

Measurement of Aerosols and Ice Clouds Using Ellipsometry Lidar

Dukhyeon Kim^{1†}, Hai Du Cheong¹, and Sergei N. Volkov²

¹Division of Cultural Studies, Hanbat National University, Dukmyung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1,
Zuev Square, Tomsk 634-050, Russia

(Received January 9, 2015; Revised manuscript January 27, 2015; Accepted January 28, 2015)

We have developed ellipsometry lidar and measured aerosol and ice-cloud characteristics. To measure a full normalized backscattering phase matrix (NBSPM) composed of nine elements, we have designed an optical system with three kinds of transmission and three kinds of reception, composed of $\lambda/2$ waveplate, $\lambda/4$ waveplate and empty optic. To find systematic optical errors, we used clean day middle-altitude (4-6km) lidar signals for which the aerosol's concentration was small and its orientation chaotic. After calibrating our lidar system, we have calculated NBSPM elements scattered from an aerosol and from an ice cloud. In the case of an aerosol, we found that the off-diagonal values m_{12}, \dots, m_{34} of the NBSPM are smaller than those for a cirrus cloud. Also, the off-diagonal values of the NBSPM from a cirrus cloud depend on atmospheric conditions.

Keywords: Ellipsometry lidar, Aerosol, Ice cloud, Polarization, Backscattering Mueller Matrix

OCIS codes: (010.0280) Remote sensing and sensors; (010.1100) Aerosol detection; (010.1350) Backscattering

타원편광 라이다 개발 및 이를 이용한 에어로졸과 구름의 특성 측정

김덕현^{1†} · 정해두¹ · 세르게이 볼코브²

¹한밭대학교 교양학부

Ⓧ 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산 16-1 번지

²러시아 과학원 산하 시베리아 대기광학연구소

Ⓧ 634-050 러시아, 톰스크

(2015년 1월 9일 받음, 2015년 1월 27일 수정본 받음, 2015년 1월 28일 게재 확정)

얼음 구름과 에어로졸의 후방산란 특성을 측정할 수 있는 타원 편광라이다를 구성하고 이를 이용하여 에어로졸과 얼음 구름의 특성을 측정하였다. 규격화된 전체 후방산란 물리 행렬을 구하기 위하여 3 개의 광학계($\lambda/4$ 파장판, $\lambda/2$ 파장판, 그리고 빈 공간)로 구성된 조사 광학계와 같은 구조로 된 수신광학계를 통하여 총 9 개의 라이다 시스템을 구축하였다. 구축된 광학계의 체계적 오차를 구하기 위하여 에어로졸의 농도가 낮은 높은 고도의 9 개의 라이다 신호를 이용하였다. 9 개의 라이다 신호를 이용하여 5 개의 광학계 설치 오차(offset angle)와 무질서하게 배열된 에어로졸에 대한 물리 매트릭스 요소(2 개)를 찾아내었다. 광학장치를 검정한 후 얼음구름과 에어로졸에서 NBSPM (Normalized Backscattering Phase Matrix)를 구하였으며, 그 결과 에어로졸의 경우 입자의 방향성과 관계되는 NBSPM 의 비대각 행렬이 얼음 구름의 그것보다 작음을 알 수 있었다. 그리고 권운의 경우에도 NBSPM 의 비대각 행렬이 변하는 기상 조건에 따라 달라지는 것을 볼 수 있었다.

Keywords: 타원편광라이다, 에어로졸, 얼음 구름, 편광, 후방산란 물리 매트릭스

OCIS codes: (010.0280) Remote sensing and sensors; (010.1100) Aerosol detection; (010.1350) Backscattering

I. 서 론

에어로졸의 종류와 모양 그리고 크기를 판별하기 위하여 편광라이다 장치는 오래전부터 사용되어왔고^[1], 국내에서 기

상청과 환경부에서 도입하여 현재 운영하고 있다^[2, 3]. 기존의 편광라이다는 선형 편광된 레이저를 대기 중에 조사하고 후방산란된 신호를 편광빔분할기(PBS)로 송신 빛의 편광방향(I_p)과 직각 방향(I_v)으로 분리하여 측정한다. 많은 연구가

[†]E-mail: dhkim7575@hanmail.net

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

들은 두 채널의 신호로 비편광도($\delta = I_v/I_p$)를 계산하여 산란 물질의 모양에 대한 정보를 얻어 낸다^{4, 5}.

그러나 많은 다른 연구자들이 지적하였듯이^{6, 7} 후방산란 세기 및 편광 특성은 입자의 방향성과도 밀접한 관계가 있어서, 단순히 레이저를 대기 중에 조사하고 후방산란된 빛의 선형 혹은 원형 편광의 정도만으로 입자의 비구형성 정도를 예측하는 것은 불가능한 일이다. 선형편광의 경우엔 라이다 장치의 회전에 대하여 물리 매트릭스의 M_{44} 성분의 변화가 없다는 것을 이용하여 원형편광을 사용하는 예도⁸ 있으나, 역시 물리 매트릭스의 특정 요소(element)만 특정하기 때문에 한계를 지니고, 이러한 점을 보완하여 두 개의 편광을 동시에 사용하는 방법⁹ 제시되고 있으나 역시 NBSPM의 일부분 값만 얻을 수 있다.

전체 NBSPM를 구하기 위하여 회전하는 타원편광분석기(ellipsometry)를 이용하는 경우[10] 시간이 너무 많이 소요되어 파장판이 회전하고 있는 동안에 구름의 광학적 특성이 변할 수 있기 때문에 라이다 장치엔 사용이 불가능하다. 그러므로 가능한 적은 수의 광학계로 전체 NBSPM를 구하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 최적의 광학계의 구성으로 원하는 NBSPM 값을 구하는 방법을 제시하고 실제로 장치를 구축하여 측정 한 결과를 보여준다.

