

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0183-06

用多角度 POLDER 数据验证互易原理在遥感像元尺度的适用性

刘 强¹, 李小文^{2,3}, 王锦地²

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学 资源与环境科学系, 北京 100875; 3. 波士顿大学 遥感中心 美国波士顿)

摘 要: 利用 ADEOS-POLDER 多角度遥感数据, 从统计意义出发, 对光照与观测角度互易的观察对进行考察, 发现在 POLDER 数据中存在不可忽略的不互易现象, 以文中定义的不互易度来衡量, 可见光波段不互易度可达 1.0, 红外波段不互易度可达 0.3。两个方向上计算 NDVI 的偏差可达 0.2。分析了不互易度与 NDVI 和海拔的相关性, 发现不互易性与地表的复杂程度有一定的相关性, 并提出地物光谱反射弱的数据不互易度大的假设。

关键词: 互易原理; 二向反射; POLDER

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

赫姆霍兹的互易原理最初应用于光学系统^[1], 后来渐渐被推广到电磁波传播、反射、散射的各个过程。在遥感中所说的“源传互易”却与赫姆霍兹的互易原理有所区别。“源传互易”是指: 当光源和传感器互换位置时, 地表的二向反射率相同。我们认为“源传互易”忽略了电磁波的极化特征, 而且传感器视场具有一定尺度, 不满足于赫姆霍兹提出的“点”与“路径”的定义, 因此不能看作是赫姆霍兹互易原理的简单推广, 其成立的可能是需要验证的^[2,3]。本文的讨论仅限于遥感中的“源传互易”, 在下文中提到互易原理, 除非特殊说明, 都是指“源传互易”。

互易原理如果成立, 其对于遥感的重要意义, 一是在验证地表二向反射(BRDF)时多了一条衡量标准或限制条件, 二是当实验条件限制不能获取某些角度的数据时, 可能用互易原理插补数据。然而, 至今的遥感实践却未能有效地支持互易原理。一些被广泛引用的数据, 如 Kimes、Deering 的野外观测数据, 并不完全遵从互易原理^[4,5], 尤其是当角度差异大时, 出现相当程度的偏离^[6]。现有的 BRDF 模型中, 有的符合互易原理, 如 Canopol 和 Myneni 证明了他们的体散射模型满足互易原理, Hapke 的土壤的多次散射模型也是互易的; 另一些模型却不互易, 如

Walthall 的经验模型, Wanner 在核驱动模型反演中使用的 Li-Sparse 和 Li-Dense 核。

李小文等认为赫姆霍兹的互易原理不能简单地应用到具有一定三维结构且受尺度效应影响的遥感像元, 并指出 Siegel 和 Howell 的关于互易原理的热力学证明有误^[2,7]。Kriebel 和 Girolamo 等都根据自己的实测或模拟数据, 对观测到的互易的失效现象作了细致的分析^[8,9]。与此同时, 也有许多学者致力于把赫姆霍兹的互易原理推广到遥感领域。如 Snyder 严格定义了 BRDF, 试图理论证明在微观光路互易的条件下互易原理成立, 并根据互易原理的要求, 提出了测量 BRDF 需要满足的严格条件^[10]。Nilson 和 Kuusk 为 Walthall 的经验模型添加限制, 使之满足互易原理; Snyder 和 Wan 提供了经过修改的、互易的 Li-Sparse 和 Li-Dense 模型。

但是, “互易原理”究竟成立与否, 或者说, “在遥感中运用源传互易的方法需要满足什么条件”, 这仍然是学者们争论不休的问题。本文并未从理论上探讨这一问题, 而只是利用已有的近年来首次获取的多角度遥感数据, 客观地度量了数据中出现的不互易的程度, 并试图讨论这种不互易度与一些重要遥感受变量的相关性。

收稿日期: 1998-12-22; 修订日期: 1999-10-08

基金项目: 九五攀登计划项目(95-A-30)国家自然科学基金(4967105)Residual/ASD/ADEOS 国际合作研究项目资助。 <http://www.cnki.net>

