

一种相控阵雷达横滚角标校方法

陈皓¹, 雷艺²

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 合肥 230031; 2. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230601)

摘要: 提出了一种相控阵雷达横滚角标校方法, 利用相控阵雷达横滚角与目标俯仰角测量误差之间的近似线性关系, 结合雷达自带的角度测量误差标定手段, 快速地计算得到雷达的横滚角, 进而大幅提高相控阵雷达的角度测量精度。实验证明, 使用该方法计算得到的横滚角与使用激光测量仪器测得的横滚角结果精度相当, 完全能够满足高精度测量雷达的需求。

关键词: 相控阵雷达; 横滚角; 标校; 测量误差

中图分类号: TN951 **文献标志码:** A

A Roll Angle Calibration Method for Phased-Array Radar

CHEN Hao¹, LEI Yi²

(1. Key Lab of Aperture Array and Space Application, The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230031, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: This paper presents a roll angle calibration method for phased-array radar. Based on the built-in elevation calibration methods of phased-array radar, the proposed method utilizes the approximately linear relationship between the roll angle and the target's elevation measurement error to calculate the roll angle. Experiments confirm that the roll angle calculated by this method has nearly the same accuracy as that of the method using laser measurement instruments. With the proposed method, the angle measurement accuracy of phased-array radar can be greatly improved.

Key words: phased-array radar; roll angle; calibration; measurement error

引言

角度测量精度是相控阵雷达最主要的指标之一, 目前相控阵雷达的主要测角方式为多波束比幅测角与和差波束测角^[1-5]。对于相控阵雷达来说, 目标的测角通常在阵面球坐标系下完成, 再根据阵面的指向转换到雷达球坐标系中^[6]。因此包含坐标转换的完整测角流程如下: (1) 通过回波时间测得目标距离, 通过多波束比幅或者和差波束测得目标在阵面球坐标系下的方位角和俯仰角; (2) 把目标坐标从阵面球坐标系转换到阵面直角坐标系; (3) 根据雷达阵面的方位角、俯仰角和横滚角把目标坐标从阵面直

角坐标系转换到雷达直角坐标系;(4)最后把目标坐标从雷达直角坐标系转换到雷达球坐标系,得到目标相对雷达站点的距离、方位和仰角。步骤(3)需要知道雷达阵面的方位角、俯仰角和横滚角3个角度才能完成阵面直角坐标系到雷达直角坐标系的转换。

通常地面雷达的方位角和俯仰角可以由旋转变压器或者角度编码器测量得到,而横滚角则默认为 0° (因为地面雷达架设过程中会进行基座调平,理论上基座完全调平后雷达阵面只在方位维度和俯仰维度可以转动,横滚角始终为 0°)。但是实际上,由于基座调平精度有限,以及基座的形变、天线阵面与基座之间的安装误差等因素,天线阵面的横滚角不可能完全为 0° ,根据实际工程经验,天线阵面横滚角通常在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。对于高精度的测量雷达, 0.2° 的误差是不可容忍的,因此高精度雷达需要精确的横滚角数据。为了得到横滚角数据,常用全站仪等高精度激光测量设备对天线阵面的横滚角进行测量。全站仪价格昂贵,且需要专业技术人员操作,一般的雷达装备不会配备。如需要测量横滚角,需协调专业人士和设备对雷达横滚角进行定期标校测量,耗费人力和成本。

大型相控阵雷达为了保证测量精度,一般都自带多种精度标校手段,常用的标校手段包括广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)飞机标校和两行轨道数据(Two-line orbital element, TLE)星历卫星标校。ADS-B是一种空中交通管制技术。民航飞机的机载GPS设备获得自身的位置信息,再通过飞机上的ADS-B发射机把位置信息广播出去,地面的ADS-B接收机收到广播信号后即可解析得到飞机的位置信息。目前许多大型相控阵雷达均自带ADS-B接收机,把ADS-B解析到的飞机位置信息作为真值,与雷达测量值进行对比,得到雷达的测量误差(距离误差、方位误差、俯仰误差),再对误差进行修正。TLE星历是可以从公开网站上随时下载的卫星运行数据,TLE星历中包含时间信息和卫星的轨道数据,根据TLE星历可以通过软件计算出任意时刻卫星的位置,把这个位置信息作为真值,与雷达测量值进行对比,也可得到雷达的测量误差,进而对误差进行修正。ADS-B飞机标校和TLE星历卫星标校由于其方法简单便捷,且标校精度高,目前已经被广泛应用在雷达系统中。

