

地物的二向性反射和方向谱特征*

李小文

(中国科学院遥感应用研究所)

1987年12月28日收稿

摘 要

本文简要介绍了地物二向性反射的概念及其与地物三维空间结构之间的关系。本文建议在建立高分辨率地物波谱数据库的同时,开展不同类型地物 BRDF 模型的研究。否则耗资巨大的数据库仍不能有效地应用于结构千变万化的环境遥感。

关键词 二向性反射 二向性反射分布函数 方向谱 几何光学模型

目前遥感技术中用以识别地物的主要依据是地物具有不同的波谱特征。遥感技术发展的历史表明,仅仅凭借这一特征,还不能充分利用遥感图像所包含的信息,使对地物的识别和分类达到令人满意的精度。因为人们识别物体不仅凭其颜色(波谱特征),而且需要凭借其形状和结构。由于绝大多数地物具有三维空间结构,而遥感图像仅是其向二维空间的投影,问题很自然成为如何从遥感图像中提取三维空间的信息。人们从经验中知道,物体的阴影对于识别其三维结构有非常重要的作用,尤其是在不同的人照和观察方向上,从观察到的阴影变化可以推断出物体的三维结构特征。因此在遥感技术发展的早期,就提出了“多角度分辨力”的概念,与多光谱、多时相等并列为遥感技术的重要手段。然而在相当长一段时间内,多角度分辨力方面的研究未得到足够的重视。其主要原因是,(1)陆地卫星系列传感器均垂直向下观察;(2)除山脉、云朵等外,绝大多数地物的阴影小于一个像元,因此阴影仅影响像元的灰度而本身不可见;(3)对地物的二向性反射特点和原因缺乏了解。这种状况只是最近几年才开始转变。首先,为了更准确地作气象预报,对地物二向性反射的研究日益重视;其次,对波谱分辨力的研究即将有质的飞跃;人们不再满足用在实验室条件下测得的材料波谱特征来代替三维空间结构的地物波谱特征,最后,新一代航天遥感器(如 SPOT 和 SIR-B 等)已具有可变观测方向的功能,因之利用多方向观测来识别地物即将成为可能。所以国际上对地物二向性反射模型的研究日趋活跃;同时对多角度分辨力的重要性开始重新强调。我国的遥感工作者也注意到了这个问题。如长春光学精密机械研究所的禹秉熙进行了测定小麦和木本植物二向性反射的尝试;新疆生物土壤沙漠研究所的刘培君等提出了在白杨林二向性反射接近热点处进行郁闭度纠正的方案。不过,从总的说来,我们在这方面的研究,还远不能满足遥感技术发展的需要。本文拟从地物的二向性反射分布函数出发,说明地物的波谱特征包含其材料的波谱特征及其空间结构特征这两个要素。并讨论开展这方面研究的一些问题。

* 本文所作的研究,在1987年以前由 NASA 基金支持,1987年以后由我国自然科学基金支持,谨此致谢。

一、二向性反射分布函数 (BRDF)

大家都知道,一个理想的光滑表面对入射的光线呈镜面反射,即反射光与表面法线和入射光在同一平面内具表面法线与入射及反射光线的夹角相等。而理想的粗糙表面对任何方向的人射光都呈均匀漫反射。然而现实中地物的反射,远比这两种理想的反射复杂,既不容易理解,也难于表达。因此很长一段时间内在术语及定义方面存在着混乱现象。目前比较广泛被接受的 BRDF 的定义是 Nicodemus 于 1977 年给出的^[1]:

$$BRDF_{(i,r,\lambda)} = \frac{dL_r(Q_i, Q_r, \lambda)}{L_i(Q_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i} \quad (1)$$

在这个表达式中, L 表示辐射强度,下标 i 表示入射光方向;下标 r 表示反射光的方向; λ 是波长; Ω 是给定方向的一个立体角,其方向用极坐标的两个角来表示, θ 是垂直方向与该方向的夹角, ϕ 是该方向水平投影的方位角。这个定义的物理意义,简言之,就是从某一给定方向 i , 向地物表面一点入射的能量的微小增量与其所引起的向另一方向 r 反射的增量之间的比值。通过这样的定义 BRDF 只取决于地物本身和两个方向的变量,独立于入射光的空间分布函数。然而尽管如此,它仍然是五个变量的函数,即 λ , θ_i , θ_r , ϕ_i 和 ϕ_r 。