作者简介: 刘 强(1974—), 男, 1997 年于北京大学数学系本科毕业, 现在中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位, 主要研究方向为多角度遥感模型的反演及其应用。

1 角度互易对的定义

对于同一点两次观测, 如果其角度关系满足下式, 则我们称之为一个角度互易对。

$$\begin{aligned} &|\theta_s^1 - \theta_s^2| < 0.5^\circ \text{ 且 } |\theta_v^1 - \theta_v^2| < 0.5^\circ \\ &\text{且 } |\varphi^1 - \varphi^2| < 1^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

其中, θ_s 、 θ_v 分别表示太阳天顶角和观测天顶角; 上标 i ($i=1, 2$) 用以区别对同一点的两次观测; φ 表示相对方位角, 规范化为 0° 到 180° 之间。需要说明的是: 由于数据的限制, 角度互易对的概念只考虑了相对方位角, 这有别于赫姆霍兹的互易条件, 在遥感应用中, 当对地表纹理取向没有先验知识时, 只考虑相对方位角的做法是很普遍的。

2 遥感数据中的不互易现象

2.1 数据描述

我们使用 ADEOS-POLDER level 2 的 Land Surface (Directional) Parameters 产品为基本数据。POLDER 传感器为法国研制的星载多角度多极化传感器, 搭载日本 ADEOS 卫星平台。该传感器采用广角镜 CCD 面阵成像, 其最大视场为 114° , 星下点分辨率 $6\text{km} \times 7\text{km}$, 利用视场重叠获取多角度数据, 每轨沿轨道方向可有 14 个角度的观测, 最大观测天顶角约 75° 。POLDER level 2 的产品是经过大气分子散射校正和气溶胶阈值校正的方向反射率, 大气校正使用 5S 算法, 共有 4 个波段, 波段中心大致位于 0.443、0.670、0.765、0.865 μm , 本文中称之为 1、2、3、4 波段, 相应的反射率用 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 表示。

我们取东经 $70^\circ - 120^\circ$ 北纬 $20^\circ - 30^\circ$ 的区域作为样区, 在 1996 年 10 月 30 日—11 月 18 日的数轨数据中, 以(1)式的角度关系为限制, 搜索角度互易的观测对。样区内 200,000 个遥感像元中, 共找到 508 个角度互易对。这 508 个角度互易对的天顶角变化范围是 $35.3^\circ - 50^\circ$, 太阳天顶角与观测天顶角的最大差别 4.8° 。

2.2 不互易程度的描述

对于角度互易对, 定义如下描述不互易程度的量

$$D_j = 2 \times \frac{|R_j^1 - R_j^2|}{R_j^1 + R_j^2} \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

这里, 下标 j 用于指示反射率及其不互易度的波段。 D_j 为两个方向反射率观测值的差除以它们的平均, 在本文中暂时把 D_j 称做“(第 j 波段的) 相对不互易度”或简称“不互易度”。

2.3 数据的不互易度

对于 508 个样本总体, 它们各波段的平均和最大不互易度为:

$$\begin{aligned} E(D_1) &= 0.2076 & \max(D_1) &= 1.2603 \\ E(D_2) &= 0.1046 & \max(D_2) &= 0.9461 \\ E(D_3) &= 0.0476 & \max(D_3) &= 0.3232 \\ E(D_4) &= 0.0446 & \max(D_4) &= 0.3140 \end{aligned}$$

其中 $E(\quad)$ 为平均值函数, $\max(\quad)$ 为最大值。取步长为 0.02 做各个波段不互易度的直方图(图 1)。从图中看, 蓝光波段不互易度大, 半数以上的角度互易对不互易度超过 20%。随波长的增加, 不互易性减小。若认为不互易度小于 10% 就基本互易, 则近红外波段多数角度互易对具有较好的互易性(D_3 、 D_4 均小于 10% 的数据对共有 445 对)。但即使在红外波段, 也有许多不互易度超过 20% 的角度互易对(第 3 波段 8 对, 第 4 波段 5 对)。

