

结合自重变形特点的 天线测量数据粗差别除与定权方法

汪文琪¹, 李宗春¹, 程志峰², 冯其强¹, 张冠宇¹

(1. 战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院, 河南郑州 450001;

2. 中国电子科技集团第五十四研究所, 河北石家庄 050081)

摘 要: 针对传统天线测量数据处理中粗差别除和定权不合理问题, 提出了一种结合粗差别除和一次范数最小法定权的天线反射面多仰角测量数据处理方法. 首先, 根据反射面自重变形的特点, 通过构造统计量对粗差点予以剔除, 提高了测量数据的可靠性; 其次, 顾及测量点的变形特点, 引入了抗差估计中的一次范数最小法对不同变形点进行定权, 解决了等权最小二乘拟合的“虚假面型”问题. 经过某口径 13m 天线反射面测量数据的实例计算, 对比其他方法, 新方法拟合结果能够合理、准确地反映出反射面的实际变形偏差, 更适用于天线反射面自重变形数据的处理.

关键词: 天线反射面测量; 自重变形; 等权最小二乘拟合; 粗差别除; IGGIII 法; 一次范数最小法

中图分类号: P111; P258 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1741-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.011

Method of Gross Error Elimination and Weight Determination of Antenna Measurement Data with Gravity Deformation Characteristics

WANG Wen-qi¹, LI Zong-chun¹, CHENG Zhi-feng², FENG Qi-qiang¹, ZHANG Guan-yu¹

(1. Institute of Surveying and Mapping, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: Aiming at the unreasonable problem of gross error elimination and weight determination in traditional antenna measurement data processing, a method for multi-elevation antenna measurement data processing is proposed, which combines gross error elimination and weighting way of L1-norm least method. Firstly, according to the characteristics of reflector gravity deformation, the gross error was eliminated by constructing statistics, which improved the reliability of measurement data. Secondly, referring to the deformation characteristics of measurement points, the L1-norm least method in robust estimation was introduced to determine the weights of different deformation points, so as to solve the "false fitting surface" problem of equal-weight least square fitting. Through the calculation of measurement data for a $\Phi 13\text{m}$ antenna reflector, compared with other methods, the fitting results of this method can reasonably and accurately reflect the actual reflector deformation deviation, and this method is more suitable for the data processing of antenna reflector gravity deformation.

Key words: antenna reflector measurement; gravity deformation; equal-weight least square fitting; gross error elimination; IGGIII method; L1-norm least method

1 引言

反射面天线广泛应用于射电天文、雷达、通信和太空探测等领域^[1]. 理论上, 电磁波信号能够通过反射面精准地汇集到天线的馈源装置, 从而实现对目标的观测. 实际工作中, 天线反射面由于外界环境的影响会发

生变形, 导致观测效率降低, Ruze 公式^[2]具体描述了天线增益与表面偏差之间的关系. 影响天线反射面变形的载荷因素包括自重、风力、温度等^[3,4], 其中自重载荷的影响最大.

天线反射面自重变形与仰角有关^[5], 利用多仰角测量数据获取反射面变形信息是分析变形规律、补偿

变形损失的基础. 如何处理反射面测量数据, 从中提取有用的信息, 一些文献已经进行了研究. 文献[6,7]详细介绍了多种天线反射面测量及数据处理的方法; 文献[8]以反射面轴向误差最小为目标, 提出了一种基于最小二乘的天线反射面拟合方法; 文献[9]应用刚体位移的思想, 介绍了一种利用确定刚体位移的6自由度及抛物面的焦距共7个广义自由度来拟合空间抛物面的方法. 这些方法被应用在反射面的变形补偿^[10-13]、天线的性能分析^[14]以及副反射面的赋形设计^[15]等方面. 上述文献在进行反射面拟合时均采用了等权最小二乘的方法, 该方法没有考虑到不同定权对反射面拟合的影响, 所得到的拟合曲面含有一定的“虚假信息”, 由此计算获取的变形偏差并不合理. 文献[16]在介绍天线变形曲面拟合方法时提到了含有不同权值的最小二乘方法, 但没有提及具体定权方法. 另外, 天线反射面测量数据在处理过程中直接进行拟合计算, 一般认为不存在粗差, 但实际测量过程中由于人为或其他因素的影响粗差难以避免, 导致曲面拟合结果失真. 文献[17]提出了基于抗差估计和加权最小二乘的天线曲面拟合算法 (Robust estimation and Weighted Least Squares, RWLS), 引入抗差估计中的 IGGIII 法根据拟合偏差大小对反射面拟合点定权, 将粗差剔除和迭代定权合二为一, 对不同点能够合理定权, 拟合过程中削弱了粗差数据的影响, 但由于不能定位粗差, 后续的面型评价依然受到粗差的影响.

