

文章编号 1004-924X(2015)02-0387-08

航空多角度偏振辐射计信噪比估算与测量

汪方斌^{1,2*}, 洪 津¹, 孙晓兵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, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为精确评估航空多角度偏振辐射计的性能,分析了航空多角度偏振辐射计的信号与噪声,给出了估算其探测器信噪比的过程。介绍了航空多角度偏振辐射计的工作原理,推导了探测器信噪比与系统信噪比的估算表达式。结果显示:系统信噪比与强度信噪比成正比,探测器信噪比需求与偏振探测精度成反比,航空多角度偏振辐射计的探测器信噪比应不小于 245,得到的结果弥补了一直以来偏振遥感仪器只计算探测器信噪比的不足。最后,根据推导的表达式,通过矢量传输模拟估算了用航空多角度偏振辐射计探测典型场景时的探测器信噪比与系统信噪比,并在暗室中利用积分球与偏振盒进行了测量。结果表明,航空多角度偏振辐射计各个探测器的信噪比均满足偏振探测的需求。

关键词:航空遥感;偏振辐射计;多角度偏振术;信噪比

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0387

Estimation and measurement of signal-to-noise ratio for aviation multi-angular polarimetric radiometer

WANG Fang-bin^{1,2*}, HONG Jin¹, SUN Xiao-bing¹, WANG Yi¹

- (1. *Center of Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangfb@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: To estimate the performance of an Aviation Multi-angular Polarimetric Radiometer (AMPR) precisely, its signals and noise were analyzed and the estimation processing for signal-to-noise ratios (SNRs) were investigated. The working principle of the AMPR was introduced and the formulas to calculate the detector SNRs and system SNRs were inferred. It indicates that the system SNR is proportional to intensity SNR while the requirement of detector SNR is inverse proportional to the polarimetric accuracy. However, the detector SNRs of AMPR should not be less than 245. The results make up the shortcoming from the traditional method that the precision of the polarization remote sensing instruments depends only on the detector SNRs. Finally, the system SNRs and the detector SNRs in a typical scene simulated by vector radiative transfer were estimated with the inferred formula

收稿日期:2013-11-07;修订日期:2014-01-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40971196)

and tested by a Spherical Integrating Source (SIS) and a polarization box in a dark laboratory. The results show that the SNRs of the AMPR detector meet the requirements of polarimetric detection.

Key words: aviation remote sensing; polarization radiometer; multi-angular polarimetry; Signal-to-Noise Ratio(SNR)

1 引言

多角度偏振对地观测能够获得空间目标的七维(光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭圆率和旋转方向)数据参数,解决了传统遥感手段在大气探测和伪装识别等方面的不足^[1-2]。如在地表特性未知时,通过光强与偏振度的多角度观测,可以为气候研究提供足够精度的气溶胶相关参数^[3]。目前,国内外学者已研制出了多角度偏振遥感系统,典型的有法国国家空间研究中心(CNES)的 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth Reflectance)、美国国家航空航天局(NASA)的 APS(Aerosol Polarimetry Sensor)、中科院安徽光学精密机械研究所的多角度偏振辐射计等^[4-7]。

偏振遥感系统的信噪比分为探测器信噪比和系统信噪比。探测器信噪比定义为探测器接收的信号电子数和总噪声电子数之比,反映了仪器对弱信号的探测能力,决定了遥感仪器的孔径、质量等重要的重要的系统参数^[8]。系统信噪比定义为偏振遥感仪器观测的斯托克斯(stokes)参量信噪比和偏振度(Degree of Polarization, DoP)信噪比,体现了偏振遥感系统的偏振探测精度,反映了偏振遥感系统对大气气溶胶微物理特性的敏感程度与反演结果的不确定性^[9]。因此,正确地估算与测量信噪比,对仪器的性能评估与使用具有重要的指导意义。

APS 参照 EOSP(Earth Observing Scanning Polarimetry)与 MODIS(MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer)信噪比估算方法,首先计算了探测器的基本噪声(包括放大器噪声、暗电流噪声、量化噪声等),并认为它们在探测期间保持不变,然后考虑随着辐照度变化而变化的光子噪声得到探测器总噪声,再将信号与探测器总噪声 DN 值相除,获得遥感系统的探测器信噪比^[8,10-11]。虽然 APS 也给出了系统信噪比的计算