2.4 波段间的相关性

为讨论不同波段之间不互易度的相关性, 定义:

$$A_{ij} = \frac{\text{Cov}(D_i, D_j)}{\sqrt{\text{Var}(D_i) \times \text{Var}(D_j)}} \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中 $\text{Cov}(\quad)$ 表示协方差函数, $\text{Var}(\quad)$ 表示方差函数, A_{ij} 为第 i 、 j 波段的相关系数。做出相关系数矩阵(表 1)。从表 1 可看出两个红外波段不互易度间的相关性最强, 两个可见光波段间的相关性也很强, 可见光和红外波段间的相关性较弱。总体上, 各个波段间不互易度呈明显的正相关, 这从一定意义上说明数据受仪器不稳定因素影响小。

2.5 典型不互易对的分析

称不互易度在各个波段都大的角度互易对为“典型不互易对”。因为各个波段间不互易度有较大的正相关, 这样的定义是合理的。若取 $D_j > 0.15$, $j = 1, 2, 3, 4$ 为判断“典型不互易对”的标准, 则在这 508 对数据中可找到 10 个典型不互易对(表 2)。

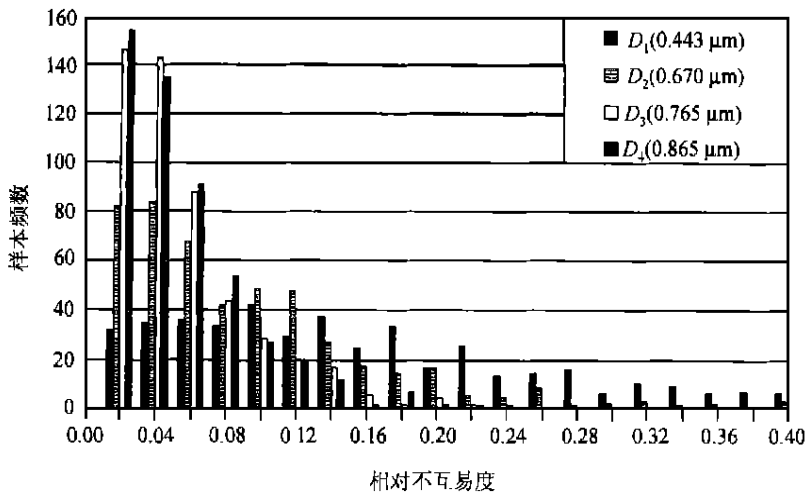


图 1 各波段频数与相对不互易度的直方图

Fig. 1 Frequency and non-reciprocity map for the four bands of POLDER

表 1 不同波段间不互易度的相关系数矩阵

Table 1 Correlation-coefficient matrix for $D_j (j=1, 2, 3, 4)$. D_j defined as the measurement of non-reciprocity in band j of

POLDER sensor				
A_{ij}	D_1	D_2	D_3	D_4
D_1	1	0.7206	0.4638	0.3615
D_2	0.7206	1	0.4306	0.3308
D_3	0.4638	0.4306	1	0.9330
D_4	0.3615	0.3308	0.9330	1

表 2 中第 3、4、5 个角度互易对为地理上的相邻点,地理坐标大约在东经 87.2° , 北纬 29.6° , 该点位

于西藏雄巴县西 10 km, 海拔 5663 m, 在 1:200,000 地形图上标注该点地形为“石块地”。第 9、10 两点也相邻,地理坐标大约在东经 95.9° , 北纬 20.7° , 该处位于缅甸阿拉干山脉东麓。从表中看,无论是高海拔、低 $NDVI$, 还是低海拔、高 $NDVI$, 都有不互易度大的点。而且,表中不互易点的分布暗示:一定的地理区域(或地表类型)可能有本质的不互易性。

我们给出了 10 个典型不互易对,并不意味着我们考虑的整个区域内仅有这么几个不互易的点。由于我们掌握的多角度数据有限,从中选出的角度互易对更少,这使得我们无法全面考察区域内每一点的互易性。