针对上述天线反射面拟合中存在的问题, 结合天线反射面多仰角测量的数据特点, 本文提出一种较为合理的反射面拟合方法. 天线反射面测量过程中布设有测量点, 在粗差剔除方面, 依据多仰角测量数据相邻测量点随仰角变化相近的特点构造相应的统计量剔除粗差点数据, 可提升测量数据的可靠性; 在拟合点定权方面, 引入抗差估计中的一次范数最小法, 根据点位变形偏差的大小合理地确定权值, 使得数据整体的处理方案更为合理.

2 数据处理方法

天线反射面测量数据处理流程一般包括两部分: 一是反射面拟合, 将测量坐标系与设计坐标系统一; 二是面型评价, 计算出反射面的面型精度, 评价实际反射面偏离理论曲面的程度.

天线反射面多仰角测量数据分布在不同的测量坐标系, 以某一仰角为例, 反射面测量点在该仰角下测量坐标系的分布如图1所示. 测量坐标系与设计坐标系之间存在3个平移参数和2个旋转参数, 记为 $t = (X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y)$ ^[7], 如图2所示, 测量坐标系原点 O 在设计坐标系下的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , ε_x 和 ε_y 分别为绕 X 轴和

Y 轴旋转的角度, 利用相应的坐标转换公式即可实现测量坐标系与设计坐标系的统一.

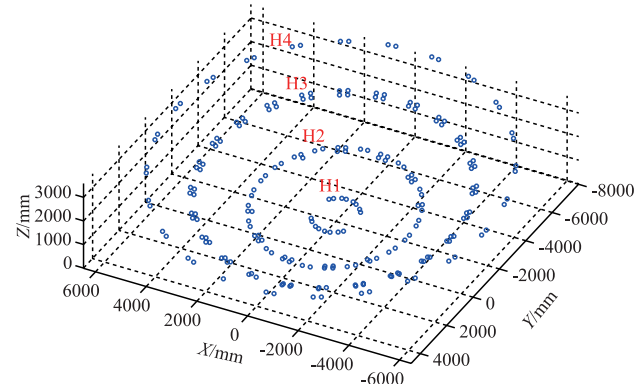


图1 天线反射面测量点分布

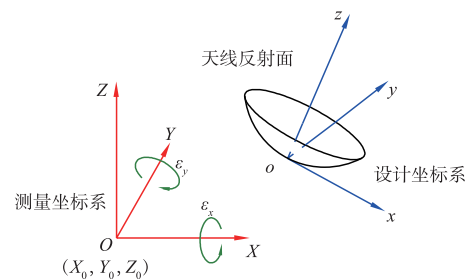


图2 坐标系转换

天线反射面面型精度一般采用测量点相对于设计反射面法向偏差的均方根值 RMS (Root Mean Square) 作为评价标准, 计算公式如式(1)所示.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (1)$$

式中, Δ_i 为测量点相对于设计反射面的法向偏差, n 为测量点个数.

2.1 等权最小二乘拟合

前文已经提及, 等权最小二乘拟合是反射面测量数据处理中最常用的方法, 具体的拟合过程可以参见文献[7].

在等权最小二乘拟合中, 变形偏差大的点和变形偏差小的点都被赋予了相同的权值, 相当于所有的拟合点对面型精度的贡献量相等. 为了照顾偏差大的点, 等权最小二乘拟合需要偏差小的点作出妥协, 从而保证整体面型的最优, 但这种面型的最优, 处理策略不尽合理.