方法,但没有说明系统信噪比与探测结果之间的关系。POLDER 没有讨论系统信噪比,仅对典型场景反射率进行了反复多次测量,用反射率的平均值与均方差的比值来估算遥感仪器的信噪比^[12]。

本文通过分析信号与噪声来估算偏振遥感系统探测器的信噪比,推导了系统信噪比的表达式,并在此基础上对航空多角度偏振辐射计(Aviation Multi-angular Polarimetry Radiometer, AMPR)观测典型场景时的信噪比进行了估算与实验测量。

2 仪器描述

AMPR 是机载大气环境成份探测系统的分系统,和大气环境激光雷达、差分光学吸收光谱仪一起在总控管理器的控制下,实时获取并记录遥感平台飞行高度以下一定范围内的大气气溶胶、污染气体、云的特性及空间分布的立体信息。其工作原理类似于美国 APS 的扫描型偏振探测器^[8],光路由正交扫描镜、反射镜、望远准直透镜、渥拉斯顿(Wollaston)棱镜、分色片、聚焦透镜、滤光片等组成,可以同时获取目标 6 个波段(490~1 640 nm)、4 个偏振态的光谱偏振信息,避免了“虚假”偏振^[13-14]。AMPR 的剖面结构如图 1 所示,性能参数及运行特性如表 1 所示。

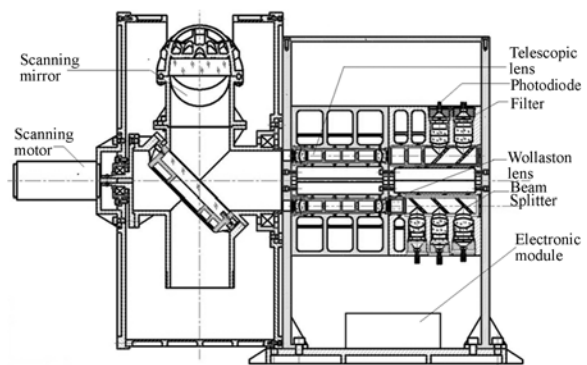


图 1 AMPR 剖面结构

Fig. 1 Cutaway map of AMPR

表 1 AMPR 的基本特性

Tab. 1 Characteristics of Aviation Multi-angular Polarimetry Radiometer (AMPR)

Parameters	Values
Spectral band/nm	490,555, 665,865, 960,1 640
IFOV/mrad	17
Viewing field/(°)	-55~+55
Scanning interval/(°)	1
Receiving aperture/mm	12
Detection azimuth/(°)	0,45,90,135
Dielement detector	Si PIN($\lambda < 1\ 100\ \text{nm}$) InGaAs($\lambda > 1\ 100\ \text{nm}$)
Quantization precision/bit	14
Radiating accuracy	5%
Polarimetric accuracy	0.5%
Focal length/mm	52
Transmittance	0.1
Scanning velocity/(r · min ⁻¹)	57.5

探测时,仪器被安装在遥感平台上,沿飞行路径向前运动,同时扫描镜旋转。进入光学系统的光线被前置望远镜、Wollaston 棱镜分为振动方向互相垂直的两束线偏振光,在分色、聚焦、滤光后被光电二极管(Photo Diode, PD)二元探测器接收。

假设测量的大气及地表在 0, 90, 45, 135° 方向上的光强分别为 $S_0, S_{45}, S_{90}, S_{135}$, 则可计算出信号的 stokes 矢量 $\mathbf{S} = [I\ Q\ U\ V]^T$, 其中^[15]:

$$I = S_0 + S_{90} (= S_{45} + S_{135}), \quad (1)$$

$$Q = S_0 - S_{90}, \quad (2)$$

$$U = S_{45} - S_{135}. \quad (3)$$

进一步可计算出多角度总反射率和多角度偏振反射率,并通过基于地气系统的矢量辐射传输方程来反演气溶胶等的光学特性^[16-17]。

3 探测器信噪比

为方便分析,假设 4 个偏振方向的探测器通道特性相同,且探测器对光的振动方向不敏感(实际系统应进行定标和补偿^[13,18])。

3.1 信号分析

假设某一场景被太阳入射后在中心波长 λ 处被仪器接收的光谱辐亮度为 $L(\lambda)$, 则探测器在积

分时间 t_{int} 内场景信号产生的电子数为:

$$S_e(\lambda) = \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] t_{\text{int}} \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) L(\lambda) \eta(\lambda) (\lambda/hc) d\lambda, \quad (4)$$