II. 이론적 배경

가장 일반화된 후방산란 된 빛의 물리 매트릭스는 역방향으로 진행하는 빛이 만족해야 하는 상반작용 정리(Reciprocal theorem)에 의하여 다음의 조건을 만족한다¹¹.

$$\begin{aligned} M_{ij} &= M_{ji} \text{ if } i \text{ or } j \neq 3; \\ M_{ij} &= M_{ji}^* \text{ if } i \text{ or } j = 3, \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_{11} - M_{22} + M_{33} - M_{44} = 0 \quad (2)$$

즉 후방산란 된 빛의 편광을 결정하는 물리 매트릭스는 총 10개의 독립적인 값이 존재함을 알 수 있다. 그러나 에어로졸의 물리적 상태와 관계없이 후방산란계수에만 관계되는 M_{11} 을 1로 규격화할 경우 총 9 개의 독립변수가 존재한다. 식 (1), (2)는 산란 물질의 모양이나 대칭성에 관계없이 임의의 모양에 대하여 적용이 가능한 식이다. 만약 구성된 입자의 모양이 구형이거나 혹은 구형이 아니더라도 무질서하게 배열된 앙상블에서 산란된 것이라면 라이다 시스템을 회전 하여도 후방 산란된 빛의 편광특성이나, 후방산란계수 등은 변하지 않는다. 즉 식 (1), (2)은 다음의 식도 만족하게 된다¹².

$$M_{\Phi} = R(\Phi)(M)R(\Phi), \quad R(\Phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & s & 0 \\ 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $R(\Phi)$ 는 라이다 시스템을 레이저 조사방향(Z)에 대하여 Φ 만큼 회전시키는 것을 의미하며, c 와 s 는 $c = \cos(2\Phi)$, $s = \sin(2\Phi)$ 를 의미한다. 즉 식 (1)~(3)을 만족하는 식은 아래와 같은 식을 만족하여야 한다¹³.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & M_{14} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 \\ M_{41} & 0 & 0 & M_{44} \end{bmatrix} = M_{11} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m_{14} \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ m_{41} & 0 & 0 & m_{44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서 각 행렬요소들 간에는 $M_{22} = -M_{33}$ 을 만족하며 식 (1)의 조건에서 $M_{44} = M_{41}$ 조건도 만족하여야 하며, 식(2)의 조건은 모든 후방산란의 경우 만족해야 하므로 $1 - m_{22} + m_{33} - m_{44} = 0$ 조건도 만족해야 한다. 대칭면이 있는 입자들로 구성되어 있거나, 한 면에 대하여 거울상(mirror image) 입자만 존재하는 경우 $M_{44} = 0$ 를 만족하며 일반적으로 M_{14} 값은 매우 작은 값을 지니게 된다. 그러므로 식 (4)는 $M = M_{11} \cdot \text{diag}[1, 1-d, d-1, 2d-1]$ 의 꼴로 표현이 가능하여 송신레이저의 편광 방향이 선형편광이든 원형 편광이던 관계없이 하나의 변수로 표시된 NBSPM 값을 구할 수 있다.

즉 선형편광($S_{laser}^L = [1, 1, 0, 0]^T$) 레이저를 사용할 두 채널로 수신된 빛의 세기는 $I_p^L = D_p P_p M S_{laser}^L$, $I_v^L = D_v P_v M S_{laser}^L$ 로 표현되며, 여기서 PBS(Polarization Beam splitter: P_p, P_v)와 검출기(D_p, D_v)는 각각 매트릭스와 행벡터로 나타낼 수 있다¹⁴. 신호를 규격화한 아래와 같이 정의된 Q 값은 NBSPM의 성분으로 표시되며 센서의 효율이 같다면 1-d로 표현된다.

$$Q = \frac{I_p^L - I_v^L}{I_p^L + I_v^L} = \frac{D_p P_p M S_{laser}^L - D_v P_v M S_{laser}^L}{D_p P_p M S_{laser}^L + D_v P_v M S_{laser}^L} = (1-d) \quad (5)$$

여기서 센서와 PBS는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D_p &= \eta_p(1, 0, 0, 0), D_v = \eta_v(1, 0, 0, 0), \\ P_p &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_v = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ M &= M_{11} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d-1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2d-1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

마찬가지로 원형편광($S_{laser}^c = [1, 0, 0, -1]^T$)을 레이저를 사용할 경우 규격화된 신호 $V = (I_p^c - I_v^c)/(I_p^c + I_v^c)$ 는 각 채널의 측정값 $I_p^c = D_p P_p M S_{laser}^c$ 와 $I_v^c = D_v P_v M S_{laser}^c$ 로 표시되어 $V = 1-2d$ 로 표현된다. 그러므로 선형 편광 라이다 장치와 원형편광 라이다 장치에서 얻어지는 값은 $V = 2Q - 1$ 의 관계를 만족한다.

그러므로 간단하게는 Q, V 값의 비교를 통하여 산란 물질의 회전 대칭성을 연구하는^{6, 15, 16} 것도 가능하며, Balin 등¹⁵ 선형편광 레이저와 원형편광레이저를 이용하여 구한

NBSPM의 행렬 요소(d^L, d^C)값들의 관계에서 K_4 상수를 아래 식 7 과 같이 정의하고 이 값의 변화를 이용하여 산란 입자의 방향성을 논하였다. K_4 가 2인 경우엔 비대각선 행렬의 값은 구하지 못해도 대각선 행렬의 값만 존재하는 것으로 간주하였다.

$$d^L = 2d^C / K_4 \quad (7)$$

많은 연구가들의 연구 결과에 의하면, 높은 고도에 존재하는 권운의 경우 지표면과 수평방향으로 부는 바람장 때문에 입자들이 무질서하게 배열되어 있지 않고 방향성을 지니고 있는 것으로 관측되었다^[16, 17].

