ISSN 2095-1000 CN 11-1780/TP

Established in 1976

# 基于修正模型的天线指向误差统计特性分析

章鹏飞,鲁高飞,史兼郡,刘仲博,王 坤 (西安卫星测控中心西安710043)

摘要:作为评估天线性能的重要指标之一,天线指向精度直接影响着天线的跟踪观测性能。为了适应任务需求,提高 天线及星地链路分析精度,本文基于指向误差修正模型对模型各分量的影响因素含义进行了系统分析,并定量研究了各个 分量对指向误差的影响。基于各模型参数的分布特性,提出了一种指向误差概率分布模型,进一步完善了天线指向误差分 析计算方法,最后利用天线的典型参数分析计算了天线指向误差角近似满足修正瑞利分布下的特征,可为后续星地链路统 计分析提供参考依据。

关键词:修正模型;指向精度;统计分析;概率分布
中图分类号:TN95;V556 文献标志码:A 文章编号:2095-1000(2023)02-0042-10
DOI: 10.12347/j.ycyk.20220730001
引用格式:章鹏飞,鲁高飞,史兼郡,等.基于修正模型的天线指向误差统计特性分析[J].遥测遥控,2023,44(2):42 -51.

# Study on the statistical characteristics of pointing error for an antenna based on the correction model

ZHANG Pengfei, LU Gaofei, SHI Jianjun, LIU Zhongbo, WANG Kun

(Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** As one of the most important characteristics, the pointing accuracy of the antenna directly affects the observation and tracking performance of the antenna. In order to meet the task requirements and improve the analysis accuracy of antenna and satellite ground link, this paper systematically analyzes the meaning of influencing factors of each component on pointing error. Based on the distribution characteristics of the model parameters, a probability distribution model of antenna pointing error is proposed, which can be used to improve the analysis method of antenna pointing error. Finally, the characteristics of antenna pointing error angle under the approximate modified Rayleigh distribution are analyzed and calculated by using typical parameters, which can provide a reference for the subsequent statistical distribution analysis of satellite ground link.

Keywords: Correction model; Pointing accuracy; Statistical analysis; Probability distribution

Citation: ZHANG Pengfei, LU Gaofei, SHI Jianjun, et al. Study on the statistical characteristics of pointing error for an antenna based on the correction model[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 42–51.

# 引 言

随着星地通信技术的快速发展及通信链路中 海量数据传输的需求,地面天线设备正朝着高频 段、大口径、高精度指向与跟踪等方向发展。指 向精度作为天线性能的重要指标之一,直接影响 着地面天线设备的信号接收能力以及星地链路传 输的有效性与可用率。因此天线指向误差测量及 其精度的提升一直受到广泛的关注与研究<sup>[1-3]</sup>。 通常影响天线指向精度的因素很多并且性质 复杂。按误差来源可分为静态误差源和动态误差 源两种。按误差性质,可分为系统误差和随机误 差。针对天线指向修正,国内外在天线的指向误 差源分析及天线指向精度改进方面做了大量的研 究工作<sup>[4-9]</sup>。通常提高天线指向精度的方式有两 种<sup>[10-13]</sup>。第一种是硬件校准,即在天线建造安装过 程中,通过提高硬件设备的加工和装配精度来使 得天线局部满足一定指向精度。第二种是软件标

基金项目: 部委级项目 (TJ20191A20064); 中科院二代导航项目 (ZFS19001D-ZTYJ02) 收稿日期: 2022-07-30 修回日期: 2022-09-05

校,通过分析天线各误差来源,建立对应的天线 指向误差修正模型,并用有塔或无塔标校的方式 完成模型系数的解算,最后伺服系统根据修正模 型试试修正补偿从而提高天线的指向精度。

