

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.007

引用格式:毛南平,万胜辉,蒋知彧,等. 船载雷达光机轴偏差的动态标校[J]. 电讯技术,2014,54(9):1210-1215. [MAO Nan-ping, WAN Sheng-hui, JIANG Zhi-yu, et al. Dynamic Calibration of Non-Parallelism between Ship-borne Radar's Optical Axis and Mechanical Axis[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1210-1215.]

船载雷达光机轴偏差的动态标校*

毛南平,万胜辉**,蒋知彧,周云德,朱晓峰

(中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431)

摘要:为解决船载雷达在海上动态情况下雷达光轴与机械轴之间的偏差无法准确标校的问题,提出了采用标校电视反向法瞄船桅光标,在海上动态条件下标校雷达光机偏差的新方法,并分析了该方法的可能误差源,得出改正角误差是反向法光机偏差标校的最大误差源,给出了减少或避免改正角误差的三个解决方法,即智能选择法、相对比较法和最小二乘法,利用相对比较法对反向法光机偏差标校数据进行误差修正,标校精度优于 10"。试验结果表明,该方法解决了近距离改正角误差较大的技术难题,提高了标校精度,且该方法操作性强,在船载雷达上有较高的实用价值。

关键词:船载雷达;测控;光机轴偏差;改正角;动态标校

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)09-1210-06

Dynamic Calibration of Non-Parallelism between Ship-borne Radar's Optical Axis and Mechanical Axis

MAO Nan-ping, WAN Sheng-hui, JIANG Zhi-yu, ZHOU Yun-de, ZHU Xiao-feng

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to solve the problem that the deviation between the ship-borne radar optical axis and mechanical axis can not be calibrated accurately in dynamic sea condition, this paper proposes a new method to calibrate the ship-borne radar's optical-mechanical axis non-parallelism by calibrating TV reverse method aiming calibration target on mast in dynamic sea condition, analyzes possible error sources of the method, confirms that the parallax error is the largest error source of the reverse optical-mechanical axis non-parallelism calibration method and gives three solutions to decrease or avoid the parallax error, namely intelligent selection method, comparative method and least square method. The comparative method is used to correct calibration data and the calibration accuracy is better than 10". Tests show that the method improves the calibration accuracy by solving the technical problem of how to correct parallax error at short range, features high operability and high accuracy, and has high practical value for ship-borne radars.

Key words: ship-borne radar; TT&C; optical-mechanical axis non-parallelism; parallax error; dynamic calibration

1 引言

为了标校船载雷达电轴的变化,一般通过海上施放信标球标校光电偏差,但是当标校电视光轴发生较大漂移时,光电偏差则无法正确反应电轴变化

量。通过分析多套船载雷达近年来的标校数据,发现大部分标校电视光轴发生了变化。

为了解决标校电视光轴变化带来的系统误差偏大问题,必须重新标校光机偏差,而光机偏差的标校

* 收稿日期:2014-03-31;修回日期:2014-07-10 Received date:2014-03-31;Revised date:2014-07-10
** 通讯作者:shenghuiwan@aliyun.com Corresponding author:shenghuiwan@aliyun.com

一般在船进坞的静态条件下采用标校电视对船坞周围的方位标瞄标的方法进行, 船出海后, 船载雷达在海上无固定方位标可用, 且雷达处于海上动平台^[1]上, 雷达光轴漂移后, 目前还没有一种较好的海上动态标校的手段。为此, 我们提出了通过标校电视反向法瞄船桅光标动态标校雷达光机偏差的新方法, 推导出了该标校方法的数学计算模型, 并针对近距离改正角误差较大的技术难题给出了 3 种改正角误差修正方法, 设计了具体试验方法, 通过试验得出了完整的相关试验数据, 试验数据表明, 该方法技术可行, 标校精度满足船载雷达精度要求。

2 光机偏差传统标校方法

光机偏差的传统标校需要船进坞实施。坞内标校^[2]是在船进坞坐墩条件下, 为确定各测量设备的误差模型参数和坐标系取齐而组织的船坞、船、测量设备、标校设施和大地测量的协同工作实施过程。

测量设备正向(俯仰角 $E < 90^\circ$)测量某一目标, 录取方位角和俯仰角的测量值分别为 A_+ 、 E_+ ; 然后, 方位转动 180° , 俯仰转动 $180^\circ - 2E_+$, 再测量同一目标, 录取方位角和俯仰角的测量值分别为 A_- 、 E_- , 称为正倒镜法或者反向法。