바람의 부는 방향을 xyz좌표계에서 xoz면으로 하고, xoz면을 산란면(scattering plane)이라 한다면 본 산란면에 대하여 산란물질은 대칭적으로 존재한다고 할 수 있으며 이런 경우 NBSPM는 다음과 같이 표현 된다^[17, 18].

$$M^0 = \begin{bmatrix} A & B & 0 & z \\ B & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & -D \\ z & 0 & D & C \end{bmatrix}, z \approx 0 \quad (8)$$

그러나 일반적으로 얼음 구름 입자들의 정렬방향을 알 수 없으므로 NBSPM는 임의의 각도(Φ)만큼 회전된 상태로 계산되므로 실험적으로 얻어지는 NBSPM는 아래의 모양을 지니게 된다.

$$M_E = R(\Phi)M^0 R(\Phi) = M_{11} \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ -m_{13} & -m_{23} & m_{33} & m_{34} \\ m_{14} & m_{24} & -m_{34} & m_{44} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 각 요소 m_{ij} 와 식 (8)의 행렬요소 A, B, C, D의 관계는 식(3)의 회전 매트릭스($R(\Phi)$)를 (9)식에 넣고 계산하면 알 수 있는데, 여기서 첨자 M_E 는 실제 실험을 통하여 얻어지는 물러 매트릭스를 의미하고 M^0 은 산란면과 입자의 정렬 방향이 같을 경우에 얻어지는 물러 매트릭스에 해당한다.

그러므로 일정 방향으로 정렬된 입자들의 NBSPM는 선형편광 레이저를 사용할 경우 $Q = (I_p^L - I_v^L) / (I_p^L + I_v^L) = (m_{12} + m_{22}) / (1 + m_{12})$ 값으로 얻을 수 있고, 원형편광 레이저를 사용할 경우 $V = (I_p^C - I_v^C) / (I_p^C + I_v^C) = (m_{14} - m_{44}) / (1 - m_{14})$ 로 얻을 수 있다. 그런데 m_{14}, m_{44} 값은 식 (3)의 방법으로 회전하더라도 회전 방위각에 무관한 값이므로 원형편광을 통하여 얻어지는 값 V 는 라이다의 방향에 무관하고 할 수 있다. 반면에 선형편광레이저를 조사하여 비편광도(정의: $\delta = I_v^L / I_p^L$)를 얻는다면 그 값은 m_{12}, m_{22} 가 라이다의 좌표계 방향에 따라 다르기 때문에 라이다의 설치 방향에 따라 다른 값을 얻게 된다. 즉 m_{12} 값이 0이 아닌 경우 공간회전대칭성을 판단하는 지수로 활용이 가능하다. 또한 앞선 논의처럼 무질서한 방향 분포를 이루고 있다면, 비편광도의 정의로부터 $Q = (I_p^L - I_v^L) / (I_p^L + I_v^L) = (1 - \delta_L) /$

$(1 + \delta_L) \approx m_{22} = 1 - d_L$ 이고, 마찬가지로 원형편광의 경우 $V = (I_p^C - I_v^C) / (I_p^C + I_v^C) = (1 - \delta_C) / (1 + \delta_C) = -m_{44} = 1 - 2d_C$ 를 만족하게 된다. 그러므로 두 편광으로 얻은 비편광도 사이엔 다음의 관계식이 성립한다.

$$\delta_C = \frac{2\delta_L}{1 - \delta_L} \quad (10)$$

방향성을 지닌 입자 앙상블에 대한 NBSPM의 특성에 대한 연구는 많은 연구가들에 의하여 이루어 졌는데, Romashov 등은 입자의 방향성을 정량적으로 측정하는 입자의 방향성을 의미하는 인자를 규정하고 그 값의 크기에 따라 입자들의 방향성을 논하였다.^[17]

$$\chi = \frac{M_{22} + M_{44}}{M_{11} + M_{44}} = \frac{m_{22} + m_{33}}{2 - m_{22} + m_{33}} \quad (11)$$

III. 실험 장치의 구성 및 수학적 표현

산란 입자의 NBSPM를 구하는 방법은 두 개의 회전하는 파장판을 이용하는 방법^[19, 10]이 있으나 소요시간과 복잡한 장치제어 문제로, 본 연구에서는 고정된 3 개의 광학계를 교대로 송수신 장치에 삽입하여 산란된 빛의 편광상태를 측정할 수 있도록 하였다. Figure 1에 그 과정을 상세히 나타내었다. 송신부와 수신부에는 회전하는 원판에 3 가지 종류의 파장판을 설치하여 교대로 레이저 빔의 경로에 스텝모터를 이용하여 위치시킴으로써, 3 가지 종류의 다른 편광 빛을 대기 중에 조사하도록 하였고, 마찬가지로 회전하는 원판에 3 개의 다른 파장판을 설치하여 각각의 파장판이 교대로 수신 빛의 경로에 설치되도록 하였다.

그림에서 알 수 있듯이 송신과정은 레이저 빛을 변조시키기 위하여, 1/2 파장판(빠른 축의 각도와 레이저 편광이 이루는 각도:22.5도), 1/4 파장판(빠른 축의 각도와 레이저 편광이 이루는 각도:45도) 그리고 그대로 통과 시키는 투명한 빈 광학계로 구성된다. 후방산란 후 센서를 통하여 얻게 되는 신호 역시 센서로 입력되기 전에 변조되게 되는데, 송신과정과 마찬가지로 3 가지의 광학계를 교대로 투과시켜서 신호를

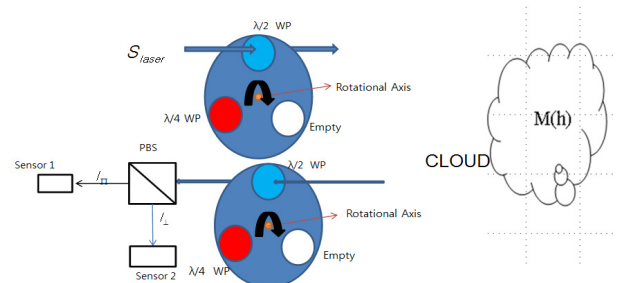


FIG. 1. Experimental setup for measuring NBSPM of ice cloud and aerosol.