指向误差修正模型主要包括:基本参数模型, 球谐函数模型以及神经网络模型等<sup>[10-15]</sup>。其中基本 参数模型的模型参数物理含义明显,模型修正稳 定,因此广泛应用于各类天线的指向修正。为了 评价修正模型的修正效果,通常取标校观测数据 点集的修后残差均方根值来进行衡量。天线在实 际使用过程中,受时变因素如风载荷、温差等影 响往往会使得天线很容易突破上述修正后残差范 围。因此随着天线口径以及观测频率的增加,要 实现高精度指向跟踪目标极具挑战,任何引起指 向误差的因素都需要慎重考虑并采用多种检测分 析方法来研究上述问题。

基于观测任务要求,本文分析了天线指向误 差修正模型中各个分量的影响因素含义,并从工 程应用角度定量研究了各分量指向误差的影响。 基于各影响因素分布规律,本文提出了一种指向 误差概率分布模型,并基于实际使用要求将其近 似为修正瑞利分布,随后基于典型修正模型参数 分析了天线指向误差的统计特性,可为后续星地 链路统计提供分析依据。

# 1 指向误差源分析与模型

#### 1.1 主要误差源概述

天线在安装建造调试过程中通过天线的轴系 校准、电轴校准、馈源位置调整等工程方法进行 硬件校准修正,使得天线具备一定指向精度。在 后续天线运行的过程中,在对指向误差源分析的 基础上,建立指向误差修正模型,通过软件标校 的方法对天线进行进一步的指向误差补偿才能满 足天线实际观测精度要求。通常天线的指向误差 源主要包括:天线电轴和机械轴不重合,俯仰轴 与方位轴不正交,天线的方位轴偏离天顶、方位 和俯仰编码器的零位偏差、天线重力变形误差以 及大气折射误差等。根据上述主要误差源可建立 天线指向误差线性分解模型如式(1)、式(2) 所示<sup>[10]</sup>:

 $\Delta A = C_1 - C_3 \cos C_4 \cos A \tan E + C_5 \tan E - C_3 \sin C_4 \sin A \tan E - C_6 \sec E + \varepsilon_4$ 

 $\Delta E = C_2 + C_3 \cos C_4 \sin A + C_7 \cos E - C_3 \sin C_4 \cos A + C_8 \cot E + 1/60 \cot E + \varepsilon_E$ (2)

式(1)、式(2)中, $\Delta E$ 为俯仰误差, $\Delta A$ 为方位 误差,A为天线观测方位值,E为天线观测俯仰 值, $C_1 \sim C_8$ 为模型参数,具体含义可参考文献[10]。 其中 1/60cot(E)为传统大气折射计算模型修正量,  $\varepsilon_A$ 与 $\varepsilon_E$ 分别为方位俯仰的随机误差项,主要受风 速、温度造成的天线形变等导致的其他高阶时变 误差。

# 1.2 指向偏差对天线增益的影响

对星地链路而言,理想的通信情况为星载天 线和地面天线均指向对方的最大增益方向。实际 任务过程中,两者之间总可能会偏离对方主轴方 向,从而导致链路存在指向误差损耗。通常对于 地面天线而言星载天线口径相对较小,因此星载 天线指向偏差引起的损耗可忽略不计。地面天线 指向偏差引起的天线增益减少量可用如下公式 近似:

$$\Delta G(\theta) = 10\log(e^{2.773\theta^2/HW^2})$$
(3)

式中, θ为天线指向偏差, HW为天线的半功率波 束宽度。HW与天线工作波长λ及天线口径D有关, 通常可按如下式近似表示:

$$HW = 70\frac{\lambda}{D} = 70\frac{c}{fD} \tag{4}$$

式中*c*为光速,*f*为工作频率。图1给出了典型口径 天线及工作频率的天线指向偏差与增益损失的理 论关系。

由图1可知,频率f越高,天线口径D越大,则天线半功率波束宽度越小,指向偏差引起的增益损耗越大。以D=60 m,f=7 500 MHz为例,天线的半功率波束宽度为148"。在指向偏差为20、60、100时,分别对应着0.17 dB、1.53 dB、4.26 dB的衰减。通常要求天线指向误差小于半功率波束宽度的十分之一,此时指向误差引起的损失小于0.13 dB。但随着天线口径以及观测频率的增加,实现上述目标极具挑战,因此有必要在指向误差修正模型的基础上,充分考虑引起指向误差的各因素统计特性,在确保满足使用要求的情况下,对指向性能进行合理有效评估。