2.2 RWLS 方法

RWLS 方法^[17]与等权最小二乘拟合的不同之处在于定权. RWLS 方法引入 IGGIII 等价权函数对变形偏差大小不同的拟合点分别定权, 变形偏差大的点权值小, 变形偏差小的点权值大, 权值不同表示拟合过程中的

贡献不同. 对于偏差特别大的一部分点, 权值定为 0, 称为淘汰点. 这种定权方式顾及了变形偏差大小对拟合结果的影响, 具有一定的合理性.

如果测量过程中出现粗差, 由于粗差点对应的变形偏差比较大, 在拟合时会被归到淘汰点. 淘汰点因为权值为 0 不参与拟合的过程, 所以反射面拟合过程在一定程度上能够削弱粗差的影响; 但后续的面型评价中由于无法定位和剔除淘汰点中的粗差, 所有点均参与评价, 其评价结果会受到粗差的影响.

2.3 结合粗差别除和一次范数最小定权拟合

本文依据天线反射面多仰角测量数据的特点, 提出了一种结合粗差别除和一次范数最小定权的反射面拟合方法.

天线反射面上不同点的变形各异, 单一仰角下难以从测量数据中区别出粗差. 对于多仰角测量数据, 反射面随仰角转动的过程中, 各测量点相对于设计反射面的偏差也随之改变. 布设位置相对较近的测量点在单个仰角下的变形偏差各不相同, 但是随仰角改变的偏差变化量相对接近, 可以利用该特点探测隐藏于不同仰角测量数据中的粗差点.

下面具体分析测量点偏差变化量的特点, 将反射面上的测量点进行分组, 距离较近的点变化相近, 以此作为分组原则. 具体分组方式可以根据测量点的实际布设情况确定. 每一组的测量点偏差变化量可视作服从同一正态分布. 以一组测量点为例, 利用式(2)分别计算出该组测量点变形偏差随仰角变化量 $d\Delta_j^i$, 则 $d\Delta_j^i \sim N(\mu_j, \sigma_j^2)$.

$$d\Delta_j^i = \Delta_{j+1}^i - \Delta_j^i \quad (2)$$

式(2)中, 上标 i 表示测量点的点号; 下标 j 和 $j+1$ 为变形偏差所对应的仰角序号, 取值范围为 $1 \sim m$, 其中 m 为测量仰角的个数.

$$d\bar{\Delta}_j^i = \frac{d\Delta_j^i - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3)$$

将 $d\Delta_j^i$ 按式(3)标准化, 则 $d\bar{\Delta}_j^i \sim N(0, 1)$, 那么将所有的 $d\bar{\Delta}_j^i$ 求和, 其结果服从 χ^2 分布, 自由度为 $m-1$, 如式(4)所示.

$$\sum_{j=1}^{m-1} d\bar{\Delta}_j^i{}^2 \sim \chi^2(m-1) \quad (4)$$

将以上分析结果运用到反射面测量数据粗差别除之中, 由于计算中用到的各测量点在不同仰角下的变形偏差不需要完全准确, 所以这里利用等权最小二乘拟合的方法求取. 具体判断流程如下:

(1) 首先利用等权最小二乘拟合的方法计算出各点的变形偏差, 随后利用式(2)分别计算反射面各测量点变形偏差随仰角的变化量 $d\Delta_j^i$.

(2) 将测量点分组, 逐组计算 $d\Delta_j^i$ 在各仰角下的分

布参数, μ_j 和 σ_j^2 分别用样本均值和样本方差代替, 以此为基础将 $d\Delta_j^i$ 标准化并求和.

(3) 选择 χ^2 分布的显著性水平 α , 当满足如下条件时, 则判定测量点为粗差点, 上限为

$$\chi^2(m-1) > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(m-1)$$

下限为

$$\chi^2(m-1) < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(m-1)$$

偏差不同的测量点对曲面拟合的贡献不同, 为了得到更为合理的曲面拟合参数, 需要根据测量点变形偏差的大小进行定权, 而变形偏差与平差理论中残差的概念类似, 由此可以类比抗差估计中利用残差定权的方法, 在反射面拟合时引入抗差估计中的选权迭代法, 使用等价权函数进行定权. 需要特别指出的是, 抗差估计在这里不是用来抵抗粗差, 粗差数据在此之前已经进行了探测、剔除, 这里只是借鉴了抗差估计中利用残差定权的方法.

