

文章编号:1001-9014(2005)06-0441-04

## 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探

赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 罗杨洁

(东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

**摘要:**在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,地表或大气中的目标地物将产生与它们自身性质有关的偏振特性。因此,地物的偏振信息探测成为遥感目标识别的新手段。偏振反射是伴随着目标的二向性反射而产生的,在探测目标地物的二向性反射的同时,可以通过偏振器获得目标地物偏振态的三维空间分布。本文从多角度偏振遥感机理的角度出发,研究了偏振化二向性反射与二向性反射之间存在的定量关系,并从实验上验证了二向反射、 $45^\circ$ 偏振、偏振均值三者在此空间中的相应方位角、天顶角、探测角以及通道上的反射比均相等。

**关键词:**偏振反射;二向性反射;多角度;定量遥感

**中图分类号:**TP72 **文献标识码:**A

## STUDY ON QUANTITATIVE RELATION BETWEEN MULTI-ANGLE POLARIZED REFLECTANCE AND BIDIRECTIONAL REFLECTANCE

ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li, LUO Yang-Jie

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** In the process of reflecting, scattering and transmitting electromagnetic wave, earth targets can produce polarized characteristics which related to the nature themselves, therefore, detecting the objects' polarization information becomes a new method in remote sensing. Since polarized reflectance always goes with bidirectional reflectance, the polarized three-dimensional spatial distribution of the targets can be obtained by a polarimeter during detecting its bidirectional reflectance. From the point of view of multi-angle polarized remote sensing mechanism, the quantitative relation between polarized BRDF and BRDF was studied. And the experiment testified the equality of the reflectance of bidirectional reflect, polarized reflect of  $45^\circ$  degree and polarized reflect of mean value in the corresponding azimuth angle, zenith angle, and detection angle and detection channels in  $2\pi$  space.

**Key words:** polarized reflectance; bidirectional reflectance; multi-angle; quantitative remote sensing

### 引言

在利用多波段、多时相、高光谱的遥感数据来提高遥感对地物识别能力的同时,人们注意到角度信息在遥感图像识别和分类中所起的影响和贡献,即地物在 $2\pi$ 空间上的三维光谱特征。早期的遥感主要采取垂直收集对地观测数据,以获得地面的二维信息,遥感解译的主要依据是根据不同的地物具有不同的吸收、反射和发射电磁波的能力,来分辨地球表层的地物分布,并假定目标地物的反射光谱在 $2\pi$ 空间内分布是一致的,即所谓的朗伯体,实践证明,这种假定引发的结论与实际相差较大,不尽合理。随

着遥感应用的深入研究,人们逐渐意识到目标的三维信息的重要性,因此20世纪70年代末,美国科学家 G. Suits, N. S. Goel, A. H. Strahler 以及中国的李小文等对二向性反射做了分布函数(BRDF)的研究,以期实现对目标地物的空间分布结构的反演<sup>[1-3]</sup>。

然而在来自目标地物的辐射中,除了光通量、方向、相位外,还有一个重要的物理参量即物质的偏振性尚未得到足够的重视和充分的利用。光是电磁波,而且是横波,因此光具有偏振性。自然界存在各种各样的反射起偏器,如水体表面、冰雪、沙漠、云等,经反射后的光具有一定程度的偏振性,太阳光入射到

收稿日期:2004-11-10,修回日期:2005-05-10

Received date: 2004-11-10, revised date: 2005-05-10

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-338-1)和国家自然科学基金(49771057)资助项目

作者简介:赵云升(1948-),男,吉林德惠人,教授,现主要从事遥感基础理论及偏振光遥感研究。

大气层,产生散射,这种散射光也具有一定程度的偏振性.太阳光或经过大气层的天空光照射到地物,被地物反射、折射或散射的电磁辐射也都会变成具有一定偏振态的光波,它们的特性主要表现为:在垂直于光线的那个平面上,光在各个方向上能量分布不均匀,会发生极化现象.地表或大气中的目标地物,在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,会表现出由它们自身性质决定的偏振特征.偏振光正为遥感目标识别提供新的手段<sup>[4-6]</sup>.美国曾多次进行航天飞机平台上的地对地偏振实验,证实了偏振信息在土壤植被分类、大气溶胶探测及海水表面状态研究方面所具有的优势性.偏振光是伴随目标的二向性反射而产生的,换言之,目标的偏振反射与二向性反射是一对孪生姊妹<sup>[7]</sup>.多角度偏振反射与二向性反射之间存在着许多共性,相互间有着非常明显的定量关系,并且从理论和实践都得到了证明.

## 1 偏振反射反算二向性反射机理

自然界绝大部分的物体均具有各向异性的反射特性.其反射率不仅与传感器的位置,而且还与天顶角的高度密切相关,一般称之为二向性反射,它可以用二向性反射分布函数(BRDF)来描述.在以下的讨论中,不加偏振片(无偏)时即为二向性反射.