其中: D 为有效孔径, Ω 为瞬时视场角, $\tau(\lambda)$ 为光学系统透过率, $\eta(\lambda)$ 为量子效率, h 为普朗克常数 ($h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$), c 为光速 ($c = 2.998 \times 10^{17} \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$)。由于探测波段为窄带光谱,因此可以用光谱平均来代替积分形式,即:

$$S_e(\lambda) = \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] \left[\frac{\lambda}{hc} \right] t_{\text{int}} \Omega \tau(\lambda) L(\lambda) \eta(\lambda) \Delta\lambda = \frac{A_d}{4} \left[\frac{D}{f} \right]^2 \left[\frac{\lambda}{hc} \right] t_{\text{int}} \tau(\lambda) L(\lambda) \eta(\lambda) \Delta\lambda, \quad (5)$$

其中: $\Delta\lambda$ 为中心波长 λ 的带宽。

3.2 噪声分析

以 PD 为探测器的遥感系统的噪声源有很多,但主要是散粒噪声、探测器噪声、放大器噪声及量化噪声,总噪声电子数 N_{tot} 为:

$$N_{\text{tot}} = \sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{amp}}^2 + N_{\text{quan}}^2}, \quad (6)$$

其中: N_{shot} 为散粒噪声电子数,来源于信号与背景光。信号噪声主要是由于光子入射随机形成光生电子而产生的,背景噪声则来自于视场范围以外的辐射源入射到探测器上引起的随机波动。散粒噪声在大量光子入射时近似服从泊松分布,可以用下式进行计算:

$$N_{\text{shot}} = \sqrt{S_e + S_{\text{bk}}}. \quad (7)$$

本文采用硅光电二极管探测器,在背景光很小的情况下,其噪声可以忽略^[19]。

N_{dark} 为探测器噪声的等效电子数,主要指暗电流噪声,是在没有外信号输入时,探测器的温度使电子产生无规则热运动造成的暗电流偏移,与频率无关^[20]。

$$N_{\text{dark}} = \sqrt{\frac{2kT_{\text{det}} t_{\text{int}}}{R_d}} / e, \quad (8)$$

其中: k 为波尔兹曼常数 ($k = 1.38 \times 10^{23} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T_{det} 为探测器的热力学温度, R_d 为探测器电阻, e 为电荷量 ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

N_{amp} 为放大器噪声的等效电子数,是在信号放大过程中,放大器由于自身原因引入的噪声量,主要是频带内反馈电阻的热噪声:

$$N_{\text{amp}} = t_{\text{int}} \cdot \text{NEP} \cdot \sqrt{\Delta f} \eta(\lambda) / e, \quad (9)$$

其中: NEP 为放大器噪声的等效系数, Δf 为系统带宽。

量化噪声的等效电子数 N_{quan} 的计算公式为:

$$N_{\text{quan}} = \frac{S_{\text{is}}}{2^N \sqrt{12}}, \quad (10)$$

其中: S_{is} 为 AD 转换器满量程所对应的电子数, N 为 ADC 转换器的位数。

3.3 探测器信噪比公式

根据探测器信噪比的定义, 方向 i 上的探测器信噪比 SNR_i 为:

$$SNR_i = \frac{S_c}{N_{\text{tol}}}. \quad (11)$$

为计算探测器信噪比, 还需要确定积分时间与系统带宽, 它们可由扫描速度求出^[18]:

$$T_{\text{int}} = \frac{60 \cdot \theta}{n \cdot 360} = \frac{\theta}{6n}, \quad (12)$$

$$\Delta f_n = \frac{1}{2t_{\text{int}}}, \quad (13)$$

其中: n 为采样扫描速度, θ 为扫描角度间隔。

4 系统信噪比

4.1 斯托克斯参量信噪比

由式(1)~(3)可知, 当两个探测方向分量相互正交时, 噪声必然互不相关, 因此 stokes 参量信噪比为:

$$SNR_I = \frac{IN}{\sqrt{N_0^2 + N_{90}^2}}, \quad (14)$$

$$SNR_Q = \frac{QN}{\sqrt{N_0^2 + N_{90}^2}}, \quad (15)$$

$$SNR_U = \frac{UN}{\sqrt{N_{45}^2 + N_{135}^2}}, \quad (16)$$

其中: IN, QN, UN 以电子数表示的 stokes 分量, $N_0, N_{45}, N_{90}, N_{135}$ 分别表示 $0, 90, 45, 135^\circ$ 偏振方向上探测器噪声的等效电子数。

