

# 无模糊球面天线阵设计方法

赵 绮 白春惠

(西安电子科技大学 710071)(秦皇岛 91404 部队 066001)

**摘要** 基于测向天线阵列阵列流形上方向向量的空间距离,以球面天线阵为例,提出了一种用于无模糊阵列信号处理测向的有向天线元阵列设计方法。该方法不需要根据不同阵列的阵列流形上方向向量的空间距离的解析式进行复杂的推倒,而是从计算机模拟的角度对其进行探讨。该方法具有简单、灵活、稳健、可移植性强等特点。

**关键词** 阵列信号处理 测向 模糊 天线阵

阵列信号处理测向技术凭借其高分辨、高精度及多信号测向能力等优良性能,代表了新型测向系统的发展方向。在实际的测向系统中,工作频段通常有几个或十几个倍频程,这样在设计天线阵列时就要求有较全面的考虑。为了提高测向精度和减小阵元间的互耦,希望天线阵的孔径尽可能的大,但还要保证天线阵的设计不会引起测向模糊。因此对于天线阵列设计方法的研究,对实际应用具有非常重要的意义。

## 1 有向天线元阵列无模糊测向的条件

在理论上,不存在一阶测向模糊等价于不存在阵列流形上完全相同的两点。但是从工程意义上讲,在有一定阵列流形误差及测向误差的情况下,若阵列流形上两个方向向量的空间距离极近,就有可能产生测向模糊。下面讨论用方向向量的空间距离的概念研究有向天线元阵列的测向模糊问题。设  $a(\theta_1, \theta_1)$  和  $a(\theta_2, \theta_2)$  为阵列流形上的两个方向向量,其归一化空间距离可以有不同的定义,我们选用如下的形式:

$$d(\theta_1, \theta_1, \theta_2, \theta_2) = \frac{\| a^H(\theta_1, \theta_1) a(\theta_2, \theta_2) \|}{\sqrt{a^H(\theta_1, \theta_1) a(\theta_1, \theta_1) a^H(\theta_2, \theta_2) a(\theta_2, \theta_2)}} \quad (1)$$

式中,  $H$  表示共轭转置。上式适用于任意形状的天线阵列。

有向天线元阵列的 MUSIC 算法公式可表示为:

$$P_{MUSIC} = \frac{a^H(\theta, \theta) E_s E_s^H a(\theta, \theta)}{a^H(\theta, \theta) a(\theta, \theta)} \quad (2)$$

对于只有从一个方向入射的单信号情况,有

$$E_s = a(\theta_0, \theta_0) \quad (3)$$

代入式(2)得到

$$P_{MUSIC} = a^H(\theta_0, \theta_0) a(\theta_0, \theta_0) d^2(\theta, \theta, \theta_0, \theta_0) \quad (4)$$

由上式可知,可以采用方向向量的空间距离代替 MUSIC 算法的谱峰研究有向天线阵列的测向模糊问题。

假设由阵元位置误差等引起的系统误差经校正已完全消除。由噪声等引起的随机误差对 MUSIC 算法的影响表现在使真实信号与虚假信号对应的谱峰均降低。考虑该误差对测向模糊的影响时我们考虑一种极端的情况,即真实信号的谱峰降低,而虚假信号的谱峰不变。

假设信号的入射角为  $(\theta, \theta)$ , 方向向量为

$$a(\theta, \theta) = [\gamma_1(\theta, \theta) e^{j\Psi_1(\theta, \theta)}, \gamma_2(\theta, \theta) e^{j\Psi_2(\theta, \theta)}, \dots, \gamma_M(\theta, \theta) e^{j\Psi_M(\theta, \theta)}] \quad (5)$$

设虚假信号的伪峰出现在  $(\theta_1, \theta_1)$ , 由噪声等引起的随机相位误差为  $\Delta\Psi_i$ , 考虑使用宽波束天线阵元, 认为幅度误差可以忽略。假设由此引起的随机测向误差为  $(\Delta\theta, \Delta\theta)$ , 其对应的方向向量为

$$a(\theta + \Delta\theta, \theta + \Delta\theta) \approx [\gamma_1(\theta, \theta) e^{j[\Psi_1(\theta, \theta) + \Delta\Psi_1]}, \gamma_2(\theta, \theta) e^{j[\Psi_2(\theta, \theta) + \Delta\Psi_2]}, \dots, \gamma_M(\theta, \theta) e^{j[\Psi_M(\theta, \theta) + \Delta\Psi_M]}]^T \quad (6)$$