多角度偏振遥感是利用地球表面和大气中的目标地物,在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,产生特征偏振信息,作为目标的遥感信息源.其理论依据是定量描述偏振信息的 Stokes 矢量法<sup>[8,9]</sup>.对于来自被探测目标的任一准单色平面波,其偏振状态可以用 4 个 Stokes 参数  $I, Q, U, V$  来表征.

$$S = \begin{bmatrix} I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} \\ Q = I_{90^\circ} - I_{0^\circ} \\ U = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ V = I_r - I_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $I$  为非偏振光强,  $Q, U$  分别代表两个方向上的线偏振光强,  $V$  代表圆偏振光强,  $I_0$  为光的总强度,  $I_{0^\circ}, I_{90^\circ}, I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}, I_r$  和  $I_l$  分别表示置放在光传播路径上一理想偏振片在  $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向上的线偏振光以及左旋( $l$ )和右旋( $r$ )圆偏振光强.

根据 Stokes 矢量,我们讨论非偏振光、线偏振光、部分偏振光、圆偏振光这 4 种偏振态在通过偏振遥感系统后的变化情况.

根据马吕斯定律,强度为  $I_0$  的线偏振光,通过检偏器后,透射光的强度(在不考虑吸收的情况下)为

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (2)$$

其中  $\alpha$  为检偏器的偏振化方向与入射偏振光的偏振化方向之间的夹角.即当检偏器以入射光为轴转动时,透射光强度将有变化.其 Stokes 矢量满足关系式  $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ .

马吕斯定律是对偏振光的无吸收而言的,对于非偏振光(自然光)并不成立.可以把非偏振光分解为两束等幅的、振动方向互相垂直的、不相干的线偏振光,即  $I_x = I_y = I_0/2$ ,这就是非偏振光的线偏振表示.其 Stokes 矢量有  $Q = U = V = 0$ .当非偏振光通过起偏器时,与偏振片的透光轴方向平行的线偏振光完全透过,而与偏振片的消光轴方向平行的线偏振光则不能透过.偏振片在这里实际上起着起偏器的作用.因此非偏振光经过偏振片后,它的光强是原来的一半,并且光矢量的振动方向与偏振片的透光轴方向一致.

圆偏振光是光矢量在波面内匀速转动(角速度为波的圆频率)而其大小不变,从而光矢量端点的轨迹为一个圆.按照垂直振动合成的理论,可沿任意一对相互垂直的方向将圆偏振光分解成振幅相等的两个偏振光,其中一个分量不能通过偏振器,另一个分量能通过它.则其通过线偏振器后强度变化与非偏振光的情况相同,光强为入射前的一半.其 Stokes 矢量有  $Q = U = 0$ .

光源的出射光为非偏振光,经地物一次反射后,如图 1 所示,根据菲涅耳公式,其反射存在偏振现象.这时地物实际上是起偏器,这里面存在两种情况:一种是到达传感器的光是非偏振光与偏振光的混合,为部分偏振光;另一种是反射光完全起偏,反射光全部为完全偏振光.

首先讨论反射光为部分偏振光的情况.设部分偏振光的总强度为  $I_0$ ,其中非偏振光成分的强度为  $I_n$ ,偏振光成分的强度为  $I_l$ ,则有  $I_0 = I_n + I_l$ ,这时在传感器前使用检偏器,就可以测定光束通过检偏器

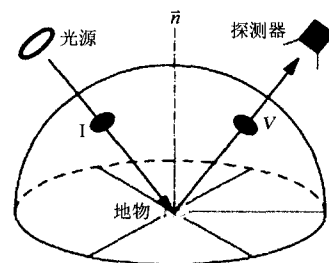


图 1 多角度偏振反射示意图

Fig. 1 Sketch map of polarized bidirectional reflectance

后的光强变化. 让光束垂直入射, 设转动检偏器与透光轴方向平行(透光方向)的光强为  $I_{90^\circ}$  和与透光轴方向垂直(消光方向)光强为  $I_0$ , 显然有

$$I_{90^\circ} = I_t + \frac{I_n}{2},$$

$$I_0 = \frac{I_n}{2},$$

故 
$$\frac{I_{90^\circ} + I_0}{2} = \frac{I_0}{2} \quad (3)$$

即透光方向与消光方向的光的强度的算术平均数(暂称为偏振均值)为入射前光强的一半.