由式(12)可知, stokes 参量的信噪比满足:

$$SNR_Q = |q| SNR_I, \quad (17)$$

$$SNR_U = |u| SNR_I, \quad (18)$$

其中: q, u 为两相互正交方向的线偏振度 (Degree of Linear Polarization, DoLP), 分别为:

$$q = \frac{Q}{I} = \frac{S_0 - S_{90}}{S_0 + S_{90}}, \quad (19)$$

$$u = \frac{U}{I} = \frac{S_{45} - S_{135}}{S_{45} + S_{135}}. \quad (20)$$

4.2 偏振度信噪比

在实际应用中, 通常采用偏振度或 DoLP 来反演大气的特性。偏振度定义为:

$$P = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (21)$$

则偏振度与线偏振度的信噪比为:

$$SNR_P = \frac{P}{\sqrt{N_q^2 + N_u^2}}, \quad (22)$$

$$SNR_q = \frac{|q|}{N_q}, \quad (23)$$

$$SNR_u = \frac{|u|}{N_u}, \quad (24)$$

其中: N_q, N_u 分别表示线偏振度信号的噪声, 为无量纲的量, $|\cdot|$ 表示绝对值。对式(19)和(20)进行差分得:

$$\langle \Delta q \rangle = \frac{\partial q}{\partial S_0} \Delta S_0 + \frac{\partial q}{\partial S_{90}} \Delta S_{90} = (1-q) \frac{\Delta S_0}{I} - (1+q) \frac{\Delta S_{90}}{I}, \quad (25)$$

$$\langle \Delta u \rangle = \frac{\partial u}{\partial S_{45}} \Delta S_{45} + \frac{\partial u}{\partial S_{135}} \Delta S_{135} = (1-u) \frac{\Delta S_{45}}{I} - (1+u) \frac{\Delta S_{135}}{I}, \quad (26)$$

其中: Δ 表示差分操作。由于各探测器噪声互不相关, 对式(25)和(26)再次进行差分并整理可得:

$$\langle \Delta q^2 \rangle = (1+q^2) \frac{\langle \Delta S_0^2 \rangle + \langle \Delta S_{90}^2 \rangle}{I^2} + 2q \frac{\langle \Delta S_0^2 \rangle - \langle \Delta S_{90}^2 \rangle}{I^2}, \quad (27)$$

$$\langle \Delta u^2 \rangle = (1+u^2) \frac{\langle \Delta S_{45}^2 \rangle + \langle \Delta S_{135}^2 \rangle}{I^2} + 2u \frac{\langle \Delta S_{45}^2 \rangle - \langle \Delta S_{135}^2 \rangle}{I^2}. \quad (28)$$

考虑到方向的正交性且选用探测器的特性相同, 上述两式第二项数值均极小, 可以忽略, 从而(线)偏振度的噪声可以写为:

$$\langle \Delta q^2 \rangle \approx \frac{1+q^2}{SNR_q^2}, \quad (29)$$

$$\langle \Delta u^2 \rangle \approx \frac{1+u^2}{SNR_u^2}, \quad (30)$$

$$\langle \Delta P^2 \rangle \approx \frac{2+P^2}{SNR_P^2}. \quad (31)$$

(线)偏振度的信噪比为:

$$SNR_P = \frac{P}{\sqrt{2+P^2}} SNR_I, \quad (32)$$

$$SNR_q = \frac{|q|}{\sqrt{1+q^2}} SNR_I, \quad (33)$$

$$\text{SNR}_u = \frac{|u|}{\sqrt{1+u^2}} \text{SNR}_I, \quad (34)$$

公式(29)~(31)表明:(线)偏振度的不确定度与强度信噪比成反比,即仪器偏振探测的精度受到探测器信噪比的限制。另一方面,由公式(32)~(34)可见,弱偏振光探测,(线)偏振度的信噪比与(线)偏振度近似成正比。因此,在弱信号或弱偏振的情况下,探测获取的(线)偏振度有可能因噪声过大而无法使用。因此,在设计仪器时,应折中选择偏振探测精度与探测器信噪比。

