

文章编号 1004-924X(2021)07-1511-07

空间目标光度测量的消光修正拟合

满 意^{1,2}, 杨轻云^{1*}, 陈 涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高光度测量的精度进而提高反演空间目标的姿态、形状等特性的准确率, 提出了消光修正拟合的光度测量方法。传统的光度测量是利用一些已知星等恒星的灰度值计算零等星灰度值, 然后再通过待测目标的灰度值计算出待测目标的星等值, 在此过程中加入经典大气消光模型所带来的影响。先是利用实测数据对光度测量计算过程中的消光修正进行拟合, 充分考虑实际测量时大气消光所带来的影响, 获取更符合实际情况的光度测量数据。然后, 在零等星灰度标定的过程中采取迭代的方法计算零等星灰度的均值, 降低大气不稳定所带来的异常数据对于测量结果的影响。实验结果表明: 改进优化后光度测量方法的精度可以达到 0.11 个星等。相对于以往的光度测量方法测量精度更高, 测量结果可以更好地应用于后续的反演工作。

关键词: 光度测量; 空间目标; 大气消光; 迭代均值法

中图分类号: V556; TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212907.1511

Extinction correction fitting for photometric measurement of space targets

MAN Yi^{1,2}, YANG Qing-yun^{1*}, CHEN Tao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yangqingyun@ciomp.ac.cn

Abstract: To improve the accuracy of photometric measurements and the attitude and shape inversion of space targets, a photometric measurement method entailing extinction coefficient fitting was proposed based on existing measurement methods. In conventional photometric measurement methods, the gray value corresponding to a "0" magnitude was calculated using the gray values of stars whose magnitude was known; then, the magnitude of targets was calculated using their gray values while considering the effect of atmospheric extinction. In this study, more accurate photometric measurement data was obtained using the extinction-correction fitting method, based on actual measured data. Then, to reduce the impact of anomalous data due to atmospheric instabilities, the method of obtaining the iteration mean was used for calibrating the gray value corresponding to 0 magnitude. Experimental results indicate that the error of the improved photometric measurement method is approximately 0.11 magnitude. Compared with previous

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2021-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No. 11703026)

photometric measurement methods, this improved photometric measurement method has a higher degree of precision, and the measured results can be better applied to subsequent inversion work.

Key words: photometric measurement; space objective; atmospheric extinction; iteration mean method

1 引言

随着航空航天技术的飞速发展,大量的航天设备被送上太空,用于通信、遥感、导航等方面^[1-5]。与此同时,空间碎片等太空垃圾的数量也随之急剧增加,它们可能会对在轨航天器造成不可估量的影响,因此空间目标的监测及管理对于太空安全非常重要,成为了目前的研究热点^[6]。在监管监测过程中,空间目标探测系统可以确定目标的尺寸和形状等目标特性,并对空间目标进行分类^[7]。然而,对于中高轨目标,难以直接通过高分辨率成像获取目标信息,这时可以通过地基光学系统追踪中高轨道目标,从而获取其光度信息^[8]。通过光度测量得到基于时间序列和基于相位角序列的光度曲线,用于反演目标的形状和姿态^[9-10]。

目前,CCD是获取空间目标光度信息的主要手段。基于CCD测量星等的方法主要有对比法和标定法^[11-12]。对比法是将同一高角、背景以及仰角下获取的待测目标的图像和已知星等目标的图像进行灰度级对比,从而获取待测目标的星等。此方法每次测量都需要一个对比目标,计算复杂且无法同时测量多个目标。标定法是利用多颗不同方位和仰角的已知星等的恒星标定出标准零等星的灰度值,再将待测目标的灰度值与标准零等星的灰度值进行对比,从而获取待测目标的星等。此方法无需对比目标,可以同时测量多个目标,是目前常用的方法。

起初的光度测量方法没有考虑大气消光所产生的影响,最终计算结果的测量误差相对较大。后来考虑大气消光的影响,利用经典的大气透过率公式计算大气消光的星等,采用修正后的星等数据进行计算,得到的测量精度较之前有了一定的提高^[13]。但经典的大气透过率公式是在一个理想环境下得到的公式,并不能很好地体现实际的大气环境状况,大气透过率会受海拔等各方面因素的影响^[14]。同时,上述方法在计算标准零等星灰度值时都是采用算术平均值的方法,无