笔者通过多年的工程实践和数学仿真发现:雷达天线阵面的横滚角会带来俯仰角测量误差,俯仰角测量误差值与阵面横滚角、阵面方位角、阵面俯仰角和目标方位近似满足一定的数学关系。因此,可以使用雷达自带的标校手段(例如ADS-B飞机标校或者TLE星历卫星标校)得到雷达俯仰角测量误差,再根据俯仰角测量误差计算出天线阵面的横滚角。通过该方法可以随时随地进行天线横滚角标校,不必使用额外的高精度激光测量设备,节约时间和成本,极大方便了雷达的精度标校。

1 坐标转换基础理论

1.1 坐标系定义

相控阵雷达通常使用下列4个坐标系对目标进行空间定位^[7]。

(1) 雷达直角坐标系

如图1所示,雷达直角坐标系 (X, Y, Z) 也叫作东北天 (E, N, U) 坐标系,其坐标原点为雷达阵面中心位置, X 轴和 Y 轴在水平面上,其中 X 轴指向正东方向, Y 轴指向正北方向, Z 轴垂直于水平面向上。

(2) 雷达球坐标系

雷达球坐标系 (R, A, E) 以雷达直角坐标系为基准, R 为目标距离阵面中心的斜距,方位角 A 定义为目标矢量在水平面的投影与正北方向(y 轴)的夹角,俯仰角 E 定义为目标矢量和水平面之间的夹角。

(3) 阵面直角坐标系

如图2,阵面直角坐标系 (X_A, Y_A, Z_A) 定义如下: X_A 轴和 Z_A 轴位于天线阵面平面内,互相垂直,分别为天线阵面的横坐标和纵坐标, Y_A 轴指向天线阵面的法向。 X_A, Y_A, Z_A 构成右手坐标系。 A_A 为阵面方位角,定义为正北方向顺时针旋转到阵面法线在水平面内的投影所经过的最小角度($0\sim 360^\circ$); A_E 为阵面俯仰角,定义为阵面法线与水平面的夹角($0\sim 90^\circ$); A_R 为阵面横滚角,定义为过坐标原点 O 且在天线阵面内的水平线与 X_A 轴的夹角($0\sim 90^\circ$)。

(4) 阵面球坐标系

阵面球坐标系 (R_A, A_{zi_A}, E_A) 以阵面直角坐标系为基础,阵面直角坐标系的 X_A 轴和 Y_A 轴构成基本平面, R_A 为目标距离阵面中心的斜距, A_{zi_A} 定义为目标矢量在基本平面的投影与 Y_A 轴的夹角, E_A 定义为目标矢量和基本平面之间的夹角。

1.2 坐标系转换

(1) 雷达直角坐标系与雷达球坐标系

由图1可以得到雷达直角坐标系和雷达球坐标系之间的转换关系如下

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos E \cdot \sin A \\ y = R \cdot \cos E \cdot \cos A \\ z = R \cdot \sin E \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ A = \arctan(x/y) \\ E = \arcsin(z/R) \end{cases} \quad (2)$$

(2) 雷达直角坐标系与阵面直角坐标系

阵面直角坐标系 (X_A, Y_A, Z_A) 可以由雷达直角坐标系 (X, Y, Z) 通过直角坐标系的旋转得到^[8-11]。

首先,坐标系绕 Z_A 轴顺时针旋转角度 A_A ,旋转矩阵为

$$L_1 = \begin{bmatrix} \cos A_A & -\sin A_A & 0 \\ \sin A_A & \cos A_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

然后,坐标系再绕 X_A 轴逆时针旋转角度 A_E ,旋转矩阵为

$$L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_E & \sin A_E \\ 0 & -\sin A_E & \cos A_E \end{bmatrix} \quad (4)$$

最后,坐标系绕 Y_A 轴顺时针旋转 A_R ,旋转矩阵为

$$L_3 = \begin{bmatrix} \cos A_R & 0 & \sin A_R \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_R & 0 & \cos A_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此,由雷达直角坐标系转换为阵面直角坐标系的公式为

