

基于 SLR 数据的雷达探测精度分析方法

罗震龙¹, 宋嘉政¹, 褚福勇¹, 代林¹, 张小各¹, 杨超², 杨生忠²

- (1. 中国人民解放军 63786 部队, 新疆乌鲁木齐 830000;
2. 中国人民解放军 32035 部队, 陕西西安 710000)

摘要: 空间安全已成为各航天大国国家安全中的重要一环,空间目标监视技术也已成为空间技术新的制高点。雷达凭借其全天候、全天时的特点,已成为空间目标监视的骨干设备,其探测精度直接影响太空态势掌控的准确性,因此准确分析雷达探测精度有着重要意义。本文以卫星激光测距(SLR)数据为基础,首先分析了不同阶数插值算法以及滑动式内插、非滑动式内插的插值精度,而后介绍了坐标转换方式与雷达精度分析方法。仿真结果表明,滑动式九阶拉格朗日插值算法有较好的插值效果,满足雷达精度分析的需求。

关键词: 卫星激光测距; 拉格朗日插值; 监视雷达; 精度分析

中图分类号:TN953 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2021)06-0704-05

Radar Detection Accuracy Analysis Method Based on SLR Data

LUO Zhenlong¹, SONG Jiazheng¹, CHU Fuyong¹, DAI Lin¹, ZHANG Xiaoge¹, YANG Chao², YANG Shengzhong²
(1. Unit 63786 of PLA, Urumqi 830000, China; 2. Unit 32035 of PLA, Xi'an 710000, China)

Abstract: Space security has become an important factor in the national security of all major space powers. Space target surveillance technology has also become a new technical peak for space technology. Radar has become the main equipment for space target surveillance relying on its all-time and all-weather characteristics. Its detection accuracy directly affects the space situation control, so analysis of radar detection accuracy is of great significance. Firstly, the accuracies of different order interpolation algorithms, sliding interpolation, and non-sliding interpolation are analyzed based on satellite laser ranging (SLR) data. Then we introduce the coordinate conversion method and radar accuracy analysis method. The simulation results show that the sliding ninth-order Lagrange interpolation algorithm has a good interpolation effect and meets the requirements of radar accuracy analysis.

Key words: satellite laser ranging; Lagrange interpolation; surveillance radar; accuracy analysis

0 引言

随着信息化战争对空间技术的依赖性不断增强,空间目标监视技术已经成为各航天大国竞相发展的空间技术“制高点”^[1]。空间目标监视雷达凭借其全天候、全天时的技术优势,已成为空间目标监视体系内的骨干设备,其主要作用是对太空中的导弹、卫星、空间碎片、空间站、宇宙飞船和天然陨石等空间目标进行探测和跟踪,实时掌握空间目标的运动态势^[2]。空间目标监视雷达的主要功能是发现空间目标并对空间目标定位,雷达的探测精度直接影响到空间目标的定轨精度,决定

了掌控太空态势的准确性。因此,分析雷达探测精度对于空间目标监视有着重要意义。

要分析雷达的探测精度,首先要知道被测目标的准确位置。目前,卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)是卫星观测中测量精度最高的技术手段^[3-4],其通过精确测量激光信号从地面站到卫星的往返飞行时间获得星地间精密距离,单次测量精度已提高到亚厘米级,目前正向毫米级发展^[5-6]。SLR的定位精度远高于以微波为探测手段的雷达,因此可将其测量数据作为参考对雷达探测精度进行分析。但SLR精密星历数据多是以5 min或15 min为间隔的空间目标三维坐标,空间目标监视雷达探测的是以1 s或更短时间间

隔的探测数据,因此想要得到探测时刻空间目标的参考位置就需要对SLR数据进行插值处理^[7-8]。本文首先对比了不同插值算法的插值效果,而后介绍了SLR数据与雷达观测数据的坐标转换方式,最后将效果最优的插值结果作为参考值对雷达探测精度进行分析。

1 插值算法分析

1.1 拉格朗日插值法

已知有给定的 $k+1$ 个采样节点数据 $(t_0, x_0), (t_1, x_1), \dots, (t_k, x_k)$,其中 t_j 对应采样节点的时刻, x_j 对应节点时刻目标的位置,则根据插值节点得到的拉格朗日插值多项式^[9]为

$$L(x) = \sum_{j=0}^k y_j l_j(x) \quad (1)$$

式中,

$$l_j(x) = \prod_{i=0, i \neq j}^k \frac{x - x_i}{x_j - x_i} = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{j-1})}{(x_j - x_0) \dots (x_j - x_{j-1})} \dots \frac{(x - x_{j+1}) \dots (x - x_k)}{(x_j - x_{j+1}) \dots (x_j - x_k)} \quad (2)$$