通过检偏器后的非偏振光成分的强度变为原来的一半, 如果通过检偏器后的偏振光成分也为原来的一半, 我们就可以建立二向性反射光强与偏振化二向性反射光强之间的一个等量关系, 根据式(2), 当  $\alpha = \pm \pi/4$  时, 完全偏振光成分光强  $I' = I_0 \cos^2 \alpha = I_t/2$ . 故当  $\alpha = \pm \pi/4$  时, 部分偏振光通过起偏器的光强变为入射前的一半. 所以

$$S_{45^\circ} = \begin{bmatrix} I_{45^\circ} \\ Q_{45^\circ} \\ U_{45^\circ} \\ V_{45^\circ} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} S \quad (4)$$

$S_{45^\circ}$ 、 $I_{45^\circ}$ 、 $Q_{45^\circ}$ 、 $U_{45^\circ}$ 、 $V_{45^\circ}$  分别表示  $\alpha = \pm \pi/4$  时的 Stokes 矢量、非偏振光强、线偏振光强和圆偏振光强.

由于制造偏振片的材料自身对光有一定的吸收, 故这里用反射比来阐述. 只要探测器足够灵敏, 入射前与入射后的光强相差一半, 即二向性反射(无偏时)的反射强度是  $\alpha = \pm \pi/4$  时的反射强度的 2 倍, 相同条件下各自与白板的反射比理论上应该相等.

由式(3)我们可以知道, 偏振均值与入射偏振光的偏振化方向和透光轴之间的夹角为  $\pm \pi/4$  时的光强相等. 故

$$\frac{I_b}{I_b'} = \frac{I_{90^\circ} + I_0}{2I_{45^\circ}'} = \frac{I_{45^\circ}}{I_{45^\circ}'} \quad (5)$$

$I_b$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_0$ 、 $I_{\pm 45^\circ}$  分别为二向性反射(无偏)、 $90^\circ$  偏振、 $0^\circ$  偏振以及  $45^\circ$  偏振的光强,  $I_b'$ 、 $I_{45^\circ}'$  分别为无偏与  $45^\circ$  偏振时相应白板的反射光光强.

当反射光为完全偏振光时, 我们只考虑上述论述中偏振光部分的作用, 结论(5)显然同样成立.

## 2 实验验证

为了验证以上推论, 我们利用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的二向性反射光度计<sup>[10]</sup>,

分别测量了水体、植物单叶、土壤、岩石等多种地物偏振反射值, 现以银杏单叶为例来说明.

二向性反射光度计由光源、二向性反射光度计系统和控制系统组成. 光度计的方位角为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 有 A(630~690nm)、B(760~1100nm) 2 个波段; 以镍钨灯作为光源, 在  $0^\circ \sim 70^\circ$  范围内每隔  $10^\circ$  为一个光源入射方位; 探测架上设有 7 个探测头, 探测头的间隔为  $10^\circ$ , 其范围是  $0^\circ \sim 60^\circ$ ; 同时该设备还配有偏振镜头, 能够任意角度旋转, 测量时不配偏振镜头所测数据就是地物的二向性反射比. 把待测样本固定在载物台上测量其偏振数据, 每次测量完地物数据后紧接着测白板数据, 将二者的比值作为结果存入数据库. 以同样的方式变更入射角、波段与偏振角逐个测量样本.

图 2~图 6 所示的分别为银杏单叶在入射角为  $50^\circ$ 、B 波段(760~1100nm), 方位角为  $0^\circ \sim 360^\circ$  时 7 个通道的  $0^\circ$  偏振、 $90^\circ$  偏振、 $45^\circ$  偏振、二向性反射以及偏振均值的反射比波谱曲线, 横坐标为方位角,