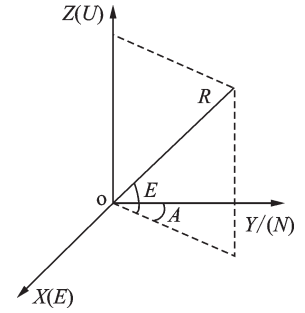


图1 雷达直角坐标系和雷达球坐标系

Fig.1 Radar rectangular coordinates and radar spherical coordinates

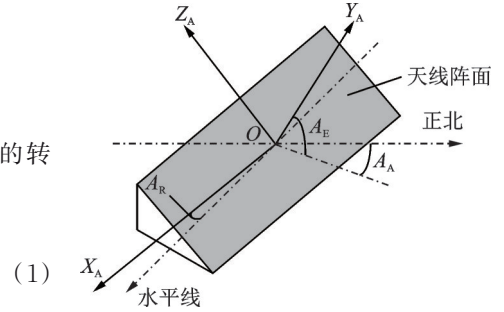


图2 阵面直角坐标系

Fig.2 Antenna array rectangular coordinates

$$\begin{bmatrix} x_{\Lambda} \\ y_{\Lambda} \\ z_{\Lambda} \end{bmatrix} = L_3 L_2 L_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

反之由阵面直角坐标系转换为雷达直角坐标系的公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = L_1^{-1} L_2^{-1} L_3^{-1} \begin{bmatrix} x_{\Lambda} \\ y_{\Lambda} \\ z_{\Lambda} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2 横滚角标校公式和仿真验证

笔者通过多年的工程实践和数学仿真发现:雷达天线阵面的横滚角会带来俯仰角测量误差,俯仰角测量误差值与阵面横滚角、阵面方位角、阵面俯仰角和目标方位近似满足式(8)的关系

$$\Delta E = E_m - E \approx -A_R \cdot \cos A_E \cdot \sin(A - A_{\Lambda}) \quad (8)$$

式中: E_m 为目标测量仰角, E 为目标真实仰角, ΔE 为目标测量仰角与实际仰角的差(即俯仰角测量误差), A_R 为天线阵面横滚角, A_E 为天线阵面俯仰角, A_{Λ} 为天线阵面方位角, A 为目标真实方位。

式(8)中,目标俯仰角测量误差近似与阵面横滚角成线性关系。因此,可以使用雷达自带的标校手段(例如ADS-B飞机标校或者TLE星历卫星标校)得到雷达俯仰角测量误差值,再根据式(8)计算出天线阵面的横滚角。通过该方法可以随时随地进行天线横滚角标校,不必使用额外的高精度激光测量设备,节约时间和成本,极大方便了雷达的精度标校。为了验证式(8)对俯仰角测量误差计算的准确性,进行了如下仿真:相控阵雷达的天线阵面方位角 $A_{\Lambda} = 90^\circ$,天线阵面俯仰角 $A_E = 20^\circ$,天线阵面横滚角 $A_R = 0.2^\circ$,测量的目标距离 $R = 100 \text{ km}$,目标的方位角 $A \in [45^\circ, 135^\circ]$,目标的俯仰角 $E \in [0^\circ, 60^\circ]$ 。根据式(1),目标在雷达直角坐标系下的坐标 (x, y, z) 为

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos E \cdot \sin A \\ y = R \cdot \cos E \cdot \cos A \\ z = R \cdot \sin E \end{cases} \quad (9)$$

再根据式(6)将目标转换到阵面直角坐标系下 $(x_{\Lambda}, y_{\Lambda}, z_{\Lambda})$

$$\begin{bmatrix} x_{\Lambda} \\ y_{\Lambda} \\ z_{\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_{\Lambda} \cdot \cos A_R - \sin A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \cdot \sin A_R & -\sin A_{\Lambda} \cdot \cos A_R - \cos A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \cdot \sin A_R & \cos A_E \cdot \sin A_R \\ \sin A_{\Lambda} \cdot \cos A_E & \cos A_{\Lambda} \cdot \cos A_E & \sin A_E \\ -\cos A_{\Lambda} \cdot \sin A_R - \sin A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \cdot \cos A_R & \sin A_{\Lambda} \cdot \sin A_R - \cos A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \cdot \cos A_R & \cos A_E \cdot \cos A_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于雷达在初始测量中横滚角未知,一般默认横滚角为 0° ,因此在测角过程中目标由阵面直角坐标系转换到雷达直角坐标系时,横滚角 A_R 的取值为 0° ,把 $A_R = 0^\circ$ 代入式(7)中可以得到