拉格朗日插值系数 $l_j(x)$ 的特点是在 x_j 上的取值为1,在其余点 $x_{i, i \neq j}$ 上取值为0。通过给定 $k+1$ 个互异的插值节点,求得一条 n 阶多项式代数曲线近似表示待插值的函数曲线,从而获取所需观测时刻的目标近似坐标。

1.2 实例分析

本文采用由Space Geodesy Facility(SGF)提供的日本AJISAI测地卫星的SLR数据进行插值实验,数据的采样时间为2020年6月30日0时0分0秒至7月2日23时56分0秒,采样间隔为4 min,数据样本提供采样时刻及卫星在 X, Y, Z 三个方向上的坐标,数据内容如表1所示。

表1 AJISAI的部分SLR数据

儒略日	秒时刻	X坐标	Y坐标	Z坐标
59 030	0	4 342 288.444	4 420 935.618	-4 851 378.197
59 030	240	3 774 868.044	5 650 148.65	-3 965 292.417
59 030	480	3 070 167.484	6 638 033.579	-2 892 661.439
59 030	720	2 251 647.756	7 342 410.058	-1 683 737.106
59 030	960	1 346 952.238	7 733 374.039	-395 372.414

续表

儒略日	秒时刻	X坐标	Y坐标	Z坐标
59 030	1 200	387 078.156	7794 678.678	911 659.741
59 030	1 440	-594 600.045	7 524 487.926	2 175 574.209
59 030	1 680	-1 563 426.497	6 935 456.756	3 336 557.662
59 030	1 920	-2 484 643.883	6 054 120.372	4 339 667.76
59 030	2 160	-3 324 604.668	4 919 625.392	5 137 482.835
59 030	2 400	-4 051 962.753	3 581 889.056	5 692 362.572
59 030	2 640	-4 638 810.684	2 099 297.071	5 978 217.019
59 030	2 880	-5 061 725.728	536 057.235	5 981 708.139
59 030	3 120	-5 302 690.341	-1 040 659.002	5 702 839.561

选取 $n+1$ 个互异的数据节点进行插值计算,通过拉格朗日插值算法可计算出一条 n 次多项式来近似目标轨迹的函数曲线, n 即为插值的阶数。为验证插值精度,将数据中某一采样时刻作为待插值时刻,该时刻的坐标值按照真值作为对比,二阶插值时选取该时刻前2个时刻和后1个时刻的数据作为插值节点,三阶插值时选取该时刻前2个时刻和后2个时刻的数据作为插值节点,以此规律选择插值节点。

分析时选择6月30日5时56分为内插时刻,对比二阶样条插值、三阶样条插值和拉格朗日插值法在不同阶数时的插值精度,结果如图1所示。

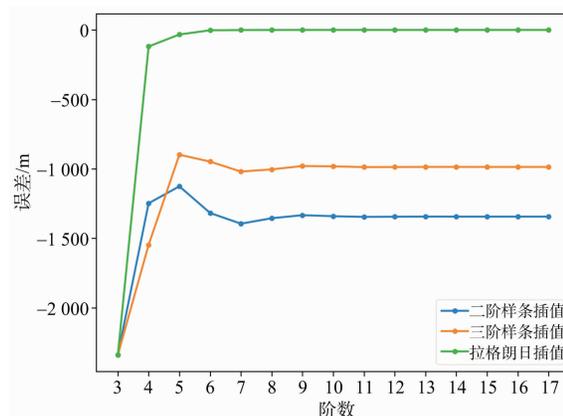


图1 三种插值算法的精度对比

从图1可以看出,样条插值法的插值误差在1 km左右,不满足雷达精度分析的需求,而拉格朗日插值法有远高于样条插值法的插值精度,使用拉格朗日算法对 X, Y, Z 三个方向上数据进行插值计算,结果如图2所示。

从图2可以看出,当插值阶数达到9阶时,拉格朗日插值法的插值精度可以达到厘米级,继续增加插值阶数,插值精度没有明显提高,反而增加了计算量,因此9阶拉格朗日插值算法为高效准确

