

分布式阵列雷达基线位置和相位误差的卫星标校方法

陆 潞* 高梅国

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘 要: 在采用相位干涉测角的分布式阵列雷达系统中, 系统阵面相位中心位置误差和相位误差对测角精度影响很大, 且阵面相位中心位置与物理中心位置通常不一致, 因此需要对其进行精细标准补偿。传统的雷达系统误差校正方法通常采用远场辐射源来对雷达进行校正, 但是对于单元间距很大的分布式阵列空间目标监视雷达而言, 要实现远场辐射校准往往很难。该文提出一种利用多弧段的精轨卫星精密星历对阵面相位中心位置误差引起的相位误差进行白化, 然后搜索相位中心坐标和相位差使匹配方差最小的校正方法, 无需使用特定仪器测量, 且能很好地标定误差; 计算机仿真以及实测数据验证了使用该文校正方法后, 测角精度得到了显著提升。

关键词: 分布式雷达; 卫星标校; 误差校正; 相位干涉测角

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2896-07

DOI: 10.11999/JEIT181152

A Satellite Calibration Method for the Baseline Coordinate and Phase Difference of Distributed Radar Array

LU Lu GAO Meiguo

(Department of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the system of distributed radar array system using phase interference angle measurement, the phase center coordinate error of arrays and the phase difference error have relatively large influence on the angle measurement. The phase center position is often inconsistent with physical center position. Thus it is necessary to compensate these errors precisely. Far field radiation sources are often used to calibrate radar in traditional calibration methods. However, it is usually hard to achieve far field radiation sources for distributed radar array with large space between units surveilling space targets. In this paper, a calibration method based on the precise ephemeris of refined orbit satellites without measuring with special instruments is proposed. The phase error caused by coordinate error can be whitened by the precise ephemeris of multiple arcs, and the coordinate and phase difference will be searched out by matching the minimum variance. This method can get the errors easily. The simulation results and actual data verify that angle measurement accuracy gets large improvement by the method.

Key words: Distributed radar; Satellite calibration; Error calibration; Phase interference angle measurement

1 引言

对于空间监视雷达而言, 采用分布式布阵方式是提高雷达威力、测量精度的有效方式, 而且为了提高雷达孔径, 每个单元常采用阵面体制。常见的雷达测角方法主要分为相位法测角和振幅法测角两大类, 而在分布式多基线雷达系统中常使用相位干涉进行测角^[1,2], 利用目标来波到达不同阵面的波程差来推导来波信号的方向, 其测角精度与基线长度、各阵面之间的相位差、信噪比等密切相关。因此, 提高测角精度也通常从这些方面着手。

实际系统中由于各种原因会存在很多误差, 这些误差的存在会使得最终的测角结果与真实值相差甚远甚至完全测错, 其中对测角精度影响较大的几个主要误差有:

(1) 阵面相位中心误差(基线误差): 测角时应使用阵面的相位中心, 而测量给出的是阵面的物理中心, 阵面的相位中心和物理中心一般情况下不在同一点上, 且物理位置中心存在测量误差;

(2) 通道相位误差: 由于阵面之间线缆长度、接口、电路等原因产生的相位差, 这个相位差在短期内通常是不变的。

这些误差的存在会导致最终的测角结果与真实值差别较大, 因此需要对系统进行校正。

收稿日期: 2018-12-14; 改回日期: 2019-05-19; 网络出版: 2019-05-27

*通信作者: 陆潞 lulu@bit.edu.cn

传统的雷达系统误差校正方法通常采用远场辐射源来对雷达进行校正^[3-6]。文献[7]利用已知的阵列旋转角度，基于最大似然准则获得阵列幅相误差、校正源信号方向角及其复振幅的无模糊估计；文献[8]将阵面相位、位置误差作为一整体进行估计，可以得到较高的校正精度。但是对于单元间距很大的分布式阵列空间目标监视雷达而言，要实现远场辐射校准往往很难。通过比对雷达量测结果和精轨卫星的精密星历，进行分析解算，可以综合考虑雷达系统内的各项误差，并统一地予以补偿。目前，这种卫星标定方法已逐渐成为国内研究关注的重点^[9-13]。文献[14]对雷达误差参数进行了建模，并结合精轨卫星的精密星历利用最小二乘法进行了解算，分析了算法的有效性和可行性。文献[15]针对大型跟踪测量雷达的特点，对零值误差、天线轴系误差和电波折射误差进行了建模，并利用卫星星历和量测数据对误差值进行了解算验证。但目前已有的卫星标校方法通常仅针对距离、角度零值等方面进行建模，缺少对阵面相位、位置误差等具体产生误差因素的建模，因此当距离、角度等误差不是固定值时往往误差较大。

