

利用射电星校准 13 m 测控天线指向误差 及测试结果^{*}

赵军祥, 教富龙, 杨文洁

(北京跟踪与通信技术研究所·北京·100094)

摘要:分析了利用射电星校准 13m 测控天线指向精度的方法,综合利用射电星和光标测试数据,采用简化的天线误差模型,计算出天线误差系数,经过误差修正后天线的指向精度达到设计要求。

关键词:天线;射电星;指向精度

中图分类号:TN820.4

文献标识码:A

文章编号:1674-5620(2009)03-0013-03

Calibrating 13m TT&C Antenna Pointing Error Using Radio Star and the Test Results

ZHAO Jun-xiang, JIAO Fu-long, YANG Wen-jie

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094)

Abstract: The means using radio star to calibrate 13 m TT&C antenna pointing errors is analyzed. The antenna error coefficients are obtained jointly using the radio star and optical target test data according to a simplified antenna error model. The antenna pointing accuracy satisfies the design requirements after errors are corrected.

Keywords: Antenna; Radio Star; Pointing Accuracy

0 引言

射电星是能够辐射电磁信号的恒星或恒星状天体。由于距地球非常遥远,射电星可以作为点源处理。射电星发出的信号到达地面时,经过空间衰减,信号强度很低,接近于噪声,天线通过程序引导才能进行跟踪。

卫星测控站天线指向精度对卫星定轨精度有较大影响,在天线安装完毕后,需要对指向误差进行标定。由于射电星运行轨迹可以通过星历表进行精确计算,任一时刻其相对天线的方位俯仰是已知的。因此,射电星可用于天线指向误差校准。与光标相比,射电星从低仰角到高仰角均可观测,克服了光标仰角低的缺陷。但是,对特定射电星,可能只在有限的方位出现,不能实现全方位覆盖。射电星和光标结合,可以弥补各自缺陷,提高校准精度。

2008 年 8 月至 10 月,利用仙后和金牛两颗射电星及各站设立的光标,对某项目主站和副站的 2 副 C13m 卫星测控天线指向误差进行了校准,得到

了两天线方位、俯仰的误差系数,用于对天线的测角数据进行修正。

1 天线指向误差计算方法

分为跟踪射电星时指向误差计算和对光标时指向误差计算。

1.1 对射电星时指向误差计算

首先计算射电星的跟踪数据,对天线进行程序引导使之指向射电星,天线接收的射电星信号经下变频器变为 70 MHz 中频信号,送给 Agilent4440A 频谱仪,在频谱仪上观察信号电平,然后在方位上天线正偏,利用频谱仪观察信号电平下降情况,调整正偏角度,使信号电平相对无偏置时下降适当幅度。信号稳定后,再转为负偏,调整负偏角度,使信号电平下降幅度与正偏时相等,分别记录天线正偏角度 ΔA_+ 、负偏角度 ΔA_- ,及测试结束时刻天线的方位角 A 、俯仰角 E 。取消天线方位偏置,在俯仰上用同样的方法进行正偏负偏,得到正偏角度 ΔE_+ 、负偏角度 ΔE_- 。天线正偏、负偏交替进行,获取多组测

* 收稿日期:2008-12-25;修回日期:2009-02-13

第一作者简介:赵军祥(1965—),男,博士,研究员,主要从事航天测控技术研究。

试数据。

对每组数据,根据正偏、负偏角度,天线方位指向误差 ΔA 、俯仰指向误差 ΔE 的计算方法为

$$\Delta A = \frac{\Delta A_+ + \Delta A_-}{2}$$

$$\Delta E = \frac{\Delta E_+ + \Delta E_-}{2}$$

ΔA 、 ΔE 含有指向系统误差、信号随机噪声、仪器分辨率及人为误差的影响。

1.2 对光标时指向误差计算

标校塔上信标机开机,天线对塔进行自跟踪,ACU 输出的天线测角数据记为 A 、 E 。自跟踪完成后,调整天线望远镜光轴,使望远镜对准塔上光标,这样光轴与电轴保持一致。

