

气溶胶偏振探测仪检偏器方位角优化

代 虎^{1,2}, 颜昌翔¹, 吴从均^{1,2}

- (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: 非理想透镜组的偏振效应引起偏振测量系统的测量矩阵改变, 导致系统最佳配置漂移。为了最大化气溶胶偏振探测仪的信噪比, 利用 Jones 矩阵的方法计算前置光学透镜组的起偏度, 并分别以系统分析矩阵的条件数和参数 $Tr(BB^T)$ 为优化参数对检偏器的放置角度进行优化。经过优化, 得到检偏器的最佳方位角, 在 670 nm 通道系统分析矩阵的条件数由 1.836 0 降为 1.689 4, 在 1 641 nm 通道系统分析矩阵的条件数由 1.977 7 降为 1.771 4。结果表明, 两种优化方法的结果基本一致, 经过优化之后两个偏振测量通道的信噪比都提升 10% 左右。

关键词: 偏振遥感; 信噪比; 条件数; 奇异值分解; 检偏器方位角

中图分类号: O436.3; TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1243-06

Azimuth optimization of polarizers for the aerosol polarimeter

Dai Hu^{1,2}, Yan Changxiang¹, Wu Congjun^{1,2}

- (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)

Abstract: The polarization effect of the imperfect lens components changes the analysis matrix of the polarimetry system, so the optimum configuration of the system shifts. In order to maximize SNR of the aerosol polarimeter, the polarization degree of the imperfect lens components was computed by means of Jones matrix, and the optimum azimuth angles of polarizers were found to minimize the condition number of the system analysis matrix and the parameter $Tr(BB^T)$, respectively. After optimizing, the optimum angles of polarizers at 670 nm channel and 1 641 nm channel were found, respectively. The condition number of the system analysis matrix reduced from 1.836 0 to 1.689 4 at 670 nm channel, while that of the system analysis matrix fall from 1.977 7 to 1.771 4 at 1 641 nm channel. It is indicated that the results of these two optimization methods are consistent, and both of the SNRs are improved about 10% at 670 nm and 1 641 nm channels.

Key words: polarization sensing; signal-noise-ratio; condition number; singular value decomposition; azimuth of polarizer

收稿日期: 2014-08-10; 修订日期: 2014-09-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA12A103)

作者简介: 代虎(1985-), 男, 博士生, 主要从事空间遥感器在轨定标技术方面的研究。Email: daihulove1@126.com

导师简介: 颜昌翔(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。Email: yancx@ciomp.ac.cn

0 引言

Stokes 矢量偏振仪被广泛应用于包括医疗诊断和大气遥感探测等应用中^[1-3], 波长覆盖整个可见光到长波红外波段。Stokes 偏振仪能够提高目标对比度, 减少背景干扰, 有助于目标探测和识别, 提供目标表面方位信息, 擅长在复杂背景中提取目标信息。大气中的气溶胶粒子与光子的相互作用使光束的偏振态发生变化, 从而使光束携带了气溶胶粒子的信息, 通过信息解译能够反演出气溶胶的组成成分、尺寸分布和气溶胶光学厚度等光学特性^[4-5]。并且对目标区域的气溶胶光学特性的反演还能够校正气溶胶对其他光学遥感器性能的影响, 减小大气条件对仪器工作的限制, 提高其测量精度^[6-7]。

尽管偏振探测是一种极具潜力的探测手段, 测量目标场景光辐射的偏振特性却十分不易。由于偏振器件会降低光学系统的透过率, 偏振探测系统的信噪比普遍较低。Ambirajan^[8-9], Sabatke^[10-11]和 Tyo^[12-13]研究了通过减小系统分析矩阵的条件数增加系统信噪比的方法, 并提出了几种 Stokes 偏振仪在理想光学组件条件下的最优系统配置。

