文章编号:1001-893X(2011)06-0094-04

摇摆状态一维相控阵天线波束指向修正*

张驿1,王辉1,温剑2,张云2,何海丹2

(1.海军装备部重庆局,重庆 405200; 2.中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:由于载机平台摇摆,一维相控阵天线姿态会发生倾斜,从而影响波束指向。为此,提出了一 种修正方法,给出了适应于各种监视雷达系统(如二次航管系统)工作原理的详细修正流程及算法。 试验结果表明,所提方法使天线能维持高指向精度。

关键词:一维相控阵天线;姿态摇摆;波束指向修正;二次航管雷达

中图分类号:TN82 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.06.021

Beam Pointing Correction for Linear Phased Array Antenna in Swing State

ZHANG Yi¹, WANG Hui¹, WEN Jian², ZHANG Yun², HE Hai-dan²

(1. Chongqing Military Representative Bureau of Navy Equipment Department, Chongqing 405200, China;
 2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper introduces a compensation method to correct the beam pointing error caused by linear phased array antenna in swing state and presents compensation workflow and algorithm applying to various surveillance systems such as SSR(Secondary Surveillance Radar) system. Test result illustrates that the proposed method can make antenna keep high pointing precision.

Key words: linear phased array antenna; attitude swing; beam pointing error; SSR

1 引 言

舰船在海面上运动时,受风、浪、流等因素的影 响,船体发生横、纵摇动和横荡、纵荡、升沉等各种复 杂的摇荡运动。这种摇荡影响了无稳定平台的一维 相控阵天线的波束指向,降低了系统对目标探测和 跟踪的精度和性能,造成系统跟踪目标的失败。一 般的机械扫描固定波束天线,或大型二维相控阵(点 波束),其波束指向的变化和平台的倾斜变化是简单 的坐标变换。但是对一维相控阵天线而言,通常是 较宽的扇形波束,由波控计算机控制一维扫描波束, 在不同的扫描角度,其方位的指向变化和平台的姿 态倾斜并不完全一致,会造成天线指向偏差^[1]。 天线指向偏差会降低系统的测角精度,造成目标跟踪丢失,影响设备的战技指标。面对一维相控阵天线应用中的新问题,我们展开研究,提出了适应不同工作模式的一维相控阵天线波束修正方法。试验结果验证了方法的有效性。

2 一维相控阵波束指向倾斜的原理

N 元一维相控阵天线(不考虑单元因子),单元
 沿 Y 轴按等间距 d 排布,天线法向在 XOZ 平面内,
 如图 1 所示。

阵列天线方向图函数^[2]:

$$F(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{j(\frac{2\pi}{\lambda}id\cos\theta\sin\phi - i\Delta\phi_B)}$$
(1)
$$\exists \mathbf{r}, f(\theta, \phi) \end{pmatrix} \dot{\mathbf{p}} \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{T} \\ \mathbf{t$$

- * 收稿日期:2011-03-22;修回日期:2011-05-23
- · 94 ·

扫描方位角度。

方位面扫描的一维相控阵天线,方向图阵因子 关于阵轴线呈旋转对称,仅能控制方位面的阵内相 差,即其指向为 $(0, \phi_B)$ 。若目标在 (θ, ϕ) ,则需对指 向做调整,才能对准目标。由几何关系可得:

$$\phi_B = \arcsin(\sin\theta\sin\phi) \tag{2}$$

设定 ϕ_B ,天线的指向为过点(0, $\sin\phi_B$,0),平行 于 *XOY* 面的平面与单位球面相交的圆弧。



图 1 一维相控阵天线的坐标定义 Fig.1 Coordinate definition of linear array

2 天线倾斜后的坐标变换

2.1 坐标系定义

载体各种运动最终可归结为天线围绕其相位中 心的旋转和平移,本文仅考虑坐标旋转,而平移的情 况较简单,本文不作说明。

以大地坐标系 OXYZ 坐标为参考坐标系,设静 止状态天线坐标系与大地坐标系重合。将天线姿态 变化分解为绕大地坐标系的3个坐标轴旋转的3个 独立变化;平台上罗经、惯导等设备提供的横摇角、 纵摇角、航向角即为上述3个坐标轴的旋转角^[3]。 姿态变化后的天线坐标系为 OX'Y'Z'。定义一维相 控阵天线法向为正 X'轴方向,与舰首方向一致;天 顶方向为正 Z'轴,Y'轴与X'Z'轴呈右手定则关系。

