

航空多角度偏振辐射计信噪比不确定性数学模型

汪方斌^{1,2}, 洪津¹, 孙晓兵¹, 宋茂新¹, 孙斌¹, 王羿¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心 合肥 230031; 2. 安徽建筑大学机械与电气工程学院 合肥 230601)

【摘要】信噪比(SNR)作为评价遥感系统探测能力的一项关键指标,反映了遥感系统的灵敏度。信噪比的不确定度反映了仪器满足测量需求的信度水平。通过对航空多角度偏振辐射计(AMPR)工作原理的分析及其观测Stokes矢量与偏振度信噪比的讨论,提出了AMPR信噪比的不确定度数学模型。基于该模型,利用积分球对AMPR信噪比不确定度进行实验室验证。验证结果表明,当探测偏振度大于1%或2%时,AMPR信噪比不确定度分别不超过10%或5%(1 σ)。

关键词 信度; 偏振; 辐射计; 遥感; 信噪比; 不确定度

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.013

Mathematical Model on SNR Uncertainty of Aviation Multi-Angle Polarimetric Radiometer

WANG Fang-bin^{1,2}, HONG Jin¹, SUN Xiao-bin¹, SONG Mao-xin¹, SUN Bin¹, and WANG Yi

(1. Center of Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences Hefei 230031;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University Hefei 230601)

Abstract Signal-to-noise ratio (SNR) is a key parameter to evaluate the detection performance for a remote sensing system. A mathematical model to estimate the SNR uncertainty for aviation multi-angular polarimetric radiometer (AMPR) is proposed through analyzing the working principle of AMPR and discussing the SNRs of measured Stokes vectors and degree of polarization. Based on the proposed model, the AMPR SNR uncertainty has been validated in laboratory by using integrating sphere source. The experiment results indicate that the SNR uncertainty of AMPR is no more than 10% or 5% (1 σ) for the degree of polarization less than 1% or 2%, respectively.

Key words confidence; polarization; radiometer; remote sensing; SNR; uncertainty

航空航天对地遥感系统获取的目标光谱、辐射强度、空间状态等测量数据,既包括目标地表信息,也包括大气信息,可从空间实现对反演目标的需求,已经成为量化获取地表与大气信息的一种重要手段^[1-3]。随着地-气系统研究的深入,遥感仪器的性能要求不断提高^[4]。为了评估和提高遥感器的性能,国内外众多学者展开了专门研究,其中,使用较多的指标是信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)^[5-12]。

信噪比作为评价遥感系统探测性能的一项关键指标,反映了遥感器的敏感程度。信噪比的不确定度说明了仪器满足测量需求的信度水平^[13]。

以探测大气光学厚度为例。通常情况下,大气光学厚度的变化幅度很小,并且难于精确测量。所使用的遥感系统一般采用噪声等效光学厚度来描述

对大气光学厚度的响应能力。噪声等效光学厚度定义为最小可探测的光学厚度的变化,与观测辐亮度成正比、与信噪比和目标大气辐亮度相对光学厚度梯度成反比^[14]。因此,遥感器扫描瞬间,由于目标大气的辐亮度及其相对光学厚度的梯度保持恒定,信噪比不确定度就代表了遥感系统探测的不确定性水平。

本文从航空多角度偏振辐射计(aviation multi-angular polarimetric radiometer, AMPR)光学探测原理出发,通过对Stokes矢量信噪比、偏振度信噪比的讨论,提出了AMPR信噪比不确定度数学模型。通过该模型,在实验室环境中,利用积分球数据对AMPR信噪比不确定度进行实验。实验结果表明,当探测偏振度大于1%或2%以上时,AMPR信噪比不

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(409711996); 安徽高校省级自然科学基金重点项目(KJ2013A072)

作者简介: 汪方斌(1972-), 男, 博士, 主要从事偏振遥感、定量遥感方面的研究。

确定度分别不会超过10%或5%(1 σ)。

1 仪器描述

航空多角度偏振辐射计从可见到短波红外多个波段分口径同时完成目标的Stokes矢量测量。利用这些测量信号在0°、45°、90°、135°方位提取出的偏振信息,反演得到气溶胶分布状态的时空信息及其对