# 2 指向模型因子分析

(1)

受限于天线工作任务需求,通常天线利用射 电星标校及指向修正模型解算标定的系数,会在



关系



后续任务中持续使用很长一段时间。因此固定的 标校系数不能满足时变因素影响如风载荷、温差 等条件下高精度指向需求。本节在指向修正模型 基础上,对指向模型误差各分量影响因子的统计 特征进行分析。

#### 2.1 大气环境对结构的影响

由于天线工作在室外自然环境中,因此会受 到各类大气环境如变化的气温,雨、雪、风以及 非均匀光照等影响,使得天线结构产生不同程度 的变形,进而影响天线的指向精度,通常表征为 式(1)、式(2)中的随机误差项。

#### 2.1.1 风载荷对结构的影响

风载荷作用在天线时会使得反射面及其支撑 结构产生变形从而引起指向误差。风载荷可分为 稳态风和阵风,其中稳态风引起的误差可视为系 统误差,阵风在风速、风向以及开始结束时刻均 是无规律的,可视为随机误差。对某设备所在区 域一年的风速进行统计如图2所示。



year

由图2可知,该区域最大风速达到25 m/s,且 每个月份均有15 m/s以上的风速。天线在上述可用 时段内,往往会受到大风载荷的影响从而使得天 线形变造成信号收发增益降低。利用Ansys软件建 立天线的有限元模型进行分析。在假定风速为 16 m/s、风向水平的条件下,风载荷可对俯仰轴 两端造成0.2 mm左右的高度差,进而引起俯仰轴 与方位轴的垂直误差,最终影响天线的指向 精度<sup>[16]</sup>。

2.1.2 温度对结构的影响

环境温度以及太阳光照与光照角度变化会使 得天线各部位结构的热膨胀不同,从而改变天线 整体的结构形状。如天线主反射面通常一面受太 阳直射,另一面背阴会导致背架膨胀尺度不一致 进而影响反射面精度一致性,引起天线指向误差。 天线座架受太阳光照不均匀,会导致热变形不一 致,引起天线轴角测量误差等<sup>[17]</sup>。某设备所在区域 记录一段时间内的温度变化如图3所示。

由图3可知,该区域在上述时间段内最大环境 温度变化达到4℃/hr。为减小温度变化引起的天 线变形误差,通常将天线外露表面涂上白漆或高散 射红外涂料等<sup>[17]</sup>。此外还可在天线反射背面等关键 位置布置温度传感器,实时采集温度并补偿修正。

综上分析结合建立的天线有限元模型,可估





计风载荷及温度变化引起的指向误差如表1所示。

表1	不同风载荷及温度变化导致的指向误差	[18]
----	-------------------	------

 Table 1
 Pointing error caused by different wind speed and temperature changes

治実測	环境变化(温度变化、风速)导致的指向误差					
庆左你	[2,4]	[5,10]	[7,20]			
稳态风	2	10	40.0			
热变形	0.5	1.0	2.0			
阵风	1	5.0	20			

由表1可知环境变化越剧烈,引起的指向误差 越大。

#### 2.2 大气折射模型影响分析

式(2)中大气折射修正模型仅与天线观测目标 时俯仰角有关,未考虑温度、湿度、大气压等时 变环境的影响。对于大口径天线高频段跟踪任务 而言,在低仰角范围内的模型修正精度不能满足 高精度指向要求,从而会出现天线跟踪过程中接 收在低仰角下信噪比会随之降低(如图4所示)。 因此需要综合考虑大气环境,选择精度更高的大 气折射修正模型完成天线指向的精确修正。

大气折射主要受对流层的影响。目前高精度 的大气折射修正计算精度基本仍在同一数量级上 徘徊<sup>[19,20]</sup>。文献[20]讨论了四种典型广泛使用的大 气折射修正模型。以《航海表》中模型为标称值, 其余三种修正模型与其残差结果如图5所示。