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_{\Lambda} & \sin A_{\Lambda} \cdot \cos A_E & -\sin A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \\ -\sin A_{\Lambda} & \cos A_{\Lambda} \cdot \cos A_E & -\cos A_{\Lambda} \cdot \sin A_E \\ 0 & \sin A_E & \cos A_E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\Lambda} \\ y_{\Lambda} \\ z_{\Lambda} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中 (x_m, y_m, z_m) 为横滚角取 0° 时的目标坐标(雷达直角坐标系下)测量值,再根据式(2)把 (x_m, y_m, z_m) 转换到雷达球坐标系下

$$\begin{cases} R_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2} \\ A_m = \arctan(x_m/y_m) \\ E_m = \arcsin(z_m/R_m) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)得到的目标测量仰角 E_m 与目标真实仰角 E 相减可以得到俯仰角测量误差 ΔE

$$\Delta E = E_m - E \quad (13)$$

通过式(9~13)可以计算出目标在不同方位角和俯仰角由横滚角带来的俯仰角测量误差,但是计算复杂且没有解析解,这里称之为方法1。通过式(8)的经验公式,也可以得到俯仰角测量误差的近似值,且误差值与横滚角成线性关系,这里称之为方法2。两种方法得到的俯仰角测量误差随目标方位角和俯仰角变化情况如图3。由图3可知,横滚角的存在确实带来较大的俯仰角测量误差,通过方法1得到的结果可以看出,横滚角为 0.2° 时,目标在方位 45° 、俯仰 60° 时俯仰角测量误差可达到 0.1415° 。如此大的俯仰角测量误差是高精度测量雷达(角度误差指标通常要求 $\leq 0.5 \text{ mrad}$, 0.5 mrad 即为 0.0286°)无法容忍的,因此对横滚角进行标校并修正非常有必要。同时通过图3也可以看出,通过方法2经验公式得到的俯仰角测量误差与方法1得到的结果基本相当,方法2与方法1得到的俯仰角测量误差值再作差的结果如图4所示。从图4中可以看出两种方法得到结果差距很小,最大值仅为 0.0087° ,均方根值为 0.0052° ,远小于高精度测量雷达的指标要求值。

因此,通过仿真验证可以得到结论:使用式(8)得到的俯仰角测量误差近似值是较为精准的,完全满足工程应用要求。

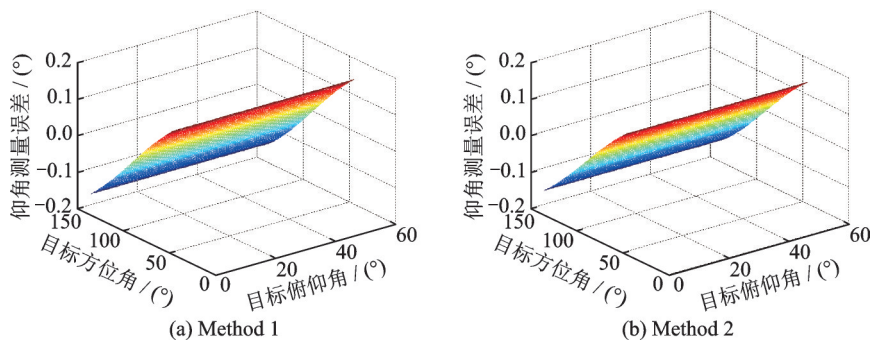


图3 俯仰角测量误差随目标方位角和俯仰角变化情况

Fig.3 Relationship of elevation measurement error and target's azimuth and elevation

3 横滚角标校方法和实验验证

基于式(8)中横滚角与俯仰角测量误差的线性关系,笔者提出了如下横滚角标校方法:

(1)相控阵雷达阵面固定不动,横滚角默认为 0° ,观察一个或者多个航段的民航飞机或者卫星,观测航段尽量覆盖较大的方位范围(建议覆盖天线法向 $\pm 30^\circ$ 内)。