연계 된다. 단 수신광학계에선 1/2 파장판의 빠른 축의 각이 처음 레이저의 편광방향과 -22.5도가 되도록 구성하였다.

레이저의 편광이 파장판에 의하여 변조되어 산란 물질에 의하여 후방산란 산란되고, 다시 변조되어 센서로 입사되는 두 개 센서의 신호를 수학적으로 나타낸 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_{\parallel}^{j,k} &= \eta_{\parallel} G_{\parallel}^j \cdot M \cdot S_{\nu}^k & j,k=1,2,3 \\ I_{\perp}^{j,k} &= \eta_{\perp} G_{\perp}^j \cdot M \cdot S_{\nu}^k & j,k=1,2,3 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 η 는 각각의 센서의 효율을 의미하며, 첨자 k 는 송신 쪽 광학계의 상태를 나타내고 ($k=1$ 일때는 빈공간, 2 일때는 1/2파장판, 3 일때 1/4 파장판) j 는 수신쪽 광학계를 같은 순서로 나타낸다. G_{\parallel}^j 는 센서와 PBS 그리고 파장판을 지난 빛을 수학적으로 나타낸 것으로 $G_{\parallel}^j = (1,0,0,0) \cdot P_{\parallel} \cdot W_p(\delta,\theta)$ 를 나타내고, P_{\parallel} 는 PBS를 투과하는 것이고, $W_p(\delta,\theta)$ 파장판을 나타내며, δ, θ 는 각각 파장판의 위상지연과 빠른 축(fast axis)의 설치 방향이 처음 레이저 편광방향과 만든 각도를 의미하며 각각의 광학계는 다음과 같이 표현된다.

$$W_p(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C^2 + S^2 \cos(\delta) & SC(1 - \cos(\delta)) & -S \sin(\delta) \\ 0 & SC(1 - \cos(\delta)) & S^2 + C^2 \cos(\delta) & C \sin(\delta) \\ 0 & S \sin(\delta) & -C \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}$$

$$P_{\parallel} = P(\theta=0), P_{\perp} = P(\theta=\pi/2) \quad (13)$$

$$P(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

BSPM(Backscattering Phase Matrix)는 공기분자에 의한 것(Σ)과 입자에 의한 (M_E)것으로 나누어 표현할 수 있는데 다음과 같이 표현된다.

$$M = M_E + \Sigma = M_{11} \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ -m_{13} & -m_{23} & m_{33} & m_{34} \\ m_{14} & m_{24} & -m_{34} & m_{44} \end{bmatrix} + \Sigma_{11} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.94 \end{bmatrix}, m_{44} = 1 + m_{33} - m_{22} \quad (14)$$

산란비(R =scattering ratio)는 공기 분자에 의한 후방산란계수와 총 산란계수의 비는 나타내며, 편광에 관계없는 물리량이다. 그러므로 두 편광라이다 신호의 합한 신호를 이용하여 Klett^[20] 혹은 Fernald^[21] 제시한 알고리즘으로 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 정의에 의하면 R 은 다음과 같다.

$$R = \frac{\beta_a + \beta_m}{\beta_m} = \frac{M_{11}(m_1 \cdot S_i) + \Sigma_{11}(\sigma_1 \cdot S_i)}{\Sigma_{11}(\sigma_1 \cdot S_i)} = \frac{M_{11}(m_1 \cdot S_i) + \Sigma_{11}}{\Sigma_{11}} \quad (15)$$

여기서 β_m 은 공기분자에 의한 후방산란계수, β_a 은 에어로졸에 의한 후방산란계수, m_1, σ_1 은 각각 에어로졸과 공기분자의 NBSPM의 첫 번째 행을 나타내는 것으로 $m_1 = (1, m_{12}, m_{13}, m_{14}), \sigma_1 = (1, 0, 0, 0)$ 로 나타낸다.

그러므로 에어로졸에 의한 후방산란계수와 공기분자에 의한 후방산란계수 산란비(scattering ratio)를 이용하면 에어로졸과 공기분자의 산란을 동시에 고려한 산란물체의 물리 매트릭스는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M = M_{11} \left(m + \frac{m_1 \cdot S_{tr}}{R-1} \sigma \right) = M_{11} m_T \quad (16)$$

실험적으로 얻어지는 두 채널의 라이다 신호는 식 (12)와 같이 표현되고, 두 신호를 아래와 같이 규격화하면

$$C^l = \frac{I_{\parallel}^l - I_{\perp}^l}{I_{\parallel}^l + I_{\perp}^l} = \frac{G_{\parallel}^l m_T S_{tr}^l - \alpha G_{\perp}^l m_T S_{tr}^l}{G_{\parallel}^l m_T S_{tr}^l + \alpha G_{\perp}^l m_T S_{tr}^l}, \quad (17)$$

$$\alpha = \eta_2 / \eta_1, l = (j-1)*3 + k, j, k = 1, 2, 3$$

이상적인 경우 두 센서의 효율비(α)가 알려져 있고, 구축된 파장판과 PBS의 설치각도와 위상지연 값(δ)이 정확하다면 17식은 9 개의 실험 값($C^l : l=1, \dots, 9$)으로부터($\vec{y} = (C^1, \dots, C^9)$) 8 개의 m_T 의 행렬요소($\vec{x} = (m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{33}, m_{34})$)를 구하는 잘 정의된(well posed) 선형방정식을 푸는 문제로 귀결된다.