从图5中可知,当天顶距在0~85之间,普尔 科沃表、《中国天文年历》、UNSW932以及《航海 表》这四种模型的大气折射修正精度基本相当。





Fig.4 The relationship between signal-to-noise ratio of antenna received signal and elevation angle





当天顶距在[0,80]之间即俯仰角在[90,10]之间时, 上述四种模型的修正精度偏差值在5"以内。当天 顶距在[80,85]之间即俯仰角在[10,5]之间时,上述 四种模型的修正精度偏差值不超过30"。因此在上 述角度区间进行大气折射修正应用中,该四种模 型均可作为可靠参考修正模型。为了方便计算, 本文采用UNSW932模型研究不同温度、相对湿度 以及大气压强条件下对大气折射修正的影响,并 与式(2)中采用的简约大气折射修正模型比对分析。

UNSW932的大气折射修正模型计算公式如下:

$$\Delta E = 10^{-6} N_0 \cos(E) m'(\xi_0)$$
 (5)

其中, *E*为俯仰角度,  $\xi_0$ 为真天顶角, 实际计算可 用 $\xi_0=90-E$ 近似, *m*'( $\xi_0$ )为母函数,  $N_0$ 为大气折射 率。本文采用Smith-Weintraub方程来计算如下式:

$$N_0 = \frac{77.6}{T} \left[ P + \frac{4810 \times P_e}{T} \right] \times 10^{-6}$$
 (6)

式中,P(hpa)为大气压, $P_e(hpa)$ 为水气压,T(K)为绝对温度。水气压 $P_e$ 由地面相对湿度RH与饱和水气压 $P_w$ 决定:

$$P_{\rm e} = \rm RH \times P_{\rm w} \tag{7}$$

本文采用Golf-Gratch公式计算饱和水气压如下式:

$$\log P_{\rm W} = C_1 (1 - T_1/T) + C_2 \log(T/T_1) + C_3 \log(1 - T_1/T) + C_3$$

 $T_{1}/T) + C_{4} \log(1 - T_{1}/T) + C_{5}$ (8)

式中,  $T_1$ =273.16(K)、T=273.15+t(K);  $C_1$ =10.79574、  $C_2$ =-0.05028、 $C_3$ =0.000150475、 $C_4$ =0.00042873、  $C_5$ =0.78614。

图 6 为温度变化范围在-30 ℃~30 ℃,大气压 强 P=1 013 hPa,相对湿度 RH=50%的情况下,俯 仰角在 5°至 50°时,UNSW932 模型计算的大气折 射角修正量与式(2)中大气折射修正模型折射角修 正量的差值。



图6 不同温度下的两种模型折射修正量差值 Fig.6 The difference between the two models of refraction corrections at different temperatures

由图6可知,当气压与湿度保持不变情况下,俯仰角越低两模型修正量相差越大。俯仰角超过 20°时两者折射角修正相差较小且变化平缓。在俯 仰角较低时,折射角修正差随温度升高有先减后 增的现象,可以看出在温度较高或者较低且俯仰 角较低的情况下两种模型的折射角修正差异显著。

图 7 为大气压强变化范围 861 hPa~1 115 hPa, 温度 T=15 K,相对湿度 RH=60%的情况下,俯仰 角在 5°至 50°时,两种模型计算的折射角修正量的 差值。

由图7可以看出: 在一定的大气压强变化范围



内,两种模型的折射角修正差随大气压强的上升 而基本呈单调递增形式。两种模型的差值在低俯 仰角处随大气压强的提升有剧烈的变化,单调递 增趋势也十分明显。

图 8 为相对湿度变化范围 0%~100%,大气压 强 P=1 013 hPa,温度 T=15 ℃的情况下,俯仰角在 5°至 50°时,两种模型计算的折射角修正量的 差值。



图 8 不同相对湿度下的两种模型折射修正量差值 Fig.8 The difference between the two models of refraction corrections at different relative humidity