这一定义虽然因其优点而得到广泛承认,但在实际应用中也有其不便。首先,为了测定 BRDF, 必须测定 L_i 和 L_r , 其次, 这个定义基于地面某一点的反射。这二者对测量带来很多困难。因此,在实际测量中常采用另一方式,通常称为“方向反射比”(DRF),定义为在相同入照条件下地物向某一方向反射的强度与理想的漫反射体在该方向上反射强度之比。DRF 比较容易测定,但它依赖于入射光强的空间分布,所以很难用来作为地物本身的特征。很容易证明,当入照光的分布为 δ 函数时(即仅从某一方向照明), DRF 与 BRDF 仅相差一个常数。而 DRF 的定义方式比较适合于遥感器的传感方式,以有限面积的反射为基础,所以 BRDF 也可以定义为 DRF 的极限形式^[2]:

$$\therefore BRDF = \lim_{\Omega_i \rightarrow 0, \Omega_r \rightarrow 0} [1/\pi \cdot DRF] = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\int_A R(s) \langle s, i \rangle \langle s, r \rangle I(i, s) I(r, s) ds}{A \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \theta_r} \quad (2)$$

式中 A 是像元面积; ds 是 A 上反射入射光的小面积元,该面积元可以近似为漫反射表面,其反射系数为 $R(s)$, 其法线与 i, r 方向夹角的余弦分别为 $\langle s, i \rangle$ 和 $\langle s, r \rangle$; $I(i, s)$ 与 $I(r, s)$ 则为从 i, r 方向 ds 的可见度; 注意此处 $R(s)$ 为实验室测得的构成 ds 的材料之波谱特征,故为 λ 的函数。

二、BRDF 的数学模型

迄今为止,各种各样的 BRDF 模型用于不同的地物,如土壤、积雪、农作物、果树和森林等。从方法而论,大体可以分为三类:辐射传递模型,几何光学模型和计算机模拟模型。辐射传递模型比较适合于水平方向上均匀的三维空间结构,如农作物,草原,积雪等。

几何光学模型比较适合于空间关系复杂但以表面反射为主的地物,如土壤,森林,建筑物等。计算机模拟模型适合于解决多重散射等更难以求解的问题。通常这三类模型可混合起来使用。例如计算机模拟常以前两种模型为基础;几何光学模型在需要考虑体散射时常局部引入辐射传输模型;而后者在考虑体积分元的性质时常应用几何光学方法等。

这里以笔者与美国 Strahler 研究的针叶林几何光学模型为例,说明从地物的空间结构导出其 $BRDF$ 的基本方法。

为了简化问题,我们首先假定每棵针叶树是一个绿色的圆锥,其表面积元是漫反射体,其反射率 $R(s) = C$,圆锥完全不透明。这些圆锥放置于水平地面,地面亦为漫反射体,反射率为 $R(s) = G$ 。传感器从方向 r 观察时的视场 ($IFOV$) 称为一个像元,面积为 A ,圆锥的平均底半径为 R ,顶角为 2α ,单位面积上共有 λ 个这样的圆锥,其位置是随机的。

当入射光从方向 i 射入时,圆锥表面和地面上的小面积元可能被光线照射,也可能在阴影中。由于假定圆锥不透明,同时忽略多次散射,方程(2)中的 $I_i(s)$ 分别等于 1 或零。相似地,当传感器从方向 r 观察时,这些小面积元可能看得见,也可能被圆锥体阻挡,处于“视觉阴影”中,方程(2)中对应的 $I_r(s)$ 相当于置 1 或零。因此仅有 I_i 和 I_r 均为 1 的面积元才对传感器的响应有贡献:

$$BRDF = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\int_{A_{G11}} G \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\theta_r ds + \int_{A_{C11}} C \cdot \langle s, i \rangle \langle s, r \rangle ds}{A \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\theta_r} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{A_{G11}}{A} G + C \frac{1}{A} \int_{A_{C11}} \frac{\langle s, i \rangle}{\cos\theta_i} \cdot \frac{\langle s, r \rangle}{\cos\theta_r} ds \right] \quad (3)$$

式中 A_{G11} 是既被照到又被看到的地面面积; A_{C11} 是既被照到又被看到的锥面对应的水平面总面积。 $\frac{\langle s, i \rangle}{\cos\theta_i} \cdot ds$ 是 ds 沿 i 方向投影到地面的面积, $\frac{\langle s, r \rangle}{\cos\theta_r}$ 与此相似。

