

# 近场效应对船载双通道雷达相位标校影响及应对方法研究

蔡瑾曜 陈晓阳

(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

**摘要:**随着船载双通道雷达天线频率的不断提高,天线角度标校所需要的远场距离条件越来越无法满足。通过对双通道雷达天线自跟踪系统的深入分析,给出了交叉耦合产生的机理,并以此为基础阐述了近场效应对校相和角度标校的影响。给出了当前解决近场效应的4类常用的应对方法,经实际工程验证和对比分析,在近场距离条件下,近场阵列天线法是解决雷达天线角度标校最适宜的方法。最后,以X频段天线为例进行了实际测试,结果证明该方法操作简便、数据稳定可用,并已在多次卫星测控任务中得到了验证。

**关键词:**船载双通道雷达;近场效应;交叉耦合;角度标校

**中图分类号:** TN95    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** D510.1025

## Research on the phase calibration influence and measures of near field effect to the shipboard double channel radar

Cai Jinyao Chen Xiaoyang

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** As the work frequency of the shipboard double channel radar increase, the condition of far field angle calibration is more and more difficult to satisfy. Through the auto-track system analysis of the double channel radar, this paper states the reason of causing cross coupling. On the basis, this paper states the influence of near field effect to phase and angle calibration. This paper provides 4 methods to solve the near field effect, through realistic engineering testing and contrast, the method of using near array antenna can appropriately solve the angle calibration problem of radar antenna on near field effect condition. At last, the X band antenna has been practical tested, the method of using near array antenna has been proved easy to operate and the data is stable which has been verified in satellite monitoring and control tasks.

**Keywords:** shipboard double channel radar; near field effect; cross coupling; angle calibration

### 1 引言

船载统一测控系统雷达的跟踪一般采用双通道单脉冲跟踪体制<sup>[1-3]</sup>,在双通道单脉冲雷达系统中,终端接收机有两条通道即和、差通道,为了保证天线跟踪的稳定性,它们之间的相位差须控制在一定的范围(通常要求在8度以内),船载测控设备出海执行任务前必须对跟踪相位进行标定。

对于高频段X波段天线来说,以往能给S频段提供校相的标校塔已经无法满足X频段的校相距离要求。若仍用此标校塔校相,会产生近场效应,导致标定的相位值无

法满足雷达天线在海上对卫星跟踪的要求,进而导致雷达天线无法稳定跟踪目标。对于上述问题,研究了双通道单脉冲跟踪雷达天线交叉耦合的产生原理,分析了近场效应对标校产生的影响,并提出了几种可行的应对方法。

### 2 交叉耦合产生原理

双通道雷达天线跟踪设备将信号接收后,使用多模馈源激励出和模信号和差模信号,利用和、差模信号的特性实现对卫星目标的稳定跟踪<sup>[4-6]</sup>。

当雷达天线的电轴偏离目标一个角度 $\theta$ 时,并且 $\theta$ 在跟踪天线直角坐标平面内与天线方位轴的夹角为 $\beta$ 。那么

信号在多模馈源内激励出来的和、差模信号可分别用表示如下:

$$E_{\Sigma} = E_1 \times \sin\alpha t \quad (1)$$

$$E_{\Delta} = E_2 \mu \theta \times \sin(\omega t + \beta) = E_2 \mu \theta \cos\beta \sin\omega t + E_2 \mu \theta \sin\beta \cos\omega t \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为 $\theta$ 角与天线方位轴的夹角, $\mu$ 为差斜率, $\omega$ 为卫星信号的角频率, $E_1$ 、 $E_2$ 分别为和、差模信号的幅度。

式(2)中,当雷达天线电轴偏开目标 $\theta$ 角时,其在线直角坐标系方位和俯仰轴上产生的角误差信息为 $\theta \cos\varphi$ 和 $\theta \sin\varphi$ 。角度误差信号如图1所示。