本文结合分布式雷达的特点，对各阵面相位中心坐标误差和阵面间固定相位差误差对测角的影响进行了建模和分析，并提出一种利用多弧段的精轨卫星精密星历对阵面相位中心位置误差引起的相位误差进行白化，然后搜索相位中心坐标和相位差使匹配方差最小的校正方法，最后使用理论仿真和实测数据进行了验证。

2 角度测量原理

典型的相位干涉仪测角原理如图1所示。

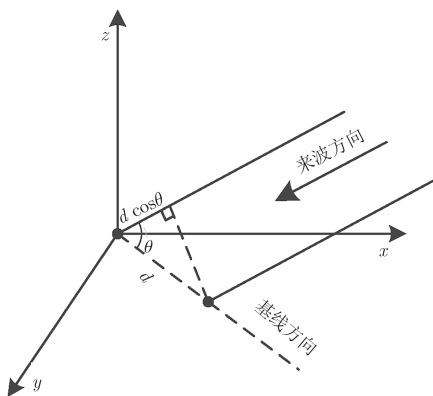


图1 相位干涉仪测角原理

图1中 d 为分布阵面间距， θ 为来波方向与基线之间的夹角。由图1可见，两个阵面对应接收通道的相位差 ψ 为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta \quad (1)$$

显然，只有当基线长度和相位差的精度较高时，才能获得理想的测角精度。

阵面相位中心坐标误差主要分为绝对位置误差和相对位置误差。绝对位置误差是指所有的阵面作为一个整体相对目标的位置误差，而相对位置误差是指分布式雷达中各阵面间相对位置的误差。只有在目标与观测站之间的连线和阵面绝对位置误差垂直时，测角误差最大。

对于空间监视雷达而言，目标与观测站之间的距离一般在100 km以上，而通常通过测绘得到的阵面绝对位置误差在1 m以内，因此最大角度误差 $\Delta\theta_{\max}$ 可以表示为

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{\Delta p_{\max}}{2\pi R_{\min}} \times 360^\circ \approx 0.000573^\circ \quad (2)$$

其中， $\Delta p_{\max}$ 表示阵面绝对位置误差的最大值， $R_{\min}$ 表示目标与观测站之间距离的最小值。可见在最极端的情况下由于阵面绝对位置误差导致的测角误差也是很小的。因此在标校过程中只需考虑对阵面间的相位位置误差进行校正即可。

3 标校方法

3.1 校正数学模型

对于分布式雷达系统而言，通常选择一个阵面作为参考阵面，并以它为原点建立站心空间直角坐标系。设目标所在位置的单位方向向量 $\mathbf{I}_t$ 为

$$\mathbf{I}_t = [x_t, y_t, z_t]^T \quad (3)$$

其中， T 表示转置。这个值可以通过精密星历解算得到。

一接收阵面的真实坐标矢量 $\mathbf{P}_0$ 为

$$\mathbf{P}_0 = [x, y, z]^T \quad (4)$$

实测两阵面之间的相位差 ψ 包含由基线产生的波程相位差 $\tilde{\psi}_b$ 、阵面间的系统相位差 $\tilde{\psi}_s$ 和噪声项 n

$$\begin{aligned} \psi &= \tilde{\psi}_b + \tilde{\psi}_s + n \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{I}_t^T \cdot \mathbf{P}_0 + \tilde{\psi}_s + n \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_t \cdot x + y_t \cdot y + z_t \cdot z) + \tilde{\psi}_s + n \end{aligned} \quad (5)$$