方程(3)很容易用计算机模拟实现,也不难用数理统计方法算出其平均值^[2]。这里只讨论(3)式可以得出的几个概念性结论。

由于 A_{G11} 和 A_{C11} 是照射到的面积和看得见的面积的交集,很明显,只有当 i 和 r 方向一致时,它们才能同时取得在给定任一方向时的最大值。

如果 ds 的方向分布在水平方向上各向同性(如在本例中),则 $BRDF$ 取得最大值时一定满足 $\phi_i = \phi_r$ 。如果 ds 的方向分布不仅在水平方向各向同性,而且其垂直方向的倾角分布也是均匀的,那末 $BRDF$ 取得最大值时的 r 方向,一定与 i 方向完全相同。在这种情况下, r 方向对 i 方向的任何偏离,只引起 A_{G11} 和 A_{C11} 的减小而不会引起被积项的任何增加。因此(3)式比较成功地解释了二向性反射中所谓的“热点”效应。

更重要的是,(3)式明确地告诉我们,地物的二向性反射特征不仅取决于其材料的波谱特征(G 与 C),而且取决于其结构—— A_{G11} 和 A_{C11} 随 i 和 r 的变化以及 ds 的空间分布状况。

虽然上述模型在解释热点及其附近变化时比较成功^[2],但在远离热点处,与实际测量值有较大出入。很明显,由于针叶林的树冠并非不透明的,其阴影中通常包含着大小不等的光斑。为了使模型进一步逼真,我们可以再将几何光学模型应用于树冠内部,求出其间

隙率。此时我们通常假定单位体积树冠内所包含的叶面积总数为常数,叶面方向分布函数为已知,叶的空间分布在树冠内随机,这样可以求出树冠平均间隙率的非常简单的表达式,为植被叶面积指数(LAI)的函数^[3]。除间隙率之外,我们也可以将单个树冠处理为体散射,计算其BRDF,其二向性反射是由树叶之间的相互遮蔽造成的。但从目前的结果来看,森林的BRDF主要还是由树冠与地面及树冠与树冠之间的相互遮蔽造成的,将树冠模拟为带间隙率(部分透明)的表面反射体,与实际的一致性已相当不错^[4]。

三、方向谱特征

综上所述,地物的二向性反射,取决于其材料的波谱特征和地物的结构特征。因此,从单个观测值,例如某一太阳角时遥感器垂直向下观测到的值,我们无法判定这二者中的任何一个,也不能推导出地物的半球反射率(除非我们已知其BRDF的形状)。

从气象预报的角度出发,有的作者建议今后的遥感器与垂直方向成一合适的倾角,使在该处的BRDF值接近于整个半球BRDF的平均值。但即使对粗略分类的几种主要地物类型来说,要找到普遍适用的这个倾角,恐怕都是很困难的。

从资源与环境遥感的角度出发,多数作者倾向于从多角度观测的BRDF值来反演地物的材料波谱特征和结构特征,以有助于识别和分类。但是BRDF是五个变量的函数($\lambda, \theta_s, \phi_s, \theta_r$ 和 ϕ_r),对这样的函数表达和识别是相当困难的,更不用说建立其与不同地物之间的对应关系了。因此人们试图找出BRDF的某种特定子集与地物结构的某些主要特征之间的关系。如果能建立这样的对应关系的话,我们可以称之为地物结构的方向谱。Gerstl^[5]首先提出了这一概念,并建议使 θ_r 为常数,仅以 ϕ_r, ϕ_s 为变量,测量地物的方向谱特征。 θ_r 的选择则使得测量值穿越BRDF的热点,通常即 $\theta_r = \theta_s$ 。这个建议有它的一些优点。首先,由于 θ_r 为常数,大气本身的BRDF近似为水平方向各向同性,因此避免了大气干扰的影响。其次,这种测量方式比较容易执行,遥感器的垂直方向倾角固定,仅作水平方向的旋转。但是,如前所述,如果地物结构有明显的方向性,其热点可能偏离太阳的方位角,因此,在某些情况下可能会误判,总的说来,这一方案是很有启发性的。目前虽然方向谱与地物结构的关系,还远未建立,但至少人们已经比较明确热点的宽度对应于地物的大小,例如针叶林热点远较农作物的热点宽,面向太阳的“冷点”则与地物的透光能力有关等。总之,BRDF中包含着大量的信息冗余,找出其中一个信息量最丰富的子集是有非常重要的实际意义的。