常用的等价权有 Huber 法、Hampel 法、丹麦法、IGG 法、IGGIII 法、一次范数最小法等^[18]. 由于在前期已经剔除了测量数据中的粗差点, 所以不需要像文献[17]一样选择含有淘汰区间的等价权定义方式, 因此本文选择了一次范数最小法作为反射面拟合定权的方法.

3 实例计算

3.1 数据获取

本文的实验数据通过数字工业摄影测量^[19-21]的方法采集得到. 如图 1 所示, 口径 13m 天线主反射面上总共布设有 4 圈测量点标志, 各圈测量点数目及编号如表 1 所示. 通过改变天线反射面姿态, 分别在 5° 、 20° 、 34° 、 45° 、 60° 和 90° 仰角下对反射面进行测量, 得到 6 个仰角下测量点的坐标数据.

表 1 各圈测量点个数及编号

圈号	H1	H2	H3	H4
点数/个	16	64	94	47
编号	1~16	17~80	81~174	175~221

3.2 等权最小二乘拟合计算结果

将 6 个仰角下的数据分别按照等权最小二乘拟合的流程进行拟合计算, 各仰角反射面面型精度如表 2 所示.

表 2 等权最小二乘拟合计算结果

仰角/ $^\circ$	5	20	34	45	60	90
RMS/mm	0.090	0.071	0.072	0.125	0.189	0.271

对于天线反射面来说, 安装调整角位置的面型精度最高, 其他仰角下的面型精度应小于安装调整角^[22], 如图 3 所示. 该 $\Phi 13\text{m}$ 天线属于 VLBI (Very Long Base-

line Interferometry) 天线, 信号接收角度主要位于 42° 附近, 施工装配时将此仰角定为安装调整角. 因此反射面面型精度最优仰角应为 42° , 而根据表 2 中数据的变化趋势, 最佳面型精度 (RMS 值最小) 却出现在仰角 20° 和 34° 之间, 这显然与天线实际的施工装配结果不相符合.

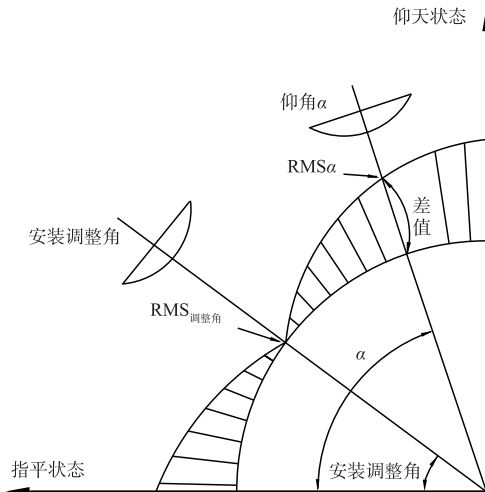


图3 反射面RMS随仰角变化^[22]

3.3 RWLS 计算结果

将 6 个仰角下数据分别按照 RWLS 拟合的流程进行拟合计算, 此处 k_0 取 1.5, k_1 取 2.5. 计算结果如表 3 所示.

表 3 RWLS 计算结果

仰角/ $^\circ$	5	20	34	45	60	90
RMS/mm	0.090	0.072	0.073	0.125	0.193	0.274

从表 3 中可以看出, 利用 RWLS 计算得到的不同仰角下面型精度的变化趋势与等权最小二乘类似, 其面型评价结果与天线反射面实际施工装配的情况没能很好地吻合. 对比表 2 中的结果, 二者计算时都用到了全部的测量数据, 但得到的反射面面型精度有一定差别, 主要是因为各拟合点参与平差时候的权值不同. RWLS 依据变形偏差的大小进行定权, 比等权最小二乘拟合更为合理. 但表 3 的计算结果表明, 利用 RWLS 计算的面型精度也不符合安装施工实际, 主要原因在于 RWLS 无法具体确定出淘汰点中是否存在粗差点以及粗差点的具体位置, 使得面型评价中混入了粗差的影响.

3.4 本文方法计算结果

首先判断测量数据是否存在粗差, 计算流程如下:

(1) 采用等权最小二乘拟合的方法计算出各测量点变形偏差随仰角变化量 $d\Delta_i^j$, 由于测量数据分布在 6 个不同的仰角下, 所以第 i 个测量点对应的 $d\Delta_i^j$ 数目为 5.

