

文章编号 1005-0388(2003)03-0286-04

# HF 零位天线系统及其算法<sup>\*</sup>

陈 健 李建东 裴昌幸 杜武林

(西安电子科技大学通信工程学院, jianchen@mail.xidian.edu.cn, 陕西 西安 710071)

**摘要** 介绍了一种三元阵 HF 零位天线系统的设计。系统采用分时采样单通道检测技术代替传统的多通道检测技术,解决了困扰开环系统中通道失配的难题。对系统的关键技术:鞭环组合天线、检测通道、信号处理平台、分时采样技术进行了讨论。实验表明,利用 MUSIC 测向算法以及最小化干扰信号算法,系统能有效地抑制干扰。

**关键词** HF 零位天线, 抗干扰算法, 空间谱估计

**中图分类号** TN973.3      **文献标识码** A

## The design and algorithm of a HF nulling antenna system

CHEN Jian LI Jian-dong PEI Chang-xing DU Wu-lin

(School of Communication Engineering, XiDian University,

jianchen@mail.xidian.edu.cn, Xi'an Shanxi 710071, China)

**Abstract** This paper presents a technique for designing a three-array HF adaptive nulling antenna system. The mono-channel scheme is adopted in this system to solve the multi-channel mismatch problem. The key technology for the whip-loop antenna, receiver, signal-processing platform and time-division is described in detail, respectively. With the multiple signal classification (MUSIC) algorithm and open-loop and close-loop adaptive method, it is shown from the experiment results that the HF adaptive antenna system can suppress interference efficiently.

**Key words** HF nulling antenna, interference rejection algorithm, spatial spectrum estimation algorithm

## 1 引言

零位天线系统是一电子系统,它由阵列天线和相应的信号处理系统构成,是一种空间域的抗敌方有意干扰和其它电台无意干扰的重要手段,只要干扰信号的来向与有用信号的来向不同,自适应零位天线技术就能有效地发挥作用、消除干扰信号的影响,这种抗干扰是其它抗干扰方法所不能替代的,是它们的重要补充。并且这种方法在应用时不需要对电台作改动,因此是一种很有前途的抗干扰技术。

## 2 系统组成

图 1 示出了 HF 波段工作的零位天线系统组成

框图<sup>[1,2,6]</sup>, 它是由组合天线阵、主检测通道、辅助检测通道、取样电路、信号处理控制单元和复数加权网络等几部分组成。其基本原理是:由天线阵接收到有用信号和干扰信号,经主检测通道送入取样电路,再送入数字信号处理控制单元,根据所选用的算法准则计算出信号来向,人工选择干扰来向,并由信号处理控制单元控制复数加权网络使干扰来向为零陷波值,从而对干扰信号进行抑制。

本系统硬件设计的主要特点有:

1) 鞭环组合天线阵

阵列天线采用鞭天线和两互相垂直环形天线构成的组合天线,其中鞭天线为主天线,也是电台的发

\* 收稿日期:2002-07-27.

基金项目:国家部委电子预研项目资助(31.5.4.4)

射天线。采用鞭环组合天线阵的目的,一是减小天线阵的几何尺寸,另外也希望展宽工作频带以适应跳频工作的要求。

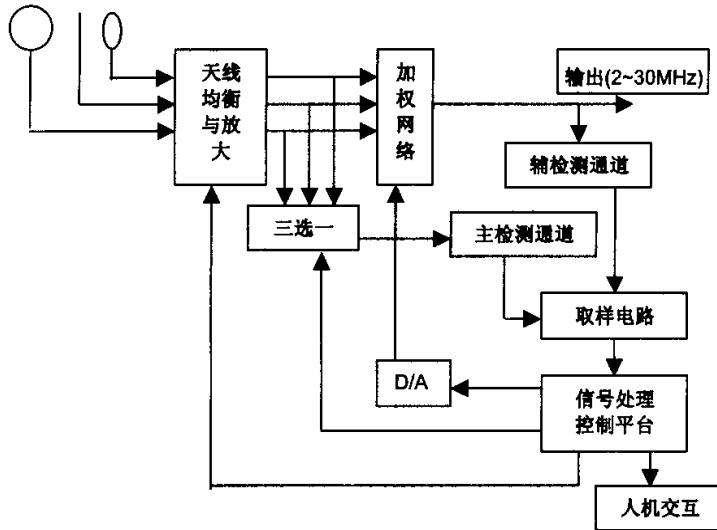


图1 系统的组成框图

### 2) 主、辅检测通道

三根天线应有三个接收通道,但由于本系统的波段系数较大,空间临近干扰信号很多,导致多通道接收机电路较为复杂,并且开环自适应算法要求系统的多个通道性能保持高度一致,所以本系统将三通道接收机改为分时工作的单通道接收机,即图1中的主检测通道,这样可以简化系统、消除通道失配、提高系统性能。根据通信情况下的复杂信号环境,主要是缺乏干扰信号与有用信号的先验信息,该系统采用了两种基本控制算法:一种是基于闭环控制的最小均方误差(LMS)和功率反演算法(PI);另一种是基于开环控制的来向估计和去干扰算法以确定信号来向DOA,同时去除干扰。前者精度高,系统误差影响小,但对通道的一致性和权值控制精度要求较高;后者收敛速度快,两种算法结合在一起,可以发挥各自优点,满足设计要求。