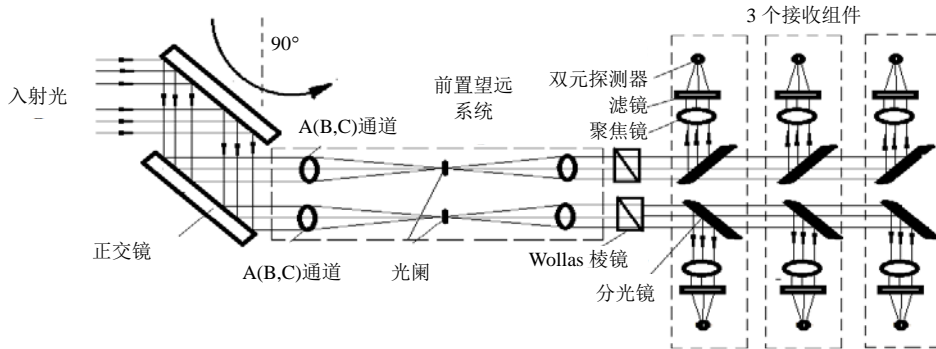


图1 AMPR光学原理示意图

仪器工作时,通过旋转正交反射镜沿轨扫描。当光学信号进入系统后,被引入6路主光学系统并通过前置望远系统和Wollaston棱镜分为振动方向互相垂直的两对线偏振光,再经过分色片分束、透镜聚焦、滤光片滤光后被二元探测器接收。6路光学信号被划分成相邻的3对A-A', B-B', C-C', 分别对应3个(490 nm,665 nm,960 nm)、2个(555 nm,865 nm)和1个(1 640 nm)波段,每对光路中的2个Wollaston棱镜

地球辐射收支的直接影响。由于偏振量是辐射分量的比值,可以保证在测量时刻各辐射量相对精度的情况下,避免“虚假”偏振,获得较高的偏振解析精度。

航空多角度偏振辐射计光学原理和信息获取方式分别如图1、图2所示,基本特性如表1所示。

方位角互成45°,从而实现6个波段4个振动方向0°、45°、90°、135°线偏振分量的同时测量。

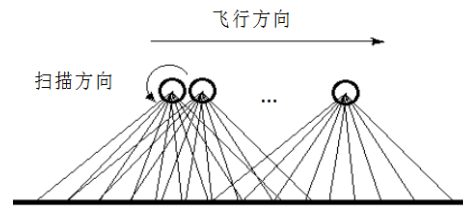


图2 AMPR信息获取示意图

表1 航空多角度偏振辐射计的基本特性

光谱范围/nm	瞬时视场/mrad	视场/(°)	接收光圈/mm	探测方位/(°)	探测器	量化精度/bit	辐射精度/%	偏振精度/%
490,555, 665,865, 960, 1 640	17	-55~+55, 沿轨	12	0,45,90,135 (线偏振)	SiPin(<1 100 nm), InGaAs(>1 100 nm)	14	5(校准)	0.5

假设探测的Stokes矢量为 $S=[I Q U V]^T$, 其中, T表示转置; I 、 Q 、 U 、 V 为Stokes矢量的4个分量。 V 分量因圆偏振在大气测量中极小,实际应用中可不考虑。有下列关系成立^[15]:

$$S_0 = (I + Q) / 2 \quad (1a)$$

$$S_{90} = (I - Q) / 2 \quad (1b)$$

$$S_{45} = (I + U) / 2 \quad (1c)$$

$$S_{135} = (I - U) / 2 \quad (1d)$$

式中, S_0 、 S_{45} 、 S_{90} 、 S_{135} 表示4个方向的探测分量。

2 数学模型

2.1 探测器信噪比模型

AMPR探测器信噪比定义为探测器集成信号的电压值与其噪声信号均方根(root sum square, RSS)

的比值。电压信号可通过特定的场景辐亮度、光学路径上的光学系统的透过率以及量子效率进行计算,而噪声主要包括光子散粒噪声、探测器噪声、量化噪声以及其他噪声。假设探测噪声随机、相互独立,则探测器的信噪比为:

$$SNR_i = \frac{S_i}{\sqrt{N_{i,photon}^2 + N_{i,detector}^2 + N_{i,quantization}^2 + N_{i,other}^2}} \quad (2)$$