(2) 测量点在反射面上的分布情况是分组的主要依据, 考虑采用反射面分块的方式进行分组, 每块反射

面上包含的测量点作为一组. 分组过多, 则每组包含的测量点个数过少, 不能很好地反映统计规律; 分组过少, 则每组包含的测量点个数过多, 测量点之间的变形差异过大, 不满足粗差剔除的前提条件, 因此需要根据实际情况对反射面进行合理地分块. 本例根据天线反射面的旋转对称特性, 引入天线俯仰轴和方位轴在口径平面上的投影线将反射面分成面积相同的 4 块区域, 如图 4(a) 所示, 其中, $r = 6500\text{mm}$ 是反射面半径; 按此分块后, 每块区域内侧和外侧的测量点变形情况还是存在较大的差异, 因此在图 4(a) 的基础上, 进一步对内侧和外侧的点进行区分, 如图 4(b) 所示, 在距离圆心 $0.707r$ 的距离处进行分割, 将反射面划分成面积相等的 8 块; 每块区域面积相等使得包含的测量点个数尽可能相同, 最终反射面的分块结果见图 4(c). 这种分法顾及了反射面的对称特性, 组内测量点数目尽量相同, 同时使各测量点变形偏差的变化尽可能相近, 能够满足粗差剔除的条件, 各组测量点个数如表 4 所示.

表 4 各组测量点个数

分组	1	2	3	4	5	6	7	8
点数/个	21	19	21	19	34	35	36	36

分别计算出每组测量点偏差变化量服从的分布参数, 利用分布参数将偏差变化量数据标准化并求和, 则每组结果均服从自由度为 5 的 χ^2 分布.

(3) 类比正态分布“ 3σ 原则”——大于 3 倍标准差的数据被认为含有粗差, 应予以剔除. “ 3σ ”对应的概率为 99.7%, 这里选择显著性水平 $\alpha = 0.005$, 与之接近. 其中 $\chi_{0.0025}^2(5) = 18.386$, $\chi_{0.9975}^2(5) = 0.307$. 具体各组拟合点统计量如图 5 所示, 图中上下两条虚线为 χ^2 分布的上下限, 从中可以看出, 第 5 组中 187 号点和第 7 组中 145 号点属于粗差点. 将粗差数据剔除之后, 再次利用等权最小二乘拟合的方法计算各仰角的面型精度, 结果如表 5 所示.

表 5 剔除粗差后等权最小二乘拟合计算结果

仰角/ $^\circ$	5	20	34	45	60	90
RMS/mm	0.091	0.072	0.068	0.123	0.188	0.271

从表 5 中可以看出, 剔除粗差点之后的等权最小二乘拟合计算结果发生了明显的变化, 更符合天线反射面的安装实际——最小面型精度仰角位于 34° 和 45° 之间. 从中可以看出粗差剔除在天线测量数据处理中的重要性.

另外, 采用本文提出的一次范数最小定权方法进行曲面的拟合, 逐次循环迭代直至两次所求参数之差小于阈值, 由此求得反射面上各点最终的变形偏差并计算出各仰角下反射面面型精度, 结果如表 6 所示.