假设仪器的偏振探测精度为 ϵ , 由式(31)可得:

$$\langle \Delta P \rangle \approx \sqrt{2+P^2} / \text{SNR}_I \leq \epsilon. \quad (35)$$

考虑到线性偏振检测的对称性并结合公式(14)~(16),探测器信噪比 SNR_i 应满足:

$$\text{SNR}_i \geq \sqrt{(2+P^2)/2} / \epsilon. \quad (36)$$

根据表 1 可知,偏振探测精度高于 0.5%, AMPR 探测器的信噪比应不小于 245。

5 估算与测量

5.1 矢量辐射传输方程

估算探测器与系统的信噪比,需要计算光谱辐亮度。采用矢量辐射传输方程(Vector Radiation Transfer Equation, VRTE)可以较好地模拟出符合遥感系统在轨工作观测的辐亮度与偏振态。SCIAPOL 1.0 是基于离散坐标方法求解矢量传输模型,可以获得媒介内、上、底层任何点、方向的 stokes 矢量^[21-22]。通过设置并运行矢量传输模型参数,获得 stokes 矢量后,修改式(1)即可获得在 0, 90, 45, 135° 方向上的辐亮度:

$$S_0 = (I+Q)/2, \quad (37)$$

$$S_{90} = (I-Q)/2, \quad (38)$$

$$S_{45} = (I+U)/2, \quad (39)$$

$$S_{135} = (I-U)/2. \quad (40)$$

为使估算结果尽可能符合实际情况,采用典型场景进行矢量传输模拟,模型参数如表 2 所示^[22-25]。表中除波长外,每个波段的参数均相同。

表 2 矢量辐射传输模型参数

Tab. 2 VRTE parameters

Parameters	Values
Spectral band/nm	490,555, 665,865, 960,1640
Sun elevation angle/(°)	60
Sun azimuth angle/(°)	0
Observer elevation angle/(°)	60
Observer azimuth angle/(°)	120
Effective radius/ μm	0.2
Effective variance	0.2
Optical depth	0.2
Size distribution	log normal distribution
Refractive index	1.50+0.00i
Sensor altitude/km	8
Surface albedo	0.3
Atmosphere albedo	1

5.2 估算

通过设置 VRTE 参数,运行 SCIAPOL 1.0 后获得相应的 stokes 矢量并可计算其偏振度与线偏振度。表 3 是模拟得到的(线)偏振度。

表 3 模拟的 DoP 和 DoLPs

Tab. 3 Simulation of DoP and DoLPs

λ/nm	P	q	u
490	0.105 9	0.097 1	-0.042 3
555	0.132 4	0.121 9	-0.051 8
665	0.102 7	0.092 9	-0.043 8
865	0.039 8	0.023 3	-0.032 2
960	0.034 2	-0.021 3	-0.026 8
1640	0.163 5	-0.161 9	0.022 8

将辐亮度与(线)偏振度代入上述公式即可估算出探测器与系统信噪比,结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 探测器信噪比估算值

Tab. 4 Estimated SNRs of detectors

λ/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	SNR_0	SNR_{45}	SNR_{90}	SNR_{135}
490	24	527.5	465.9	441.3	503.5
555	34	755.4	651.9	609.1	714.2
665	46	1 248.7	1 119.2	1 071.3	1 202.8
865	44	829.6	787.9	794.6	836.2
960	38	1 272.7	1 267.1	1 315.4	1 320.9
1 640	44	352.8	429.2	486.4	410.4

表 5 AMPR 信噪比估算值

Tab. 5 Estimated SNRs of AMPR

λ/nm	SNR_I	SNR_Q	SNR_U	SNR_P	SNR_q	SNR_n
490	685.6	66.6	29.0	51.3	66.4	29.0
555	966.2	117.7	50.1	90.3	117.3	50.1
665	1642.3	152.6	71.9	119.2	152.4	71.9
865	1 148.5	26.8	37.0	32.3	26.8	37.0
960	1 830.2	38.9	49.1	44.3	38.9	49.1
1640	693.6	96.1	13.5	68.2	95.0	13.5