由图8可以看出:在俯仰角较低时随着相对湿度的上升两模型的差值也随之上升。在低俯仰下两种模型的差值较大且随相对湿度的变化显著。 在俯仰角为7°,相对湿度为0%时,两者差值为 -71.52";相对湿度为100%时,两者差值为 85.54"。在低俯仰下两种模型的差值随相对湿度基 本呈现单调递增的趋势且变化显著。

综上所述,与简化大气折射修正模型相比,

基于大气实时产生的折射修正模型能够体现不同 的气象条件对大气折射角的影响,特别是在低仰 角时两种模型之间的差别更加明显。因此为满足 高精度的天线指向要求,需引入实时大气环境参 数构建的折射模型。

# 2.3 修正模型系数影响分析

为了满足天线任务指向精度要求,天线通常 利用射电源完成对天线各方向指向误差测量及模 型系数的接收。为了判断每次利用误差修正模型 进行标校解算过程中,是否有不必要的误差分量 或者哪些误差分量已经被提前修正,需通过各次 误差分量的显著性检验算法,用以评价模型各分 量的差异程度。对式(1)、式(2)可统一表示为如下 矩阵形式

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{9}$$

对此模型分量 $\beta_j$ 提出假设并进行计算做出如下 拒绝 $H_0$ 或 $H_1$ 的结论:

$$\begin{cases} H_0: \beta_j = 0\\ H_1: \beta_j \neq 0 \end{cases}$$
(10)

对于式(9)的参数估计结果 $\hat{\beta} = (X^{\mathsf{T}}X)^{-1}Xy_{\circ}$ 若I $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$ ,则可以构造如下统计检验量 $t_i$ 。

$$t_j = \frac{\beta_j}{\widehat{\sigma} c_{ij}} \tag{11}$$

其中,  $c_{jj}$ 为矩阵 $\sigma^2(X^TX)^{-1}$ 中的第j行第j列的元素。给定显著性水平 $\alpha$ 情况下,有如下 $t_i$ 检验:

$$t > t_{\alpha/2} (n - p - 1)$$
 (12)

若上式成立,则拒绝原假设*H*<sub>0</sub>,即认为模型 分量β<sub>2</sub>显著不为零,即表明β<sub>2</sub>对应误差项分量对总 误差的贡献是显著的,反之对应误差项分量对总 误差的贡献是不显著的。

为了检验所建立指向误差模型是否包含主要 误差项以及核验误差模型分量是否必要或已被提 前修正,计算某次标校模型解算结果的系数显著 性检验统计量如表2所示(表中的0表示其统计量P 值小于10<sup>-4</sup>)。

表2 模型修正的检验统计量P值

Table 2 Test statistic P value of model correction

算法类 型	统计 量	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$
预先	方位	0.768 4		0.000 3	0	0.657 6	0.423 8	
修正	仰角		0	0	0			0
未预先	方位	0.127 4		0.001 3	0.008	0.019 8	0.026 7	
修正	仰角		0	0.261	0			0

由表2中的模型系数统计量的P值可知,预先 修正计算的分量参数β<sub>1</sub>,β<sub>5</sub>,β<sub>6</sub>的P值显著不为零, 则对应误差项分量对总误差的贡献是不显著的。 这主要是预先修正处理是为了天线更快地指向所 测目标进行扫描而进行的预修正。为预先修正计 算的模型分量各参数的P值均相对较小,则对应误 差项各分量对总误差的贡献均为显著。

为比较不同标校系数对指向误差修正的影响, 利用天线某次射电源标校解算前后系数进行分析。 其中天线标校前后装订系数如表3所示。

衣) 保空修正的胖丹衣与杀颈	「系数
----------------	-----

Table 3	Solution	coefficient of	of model	correction
	Solution			CONCENIOR

模型系数	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	<i>C</i> <sub>7</sub>	$C_8$
标校解算前	0.129 42	-0.163 36	0.019 37	70.670 17	0.023 73	0.034 90	0.030 84	-0.005 51
标校解算后	0.107 38	-0.162 72	0.013 65	48.970 22	-0.000 63	0.002 33	0.028 14	0.003 47