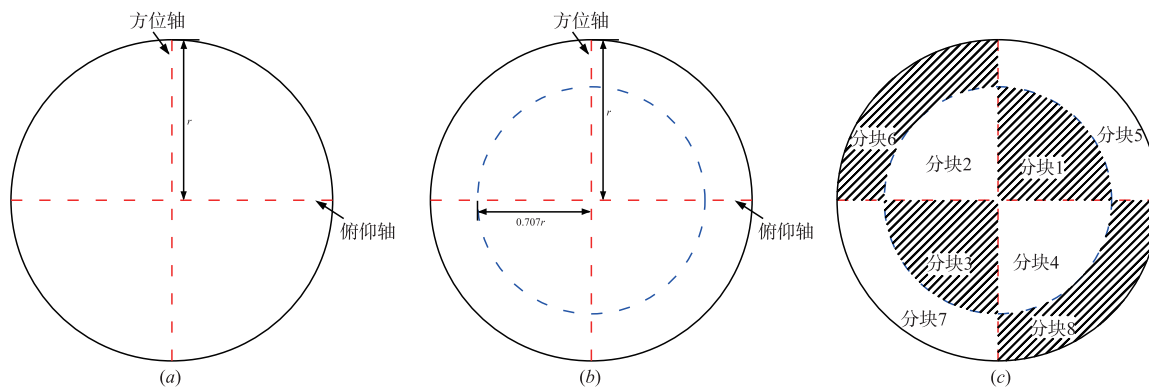


图4 反射面分块

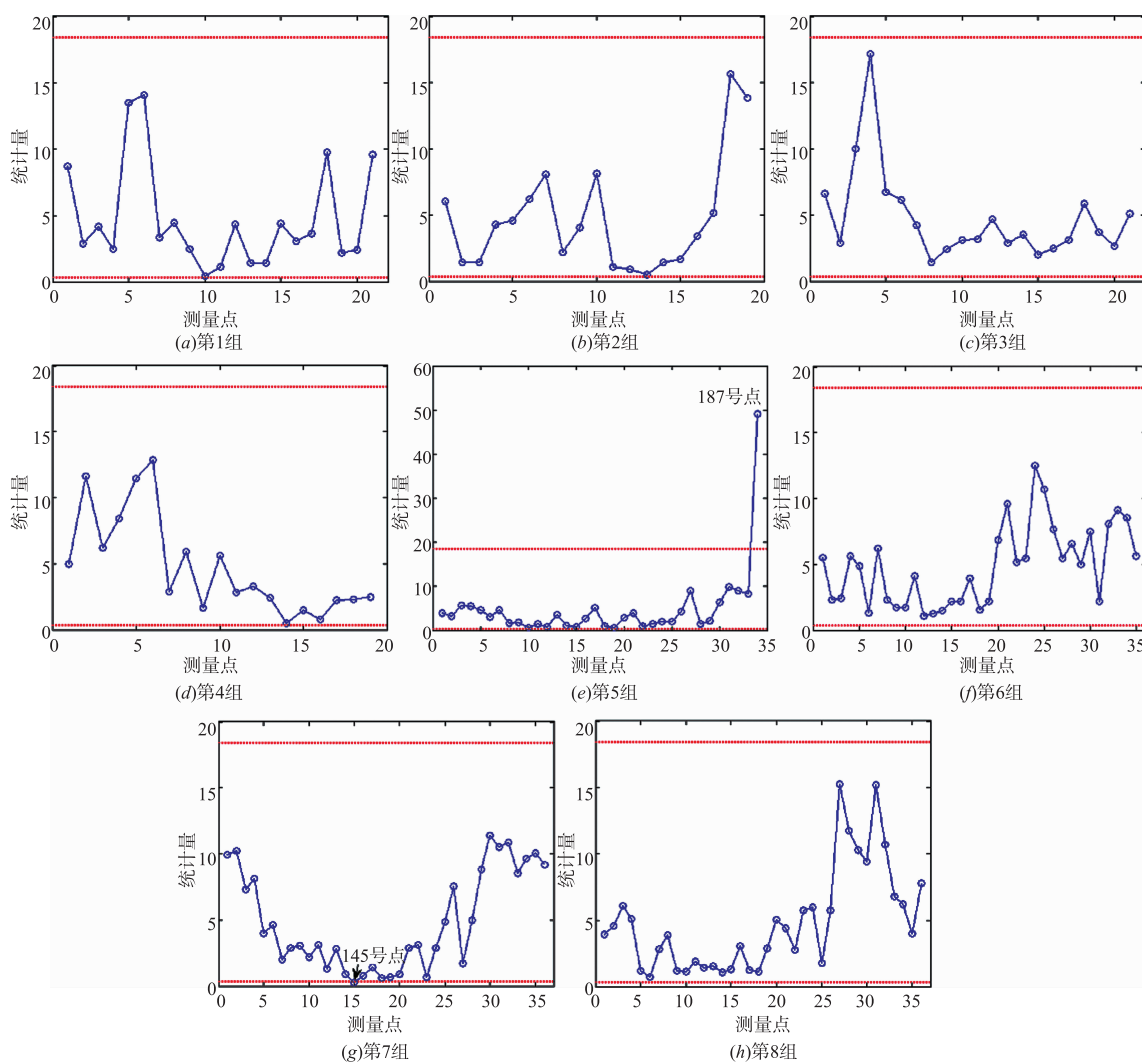


图5 各组统计量

将结果与表 5 对比发现,经过一次范数最小定权之后,反射面面型精度发生了一定的变化,仰角为 5° 、 60° 和 90° 时,RMS 值有所提升,其余三个仰角没有明显变化.分析其原因,一次范数最小法根据测量点变形偏

