

航空多光谱数据与地面光谱数据之间 相关性研究*

郎 爱 军

(地矿部航空物探遥感中心)

1991 年 6 月 22 日收稿

摘 要

本文从理论分析出发,在合理的假设条件下确立了航空扫描仪响应值与地面有效反射亮度成线性的数学模式并给出有关参数的确切物理含义。

在野外测试条件下,解决了绝对参量(即太阳在地面的反射辐射亮度)的测量方法,并使同步测量实际可行。

根据金海湖、高阳、安新县等地区的航空飞行中所获得的空一地多光谱同步数据,经回归分析得到不同地区、不同时期、不同高度和不同探测角度条件下的各波段地一空遥感数据回归方程,共 59 个。经相关系数 r 和 t 检验表明相关性显著或十分显著。相关系数绝大部分大于 0.98,最小也不小于 0.93。并就不同因素对回归系数的影响及反射亮度影像和波段反射率影像生成等有关内容进行了探讨。

一、引 言

航天、航空多波段遥感数据是地物反射和辐射特性的反映,这是遥感技术的物理基础,然而,对于被动遥感来说,空中数据不仅与地物特性有关,还与光照条件、大气传输特性乃至探测系统的特性等诸因素有关。因此,无论是数字影像的 DN 值,还是摄影影像的密度值,在同一波段不同地物之间仅具有相对大小的意义,而对同一地物不同波段之间无直接的可比性。研究空中数据与地面某物理量之间的相关关系,给出它们之间的定量关系式,对于遥感技术的深化和遥感数据的定量应用无疑是一项十分有价值的工作。近年来,国内一些单位(如中国科学院)在不同深度、不同方面开展了此项研究^[1,2]。我们在以往的工作中也有所涉及。国际地质对比计划第 264 项目(IGCP264)也把此项工作列为重点课题之一。本文则以航空多光谱数据与地面反射亮度之间的相关关系为专题进行了较深入的研究。

二、理论依据

遥感技术的依据就是对地面向空中的电磁辐射能量的测量。为了定量讨论航空多光谱数据与地物反射特性之间的关系,必须建立传感器的响应与地物反射特性之间的关系

* 参加本课题野外试验和数据处理的还有张宗贵、陈宁、傅旭明,对他们辛勤工作表示感谢。

式,这个关系式在有的文献中称为遥感方程。无论是卫星或航空遥感技术,其传感器对地面的测量都要通过大气。因此,一般来说,遥感方程中应考虑大气的影晌,这种影响^[3]表现为:

1) 由于大气的散射和吸收,从大气层外进入的太阳辐射没有全部到达地面;从地面目标反射的辐射也只有部份进入传感器(即衰减)。

2) 没有到达地面的太阳辐射,却因大气的散射有部分进入传感器(即程辐射)。

3) 目标周围地物的反射辐射因大气散射,也有部分进入传感器(通常称背景影响)。

4) 大气散射的向下辐射,形成了辅加的光照(即天空光)。

此外,考虑到地物近似为漫反射体,忽略反射的方向因素。经一系列推导得以下关系:

$$R = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_0(\lambda) s(\lambda) [\beta(\lambda) + \tau_\theta(\lambda) \sin \theta (\bar{\rho}(\lambda) \tau_i(\lambda) + \rho(\lambda) \tau_x(\lambda))] d\lambda \quad (1)$$

式中:

R 为传感器系统响应值。

$E_0(\lambda)$ 为大气层外的太阳辐射度分布。

$s(\lambda)$ 为传感器的波谱响应函数。

$\beta(\lambda)$ 为大气散射亮度系数。

θ 为太阳高度角。

τ_θ 太阳高度角为 θ 时,阳光的等效透射率,它包含大气的散射、吸收形成的衰减和散射形成的辅加光照的综合影响。

$\bar{\rho}(\lambda)$ 背景的平均波谱反射率。

$\tau_i(\lambda)$ 为漫反射透射率,即背景的反射辐射经散射并进入传感器的概率。

$\rho(\lambda)$ 为目标的波谱反射率。

$\tau_x(\lambda)$ 称为‘直接透射率’,它反映从地物表面到传感器直接路径上的衰减的大小。

$\lambda_1 - \lambda_2$ 为波段范围。

若地面在较大范围内宏观均匀,则:

$$\bar{\rho}(\lambda) = \rho(\lambda)$$

并令

$$\tau(\lambda) = \tau_i(\lambda) + \tau_x(\lambda)$$

$\tau(\lambda)$ 称为大气在探测方向上的总透射率。这样(1)式为:

$$R = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_0(\lambda) s(\lambda) [\beta(\lambda) + (\sin \theta) \tau_\theta(\lambda) \tau(\lambda) \rho(\lambda)] d\lambda \quad (2)$$