的 SLR 数据插值方法。

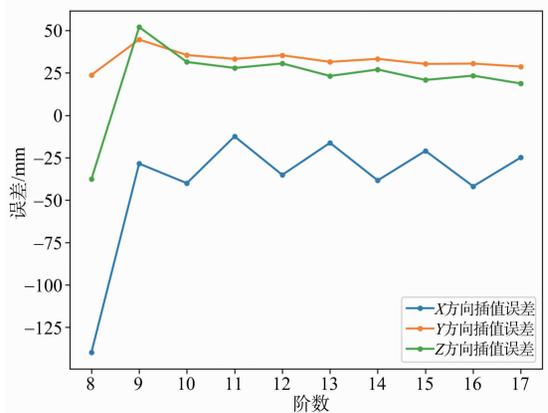


图 2 X, Y, Z 三个方向的拉格朗日插值误差

1.3 滑动式内插法

使用拉格朗日插值算法进行计算时,非滑动式的内插方法为使用已知的插值节点数据计算整段插值区间内的待插值点坐标,为分析非滑动式插值法的插值精度,选取 6 月 30 日 5 时 40 分至 6 时 20 分共 11 个采样时刻作为插值样本,依次将 5 时 44 分至 6 时 16 分共 9 个采样时刻作为待插值时刻进行插值误差计算,插值算法为 9 阶拉格朗日插值, X, Y, Z 三个方向上的计算误差如图 3 所示。

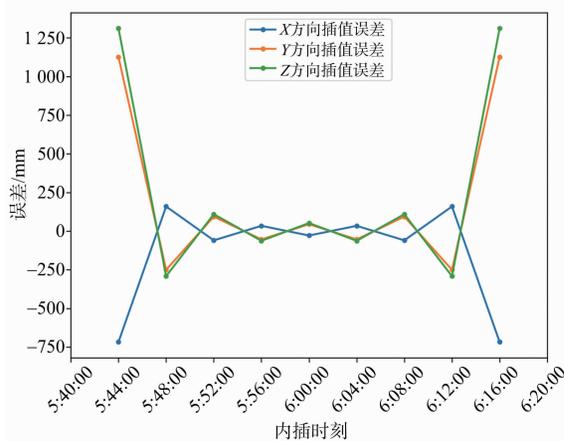


图 3 插值区间内精度分析

从图 3 可以看出,在靠近插值区间两个端点处的插值误差会增大,出现明显的波动现象,靠近插值区间中心位置的插值精度较好,因此,若能时刻保证待插值点处于插值区间的中心位置,则能整体得到精度较高的插值效果。这种通过不断变换插值区间,使得待插值点处于插值区间中心位置的方法,称为滑动式内插法^[10],配合拉格朗日插

值算法,即为滑动式拉格朗日插值算法。

为进一步分析滑动式拉格朗日插值算法的插值精度,依次选取 6 月 30 日 5 时 56 分至 7 月 2 日 11 时 56 分的数据作为待插值节点,使用不同阶数的滑动式拉格朗日插值算法进行插值,计算插值误差与 RMSE 值,结果如表 2 所示。

表 2 不同阶数的滑动式拉格朗日插值误差

阶数	最大误差/mm			RMSE/mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z
7	723.83	986.46	641.19	256.59	260.20	340.29
9	172.55	254.62	198.17	55.88	60.43	57.04
11	148.81	180.53	172.82	45.48	48.90	46.02
13	130.06	153.25	149.53	40.54	42.99	40.86

由表 2 结果可知,当插值阶数达到 9 阶时,滑动式拉格朗日插值法的插值均方根误差能够达到厘米级,最大误差值不超过 30 cm,插值结果满足对雷达精度分析的需求。

2 雷达测量精度分析

通过滑动式拉格朗日 9 阶插值处理,已经得到与探测时刻相对应的空间目标高精度坐标值,但是此时的插值结果为空间目标在地心地固坐标系 (ECEF) 下的坐标,需要将其转换到站心坐标系下的球坐标数值,才能与雷达直接测量得到的距离、方位、俯仰信息进行对比,开展测量精度分析。

2.1 坐标转换

假设测站所在坐标点为 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$, 经度、纬度、高程为 $LLA_0 = (lon_0, lat_0, alt_0)$, 目标点坐标为 $P = (x, y, z)$, 如图 4 所示。

则目标在以测站为中心的站心坐标系下的直角坐标为

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\sin(lon_0) \\ -\sin(lat_0)\cos(lon_0) \\ \cos(lat_0)\cos(lon_0) \\ \cos(lon_0) & 0 \\ -\sin(lat_0)\sin(lon_0) & \cos(lat_0) \\ \cos(lat_0)\sin(lon_0) & \sin(lat_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