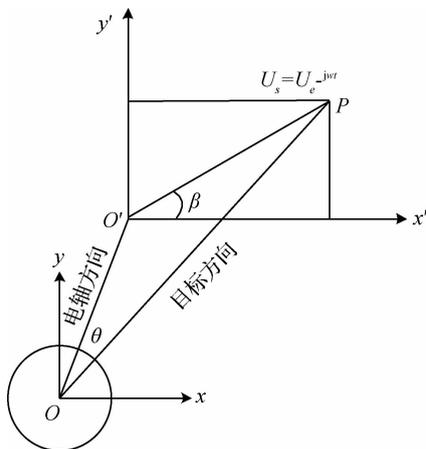


图1 角误差信号示意图

外部接收的电磁信号经雷达天线的多模馈源,分离出和、差信号,通过下行信道的放大和下变频,变为中频信号后送终端,由基带终端解调出误差电压。当和差通道的相位差值 $(\varphi_1 - \varphi_2) \neq 0$ 时,方位和俯仰误差电压分别为:

$$\Delta U_A = \frac{1}{2} K' \mu \theta \cos\beta \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{1}{2} K' \mu \theta \sin\beta \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

$$\Delta U_E = \frac{1}{2} K' \mu \theta \sin\beta \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{1}{2} K' \mu \theta \cos\beta \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4)$$

式中: $-\frac{1}{2} K' \mu \theta \sin\beta \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ 和 $-\frac{1}{2} K' \mu \theta \cos\beta \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ 分别是因拉偏方位和俯仰引起的交叉耦合值,将角误差信号 $\Delta U_A$ 和 $\Delta U_E$ 送给伺服主控,控制雷达天线朝着角误差信号减少的方向运动,直到 $\Delta U_A$ 、 $\Delta U_E$ 为0,从而实现了雷达天线对目标的自跟踪。

### 3 近场效应影响域分析

#### 3.1 场的划分

雷达天线周围空间可根据距离分为3个区域:远场区、辐射近场区、感应近场区,如图2所示。

$D$ 为天线的直径,若 $r > 2D^2/\lambda$ ,则该区为远场区。在

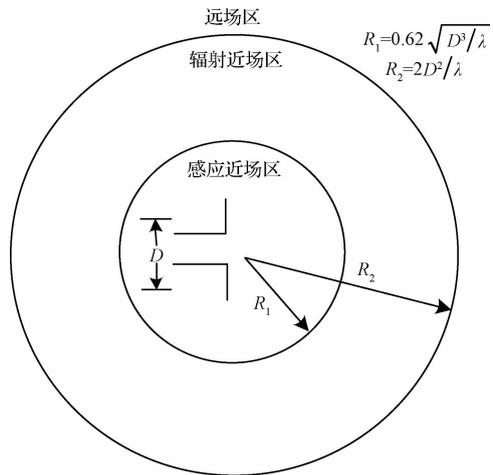


图2 场区划分

远场区,电磁场互相垂直,同时均垂直于传播方向,此时电场、磁场为平面波。当被测天线口面上的电磁场在天线口面中心到边界的相位差不超过 $22.5^\circ$ 时,此时电磁波可被近似认为准平面波。

当距离满足 $0.62 \sqrt{D^3/\lambda} < r < 2D^2/\lambda$ ,该区为辐射近场区,在辐射近场区,场方向图是径向距离 $r$ 的函数,此时天线方向图是一个主瓣和副瓣难分的起伏包络。随着离天线距离的增加,直到靠近远场辐射区时,天线方向图的主瓣和副瓣才明显形成。当 $r < 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$ ,该区为感应近场区,在感应近场区,无功功率成为主导,向外基本不辐射功率,电场和磁场能量相互交替地存储于天线附近的空间内。靠近天线的区域是近场区,包含感应近场区和辐射近场区。