在多数的被动探测中, 光辐射中圆偏振信息非常少, 而且 Stokes 矢量中圆偏振参数 s_3 的测量最复杂, 所以某些仪器设计时 s_3 参数时常会被忽略掉以降低系统的成本^[14]。气溶胶偏振探测仪就是一种采用三通道结构形式的三参数(s_0, s_1, s_2)Stokes 偏振仪。由于气溶胶偏振仪的宽视场, 透镜组的偏振效应对整个系统的测量矩阵影响很大, 所以气溶胶偏振探测仪的检偏器最优放置角度不再是 Tyo^[15]建议的($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)。文中根据气溶胶偏振仪的光学设计参数, 定量描述透镜组的偏振效应对系统测量矩阵的影响, 并利用测量矩阵条件数和参数 $Tr(BB^T)$ 两种优化参数优化检偏器的方位角, 给出系统的最佳配置。

1 偏振测量及优化原理

1.1 偏振测量理论

由于光学传感器对偏振信息不敏感, 光辐射的 Stokes 矢量不能直接测得。为了测得光辐射的偏振信息, 光学系统中必须加入偏振分析器(PSA)。PSA 通常由偏振敏感器件组成, 比如检偏器和相位延迟

器。每组偏振分析器可以被认为是一个二向椭圆衰减器, 二向椭圆衰减器允许某个偏振态的光辐射通过但不改变其光强。Lu 和 Chipman^[16]证明二向椭圆衰减器的 Mueller 矩阵第一行就是能够完全通过它的偏振态的 Stokes 矢量, 该 Stokes 矢量被称为二向椭圆衰减器的主轴, 也就是 PSA 的主轴。该 Stokes 矢量可以表示为:

$$\mathbf{S}_D = [1 \ \mathbf{D}^T]^T \quad (1)$$

式中: \mathbf{D}^T 为 3×1 的二向衰减向量, 它给出了以最大光强通过衰减器的偏振态在邦加球上的位置。通过改变偏振敏感器件的方位和位相延迟器的相位延迟量可以改变二向椭圆衰减器的主轴。

当某偏振态光束 \mathbf{S} 经过 PSA 后进入探测器, 探测器测得的光强如公式(2)。

$$I_{\text{out}}^{(i)} = \mathbf{S}_D^{(i)} \cdot \mathbf{S} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_D^{(i)}$ 表示第 i 个 PSA 的主轴。即探测器测得的光强是 PSA 主轴与入射光束 Stokes 矢量的内积。因此, 每个偏振分析通道探测器测得光强可以看作是入射偏振光在 PSA 主轴方向的投影。根据 N 个偏振分析通道的光强测量可以构建一个线性方程组(3)。

$$\mathbf{I} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A} = [\mathbf{S}_D^{(1)} \ \mathbf{S}_D^{(2)} \ \mathbf{S}_D^{(3)} \ \cdots \ \mathbf{S}_D^{(N)}]^T$ 被称为测量矩阵; $\mathbf{I} = [I_{\text{out}}^{(1)} \ I_{\text{out}}^{(2)} \ I_{\text{out}}^{(3)} \ \cdots \ I_{\text{out}}^{(N)}]^T$ 。求解线性公式(3)即可得到待求的入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S} 。偏振分析通道数 N 必须不小于待测 Stokes 参数的个数 M , 当 $N > M$ 时, 可以利用最小二乘法求解公式(3)。

1.2 偏振测量系统优化理论

设光强测量过程中附加噪声为 $\boldsymbol{\varepsilon}$, 根据测得的光强反演入射光 Stokes 矢量的误差

$$\Delta \mathbf{S} = \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: \mathbf{B} 为测量矩阵 \mathbf{A} 的广义逆矩阵, 称为数据反演矩阵。根据范数的性质, 结合公式(3)、(4)可得不等式(5)。

$$\frac{\|\Delta \mathbf{S}\|}{\|\mathbf{S}\|} \leq \kappa(\mathbf{A}) \cdot \frac{\|\boldsymbol{\varepsilon}\|}{\|\mathbf{I}\|} \quad (5)$$

