(f_s, \theta_M)]$$

$$P = [P_r(\theta_1), P_r(\theta_2), P_r(\theta_3), \dots, P_r(\theta_M)]$$

基于自适应阵列理论, 可以得到相对应于第  $s$  子载波的阵列权矢量  $W(f_s)$  的迭代表示式:

$$W_{\text{opt}}(f_s, k) = R_s^{-1}(k) R_d(k) \quad (4)$$

公式 (4) 中的  $R_s$  是协方差矩阵,  $R_d$  是互相关矢量, 在第  $k$  次迭代中, 两者分别定义如下:

$$R_s(k) = \sigma^2 I + VF(k) V'$$

$$R_d(k) = VF(k) P \quad (5)$$

为了保证协方差矩阵可求逆, 对该矩阵加上一小数值  $\sigma^2$ , 可以看出  $W_{\text{opt}}(k)$  的取值取决于  $F(k)$ 。也就是说虚拟干扰直接影响到阵列权矢量。只有在获得一个最佳权矢量, 使得目标波束与参考波束间的差异最小时, 该算法的迭代过程才会结束。

在此算法中, 由式 (2) 可以看出, 虚拟干扰的强度取决于目标波束与干扰波束间的差值。适当的虚拟干扰, 可以达到控制目标波束形状, 使其趋向参考波束的目的。与其他基于自适应阵列理论的波束综合算法<sup>[5,6]</sup>相比, 本文所提出的算法不仅能够控制主瓣形状, 对于在旁瓣范围的波束形状也可以精确控制。也就是说任意给定一个参考波束, 通过本算法, 将可以获得与参考波束基本一致的目标波束。使得:

$$|V(f, \theta)' W(f)| = P_r(\theta) \quad (6)$$

对于应用于 OFDM 系统的智能天线, 不同子载波上的处理可以单独并行进行。使用本文所提出的波束综合算法能够获得一组权矢量, 使得对所有子载波而言, 阵列输出基本一致, 组成了一个宽带频不变智能天线结构。这种设计思想可以极大地简化 OFDM 系统宽带智能天线系统的计算复杂性, 提高系统性能, 能提高系统的频谱利用效率。

在以往文献所提出的应用于 OFDM 系统的智能天线, 多数是对子载波单独进行处理, 需要大量的导频信息。为了提高系统的频谱利用效率, 只需要采用一个子载波作为导频信道, 来获得参考波束, 而其他子载波上的最优权矢量只需要应用本文所提出的算法就可以获得了。这样可以在 OFDM 系统的有效频带内获得一个不随频率而变化的输出波束。

为了验证算法的有效性,在文中提供了多个仿真例子加以说明。

3 仿真结果与讨论

本文列举了几个不同的仿真结果,对该算法的有效性进行验证。从算法中阵列的导向矢量 $V(\theta_m)$ 中可以看出,该算法可以应用于任意阵元组成的天线阵列。为了简单起见,在本文的仿真中,假定阵元是各向同性。而虚拟干扰的迭代常数 $K_p=30$ ,  $K_m=300$ ,在旁瓣和主瓣上的初始强度值都设为单位值。

在第一个仿真例子中,选择一个与文献[5]中一致的参考波束,进行波束综合的天线阵列由15个各向同性的阵元因子组成,为了简单起见,假定阵元间是等距的,间隔为入射波波长 $\lambda$ 的一半。参考波束在主瓣范围具有特定波束形状,在旁瓣范围强度值为-20 dB,如图2中实线所示。而虚线所示曲线就是利用本文所提出的算法,根据参考波束,进行波束综合而最终得到的目标波束。可以看到在主瓣范围波束形状与参考波束一致,在旁瓣范围,目标波束围绕着参考值振荡,在两者之间差异的绝对值可以根据实际需要设定,令其小于一个值 $\epsilon$ 。

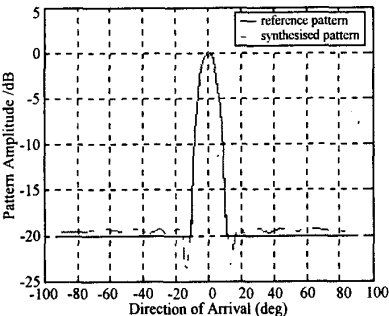


图2 仿真实例1

如果给定一个参考波束,其主瓣和旁瓣范围内的波束形状如图3所示。对一个18个阵元组成的均匀分布的直线阵列进行波束综合,阵元间隔取为 $\lambda/3$ 。使用本迭代算法,获得的目标波束如图3所示。可以看到,随着迭代次数的增加,在任意入射角 $\theta$ ,目标波束与参考波束间的差异逐渐缩小。