#### 3.2 近场效应对标校的影响

近场效应<sup>[7-8]</sup>会加剧交叉耦合的产生,从而影响雷达天线的角度标校。当天线处于辐射近场区和感应近场区时,根据上节提到的各场区特性,首先会导致辐射到被测天线面上的相位不一致,造成严重的相位测量误差;其次因为入射波的场强幅度不一致,从而使得天线增益实测值变小,最终导致雷达天线第一副瓣的测量出现较大误差。在近场距离条件下,雷达天线辐射方向图与远场距离条件下存在较大差异,这就导致与雷达天线相关的角度标校结果的失真。在天线位于近场区时,入射波在被测天线口面上产生的最大相位差可表示为:

$$\Delta \Phi_{\text{MAX}} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta R_{\text{MAX}} \quad (5)$$

其中:

$$\Delta R_{\text{MAX}} = \sqrt{l^2 + \left[ \frac{d+D}{2} \right]^2} - l \quad (6)$$

式中: $D$ 为接收天线的口径, $d$ 为发射天线DE直径, $l$ 为收、发天线之间的距离。通常情况下, $d \ll D$ ,从而式(5)可简化为:

$$\Delta\Phi_{\text{MAX}} = \frac{\pi D^2}{4\lambda l} \quad (7)$$

当式(7)中的  $\Delta\Phi_{\text{MAX}}$  越大,校相时的相位误差越大。通过以上分析和阐述,雷达天线不应在辐射近场区和感应近场区工作。在收发天线的距离为  $2D^2/\lambda$  处,发射天线辐射的电磁波增益为其在无限远处辐射增益的 0.99 倍,故在该距离下,传输的波可近似认为平面波。因此,将  $r = 2D^2/\lambda$  作为远场区和辐射近场区之间的“边界”距离条件,其中  $D$  是天线口径的尺寸, $\lambda$  是波长。

以 12 m X 频段雷达天线为例,根据远场计算公式可以推算出该雷达天线远场距离应该为  $r = 2D^2/\lambda = 8\ 160$  m,而标校塔到该雷达天线的实际距离为 980 m,处于辐射近场区,不满足远场条件。

#### 4 应对方法分析

对雷达天线角度标校方法的研究,最关键的实质就是在待测天线处产生一个准平面波,产生准平面波的方法较多<sup>[9-11]</sup>,基本可归纳为两类:远场法和近场法。近场法一般可分为:近场感应解析法、紧缩场法和近场阵列天线法。

##### 4.1 远场法

远场法是当前使用最多的雷达天线角度标校测量方法,也是较好、较精确的方法。远场法就是在满足被测天线远场距离条件的位置处,通过发射天线向接收天线发送一个准平面波,通过距离的改变消除近场效应。远场法却存在条件限制,需要在满足雷达天线远场距离的位置处建造高度满足条件的标校塔或者有建筑物,并在建筑物上或塔上安装标校天线。而建造标校塔的成本较高,建筑物往往受限于高度条件,必须是高层建筑,否则高度不够会产生多径干扰,影响雷达天线的角度标校。

##### 4.2 近场感应解析法

与远场相比,在近场条件下,雷达发射天线和、差方向的相对相位产生了变化,从而导致接收天线多模馈源处和、差口对电磁波响应后的相对相位发生变化。在近场条件下,多模馈源和、差口对电磁波信号的感应电压发生了变化,致使和差通道的相位差发生变化。近场感应解析法<sup>[12]</sup>就是对测量天线的近场方向图进行仿真分析,研究雷达天线在近场条件下和差方向图的相对相位,得出天线近场和差方向图的相对相位差与距离的关系。

对于一个 12 m 的 S 频段天线,工作频率为 2 250 MHz,通过仿真解析得到了天线和差口相对相位差与距离的仿真曲线,图 3 中  $R$  为信标天线与标校天线的距离, $R_0 = 2D^2/\lambda$  为满足远场条件的距离。