式中: $\kappa(\mathbf{A})$ 为系统分析矩阵 \mathbf{A} 的条件数。

$$\kappa(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \cdot \|\mathbf{A}\|^{-1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{A}^{-1} 为 $N=M$ 时测量矩阵 \mathbf{A} 的逆矩阵; $\|\cdot\|$ 为矩阵或向量的范数。由公式(5)可知, 当光强测量的相对误差 $\frac{\|\boldsymbol{\varepsilon}\|}{\|\mathbf{I}\|}$ 确定时, 条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 表示 Stokes 矢量相

对测量误差的上界, $\kappa(\mathbf{A})$ 的值越小, 光强测量过程中的附加噪声对测量结果的影响越小, 系统信噪比越高^[17-20]。矩阵的条件数对应于矩阵范数, 主要有三种, L_1 、 L_2 和 L_∞ 条件数, 此处根据 Tyo^[12] 的建议选择 L_2 条件数。当 $N=M$ 时, 最理想的情况是 $\mathbf{S}_D^{(i)} (i=1, 2, \dots, N)$ 相互正交, 此时矩阵 \mathbf{A} 的条件数最小。但是任何一种完全偏振态有且仅有一个确定的正交偏振态^[21], 所以当 $M>2$ 时, 不存在这样的一组正交偏振态 $\mathbf{S}_D^{(i)} (i=1, 2, \dots, M)$ 。根据 Tyo 分析, 分析矩阵 \mathbf{A} 的最小 L_2 条件数是 $(M-1)^{1/2}$ 。

此处提出另外一种优化方法。光强测量过程中的附加噪声是随机噪声, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是由 N 个随机变量 ε_i 构成的随机向量, 为了方便下文推导, 假设每次光强测量的附加噪声 ε_i 相互独立且服从标准差为 σ 的同一分布。Stokes 矢量测量误差 $\Delta\mathbf{S}$ 的统计学特性可以用协方差矩阵表示, 其协方差矩阵 $\mathbf{C}_{\Delta\mathbf{S}}$ 表示如下:

$$\mathbf{C}_{\Delta\mathbf{S}} = \langle \Delta\mathbf{S} \cdot \Delta\mathbf{S}^T \rangle = \sigma^2 \mathbf{B}\mathbf{B}^T \quad (7)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为求期望值; σ^2 代表光强测量的附加噪声。矩阵 $\mathbf{B}\mathbf{B}^T$ 非对角元素表示 Stokes 矢量测量误差 $\Delta\mathbf{S}$ 各分量之间的相关性, 它的对角元素表示光强测量噪声向 Stokes 矢量测量误差传递的增益因子, 因此矩阵 $\mathbf{B}\mathbf{B}^T$ 的对角元素之和 $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 和 \mathbf{A} 的条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 一样可以作为评价系统信噪比的参数, $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 越小, 附加噪声引入的测量误差越小, 系统的信噪比越高。

矩阵 \mathbf{A} 的条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 和参数 $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 都能够表示光强测量的附加噪声对 Stokes 矢量反演的影响, 但是它们之间有明显差别, 矩阵 \mathbf{A} 的条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 表示 Stokes 矢量的相对反演误差的上界, 而参数 $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 表示附加噪声的传递因子, 相比较而言参数 $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 能更加详细准确地评价系统的信噪比。

矩阵 \mathbf{A} 是 $N \times M$ 维矩阵, 根据奇异值分解可以分解为以下形式:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_M \\ & & & \vdots \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (8)$$

式中: $\mu_1 \cdots \mu_M$ 为矩阵 \mathbf{A} 的非零奇异值; \mathbf{U} 和 \mathbf{V}^T 都是正交矩阵。因此矩阵 \mathbf{A} 的 L_2 条件数 $\kappa(\mathbf{A})$ 还可以表示为公式(9):

$$\kappa(\mathbf{A}) = \frac{\max \mu_i}{\min \mu_i} \quad (9)$$

矩阵条件数的奇异值表示法将矩阵 \mathbf{A} 从方阵扩展为任意 $N \times M$ 维矩阵, 即当 $N > M$ 时也可以用条件数评价偏振系统的信噪比。但是由于条件数是两个非零特征值的比值, 所以当测量矩阵 \mathbf{A} 的奇异值按相同比例变化(例如增加光学系统的透过率和增加光强测量次数)时, 条件数不能反映系统的这些变化, 这是测量矩阵 \mathbf{A} 条件数的又一缺点。