光轴参数在方位、俯仰方向上分别为光机偏差 S_b 、俯仰零值 E_0 , 通常用标校望远镜或者标校电视反向法瞄方位标的方法进行标校。共完成三个以上测回, 并取平均值。按下式计算光机偏差^[3]:

$$S_b = \begin{cases} (A_+ - A_- + 180^\circ) / 2 - S_v, & 0^\circ \leq A_+ < 180^\circ \\ (A_+ - A_- - 180^\circ) / 2 - S_v, & 180^\circ \leq A_+ < 360^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_+ / A_- 是正(反)向方位角测量值。 S_v 是根据标校电视光轴偏心于设备三轴中心的提供的方位角改正数。

按下式计算俯仰零位偏差:

$$E_0 = (E_+ + E_- - 180^\circ) / 2 - S_e \quad (2)$$

式中, E_+ 、 E_- 是正(反)向俯仰角测量值, S_e 是根据标校电视光轴偏心于设备三轴中心的提供的俯仰角改正数。

按下式计算方位、俯仰改正角:

$$S_v = \arctg\left(\frac{\Delta X}{D}\right) \quad (3)$$

$$S_e = \arctg\left(\frac{\Delta Y}{D}\right) \quad (4)$$

式中, ΔX 、 ΔY 分别是标校电视光轴于相对于雷达三

轴中心的在水平、垂直方向的偏差(偏左为正、偏下为正), D 为目标相对于雷达三轴中心的位置。

3 反向法瞄船桅光标

传统的坞内标校是在船进坞条件下进行的静态标校, 其不足之处在于无法在船出海后在动态条件下进行标校。那么, 是否可以在船处于海上动态条件下通过反向法标校光机偏差呢? 考虑到安装在船桅的光标和船载雷达处于同一个甲板系下, 相对位置较为固定, 可以作为标校电视测量目标。为此, 我们提出采用标校电视反向法瞄船桅光标, 在海上动态条件下标校雷达光机偏差的新方法。下面先分析采用该方法所带来的误差来源。

3.1 误差来源分析

误差来源有船体变形和改正角。

(1) 船体变形

通过反向法对船桅光标, 短时间内船体变形对正向、反向的影响一致, 代入公式(1)后互相抵消, 所以船体变形对光轴参数检测结果影响可以忽略。

(2) 改正角

方位、俯仰改正角公式(3)、(4)可简化改写为下式:

$$\theta = 3600 \arctg\left(\frac{S}{D}\right) \quad (5)$$

其中, θ 为改正角, 单位是角秒("); S 为雷达三轴中心到标校电视相对位置, 单位是米(m)。

由公式可知, 改正角的精度受雷达三轴中心分别到船桅光标、标校电视距离测量精度的影响。

3.2 改正角误差计算

(1) 标校电视相对位置测量误差

由公式(5)推导, 标校电视相对位置测量误差引起的改正角修正误差可以按照下式来估计:

$$\sigma = \Delta\theta = \frac{\partial\theta}{\partial S} \cdot \Delta S = 3600 \frac{D \times \Delta S 180}{D^2 + S^2} \pi \quad (6)$$

$$\sigma = \Delta\theta \approx 3600 \arctg\left(\frac{\Delta S}{D}\right) \quad (7)$$

其中, σ 为修正误差, 单位是角秒("); ΔS 为雷达三轴中心到标校电视相对位置的总测量误差, 单位是米(m)。

假设测量误差为 $\Delta S = 1$ cm, 雷达三轴中心到船桅光标距离为 50 m, 到标校电视相对位置为 1 m, 则带给改正角的误差为 41.2"。

(2) 船桅光标相对位置测量误差

坞内标校时, 通过大地测量获取船桅光标相对

于雷达三轴中心的距离^[4]。方法有：

方法 1:分别测量雷达三轴中心、船桅光标在甲板系的位置；

方法 2:在雷达三轴中心附近的检测平台上直接测量到船桅光标的距离。

由公式(5)推导,大地测量误差引起的改正角修正误差计算公式如下：

$$\sigma=\Delta\theta=\frac{\partial\theta}{\partial D}\cdot\Delta D=3600\frac{S\times\Delta D180}{D^2+S^2\pi}$$