法有效地降低大气不稳定所带来的异常数据对最终计算结果的影响。

本文基于以往的CCD光度测量方法,利用实际测量数据对计算过程中的消光修正进行拟合,同时改进计算标准零等星灰度值的方法,采用迭代求均值的方法替换算术平均值的方法^[15]。改进后的算法提高了测量精度,计算结果更适用于反演目标的形状和姿态。

2 测量原理

2.1 空间目标星等测量

空间目标反射太阳光产生亮度值,在天文学上用星等衡量空间目标的光度,规定1等星的亮度是6等星的100倍^[16]。当参考星为零等星时,未知星等的星A的星等值 m_a 可以表示为:

$$m_a = \sqrt[5]{100} \times \lg(G_0/G_a), \quad (1)$$

式中: G_0 为零等星的灰度值, G_a 为未知星等星A的灰度值。

由式(1)可知,在已知星A灰度值的情况下,只需知道零等星的灰度值就可以计算得到星A的星等值。计算零等星灰度值的公式为:

$$G_0 = G_a \times 10^{m_a/\sqrt[5]{100}}. \quad (2)$$

选取已知星等和灰度值的星即可通过式(2)计算出其相应的零等星的灰度值,选取多颗不同方位和不同仰角的恒星即可标定出标准零等星的灰度值。

2.2 经典大气消光模型

大气消光是指大气对辐射能量产生了折射、吸收和散射,导致光辐射强度衰减,因此在空间目标的光度测量过程中会产生误差。天顶角越大,辐射穿过的大气层越厚,大气消光所带来的影响就越大,经典的大气透过率公式为^[13]:

$$\tau_z = \tau_0^{[\cos z + 0.150(93.885 - z)^{-1.253}]^{-1}}, \quad (3)$$

其中: $\tau_0 = 0.7355$,为在可见光范围内的垂直大气透过率, z 为取弧度值的天顶角。消光星等 x_g 的计算公式为:

$$x_g = -\sqrt[5]{100} \times \log(\tau_z/\tau_0). \quad (4)$$

因此在考虑经典大气消光后,计算星A的星等值 m_a 的公式可以改进为:

$$m_a = \sqrt[5]{100} \times \lg \frac{G_0 \tau_0}{G_a \tau_z}. \quad (5)$$

计算零等星灰度值 G_0 的公式改进为:

$$G_0 = G_a \times 10^{m_a / \sqrt[5]{100}} \times \frac{\tau_z}{\tau_0}. \quad (6)$$

将 τ_z/τ_0 记为消光修正系数 τ ,其计算公式为:

$$\tau = \frac{G_0}{G_a \times 10^{m_a / \sqrt[5]{100}}}. \quad (7)$$

3 迭代法标定标准零等星灰度值

在测量空间目标星等的过程中,标准零等星灰度值是否准确很大程度上决定最终结果是否准确。标定标准零等星灰度值通常采取的方法为多次选取不同仰角不同方位的已知星等和灰度值的星,计算出它们各自所对应的零等星的灰度值,然后取算术平均值作为标准零等星的灰度值。然而,取算术平均值的方法受不稳定大气的影响较大,当测量的恒星的灰度值出现异常时,

标准零等星的灰度值会出现比较大的偏差。因此为了获取更加准确的标准零等星的灰度值,本文对此过程进行改进,利用迭代法获取均值^[15]。迭代均值法计算标准零等星灰度值的流程如图1所示。具体步骤如下:

(1)计算零等星的灰度算术平均值 X_1 ,同时找到数据中的最大值 $X_{\max}$,将 $X_{\max}$ 替换为 X_1 ;

(2)计算更新后的零等星的灰度算术平均值 X_2 ,同时找到数据中的最小值 $X_{\min}$,将 $X_{\min}$ 替换为 X_2 ;

(3)再次计算更新后的零等星的灰度值平均值 X_3 ,并转到(1)进行迭代计算,直到数据的方差收敛为0。

4 消光修正拟合

在采用经典的大气消光公式进行计算时,由于没有充分考虑实际环境中消光的影响,最终的测量误差较大。本文利用实测数据拟合光度测量过程中的消光修正系数 τ ,从而得到更符合实际情况的测量数据,具体步骤如下:

(1)建立自变量为仰角 E 、因变量为消光修正系数 τ 、多项式次数为 N 的拟合公式:

$$\tau = \sum_{i=0}^N a_i E^i. \quad (8)$$

多项式拟合次数通常不高于5,根据以往的经验及数据验证, $N=3$ 时拟合效果最佳,因此:

$$\tau = a_0 E^3 + a_1 E^2 + a_2 E^1 + a_3. \quad (9)$$

(2)选取多颗不同高角和方位、仰角为 E 、星等为 m_a 、灰度值为 G_a 的星,利用式(2)计算出对应的零等星的灰度值。

(3)计算步骤(2)得到的零等星的灰度平均值,将它作为消光后的标准零等星的灰度值 G_0 ,然后将 G_0 以及步骤(2)选取的星的星等 m_a 和灰度值 G_a 带入式(7),计算 τ 的值。

(4)将选取的星的仰角 E 和对应计算得到的 τ 值进行最小二乘拟合,从而得到多项式(9)的系数 a_0, a_1, a_2, a_3 ,以及最终的拟合公式。

(5)将待测星的仰角带入拟合公式(9)计算对应的 τ 值,再通过公式(5)计算出其星等值。

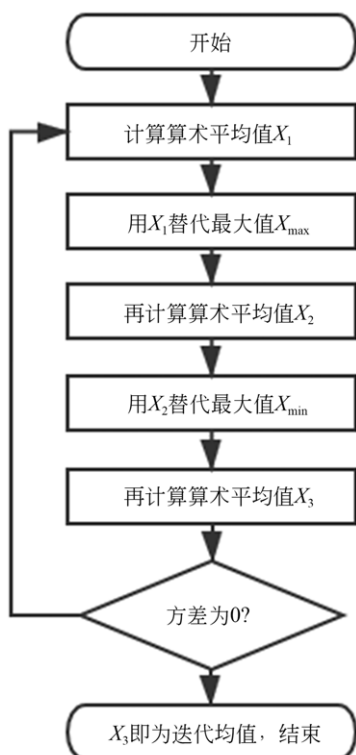


图1 迭代均值法的流程

Fig. 1 Flowchart of mean iteration method

5 测量结果

测量条件如表 1 所示。首先选取 30 颗不同方位和仰角的恒星,分别采取不加消光、经典大气消光和消光修正拟合 3 种消光处理方法计算出相应零等星的灰度值,具体数据及计算结果如表 2 所示。

在不同消光方法下分别采用求算术平均值和迭代均值两种方法计算最终的标准零等星的灰度值,计算结果如表 3 所示。

表 1 星等测量条件

Tab. 1 Magnitude measuring condition	
项目	测量条件
口径/mm	300
相机	Andor DV888
波段/ μm	0.4~0.8
环境	无月测光夜