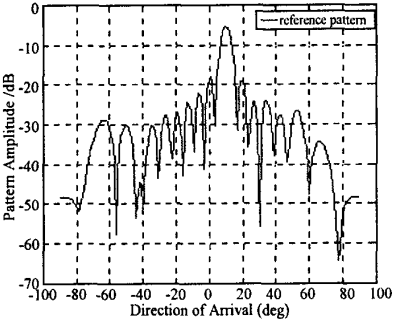


图3 参考波束

由图4可以知道,根据目标波束与参考波束之间在

不同入射角 $\theta_m$ 的差异,按照公式(2),调整在 $\theta_m$ 上入射的虚拟干扰强度,对目标波束形状进行控制,就可以使得目标波束逐渐趋向于参考波束。

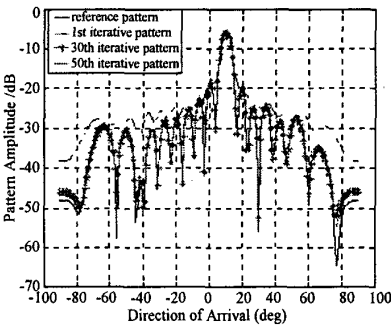


图4 不同迭代次数下的目标波束

与其他同类型的,基于自适应天线阵列理论的波束综合算法相比较<sup>[6,7]</sup>,可以看出本算法可以更快地获得与参考波束差异最小的目标波束。图5所示曲线就是应用不同的波束综合算法,在不同迭代次数时,目标波束与参考波束间差异的加权平方和 $E$ ,如公式(1)所示。图中对 $E$ 进行了归一化处理。

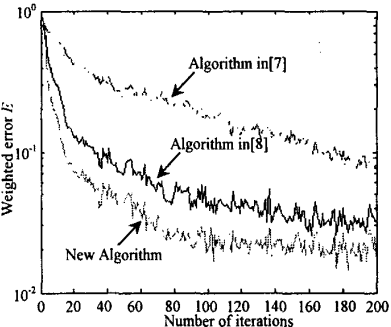


图5 不同算法的收敛性比较

由图5所示曲线可以知道,使用本文所提出来的波束综合算法,算法更快地收敛于一个更小的值。也就是说,当算法迭代结束,3种算法中都获得一个最优权矢量,得到一个最终的目标波束。但是相比较而言,新算法获得的波束与参考波束间差异最小。相同的迭代次数下,本算法也优于其他两种算法。因而可以获得与参考波束最为接近的目标波束。而这样的性质,对于新型的宽带频不变智能天线系统的设计显得尤为重要。在宽带OFDM系统中通过在不同子载波上,根据参考波束,分别应用该算法,就可以获得响应的阵列权矢量 $W(f)$ ,而得到跟参考波束基本一致的目标波束,总而言之,就是能够在OFDM系统的有效带宽内,智能天线阵列的输出将不会随载波频率的变化而变化,可以有效地提高OFDM系统的性能。

在仿真中,假定OFDM系统带宽为20 MHz,工作于2.4 GHz,子载波数 $s$ 为40,由20个各向同性阵元组成的等间距直线阵列,间隔为中心子载波波长的一半。中心子载波频率为 $f_{10}=2.4 \times 10^3 + 10 \times 20/40$  MHz。应用本文算