其中， λ 为雷达工作所使用的电磁波波长， n 为均值为0的高斯白噪声。通常情况下在短期内，阵面间的系统相位差是一个固定值。

由于阵面的真实相位中心坐标是很难精确已知的，设实际测角中使用的该阵面相位中心坐标矢量 $\mathbf{P}^*$ 为

$$\mathbf{P}^* = [x^*, y^*, z^*]^T \quad (6)$$

则用实测得到的相位差 ψ 减去该位置下由于波程差产生的相位差 ψ^* 可得

$$\begin{aligned}\psi - \psi^* &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{I}_t^T \cdot \mathbf{P}^* + \tilde{\psi}_s + n \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [x_t \cdot (x - x^*) + y_t \cdot (y - y^*) \\ &\quad + z_t \cdot (z - z^*)] + \tilde{\psi}_s + n\end{aligned}\quad (7)$$

从式(7)中可以观察到, 等式右边被分成了3部分, 分别是由于阵面相位中心坐标误差产生的相位误差项、固定相位差项以及噪声项。第1项相位误差在使用的雷达阵面相位中心坐标与真实坐标之间存在误差时就会出现, 且只有在目标尽量多地处在不同位置, 即不同弧段角度上, 才会呈现出白化的趋势。第2项是一个固定值, 无论目标怎样变化也不会随之改变。第3项为噪声项, 且是服从高斯分布的白噪声。因此在弧段数和样本数足够的情况下, 该相位差之差就会呈现出白化的特性。

由于目标在不同位置的单位方向向量上的3个坐标是相互独立的, 它们两两之间的协方差为0, 因此对式(7)等号两侧求方差后可得

$$\begin{aligned}D(\psi - \psi^*) &= \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \cdot (x - x^*)^2 \cdot D(x_t) \\ &\quad + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \cdot (y - y^*)^2 \cdot D(y_t) \\ &\quad + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \cdot (z - z^*)^2 \cdot D(z_t) + D(n)\end{aligned}\quad (8)$$

其中, $D(\cdot)$ 表示方差, 即匹配方差。显然当 $x - x^* = 0, y - y^* = 0, z - z^* = 0$ 时, 匹配方差可以取到最小值 $D(n)$, 即只有当计算使用的阵列坐标与真实的阵列坐标之间不存在误差时, 测角误差的方差最小, 仅包括噪声方差。所以, 在假设系统内的噪声为方差固定的高斯白噪声的前提下, 需要样本覆盖多弧段, 且每个弧段内有多个检测样本, 以使得由于阵面相位中心坐标误差产生的误差和噪声导致的误差均趋于白化, 那么就可以通过匹配方差是否最小来判断阵面相位中心坐标是否与真实坐标重合。

所以在多弧段、多样本数的精轨星条件下, 按一定步长遍历搜索最大可能误差范围内所有的坐标, 并计算所有精轨星在这些坐标上的阵面间相位差与实测阵面间相位差之差的方差, 选取方差最小值所对应的坐标, 即可获得阵面相位中心的真实位置。

对式(7)等号两侧求均值可得

$$\begin{aligned}E(\psi - \psi^*) &= E\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_t \cdot (x - x^*)\right) \\ &\quad + E\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot y_t \cdot (y - y^*)\right) \\ &\quad + E\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot z_t \cdot (z - z^*)\right) + \tilde{\psi}_0 + E(n)\end{aligned}\quad (9)$$

因为噪声项为0均值高斯白噪声, 因此当 $x - x^* = 0, y - y^* = 0, z - z^* = 0$ 时有

$$E(\psi - \psi^*) = \tilde{\psi}_0\quad (10)$$

在搜索到目标的真实位置之后, 将该坐标值代回到实测与搜索相位间的差值中求均值(式(9))即可得到固定相位差。

3.2 模糊范围和标校精度分析

对由基线产生的波程相位差 $\tilde{\psi}_b$ 左右两边分别对 x, y 和 z 求偏导后, 可以得到对应变化 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 后产生的相位变化 $\Delta\tilde{\psi}_x, \Delta\tilde{\psi}_y$ 和 $\Delta\tilde{\psi}_z$

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\psi}_x, \Delta\tilde{\psi}_y, \Delta\tilde{\psi}_z \end{bmatrix}^T = \frac{2\pi}{\lambda} [x_t \cdot \Delta x, y_t \cdot \Delta y, z_t \cdot \Delta z]^T\quad (11)$$