再选取 10 颗不同方位和仰角的待测恒星进行光度测量,通过式(5)计算测量星等,计算时采用表 3 中的标准零等星灰度值。然后与 10 颗恒

表 2 不同消光方法的零等星灰度值计算结果

Tab. 2 Calculation result of zero magnitude's gray value with different extinction methods						
序号	$E/(^{\circ})$	灰度值	理论星等	不加消光	经典大气消光	消光修正拟合
1	10.767 617	15 957.782 0	5.13	1 798 757.134 0	6 818 904.918 1	3 107 408.753 4
2	14.693 705	7 863.919 2	5.67	1 457 602.302 9	3 590 389.882 8	2 233 274.134 9
3	15.947 339	9 657.880 7	5.83	2 074 349.061 8	4 657 409.599 7	3 063 396.056 1
4	21.858 246	17 062.837 4	5.24	2 128 390.208 8	3 568 519.323 4	2 691 710.863 3
5	23.459 954	499 855.758 3	1.77	2 551 788.638 7	4 056 238.382 6	3 153 036.318 8
6	24.755 341	103 703.570 8	3.53	2 677 896.025 6	4 098 250.322 6	3 187 459.718 1
7	25.951 428	31 029.041 1	4.71	2 375 572.862 3	3 522 664.311 3	2 740 492.278 4
8	28.645 497	33 205.337 2	4.61	2 318 504.245 1	3 234 445.027 9	2 534 890.911 0
9	29.020 570	75 227.530 6	3.82	2 537 329.135 9	3 513 061.954 0	2 764 379.681 2
10	30.615 426	21 426.631 9	5.17	2 505 843.306 4	3 367 043.394 1	2 638 278.629 8
11	31.042 643	107 957.798 7	3.55	2 839 579.424 6	3 787 063.647 0	2 989 577.183 3
12	34.739 431	35 538.271 7	4.75	2 822 905.268 0	3 557 930.818 8	2 799 840.762 9
13	36.799 437	10 271.979 4	5.97	2 509 886.853 2	3 081 583.501 0	2 416 185.704 9
14	37.348 241	26 842.769 4	5.56	4 496 010.552 8	5 484 615.112 8	4 310 791.447 5
15	38.196 864	333 195.638 3	2.37	2 955 965.137 3	3 571 588.249 6	2 850 089.242 3
16	40.233 728	187 884.893 4	3.23	3 680 373.227 3	4 353 804.168 4	3 473 753.943 4
17	42.830 363	40 933.325 1	4.60	2 831 894.209 1	3 271 621.287 6	2 612 067.700 4
18	44.902 531	76 774.170 4	3.91	2 813 294.080 7	3 196 415.944 5	2 577 896.976 7
19	45.146 341	7 998.847 7	6.31	2 673 175.246 6	3 031 620.835 3	2 421 549.302 7
20	47.046 556	45 528.203 2	4.54	2 980 440.876 2	3 334 440.768 1	2 705 453.869 2
21	48.007 714	107 577.211 3	3.60	2 962 922.432 5	3 293 733.864 4	2 695 301.239 1
22	50.458 926	105 917.237 1	3.58	2 863 957.987 8	3 136 472.478 7	2 598 444.513 0
23	51.006 941	49 149.195 7	4.35	2 700 949.195 7	2 948 801.186 4	2 441 796.828 0
24	55.258 105	106 564.365 7	3.95	4 051 464.185 2	4 329 680.771 0	3 678 281.353 7
25	57.981 523	55 177.224 1	4.54	3 612 100.688 4	3 815 948.037 1	3 284 170.918 0
26	58.190 744	39 579.062 3	4.65	2 867 249.604 4	3 026 572.618 7	2 606 602.772 4
27	63.843 414	60 870.565 3	4.28	3 136 225.889 5	3 247 467.068 9	2 882 956.341 0
28	68.171 524	106 885.262 8	3.60	2 943 864.586 9	3 014 003.740 1	2 723 872.179 5
29	71.897 251	686 285.516 9	1.65	3 136 930.044 7	3 186 968.362 1	2 919 125.738 1
30	72.615 060	11 140.170 6	6.05	2 930 163.432 2	2 973 060.833 8	2 670 653.370 3

星的理论星等进行比较得出测量误差。利用算术平均值计算的测量星等及误差如表 4 所示,利用迭代均值计算的测量星等及误差如表 5 所示。

表 3 标准零等星灰度值计算结果
Tab.3 Calculation result of standard “0” magnitude’s gray value

方法	不加消光	经典消光	消光修正拟合
算术均值	2 807 846.194 8	3 669 010.680 3	2 859 091.291 0
迭代均值	2 776 688.776 4	3 485 967.841 4	2 783 895.783 8

测量精度 σ 为:

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^n\Delta m_i^2/(n-1)},\tag{10}$$

其中: Δm_i 为不同恒星对应的测量误差, n 为恒星数量,计算结果如表 6 所示。

表 4 取算术平均值时不同消光方法的光度测量结果
Tab.4 Photometric measurement result of different extinction methods using arithmetic mean