IV. 실험 결과 및 토의

설치된 센서의 효율이 다르고, PBS와 각 파장판의 빠른 축이 원하는 방향으로 설치되어 있지 않으면 식 (17)에서 미지수가 너무 많아 NBSPM 행렬요소를 제대로 구할 수 없다. 그러므로 설치된 광학계의 모든 6개의 설치오차(systematic error: 센서의 효율 비, PBS 설치 각도, WP 설치 각도 4가지)를 측정하여 보정하여야 한다. 일반 에어로졸에서 각 에어로졸은 무질서하게 정렬되어 있다고 가정하면, NBSPM 독립요소는 식 (2)와 (4)에 의하여 2개의 독립변수만 존재한다. 그러므로 식 17에서 9개의 측정값을 이용하여 설치 오차 6개 그리고 에어로졸의 NBSPM 값 2개(m_{22}, m_{33})를 얻을 수 있다. 즉 체계적 오차는 다음 식을 만족하는 벡터 x 를 구하는 문제로 귀결된다.

$$F(\vec{x}) = \vec{y} \quad (18)$$

여기서 벡터 y 와 x 는 $\vec{y} = (C^1, \dots, C^9)$ 이고 $\vec{x} = (\theta_{PBS}, \alpha, \theta_{\epsilon_1}^T, \theta_{\epsilon_2}^T, \theta_{\epsilon_1}^R, \theta_{\epsilon_2}^R)$

$\theta_{e2}^R, m_{22}, m_{33}, m_{44}$)이다.

이러한 비선형 방정식의 해는 주어진 측정값(\vec{y})을 최적화시키는 설치오차(\vec{x})의 바예시안(Bayesian)분포에서 최대값(\vec{x})를 나타내는 것으로 그 값을 구할 수 있으며, 뉴턴-가우스-되먹임 방법에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{i+1} = x_i - [K^T S_e^{-1} K]^{-1} [K_i^T S_e^{-1} (y - F(x_i))] \quad (19)$$

여기서 K 는 $K_{ik} = dy_i/dx_k$ 를 의미하며, S_e 는 측정값 오차의 공분산 행렬을 의미하며, 본 연구에서는 광자계수기로 얻은 광자수의 포아송(Poisson) 분포 특성을 이용하여 그 오차를 얻었다.

Figure 2는 구축된 9 채널 라이다 신호에서 얻은 9 가지의 라이다 신호에서 중에서 일부분의 신호 즉 송수신 파장판의 조합이 각각 $(1/4\lambda, 1/2\lambda)$, $(1/4\lambda, 1/4\lambda)$, $(1/2\lambda, 1/2\lambda)$ 그리고 파장판이 설치되지 않은 $(0, 0)$ 상태에서 얻은 비편광도를 고도별로 나타낸 것이다. Figure 2에 내삽된 그래프는 구름에 의하여 산란된 라이다 신호를 이용하여 얻은 소광계수 값을 고도별로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 약 6 km부터 권운이 있으며 운정은 9 km 정도에 있다는 것을 알 수 있다. 각각의 파장판 조합에서 얻어지는 신호는 다른 비편광도를 보이고 있음을 알 수 있으며, 충분한 SNR 값을 가지고 있음을 알 수 있고, 구름과 구름이 없는 일반 에어로졸에서는 얻어지는 비편광도가 크게 차이가 난다는 것을 볼 수 있다. 이러한 정보가 식 (17)을 이용하여 NBSPM를 구하는데 사용된다.

Figure 3은 2014년 5월 3일 오후 23시부터 5월4 일 05시까지 얻은 라이다 신호에 Klett의 알고리즘을 적용하여 얻은 소광계수를 보여준다. 그림의 y축은 총 333개의 데이터를 나타낸 것이며, 하나의 고도별 프로파일은 얻는데 1 분이 소요된다. 그래프에서 x 축은 고도를 나타낸 것으로 값 1은 60m를 나타낸다. 그러므로 200은 고도 12 km을 의미한다. y 축은 시간의 흐름을 나타내고 있기 때문에 총 5시간 30분의 정

보를 가지고 있다. 고도별 NBSPM를 얻기 위해서 총 9 개의 데이터가 필요하므로 333개의 데이터는 37개의 NBSPM 데이터 프로파일을 얻을 수 있다. 구름은 약 6-9 km 영역에 존재하여, 얼음 구름 상태일 것으로 생각되며, 구름은 시간에 따라 고도를 달리하고 있음을 볼 수 있다. Figure 3의 계산된 소광계수를 식 16에 적용하여 NBSPM 계산에 사용하면 구름이 있는 부분과 그렇지 않은 에어로졸만 있는 부분으로 나누어 계산이 가능하다.

Figure 4는 식 (19)를 이용하여 얻은 체계적 설치 오차와 NBSPM 의 두 행렬 요소를 나타낸 것이다. 계산에 사용된 라이다 신호는 2014년 5 월 3일 오후 23시부터 5월4 일 05 시까지 받은 것으로 권운 구름이 존재하는 날짜를 택하였다. 그림에서 위쪽 내삽 그래프는 Fig. 3을 다시 그린 것이고, 그래프의 사각형부분은 계산에 사용한 데이터 영역을 표시한

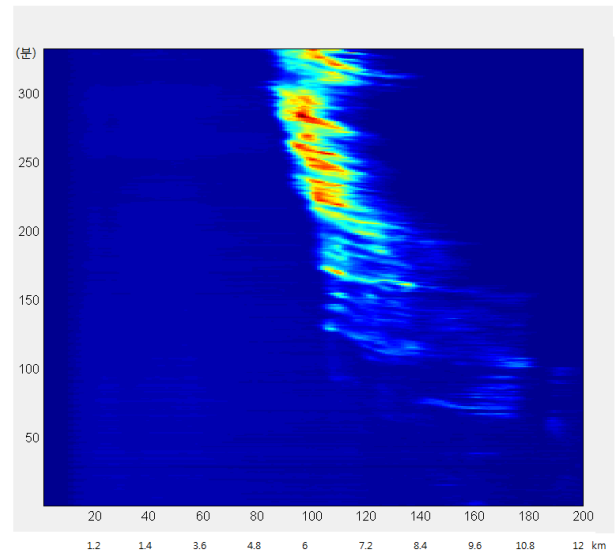


FIG. 3. Extinction coefficient distribution measured from May 3 to May 4, 2014.