矩阵 \mathbf{B} 是矩阵 \mathbf{A} 的广义逆矩阵, 所以矩阵 \mathbf{B} 可以写作如下形式:

$$\mathbf{B} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 1/\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mu_M \end{bmatrix} \mathbf{U}^T \quad (10)$$

由于 \mathbf{V} 是正交矩阵, 所以参数 $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 的奇异值表示法如公式(11):

$$Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{\mu_i^2} \quad (11)$$

式中: $Tr(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ 是测量矩阵 \mathbf{A} 奇异值的倒数的平方和, 能够敏锐地反映测量矩阵 \mathbf{A} 奇异值按相同比例变化对信噪比的影响, 克服了条件数不能详细准确表征系统信噪比的缺点。

2 气溶胶偏振探测仪结构优化

2.1 气溶胶偏振探测仪介绍

气溶胶探测仪是全球二氧化碳监测科学实验卫星的有效载荷之一, 与高光谱与高空间分辨率二氧化碳探测仪一体化设计, 将于 2015 年底发射升空。它是一台 6 镜头、5 波段、9 通道的多谱段偏振测量仪, 以推扫方式工作于 700 km 轨道高度, 空间分辨率优于 1 km、覆盖宽度大于 400 km, 具备获取 0.38 m、0.67 m、0.87 m、1.375 m、1.641 m 五个光谱通道的多光谱云与气溶胶图像数据功能, 识别大气探测路径中的云干扰, 实现云与气溶胶遥感探测, 为 CO_2 反演提供必要的云与气溶胶观测数据, 提高反演精度。为了满足 CO_2 的反演精度要求, 两个偏振波段的辐射定标精度和偏振定标精度都要达到 5%^[22]。

气溶胶探测仪的 0.67 μm 和 1.641 μm 波段具有偏振测量功能, 这两个波段都分别有三个通道, 每个通道的结构示意图如图 1 所示, 每个波段的三个通

道中分别装有透振方向分别为 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ 的检偏器。在实际安装中检偏器是固定在光路中,不需要旋转,所以检偏器安装定位精度能够保证优于 $5'$ 。每个通道中的 PSA 仅由检偏器构成,因此气溶胶偏振仪是只有线偏振测量功能的三参数 Stokes 矢量偏振探测仪。第 i 通道 PSA 的主轴如公式(12)所示:

$$S_D^{(i)} = [1 \cos 2\theta_i \sin 2\theta_i]^T \quad i=0, 1, 2 \quad (12)$$

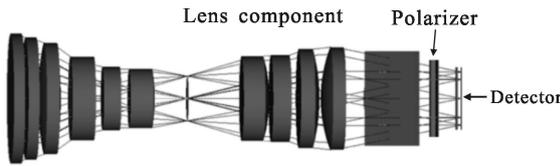


图 1 单个信道的光学结构示意图

Fig.1 Schematic of optical layout of a channel

理想条件下,三参数 Stokes 矢量偏振仪中三个检偏器透振方向的最佳位置是 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$,此时系统分析矩阵 A 的条件数最小^[15]。三个 PSA 主轴的二向衰减矢量对应于邦加球赤道的三等分点,以它们为顶点构成一个内接等边三角形。

气溶胶偏振探测仪的视场角是 $\pm 16^\circ$,如此大的视场角导致前置透镜组的偏振效应异常突出,对偏振测量系统的分析矩阵 A 产生重大影响,所以三个偏振通道中检偏器的最优放置角度不再是 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$,而要综合考虑透镜组与偏振器件的影响予以重新优化。