序号	$E/(^{\circ})$	灰度值	理论星等	不加消光	测量误差	经典消光	测量误差	消光修正拟合	测量误差
1	15.548 016	4 638.753 58	6.43	6.954 9	0.524 9	6.336 9	−0.093 1	6.511 0	0.081 0
2	22.978 480	11 072.870 82	5.72	6.010 2	0.290 2	5.781 0	0.061 0	5.779 4	0.059 4
3	24.413 441	76 425.844 65	3.65	3.912 8	0.262 8	3.730 8	0.080 8	3.718 1	0.068 1
4	27.397 022	51 407.923 17	4.29	4.343 3	0.053 3	4.243 3	−0.046 7	4.217 8	−0.072 2
5	30.067 796	19 425.217 07	5.26	5.400 0	0.140 0	5.359 0	0.099 0	5.328 8	0.068 8
6	35.225 329	267 977.244 1	2.65	2.550 6	−0.099	2.596 9	−0.053 1	2.563 2	−0.086 8
7	41.706 191	7 788.866 093	6.32	6.392 2	0.072 2	6.515 3	0.195 3	6.470 4	0.150 4
8	52.568 009	58 907.671 03	4.26	4.195 5	−0.064 5	4.399 7	0.139 7	4.303 7	0.043 7
9	56.638 610	408 897.634 6	1.92	2.091 8	0.171 8	2.316 8	0.396 8	2.195 5	0.275 5
10	63.843 414	60 870.565 38	4.28	4.159 9	−0.120 1	4.412 5	0.132 5	4.250 5	−0.029 5

表 5 取迭代均值时不同方法下的光度测量结果
Tab.5 Photometric measurement result of different extinction methods using iteration mean

序号	$E/(^{\circ})$	灰度值	理论星等	不加消光	测量误差	经典消光	测量误差	消光修正拟合	测量误差
1	15.548 016	4 638.753 58	6.43	6.942 8	0.512 8	6.281 4	−0.148 6	6.482 1	0.052 1
2	22.978 480	11 072.870 82	5.72	5.998 2	0.278 2	5.725 4	0.005 4	5.750 5	0.030 5
3	24.413 441	76 425.844 65	3.65	3.900 7	0.250 7	3.675 3	0.025 3	3.689 2	0.039 2
4	27.397 022	51 407.923 17	4.29	4.331 2	0.041 2	4.187 7	−0.102 3	4.188 8	−0.101 2
5	30.067 796	19 425.217 07	5.26	5.387 9	0.127 9	5.303 4	0.043 4	5.299 9	0.039 9
6	35.225 329	267 977.244 1	2.65	2.538 6	−0.111 4	2.541 3	−0.108 7	2.534 3	−0.115 7
7	41.706 191	7 788.866 093	6.32	6.380 1	0.060 1	6.459 7	0.139 7	6.441 5	0.121 5
8	52.568 009	58 907.671 03	4.26	4.183 4	−0.076 6	4.344 2	0.084 2	4.274 8	0.014 8
9	56.638 610	408 897.634 6	1.92	2.079 8	0.159 8	2.261 2	0.341 2	2.166 6	0.246 6
10	63.843 414	60 870.565 38	4.28	4.147 8	−0.132 2	4.356 9	0.076 9	4.221 6	−0.058 4

表 6 测量精度计算结果
Tab.6 Calculation result of measurement accuracy

方 法	不加消光	经典消光	消光修正拟合
算术平均值	0.239 1	0.172 0	0.121 8
迭代均值	0.232 4	0.147 5	0.110 3

由表 6 可以看出,在相同的计算均值方法下,消光修正拟合方法的测量误差最小,精度最高;在相同的消光处理方法下,迭代均值方法的测量误差更小,精度更高;改进后的方法的测量精度可以达到 0.11 个星等。

6 结 论

本文研究了基于 CCD 的空间目标光度测量的方法,针对空间目标监测中的光度测量算法进行改进和优化。首先介绍了光度测量的基本原理以及经典大气消光模型,然后分析了传统方法存在的问题并提出了消光修正拟合方法。同时,

采用迭代法替代算术平均法计算标准零等星的灰度值。最后,选取 30 颗不同方位和仰角的恒星计算标准零等星的灰度值,再选取 10 颗不同方位和仰角的恒星计算测量精度。实验结果表明:优化后的光度测量算法的精度可以达到 0.11 个星等,与之前算法相比测量精度更高,可为后续的姿态形状反演提供更准确的数据。

参考文献:

- [1] 宋奕辰,徐小涛,宋文婷. 国内外卫星移动通信系统发展现状综述[J]. 电信快报, 2019(8): 37-41.
SONG Y CH, XU X T, SONG W T. Overview of the development of satellite mobile communication systems at home and abroad [J]. *Telecommunications Information*, 2019(8): 37-41. (in Chinese)
- [2] 田大鹏,邵晓鹏. 航空光学成像与测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1221-1225.
TIAN D P, SHAO X P. New emerging technologies in airborne optical imaging and measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1221-1225. (in Chinese)
- [3] 刘艳亮,张海平,徐彦田,等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21, 27.
LIU Y L, ZHANG H P, XU Y T, *et al.* Development status and trend of global navigation satellite system[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(1): 18-21, 27. (in Chinese)
- [4] WANG Y, DU X P. Big data analysis of the relevance of shape and function of global geostationary satellites[C]. *Proceedings of 2017 IEEE 8th International Conference on Software Engineering and Service Science, IEEE*, 2017: 183-186
- [5] 高世杰,吴佳彬,刘永凯,等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171-1181.
GAO SH J, WU J B, LIU Y K, *et al.* Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese)
- [6] 李宗凌,汪路元,禹霁阳,等. 空间碎片目标在轨实时监测处理方法[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 58-64.
LI Z L, WANG L Y, YU J Y, *et al.* On-orbit real time monitoring and processing method for space debris target [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(6): 58-64. (in Chinese)
- [7] LINARES R, FURFARO R, REDDY V. Space objects classification via light-curve measurements using deep convolutional neural networks [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2020, 67(3): 1063-1091.
- [8] 高扬,赵金宇,刘俊池,等. 中高轨道目标的地基光电监视[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2584-2590.
GAO Y, ZHAO J Y, LIU J CH, *et al.* Ground-based photoelectric surveillance for mid-high orbit target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2584-2590. (in Chinese)
- [9] 荆楠,李创,钟培峰,等. 光度数据反演临近空间低速点目标形状尺寸信息[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1738-1747.
JING N, LI CH, ZHONG P F, *et al.* Inversion of low dynamic vehicle shape and dimension information using non-resolved photometric data in near space[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1738-1747. (in Chinese)
- [10] CAPUANO V, KIM K, HARVARD A, *et al.* Monocular-based pose determination of uncooperative space objects [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 493-506.
- [11] 续敏,王建立,王建军. 实时比对法用于卫星星等测量及其精度评估[J]. 光学技术, 2007, 33(3): 473-475.
XU M, WANG J L, WANG J J. Application of real time comparison to measuring satellite magnitude and it's precision evaluating[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(3): 473-475. (in Chinese)
- [12] 魏敏,陈海宁,叶斌,等. 用 CCD 进行空间目标光度测量方法的研究[C]. 第十九届测控、计量、仪器仪表学术年会(MCMI'2009)论文集. 桂林, 2009: 429-431.
WEI M, CHEN H N, YE B, *et al.* Photometric

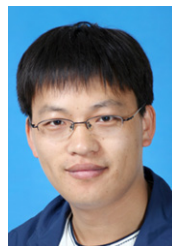
- measurement methods of space targets use CCD [C]. *Proceedings of the 19th Annual Conference on Measurement and Control, Measurement, Instrumentation, MCMI*, 2009: 424-426. (in Chinese)
- [13] 魏敏, 魏维. 基于CCD的空间目标光度测量方法研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(5): 752-755.
WEI M, WEI W. Research on photometric measurement of space targets using CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(5): 752-755. (in Chinese)
- [14] 王飞翔, 郭杰, 许方宇, 等. 不同海拔地区红外大气透过率的计算和测量[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 844-853.
WANG F X, GUO J, XU F Y, *et al.* Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 844-853. (in Chinese)
- [15] 马昌, 李密, 薛文鹏. 基于均值迭代法的稳态数据处理方法[J]. 航空科学技术, 2016, 27(7): 48-52.
MA CH, LI M, XUE W P. Method of steady state data processing based on mean iteration [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(7): 48-52. (in Chinese)
- [16] 董振铭. 恒星视星等的影响因素分析和其在天文仪器上的应用[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(24): 74-76.
DONG ZH M. Analysis of the influencing factors of stellar apparent magnitude and its application in astronomical instruments [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2019(24): 74-76. (in Chinese)

作者简介:



满意(1993—),男,吉林龙井人,博士研究生,2016年于吉林大学获得学士学位,主要从事红外图像处理及目标检测与跟踪方面的研究。E-mail: manyi18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



杨轻云(1977—),男,湖南邵东人,博士,研究员,2000年于南方冶金学院获得学士学位,2003年、2006年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事大型望远镜设备控制软件设计、图像处理及数据分析等工作。E-mail: yangqingyun@ciomp.ac.cn