

文章编号:1004-9037(2012)01-0000-00

相控阵测量雷达跟踪起伏动目标精度分析

马海潮¹ 周立锋¹ 蔺建英²

(1. 92941 部队 96 分队; 2. 91245 部队, 辽宁, 葫芦岛, 125000)

摘要:目标不同的航路及其运动特点对雷达测量数据质量影响很大。为了估算整个航路目标动态定位精度,依雷达测量目标工作原理,给出航路分段处理原则。对雷达测量数据与GPS测量真值比对的一次差,提出了基于三次B样条的雷达系统误差分离方法。通过处理某飞行任务的大量测量数据,估算出了不同航路的雷达动态测距、测角系统误差和随机误差。结果表明雷达测距系统误差与斜距成正比;测角系统误差为设计指标的2倍多;其随机误差与设计指标相符。

关键词:相控阵雷达;精度评估;系统误差;随机误差;样条函数

中图分类号:V557⁺.5;TN957.52⁺4

文献标识码:A

Accuracy Analysis of Phased-Array Measurement Radar Tracking Undulate Target

Ma Haichao¹, Zhou Lifeng¹, Lin Jianying²

(1. Element 96 Unit 92941; 2. Unit 91245, Huludao, Liaoning, 125000, China)

Abstract: Different voyage routes and moving characteristics of a target can affect heavily radar measured data quality. According to phased-array measurement radar tracking target principle, a whole voyage route is divided into segments such as straight lines or curves to be processed for target position accuracy estimation. Based on the cubic B-spline function, a separation method of radar system errors from the difference between radar measured values and true values is proposed. The system errors and random errors of radar range, azimuth and elevation in different segments have been estimated for a lot of flight tasks. The result shows the dynamic system error of radar range is direct proportional to range; angle system errors are two times of their specifications, but random errors are consistent with their accuracies.

Key words: phased-array radar; accuracy evaluation; system error; random error; spline function

引 言

雷达跟踪精度可用综合误差或分别用系统误差和随机误差表示,通常采用后者表述。通常,雷达测距测角精度设计指标或理想值为雷达跟踪非起伏目标及信杂比 ≥ 12 dB情况下的测距、测角系统误差和随机误差。空心金属箔光滑圆球视为非起伏目标或理想的点目标。因其的RCS与观测方向无关,故其回波不随时间起伏,也就不会引起角跟踪精度下降。为此,雷达验收时,采用跟踪标准金属球方式用于检验或考核雷达随机误差;而对其系统

误差的考核,采用飞机校飞方式进行。航路高度、航路方向及航路长度等航路参数直接影响其精度^[1]。通常,要求飞机保持等速直航飞行,对航路参数如航路高度、长度和捷径等设计苛刻。不难得出,雷达的精度是指某些较有力的条件下所能达到的精度指标。然而,飞机实际执行任务时,其姿态和航路参数变化多端,致使雷达视在中心不断变化或引起角噪声、角闪烁或目标起伏,使得测距和测角精度变差。于是,雷达实际跟踪目标精度要低于设计指标或理想值。因此,研究和评估雷达跟踪起伏目标时所能达到的实际精度,无论对目标引导还是对目标制导,更具有重要实际意义。

通用的评估雷达设计精度指标验收方法不适用雷达实际参加任务的数据处理。因满足该方法处理要求的数据量很少,航路上大量数据不能处理,显然不切实际情况。高精度 GPS 定位在雷达精度检验领域得到应用,取得一些研究成果^[2,3,4]。然而,未能解决雷达跟踪动目标全航路测量数据精度处理问题。在实际执行任务中,雷达跟踪各种目标均为起伏目标,且目标运动特性多样性如匀速、加速、直航(迎头或追尾)、过捷或转弯等,致使测量数据误差情况复杂。为了评估雷达于航区空域实际执行任务中目标航迹定位精度,对目标飞行不同的航路分别进行处理,以定量地分析不同段落的误差。本文给出了一种基于 B 样条函数雷达跟踪动态目标精度分析方法,对测角测距系统误差和随机误差进行了有效分离,评估出目标各测元不同航路的误差特性。该方法已成功地用于相控阵测量雷达全航区数据处理,提高了目标定位精度,为指挥和控制系统提供了可靠的雷测数据信息源。

1 测量航路数据分段

依雷达的工作原理和性能,雷达测量误差与目标的运动参数有关。雷达的一次差即雷达测量值与真值之差值为最原始和最全面反映雷达测量误差。其既包含系统误差又包含随机误差,是分析雷达精度的基础。当目标的航向、位置或速度变化时,雷达系统误差和随机误差随之改变。如果航路很长,各段航路的误差不同。计算航路上所有误差的总均方根值就相当于沿航路取平均,看不出它们在不同位置的差别。为此,全航路精度值无实际意义或使用价值。