通过研究雷达天线的近场方向图,可算出雷达天线和差口相对相位差与距离的关系,从而可以最终得出和差通道设备测出的相位调整值和实际的相位调整值之间的关系,即:

$$\Delta\Phi_{\text{真}} = \Delta\Phi_{\text{测}} - \Delta\Phi_{\text{近场}}$$

式中: $\Delta\Phi_{\text{近场}}$  为近场耦合导致的和差通道相位差, $\Delta\Phi_{\text{测}}$

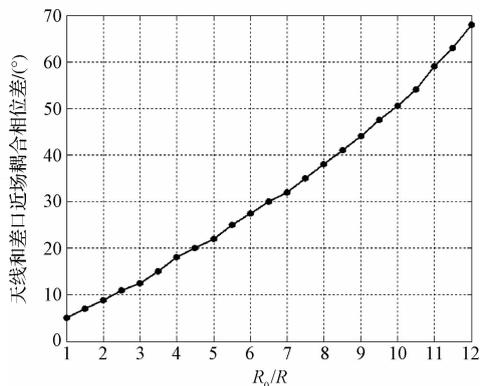


图 3 天线和差口相对相位差与距离的关系

为设备测量的和差通道相位差, $\Delta\Phi_{\text{真}}$  为设备实际应调整的和差通道相位差。

##### 4.3 紧缩场法

紧缩场方法<sup>[13-14]</sup>是一种通过光滑反射面将天线发出的球面波变换为平面波的标校方法。通常使用微波透镜或抛物面反射器,将球面波前变换为平面波前。紧缩场可分为微波暗室和紧缩场天线两大部分。使用光滑反射面,将点源产生的球面波在短距离内转变为平面波。紧缩场天线必须准确地安装于微波暗室中,并调节好水平度,通过对紧缩场天线反射面边缘的处理和微波暗室的配合,在测试空间的区域创造出一个“静区”,进而创造出满足雷达天线角度标校要求的准平面波。

##### 4.4 近场阵列天线法

近场阵列天线法也可称为多探头阵列法,是将多个单喇叭天线组成阵列天线,通过调整各个天线元之间的距离以及每个天线元辐射场的幅度和相位,从而使多个天线元辐射的场经合成后,辐射到达被测天线口面处形成的波为准平面波,原理如图 4 所示。该方法已经在工程实践中得到具体应用<sup>[15]</sup>,近场阵列天线安装实物如图 5 所示。

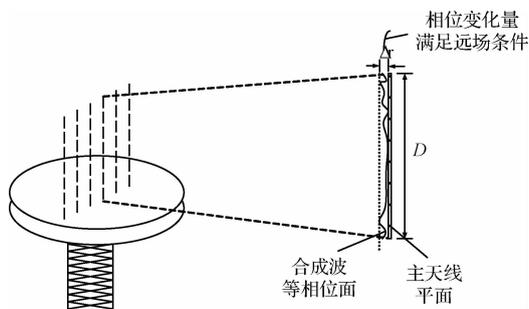


图 4 近场阵列天线原理

##### 4.5 对比分析

上述 4 种方法都可以在近场条件下产生准平面波,但对于船载双通道跟踪设备而言,紧缩场法实现难度较大,除了需要极强的工艺以外,也无法为测量船雷达天线建造一个合适的微波暗室,在实际中无法实现。在近场条件下,近场感应解析法和近场阵列天线法较适用于船载雷达



图5 近场阵列天线安装实物

天线的标校。分别用远场法、近场感应解析法和近场阵列天线方法(阵列天线法是9个单喇叭组成的天线阵)对直径为12 m的高频X频段天线进行试验验证,以远场法为参考,并将3种方法的结果进行了比较,以右旋链路为例,得到了不同频点下基带校相的相位值,结果如表1所示。