### 3) 信号处理平台

系统利用TMS320C31数字信号处理器为核心构建了信号处理平台,它是系统的核心,完成对中频信号采样及对采样信号处理,计算出加权网络的加权值,并给出相应的模拟权值,同时协调系统的工作(如控制频率合成器、波段选择等),提供人机交互功能。

### 4) 分时取样技术

在计算信号的来向时需要构造相关矩阵,采用分时取样方案后,在一个时刻只能得到一路信号的数据,显然不能做到两信号的相关,为此在设计时应合理的选择取样周期、分时时隙和信号之间的关系,保持在时分取样中保持信号的相关性。本系统对信号的采样是在 $f_s = 1.5\text{MHz}$ 的中频上进行的,并采用欠采样技术,为满足上述要求,选取采样频率 $f_s = 4f_0/299$ ,分时时隙频率 $f_{TS} = f_s/40$ 。

## 3 系统中的算法

要实现自适应零位天线的效果,通常需要以下两个步骤:采用某种算法对天线阵接收的信号进行分析,获得信号来向(DOA)信息;应用波束形成技术,根据获得的DOA对天线阵进行复加权,使天线方向图的主瓣对准所需的信号,在干扰来向上形成零陷。上述两个步骤是相辅相成的,共同影响系统的性能。为此,需要选择合适的算法。

### 3.1 信号来向角的计算

对信号来向角估算的算法要求是高速、高分辨率、高精度,而空间谱估计作为一种获取信号空间参数(方向、位置等)技术,应用领域日趋广泛,本系统采用常用的多信号分类(Multiple Signal Classification,即 MUSIC)算法来获取信号的来向<sup>[3~5]</sup>。

假设天线阵列为 $M$ 元,空间共有 $D$ 个信号源,

并设系统噪声为零均值、 $\sigma_n^2$  方差的白噪声。对阵列输出  $X$  求自相关矩阵  $R_{xx}$  有：

$$R_{xx} = E\{x(t), x^H(t)\} = AR_s A^H + \sigma_n^2 I \quad (1)$$

式中： $R_s = E\{s(t), s^H(t)\}$ ，只考虑信号源为互不相关的情况，此时  $R_{ss}$  为对角阵，对角线元素即为各信号的功率。 $A$  为方向矩阵， $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_D)]$ ， $a(\theta_k)$  为天线的方向矢量， $\theta_k$  为第  $k$  个信号源与天线阵法线方向的夹角。

对式(1)作特征分解，其各特征值及其相对应的特征向量分别为

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_D \geq \lambda_{D+1} = \dots = \lambda_M = \sigma^2 \quad (2)$$

$$V_1, V_2, \dots, V_D, V_{D+1}, \dots, V_M \quad (3)$$

1) 自相关矩阵  $R_{xx}$  的最小特征值等于  $\sigma^2$ ，且多重度为  $M-D$ ，由此可得信号源的个数为  $D$  个，又

由于噪声向量对应的特征值的最小重数为 1，因此测向时最多可测得信号源的数目为  $N-1$  个。

2) 根据特征值对应的特征向量，可把与信号特征值对应的方向向量组成的空间称为信号子空间，记为  $\text{span}\{V_1, V_2, \dots, V_D\}$ ；把与噪声特征值对应的向量组成的空间称为噪声子空间，记为  $\text{span}\{V_{D+1}, \dots, V_M\}$ 。因此，自相关矩阵  $R_{xx}$  所在的  $M \times M$  维空间可分解为完备的两个正交子空间，以最小特征值的特征向量为列构造一个噪声投影矩阵  $E_N^H$