雷达的一次差既具有随机性,又具有统计规律性,为此其属于随机函数范畴。分析和总结雷达全航路的一次差,不难得出其为非平稳随机函数。对于非平稳随机函数的数学期望、均方值、相关函数和协方差函数是难于计算的,因它们都是时间的函数。对于平稳随机函数,就变得简单了,因它们与时间无关,或仅与时间间隔有关。也只有对这种情况,才能有效地进行雷达数据处理和分析。因此,对于不平稳的雷达全航路一次差数据,需分段处理。

选择典型航路来衡量雷达精度指标优劣更合适。这是因为雷达只能对某些特定的战术条件范围才能反映出它的跟踪性能。以飞机为目标时,最常用的典型航路目标直线、大转弯和小转弯等飞行。依 GPS 测量给出的飞机航迹特点,归纳出相对于相控阵雷达站址的几何关系。首先,将航路分为中

高空、低空情况;每条航路又分成直航段(含过捷)和转弯段。对于相控阵雷达,飞机航路基本为中高空情况。为此,挑选相控阵雷达跟踪目标仰角大于 3 度的直航段进行数据精度分析;飞机大转弯、小转弯或转圆圈飞行航迹作为转弯段进行精度分析,以全面地反映雷达跟踪性能。

2 雷达测量系统误差和随机误差分离及其评估

理论上,雷达系统误差为有规律的误差,依据产生系统误差的原理,可建立系统误差模型,即误差与误差源各参量之间的关系^[5,6]。如果知道这些参数的数值,就能计算出系统误差。然而,大多情况下它们是未知的或多变的,于是就难以估算系统误差,尤其,雷达跟踪起伏目标的系统误差模型更为复杂。为此,实际工作或任务中,很少或不可能通过建立系统误差参数模型来估算雷达系统误差。为此,研究如何利用数学理论和方法,分离出雷达跟踪目标的系统误差,对实际任务具有重要作用。下面给出从测量值与真值的一次差中分离系统误差和随机误差的原理和算法编程实现步骤。

2.1 测量真值大地坐标至测站坐标系的转换

作为真值, GPS 测量的目标定位数据为空间大地直角坐标系的数据 (X, Y, Z) 或 WGS-84 大地坐标系的经度、纬度和大地高 (L, B, h) ; 作为测量值, 相控阵雷达测量的目标位置数据为测站坐标系的斜距、方位角和俯仰角 (R, A, E) 。为了对比目标真值与测量值, 需要 GPS 测量真值转换至测站坐标系下的数据。转换步骤: 首先, 将大地坐标系下测量真值 (L, B, h) 转换到空间大地直角坐标系的数据 (X, Y, Z) ; 其次, 将空间大地直角坐标系转换到测站直角坐标系 (x, y, z) ; 最后, 再将测站直角坐标系转换至测站极坐标 (R, A, E) 。具体转换公式如下。

(1) 大地坐标系至空间大地直角坐标系的转换

$$\begin{cases} X = (N + h)\cos B\cos L \\ Y = (N + h)\cos B\sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + h]\sin B \end{cases} \quad (1)$$

其中, $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$, 为参考椭球的卯西圈曲率

半径; $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$, 为参考椭球的的第一偏心率。

(2) 空间大地直角坐标至测站直角坐标的转换

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix};$$

$$H = \begin{bmatrix} \sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \end{bmatrix};$$

(X_0, Y_0, Z_0) 为已知的雷达站址空间大地直角坐标;

(B_0, L_0) 为已知的雷达站址大地纬度和经度。

(3)测站直角坐标至测站球坐标的转换

$$\begin{cases} R_{0i} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ A_{0i} = \arctan \frac{y}{x} \\ E_{0i} = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (3)$$

(R_{0i}, A_{0i}, E_{0i}) 为目标相对雷达的斜距、方位角和俯仰角测量真值。

2.2 基于三次B样条的雷达系统误差分离方法

对GPS测量目标的差分定位数据,经坐标变换获得测站球坐标系下的GPS目标定位数据序列 (R_{0i}, A_{0i}, E_{0i}) 作为真值,与相控阵测量雷达的测量数据序列 (R_i, A_i, E_i) 作差,获得一次差的比对结果,具体如下:

$$\begin{cases} \Delta R_i = R_i - R_{0i} \\ \Delta A_i = A_i - A_{0i} \\ \Delta E_i = E_i - E_{0i} \end{cases} \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (4)$$