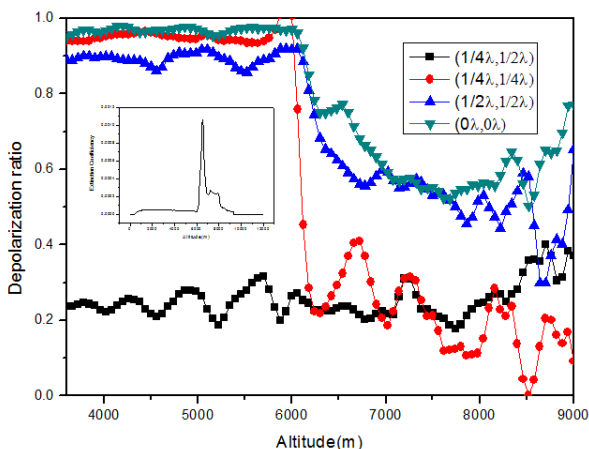


FIG. 2. Depolarization ratio in the cirrus cloud and aerosol with different wave plate combination.

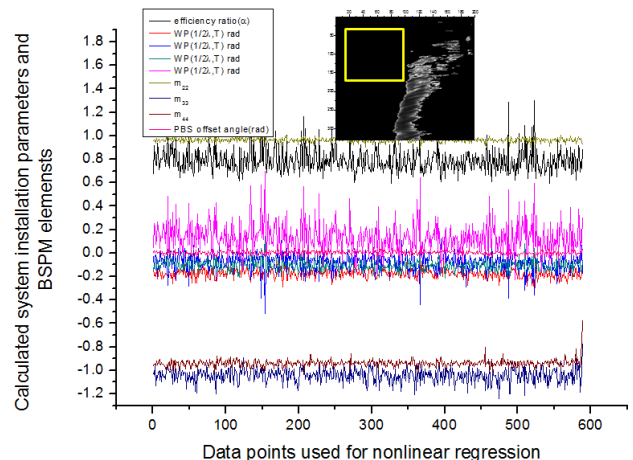


FIG. 4. Variation of system parameters calculated from different time and altitude lidar signals.

TABLE 1. Calculated system parameters using two channel polarization spherical aerosol lidar signals

System parameters	Mean	Unit	Standard Deviation
Detector sensitivity ratio	0.79389	x	0.09547
Transmitting optics error($\lambda/2$ Wp)	-0.17071	rad	0.03881
Transmitting optics error($\lambda/4$ Wp)	-0.06775	rad	0.06865
Receiving optics error($\lambda/2$ Wp)	-0.10048	rad	0.04266
Receiving optics error($\lambda/4$ Wp)	0.14478	rad	0.11341
Element of BSPM (m_{22})	0.96481	x	0.01543
Element of BSPM (m_{33})	-1.03902	x	0.05445
Element of BSPM (m_{44})	-0.94096	x	0.02799
Receivng optics PBS	0.00382	rad	0.01562

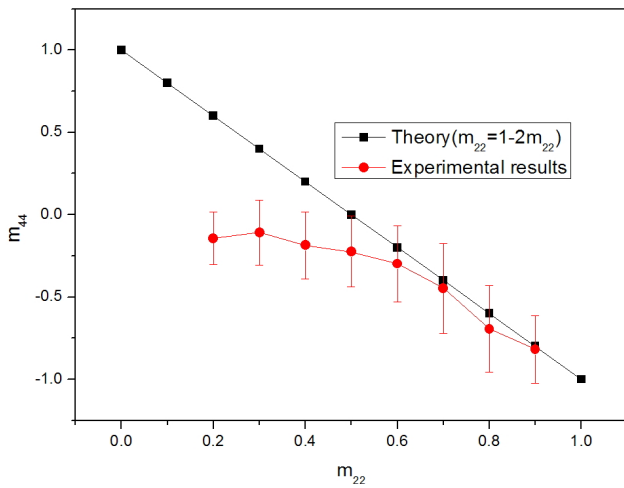


FIG. 5. Theoretical and experimental relation between m_{22} and m_{44} .

것으로 구름이 없는 지역이며 구체적인 고도는 4.2 km에서 6 km 이하 영역의 에어로졸을 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 설치 오차는 일정한 값을 중심으로 요동하고 있으나, 일정한 값으로 이동(shift)된 값을 나타내고 있다. 계산 결과는 Table 1에 나타내었다.

Figure 5는 Table 1의 설치오차를 이용하여 식 (17)에 적용한 후 구름과 에어로졸 모두를 포함하는 영역(Fig. 2의 모든 영역)에서 구한 NBSPM 값의 주요 두 행렬 요소 m_{22} 와 m_{44} 의 관계를 나타낸 것이다. 비구형 얼음 구름이 무질서하게 분포하고 있고, 구형(spherical shape)의 에어로졸대기의 경우 두 행렬요소는 그림에서 제시한 이론적 값과 같은 관계를 만족하여야 한다. 그러나 그림에서 m_{22} 가 1에 가까운 값에서는(구형의 에어로졸) 이론적 계산과 일치하고 있으나, 비구형의 입자에 의하여 산란된 신호(m_{22} 가 1 보다 더 크게 작은 영역) 즉 권운과 같이 비구형의 입자로 구성된 입자에 의해서 얻은 m_{22} 값에서는 그렇지 않음을 보여 준다. 그러므로 권운의 경우 선형 편광라이다로 얻을 수 있는 m_{22} 값으로 원형 편광라이다로 얻을 수 있는 m_{44} 값을 유추할 수 없다는 결론에 이른다. 이러한 이유는 비구형의 입자가 특성방향으로 정렬되어 있을 수 있기 때문인 것으로 NBSPM의 행렬 요