2.2 透镜组的偏振效应

对于一个既定的光学系统,透镜组起偏度是入射光线的视场角、入射光的偏振度和偏振方位角的函数。透镜组中每个光学表面的偏振效应可以用 Jones 矩阵描述:

$$J_n = \begin{bmatrix} t_{pn} & 0 \\ 0 & t_{sn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: J_n 为透镜组中第 n 个光学表面的 Jones 矩阵; t_{pn}, t_{sn} 分别是该光学表面的 p 和 s 分量透过系数,可以利用 ZMAX 的偏振分析得到。

整个透镜组的 Jones 矩阵

$$J = J_n \cdots J_3 J_1 = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

使用相干矩阵 C_i 描述入射光的偏振态,则出射光的相干矩阵^[23] C_o 为:

$$C_o = J C_i J^+ \quad (15)$$

式中: J^+ 是 J 的广义逆矩阵。因此可得出射光的偏振度 P_o 。

$$P_o = \left(1 - \frac{4t_p^2 t_s^2 (1 - P_i^2)}{[t_p^2 + t_s^2 + P_i \cos 2\alpha (t_p^2 - t_s^2)]^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

式中: t_p, t_s 分别为透镜组 p, s 分量的透过系数; P_i 是入射光的偏振度; α 为入射光偏振方位角。

气溶胶散射光是线偏振光,偏振度主要分布在 $0.2 \sim 0.5$ 之间^[24]。设入射光的偏振度均匀分布在 $0.2 \sim 0.5$ 之间,方位角均匀分布在 $0 \sim 180^\circ$,透镜组在 $\pm 16^\circ$ 视场上的平均起偏度是 P_I 。

$$P_I = \langle P_o - P_i \rangle \quad (17)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为求平均值。

因此透镜组的部分 Mueller 矩阵如下^[25]:

$$M_I' = \begin{bmatrix} 1 & P_I & 0 \\ P_I & 1 & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{式中: } J = \frac{2\sqrt{(1-P_I)/(1+P_I)}}{1+(1-P_I)/(1+P_I)}。$$

2.3 偏振测量系统优化

考虑到透镜组的偏振效应,偏振测量系统第 i 通道中偏振分析器的主轴为:

$$S_D^{(i)} = [1 + P_i \cos 2\theta_i \quad P_i + \cos 2\theta_i \quad J \sin 2\theta_i]^T \quad i=0, 1, 2 \quad (19)$$

此处忽略了滤光片微弱的偏振效应。三个检偏器的角度 $(\theta_0, \theta_1, \theta_2)$ 是相对的,可以认为 θ_0 是 0° 。由于检偏器的自由度相比相位延迟器要少,为了获得最佳的系统配置,只能通过合理选择 θ_1 和 θ_2 的值使系统的信噪比最优化。

利用 MATLAB 的 GlobalSearch 全局寻优方法寻找使 $\kappa(A')$ 最小的 θ_1 和 θ_2 ,需要满足条件 $0^\circ < \theta_1 < \theta_2 < 180^\circ$,局域优化指令选择 fmincon,起点向量选择 $[0, 1.0467, 2.0933]$,最大迭代次数采用默认值。经过优化,在 670 nm 通道,检偏器的最佳放置角度是 $(0^\circ, 62^\circ 42', 117^\circ 18')$;而在 1641 nm 通道,检偏器的最佳放置角度是 $(0^\circ, 63^\circ 26', 116^\circ 33')$ 。

同样利用 MATLAB 编程找到使参数 $Tr(BB^T)$ 最小的 θ_1 和 θ_2 。经过优化,在 670 nm 通道,检偏器的最佳放置角度是 $(0^\circ, 62^\circ 13', 117^\circ 47')$,而在 1641 nm 通道,检偏器的最佳放置角度是 $(0^\circ, 62^\circ 36', 117^\circ 24')$ 。表 1 和表 2 分别是 670 nm 和 1641 nm 通道两种优化参数的比较,经过优化系统的信噪比提升了 10% 左右。

表 1 通道 670 nm 的两个优化参数比较

Tab.1 Comparison of the two optimization parameters at 670 nm

Optimization parameter	Before optimizing	After optimizing	Ideal value	SNR progress
$\kappa(A)$	1.836 9	1.680 5	1.414 2	11%
$Tr(BB^T)$	2.083 0	1.878 9	-	9.8%