式中, SNR_i 、 $N_{i,photo}$ 、 $N_{i,detector}$ 、 $N_{i,quantization}$ 和 $N_{i,other}$ 分别表示*i*方向(0°、45°、90°、135°)探测器信噪比、光子散粒噪声、探测器噪声、量化噪声以及其他噪声。

为获得探测器的信噪比,需要进行多次测量。暗背景下多次测量均值作为背景光,在后序测量信号中予以扣除;而噪声强度为多次测量的随机涨落。

AMPR沿 $-55^\circ \sim +55^\circ$ 视场每隔 1° 作一次扫描。扫描过程中, 温度、湿度、环境等可能发生变化, 噪声、信号出现随机变化, 使测量结果存在不确定性。

2.2 Stokes矢量信噪比及其不确定度数学模型

探测器信噪比能够在一定程度上反映系统的响应能力, 而AMPR实际探测的是Stokes矢量, 因此需要对仪器性能特征作进一步的分析。

为了避免问题复杂化, 假设通道基本特性、增益相同(实际的不一致性可以通过定标进行消减), 则强度分量 I 可由 0° 、 90° 或 45° 、 135° 其中的一对进行分析:

$$I = S_0 + S_{90} (= S_{45} + S_{135}) \quad (3)$$

式中, I 取决于相互正交的探测分量 S_0 、 S_{90} 或 S_{45} 、 S_{135} (本文以前者进行讨论)。由于这两个探测分量正交配置, 噪声互不相关, 即强度分量的噪声值 N_I 可以由这两个探测分量噪声平方和的均方根来表示:

$$N_I^2 = N_0^2 + N_{90}^2 = \langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle \quad (4)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示时间平均; N_I 表示Stokes矢量参数或相应方向探测器噪声; δS_i^2 为探测器测量信号方差, 表示噪声强度。可以推出, 强度分量的信噪比为:

$$\text{SNR}_I = \frac{I}{N_I} = \sqrt{\frac{\langle S_0 + S_{90} \rangle^2}{\langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle}} \quad (5)$$

对式(5)进行差分并整理可得强度分量信噪比的不确定度关系式为^[13]:

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_I}{\text{SNR}_I} \right)^2 = \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N_I}{N_I} \right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N_I}{N_I} \right)^2 \quad (6)$$

式中, Δ 符号表示差分。第1项说明了系统响应能力对强度分量不确定性的影响, 信噪比越大, 影响越小; 第2项反映了强度分量不确定性对噪声的敏感程度, 其原因主要是实际使用中往往采用大样本量来估计噪声方差并假定测量期间噪声不变。

假设通道噪声均为高斯白噪声, 根据中心极限定理, 噪声方差服从高斯分布^[16], 对式(4)进行差分处理即可得噪声的不确定度为:

$$\left(\frac{\Delta N_I}{N_I} \right)^2 = \frac{\langle \delta S_0^2 \rangle \Delta \langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle \Delta \langle \delta S_{90}^2 \rangle}{(\langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle)^2} \quad (7)$$

类似地, 可以求出偏振分量 Q 和 U 的信噪比及其不确定度为:

$$\text{SNR}_Q = \sqrt{\frac{\langle S_0 - S_{90} \rangle^2}{\langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle}} = |q| \text{SNR}_I \quad (8)$$

$$\text{SNR}_U = \sqrt{\frac{\langle S_{45} - S_{135} \rangle^2}{\langle \delta S_{45}^2 \rangle + \langle \delta S_{135}^2 \rangle}} = |u| \text{SNR}_I \quad (9)$$

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_Q}{\text{SNR}_Q} \right)^2 = \left(\frac{\Delta Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N_Q}{N_Q} \right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_Q} \right)^2 + \frac{\langle \delta S_0^2 \rangle \Delta \langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle \Delta \langle \delta S_{90}^2 \rangle}{(\langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle)^2} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_U}{\text{SNR}_U} \right)^2 = \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N_U}{N_U} \right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_U} \right)^2 + \frac{\langle \delta S_0^2 \rangle \Delta \langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle \Delta \langle \delta S_{90}^2 \rangle}{(\langle \delta S_0^2 \rangle + \langle \delta S_{90}^2 \rangle)^2} \quad (11)$$