大气校正模型残差在2.2节已经讨论,本节仅 考虑*C*<sub>1</sub>~*C*<sub>8</sub>对指向误差修正的影响如图9所示。

由图9可知,不同标校系数在不同方位与俯仰 受到的影响不一样。其中在某些特定方位及高仰 角的情况下,两次标校系数的方位补偿量差值有 剧烈的变化,最大值两者差可达到765"。根据式 (1)、式(2)可知,这主要是由于tanE在E接近90°时 会迅速增加,从而导致对应的系数补偿量产生放 大效应。不同标校系数对俯仰补偿量相对较为简 单,根据公式(2)可知,补偿量为sin(•)与cos(•)的 组合,其中•表示式(2)中的方位A或俯仰E, 因此俯仰角补偿量仅需要关注sin(•)与cos(•)最大值 为1时方位俯仰角度附近即可。

# 2.4 指向引导偏差分析

对于近地目标而言,考虑由星历轨道根数转 换得到的位置精度会在一定范围内带来天线的指 向引导偏差。对于深空超远距离目标而言,随着 星地距离不断变化增大,会使得光行时(Light





Time)引起的跟踪指向偏差效应明显(如图10所 示)。地面天线在t<sub>0</sub>时刻接收到的信号,实际上是 t<sub>0</sub>-t时刻目标发射的信号。以火星轨道探测器为 例[21,22],当星地距离达到2.9亿千米,光行时为 975.5 s, 对应的目标移动角度为25"。因此需分析 在引导偏差下模型修正补偿的偏差量。

设备方位俯仰引导偏差会引起模型修正的指 向也会存在传递偏差,假设在引导方位俯仰分别 存在方位偏差 dA 俯仰偏差 dE。根据式(1)、式(2) 可得模型修正量偏差如下式:

$$d(\Delta A) = [C_3 \sin(A - C_4) \tan E] dA + [C_5 \sec^2 E - C_3 \cos(A + C_4) \tan E \sec^2 E - C_6 \sec E \tan E] dE$$
(13)

$$d(\Delta E) = [C_3 \cos C_4 \cos A] dA + [-C_7 \sin E + C_3 \sin C_4 \sin A - C_9 \csc^2 E] dE$$
(14)

 $C \sin E$ 





例假定方位、俯仰指向引导偏差均为60"。计算不 同方位与俯仰的模型修正偏差量如图11所示。





由图11可知,模型修正量的补偿偏差优于1", 修正模型的影响可忽略不计,仅考虑轨道误差本 身即可。

#### 3 指向误差概率模型

通常不同误差源产生的误差按照误差合成方 法来估算指向精度。不同误差源会造成不同的随 机误差项或系统误差项,因此简单采用误差合成 方法不能满足指向精度分析要求。由上节分析可 知,在修正模型中各个分量参数的取值可用相对 固定均值的系统差或未知规则的随机差进行表征。 进一步简化各分量参数为互相独立的高斯分布随 机变量,则式(1)、式(2)可表示如下:

$$\Delta A = \Delta A_0 + dA$$
  

$$\Delta E = \Delta E_0 + dE$$
(15)

式中 $\Delta A_0$ 为天线方位使用模型修正系数的修正量,  $\Delta E_0$ 为天线俯仰使用模型修正系数的修正量, dA、 dE为方位与俯仰没有明确给出的未知因素误差分 量,其满足下式:

$$\frac{\mathrm{d}A \sim N(\mu_A, \sigma_A^2)}{\mathrm{d}E \sim N(\mu_E, \sigma_E^2)}$$
(16)

由式(3)可知,为分析天线与目标之间星地链路的传输性能,需给出天线的方位和俯仰误差角分量与指向误差角之间的关系。对于天线的方位与俯仰指向(*A*, *E*),其空间指向方向*r*可表示为下式:

r=[sinAcosE cosAcosE sinE] (17) 天线的方位俯仰变化会引起天线的空间指向 变化,据此可得空间指向对方位俯仰的偏导数如 下式:

$$\theta = |\operatorname{d} r| = \sqrt{(\operatorname{d} A \cos E)^2 + (\operatorname{d} E)^2}$$
(19)