$$E_N^H = \{V_{D+1}, \dots, V_M\} \quad (4)$$

在信号所来方向  $\theta_k$  ( $k=1, 2, \dots, D$ ) 上有

$$E_N^H a(\theta_k) = 0 \quad (5)$$

根据式(5)即可求出信号的来向。图 2 示出了计算机仿真获得信号来向角的情况。

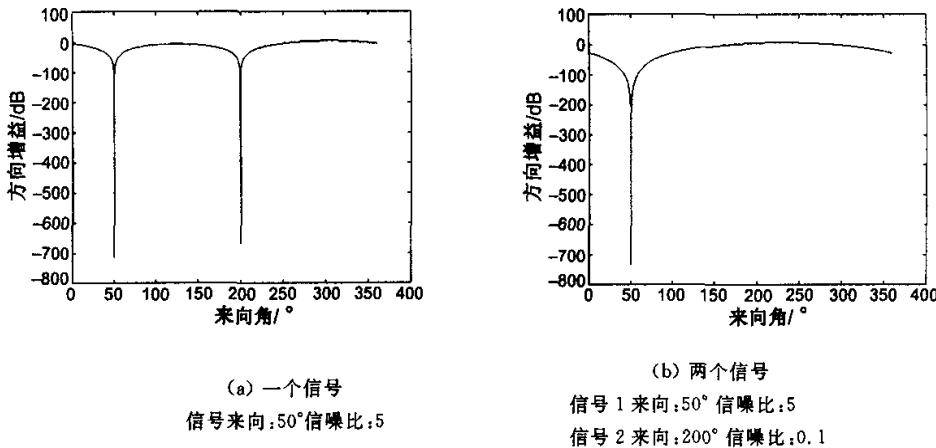


图 2 信号来向角估计

### 3.2 去干扰算法

设干扰信号的来向为  $\theta_j$ ，令图 1 中的权向量  $W = a(\theta_j) = [1 \ j\cos\theta_j \ j\sin\theta_j]^T$ ，则天线方向增益函数  $G(\theta)$  为：

$$G(\theta) = |W^T a(\theta)| \quad (6)$$

$$\begin{cases} G(\theta) = 0 & \theta = \theta_j; \\ G(\theta) \neq 0 & \theta \neq \theta_j; \end{cases} \quad (7)$$

因此，在选择  $W = a(\theta_j) = [1 \ j\cos\theta_j \ j\sin\theta_j]^T$  的加权后可在干扰方向形成零陷，从而达到去干扰的目的。由此可看出，本系统是采用最小化干扰信号的输出功率来实现抗干扰的目的，而没有采用智能天线中常用的最大化有用信号功率的方法，这是因为作者的目的是消除干扰，虽然在零陷对准干扰时将对有用信号造成一定的衰减，但由于实际应用时信号与

干扰之间存在一定的夹角，衰减并不严重（有用信号与干扰信号间存在的夹角越大，衰减越小），而且易于用汇编语言实现。

考虑到系统的误差，为提高系统的抵消比，在设计时增加了一辅助检测通道，利用功率反演算法对加权系数进行了校正。

### 4 结论

在完成系统的软、硬件设计及整机调试之后，利用自行制作的、可模拟波段内两个不同来向信号的多波信号源对系统的干扰抑制比、波段工作性能等进行测试。测试结果表明，系统可以达到在 1.6~30MHz 的频率范围内抵消任意来向的一个或两个干扰信号，在定频工作时干扰抵消比大于 25dB，跳

频工作时干扰抵消比为 $15\sim20\text{dB}$ ,能适应100跳/秒的低速跳频,测向误差为 $\pm5^\circ$ ,造成测向误差的原因主要是分时采样引起的。为保证良好的相位关系,分时取样电路必须由信号处理平台控制锁相环来实现,锁相环的性质严重影响测向精度,这是本系统实现的难点之一。

### 参考文献

- [1] 裴昌幸等.自适应零位天线系统及其设计与实现[J].西安电子科技大学学报,1999,26(2):170~173.
- [2] 满宝辉.自适应零位天线系统信号处理平台的研究[C].西安电子科技大学硕士学位论文,2000.
- [3] Tung, T L Yao, K Chen, D et al.. Source localization and spatial filtering using wideband MUSIC and maximum power beam forming for multimedia applications [J]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems, SiPS: Design and Implementation 1999,625~634.
- [4] Astely, David Ottersten, Bjorn. Effects of local scattering on direction of arrival estimation with MUSIC [J]. IEEE Transactions on Signal Processing ,1999,47(2):3220~3234.
- [5] 陈建峰等.阵列高分辨方位估计方法统计性能分析[J].航空学报,1998,19(1):114~117.
- [6] 马长征,吴伟陵.波束形成和解码的联合迭代接收技术[J].电波科学学报,2002,17(1):1~3.



陈 健 (1968-),男,江苏人,  
西安电子科技大学通信工程学院副  
教授、博士研究生,研究方向:软件  
无线电、通信信号处理、通信对抗。



李建东 (1962-),男,江苏人,西安电子科技大学  
通信工程学院教授、博士生导师、院长,研究方向:  
移动通信、软件无线电、通信对抗。



裴昌幸 (1945-),男,陕西人,  
西安电子科技大学通信工程学院教  
授、博士生导师、副院长,研究方向:  
通信对抗、网络安全。

## 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>