这时,真实信号的谱峰为

$$P(\theta, \theta, \Delta\theta, \Delta\theta) = d(\theta, \theta, \theta + \Delta\theta, \theta + \Delta\theta) \quad (7)$$

把式(5)、(6)代入式(7)可以得到

$$P(\theta, \theta, \Delta\theta, \Delta\theta) = \frac{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2(\theta, \theta) e^{j\Delta\Psi_i}}{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2(\theta, \theta)} \quad (8)$$

于是,利用谱峰的大小来进行信号的真伪判断时,当真实信号的谱峰小于等于虚假信号的伪峰时,即

$$P(\theta, \theta, \Delta\theta, \Delta\theta) \leq d(\theta, \theta, \theta_1, \theta_1) \quad (9)$$

成立时会产生错判。因此为了不产生错判要求  $(\theta, \theta)$  在整个参数空间满足

$$\frac{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2(\theta, \phi) e^{\Delta\Psi_i}}{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2(\theta, \phi)} > d(\theta, \phi, \theta_1, \phi_1) \quad (10)$$

## 2 无模糊球面天线阵的设计方法

以上推导理论上适用于有向天线元组成的任意阵。对于一些复杂的阵列形式,虽然可写出方向向量空间距离的解析式,但由于阵列流形的复杂性,我们并不能从解析式中直接得出有关结论,为此我们从计算机模拟的角度对其进行探讨。下面以球面阵为例说明无模糊天线阵的设计方法。

用  $2M$  个对数周期天线阵元组成天线阵列,内向分布于半径为  $R$  的球面上正交的两个大圆的圆弧上,各阵元的视在相位中心可近似认为分布在半径为  $R_d$  的球面上(见图1)。其中阵元  $1 \sim M$  位于

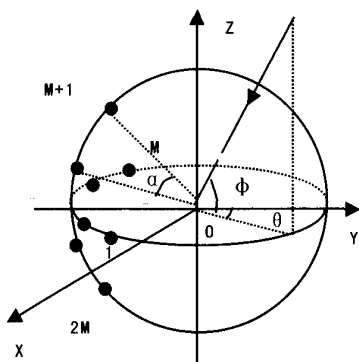


图1 二维球面阵几何结构

$XOY$  平面上,阵元  $M+1 \sim 2M$  位于  $YOZ$  平面上。各对数周期天线阵元的轴线交于球心,轴线夹角为  $\alpha$ 。采用球面坐标系表示入射平面波的波达方向,坐标系的原点  $O$  位于球心。定义方位角  $\theta$  为信号到达方向在  $XOY$  平面上的投影与  $Y$  轴的夹角,仰角  $\phi$  为到达方向与  $XOY$  平面的夹角。

研究方向向量间的空间距离应遍历参数空间(方位范围  $[-30^\circ, 30^\circ]$ , 俯仰范围  $[-30^\circ, 30^\circ]$ )。假设信号数目为1,考虑到阵列的对称性,其中一个方向可选在方位范围  $[0^\circ, 30^\circ]$ 、俯仰范围  $[0^\circ, 30^\circ]$  内以  $1^\circ$  为步进变化,而另一个方向遍历参数空间。 $D_d$  ( $D_d = 2R_d$ ) 表示阵元的视在相位中心所在球面的直径。 $\lambda$  表示信号波长。经计算机模拟得到结论:①阵元间距一定时,阵元数目越少越容易产生测向模糊。②阵元数目一定时,对于相同的  $D_d/\lambda$ ,阵元间夹角越大导致方向向量空间距离中的第一伪峰值越大,则越容易产生测向模糊。③球面阵半径越大,对于给定频率  $D_d/\lambda$  越大,越容易产生测向模糊。

根据以上结论,影响球面天线阵测向性能的参数分别为:阵元数、阵元夹角和阵半径。下面我们给出无模糊球面天线阵列的设计方法:

1) 根据对设备复杂程度的要求确定天线阵阵元数范围;

2) 假设随机相位误差  $\Delta\Psi_i$  服从零均值正态分布,根据实际情况,给定  $\Delta\Psi_i$  的容限方差  $\sigma^2$ ;