式中, $|\cdot|$ 表示绝对值; q 和 u 表示无量纲的偏振分量:

$$q = \frac{Q}{I} = \frac{S_0 - S_{90}}{S_0 + S_{90}} \quad (12)$$

$$u = \frac{U}{I} = \frac{S_{45} - S_{135}}{S_{45} + S_{135}} \quad (13)$$

2.3 偏振度信噪比与不确定度数学模型

偏振遥感, 通常采用偏振度进行反演运算, 因此对偏振度信噪比进行估计和不确定度分析也是必要的。根据偏振度 P 的定义, 有:

$$P = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (14)$$

式中, q 和 u 相互正交。因此偏振度 P 的噪声强度为:

$$N_P^2 = \langle \delta P^2 \rangle = \langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle \quad (15)$$

则偏振度与线性偏振度的信噪比为:

$$\text{SNR}_P = \frac{P}{\sqrt{\langle \delta P^2 \rangle}} = \frac{\sqrt{q^2 + u^2}}{\sqrt{\langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle}} \quad (16)$$

$$\text{SNR}_q = \frac{|q|}{\sqrt{\langle \delta q^2 \rangle}} \quad (17)$$

$$\text{SNR}_u = \frac{|u|}{\sqrt{\langle \delta u^2 \rangle}} \quad (18)$$

对方程式(12)、式(13)进行差分可得:

$$\langle \Delta q \rangle = \frac{\partial q}{\partial S_0} \Delta S_0 + \frac{\partial q}{\partial S_{90}} \Delta S_{90} = \frac{1-q}{I} \Delta S_0 - \frac{1+q}{I} \Delta S_{90} \quad (19)$$

$$\langle \Delta u \rangle = \frac{\partial u}{\partial S_{45}} \Delta S_{45} + \frac{\partial u}{\partial S_{135}} \Delta S_{135} = \frac{1-u}{I} \Delta S_{45} - \frac{1+u}{I} \Delta S_{135} \quad (20)$$

考虑到辐射计正交偏振的测量原理, 噪声互不相关, 对式(19)、式(20)和式(15)进行差分并整理有:

$$\langle \delta q^2 \rangle = \left(\frac{1-q}{I} \right)^2 \langle \delta S_0^2 \rangle + \left(\frac{1+q}{I} \right)^2 \langle \delta S_{90}^2 \rangle \quad (21)$$

$$\langle \delta u^2 \rangle = \left(\frac{1-u}{I} \right)^2 \langle \delta S_{45}^2 \rangle + \left(\frac{1+u}{I} \right)^2 \langle \delta S_{135}^2 \rangle \quad (22)$$

$$\left(\frac{\Delta N_p}{N_p}\right)^2 = \frac{\langle \delta q^2 \rangle \Delta \langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle \Delta \langle \delta u^2 \rangle}{(\langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle)^2} \quad (23)$$

利用式(21)~式(23), 可以求出 P 、 q 、 u 信噪比的不确定度为:

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_p}{\text{SNR}_p}\right)^2 = \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_p}{N_p}\right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_p}\right)^2 + \frac{\langle \delta q^2 \rangle \Delta \langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle \Delta \langle \delta u^2 \rangle}{(\langle \delta q^2 \rangle + \langle \delta u^2 \rangle)^2} \quad (24)$$

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_u}{\text{SNR}_u}\right)^2 = \left(\frac{\Delta u}{u}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_u}{N_u}\right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_u}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \langle \delta u^2 \rangle}{\langle \delta u^2 \rangle}\right)^2 \quad (25)$$

$$\left(\frac{\Delta \text{SNR}_q}{\text{SNR}_q}\right)^2 = \left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_q}{N_q}\right)^2 = \left(\frac{1}{\text{SNR}_q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \langle \delta q^2 \rangle}{\langle \delta q^2 \rangle}\right)^2 \quad (26)$$

3 实验

为进一步分析AMPR的性能, 在实验室中利用积分球光源对其信噪比进行了测量并计算其不确定度。积分球各波段的辐亮度数据如表2所示。

表2 积分球各波段辐高亮度

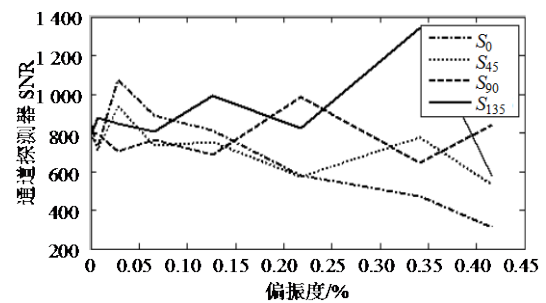
中心波长/nm	辐亮度/ $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$
490	1.276
555	2.296
665	4.175
865	5.843
960	5.880
1 640	3.194