法,可以得到不同的子载波的输出,如图6所示。

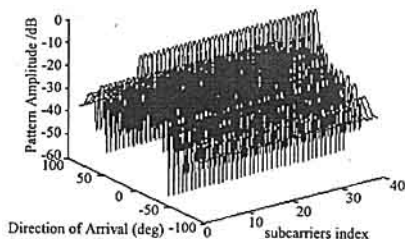


图6 不同子载波的阵列输出

## 4 结 语

为了降低OFDM系统中智能天线系统的复杂性,提高系统的频谱利用率,基于自适应天线阵列理论,提出了一种波束综合算法,应用在子载波阵列信号的处理。该综合算法,能够更准确地调节在不同入射角度上引入的虚拟干扰的强度,使得在整个主瓣和旁瓣范围,都能够根据参考波束形状与目标波束间的差异,对目标波束进行调整。从而获得与参考波束最为接近的目标波束。该算法对于宽带频不变智能天线系统的设计,乃至应用于OFDM系统的智能天线系统设计,都有着重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Hua, Li Ye. Clustered OFDM with Adaptive Antenna Arrays for Interference Suppression [J]. Wireless

Communications, IEEE Transactions. 2004, 3 (6): 2 189 - 2 197.

- [2] Joseph C Liberty, Theodore S Rappaports. Smart Antennas for Wireless Communications: IS95 and Third Generation CDMA Application, Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] Olen C A, Compton R T. A Numerical Pattern Synthesis Algorithm for Arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. 1990, 38: 1 666 - 1 031.
- [4] Jia Yunjian, Hara S. Virtual Subcarrier Assignment with Multiple Subcarrier Puncturing for Spatial Filtering of OFDM Signals; The 2004 Joint Conference of the 10th Asia-Pacific Conference. 2004, 2: 937 - 941.
- [5] Ching-Yih Tseng, Lloyd J Griffiths. A Simple Algorithm to Achieve Desired Patterns for Arbitrary Arrays [J]. IEEE Trans. Signal Processing. 1992, 40 (11).
- [6] Zhou Yuanping, Ingram M. Pattern Synthesis for Arbitrary Using an Adaptive Array Method [J]. IEEE Trans. Antennas Propagate. 1999, 47: 862 - 869. et al.
- [7] Guo Q, Liao G, Wu Y. Pattern Synthesis Method for Arbitrary Arrays Based on LCMV Criterion [J]. IEEE Electronics Letters, 2003, 39 (23).
- [8] Zhou Yuanping, Ingram M, Anderson P D. Synthesis of Minimax Sidelobes for Arbitrary Arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. 1998, 46: 1 759 - 1 760.

**作者简介** 梁奕晖 男, 1977年出生, 中山大学电子与通信工程系博士研究生。主要研究方向为波束综合技术, 智能天线技术。

肖明明 男, 1972年出生, 毕业于中山大学电子与通信工程系, 获通信与系统专业硕士学位, 现于仲恺农业技术学院信息工程系任教。主要研究方向为时空域信号处理及无线系统纠错等。

(上接第4页)

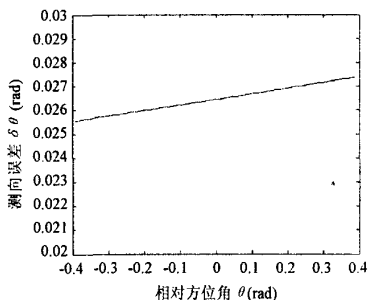


图4 电扫描恒差比幅的误差曲线

## 3 结 语

就比幅测向体制而言,信号到达角度(AOA)的测量实际上是靠各对应相邻天线接收通道对信号幅度的检测提取来完成的,从图4可知,其测向精度主要取决于各天

线通道的一致性以及对信号幅度提取测量的精确度和处理方法的科学性。

## 参 考 文 献

- [1] Butler J L. Multiple Beam Antennas. Internal MEMO RF 3849, Sanders Associates, Nashua, NH, 1960.
- [2] Gregoire D G, Singletary G B. Advanced ESM AOA and Location Techniques [J]. Aerospace and Electronics Conference. Proceedings of the IEEE 1989 National, 1989, 2, 22-26: 917-924.
- [3] 管振辉, 张冰. 电扫描恒差比幅测向体制侦察机天线方位图数据的自动定制 [J]. 华东船舶工业学院学报 (自然科学报), 2001, 15 (1): 13-16.
- [4] 陆志宏. 电扫描恒差测向体制中方位的计算方法 [J]. 舰船电子对抗, 1994, (6): 17-23.

**作者简介** 赵振才 男, 1964年出生, 工程师。主要研究方向为电子对抗技术与作战指挥。

林志远 男, 1969年出生, 博士。主要研究方向为电子对抗理论与技术。

## 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>