3) 在参数空间中任取一个方向  $(\theta, \phi)$ , 产生随机相位误差  $\Delta\Psi_i$ , 根据式(8)计算真实信号的谱峰  $mp(\theta, \phi) = E[p(\theta, \phi, \Delta\theta, \Delta\phi)]$ ;

4) 取另一个方向  $(\theta_1, \phi_1)$  遍历参数空间, 计算  $d(\theta, \phi, \theta_1, \phi_1)$ , 记下第一伪峰值  $d_m(\theta, \phi, \theta_1, \phi_1)$ ;

5) 给定阵元夹角  $\alpha$ , 变化  $D_d/\lambda$ , 作曲线  $D_d/\lambda - d_m(\theta, \phi, \theta_1, \phi_1)$ , 求第一伪峰值小于真实信号谱峰时的最大  $D_d/\lambda$  值  $LE(\theta, \phi) = \max_{d_m(\theta, \phi, \theta_1, \phi_1) < mp(\theta, \phi)} D_d/\lambda$ ;

6) 变化方向  $(\theta, \phi)$ , 取遍整个参数空间, 重复步骤3)、4)、5), 计算

$$LEM(\alpha) = \min_{(\theta, \phi)} LE(\theta, \phi);$$

7) 改变阵元夹角  $\alpha$ , 重复步骤3)、4)、5)、6), 绘制曲线  $\alpha \sim LEM(\alpha)$ , 该曲线左侧区域即为无模糊区域;

8) 根据天线阵元尺寸, 确定物理可实现区域。物理可实现区域与无模糊区域的交集即为合理设计区域。

## 3 八元球面天线阵的设计与实现

● 双极化对数周期天线的实现: 在常规的对数周期天线基本原理基础上, 我们采用优化设计, 实现双线极化对数周期天线。决定对数周期天线几何形状的参数分别为:  $\gamma = 26.56^\circ$ ; 比例因子  $\tau = 0.8$ ;  $l_n = 0.08m$ 。天线的各项性能均达到了较高水平, 水平极化波束宽度为  $100^\circ$ , 垂直极化波束宽度为  $60^\circ$ 。

● 天线阵的设计与实现: 首先, 阵元数目是需要考虑的一个重要因素。阵元数越多, 测向精度越高, 有利于对抗多径效应、解测向模糊等, 可得到更理想的系统性能。但是, 阵元增多, 将使分析设计复杂, 系统庞大。因此, 折衷考虑取8个阵元数较为合适。系统要求随机相位误差的容限标准差  $\sigma = 10^\circ$ , 按步骤3)、4)、5)、6)、7), 绘制曲线  $\alpha \sim LEM(\alpha)$ , 按照上节实现的双极化对数周期天线的几何参数, 求得物理可

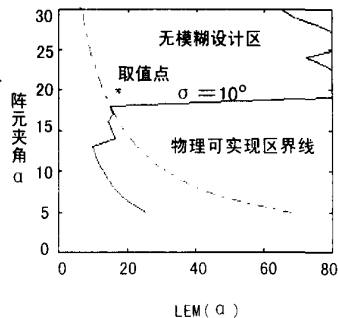


图2 球面阵设计参数取值区间

(下转第40页)

射电源与目标在相对于测站的同一视线方向时,  $\Delta DOR$  或  $\Delta DOD$  测量数据内已消除或部分消除了公共误差源的影响, 如电离层、对流层、太阳黑子、站址误差等因素对距离测量或多普勒测量的影响, 由此提高了测量精度。

目前 NASA 深空网中有两种 VLBI 测量方式, 即宽带 VLBI 测量和窄带 VLBI 测量。宽带 VLBI 测量的测量元素为  $\Delta DOR$ , 它实际上是相位差的测量, 因此要求测量系统目标发射信号的带宽足够宽, 除载波调相后的残留载波外, 发射信号中副载波及其各次谐波的谐波分量要足够强, 即目标发射机的发射频谱应足够宽, 地面接收机除接收目标发射信号的残留载波外, 还接收目标转发信号调制副载波的偶次谐波分量, 以高次谐波求解距离差, 以其它谐波做匹配侧音解模糊。而窄带 VLBI 的基本测量量为  $\Delta DOD$ , 它表示形成基线的两个测控站目标接收机得到的单向多普勒频差和标校接收机得到的单向多普勒频差的差分, 实际上是站间多普勒频差的测量。