对于航空多光谱扫描仪遥感系统,以 i 代表不同波段,以 j 代表不同的地物, S_{ni} 为传感器各波段的相对响应函数, S_{pi} 为传感器各波段响应函数 $S_i(\lambda)$ 的峰值, g_i 为传感器各波段增益, R_{0ig} 为传感器零输入响应。考虑到波段的设置多半在各大气窗口的内部,加之,波段范围比较窄,因此, $\tau(\lambda)$ 可用 τ_i 来代替,则(2)式可为:

$$W_{ij} = a_i + b_i R_{ij} \quad (3)$$

其中:

$$W_{ij} = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{E_e(\lambda)}{\pi} S_{ni}(\lambda) \rho_j(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

W_{ij} 是与波段、传感器特性有关的地物有效反射亮度。式中:

$$E_e(\lambda) = E_0(\lambda)(\sin \theta)\tau_\theta(\lambda) \quad (5)$$

$E_e(\lambda)$ 为地面的太阳辐照度分布。

$$a_i = -\left(\frac{W_{i0}}{\tau_i} + \frac{R_{0ig}}{g_i S_{pi} \tau_i}\right) \quad (6)$$

a_i 为假定空中读数为零时,所对应的地面有效反射亮度。

$$W_{i0} = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{E_0(\lambda)}{\pi} S_{ni}(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

W_{i0} 是与波段和传感器特性有关的大气有效散射亮度。它与地物无关。

$$b_i = \frac{1}{g_i S_{pi} \tau_i} \quad (8)$$

b_i 为空中读数的单位变化所对应的地面有效反射亮度的变化。

(3) 式表明传感器各波段总响应 R_{ij} 与地物有效反射亮度 W_{ij} 成线性关系。这就是本文的理论依据。

(4) 式其实质是地面上采用与空中传感器响应特性($S_{ni}(\lambda)$)相同的多波段辐射亮度计,在获得空中数据 R_{ij} 的同时对各典型地物测得各波段的反射亮度。当然,这样的同步测量实际上是不可行的。在实施方案上,我们采用连续波谱仪准同步测得若干典型地物的波谱反射率,并同步测量太阳在地面上的辐照度分布 $E_e(\lambda)$,再用空中传感器相对响应函数 $S_{ni}(\lambda)$ 对 $\frac{E_e(\lambda)}{\pi} \cdot \rho_i(\lambda)$ 的乘积进行滤波积分,求得 W_{ij} 。在这种情况下,只要同步测量一个参数,即 $E_e(\lambda)$,就可得到各地物各波段的反射亮度的同步数据。使同步测量实际可行。从另一个意义上说,这个方案还将连续测量的仪器模拟成任意波段个数、任意响应特性的空中仪器。

(6)和(8)式给出了回归系数(a_i, b_i)、传感器系统参数(R_{0ig}, g_i, S_{pi})和大气综合参数(W_{i0}, τ_i)三组参数之间的定量关系。当获得任意两组参数后即可推算得到第三组参数,在不同场合下,将有不同的实际应用。

三、试验安排和实施

(一) 试验前的准备

为了保证野外测试数据可靠,作了如下准备。

1. 地物的选择

1) 地物反射率应较稳定。例如:柏油马路、水泥地、水体、裸露土壤和生长旺盛的植被等。

2) 地物个数适中。从测量精度讲,所选的地物个数应愈多愈好,但这将带来测试及计算工作量过大;地物过少又会导致回归方程置信度下降。考虑各波段的要求和实际情况,选择 7—10 个地物。在试验中,除了利用自然地物外,还人工制作了地标。选制了颜色为雪白、黄白、浅灰、深灰、黑色的布标。人工地标的准备,对于冬季地物种类少的情况尤为方便。

3) 对所选地物其反射率数值应有合适范围,以满足各波段有各种可能的反射特性情况的要求。应包括高反射率 60—80% (如: 雪、白布); 中等反射率 40—60% (如: 水泥地、砂、植被); 低反射率 10—20% (如: 水、植被、黑布) 等各种地物。

当然,这一要求在红外波段较难实现,因为几种布标在该波段的反射率几乎一样。

4) 目标的大小相对像元而言应足够大,而且反射特性均匀。对于自然地物,面积要求较易满足。用多点测量,取其平均的方法来弥补均匀性较差的缺陷。对于人工地标无法制作得太大,考虑到像元面积为 $2.5 \times 2.5 \text{m}^2$, 为保证扫描所得的数据至少有一个像元是完整的待测目标,而不是混合像元,布地标的尺寸应不小于 $5 \times 5 \text{m}^2$ 。我们取 $6 \times 6 \text{m}^2$ 。