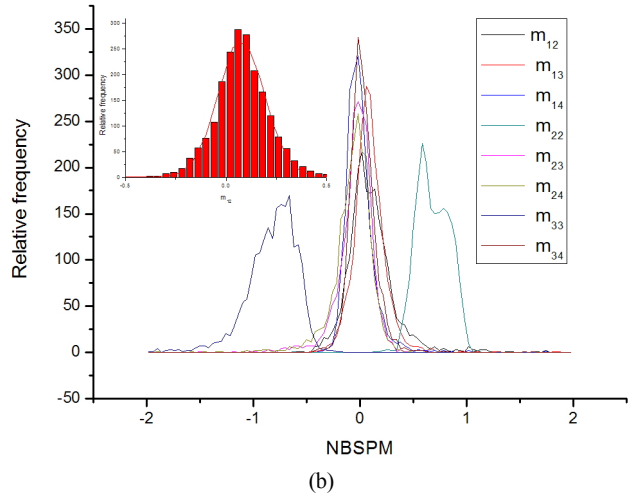
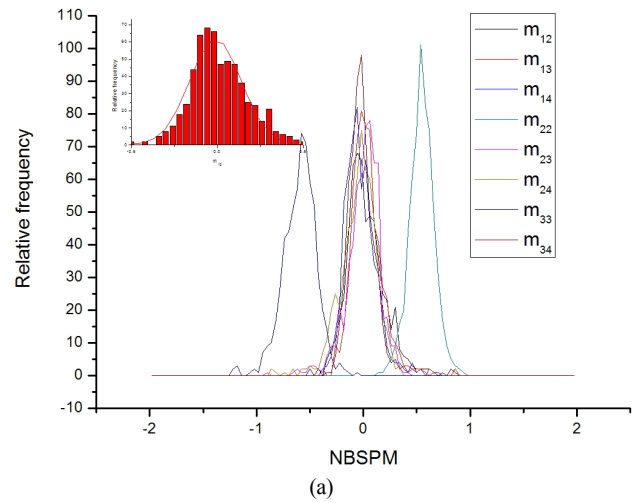


FIG. 6. Relative frequency of NBSPM element m_{12} measured on May 3(a) and June 2(b), 2014.

소 모두를 구하여만 그 비교가 가능하다는 것을 보여 준다. 모든 경우에 있어서 비구형의 입자가 방향성을 지닌 상태로 분포한다고 할 수 없기 때문에 다른 날, 즉 다른 대기환경에서 어떤 방향성을 지니는지 알아보았다. 다른 날 얻은 라이다 신호를 이용하여 비구형 방향성을 결정하는 행렬 요

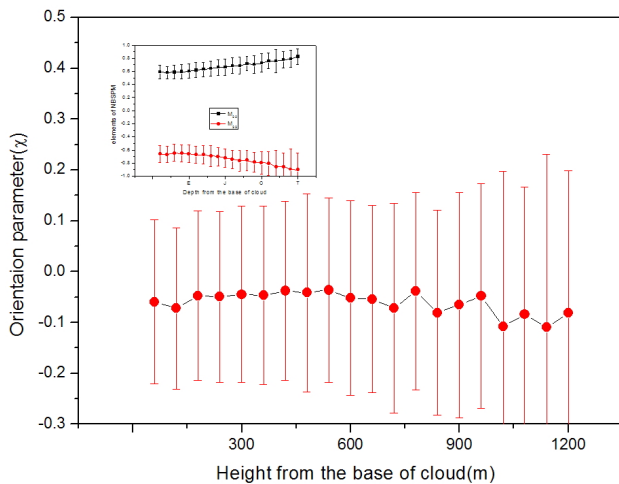


FIG. 7. Orientation index profile from the base of the cirrus cloud measured on June 2, 2014.

소인 m_{12} 값을 상호 비교하였다. Figure 6은 서로 다른 날(a) : 2014년 5월 3일, (b) : 2014년 6월 2일) 얻은 권운에서 산란된 라이다 신호만으로 구한 NBSPM 각 요소들의 통계적 분포를 보여준다. 그 중에서 방향성과 밀접한 관계가 있는 m_{12} 값의 분포 특성을 그림 내부에 더 상세히 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 5월 3일에 얻은 구름의 경우 m_{12} 의 분포가 -0.00634 을 중심으로 가우시안 분포를 하고 있어 0에 가까운 값을 보이고 있으나, 6월 2일의 경우엔 0.076 을 중심으로 가우시안 분포를 하며, 오차를 고려하더라도 0이 아님을 알 수 있다. 즉 6월 2일의 경우 구름을 구성하고 있는 얼음 알갱이가 특정 방향으로 정렬되어 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 정성적인 판단은 NBSPM의 다른 비대각선 행렬 값을 이용하여 판단하여도 마찬가지로 결과를 가져온다.

Figure 7은 식 (11)의 방향성 지수(χ)를 구름 깊이별로 나타낸 것이다. x축은 구름이 시작하는 고도부터 구름 안쪽으로의 고도를 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있듯이 구름의 깊이에 따라 방향성 지수는 크게 변하지 않고 일정함을 알 수 있다. 0에서 큰 값일수록 더 큰 방향성을 지닌 것을 의미하기 때문에 측정된 권운의 경우 약하게 방향성을 지닌 것으로 생각되며, 같은 권운이더라도 다른 날 측정된 권운의 방향성 지수는 이보다 작은 값으로 계산되는 경우도 있었다. 방향성 지수는 대기의 바람장이나 얼음 알갱이의 형상에 따라 변하기 때문에 장기간의 측정으로 통계적 분석이 필요할 것으로 판단된다. 그림에서 사각형 안의 작은 그래프는 NBSPM 값 중에서 방향성 지수를 계산하는데 사용된 m_{22} 와 m_{33} 값의 변동성을 나타낸 것이다.

V. 결 론

송신단과 수신단에 각각 3개의 다른 편광 상태를 송·수신할 수 있는 타원편광 라이다 시스템을 구축하여 후방산란을 일으키는 입자의 NBSPM 특성에 대하여 연구하였다. 이를

위하여 먼저 설치된 광학계의 오차를 비선형 회귀분석법으로 보정하고 이로부터 미지의 얼음 구름과 에어로졸에서 NBSPM 값을 구하였다.