因此坐标在 x, y, z 方向上使得相位差不发生模糊的最大位置误差, 即使得相位变化小于 2π 的 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 的范围为

$$\left\{ (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \mid \Delta x < \frac{\lambda}{|x_t|}, \Delta y < \frac{\lambda}{|y_t|}, \Delta z < \frac{\lambda}{|z_t|} \right\}\quad (12)$$

为使得计算得到的模糊范围适用于所有目标, 应根据目标的位置分布情况选取目标单位向量在每个轴上所能取到的最大值, 并结合实际系统中可能出现的最大误差, 取其中较小的值, 即为对应坐标上所能取到的最大的误差值。

对式(1)左右两边分别对 θ 求导后, 可以得到由 θ 变化 $\Delta\theta$ 产生的角度变化 $\Delta\psi$

$$\Delta\psi = \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \cdot \Delta\theta = -\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \cdot \Delta\theta\quad (13)$$

又因为前面已经得到了 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 与 $\Delta\psi$ 的关系, 因此当 $\Delta\theta$ 取期望的测角精度时可以得到对各坐标标校精度的要求, 即

$$\begin{cases} (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \mid \Delta x < \min_{x_t} \left| \frac{-d \cdot \sin\theta \cdot \Delta\theta}{x_t} \right|, \\ \Delta y < \min_{y_t} \left| \frac{-d \cdot \sin\theta \cdot \Delta\theta}{y_t} \right|, \\ \Delta z < \min_{z_t} \left| \frac{-d \cdot \sin\theta \cdot \Delta\theta}{z_t} \right| \end{cases}\quad (14)$$

其中, $\min$ 表示取最小值。即在仅考虑由于坐标误差引起的测角误差的情况下, 为满足测角精度要求, 坐标误差需要满足式(14)要求。

3.3 精轨卫星选择

通常情况下对于精度要求较高的雷达而言, 用于标校雷达的精轨卫星的数据精度要达到雷达的10倍以上, 而一般通过单站激光测距获得的数据精

度可以达到厘米级，通过国家天文台获得的多站定位精轨数据完全可以满足绝大部分雷达标校的要求。在选择卫星时，应尽量选择受大气摄动等影响小，能和理论卫星轨道符合得很好，且定轨精度高的卫星。

3.4 具体步骤

(1) 选取一个阵面作为基准，其余各阵面作为校正对象；

(2) 选取多个弧段精轨卫星的测量相位，并计算与基准阵面间的相位差，并确保每个弧段内有多条检测数据；

(3) 根据式(12)和式(14)分别计算得到坐标搜索范围和步长，按步长遍历最大可能误差范围内的所有坐标；

(4) 根据式(8)将实测相位差与理论相位差作差并求匹配方差，选取匹配方差最小的坐标即为相位中心真实所在的坐标，再根据式(10)计算该阵面与基准阵面间的固定相位差；

(5) 重复上述过程，直到所有阵面都校正完毕。

4 计算机仿真

为了验证本文校正算法的有效性，采用MATLAB仿真比较了文献[8]中提出的算法与本文算法对阵面相位中心位置和相位误差的校正效果。假设分布式阵列雷达载频为1 GHz，信号带宽4 MHz，采样率10 Msps，雷达阵列排布方式如图2所示，其中，1阵面为坐标轴原点，正东方向为 x 轴正方向，正北方向为 y 轴正方向，坐标单位为m，各子阵在同一水平面上，阵面1, 2, 5构成基线A，阵面1, 3, 4构成基线B，入射方向与基线A的夹角称为 θ 角，与基线B的夹角称为 φ 角。

共仿真生成2组样本数据，分别作为标校集和测试集，其中标校集包含多个入射角度下的20条数据，信号处理后信噪比为30 dB，测试集包含多个入射角度下的100条数据，信号处理后信噪比为20 dB。使用标校集对坐标和相位进行校正，然后在校正前后分别对测试集的100条不同入射角数据进行处理，最终标校前后的坐标和固定相位差如表1所示。

针对文献[8]中的标校方法，分别仿真了每个入

射角度下1个快拍和200个快拍的标校情况。标校前后的测角误差情况如图3所示。由于各测试点两条基线之间夹角的误差情况基本一致，所以这里仅画出了与基线A之间的夹角情况进行比对。