上式与天线标校中指向误差修正残差均方差 统计量评价一致。求解指向误差角*θ*的三阶中心 矩如下式:

 $\Omega_3 = 8(\sigma_A \cos E)^4 (3\mu_A^2 + \sigma_A^2) + 8\sigma_E^4 (3\mu_E^2 + \sigma_E^2)$ (20) 则指向误差角 $\theta$ 的概率密度分布可近似为瑞利 分布如下式:

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{\theta}{2\sigma^2}\right]$$
(21)

其中,  $\sigma^6 = \Omega_3/16$ 。可知, 当 *E* 接近 90°时 cos*E*≈0, 此时天线工作在高仰角区域, 空间指向角误差仅 与仰角指向误差有关。因此本文仅计算分析 *E* 在 0~50°之间的情况。以 $\sigma_A = \sigma_E = 11$ "为例计算指向误差 角  $\theta$  的概率密度分布及其期望值分布如图 12 所示。



Fig.12 Compensation deviation for model correction

由图 12 可知,随着俯仰角增大指向误差角 概率分布会向零靠近,其均值也会随着减少,这 主要是由于正割补偿的情况会使得方位偏差对误 差角的贡献受俯仰角余弦值得影响。此外方差对 指向误差角的影响相比均值而言影响更为显著, 其中方差的影响尺度约为均值的三倍,因此在后 续分析中需进一步关注方差即随机差的变化 特征。

#### 4 结束语

本文基于观测任务要求详细分析了指向误差 修正模型中各分量对天线指向误差的影响。随之 本文提出了一种指向误差概率分布模型,并基于 典型分布参数分析了天线指向误差的统计分布特 征,发现了随机差相对于系统差而言对天线指向 精度的影响更为显著,可为天线的指向精度评估 提供合理有效的参考,在下一步工作中,将基于 上述概率分布分析其对星地链路性能的影响,以 满足精细化链路分析的需求。

#### 参考文献

- [1] 赵彦.大射电望远镜指向误差建模分析与设计研究[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [2] 高冠男.云台40米射电望远镜天线控制系统运行测试 分析及天线指向误差校正[D].昆明:中国科学院研究生院(云南天文台),2007.
- [3] 鲁帆,郑小松,田志新,等.Ka频段点波束天线指向精度 对星地数传链路的影响分析[J].航天器工程,2016,25
   (6):61-68.

LU Fan, ZHENG Xiaosong, TIAN Zhixin, et al. Analysis of influence on satellite-to-earth date transmission link by directing precision of Ka-band spot beam antenna [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 61-68.

- [4] 雒小红.天线角编码误差高精度修正方法[J]. 通讯世 界, 2020, 27(2): 110-111.
- [5] 付丽,凌权宝,赵融冰,等.TM65m天线基础和轨道沉
   降及对天线指向的影响[J].红外与激光工程,2016,45
   (11):190-196.

FU Li, LING Quanbao, ZHAO Rongbing, et al. Settlements of foundation and track of TM65 m and its effect on antenna pointing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 190-196.

- [6] HU K Y, YUSUP A L, XU Q. Deformation measurement and pointing model analysis of 25 m antenna[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3744(713): 424-431.
- [7] KONG Deqing, WANG Songgen, WANG Jinqing, et al. A new calibration model for pointing a radio telescope that considers nonlinear errors in the azimuth axis [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6): 733-740.
- [8] HUANG J, LIANG W, WANG C, et al. A correction method of estimating the pointing error for reflector antenna[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(PT.5): 1-12.