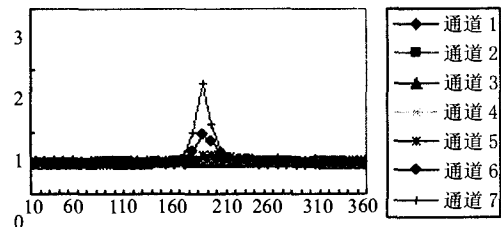


图 2  $0^\circ$  偏振波谱曲线  
Fig. 2 Spectrum curves of  $0^\circ$  polarimeter

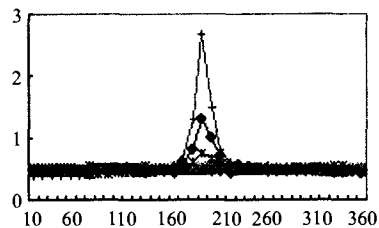


图 3  $90^\circ$  偏振波谱曲线  
Fig. 3 Spectrum curves of  $90^\circ$  polarimeter

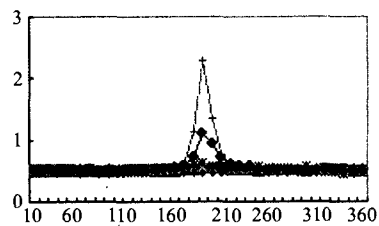


图 4  $45^\circ$  偏振波谱曲线  
Fig. 4 Spectrum curves of  $45^\circ$  polarimeter

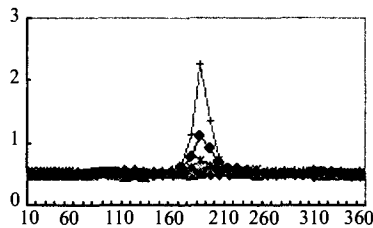


图5 二向性反射波谱曲线

Fig. 5 Spectrum curves of no polarimeter

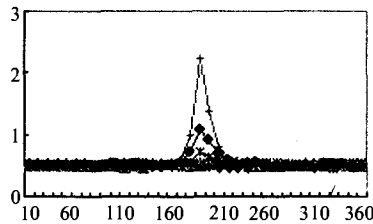


图6 偏振均值波谱曲线

Fig. 6 Spectrum curves of polarization mean value

纵坐标为偏振反射比。

从图2~图6可以看出,银杏单叶的偏振反射波谱在 $2\pi$ 空间表现出强烈的非朗伯体特性.其值与探测角有很大关系,对于探测角为 $0^\circ\sim 30^\circ$ ,其波谱特征基本不随方位角的变化而变化;但当探测角为 $40^\circ\sim 60^\circ$ 变化时,波谱曲线在 $160^\circ\sim 220^\circ$ 之间起峰,其峰值因探测角高度不同而不同.这表明当探测角较大时,银杏单叶的镜面反射作用增强,破坏了原有的朗伯体特性.图2~图6反映的为单一天顶角和波段的情况,对于其他天顶角和波段,也有相同的结果.从实验数据的分析结果看,二向反射比、 $45^\circ$ 偏振反射比、透振方向与消光方向光强的算术平均数的反射比三者的曲线无论从形态、各通道的位置顺序还是反射比强度都非常接近,与式(5)的结论完全吻合.

### 3 结语

综上所述,我们可以得出多角度偏振反射与二向性反射之间存在的等量关系,基本结论如下:

1. 入射偏振光的偏振化方向与透光轴之间的夹角为 $45^\circ$ 时,入射后的光强是入射前光强的一半;透光方向与消光方向的光的强度的算术平均数与入

射偏振光的偏振化方向和透光轴之间的夹角为 $45^\circ$ 时的光强相等;

2. 二向反射比, $45^\circ$ 偏振反射比,透光方向与消光方向光强的算术平均数的反射比三者在对应的方位角、天顶角、探测角以及通道上都相等.

上述结论实现了多角度偏振反射与二向反射之间的相互转化,可以提高现有遥感方法的定量精度,同时为地物的结构特征反演开拓了新思路.

### REFERENCES

- [1] Li Xiaowen, Strahler A H. Geometric optical modeling of a coniferous forest canopy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(5): 705—721.
- [2] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**, 977—998.
- [3] WANG Jun-Fa, GAO Xiao-Ping, CHEN Zhi-Fen, et al. Remote sensing in multi-angle and airborne imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汪骏发,高晓萍,陈志峰,等.多角度遥感及其航空成像仪.红外与毫米波学报), 2001, **20**(5): 329—334.
- [4] Kliger D S, Lewis J W, Randall C E. *Polarized Light in Optics and Spectroscopy* [M]. New York: Scademic Press, 1990.
- [5] SHAO Wei-Dong, WANG Pei-Gang, ZHENG Qing-Bo, et al. Polarimetric calibration airborne remote sensing polarimeters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵卫东,王培纲,郑亲波,等.机载偏振遥感仪的偏振定标.红外与毫米波学报), 2003, **22**(2): 137—140.
- [6] Bicheron P, Leroy M, Hautecoeur O. Enhanced discrimination of boreal forest covers using directional signatures measured by the airborne POLDER instrument [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D24) 29. 517—29. 518.
- [7] ZHAO Yun-Sheng, HUANG Fang, JIN Lun, et al. Study on polarization reflectance characteristics of plant simple leaf [J]. *Journal of Remote Sensing* (赵云升,黄方,金伦,等.植物单叶偏振反射特征研究.遥感学报), 2000, **5**(4): 2.
- [8] Berry H G, Livingston A E. Measurement of the Stokes parameters of light [J]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 172—178.
- [9] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1997: 1—98.
- [10] JinXi-Feng, Qiao De-Lin, Zhou Su-Xiang. ChangChun Institute of Fine Mechanics & Optics, Chinese Academy of Sciences [P]. Measurement device of three-dimensional space light distribution about lambertain Patent No. 96239489.0, Patent Data: March 4, 1998. (金锡峰,乔德林,周素香.中国科学院长春光学精密机械研究所.漫反射体三维空间光分布的测量装置.专利号:96239489.0, 专利授权公告日:1998年3月4日)