5.3 测量

为了解仪器的实际性能,在暗室内测量了相同辐亮度与偏振态下的仪器信噪比。

实验时,将偏振盒放置在仪器与积分球之间,调整仪器到积分球的光线充满整个视场并确保测量主平面的位置正确。然后调节积分球直到积分球达到模拟的辐亮度、旋转偏振盒得到模拟的偏振度,再将扫描入口部件旋转一个偏振方位角。

多次测量(>200)后,以测量获得的 DN 平均值为信号, DN 随机波动的均方根为噪声,两者之比为测量信噪比。测试结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 探测器信噪比测量值

Tab. 6 Measured SNRs of detectors

λ/nm	SNR_0	SNR_{45}	SNR_{90}	SNR_{135}
490	454.5	335.6	358.8	395.3
555	585.8	769.9	598.5	805.0
665	566.6	416.1	473.4	469.8
865	670.6	1 114.0	694.7	1 164.9
960	495.5	380.6	399.3	531.2
1640	863.5	789.1	923.2	987.0

表 7 AMPR 信噪比测量值

Tab. 7 Measured AMPR SNRs

λ/nm	SNR_I	SNR_Q	SNR_U	SNR_P	SNR_q	SNR_n
490	573.5	55.6	21.7	42.8	55.4	24.2
555	727.1	88.6	57.7	67.8	88.0	37.6
665	735.6	68.3	27.4	53.3	68.0	32.2
865	963.9	22.5	52.0	27.1	22.5	31.0
960	618.9	13.2	16.7	15.0	13.2	16.6
1640	1 258.4	203.7	28.0	144.5	201.1	28.7

5.4 分析

从表 4 与表 6 中可以看出,探测器的信噪比均大于 245 的基本要求。其中 490, 555, 865 nm 3 个波段估算与测量的结果比较接近,说明估算效果较好;另外 3 个波段估算的信噪比与测量值相差较大。研究发现,665, 960 nm 波段的信噪比估算值比测量值大,这主要由于实际使用的滤光片波段宽度要小于设计要求的波段宽度;1 640 nm 波段实际使用的滤光片波段宽度要大于设计要求的波段宽度,且测试环境的温度影响也较大,但测量结果说明信噪比仍然能够满足系统的偏振探测。

从表 5 与表 7 来看, Stokes 矢量强度分量的信噪比较大,而另外两分量 Q, U 及相应的 DoLP 的信噪比较小。这主要是由于强度分量是两个探测器分量的相加,而 Q, U 分量是两个探测器分量相减,噪声相加使信噪比明显降低,与理论分析结果相符。

6 结 论

本文通过分析信号与噪声,给出了 AMPR 探测器信噪比的估算过程,推导了更为实用的偏振度不确定度与系统信噪比的表达式。表达式表明系统信噪比与强度信噪比成正比,探测器信噪比与偏振探测精度成反比, AMPR 的探测器信噪比应不小于 245(偏振精度为 0.5%),这些结果弥补了一直以来偏振遥感仪器只计算探测器信噪比的不足。通过矢量传输模拟与试验给出了 AMPR 对典型场景观测时信噪比的估算值和测量值。结果显示, AMPR 各探测器信噪比均大于 245,基本满足设计要求。

由于上述工作主要在静态状况下进行,而实际上,遥感系统在探测时不仅受到自身因素影响,还要受到场景、速高比、扫描速度等因素的影响,这将在今后的工作中做进一步的研究。

参考文献:

[1] 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 偏振遥感的研究现状

及发展趋势[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1237-1240.