转动天线,使天线望远镜分别对准各个光标,记录对准光标时 ACU 输出的角度 A 、 E 。

设大地测量提供的光标相对天线望远镜的方位俯仰值为 A_G 、 E_G ,则天线对光标的指向误差为

$$\Delta A = A - A_G$$

$$\Delta E = E - E_G$$

2 天线误差系数计算

建立天线方位和俯仰指向误差数学模型,综合利用射电星和光标测试数据,解算天线误差系数。利用解算出的误差系数,计算天线跟踪卫星时的指向误差,对 ACU 输出的测量值进行修正。

根据对天线大盘不水平等的标定结果,采用简化的天线指向误差模型,忽略方位轴相对天顶的偏差,则方位和俯仰指向误差仅与俯仰有关,相应的数学模型为

$$\Delta A = \tan(E) \cdot \beta_1 - \sec(E) \cdot \beta_2 + \beta_3 \quad (1)$$

$$\Delta E = \cos(E) \cdot \beta_4 + \operatorname{ctan}(E) \cdot \beta_5 + \beta_6 \quad (2)$$

式中 A 、 E 分别为与 ΔA 、 ΔE 对应的射电源方位、俯仰角; β_1 为方位轴与俯仰轴非正交误差; β_2 为电轴与俯仰轴非正交误差; β_3 为方位编码零点误差; β_4 为重力变形系数; β_5 为大气折射改正后的残差; β_6 为俯仰编码零点误差。

假设有 n 组观测数据 ($n > 3$),利用最小二乘法可以解算出误差系数

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}_1^\top \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{B}_1^\top \cdot \Delta A \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{B}_2^\top \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^\top \cdot \Delta E \quad (4)$$

式中 $\mathbf{X} = (\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3)^\top$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \tan(E_1) & -\sec(E_1) & 1 \\ \tan(E_2) & -\sec(E_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tan(E_n) & -\sec(E_n) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta A = (\Delta A_1 \quad \Delta A_2 \quad \cdots \quad \Delta A_n)^\top$$

$$\mathbf{Y} = (\beta_4 \quad \beta_5 \quad \beta_6)^\top$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \cos(E_1) & \operatorname{ctan}(E_1) & 1 \\ \cos(E_2) & \operatorname{ctan}(E_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(E_n) & \operatorname{ctan}(E_n) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta E = (\Delta E_1 \quad \Delta E_2 \quad \cdots \quad \Delta E_n)^\top$$

光标俯仰角很低,天线对光标时俯仰误差较大。因此,解算方位误差系数时,使用射电星和光标测试数据,解算俯仰误差系数仅使用射电星测试数据。

3 计算结果

在天线指向精度标定期间,主站和副站天线跟踪金牛和仙后 2 颗射电星,因夜间射电星信号平稳,测试均在晚上进行,主站和副站各测得 100 余组数据。根据射电星测试数据和光标测试数据,利用式(3)和式(4)分别计算出每个天线的 6 个误差系数。利用 6 个误差系数计算得到的天线在不同仰角时方位和俯仰指向误差曲线与实测结果比较见图 1—图 4。

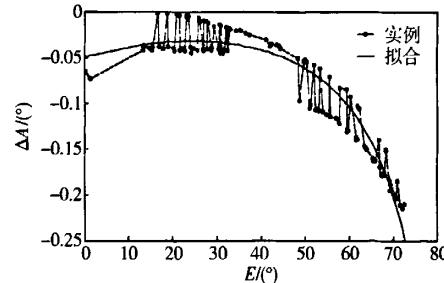


图 1 主站天线方位指向误差实测曲线
与理论拟合曲线

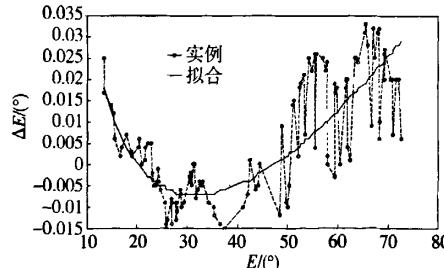


图 2 主站天线俯仰指向误差实测曲线
与理论拟合曲线

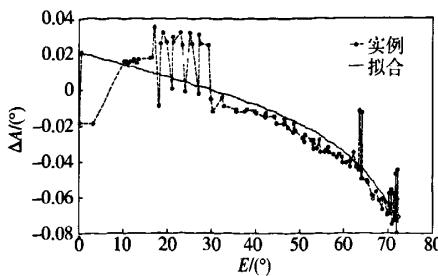
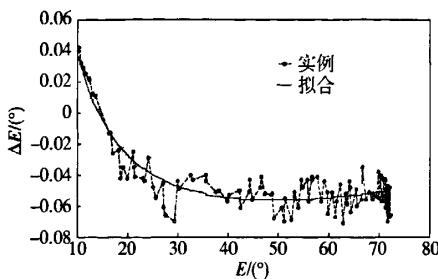