- [9] MEEKS M L, BALL J A, HULL A B. The pointing calibration of the Haystack antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1968, 16(6): 746-751.
- [10] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. TM65 m射电望远镜指向 模型的建立[J]. 天文学报, 2015, 56(2): 165-177.
  YU Linfeng, WANG Jinqing, ZHAO Rongbing, et al. Pointing model establishment of TM65 m radio telescope[J]. Acta Astronomica Sinica, 2015, 56(2): 165-177.
- [11] 姚克荣,许洪韬.大型高精度天线座轨道的安装方法研究[J]. 电子机械工程, 2018, 34(1): 58-61+68.
  YAO Kerong, XU Hongtao. Research on installation methods of large-scale high-precision antenna pedestal orbit[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2018, 34(1): 58-61+68.
- [12] 施浒立,古天龙.雷达天线和天文望远镜指向误差修 正的数学模型——拟里兹广义插值[J].电子机械工 程,1987(5):1-7.
- [13] 高冠男, 汪敏, 施硕彪, 等. 云台 40m 射电望远镜的指 向误差校正[J]. 天文研究与技术, 2007, 4(2): 188-194.
  GAO Guannan, WANG Min, SHI Shuobiao, et al. Pointing calibration for the 40 m radio telescope in yunnan observatory [J]. Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China, 2007, 4(2): 188-194.
- [14] 赵军祥,教富龙,杨文洁.利用射电星校准13m测控天线指向误差及测试结果[J].飞行器测控学报,2009,28
   (3):13-15.

ZHAO Junxiang, JIAO Fulong, YANG Wenjie. Calibrating 13 m TT&C antenna pointing error using radio star and the test results [J]. Journal of Space-craft TT&C Technology, 2009, 28(3): 13-15.

[15] 武宇翔,张洪波,孔德庆,等.基于实时参数的大气折 射模型和射电望远镜指向修正方法[J].光子学报, 2019,48(8):42-49.

WANG Yuxiang, ZHANG Hongbo, KONG Deqing, et al. Astronomical refraction model based on real-time parameters and research of radio telescope pointing calibration method [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48 (8): 42-49.

- [16] XXX设备机械结构子系统设计方案报告[R]. 西安: 2018: 76-98.
- [17] 孔德庆,姜正阳,张洪波,等.日照温度对大型射电望远镜轴角测量误差的影响及修正方法[J].光子学报,2019,49(11):1331-1342.
  KONG Deqing, JIANG Zhengyang, ZHANG Hongbo, et al. Effects of sunshine temperature on axis angle

measurement errors of large radio telescopes and the correction method [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2019, 49(11): 1331-1342.

- [18] 米月英. 65 m射电望远镜天线结构指向精度分析与设计[J]. 无线电工程, 2015, 5(44): 60-63.
  MI Yueying. Analysis and design on pointing precision of a 65 m radio telescope antenna structure[J]. Radio Engineering, 2015, 5(44): 60-63.
- [19] 严豪健.大气折射的研究进展[J].世界科技研究与发展,2006,28(1):48-58.YAN Haojian. Progresses in research of atmospheric

refraction [J]. World Sci-Tech R & D, 2006, 28(1): 48-58.

- [20] 苏超,王安国,谷树文,等.天文定位中的蒙气差修正 方法研究[J].导航,2007,43(4):37-41.
  SUN Chao, WANG Anguo, GU Shuwen, et al.. Simple method of atmospheric refraction in astronomical position[J]. Dao Hang, 2007, 43(4): 37-41.
- [21] 刘庆会,赵融冰,舒逢春,等.大型射电望远镜的火星 探测器跟踪技术[J].中国科学(信息科学),2019,49(6): 775-782.

LIU Qinghui, ZHAO Rongbing, SHU Fengchun, et al. Tracking technology of Mars spacecraft for large radio telescope [J]. Science in China(Information Sciences), 2019, 49(6): 775-782.

[22] 饶启龙.基于 CCSDS 的火星探测器测控通信系统链路分析与设计[M].上海:上海交通大学, 2012.

[作者简介]

章鹏飞 1989年生,硕士,工程师,主要研 究方向为信号与信息处理和飞行器测控工作。

鲁高飞 1988年生,硕士,工程师,主要研 究方向为飞行器测控工作和装备试验鉴定。

史兼郡 1992年生,硕士,助理工程师,主 要研究方向为飞行器测控工作和装备试验鉴定。

刘仲博 1996年生,本科,助理工程师,主 要研究方向为飞行器测控工作。

王 坤 1986年生,本科,工程师,主要研 究方向为飞行器测控工作和软件重构。

(本文编辑:潘三英)