ZHANG CH Y, CHENG H F, CHEN ZH H, et

- al.. The present research and developing trend of polarization remote sensing[J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(12):1237-1240. (in Chinese)
- [2] 李淑军,姜会林,朱京平,等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 803-809.
LI SH J, JIANG H L, ZHU J P, *et al.*. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
- [3] HASEKAMP O P, LANDGRAF J. Retrieval of aerosol properties over land surfaces capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3332-3344.
- [4] WAQUET F, CORNET C, DEUZÉJ L, *et al.*. Retrieval of aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, 6: 991-1016.
- [5] LITVINOV P, HASEKAMP O, CAIRNS B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781-792.
- [6] 罗睿智,乔延利,曹汉军,等. 航空型多波段偏振遥感探测及其光学系统的研究与设计[J]. *量子电子学报*, 2002, 19(2):143-148.
LUO R ZH, QIAO Y L, CAO H J, *et al.*. Research and designation on optical system for aviation multi-angular remote sensing detection[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19(2): 143-148. (in Chinese)
- [7] 崔文煜,张运杰,易维宁,等. 多角度偏振辐射计系统设计及实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8):1-4.
CUI W Y, ZHANG Y J, YI W N, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8):1-4. (in Chinese)
- [8] PERALTA R J, NARDELL C, CAIRNS B, *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [J]. *SPIE*, 2007, 67865L:1-17.
- [9] MIECZNIK G, ILLING R, PETROY S, *et al.*. Sensitivity metric approach for retrieval of aerosol properties from multiangular and multispectral polarized radiances[J]. *Appl. Optics*, 2005, 44(20): 4186-4204.
- [10] GSFC 421.7-70-0. Aerosol polarimetry sensor algorithm theoretic basis document[Z/OL]. http://glory.giss.nasa.gov/aps/docs/APS_ATBD_CALIBRATE_CCB.pdf.
- [11] PERSH S, SHAHAM Y J, BENAMIA O, *et al.*. Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor[J]. *SPIE*, 2010, 7807: 780703.
- [12] ANDRÉ Y, LAHERRÈRE J M, BRET-DIBAT T, *et al.*. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *SPIE*, 1995, 2572: 79-90.
- [13] 宋茂新,孙斌,孙晓兵,等. 航空航天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 M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of aviation multi-angle polarizing radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1153-1158. (in Chinese)
- [14] 孙晓兵,洪津,乔延利,等. 卫星大气多角度偏振遥感系统方案研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3):198-201.
SUN X B, HONG J, QIAO Y L, *et al.*. Project of multi-angle polarimetric system onboard satellite for remote sensing of atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3):198-201. (in Chinese)
- [15] MISHCHENKO M I, ROSENBUSH V K, KISELEV N N, *et al.*. *Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects*[M]. Kyiv: Akadempriodyka, 2010.
- [16] KNOBELSPIESSE K, CAIRNS B, REDEMANN J, *et al.*. Simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties during the MILAGRO field campaign[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11: 6245-6263.
- [17] ELIAS T, CAIRNS B, CHOWDHARY J. Surface optical properties measured by the airborne research scanning polarimeter during the CLAMS experiment[J]. *SPIE*, 2004, 5235: 595-606.
- [18] 宋宁,韩心志. 光学系统探测器上的辐照度的偏振分析[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(3): 47-51.
SONG N, HAN X ZH. Polarization analysis of irradiance on detector of optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(3): 47-51. (in Chinese)
- [19] Santa Barbara Research Center. Earth observing scanning polarimeter PHASE-B final report [R]. *New*

- York: NASS, 1990.
- [20] LOMHEIM T S, MILNE E L, KWOK J D, *et al.*. Performance/sizing relationships for a short-wave/mid-wave infrared scanning pointsource detection space sensor [C]. *IEEE Aero-space Conference*, 1999, 4 : 113-138.
- [21] ROZANOV V V, KOKHANOVSKY A A. The solution of the vector radiative transfer equation using the discrete ordinates technique_selected applications [J]. *Atmospheric Research*, 2006, 79 (3-4): 241-265.
- [22] KOKHANOVSKY A A. *Aerosol Optics-Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere* [M]. New York: Springer, 2008.
- [23] CHEN Y H, JI Y Q, ZHOU J K, *et al.*. Computation of signal-to-noise ratio of airborne hyperspectral imaging spectrometer [C]. *Systems and Informatics (ICSAI), 2012 International Conference on Systems and Informatics*, 2012: 1046-1049.
- [24] WAQUET F, LÉON J F, CAIRNS B, *et al.*. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1228-1236.
- [25] IGNATOV A, STOWE L. Aerosol retrievals from individual AVHRR channels: Part II. Quality control, probability distribution functions, information content, and consistency checks of retrievals [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2002, 59: 335-362.

作者简介:



汪方斌(1972—),男,安徽桐城人,讲师,博士研究生,1994年于宁波大学获得学士学位,2007年于中国科学技术大学获得硕士学位,主要从事偏振遥感、航空航天遥感器工程技术方面的研究。Email: wangfb@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



洪津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)