图3 副站天线方位指向误差实测曲线与理论拟合曲线

图4 副站天线俯仰指向误差实测曲线
与理论拟合曲线

对每一个观测点,利用误差系数计算出的指向误差与实测误差相减,得到修正后的指向误差残差 δA 、 δE ,其计算公式为

$$\delta A = \Delta A_m - \Delta A_c$$

$$\delta E = \Delta E_m - \Delta E_c$$

ΔA_m 、 ΔE_m 为实测的指向误差, ΔA_c 、 ΔE_c 为按式(1)、式(2)计算得到的误差。

对全部测试数据,两站方位、俯仰指向误差残差曲线见图5—图8。用公式修正指向系统误差后,两站的13 m测控天线在方位、俯仰上指向精度在0.03°以内。

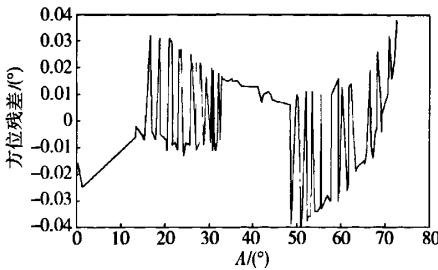


图5 主站天线方位指向误差残差曲线

卫星定点后,利用主、副站48 h测距数据对卫星进行精密定轨,根据卫星精轨标定天线俯仰和方位的系统误差,标定结果与射电星测试结果完全一致,说明利用射电星校准13 m天线指向误差方法

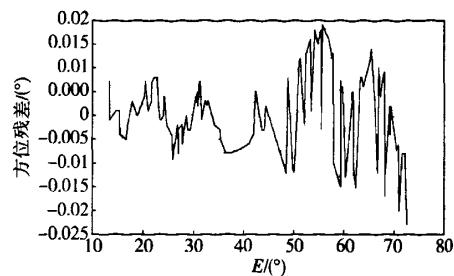


图6 主站天线俯仰指向误差残差曲线

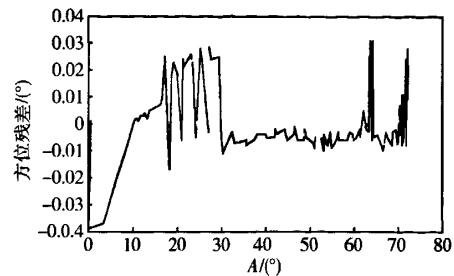


图7 副站天线方位指向误差残差曲线

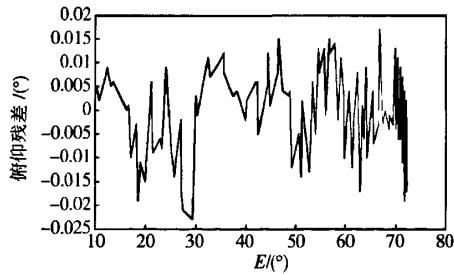


图8 副站天线俯仰指向误差残差曲线

可行,精度满足要求。

由于13 m天线口径小,只有仙后和金牛2颗信号较强的射电星可供使用。因两站靠近赤道,这两颗射电星只在有限的方位范围内出现,给天线校准带来不利影响。对口径较大的天线和中纬度地区,可使用的射电星较多,射电星出现的范围增大。因此,可以采用更精确的模型,提高校准精度。

参考文献

- [1] 苗永宽. 球面天文学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [2] 中国科学院紫金山天文台. 2007年中国天文年历[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [3] 林昌禄. 天线测量技术[M]. 成都:成都电信工程学院出版社,1987.
- [4] 王德纯,丁家会,程望东. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 电子工业出版社,2006.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>