2.2 摇摆角及坐标变换矩阵定义

以舰船平台为例,说明摇摆角和坐标变换矩阵 的定义^[4]。

横摇角 β 是舰船甲板绕舰首尾线(X 轴)旋转 后 OZ'轴与 OZ 的夹角,右旋下降为正,且 OX'Y'Z' 坐标到 OXYZ 坐标的变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\beta & \sin\beta\\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$$
(3)

纵摇角 α 是甲板绕 Y 轴旋转后 OZ' 轴与 OZ 的 夹角,舰首抬高为正; OX' Y' Z' 坐标到 OXYZ 坐标的 变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{y} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$
(4)

航向角 ψ 是甲板绕 Z 轴旋转后 OX' 轴与 OX 的 夹角,顺时针为正; OX' Y' Z' 坐标到 OXYZ 坐标的变 换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{z} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

当平台姿态横摇角 β 、纵摇角 α 、航向角 ψ 都发 生变化时,按照平台罗经的监测顺序为航向 – 横摇 - 纵摇,天线坐标系到大地坐标系的变换矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}_{y}\boldsymbol{T}_{x}\boldsymbol{T}_{z} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}$$
(6)

建立如图 2 所示的目标在大地坐标系与天线坐 标系中的方向矢量关系模型。



图 2 坐标变换示意图 Fig.2 Demonstration of coordinates rotation

大地坐标系中某目标的方向表示为(ϕ , θ),用 方向矢量表示为 $P(P_x, P_y, P_z)$;该目标在天线坐标 系的方向表示为(ϕ' , θ'),用方向矢量表示为 $P'(P'_x, P'_y, P'_z)$,则有下列关系式:

 $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{T} \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{P}' \tag{7}$

$$\boldsymbol{P}' = T^{-1} \cdot \boldsymbol{P} \tag{8}$$

3 定向模式的指向修正

或

一维相控阵天线在使用时有两种典型工作模式:一种是定向模式,一种是扫描模式。

定向模式,即已知目标在大地坐标系中的方位,

根据第2节的论述,给出定向模式的指向修正 算法。已知目标在大地坐标中的方向 **P**,则一维相 控阵天线的波控器的指向应设置为 **\$\varsigma_{\mathbf{B}}\$**:

$$\phi_B = \arcsin P_{\gamma}' \tag{9}$$

电讯技术

其中:

$$\boldsymbol{P}'(P'_{x}, P'_{y}, P'_{z}) = T^{-1} \cdot \boldsymbol{P}$$
(10)

4 二次航管系统的指向修正

4.1 修正算法及关键参数

扫描定位模式,如在二次航管系统中,一维相控 阵天线波位连续扫描。已知的参数有目标距离 D、 天线高度 h_a、目标高度 h_t(可在应答信号中获得)和 天线指向(为波位号与偏离角之和)^[5],则可由下述 补偿方法获得目标在大地坐标系中的准确方向。

在未经坐标变换前,二次航管系统由幅度单脉 冲方法测得的目标方位角是天线坐标系内天线波位 号与偏离角之和,目标仰角默认为 0°。由公式(2), 已知水平面内的方位角,可以计算出不同仰角对应 的方位角,即得到天线坐标系内的零点指向曲线,用 方位角、俯仰角表示为 $L_{antenna} = [\theta', \phi']$ 。再运用式 (7)将这条曲线变换到大地坐标中,表示为 $L_{earth} = [\theta, \phi]$ 。

图 3 给出了一维相控阵天线在姿态倾斜后的指向示意,图中为倾斜的一维相控阵天线从 – 44°扫描 至 + 44°,步进 2°,共 45 个波位的零点指向。



图 3 倾斜状态一维相控阵天线指向示意图 Fig.3 Pointing directions of linear array in incline state

如图 4 所示,由余弦定理计算目标在大地坐标 系中的俯仰角 θ:



图 4 目标仰角计算示意图 Fig.4 Elevation angle of target

在大地坐标系的 L_{earth}曲线中,根据测得的目标 仰角 θ 查表(插值),找到对应的 φ,即为二次航管系 统测得的最终目标方位角。

4.2 修正算法的试验验证

为验证这种修正方法,我们制定试验方案进行 二次航管系统联试^[6]。将询问天线和应答天线按下 述方案架设。询问天线架设在高30 m的转台上,以 克服多径等环境因素的影响;应答天线架设在固定 的高塔上,与询问天线距离为300 m(大于测试远场 距离),相对于询问天线的仰角为 5°。进行试验时, 设定询问天线为固定的倾斜姿态,同时调整转台角 度及询问天线扫描角度,使询问天线主波束对准应 答天线,完成询问 – 应答的工作流程。