(2)测量结果与ADS-B数据进行对比(对于民航飞机)或者与TLE星历数据进行对比(对于卫星目标),画出俯仰角测量误差随目标方位变化的曲线图,曲线图的横坐标为 $-\cos A_E \cdot \sin(A - A_A)$,曲线图的纵坐标为 ΔE 。

(3)对曲线进行一次函数最小二乘拟合,得到曲线的斜率 k , k 即为雷达阵面的横滚角 A_R 。

实验所用雷达为一部S波段相控阵雷达,根据上述方法步骤,首先雷达天线阵面固定不动,阵面方位角固定为 0° (即正北方向),阵面俯仰角固定为 20° 。然后雷达观测一个民航飞机航段,观测时间共560.7 s,该民航飞机航段覆盖雷达阵面方位的 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 。观测完成后,雷达测量结果与ADS-B数据

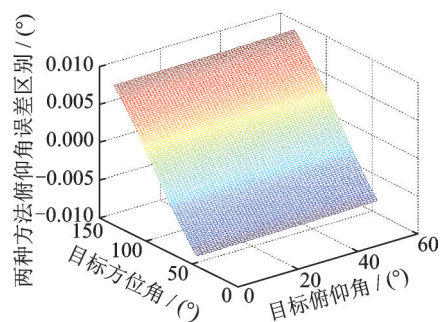


图4 两种方法得到的俯仰角测量误差的区别

Fig.4 Difference of elevation measurement error using two methods

进行对比,画出俯仰角测量误差随目标方位变化的曲线图(图5),曲线图的横坐标为 $-\cos A_E \cdot \sin(A - A_A)$,曲线图的纵坐标为 ΔE 。对曲线进行一次函数最小二乘拟合,得到曲线的斜率 $k=0.105$,即雷达阵面的横滚角为 0.105° 。

为了验证该方法得到的横滚角的准确性,使用高精度激光测量设备全站仪(型号:Leica/TS160)对雷达的横滚角进行测量,测量结果为 0.099° 。该方法所得结果与全站仪测量结果仅差 0.006° 。

为进一步验证该方法得到的横滚角对雷达测量精度的改善效果,在得到横滚角为 0.105° 后,又重新观测另一个民航航班,这次把横滚角值代入坐标转换公式。本次观测时间共 580.3 s ,该民航飞机航段覆盖雷达阵面方位的 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 。在观测完成后,雷达测量结果与ADS-B数据进行对比,画出俯仰角误差随目标方位变化的曲线图(图6)。本次观测的俯仰角均方根误差为 0.0043° ,远低于图5中的俯仰角均方根误差 0.0314° 。可见,由于得到了较为精确的雷达阵面横滚角,雷达的角度测量精度得到了极大的改善。

4 仰角测量误差对该方法的影响分析

在式(8)中,俯仰角测量误差 ΔE 全部由横滚角带来,这是本文为了方便对横滚角标校方法进行阐述而进行的简化。实际雷达测量中,由于阵面结构精度有限以及随机热噪声的影响, ΔE 还包含了俯仰角测量系统误差和随机误差。系统误差的主要原因是天线阵面的结构和伺服不够精确,是一个相对来说比较固定的误差,根据经验这个值通常在 0.1° 以内,系统误差通过合理的标校可以进行修正;随机误差主要由噪声带来,目标回波的信噪比越高随机误差越小。由噪声带来的测角随机误差 σ 与波束宽度 θ 成正比,与信噪比的平方根成反比^[3]

$$\sigma \propto \frac{\theta}{k_m \sqrt{2(S/N)}} \quad (14)$$

考虑俯仰角测量的系统误差和随机误差后,式(8)变为

$$\Delta E = E_m - E \approx E_{\text{bias}} + E_{\text{rand}} - A_R \cdot \cos A_E \cdot \sin(A - A_A) \quad (15)$$

式中: E_{bias} 为仰角测量的系统误差, E_{rand} 为仰角测量的随机误差。

为了验证在考虑俯仰角测量误差的情况下本文提出的方法依旧有效,做了如下仿真:相控阵雷达的天线阵面方位角 $A_A = 90^\circ$,天线阵面俯仰角 $A_E = 20^\circ$ (由于天线阵面俯仰角有系统误差 $E_{\text{bias}} = -0.1^\circ$,实际天线阵面俯仰角为 20.1°),天线阵面横滚角 $A_R = 0.2^\circ$,测量的目标距离 $R = 100\text{ km}$,目标的方位角 $A \in [45^\circ, 135^\circ]$,目标的俯仰角 E 为 3° 。