表 2 通道 1641 nm 的两个优化参数比较

Tab.2 Comparison of the two optimization parameters at 1641 nm

Optimization parameter	Before optimizing	After optimizing	Ideal value	SNR progress
$\kappa(A)$	1.977 7	1.768 8	1.414 2	14.7%
$Tr(BB^T)$	2.232 4	1.964 5	-	12%

注:“-”代表不存在

图 2 和图 3 分别是 670 nm 和 1641 nm 通道中两

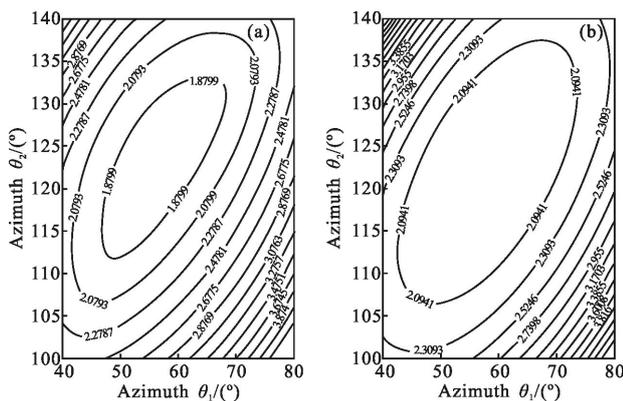


图 2 在 670 nm 通道两种优化参数与检偏器方位角的关系

Fig.2 Relationships between two optimizing parameters and azimuth angle of polarizaers at 670 nm

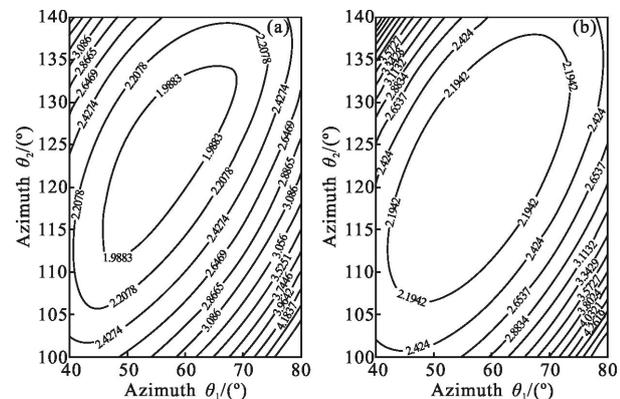


图 3 在 1641 nm 通道两种优化参数与检偏器方位角的关系

Fig.3 Relationships between two optimizing parameters and azimuth angle of polarizaers at 1641 nm

种优化参数随检偏器方位角 θ_1 和 θ_2 变化的等高线图,通过比较,两种优化方法的结果基本一致,但是存在较小偏差,这是由于两种优化参数本身的差别决定的。因为 A 的条件数反映了 Stokes 矢量相对测量误差的上界,而参数 $Tr(BB^T)$ 是附加噪声的传递因子。

3 结 论

根据气溶胶偏振探测仪的光学设计参数,利用 Jones 矩阵的方法计算了 670 nm 和 1641 nm 通道中透镜组的起偏度。分别利用条件数和参数 $Tr(BB^T)$ 两种方法对系统进行优化。结果表明,经过优化之后系统对附加噪声敏感性明显降低,670 nm 和 1641 nm 通道的信噪比显著提升。但是优化之后的系统分析矩阵条件数仍然大于理想情况下的 1.414,说明虽然经过优化检偏器的透振方向使透镜组的偏振效应造成的测量误差受到了抑制,却无法完全将其消除。条件数优化和参数 $Tr(BB^T)$ 优化的结果基本一致。参数 $Tr(BB^T)$ 优化因为具有以下优点而更具优势,(1) 能够对系统的误差性能给予详细定量的解释,(2) 能够用于研究系统奇异值同时放大或缩小的情况,而条件数优化对此却无能为力。

参考文献:

[1] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088–1095. (in Chinese)
弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1088–1095.