5) 选择朗伯特特性较好的地物,避免受入射角或探测角的影响。因此,在试验前,对布地标进行了朗伯特特性检测。在测试中,发现地标反射特性与下垫面有关。为此,所有地标都在现场进行测量,消除不同下垫面造成的影响。此外,对于水体测量应避免镜向或逆镜向反射的发生。

6) 为了实验方便,应选取坡度相同的地物,这样可共用 $E_e(\lambda)$ 。如果选用了不同坡度地物,则需分别获得不同坡度上的 $E_e(\lambda)$ 。实际上,我们选用的典型地物都是平坦的。

2. 仪器的准备

在地面,我们使用智能波谱仪 IRIS, 它可以在 $(0.4—2.5 \mu\text{m})$ 波长范围内进行连续测量。除了对仪器进行波长、暗电流、探测函数等校正外,还做了辐射校正。这样使 IRIS 波谱仪既能进行相对测量(如地物波谱反射率),又能进行绝对测量(如太阳辐照度分布),使它既是一台“波谱仪”又是一台“分光辐射亮度计”。图 1 就是 1989 年 9 月 24 日 11:07 在金海湖利用 IRIS 波谱仪测得的太阳在地面朗伯体上反射亮度分布曲线。

在空中使用的是 DS-1268 多光谱扫描仪。由于计算的需要对 Daedalus 公司提供

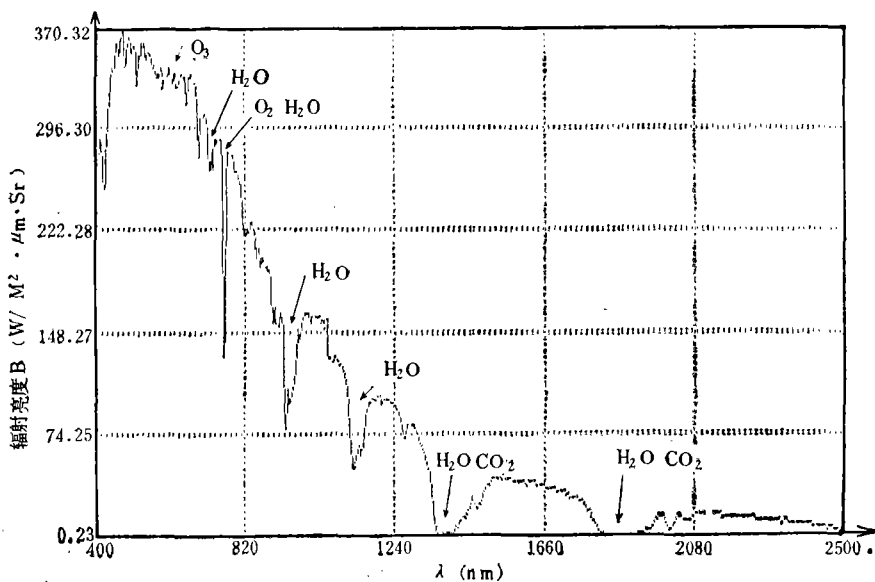


图 1 太阳在地面朗伯体上反射亮度分布曲线

Fig. 1 Solar reflective radiance distribution function on the ground

的相对响应函数 $S_{n,i}(\lambda)$ 进行了格式归一化处理,使它具有与波谱曲线相同的波长文件。

为了使一条航线的飞行过程中入射光的变化不大,飞行都安排在正午前后的两个小时之内。

(二) 野外同步测试

所谓“同步测量”是指在同一地区,地面和空中使用相同的仪器同时进行测量。在野外进行完全同步测量不仅十分困难,甚至是不可能的。从第二部分的理论分析知,对于反射特性不随时间明显变化的地物,反射率不必同步测量。即使反射特性随时间变化的地物也仅需作准同步测量。但在飞机过顶,空中仪器获取数据时,必须同步地测量太阳在地面朗伯体($\rho = 1$)上的反射辐射亮度,以得到 $\frac{E_s(\lambda)}{\pi}$ 。

在三个试验区进行了准同步测量,获得了不同地区、不同地物的反射率数据 $\rho_i(\lambda)$ 。并根据要求在飞机过顶时,同步地测得太阳在地面朗伯体上的反射辐射亮度 $\frac{E_s(\lambda)}{\pi}$ 。测量简况如表 1 所示。