(8)

或

$$\sigma=\Delta\theta=3600(\arctg(\frac{S}{D})-\arctg(\frac{S}{D+\Delta D}))$$

(9)

其中, σ 为修正误差,单位是角秒("); ΔD 为雷达三轴中心到船桅光标的测量误差,单位是 m。

假设测量误差为 $\Delta D=5\text{ cm}$,雷达三轴中心到船桅光标距离为 50 m,到标校电视相对位置为 1 m,则带给改正角的误差为 4. 12"。

(3) 影响因子

根据误差计算结果,两种测量误差对于改正角修正误差 σ 的影响程度有很大区别,测量误差为 $\Delta S=1\text{ cm}$ 带来的 σ 为 41. 2";而测量误差为 $\Delta D=5\text{ cm}$ 带来的 σ 相对较小仅为 4. 12"。这里将影响程度定义为影响因子 K_s 和 K_D ,公式如下：

$$K_s=\frac{\sigma}{\Delta S}=\frac{\partial\theta}{\partial S}=3600\frac{D}{D^2+S^2}\frac{180}{\pi}$$

(10)

$$K_D=\frac{\sigma}{\Delta D}=\frac{\partial\theta}{\partial D}=3600\frac{S}{D^2+S^2}\frac{180}{\pi}$$

(11)

影响比例

$$\lambda=\frac{K_s}{K_D}=\frac{D}{S}$$

(12)

假设雷达三轴中心到船桅光标距离为 50 m,到标校电视相对位置为 1 m,则影响比例 $\lambda=50$ 。

4 反向法的改进

反向法瞄船桅光标的标校精度主要取决于改正角误差。由于船桅光标距离雷达三轴中心距离较近,改正角的误差较大,于是本文提出几种改进方法以减小改正角的误差的影响。

4.1 智能选择法

(1) 原理

根据仿生学双眼左右观测可以测距,正倒镜测量时标校电视分别处于三轴中心左右侧,即在已知光机偏差情况下可以反推出改正角,公式如下：

$$S_v=\begin{cases}(A_+-A_-+180^\circ)/2-S_b, & 0^\circ\leq A_+<180^\circ \\ (A_+-A_- -180^\circ)/2-S_b, & 180^\circ\leq A_+<360^\circ\end{cases}$$

(13)

$$S_e=(E_++E_- -180^\circ)/2-E_0$$

(14)

式中, S_b 、 E_0 为坞内标校传统方法获取的光机偏差、俯仰角度零值, A_+ 、 A_- 为瞄船桅标时正、反向方位角测量值, E_+ 、 E_- 为瞄船桅标时正、反向俯仰角测量值。

假设 ΔX 、 ΔY 为正确值,根据公式(3)反推船桅光标相对于雷达三轴中心的距离值 D_1 。同理,根据俯仰角度零值也可以反推出一组距离值 D_2 ,再加上大地测量实测出的距离值 D_0 ,共 3 组距离值,如相差太大,通过逻辑分析可以判断出光轴参数发生了变化。

如表 1,设计了一套逻辑分析图,根据判断结果,决定计算改正角时使用的距离值。其中, Lim 表示阈值; D 表示雷达三轴中心到船桅光标的距离,用于计算改正角; D_1 表示用已知光机偏差反推的距离值; D_2 表示用已知俯仰角度零值反推的距离值; D_0 表示实测距离值。

表 1 距离关系逻辑分析
Table 1 Distance relationship logic analysis

条件 1	条件 2	条件 3	结论	措施
$ D_1-D_0 \leq Lim$	$ D_2-D_0 \geq Lim$		方位变化较小 俯仰变化超差	$D=D_1$
$ D_1-D_0 \geq Lim$	$ D_2-D_0 \leq Lim$		方位变化超差 俯仰变化较小	$D=D_2$
$ D_1-D_0 \leq Lim$	$ D_2-D_0 \leq Lim$	$ D_1-D_0 \leq D_2-D_0 /2$ $ D_2-D_0 \leq D_1-D_0 /2$ other	方位变化较小 俯仰变化较小	$D=D_1$ $D=D_2$ $D=(D_1+D_2)/2$
$ D_1-D_0 \geq Lim$	$ D_2-D_0 \geq Lim$	$ D_1-D_2 \leq Lim$ $ D_1-D_2 \geq Lim$	方位变化超差 俯仰变化超差	$D=(D_1+D_2)/2$ $D=D_0$