首先对AMPR进行辐射定标与偏振定标^[17], 并将实验安排在室温环境下的暗室中进行。实验测量时, 使积分球光源充满仪器整个视场。积分球与仪器之间放置偏振盒, 盒内波片堆产生偏振光, 转动偏振盒可以获得不同偏振度的出射光。

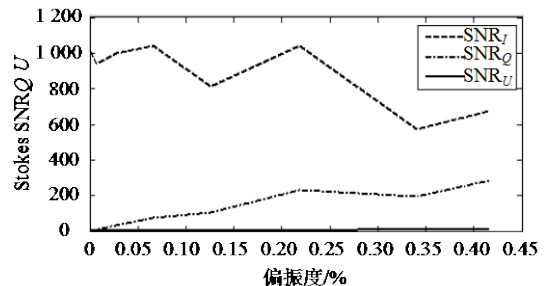
为获取实验数据, 需要进行多周期的多次测量。周期长度设为仪器的采样周期, 每周期采样不少于20次。每周期测量前将头部旋转进传感器内部并进行多次测量, 其测量结果的平均值作为背景光; 然后再旋转辐射计以使其正视积分球光源并使光源充满仪器视场, 启动AMPR进行该周期的多次探测, 扣除背景光即为获得的采样信号数据。

将所有周期内的采样信号进行平均即得到信号

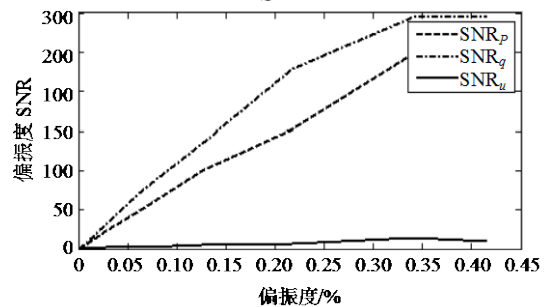
的有效值, 把信号随机涨落的均方根作为噪声, 两者相除从而获得不同通道的信噪比。由于多周期采样, 噪声强度在不同采样周期内随机涨落, 取其方差即可进行不确定度的计算。实验结果如图3(以490 nm波段为例, 其他波段实验结果一致)所示。图3a为4个方向上的通道探测器信噪比, 图3b为Stokes矢量 I 、 Q 、 U 分量信噪比, 图3c为 P 、 q 、 u 信噪比, 图3d为 I 、 Q 、 P 、 q 信噪比的不确定度。



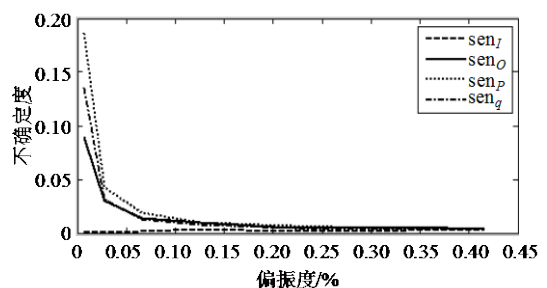
a. 4个方向通道信噪比



b. I 、 Q 、 U 分量信噪比



c. P 、 q 、 u 信噪比



d. I 、 Q 、 P 、 q 信噪比不确定度

图3 490 nm波段实验结果

从图中可以看出, AMPR探测器信噪比相对较大; 而对于Stokes矢量, 虽然强度分量仍能保持较高

的信噪比, 但 Q 分量由于为两个通道接收能量的差, 从而使 Q 、 q 信噪比要小得多, 尤其在偏振度较低的情况下; 另外, 由于实验是在仪器主平面内进行测量, U 、 u 值较小, 理论上应为0, 因此其信噪比一直保持较低的水平, 此时, 无量纲偏振分量 q 的绝对值表示了探测的偏振度。当偏振度为1%以上时, I 、 Q 、 P 、 q 信噪比的不确定度均小于10%; 当偏振度大于2%时, 信噪比的不确定度可达到 1σ 水平(<5%)。