[2] Yan Lei, Xiang Yun, Li Yubo. Progress of polarization remote sensing research [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 162–174. (in Chinese)
晏磊, 相云, 李宇波. 偏振遥感研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 162–174.

[3] Zhang Ying, Zhao Huijie, Cheng Xuan. Design of full-polarized and multi-spectral imaging system based on LCVR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1375–1378. (in Chinese)
张颖, 赵慧杰, 程宣. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1375–1378.

[4] Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang. Research of aerosol extinction inverted with look-up table method based on

- multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optics Sinica*, 2013, 33(6): 0601002-1-0601002-9. (in Chinese)
- 吴丰成, 谢品华, 李昂. 基于多轴差分吸收光谱技术的查找表法反演气溶胶消光廓线研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601002-1-0601002-9.
- [5] Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol Lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513002-1-0513002-6. (in Chinese)
- 张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002-1-0513002-6.
- [6] Zhang Qianqian, Gao Jun, Xu Xiaohong. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1213001-1-1213001-8. (in Chinese)
- 张倩倩, 高隽, 徐小红. 多粒子散射的偏振传输特性分析 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1213001-1-1213001-8.
- [7] Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng. Numerical calculation of optical properties of multi-particle size aerosol aggregate particles [J]. *Acta Optics Sinica*, 2013, 33(6): 0601004-1-0601004-5. (in Chinese)
- 黄朝军, 吴振森, 刘亚锋. 多粒子气溶胶凝聚粒子光学特性的数值计算[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601004-1-0601004-5.
- [8] Ambirajan A, Look D C. Optimum angles for a polarimeter: part I [J]. *Opt Eng*, 1995, 34(6): 1651-1655.
- [9] Ambirajan A, Look D C. Optimum angles for a polarimeter: part II[J]. *Opt Eng*, 1995, 34(6): 1656-1659.
- [10] Sabatke D S, Descour M R, Dereniak E. Optimization of retardance for a complete Stokes polarimeter [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(11): 802-804.
- [11] Sabatke D S, Locke A M, Descour M R. Figures of merit for complete Stokes polarimeters [C]//SPIE, 2000, 4133: 75-81.
- [12] Tyo J S. Noise equalization in Stokes parameter images obtained by use of variable-retardance polarimeters [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(16): 1198-2000.
- [13] Tyo J S. Considerations in polarimeter design [C]//SPIE, 2000, 4133: 65-74.
- [14] Scott Tyo J, Goldstein Dennis L, Chenault David B. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [15] Tyo J S. Optimum linear combination strategy for an N-channel polarization-sensitive imaging or vision system [J]. *Opt Soc Am A*, 1998, 15(2): 359-366.
- [16] Lu S Y, Chipman R A. Interpretation of Mueller matrices based on the polar decomposition [J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(5): 1106-1113.
- [17] Tyo J S, Turner T S. Variable-retardance, Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(9): 1450-1458.
- [18] Walraven R. Polarization imagery[J]. *Opt Eng*, 1981, 20(1): 14-18.
- [19] Wolff L B. Polarization camera for computer vision with a beam splitter[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11(11): 2935-2945.
- [20] Azzam R M A, Elminyawi I M, El-Saba A M. General analysis and optimization of the four-detector photopolarimeter [J]. *J Opt Soc Am A*, 1988, 5(5): 681-689.
- [21] Scott Tyo J. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(4): 619-630.
- [22] Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong. Inversion of micro-pulse Lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0514001-1-0514001-5. (in Chinese)
- 陈涛, 赵玉洁, 刘东. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0514001-1-0514001-5.
- [23] R M A. The Measure of ellipsoidal Polarization and Polarized Light[M]. Beijing: Science Press, 1986: 44-99. (in Chinese)
- [24] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by aerosol [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865. (in Chinese)
- 赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 862-865.
- [25] Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, et al. Project of calibration method for polarization camera [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 15(3): 227-231. (in Chinese)
- 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 15(3): 227-231.