表 2 10 个典型不互易对 ($NDVI$ 的计算见(5)式)

Table 2 Several representative pairs of non-reciprocity

	行坐标	列坐标	海拔	$NDVI$	D_1	D_2	D_3	D_4
1	1101	4503	126 m	0.4385	0.6260	0.3562	0.1752	0.1604
2	1155	4472	128 m	0.2386	0.3217	0.1818	0.2313	0.1765
3	1087	4603	5472 m	0.0980	0.5429	0.2341	0.2209	0.1978
4	1087	4604	5663 m	0.0238	0.6415	0.2927	0.3090	0.3140
5	1088	4605	5591 m	0.0563	0.4118	0.1846	0.1908	0.1718
6	1093	4531	3973 m	0.4895	0.7119	0.3059	0.2095	0.1613
7	1102	4632	4986 m	0.0876	0.2018	0.2009	0.2047	0.2125
8	1130	5122	382 m	0.4266	0.9841	0.6190	0.2632	0.2297
9	1248	4854	216 m	0.3994	0.9333	0.4744	0.1969	0.1637
10	1248	4855	195 m	0.4452	1.0704	0.5436	0.2403	0.1969

3 不互易性与其它地学参数的关系

3.1 不互易性对计算 NDVI 的影响

许多重要的植被指数的计算都受到观测角度的影响,例如 NDVI(用符号 I 表示),若只用单次观测计算 NDVI,令:

$$I_1 = \frac{R_4^1 - R_2^1}{R_4^1 + R_2^1}, I_2 = \frac{R_4^2 - R_2^2}{R_4^2 + R_2^2} \quad (4)$$

则由于数据中存在不互易现象,508 个角度互易对中, I_1 与 I_2 的差别最大可达 0.2950,平均差别为 0.0366。

作为参考的标准,先用两次观测的反射率取平均,再用平均反射率计算 NDVI,即令:

$$NDVI = I_{ref} = \frac{(R_4^1 + R_4^2) - (R_2^1 + R_2^2)}{(R_4^1 + R_4^2) + (R_2^1 + R_2^2)} \quad (5)$$

本文中所述的 NDVI,除非特殊说明,都是以 I_{ref} 参考数值。

3.2 NDVI 与不互易度的相关

为讨论不互易性和 NDVI 间的相关性,定义相关系数:

$$f(NDVI, D_j) = \frac{Cov(NDVI, D_j)}{\sqrt{Var(NDVI) \times Var(D_j)}} \quad (6)$$

计算各波段的不互易度与 NDVI 的相关系数(表 3)。从表 3 看,在可见光波段不互易度与 NDVI 呈比较显著的正相关。

进一步,我们把这些角度互易对按 NDVI 分类,取 $NDVI=0.1, 0.3, 0.5$ 为阈值,计算各 NDVI 区间各波段的平均不互易度(表 4)。从表 4 中可以看出:当 $NDVI>0.5$ 时,可见光波段的不互易度异常增高;当 $NDVI<0.1$ 时,近红外波段的不互易度异常增高。

3.3 海拔高度与不互易度的相关

接下来,我们讨论互易性和海拔高度(符号 h)间的相关性,相关系数的定义参照(6)式。各波段的不互易度与海拔的相关系数也列于表 3。从表中看,在近红外波段不互易度与海拔的相关性比较显著。

类似于 NDVI,我们也把这些角度互易对按海拔分类,取海拔 $h=600\text{ m}, 4000\text{ m}$ 为阈值,计算了 3 种海拔高度的各波段的平均不互易度(表 5)。从表 5 中看,高海拔地区近红外波段的不互易度有异常增

高。

表 3 各波段不互易度与 NDVI、不互易度与海拔的相关系数

波长/ μm	0.443	0.670	0.765	0.865
$f(NDVI, D_j)$	0.3106	0.3420	-0.0149	-0.0866
$f(h, D_j)$	-0.0298	0.0460	0.2210	0.2822

表 4 以 NDVI 为指标,四种覆盖状况的平均不互易度
Table 4 Average non-reciprocity for the different vegetation coverage