表 1 同步测试简况

Table 1 Compendious condition of synchronous measurement

	地 点	日 期		飞行高度 (km)	瞬时视场角 (mrad)	工 作 量	
		飞机测试	地面同步			曲线(条)	地物(种)
1	金海湖	1989.9.18 9.26	9:24 11:07	1	2.5	72	11
2	高阳县	1989.12.24 12.29	12.29 12:15	1	2.5	43	9
3	安新县	1990.4.24 5.9	5.6 12:27 5.7 10:55	2 1	1.25 2.5	76	12
数据获取 条件	不同地点	不同时间		不同高度和 不同角度			

四、试验结果和分析

(一) 空—地数据的相关性

在三个试验区,空中飞行六条航线,每条航线 10 个波段(其中有一条航线的第一波段数据失败)共得 59 组 W_{ij} 与 R_{ij} 数据。对所获得的数据进行了统计回归分析^[4,5]。不仅给出回归直线(见图 2)和方程

$$W_1 = 0.4555 + 0.0714R_1$$

还求得相关系数 $r = 0.9986$ (图中回归直线上、下的二条曲线给出 95% 置信度的预测区间),又进行了误差分析,并以 r 检验和 t 检验对线性相关显著性进行了评估,图 3 给出 r 的分布,59 个 r 值中最小为 0.93,0.98 以上占 76%。试验结果表明,空中读数与地面有效反射亮度之间的线性相关是十分显著的。这就有力地支持了理论分析中所确立的数学模

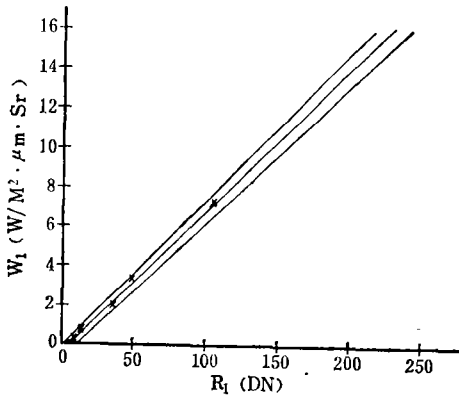


图 2 航空多光谱数据与地面光谱数据关系
(安新县, 第九航线, 波段 1)

Fig. 2 The correlation between the AMSS (DS-1268) data and the spectral data of target

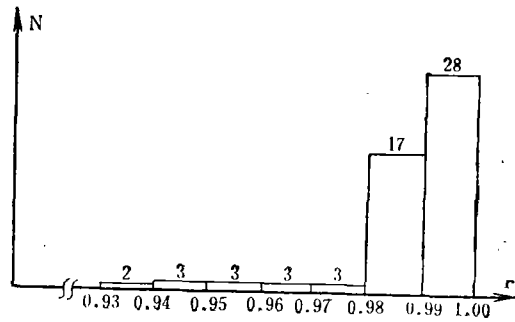


图 3 r 的分布直方图

Fig. 3 The histogram of the r distribution

式十分接近实际情况, 也证明了在建立数学模式过程中所采用的若干基本假设是合理的。

(二) 不同航高对回归系数的影响

在同一试验区, 安排了二条航线 9 和 9'', 它们的航高分别为 1km 和 2km, 瞬时视场角 (IFOV) 分别为 2.5mrad 和 1.25mrad。空中各波段读数的增益在二次飞行中也有改变, 但其它试验条件相同。表(2)给出两次试验有关数据。根据(8)式

$$b_i = \frac{1}{g_i S_{P_i} \tau_i}$$

可得

$$\frac{g''_i b''_i}{g_i b_i} = \frac{S_{P_i} \tau_i}{S''_{P_i} \tau''_i}$$

表 2 安新县 9 线和 9'' 航线有关参数

Table 2 Related parameters of Air-lines 9 and 9'' in Anxing County

参数值	波段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b	9	0.0714	0.0730	0.0639	0.0248	0.0451	0.0470	0.0720	0.1230	0.1029	0.0619
	9''	0.0307	0.0285	0.0585	0.0218	0.0395	0.0420	0.1610	0.0945	0.0378	0.0188
g	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	9''	8	8	4	4	4	4	2	8	8	8
$\frac{g'' b''}{g b}$		3.44	3.12	3.66	3.56	3.50	3.57	4.47	6.15	2.94	2.43