由测角系统测得的应答天线方位角 ϕ_B ,由坐标转换矩阵 T,可计算出在大地坐标系中应答天线的 方位角 ϕ_{test} 。应答天线的真方位 ϕ_{ture} 由高精度转台 读出。共测量 25 个摇摆姿态,各 45 个波位的指向。 测试结果如图 5 所示。



Fig.5 Pointing error of linear array in incline state

2011年

测得图 5 所示的测向偏差(\$\varphi_{test} - \$\varphi_{ture}\$)。从试验结果可以看出,在未经补偿的情况下,天线横摇造成的测向误差达到了 3°以上。

从图 6 和图 7 所示天线横摇状态下经过补偿后 的测向偏差图可知,经补偿后,天线波束指向绝对误 差小于 0.2°,均方根偏差小于 0.07°。误差主要是由 转台系统造成的。



Fig.7 RMS error of every incline attitude

将询问天线架设在二维摇摆台上,模拟各种海况的动态船摇,进行了大量的对空中民航目标的测 角试验,测试结果也验证了修正方法是稳定可靠的, 修正精度高。影响动态摇摆状态天线指向修正精度 的主要因素为系统的单脉冲测角精度、摇摆台姿态 精度、时间同步精度、测距精度,以及目标的高度精 度(由其高度表或气压高度计精度决定)。

5 结束语

本文提出的波束指向的修正方法可以修正一维 相控阵天线在各种姿态倾斜状态下的指向偏差。天 线的指向误差达到 0.07°(均方根值),二次航管系统 的测角误差达到 0.2°。在各种舰载、机载平台上,有 大量的一维相控阵天线运用,本文的修正方法可以 解决各种不同工作流程的系统的指向修正问题。在 后续的工作中,我们将进一步研究在复杂电磁传播 环境中相控阵天线的指向修正问题。

参考文献:

- [1] ROBERT J M. Phased Array Antenna Handbook [M]. Boston: Artech House Inc., 2005: 76 – 80.
- [2] 张光义,赵玉洁.相控阵雷达技术[M].北京:电子工业 出版社,2006:11-12.
 ZHANG Yi - guang, ZHAO Yu - jie. Phased - array Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry,2006:11-12.(in Chinese)
- [3] 冯同玲,陈龙潭.舰载雷达天线电子稳定方程的推导 与分析[J].火控雷达技术,2001,30(1):31-36.
 FENG Tong - ling, CHEN Long - tan. Derivation and Analysis of Electronic Steadiness Equations of Ship - borne Radar[J]. Fire Control Radar Technology,2001,30(1):31-36. (in Chinese)
- [4] SMERCZYNSKI J E. Electronic Search Beam Stabilization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, AES – 16(4):492 – 499.
- [5] STEVENS M. Secondary Surveillance Radar [M]. Boston: Artech House, Inc., 1988:31 – 33.
- [6] MH/T 4010-2006,空中交通管制二次监视雷达设备技 术规范[S].

MH/T 4010 – 2006, Technical Specification for Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar[S]. (in Chinese)

作者简介:

张 驿(1972—),男,湖北钟祥人,高级工程师,主要从 事雷达装备的总体系统设计、检验验收和质量监督工作;

ZHANG Yi was born in Zhongxiang, Hubei Province, in 1972. He is now a senior engineer. His research concerns system design, quality supervising & inspecting of radar equipment.

Email:wen.kent@hotmail.com

王 辉(1967—),男,湖北孝感人,高级工程师,主要从 事雷达装备的检验验收和质量监督工作;

WANG Hui was born in Xiaogan, Hubei Province, in 1967. He is now a senior engineer. His research concerns quality supervising & inspecting of radar equipment.

温 剑(1978—),男,四川成都人,工程师,主要研究方 向为相控阵天线系统、天线布局、星载天线;

WEN Jian was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1978. He is now an engineer. His research interests include phased array antenna, satellite borne antenna.

张 云(1974—),男,四川成都人,高级工程师,主要研 究方向为相控阵和智能天线;

ZHANG Yun was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1974. He is now a senior engineer. His research interests include phased array antenna and smart antenna.

何海丹(1970—),男,四川泸州人,研究员,主要研究方 向为相控阵、智能天线及毫米波天线。

HE Hai – dan was born in Luzhou, Sichuan Province, in 1970. He is now a senior engineer of professor. His research interests include phased array, smart antenna and MMW antenna.