	样本数	$E(D_1)$	$E(D_2)$	$E(D_3)$	$E(D_4)$
全体	508	0.2076	0.1046	0.0476	0.0446
$NDVI<0.1$	20	0.1573	0.0936	0.0977	0.1037
$0.1<NDVI<0.3$	139	0.1516	0.0640	0.0422	0.0410
$0.3<NDVI<0.5$	254	0.1905	0.0923	0.0444	0.0413
$NDVI>0.5$	104	0.3324	0.1902	0.0526	0.0457

表 5 三种海拔高度(altitude)的平均不互易度

Table 5 Average non-reciprocity for the three altitude ranges

	样本数	$E(D_1)$	$E(D_2)$	$E(D_3)$	$E(D_4)$
全体	508	0.2076	0.1046	0.0476	0.0446
$h<600$	432	0.2012	0.0961	0.0440	0.0410
$600<h<4000$	44	0.3149	0.1969	0.0552	0.0471
$h>4000$	32	0.1468	0.0930	0.0851	0.0904

4 结论和讨论

通过对 POLDER 传感器获取的多角度数据的考察与统计,可以得到以下结论:

(1) 源传不互易现象在多角度遥感数据中存在,若以 D_j 来量度不互易性,则 D_j 在可见光波段可达到 1 的量级,近红外波段可达到 0.3 的量级,且各个波段间的不互易现象是正相关的。

(2) 不互易现象不是随机存在,而是有规律性的,规律性表现在:空间分布的聚集性,与其它地学参数的相关性。

(3) 从现有的数据中看,地物光谱反射弱的数值不互易度较大;一般来说,有植被覆盖的地表近红外波段反射率高于可见光波段,于是近红外波段的平均不互易度小于可见光波段;在不互易度与 NDVI

的关系中(表4),当 $NDVI$ 大时,可见光波段反射弱、不互易度大, $NDVI$ 小时,红外波段反射弱、不互易度大。

在我们的工作中还有许多地方需要继续研究,下面是一些初步的探讨:

(1) 数据的分辨率: POLDER 产品的分辨率低($6\text{ km}\times 7\text{ km}$),是我们的遗憾,但 POLDER 数据是目前能获得的最多角度卫星遥感数据,有丰富的角度、光谱和极化信息,是多角度遥感的理想数据之一。另一方面,由于我们要讨论的不是数学或物理上一点的互易原理,而是受尺度效应影响的遥感像元的互易性,因而我们现有数据的分辨率恰好适合这一目标。

(2) 大气影响:由于我们使用的数据是经过 5S 大气校正和辐射校正的方向反射率,作为保守的估计互易原理的不适用范围,可先不把大气影响作为引起不互易的主要原因。另一方面,当我们试图解释不互易现象的产生机理时,则必须考虑到大气干扰在其中起到的复杂影响。如:蓝光波段的不互易

程度非常大且与其它波段间相关性小,这就应该怀疑蓝光波段受大气扰动影响大。关于更精细的多角度大气校正和辐射校正,还待我们下一步的工作来完成。

(3) 不互易性与两次观测间隔时间的关系:角度互易对中的两个观测一般分别来自 ADEOS 卫星的两轨,这两轨之间的时间间隔为数小时至数天,这期间地表和大气状况的改变,也许与我们观测到的不互易现象有关。由于数据已经过大气订正,可认为大气状况的改变不是不互易现象的主要原因。若假设在这数天中地面的改变引起不互易,则不互易度必然与两次观测的时间间隔相关。但是,在第4波段不互易度与时间间隔的关系图(图2)中,可以看到,无论时间间隔长(7-8天)还是时间间隔短(1-2天)的观测对,都会出现不互易的情况。其它波段的情形基本与第4波段相同。总的说,各波段的不互易度与时间间隔相关度很小,不互易性独立于时间间隔。因此判断发现的不互易现象不是由观测的时间间隔引起。