根据资料报道, 目前 NASA 深空网中  $\Delta DOR$  的测量精度可以做到 10 ~ 20cm (信号跨度带宽 38MHz),  $\Delta DOD$  的测量精度可以做到 20 ~ 30mm/s。

### 3.3 $\Delta VLBI$ 测量在深空导航应用中的优点与不足

$\Delta VLBI$  在 NASA 深空导航中占举足轻重的地位, 主要表现为以下优点: (a)  $\Delta VLBI$  测量是被动测量体制, 不需要发射上行信号; (b) 目标发射信号简单, 甚至可以考虑利用其它系统的转发信号, 如, 目标发射信号可以是方波, 这样该系统就可以利用编码顺序测距的转发信号完成高精度干涉测量; (c) 测量弧段短, 测角精度高, 资料介绍, 10 分钟的测量弧段, NASA 深空网利用  $\Delta VLBI$  得到的目标测角精度

(上接第 20 页)

实现区域(见图 2)。

考虑减小对波束宽度要求的压力, 并留出一定设计余量, 在两区域交集中取天线阵的设计参数: 球半径  $R = 0.5663m (D_d/\lambda = 17.25)$ ; 阵元夹角  $\alpha = 20^\circ$ 。

## 4 结论

计算机模拟和实际实验结果均表明该球面阵对整个测向范围内的全频段信号测向无模糊, 证明该设计方法是可行的, 解决了实际测向系统中天线阵列的设计问题。对于其它形式的天线阵可根据该方法得到类似的设计方法, 只是设计参数有所不同, 例如均匀圆阵只需考虑阵列的直径。

可以至 10mrad 左右, 是目前测角精度最高的测量体制。当然,  $\Delta VLBI$  测量有其自身的不足, 主要表现为测量实时性较差; 数据处理复杂。

## 4 总结

NASA 深空网导航的技术核心是对以上测量数据的综合数据处理。各测量系统尽管测量元素各异, 测量精度存在差别, 但测量系统之间并不能相互替代, 这从 NASA 深空网的建设过程中就可以清楚得到此结论。因此, 结合我国深空测量网的建设 and 不同任务需求, 作者认为我国深空测量网也应当是多种测量体制并存。如因编码顺序测距技术能充分利用信道能量, 研究该测量技术的原理和实现将对我国深空测量网有十分重要的意义, 另一方面, 由于  $\Delta VLBI$  测量的精度很高, 是深空目标高精度导航不可替代的测量系统, 因此建议测控专业加强对 VLBI 测量技术的研究。本文对 NASA 深空网各种测量技术简单介绍的目的旨在抛砖引玉, 能对我国将来深空网的总体规划有所帮助。

### 参考文献

- 1 The Deep Space Network—an Instrument for Radio Navigation of Deep Space Probes. JPL publication 82 - 102, 1982. 12
- 2 Sequential Ranging - How It Works. JPL Publication 93 - 18, 1993. 6
- 3 201 Frequency and Channel Assignments. DSMS Telecommunication Link Design Handbook 810 - 005, 2000. 11
- 4 202 34 - m and 70 - m Doppler. DSMS Telecommunication Link Design Handbook 810 - 005, 2000. 11
- 5 203 Sequential Ranging. DSMS Telecommunication Link Design Handbook 810 - 005, 2000. 11
- 6 204 26 - m Subnet Doppler and Ranging. DSMS Telecommunication Link Design Handbook 810 - 005, 2000. 11

### 参考文献

- 1 J. T. - H. Lo, S. L. Marple, . Observability Conditions for Multiple Signal Direction Finding and Array Sensor Localization. IEEE Trans. SP, 1992. 11, 40(11): 2641 ~ 2650
- 2 K. - C. Tan, S. S. Goh, and E. - C. Tan, . A Study of the Ambiguity Issues in Direction - of - Arrival Estimation. IEEE Trans. Signal Processing, 1996. 2, 44(4): 880 ~ 887
- 3 M. Gavish and A. J. Weiss. Array Geometry for Ambiguity Resolution in Direction Finding. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1996. 6, 44(6): 889 ~ 895
- 4 刘建华. 阵列测向系统中若干关键技术研究及侦测一体化新方法. 北京: 清华大学博士论文, 1998

## 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>