四、问题讨论

要开展地物二向性反射和方向谱的研究,有两方面的工作急待进行。一是积累地物二向性反射的测量数据,二是建立地物的二向性反射模型。这两方面的工作都是同等重要的,不可偏废。

在收集地物波谱特征方面,过去曾作了很多工作,积累了大量数据。然而由于当时精度要求有限,人们往往忽视了地物波谱特征包含材料波谱特征与结构特征这两个因素。

因此,当精度要求提高以后,人们不再知道收集到的波谱特征适用范围。随着成像光谱仪的到来,波段的划分将小至 10 毫微米,建立新的波谱数据库的工作看来势在必行。这里有必要强调这一点,即地物波谱特征数据库必须包含被测地物的结构特征。否则很有可能花费了巨大的人力物力而测得的大量数据,其应用对象却是含混的。这一点对于积累地物二向性反射的数据尤其重要。例如我们测试一棵树的二向性反射。在给定的波段,并假定树的反射在水平方位各向同性,其 $BRDF$ 仍为三个变量 θ_i , θ_r 和 $(\phi_r - \phi_i)$ 的函数。如果我们取 10 度为间隔,总的测量数据仍有 $8 \times 9 \times 19 + 1 = 1369$ 个 (θ 从零到 80 度, ϕ 从 0 到 180 度)。如果我们不同时测量这棵树的大小,形状和叶面积指数以及说明树下的地面特征,那末这一千多个数据仅适用于这棵树,而无法被应用到其它任何一棵树,这无疑是极大的浪费。又如岩石的二向性波谱特征,如果不指明其表面的粗糙程度,也是无法应用的,因为同一种材料的岩石,如果风化程度不同,其 $BRDF$ 可以相差达 50% 以上,而且有完全不同的模式。

那么,是不是应该积累大量的不同结构的地物二向性波谱数据呢? 很明显,这既不可能又无必要。如前所述,二向性波谱的数据量是极其巨大的,而地物结构更是千变万化。唯一的解决办法是积累有限数量的测试数据,建立地物结构与 $BRDF$ 之间的相互关系,并验证这些关系。只有当这些模型建立起来并用实测数据加以验证之后,我们才能有把握地将波谱数据库用来提高遥感技术对地物的识别分类能力。

目前国际上发表的 $BRDF$ 测量数据是非常有限的,而且质量不高。例如广泛使用的 Kriebel 和 Kimes 的数据,采样间隔大而且在大倾角时不满足互易原理。笔者与 Gerstl 倾向于将其解释为 IFOV 和大气的影晌,而有的则对互易原理的适用性表示怀疑。所以,只要我们积累有限数量的 $BRDF$ 测试数据及地物的结构特征,就能为遥感技术的进一步发展作出自己的贡献。

五、结 语

空间技术的迅速发展,要求遥感技术实现从定性到定量,从表面现象的描述到内在规律探求的过渡。地物的二向性反射模型或方向谱模型是实现这种过渡的重要一环。由于这方面的研究并不需耗费大量资金,我国的遥感工作者是可以大有作为的。

参 考 文 献

- [1] Nicodemus et al., Geometrical Considerations and nomenclature for reflectance, NBS Monograph 160, 1977.
- [2] Li Xiaowen and Strahler, Geometric-Optical modeling of a coniferous forest canopy, IEEE Trans. GARS, GE-23, No. 5, pp 705—721, 1985.
- [3] Li Xiaowen and Strahler, Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy, IEEE Trans. GARS. GE-26, No. 2, pp 161—170, 1988.
- [4] Li Xiaowen and Strahler, Geometric-Optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy, IEEE Trans. GARS, GE-24 No. 6, pp906—919, 1986.
- [5] Gerstl and Simmer, Radiation Physics and modeling for Off-Nadir satellite-sensing of Non-Lambertian Surface, Remote Sensing of Environment 20: 1—29,1986.

Bidirectional Reflectance and Angular Signature of Objects

Li Xiaowen

(*Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica*)

Abstract

This paper briefly introduces the concept of bidirectional reflectance and its relation to 3-D spatial structure of ground objects. It is suggested to develop appropriate *BRDF* models for various kinds of earth surface along with the process to set up a high spectral resolution data base for their signatures. Otherwise, it is pointed out, the costly data base can hardly deal with the great diversity of natural scene in composition and structure.

Key words Bidirectional reflectance *BRDF* Angular spectrum Geometric-optical model