利用第2节中同样的坐标转换方法,可以得到以 $-\cos A_E \cdot \sin(A - A_A)$ 为横坐标,以 ΔE 为纵坐标的曲线(图7中的蓝色曲线)。这里考虑了3种不同的信噪比场景(20 dB 、 30 dB 、 40 dB),在波束宽度为

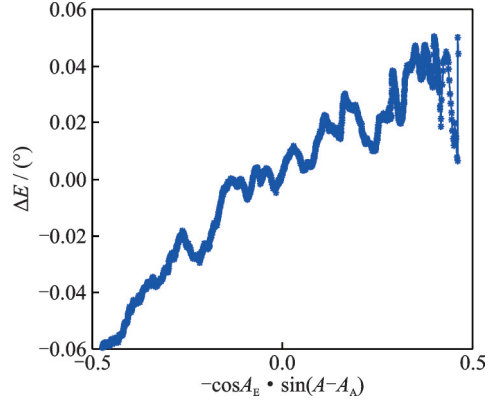


图5 俯仰角测量误差随目标方位变化的曲线图(横滚角标校前)

Fig.5 Curve of elevation measurement error with the change of target's azimuth (before roll angel calibration)

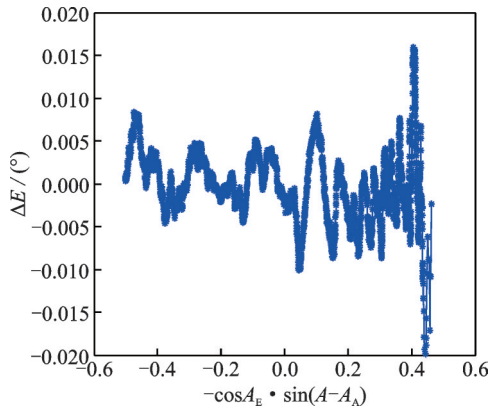


图6 俯仰角测量误差随目标方位变化的曲线图(横滚角标校后)

Fig.6 Curve of elevation measurement error with the change of target's azimuth (after roll angel calibration)

1°,斜率因子 k_m 取1.5时,由式(14)计算出的仰角测量随机误差分别为0.047°、0.015°、0.005°。图7中的红色直线为对蓝色曲线进行一次函数最小二乘拟合的结果。

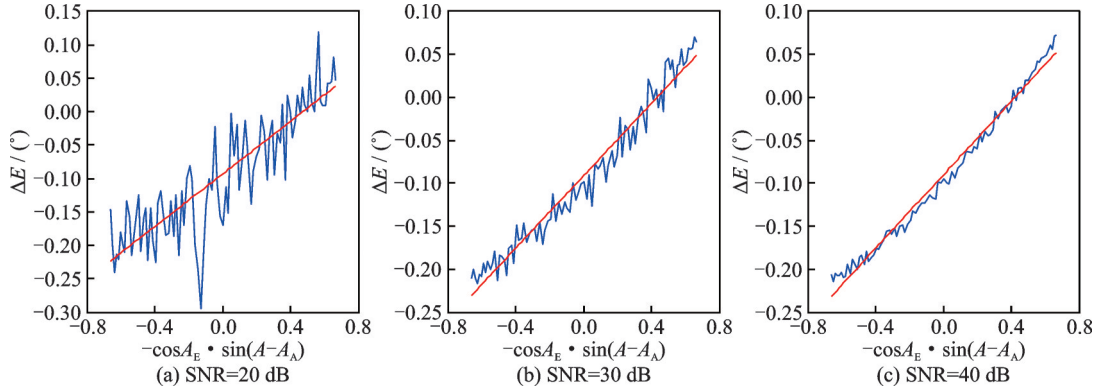


图7 俯仰角测量误差随目标方位变化的曲线图(考虑俯仰角测量系统误差和随机误差)

Fig.7 Curves of elevation measurement error with the change of target's azimuth (considering elevation systematic error and random error)