从图3中可以看出，标校后的测角精度有了明显的提升，同样的测试样本下，使用未进行标校的坐标的测角误差标准差要明显高于标校过坐标的结果，甚至出现测错的情况。文献[8]中的算法在每个入射角数据快拍数较低的情况下无法进行有效校正，要想获得较高的标校精度必须使用大量的快拍，而本文提出的算法则对快拍数没有要求。

同时还仿真了在标校弧段数为20的情况下，本文算法标校后的测试集测角精度随标校集信噪比变化的曲线以及在标校集信号处理后信噪比为20 dB的情况下，标校后的测试集测角精度随标校集使用弧段数变化的曲线，如图4所示。

从图4中可以看出，使用本文的标校算法标校之后，呈现出使用标校集信噪比越高、使用弧段数越多，标校后的测角精度越高的特点。在实际使用中应根据实际情况尽可能选取信噪比大的、尽量多弧段数的数据作为测试集来进行标校，至少要超过8个弧段，这也与大多数定理相吻合。

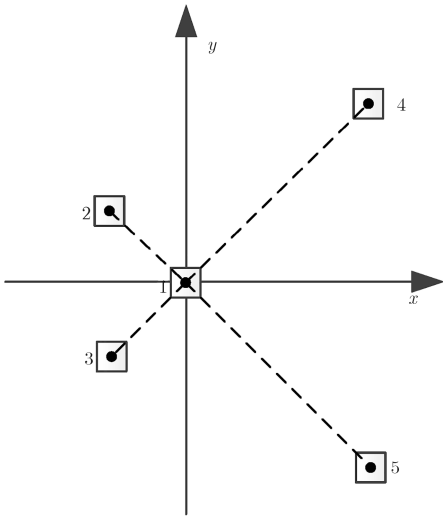


图2 雷达阵列排布方式

表1 各子阵坐标

阵面编号	设计坐标(m)	实际坐标(m)	固定相位差误差(rad)	坐标标校结果(m)	固定相位差标校结果(rad)
1	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	0	(0, 0, 0)	0
2	(-20, 20, 0)	(-20.22, 20.03, 0.0073)	0.1	(-20.2202, 20.0308, 0.0091)	0.1120
3	(-20, -20, 0)	(-19.78, -20.07, 0.0048)	-2.1	(-19.7295, -20.0687, 0.0045)	-2.1150
4	(50, 50, 0)	(49.85, 50.11, 0.042)	0.8	(49.8503, 50.1114, 0.0374)	0.7509
5	(50, -50, 0)	(50.05, -50.18, -0.012)	-0.7	(50.0495, -50.1788, -0.0215)	-0.7271