于是, $t_0, \dots, t_N (t_i = t_0 + hi, i = 0, 1, \dots, N)$ 时刻,获取雷达测量值与真值的一次差序列,用 $x(t_i)$ 表示,其中 h 为采样间隔。实际数据处理时, $x(t_i)$ 分别用 $\Delta R_i, \Delta A_i$ 或 ΔE_i 序列来替代。

令 $M(t)$ 为三次B样条函数

$$M(t) = \begin{cases} 0 & |t| \geq 2 \\ \frac{|t|^3}{2} - t^2 + \frac{2}{3} & |t| < 1 \\ -\frac{|t|^3}{6} + t^2 - 2|t| + \frac{4}{3} & 1 < |t| < 2 \end{cases} \quad (5)$$

设 n 为等距样条节点数,等距样条节点为 $\tau_0 = t_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n = t_N, \tau_l = \tau_0 + l \cdot h_a, l = 0, 1, \dots, n$,其中 h_a 为样条间距, $h_a = \frac{t_N - t_0}{n}, \tau_{-1} = \tau_0 - h_a$,

$\tau_{n+1} = \tau_n + h_a$,有

$$B_j(t_i) = M\left(\frac{t_i - \tau_j}{h_a}\right), \quad j = -1, \dots, n+1 \quad (6)$$

则 $\{B_j(t_i)\}$ 为一组等距节点插值三次样条函数基^[7]。

设 t_i 时刻的样条拟合数学模型

$$x(t_i) = \sum_{j=1}^m \beta_j B_j(t_i) + \epsilon_i \quad (7)$$

其中, m 为三次样条函数基的个数,其等于 $n+3$ 。

则有

$$\begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \dots \\ x(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(t_0) & B_2(t_0) & \dots & B_m(t_0) \\ B_1(t_1) & B_2(t_1) & \dots & B_m(t_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_1(t_N) & B_2(t_N) & \dots & B_m(t_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \dots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \dots \\ \epsilon_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

简记为

$$X = B\beta + \epsilon \quad (9)$$

对上式,应用最小二乘法求解参数 $\hat{\beta}$ 及 $\hat{x}(t_i)$

使得

$$\|X - B\hat{\beta}\|^2 = \min_{\beta} \|X - B\beta\|^2 \quad (10)$$

其解为

$$\hat{\beta} = (B^T B)^{-1} B^T X \quad (11)$$

于是

$$\hat{x}(t_i) = \sum_{j=1}^m \hat{\beta}_j B_j(t_i) \quad (12)$$

对雷达一次差序列 $x(t_i)$,拟合曲线效果应从三个方面考虑:目标航路的等距样条节点数 n 、拟合精度和拟合速度^[8,9,10]。对于目标的不同航路如直航段和转弯段,样条节点数 n 的取值不同;就是目标的不同直航段或转弯段, n 的选取也有差别。

2.3 编程算法步骤

(1)GPS差分定位解算,获得WGS-84坐标下目标位置真值 (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}) ;

(2)目标真值和测量值 (R_i, A_i, E_i) 的野点剔除与处理;

(3)目标真值转换成测站球坐标下的 R_{0i}, A_{0i}, E_{0i} ;

(4)真值序列与测量值序列的时间配准;

(5)计算测量值与真值的一次差序列;

(6)确定样条基函数 $\{B_j(t_i)\}$ 和样条节点数 n ;

(7)求解斜距、方位角、俯仰角一次差各自所对应的参数 $\hat{\beta}$ 及估计值 $\hat{x}(t_i)$;

(8) 分别统计斜距、方位角、俯仰角系统误差

σ_s ;

(9) 分别计算斜距、方位角、俯仰角残差平方和

$$RSS = \sum_{i=0}^N (\hat{x}(t_i) - x(t_i))^2。$$

3 动态飞行测量数据处理

结合某型飞机执行任务,飞机装载一台 GPS 接收机,通常把此接收机称为用户机;一台 GPS 接收机置于地面上一个已知点位坐标的固定点,通常把此接收机称为基准站。用户机和基准站构成目标真值测量系统^[1]。在任务段,其同时跟踪并记录导航卫星信息。因基准站位置坐标为已知的或经大地精确测定获得的,通过事后处理可以求取定位结果的坐标修正数或距离观测值的改正数。利用此改正数对用户机的 GPS 观测值进行处理,可精确地解算出目标的三维坐标,即获得了飞机位置的真值数据。相控阵雷达跟踪飞机输出的测量数据作为目标测量值。