(2) 分析

方法改进后提高了数据利用率, 但是还不能完全摆脱改正数误差的影响。

4.2 相对比较法

相对比较法不再使用改正角, 规避了改正角误差对标校精度的影响。

(1) 原理

在坞内标校时, 反向法瞄船桅光标标校光轴参数, 获取记忆值, 数据处理时, 令公式(1)、(2)中改正角 $S_e=0$ 、 $S_e=0$; 后续在动态条件下同样标校, 将结果与记忆值比较, 可计算光轴变化量。

根据数据处理结果(光轴变化量), 可以修正坞内标校时通过传统方法(反向法瞄方位标)标校光机偏差、俯仰零值, 公式如下:

$$S'_b = S_b + \Delta S_b \tag{15}$$

$$E'_0 = E_0 + \Delta E_0 \tag{16}$$

式中, S_b 、 E_0 为坞内标校传统方法获取的光机偏差、俯仰角度零值, S'_b 、 E'_0 为修正后的光机偏差、俯仰零值, ΔS_b 、 ΔE_0 为本方法得到的光机偏差、俯仰零位变化量。

(2) 精度分析

方法改进后基本去除了改正角精度的影响, 下面进行具体影响因素分析。

1) 标校电视在动态条件下能达到的测量精度, 根据指标应为 10"。

2) 改正角的影响

坞内标校时与动态条件比较, 雷达三轴中心、船桅光标、标校电视的相对位置关系基本不变, 所以改正角基本不变。由于雷达天线结构固定, 标校电视到雷达三轴中心到相对位置不变; 船桅光标到雷达三轴中心的距离由于船体变形, 可能有轻微的变化, 但改正角对此变化不敏感, 根据改正角误差计算公式(8), 当船桅光标到雷达三轴中心的距离变化 5 cm, 改正角的变化量仅为 4.12"。

3) 船桅光标的质量对读数误差的影响

船桅光标一般为黑白标, 由水平线、垂直线组成。由于安装或油漆作业质量较差, 会导致瞄标产生相应误差, 如某船的 4#黑白标的水平线与甲板面倾角较大, 瞄标时标校电视不能自动对准俯仰中心, 读数误差较大, 标校结果的俯仰方向(俯仰零值)不确定量达 30", 而瞄其他黑白标的标校结果以及 4#黑白标的方位方向(光机偏差)标校结果一致性优于 10"。通过瞄多个船桅光标, 并剔除野值, 可以避免此影响。

4) 船体变形的影响

按照 3.1 节分析, 正镜时船体变形量与倒镜时船体变形量基本一致, 某次任务中风力 5 级, 40 min 的记盘数据中船体变形量中艏挠角的标准偏差小于 5", 所以船体变形量在正镜、倒镜的影响效果基本上可通过反向法算法抵消, 残余的误差小于 5"。

4.3 最小二乘法

根据光轴参数计算公式(1)~(4), 改写为下式:

$$S_b = \begin{cases} \frac{A_+ - A_- + 180^\circ}{2} - \arctg\left(\frac{\Delta X}{D}\right), & 0^\circ \leq A_+ < 180^\circ \\ \frac{A_+ - A_- - 180^\circ}{2} - \arctg\left(\frac{\Delta X}{D}\right), & 180^\circ \leq A_+ < 360^\circ \end{cases} \tag{17}$$

$$E_0 = \frac{E_+ + E_- - 180^\circ}{2} - \arctg\left(\frac{\Delta Y}{D}\right) \tag{18}$$

其中, 未知量有 S_b 、 E_0 , 已知量为角度测量值 A 、 E , 以及改正角的计算参数 ΔX 、 ΔY 、 D , 但根据精度分析结论, 近距离时改正角误差较大。那么, 可以将 ΔX 、 ΔY 、 D 作为未知量(其中每个光标对应不同的 D 值), 通过最小二乘法求解。这样必须满足未知量个数少于等式数的条件, 才能正确求解, 即满足

$$2 + 2 + n \leq 2n \tag{19}$$

式中, n 为光标个数。

公式意义: 公式左边为未知量个数, 公式右边为等式数目。其中: 第一个 2 表示两个未知量 S_b 和 E_0 ; 第二个 2 表示两个未知量 ΔX 和 ΔY ; n 表示每个光标对应不同的 D 值; $2n$ 为每个光标对应两个求解公式, 即公式(17)、(18)。