表1 校相结果对比表

频点/ MHz	对靖江市政府 大楼(远场法) 校相结果/(°)	近场阵列 天线法 校相结果/(°)	近场感应 解析法 校相结果/(°)
840***	358.59	352.76	356.14
842***	30.88	25.48	27.96
847***	36.56	33.2	33.56
848***	57.66	51.95	53.16
850***	68.55	65.23	63.42

通过表1可以看出,近场阵列天线法与近场感应解析法得到的校相值与远场法的差值均在 $8^\circ$ 以内,满足指标要求。在只满足近场距离条件的情况下,近场感应解析法得到的校相值相比于近场阵列天线法更接近于远场法,所以精度更高。然而,近场感应解析法是基于天线参数的仿真分析法,车载雷达天线长期出海执行任务,系统内线缆连接状况、温湿度以及馈源微小形变都可能发生变化,从而导致相位变化,解析法无法解决因模型等仿真参数变化而导致相位变化的问题。

而近场阵列天线法则能较好解决该问题,通过调整单个天线元的幅度和相位参数,可以适用于不同频段的雷达天线,与远场法一样在测量船码头可以进行实时校相。

## 5 结论

近场效应导致待测天线面上产生的场相位不均匀,加剧交叉耦合的产生,从而给雷达天线的相位标校产生较大的相位测量误差。本文就车载双通道雷达天线的特点,远场法是消除高频点雷达天线近场效应最精确的方法。在

不满足远场距离条件时,近场阵列天线法与近场感应解析法是克服近场效应、完成相位标校的2个较为有效的应对方法。相比于近场感应解析法无法解决因模型等仿真参数变化而导致相位变化的问题,在近场条件下近场阵列天线法具有更广泛的适用性。

## 参考文献

- [1] 赵业福. 无线电跟踪测量[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 仇三山. 双通道单脉冲跟踪快速校相改进算法[J]. 四川兵工学报,2013,34(5):96-98.
- [3] 石荣,陈锡明,唐海,等. 差模跟踪接收机和差通道相位标校与调整[J]. 电子信息对抗技术,2006,21(1):6-9.
- [4] 袁刚,江涛. 差模跟踪技术的应用[J]. 现代雷达,2004,26(1):49-52.
- [5] 余海,韩来辉. 一种单脉冲双通道自跟踪系统快速校相方法[J]. 电子技术与软件工程,2016(5):159-159.
- [6] 茹胜华. 一种双通道雷达接收机的测角技术[J]. 制导与引信,2013,34(1):18-21.
- [7] 陈琼霞,高一弘. 移动通信基站天线近场效应影响分析[J]. 海峡科学,2016(4):26-27.
- [8] 董士伟,董亚洲. 天线近场特性的研究方法及其应用[J]. 空间电子技术,2015(1):52-56.
- [9] 习靖. 双通道角跟踪设备的近场相位校准研究[J]. 无线电工程,2013,43(5):32-34.
- [10] 徐荣,陈步康,刘童岭. 近场虚拟目标在船载测控设备无塔校相中的应用研究[J]. 飞行器测控学报,2010,29(6):34-38.
- [11] 毛南平,丛波,段庆光. 近场效应对一种C频段统一测控雷达角度标校数据的影响分析[J]. 电讯技术,2008,48(4):65-68.
- [12] 唐海. 天线测量[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [13] 张乐锋,吴建辉. 雷达目标特性的毫米波紧缩场测量方法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(7):1275-1278.
- [14] 杨二雷,何兵哲. 一种在紧缩场进行捕获跟踪试验的方法[J]. 飞行器测控学报,2014,33(1):20-24.
- [15] 徐荣,蔡瑾曜. 阵列天线在UXB系统标校中的应用[J]. 电讯技术,2015,55(10):1146-1151.

## 作者简介

蔡瑾曜,1988年出生,硕士,主要研究方向为航天测控。

E-mail:463846166@qq.com

陈晓阳,1988年出生,大专,主要研究方向为航天测控。