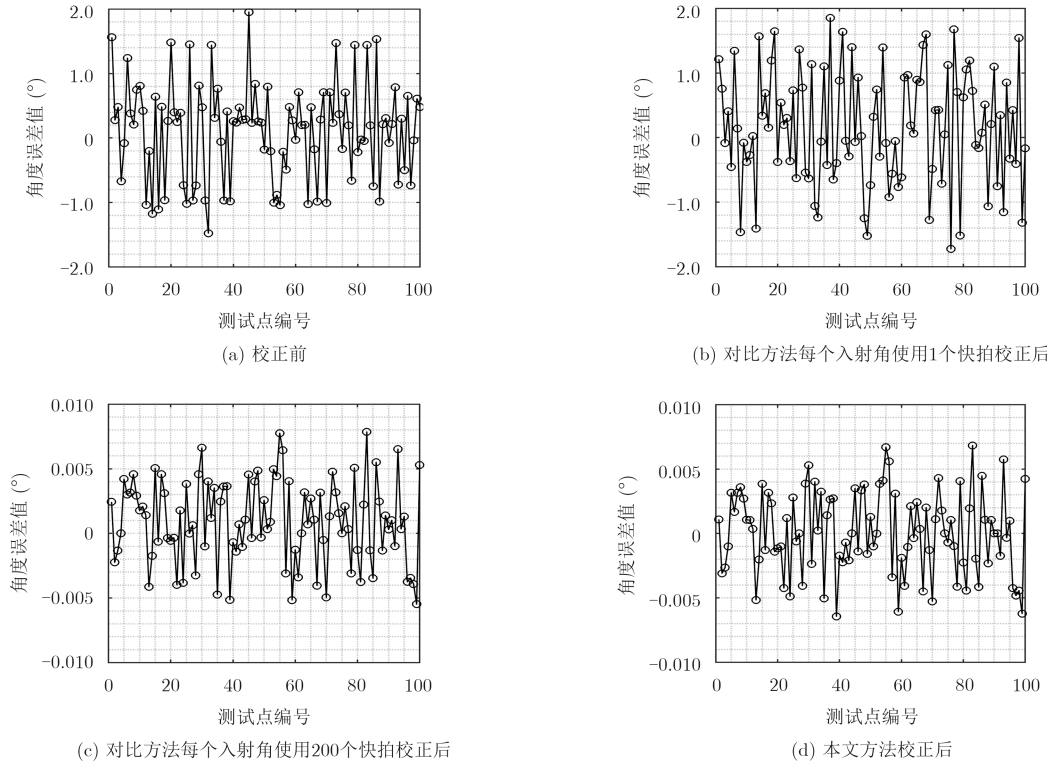


图3 校正前、使用对比标校方法以及本文标校方法后各测试点与基线A夹角误差情况对比

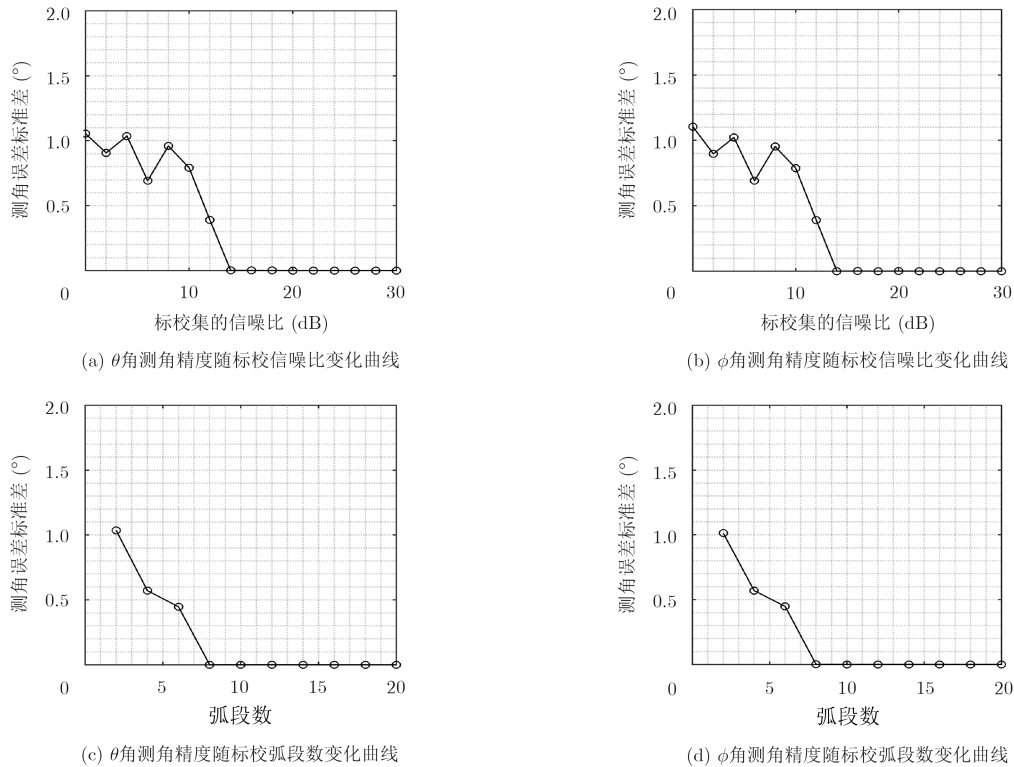


图4 使用本文标校算法后测角精度随标校集信噪比及使用弧段数变化关系曲线

5 实测数据验证

某雷达系统由两条基线A和B组成, 目标入射方向与基线A的夹角称为 θ 角, 与基线B的夹角称为 φ 角。雷达共观测15条精轨星弧段, 如表2所示。

为方便表示目标在检测时所在的位置, 表2中列出的是目标在该弧段内所有检测点中间时刻的角度值。

随机选取了其中10个弧段作为标校数据对相位中心坐标和固定相位差进行标校, 并对剩余的5个

弧段使用标定得到的值进行修正,将修正前后得到的精轨星测量角度值与精轨星真实角度进行对比,共重复进行了3次实验。标校使用的弧段编号以及

修正前后的角度误差标准差如表3所示。从表中可见,经修正后,雷达的角度误差明显得到很大改善,验证了使用精轨星标校方法的可行性与可靠性。

表 2 雷达观测范围内检测卫星统计

弧段编号	检测点数	最大信噪比(dB)	平均信噪比(dB)	θ 角($^{\circ}$)	φ 角($^{\circ}$)
1	43	27.6312	23.6608	61.5580	118.3957
2	15	18.5448	17.1017	80.5948	99.4004
3	35	32.0955	23.8029	96.6451	83.3213
4	45	23.7853	19.0944	97.0084	83.0646
5	4	14.2794	13.8117	61.5526	118.3925
6	39	34.1118	26.6359	97.5285	82.4456
7	41	19.2383	16.3595	73.1886	106.8396
8	44	23.1740	18.8095	98.0682	81.9641
9	22	15.7978	14.1222	78.8579	101.2333
10	32	17.5476	14.8111	104.6093	75.4005
11	39	34.1118	26.6359	97.5572	82.5389
12	41	19.2383	16.3595	73.2011	106.8463
13	44	23.1740	18.8095	98.0618	81.9602
14	22	15.7978	14.1222	78.8513	101.2298
15	32	17.5476	14.8111	104.6212	75.4086

表 3 修正前后测角误差标准差($^{\circ}$)

实验编号	修正前 θ 角标准差	修正前 φ 角标准差	修正后 θ 角标准差	修正后 φ 角标准差
1	0.2127	0.05465	0.003815	0.006577
2	0.3085	0.06186	0.003523	0.006966
3	0.3079	0.05706	0.003321	0.007179

6 结论