可得, 条件为 $n \geq 4$, 即需瞄所有 4 个船桅光标。但为了到达足够精度, 需要尽量增加瞄标数量。也可通过减少未知量个数提高精度, 有以下方案:

(1) 坞内标校所瞄的方位标数目较多时, 通过最小二乘法求解出 ΔX 、 ΔY ;

(2) 坞内标校时, 通过大地测量获取各个船桅光标相对于雷达三轴中心的距离 D 。船载雷达坞内标校时, 直接测量了雷达三轴中心到船桅光标的距离, 数据如表 2。将其与反推改正角(公式(13))得到的距离比对, 存在约 0.6 m 的固定偏差。由于大地测量时测距精度达 2 mm, 且根据公式(11)、(12)其对改正角误差 σ 的影响因子 K_d 相对较小, 此偏差的来源可能是标校电视相对位置测量误差。其中, 反推值为用坞内标校瞄方位标获取的光机偏差反推(通过公式(13))。

表 2 雷达三轴中心到船桅光标的距离
Table 2 The distance from radar three axes center to calibration target on mast

船桅标号	某雷达大地测量值	某雷达反推值	m
1#	48.563 2	-	
	77.187 0	77.600 0	
2#	48.627 1	47.950 0	
	77.291 1	77.660 0	
3#	47.250 4	-	
	75.917 1	76.330 0	
4#	48.627 7	47.990 0	
	77.283 0	77.690 0	

5 试验验证及结果分析

在船上进行了反向法瞄船桅光标标校光轴试验,标校光轴变化量,以此修正光轴参数,减小系统误差。

5.1 试验方法

试验方法如下^[5-6]:
第一步:标校电视瞄标及数据录取

开启标校电视,调整天线角度,确保标校电视光轴正镜对准安装于船前桅杆的十字光标的中心,分别记录天线在船甲板坐标系内的方位、俯仰正镜角度值 A_+ 、 E_+ ;然后方位转 180° ,俯仰转 $180^\circ-2E_+$,再测量同一光标,录取方位角和俯仰角的倒镜测量值分别为 A_- 、 E_- ,完成一个测回。

共完成不少于3个以上测回,并取平均值。

第二步:改正角数据获取

按照第4节介绍的改正角数据计算方法,选用其中一种方法计算出一组标校电视相对船前桅光标的方位、俯仰改正角 S_v 、 S_e 。

第三步:“光机偏差”计算

将上述两步获取的数据代入公式(1),分别计算出标校电视光轴参数在方位、俯仰方向上的光机偏差 S_b 、俯仰零值 E_0 。

5.2 标校结果

在船上进行了标校电视反向法瞄船桅光标试验,动态条件下标校了标校电视光轴,数据处理采用相对比较法,标校结果见表3。

表 3 光机偏差变化量
Table 3 Variation of the optical-mechanical axis non-parallelism

编号	设备	船桅黑白标序号	时间	光轴方位分量 S_b /(")	光轴俯仰分量 E_0 /(")	方位变化量 ΔS_b /(")	俯仰变化量 ΔE_0 /(")	备注
1	船载 雷达 标校 TV	2#	第 1 年	-8 325.00	2 100.00	-	-	基准为编号 2 数据
2		4#		-8 321.40	2 100.00	-	-	
3		4#	第 2 年 12 月 坞内标校	-8 329.80	2 104.20	-8	4	
4		4#	第 3 年 7 月	-8 359.80	2 068.20	-38	-32	基准为 2
5		4#		-8 368.20	2 109.60	-47	10	基准为 2
6		1#	第 3 年 9 月	-8 392.20	2 081.40	-	-	基准为 1
7		2#		-8 376.00	2 091.00	-51	-9	
8		3#		-8 622.60	2 154.00	-	-	基准为 2
9		4#		-8 368.80	2 077.80	-47	-23	

注:光轴变化量中“-”代表之前没有可比对的数据,无法得出相对变化量。

5.3 标校参数验证

根据标校结果,船载雷达标校电视光轴相对于坞内标校时方位变化量约为 $-40''$ 。参考公式(15),将光机偏差修正 $-40''$,并对第3年9月的两次试验任务数据进行处理,结果见表4。光机偏差使用修