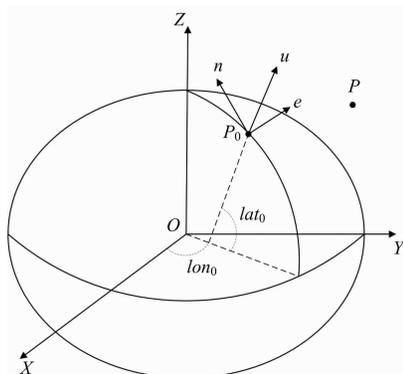


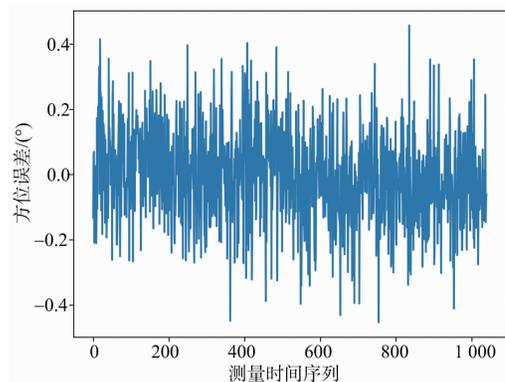
图4 ECEF与站心坐标系转换

最后,再将站心系下的直角坐标转换为雷达测量中常用的球坐标即可进行精度分析。

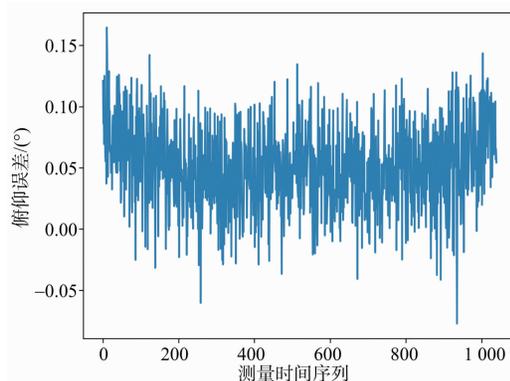
2.2 精度分析

在实际运用中,准确的精度分析对于掌握雷达效能状态有着重要的意义。经过滑动式拉格朗日9阶插值以及坐标转换的处理,具备极高定轨精度的SLR数据已经转换为雷达观测该目标时的参考值,位置误差在厘米级,可作为目标的准确位置进行比较。本文利用AJISAI的两行轨道根数进行过境预报,将预报结果添加部分噪声来模拟雷达的探测数据进行精度分析。

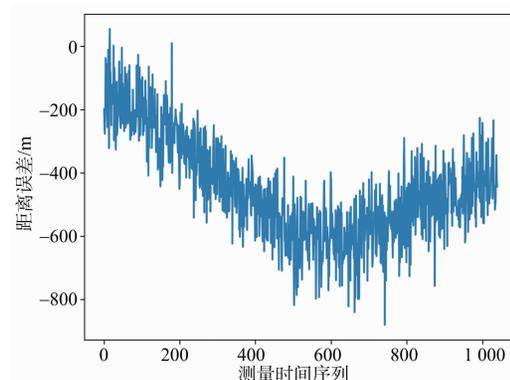
通过将探测结果中的方位角、俯仰角及距离数据分别与对应参考值进行作差处理即可获得雷达探测的精度信息,仿真计算结果如图5所示。误差计算结果中可以清晰地看出雷达在探测目标时在方位、俯仰、距离三个维度上的测量误差,从而直观地掌握雷达的探测精度。



(a) 目标方位角探测误差



(b) 目标俯仰角探测误差



(c) 目标距离探测误差

图5 探测精度分析

3 结束语

本文借助于SLR技术高测量精度的优势,利用其测量结果对空间目标监视雷达的探测结果进行了精度分析。通过对比研究几种插值方法,选取滑动式9阶拉格朗日插值算法对SLR数据进行处理,该算法兼具计算精度高、计算量小两个主要优势,插值结果符合雷达精度分析需求,同时还介绍了插值结果转换为站心坐标系数据的方法,方便进行雷达的探测精度分析。本文提出的精度分析方法原理简单,易于编程实现,为空间目标监视雷达的效能分析提供了技术参考。

参考文献:

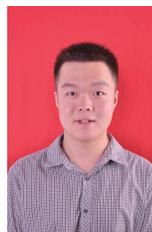
- [1] 马君国. 空间雷达目标特征提取与识别方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [2] 杨雅琦. 雷达对空间目标监视系统的设计与实现[D]. 南京:东南大学,2019.
- [3] 吴志波,邓华荣,张海峰,等. 卫星激光测距系统稳定性分析及提高[J]. 红外与毫米波学报,2019,38(4): 479-484.