利用精轨卫星对雷达系统误差进行标校是一种先进方便的雷达误差标定方法,本文利用多弧段的精轨卫星精密星历对阵面相位中心位置误差引起的相位误差进行白化,然后搜索相位中心坐标使匹配方差最小以找到阵面真实的相位中心坐标和阵面间相位差,并进行了MATLAB仿真和实测数据验证。仿真结果和实测数据表明采用该校正方法能有效地对阵列误差进行校正,同时测角精度有极大的提升。与其它标校方法相比,该文的标校方法只涉及到复数乘法以及求方差等较为基础的运算,而其它常规的标校方法通常需要使用到矩阵求逆等高复杂度的计算,且对于每个入射角下的快拍数没有要求,实现简单,具有较强的实用性。

参 考 文 献

- [1] PASALA K, PENNO R, and SCHNEIDER S. Novel wideband multimode hybrid interferometer system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1396–1406. doi: 10.1109/TAES.2003.1261135.
- [2] PENNO R, PASALA K, and SCHNEIDER S. A novel multi-mode interferometer system[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, USA, 2001: 2/767-2/778. doi: 10.1109/AERO.2001.931257.
- [3] 蒋立民. 地面测控雷达角度标校技术[J]. 装备制造技术, 2018(3): 129–131. doi: 10.3969/j.issn.1672-545X.2018.03.041. JIANG Limin. Angle calibration technology of ground TT & C radar and angle calibration technology of ground TT & C radar[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018(3): 129–131. doi: 10.3969/j.issn.1672-545X.2018.03.041.
- [4] 吴奋陟, 郭绍刚, 朱飞虎, 等. 基于标定场的激光雷达两步标定方法[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 57–62. WU Fenzhi, GUO Shaogang, ZHU Feihu, et al. Two-step calibration method of LIDAR sensor based on calibration field[J]. *Aerospace Control and Application*, 2017, 43(4): 57–62.
- [5] 文玲, 高沅铭, 常宇亮. 基于标校球的瞬态极化雷达校准方法[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(6): 580–584, 589. WEN Ling, GAO Yunming, and CHANG Yuliang.