그 결과 얼음 구름이 없는 일반 에어로졸 상태에서는 얻어진 NBSPM 값의 비 대각선 행렬 값 들은 거의 0에 가까운 값을 보여주고 있으나, 얼음 구름에서는 비대각행렬 요소들이 경우에 따라 의미 있는 오차 범위 내에서 0과 다른 값을 보여주고 있음을 알 수 있었다. 즉 얼음 구름의 일정 부분은 부분적으로 방향성을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 양을 정량화 할 수 있는 인자를 이용하여 그 값을 정량적으로 구할 수 있었다. 특히 NBSPM의 비 대각선 성분 중 m_{12} 성분이 0이 아니기 때문에 일반 선형적 편광라이다와 원형 편광라이다의 경우 직접적인 비교가 불가능한 것으로 판단된다.

즉 대각선 방향을 제외한 NBSPM의 각 항들이 라이다 시스템의 방향에 따라 변화할 수 있음을 보여주며, 기존에 구축된 편광 라이다 장비를 활용함에 있어서 편광 현상의 정량적인 분석 및 비교를 위하여 대부분 선형 혹은 원형 편광을 이용하는 기존의 장치들은 한계가 있음을 보여 준다. 즉 각각의 라이다 시스템으로 얻은 비편광도는 시간적, 공간적으로 서로 비교 불가능을 알 수 있으며 앞으로 구축되는 장치들은 본 연구에서 실례로 보여준 예와 같이 최소 9개 이상의 편광상태를 이용할 수 있는 장치를 구축 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

NBSPM은 산란물질의 모양뿐만 아니라 다양한 정보를 가지고 있기 때문에 이러한 정보를 이용하고 활용하여 대기 물질의 상태를 파악하는 것은 에어로졸에 대한 직접적인 정보뿐만 아니라, 바람장과 같은 기상정보도 동시에 줄 수 있기 때문에 앞으로 이에 대한 다양한 이론 및 실험적 연구가 병행하게 추진할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-6170)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu, "Measurement of water cloud particle size with a dual-polarization pulsed bistatic lidar," *Optical Review* **8**, 476-479(2001).
2. H.-J. Lee, J. E. Kim, and Y. Chun, "Aerosol vertical distribution measured by LIDARs in Baengnyeongdo, Munsan, and Gunsan during 10-11 May 2010," *Atmosphere. Korean Meteorological Society* **23**, 519-526 (2013).
3. Y. M. Noh, K. Lee, D. Mueller, Y. J. Choi, K. R. Kim, H. Lee, and T. J. Choi, "Instantaneous monitoring of pollen distribution in the atmosphere by surface-based lidar," *Korean Journal of Remote Sensing* **28**, 1-9 (2012).
4. N. Sugimoto, T. Nishizawa, X. Liu, I. Matsui, A. Shimizu,

- Y. Zhang, Y. J. Kim, R. Li, and J. Liu, "Continuous observations of aerosol profiles with a two-wavelength mie-scattering lidar in Guangzhou in PRD2006," *J. Appl. Meteor. Climatol.* **48**, 1822-1830 (2008).
5. N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, and T. Endoh, "Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai," *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1901-1904 (2002).
 6. M. D. Guasta, E. Vallar, O. Riviere, F. Castagnoli, V. Venturi, and M. Morandi, "Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds," *Appl. Opt.* **45**, 4878-4887 (2006).
 7. B. V. Kaul, I. V. Samokhvalov, and S. N. Volkov, "Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar," *Appl. Opt.* **43**, 6620-6628 (2004).
 8. Y. Balin, B. Kaul, G. Kokhanenko, and D. Winker, "Application of circularly polarized laser radiation for sensing of crystal clouds," *Opt. Express* **17**, 6849-6859 (2009).
 9. G. Roy, X. Cao, and R. Bernier, "On linear and circular depolarization LIDAR signatures in remote sensing of bioaerosols: Experimental validation of the Mueller matrix for randomly oriented particles," *Opt. Eng.* **50**, 126001-10 (2011).
 10. D. Kim, H. D. Cheong, and B. Kim, "Systematic error correction in dual-rotating quarter-wave plate ellipsometry using overestimated optimization method," *Korean J. Opt. Photon.* **25**, 29-37 (2014).
 11. H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles* (Chapman & Hall, Ltd., London, UK, 1957), Chapter 5.
 12. S. Asano and M. Sato, "Light scattering by randomly oriented spheroidal particles," *Appl. Opt.* **19**, 962-974 (1980).
 13. M. I. Mishchenko and J. W. Hovenier, "Depolarization of light backscattered by randomly oriented nonspherical particles," *Opt. Lett.* **20**, 1356-1358 (1995).
 14. C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (Wiley, New York, 1983), Chapter 2.
 15. Y. S. Balin, B. V. Kaul, G. P. Kokhanenko, and I. E. Penner, "Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds," *Opt. Express* **19**, 6209-6214 (2011).
 16. A. Borovoi, Y. Balin, G. Kokhanenko, I. Penner, A. Konoshonkin, and N. Kustova, "Layers of quasi-horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds observed by a two-wavelength polarization lidar," *Opt. Express* **22**, 24566-24573 (2014).
 17. D. N. Romashov and R. F. Rakhimov, "Determination of the axially symmetric elongated particles orientation from data of polarization sounding," *Atmos. Oceanic Opt.* **6**, 515-518 (1993).
 18. B. V. Kaul, S. N. Volkov, and I. V. Samokhvalov, "Studies of ice crystal clouds through lidar measurements of backscattering matrices," *Atmos. Oceanic Opt.* **6**, 325-332 (2003).
 19. S. Spuler, B. Morley, and J. VanAndel, "Measuring backscatter phase matrices of oriented scatterers," *Opt. Express* **20**, 29553-29567 (2012).
 20. J. D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns," *Appl. Opt.* **20**, 211-220 (1981).
 21. F. G. Fernald, "Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments," *Appl. Opt.* **23**, 652-653 (1984).