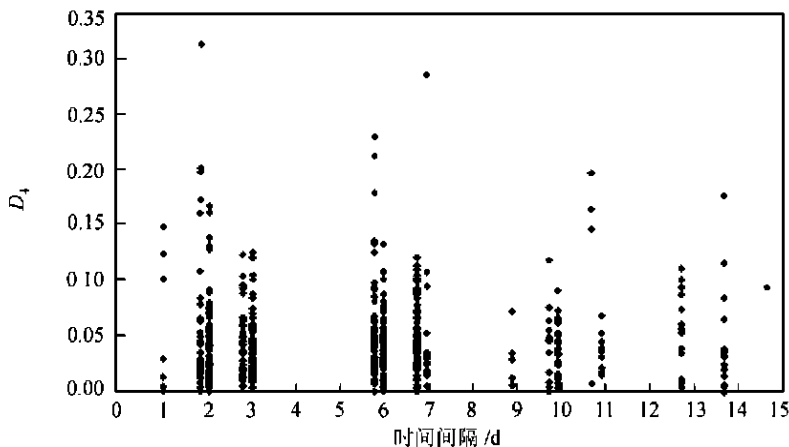


图2 不互易度与时间间隔的关系图(仅以 $0.865\ \mu\text{m}$ 波段为例)

Fig. 2 Map of non-reciprocity in band $0.865\ \mu\text{m}$ as function of time interval between two observations of the GR pair

参考文献 (References)

- [1] Helmholtz, H. von. Handbuch der Physiologischen Optik. Leopold Voss, Leipzig, 1867, 168—169.
- [2] Li, X., Wan Z. Comments on reciprocity in the BRDF modeling [J]. *Progress in Natural Science in China*, 1998, 8(3): 354—358.
- [3] Clarke, P. Helmholtz reciprocity: its validity and application to reflectometry. [J] *Lighting Research & Technology*, 1985, 17(1): 1—11.
- [4] Kimes, D. S., Newcomb, W. W., Nelson, R. F., Schutt, J. B. Directional reflectance distributions of a hardwood and pine forest

canopy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1986, GE-23: 695—704.

- [5] Deering, D. W. Temporal attributes of the bidirectional reflectance for three boreal forest canopies [A]. in Proceedings of IGARSS '95, Firenze [C]. Italy, 10—14, July 1995, 1239—1241.
- [6] Kriebel, K. T. Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces [J]. *Applied Optics*, 1978, 17: 253—263.
- [7] Siegel, Howell. Thermal Radiation Heat Transfer [M]. 3rd ed. Washington, Philadelphia, London: Hemisphere Pub., 1992, 73—77.

- [8] Kriebel, K. T. On the limited validity of reciprocity in measured BRDFs [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1996, **58**: 52—62.
- [9] Girolamo, L., T. Vanai, R. Davies. The apparent breakdown of reciprocity in reflected solar radiance [J]. *Journal Geophysics Research*, 1998, 103(D8): 8795—8803.
- [10] Snyder, W. Reciprocity of the BRDF in measurements and models of structured surface [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, March 1998, **36**(2): 685—691.

A Test of Reciprocity in Remote Sensing with POLDER Data

LIU Qiang¹ LI Xiao-wen² WANG Jin-di²

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Beijing 100101, China*; 2. *Department of Resources and Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875 China*; 3. *Boston Univ., E-mail: lix@crsa.bu.edu*)

Abstract: Reciprocity in the sense of “when the Sun and detector change position, the observed reflectance should remain the same”, its validity is tested using ADEOS POLDER level 2 data. Geometrically reciprocal (GR) pairs of data are selected from nearly a months observation of the sample region. It is found that some of these GR pairs have considerable non-reciprocity, and ignoring this non-reciprocity can cause up to 0.2’s uncertainty in the calculation of NDVI. Besides in ratio to wavelength, the magnitude of non-reciprocity also shows a sign of correlation with NDVI and altitude. It seems that with IR bands and low NDVI, visible bands and high NDVI, IR bands and high altitude, the data show more non-reciprocity.

Key words: reciprocity; BRDF; POLDER