- Calibration method for instantaneous polarimetric radar based on metal sphere[J]. *Radar Science and Technology*, 2012, 10(6): 580–584, 589.
- [6] 马可, 张远安, 王仁涛, 等. 主动防护雷达的角度标校[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 30–33, 41. doi: 10.3969/j.issn.1002-7300.2017.01.007.
- MA Ke, ZHANG Yuan'an, WANG Rentao, *et al.* Angle calibration of active protection radar[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(1): 30–33, 41. doi: 10.3969/j.issn.1002-7300.2017.01.007.
- [7] 程丰, 龚子平, 张驰, 等. 一种基于旋转测量的阵列幅相误差校正新方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1899–1905. doi: 10.11999/JEIT161058.
- CHENG Feng, GONG Ziping, ZHANG Chi, *et al.* A new rotation measurement-based method for array gain-phase errors calibration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1899–1905. doi: 10.11999/JEIT161058.
- [8] 袁自月, 牛一鸣, 杨国, 等. 一种阵列天线阵元幅相、位置误差校正方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2232–2237. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01807.
- YUAN Ziyue, NIU Yiming, YANG Guo, *et al.* A calibration method for sensor gain/phase and position errors of array antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2232–2237. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01807.
- [9] 袁勇, 李革, 马鹏斌, 等. 雷达的卫星标定技术方法[J]. 陕西科技大学学报, 2008, 26(4): 109–113. doi: 10.3969/j.issn.1000-5811.2008.04.026.
- YUAN Yong, LI Ge, MA Pengbing, *et al.* Satellite calibration of radar[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2008, 26(4): 109–113. doi: 10.3969/j.issn.1000-5811.2008.04.026.
- [10] 王建富, 吴金海, 钮俊清, 等. 一种雷达卫星标校中的野值剔除方法[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(3): 54–57. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.03.013.
- WANG Jianfu, WU Jinhai, NIU Junqing, *et al.* An outlier elimination method in satellite calibration for radar[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2017, 40(3): 54–57. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.03.013.
- [11] 杨磊, 刘冰, 李晓勇. 基于参数估计的动平台雷达等效轴参数准实时标定方法[J]. 无线电工程, 2016, 46(7): 93–97. doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2016.07.24.
- YANG Lei, LIU Bing, and LI Xiaoyong. Study on equivalent axis parameter calibration for radar system on moving platform based on parameter estimation[J]. *Radio Engineering*, 2016, 46(7): 93–97. doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2016.07.24.
- [12] 郭佳意, 钮俊清. 雷达卫星标校的工程实现研究[J]. 空军预警学院学报, 2014, 28(3): 165–167. doi: 10.3969/j.issn.2095-5839.2014.03.003.
- GUO Jiayi and NIU Junqing. Engineering implementation of satellite calibration for radar[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2014, 28(3): 165–167. doi: 10.3969/j.issn.2095-5839.2014.03.003.
- [13] 李鹏飞, 郝宇, 费华平, 等. 基于多直线融合的雷达误差标定算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(6): 682–686. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.019.
- LI Pengfei, HAO Yu, FEI Huaping, *et al.* Radar calibration error correction algorithm based on segment track linear fitting[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(6): 682–686. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.019.
- [14] 钟霞, 张建伟, 于灏. 基于最小二乘估计的雷达系统误差卫星标定方法[J]. 空间科学学报, 2013, 33(5): 554–560. doi: 10.11728/cjss2013.05.554.
- ZHONG Xia, ZHANG Jianwei, and YU Hao. A method of satellite calibration for radar's system error based on least-square estimation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(5): 554–560. doi: 10.11728/cjss2013.05.554.
- [15] 张海成, 杨江平, 王晗中. 大型跟踪测量雷达的卫星标定方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(5): 470–472, 481. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.05.004.
- ZHANG Haicheng, YANG Jiangping, and WANG Hanzhong. Study on satellite calibration method for tracking and instrumentation radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2014, 12(5): 470–472, 481. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.05.004.
- 陆 潞: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、抗干扰.
- 高梅国: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统与信号处理, 空间目标探测、成像与识别技术等.