差的大小进行定权,小变形点的权值大,对反射面拟合的贡献也大,使得拟合结果中小变形点与理论反射面更为贴合,而变形较大的点偏离理论反射面的距离更大,计算结果的 RMS 值也会随之改变.

表 6 本文方法计算结果

仰角/(°)	5	20	34	45	60	90
RMS/mm	0.092	0.072	0.068	0.123	0.190	0.272

3.5 结果分析

对比以上三种方法的计算结果,可以发现:

(1) 等权最小二乘拟合法计算结果与天线反射面实际施工装配结果不符,说明这种方法在实际测量数据处理时存在一定缺陷;

(2) RWLS 方法考虑了测量数据中的粗差问题和不同大小变形偏差定权问题,但只是在反射面拟合的过程中削弱了粗差数据的影响,由于不能很好地定位粗差的位置,导致后续反射面面型评价不符合实际的变化情况,说明 RWLS 方法有一定的合理性,但整体的处理流程也存在局限性;

(3) 本文方法所取得的结果更符合实际,相比于 RWLS 方法能够很好地定位粗差点的位置,使得在反射面拟合和反射面面型评价中都能削弱了粗差数据的影响,从而获得较为合理的处理结果.

4 结论

正确处理天线反射面测量数据是准确获取反射面变形信息的基础. 天线反射面多仰角测量数据能够反映出反射面连续变形的规律,本文所提的结合粗差剔除和一次范数最小定权的反射面拟合方法,顾及不同仰角下天线反射面连续测量数据的特点,通过建立检验统计量对测量数据中的粗差点进行检验、剔除;引入一次范数最小法对变形偏差不同的拟合点进行定权. 经过实际数据的拟合计算,本文方法克服了等权最小二乘拟合忽视的粗差问题和“虚拟最优”问题,同时避免了 RWLS 方法难以准确定位粗差的缺点,能够合理地探测出测量数据中的粗差点,计算结果真实、准确,适合于天线反射面多仰角测量数据的处理.

参考文献

- [1] 王从思,肖岚,项斌斌,等. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2017,47(5):059503.
WANG Cong-si, XIAO Lan, XIANG Bin-bin, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas [J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47(5): 059503. (in Chinese)
- [2] RUZE J. Antenna tolerance theory-A review [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(4): 633 - 640.
- [3] 叶尚辉,李在贵. 天线结构设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986. 83 - 89.
- [4] 李鹏,郑飞,段宝岩. 考虑馈源位置误差的面天线机电耦合优化设计[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1377 - 1382.
LI Peng, ZHENG Fei, DUAN Bao-yan. Electromechanical coupling optimization design of reflector antennas including feed position error [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1377 - 1382. (in Chinese)
- [5] IMBRIALE W A, BRITCLIFFE M J, BRENNER M. Gravity Deformation Measurements of NASA's Deep Space Network 70-Meter Reflector Antennas [R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2001.
- [6] 李宗春. 天线测量理论、方法及应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2003.
LI Zong-chun. On the Measuring Theory, Method and Application of Antenna [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [7] 李宗春,李广云. 天线几何量测量理论及其应用[M]. 北京:测绘出版社, 2009. 63 - 91.
LI Zong-chun, LI Guang-yun. Measuring Theory, Technique and Application of Antenna [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009. 63 - 91. (in Chinese)
- [8] 王从思,段宝岩,仇原鹰. 基于最小二乘法的天线变形反射面的拟合[J]. 现代雷达, 2004, 26(10): 52 - 55.
WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, QIU Yuan-ying. Fitting of distorted reflector antenna surface based on least square method [J]. Modern Radar, 2004, 26(10): 52 - 55. (in Chinese)
- [9] 马增祥,杨德华,王淑青,等. 基于刚体位移的天线反射面拟合新算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 29 - 35.
MA Zeng-xiang, YANG De-hua, WANG Shu-qing, et al. Antenna reflector surface fitting algorithm based on rigid body displacement principle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 29 - 35. (in Chinese)
- [10] WANG W, WANG C S, DUAN B Y, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna [J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2014, 8(3): 158 - 164.
- [11] 付丽,仲伟业,乔海花,等. 天线面板重力变形的主动控制量计算方法研究[J]. 天文学报, 2015, 56(4): 378 - 390.
FU Li, ZHONG Wei-ye, QIAO Hai-hua, et al. Research on the calculated methods of active control value for antenna panel deformations under gravity [J]. Acta Astronomica Sinica, 2015, 56(4): 378 - 390. (in Chinese)
- [12] BAN Y, DUAN B Y, WANG C S, et al. Homology parameters for large axisymmetric shaped dual-reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3392 - 3398.
- [13] 段玉虎. 副反射面调整模型及工程实现方法[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(3): 180 - 186.