4 结束语

从工作原理出发, 推导了航空多角度偏振辐射计Stokes矢量、偏振度的信噪比公式, 提出了相应的信噪比不确定性数学模型。并在实验室模拟和计算了不同偏振度下的AMPR探测Stokes矢量、偏振度的信噪比及其不确定度, 为评价偏振遥感系统满足规定要求的信度水平提供了理论依据。

实际的应用环境非常复杂, 遥感系统的信噪比及其不确定性受到的干扰因素较多, 除上文提到的环境因素外, 还包括光源、定标、装配等, 有待后续工作中作进一步的分析与研究。

参 考 文 献

- [1] LIOU Kuo-nan. An introduction to atmospheric radiation [M]. California: Academic Press, 2002.
- [2] 岳涛. 中国航天光学遥感技术成就与展望[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 10-19.
YUE Tao. The achievements and future prospects of Chinese space optical remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 10-19.
- [3] 胡君, 王栋, 孙天宇. 现代航天光学成像遥感器的发展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 519-533.
HU Jun, WANG Dong, SUN Tian-yu. Application and development of recent space optical imaging remote sensors[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 519-533.
- [4] 付秀丽, 施建成, 郭英, 等. 辐射计观测模拟系统的设计与研究[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 64-69.
FU Xiu-li, SHI Jian-cheng, GUO Ying, et al. Study on radiometer observation simulation system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 64-69.
- [5] TRAVIS L D. Remote sensing of aerosols with the earth observing scanning polarimeter[C]//Polarization and Remote Sensing. [S.l.]: SPIE, 1992, 1747: 154-164.
- [6] PERALTA R J, NARDELL C, CAIRNS B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the Glory mission[C]//Automatic Target Recognition and Image Analysis, and Multispectral Image Acquisition. [S.l.]: SPIE, 2007, 67865L: 1-17.
- [7] PERSH S, SHAHAM Y J, BENAMI O, et al. Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor[C]//Earth Observing Systems XV. [S.l.]: SPIE, 2010, 780703: 1-12.
- [8] BRUEGGE C J, DINER D J, KAHN R A, et al. The MISR radiometric calibration process[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(1): 2-11.
- [9] XIONG Xiao-xiong, BARNES W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 69-79.
- [10] 陈新锦, 袁艳, 李立英, 等. 目标探测的信噪比分析[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 397-400.
CHEN Xin-jin, YUAN Yan, LI Li-ying, et al. Analysis of signal-to-noise ratio for target detection[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 397-400.
- [11] 徐蒙, 冯旗, 危峻. 遥感应用中短波红外探测器系统的信噪比计算[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 588-590.
XU Meng, FENG Qi, WEI Jun. The calculation of SNR in SWIR detector system for applications to remote sensing[J]. Infrared Technology, 2006, 28(6): 588-590.
- [12] 朱彬, 胡玮, 邓科, 等. 多波段光学探测系统的探测概率研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(3): 339-342.
ZHU Bin, HU Wei, DENG Ke, et al. Research on detection probabilities of multi-band optical detection systems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(3): 339-342.
- [13] PAGANO T S, YOUNG J B. MODIS radiometric accuracy and sensitivity modeling using the radiometric math model (RMM)[C]//Sensor Systems for the Early Earth Observing System Platforms. [S.l.]: SPIE, 1993, 1939: 18-28.
- [14] SEIDEL F, SCHLÄPFER D, NIEKE J, et al. Sensor performance requirements for the retrieval of atmospheric aerosols by airborne optical remote sensing[J]. Sensors, 2008, 8(3): 1901-1914.
- [15] MISHCHENKO M I, ROSENBUSH V K, KISELEV N N, et al. Polarimetric remote sensing of solar system objects [M]. Kyiv: Akadempriodyka, 2010.
- [16] JI Guo-qing, ZHU Hong-bo. On the noise power uncertainty of the low SNR energy detection in cognitive radio[J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(8): 2457-2463.
- [17] 宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1153-1158.
SONG Mao-xin, SUN Bin, SUN Xiao-bing, et al. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1153-1158.

编辑 漆蓉