- [4] 张忠萍,程志恩,张海峰,等.北斗卫星全球激光测距观测及数据应用[J].中国激光,2017,44(4):164-172.
ZHANG Zhongping, CHENG Zhien, ZHANG Haifeng, et al. Global Laser Ranging Observation of Beidou Satellites and Data Application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017,44(4):164-172. (in Chinese)
- [5] 孔垚,张小贞,孙保琪,等. SLR 数据对北斗卫星精密定轨的作用分析[J].测绘学报,2018,47(S1):86-92.
- [6] 樊仲维,黄玉涛,张忠萍,等.国产千赫兹皮秒激光器在卫星激光测距领域的新进展[J].科学通报,2018,63(31):3161-3162.
- [7] 周嘉俊,李勇,陈润静,等. GPS 卫星精密星历的轨道插值[J].地理空间信息,2018,16(1):54-57.
- [8] 从建锋,刘智敏,刘盼,等.基于非滑动式与滑动式 BDS 精密星历内插及其精度分析[J].测绘工程,2019,28(6):22-29.
CONG Jianfeng, LIU Zhimin, LIU Pan, et al. Non-Sliding and Sliding BDS Precision Ephemeris Interpolation and Its Accuracy Analysis[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(6):22-29. (in Chinese)
- [9] 何玉晶,杨力.基于拉格朗日插值方法的 GPS IGS 精密星历插值分析[J].测绘工程,2011,20(5):60-62.
- [10] 徐炜,贾雪,严超,等.滑动式与非滑动式 GPS 精密星

历内插方法比较分析[J].全球定位系统,2017,42(2):15-20.

XU Wei, JIA Xue, YAN Chao, et al. The Method of Comparative Analysis Sliding and Non Sliding GPS Precise Ephemeris Interpolation[J]. GNSS World of China, 2017, 42(2):15-20. (in Chinese)

作者简介:



罗震龙 男,1993 年生于河南洛阳,硕士,主要研究方向为雷达信号处理。

宋嘉政 男,1994 年生于山东威海,硕士,主要研究方向为飞行器设计。

褚福勇 男,1986 年生于山东枣庄,硕士,主要研究方向为计算机科学与技术。

代林 男,1986 年生于四川广元,博士,主要研究方向为通信与信息系统。

张小各 男,1981 年生于安徽宿州,工程师,主要研究方向为雷达电子对抗。

(上接第 703 页)

- [5] 王玉冰,程嗣怡,周一鹏,等.基于 DS 证据理论的机载火控雷达空空工作模式判定[J].现代雷达,2017,39(5):79-84.
- [6] 王玉冰,程嗣怡,周一鹏,等.参数寻优 LSSVM 算法在机载火控雷达工作模式判定中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(3):49-53.
WANG Yubing, CHENG Siyi, ZHOU Yipeng, et al. A Parameter-Optimized LSSVM Method for Operation Modes Recognition of Airborne Fire Control Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3):49-53. (in Chinese)
- [7] 中航工业雷达与电子设备研究院.机载火控雷达[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [8] 马珂,毕大平,胡立群,等.基于 ELINT 的机载火控雷达空空工作状态识别[J].电子信息对抗技术,2019,34(4):35-39.
MA Ke, BI Daping, HU Liqun, et al. Air-to-Air Operation Statuses Recognition of Airborne Fire Control Radar Based on ELINT [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34(4):35-39. (in Chinese)
- [9] SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. New York:Mc GrawHill Inc, 2008.

- [10] 李捷,杨雪洲,周亮.基于改进 DS 理论多周期数据融合的目标识别方法[J].火力与指挥控制,2019,44(7):43-48.

LI Jie, YANG Xuezhou, ZHOU Liang. Research on Target Identification Based on Improved DS Evidence of Multi-period Fusion Method[J]. Fire Control and Command Control, 2019, 44(7):43-48. (in Chinese)

- [11] 康兵义,李娅,邓勇.基于区间数的基本概率指派生成方法及应用[J].电子学报,2012,40(6):1092-1096.

- [12] TRAN L T, DUCKSTEIN L. Comparison of Fuzzy Numbers Using a Fuzzy Distance Measure[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 130(3):331-341.

作者简介:



马珂 男,1989 年出生,安徽宿州人,在读硕士研究生,主要研究方向为雷达对抗。

毕大平 男,1965 年出生,安徽桐城人,教授、博士生导师,主要研究方向为电子对抗装备新技术研究。