- DUAN Yu-hu. Subreflector adjustment model and engineering realization method [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(3):180-186. (in Chinese)
- [14] 荣吉利, 夏鹏, 冯志伟, 等. 抛物面天线反射面参数化建模与热变形优化分析[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(10):998-1002.
- RONG Ji-li, XIA Peng, FENG Zhi-wei, et al. Parameterized modeling and thermal deformation analysis for paraboloid antenna reflector[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(10):998-1002. (in Chinese)
- [15] 李建军, 尹鹏飞, 赵现斌, 等. 双馈源双偏置结构星载通信多波束天线[J]. 微波学报, 2018, 34(4):10-15.
- LI Jian-jun, YIN Peng-fei, ZHAO Xian-bin, et al. Multi-Beam antenna with double feeds and dual-offset configuration for space-borne communication[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(4):10-15. (in Chinese)
- [16] 华慕麟. 天线变形曲面的一种拟合方法[J]. 现代雷达, 1994, 16(1):75-82.
- HUA Mu-lin. A best-fit method for deformed surface of antennas[J]. Modern Radar, 1994, 16(1):75-82. (in Chinese)
- [17] 李干. 大型天线安装测量与面型数据处理若干问题研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2012.
- LI Gan. On Key Techniques about Large Antenna Installation Measuring and Surface Data Processing[D]. Zheng Zhou:PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [18] 张勤, 张菊青, 岳东杰, 等. 近代测量数据处理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2011. 96-104.
- ZHANG Qin, ZHANG Ju-qing, YUE Dong-jie, et al. Advanced Theory and Application of Surveying Data[M]. Beijing:Surveying and Mapping Press, 2011. 96-104. (in Chinese)
- [19] 冯其强, 李广云, 李宗春. 数字工业摄影测量技术及应用[M]. 北京:测绘出版社, 2013. 87-112.
- FENG Qi-qiang, LI Guang-yun, LI Zong-chun. Digital Industrial Photogrammetry Technology and Application[M]. Beijing:Surveying and Mapping Press, 2013. 87-112. (in Chinese)
- [20] SUBRAHMANYAN R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(8):2590-2596.
- [21] BUFFA F, CAUSIN A, CAZZANI A, et al. The Sardinia radio telescope: A comparison between close-range photogrammetry and finite element models[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 2017, 22(5):1005-1026.
- [22] 王伟, 段宝岩, 马伯渊. 重力作用下天线反射面变形及其调整角度的确定[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4):645-650.
- WANG Wei, DUAN Bao-yan, MA Bo-yuan. Gravity deformation and best rigging angle for surface adjustment of large reflector antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4):645-650. (in Chinese)

作者简介



汪文琪 男, 1996 年生于安徽宿州. 战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院硕士研究生, 主要研究领域为天线反射面测量及数据处理、精密工程测量等.
E-mail: wenqi_xd@163.com



李宗春 男, 1973 年生于山东日照. 战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院教授. 主要研究领域为精密工程测量、天线反射面测量及数据处理等.
E-mail: 13838092876@139.com