正值(光电偏差都使用实测值)后,角度系统误差从 $1.1'$ 减小到 $0.3'$,实际减少量为 $0.8'$ (约 $48''$),误差小于 $10''$ (为 $8''$)。上述数据表明,采用反向法瞄船桅光标动态标校方法后,雷达测轨精度得到了较大提高。

表 4 船载雷达测量值与箭载 GPS 比对
Table 4 Comparison between the ship-borne radar's measured values and on-board GPS

编号	参数	方位系统 误差 $\Delta A/ (^{\circ})$	俯仰系统 误差 $\Delta E/ (^{\circ})$
1	坞内标校值	-1.075	-0.319
2	光机偏差修正-40"	-0.348	-0.320
3	坞内标校值	-1.061	0.071
4	光机偏差修正-40"	-0.385	0.072

6 结束语

船载测控雷达包括光机偏差在内的天线轴系误差标校目前均在船进坞的静态条件下进行标校, 船出海后即使上述参数发生变化, 在海上动态条件下也无法准确标校。为解决这一难题, 本文提出了采用标校电视反向法瞄船桅光标, 在海上动态条件下标校雷达光机偏差的新方法, 给出了误差数据处理的具体方案。试验结果表明: 该方法可操作性强, 能精确标校光轴变化。数据处理时采用相对比较法可以很好地解决近距离改正角误差较大技术难题, 提高标校精度。

总之, 标校电视反向法瞄船桅光标标校在船载雷达海上光机偏差动态标校上有较高的实用价值, 船载测控雷达的其他轴系误差(如望远镜光轴与标校电视光轴不平行度)的海上动态标校可参照执行。

参考文献:

[1] 毛南平, 李其福, 房新兵. 船摇对组阵天线信号合成效率的影响[J]. 电讯技术, 2012, 52(8): 1247-1250.
MAO Nan-ping, LI Qi-fu, FANG Xin-bing. Effect of Ship Swaying on Signal's Synthesis Efficiency of Antenna Array[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(8): 1247-1250. (in Chinese)

[2] 钟德安. 航天测量船测控通信设备标校与校飞技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

ZHONG De-an. Space Tracking Ship TT&C and Communication Equipment Calibration and Evaluation by Flying Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

[3] 王录, 路建功, 张维宁. 精密测量雷达常规标校误差校正参数研究[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(1): 1-5.
WANG Lu, LU Jian-gong, ZHANG Wei-ning. Research on error correction parameters of conventional calibration for precision instrumentation radars[J]. Radar & ECM, 2013, 33(1): 1-5. (in Chinese)

[4] 丰少伟, 黄双华, 杨云生. 基于差分 GPS 技术的舰载雷达通用标校方法[J]. 现代雷达, 2012, 34(5): 14-16.
FENG Shao-wei, HUANG Shuang-hua, YANG Yun-sheng. General Calibration Method of Shipboard Radar Based on Differential GPS Technology[J]. Modern Radar, 2012, 34(5): 14-16. (in Chinese)

[5] 钟德安, 张同双, 李晓勇, 等. 测量船码头动态标校方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(6): 20-23.
ZHONG Dean, ZHANG Tong-shuang, LI Xiao-yong, et al. Study on Dynamic Calibration Method for Instrumentation Ship at Wharf[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2010, 29(6): 20-23. (in Chinese)

[6] 黄家贵, 杨潇. 脉冲测量雷达卫星标校的实现[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1599-1602.
HUANG Jia-gui, YANG Xiao. Implement of pulse radar's calibration by measuring optical tracking satellites[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1599-1602. (in Chinese)

作者简介:



毛南平(1970—), 男, 江苏靖江人, 2004 获硕士学位, 现为高级工程师, 主要从事航天测控总体技术方面的研究;
MAO Nan-ping was born in Jingjiang, Jiangsu Province, in 1970. He received the M. S. degree in 2004. He is now a senior engineer. His research concerns aerospace TT&C technology.

万胜辉(1983—), 男, 安徽阜阳人, 2010 获硕士学位, 现为工程师, 主要从事航天测控总体技术方面的研究。

WAN Sheng-hui was born in Fuyang, Anhui Province, in 1983. He received the M. S. degree in 2010. He is now an engineer. His research concerns aerospace TT&C technology.
Email: shenghuiwan@aliyun.com