3种信噪比下拟合得到的一次函数如表1所示,通过拟合结果可以看出,不同信噪比下拟合的一次曲线斜率与真实横滚角之间的偏差基本都在0.01°附近,完全能够满足雷达测量精度的要求。通过结果也可以发现,横滚角标校结果随信噪比变化不大,这是因为对大量数据做了一次函数拟合,拟合过程中对俯仰角测量随机误差进行了平均。在第3节方法的步骤1中提到“观测航段尽量覆盖较大的方位范围(建议覆盖天线法向±30°内)”,因为覆盖较大的范围能够获取更多的采样数据,利于随机误差的平均;同时覆盖较广的方位角能够使曲线横坐标覆盖范围更大,利于曲线斜率的提取。

表1 不同信噪比下一次曲线拟合结果

Table 1 Results of curve fitting for different SNRs

信噪比/dB	拟合一次函数	真实横滚角/(°)	横滚角标校误差(一次曲线斜率与真实横滚角之差)/(°)
20	$y=0.2111x-0.0895$	0.2	0.0111
30	$y=0.2094x-0.0902$	0.2	0.0094
40	$y=0.2109x-0.0911$	0.2	0.0109

同时,观察拟合一次函数与y轴的交点,在3种信噪比下分别为-0.0895°、-0.0902°、-0.0911°,与俯仰角测量系统误差-0.1°基本一致。因此通过本文的方法,不仅能对雷达阵面的横滚角进行标校,也能同时对俯仰角测量的系统误差进行标校。

综上所述,本方法在雷达存在俯仰角测量系统误差和随机误差时,依然能够通过拟合直线的斜率获取较为精确的横滚角值,而且由于一次函数拟合对随机误差的平均作用,在采样点足够多的情况下信噪比对横滚角标校精度的影响不大。另外,由于俯仰角测量系统误差的存在,导致拟合后的直线不过原点,而偏离原点的数值与俯仰角的系统误差基本一致,因此通过该方法能够同时对横滚角和俯仰角系统误差进行标校。

5 结束语

本文提出的相控阵雷达横滚角标校方法,只需要利用雷达自带的角度标校手段得到目标的俯仰角

测量误差,就能够计算出雷达横滚角的数值。实验证明,该方法计算得到的横滚角和激光测量仪器测得的横滚角结果精度相当,使用该方法修正横滚角数值后的角度测量精度能够大幅提升。该方法不需要额外的测量设备,相比利用激光测量仪器对雷达横滚角进行标校的方法,节约了时间和成本,极大方便了雷达的精度标校。

参考文献:

- [1] STIMSON G W. Introduction to airborne radar[M]. Raleigh: Science Technology Publishing, Inc, 1998.
- [2] DING L, GENG F, CHEN J. Radar principles[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [3] WANG D, DING J, CHENG W. Precision tracking measurement radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [4] SKOLNIK M I. Introduction to radar systems[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2001.
- [5] ZHANG G. Principles of phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [6] HE Y, XIU J, GUAN X. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [7] WEN D, MA M, LIU Z. Three-dimensional coordinate transformation in beam scheduling of phased array radar[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(12): 25-26.
- [8] ZHU R, SHEN F, GAO Q. Simulation of angle measurement error of passive detection for shipborne phased array radar under platform sway[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020, 43(5): 13-16.
- [9] HU W, FU J. Research on algorithm of coordinate transformation using for attitude determination compensation under dynamic circumstances[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(2): 39-41.
- [10] FU H, XUE J, YU S, et al. An attitude compensation method for multifunction phased array radar[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(3): 84-88.
- [11] 常城. 基于动态水平仪的非行进间工作雷达姿态角补偿方法[J]. 工业技术创新, 2021, 8(3): 75-78.
CHANG Cheng. The compensation method of non-moving radar attitude angle based on dynamic level[J]. Industrial Technology Innovation, 2021, 8(3): 75-78.

作者简介:



陈皓(1989-),通信作者,男,博士,研究方向:雷达系统设计,E-mail: cetc_chenhao@foxmail.com。



雷艺(1990-),女,博士,研究方向:光纤通信、MI-MO、信道编码,E-mail: leiyi@hfut.edu.cn。

(编辑:陈珺)