从多次飞行任务中,挑选出 GPS 和雷达均有测量数据的时间段落进行精度评估。选取相对相控阵雷达站址飞机直线飞行轨迹作为直航段,以及飞机大转弯、小转弯或圆圈飞行运动轨迹作为转弯航路,于 10 次飞行任务中选取 7 个直航段、4 个大转

弯段和 4 个小转弯段,共计 15 个处理段落。GPS 数据的采样间隔为 0.10 s,相控阵雷达采样周期为 0.05 s,在配准时以 GPS 数据的采样间隔为准进行时间和空间配准。相控阵雷达测量数据与 GPS 真值比对,得到一次差曲线,并估算出雷达系统误差和随机误差及综合误差。图 1,2 分别为某次任务雷达测量数据(斜距、方位角、俯仰角)一次差拟合前后曲线和一次差拟合后的残差曲线。

分析并综合雷达 10 次任务的直航段和转弯段斜距、方位和俯仰角一次差曲线及精度处理结果,可得出雷达测距精度高;方位角精度优于俯仰角精度;直航段角度精度高于转弯段精度。

(1) 雷达测距系统误差与斜距之间基本成正比规律。距离在 20 km 左右时,系统误差为 0;小于 20 km 时,系统误差为负值;大于 20 km 时,系统误差为正值。测距误差波动范围较小,在 16~108 km 测距范围,测距误差动态范围为: -15~30 m;测距随机误差 ≤ 3 m,达到设计指标精度。

(2) 雷达跟踪动目标或起伏目标时,方位角、俯仰角随机误差小于其系统误差;方位角系统误差范围为 0.5~0.7 mrd;俯仰角系统误差范围为 0.7~0.8 mrd;两者随机误差 ≤ 0.4 mrd,接近设计指标精度。

图 1 某次任务雷达测量数据一次差拟合前后曲线

图 2 某次任务雷达测量数据一次差拟合后的残差曲线

4 结束语

对雷达跟踪动态目标定位精度估算是一项复杂和繁重的任务,因不同的航路和目标运动特点对其精度影响很大。结合某型飞机执行任务,将飞机航路分为直航段和转弯段,分别进行处理。从雷达测距和测角一次差中,有效地分离出其各自的系统误差。不同航路段的数据处理结果表明雷达测距、测角存在较大的系统误差,而随机误差较小,真实地反映了雷达跟踪起伏目标的动态精度。尤其雷达测距系统误差与斜距之间基本成正比关系,显然,雷达测距系统误差设计指标用一个常数值来表征是不合适的。本文提出的方法不仅适用于测量雷达精度评估,而且可用于武器系统中雷达跟踪精度和制导精度的估算。

参考文献:

- [1] 陈相麟,蒋谱成,陈军,等. 雷达试验[M]. 北京:国防工业出版社,2004:156-163.
- [2] 晋志普,陆文娟,朱纪洪,等. 无人机GPS系统对雷达进行精度评定的方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41(9):40-43.
- [3] 夏莹,刘付显,曹桂明. 雷达精度检验的数据分析[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(1):195-197.

- [4] 刘夫体. GPS与雷达测量数据融合处理方法[J]. 全球定位系统,2007,32(4):26-29.
- [5] 胡亚男,陈大庆,甘友谊. 单脉冲雷达系统误差特性与分离方法研究[J]. 现代雷达,2010,32(5):39-43.
- [6] 张虹. 单脉冲二次监视雷达精度的提高[J]. 现代雷达,2008,30(12):10-13.
- [7] 王正明,易东云,周海银,等. 弹道跟踪数据的校准与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2008:20-28.
- [8] Park H. An error-bounded approximate method for representing planar curves in B-splines[J]. Computer-Aided Geometric Design,2004,21(5):479-497.
- [9] Park H, Lee J, H. B-spline curve fitting based on adaptive curve refinement using dominant points[J]. Computer-Aided Design,2007,39(6):439-451.
- [10] Yang H, Wang W, Sun J. Control point adjustment for B-spline curve approximation[J]. Computer-Aided Design,2004,36(7):639-652.
- [11] 马海潮,周立锋,李晓冰. 外测设备精度校飞中多基线伪距差分定位精度分析[J]. 航天控制,2010,26(4):78-80.

作者简介:马海潮(1962-),男,博士,高级工程师,研究方向:数据处理和精度分析,E-mail:mhchsea@163.com;周立锋(1980-)年,男,工程师,研究方向:数据处理和精度分析;蔺建英(1962-),男,高级工程师,研究方向:光学高精度测量。