由表中数据可见:

$$S_{P_i} \tau_i > S'_{P_i} \tau'_i$$

与实际相符。

(三) 不同探测角对回归系数的影响

在同一幅航空多光谱影像中,边缘部分和中间部分的探测角是不同的,因此地面到传感器所经过的实际路程不同,所受大气的影响程度也就不同。为此,我们安排了不同探测角的有关试验。

(1) 探测角变化小的情况

在同一试验区的两条平行航线 9'' 和 10'', 重叠 50%, 它们的航高均为 2km, IFOV 为 1.25mrad。9'' 航线几乎在所选地物的正上空, 探测角约 4.32°。10'' 航线对所选地物的探测角约为 11.82°。两个状态下, 它们的探测角相差约为 7.50°, 其它参数均相同。表 3 给出了 9'' 和 10'' 航线有关结果。

由表 3 可见 9'' 和 10'' 两航线的回归系数 \hat{a} 和 \hat{b} 的差别甚小。这是由于两航线探测角相差并不大(7.50°)的结果。对于卫星影像, 由于总视场角约为 10 度, 半视场角仅 5°—6°, 同幅影像内由于不同探测角造成的影响是可以忽略的。

(2) 探测角变化大的情况

表 3 9'' 和 10'' 航线回归系数 \hat{a} 和 \hat{b}

Table 3 Regressive coefficient \hat{a} and \hat{b} of Air-lines 9'' and 10''

数据 \ 波段		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
项目											
\hat{b}	9''线	0.0307	0.0285	0.0585	0.0218	0.0395	0.0420	0.1610	0.0945	0.0378	0.0188
	10''	0.0313	0.0285	0.0559	0.0218	0.0390	0.0390	0.1590	0.0851	0.0355	0.0184
\hat{a}	9''线	-1.1298	-1.7586	-2.551	-0.6415	-1.1863	-1.8662	-4.6875	-6.6272	-1.2702	-0.4732
	10''线	-1.2772	-1.8871	-2.3689	-0.6516	-1.2150	-1.5965	-4.1987	-5.5958	-1.1851	-0.5027

表 4 9 和 10 航线的回归系数 \hat{a} 和 \hat{b}

Table 4 Regressive coefficient \hat{a} and \hat{b} of Air-lines 9 and 10

数据 \ 波段		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
项目											
\hat{b}	9 线	.0714	.0730	.0639	.0245	.0451	.0470	.0720	.1230	.1029	.0619
	10 线	.0867	.0807	.0845	.0353	.0599	.0611	.0887	.1457	.1023	.0683
\hat{a}	9 线	-0.4555	-0.9036	-0.9327	-0.2457	-0.4118	-0.5724	-1.6768	-2.6606	-0.6068	-0.0334
	10 线	-0.7615	-0.9459	-2.2551	-0.7638	-1.2271	-1.6774	-2.8538	-3.3818	-0.3181	-0.1129
$\frac{\hat{b}_{10线}}{\hat{b}_{9线}} = \frac{\tau_{9线}}{\tau_{10线}}$		1.21	1.11	1.32	1.44	1.33	1.30	1.23	1.18	0.99	1.10

同样,另两条航线,9 和 10 线,IFOV 为 2.5mrad。9 航线接近所选地物的上空,探测角为 11.1° ,而 10 航线安排为侧视,其探测角为 42.24° ,探测角相差约为 31.14° ,由表 4 可见,除了 9 波段以外, $\tau_{9线} > \tau_{10线}$ (g_i 和 S_{P_i} 相同)。

由此可知,对于一幅探测角变化较大的航空遥感影像,由于边缘比中心区所受大气影响大,使得透射率有明显下降。

(四) 地面有效反射亮度影像

根据回归方程 $W = a + \hat{\epsilon}R$, 就可以把空中影像上的量化值 R 换算成地面有效反射亮度值 W 。这样,便得到一幅地面有效反射亮度影像,而不是原始的数值影像。

由于地面有效反射亮度在数字上很小,直接显示的影像灰度很低。为此,作适当的数值上的扩展或者给影像灰度等级赋以适当的亮度值。令:

$$R' = \frac{255}{W_{\max}} W = P \cdot W \quad (9)$$

则:

$$R' = P(\hat{\epsilon}R + a) = P\hat{\epsilon}\left(R + \frac{a}{\hat{\epsilon}}\right) = P\hat{\epsilon}(R - R_0)$$

$$R' = P\hat{\epsilon}(R - R_0) \quad (10)$$

其中:

R' 为有效反射亮度影像的灰阶。 W_{\max} 当 $R' = 255$ 时,对应的亮度值,(一般可取 $R = 255$ 时,由回归方程求得的 W 值)。 $P = \frac{255}{W_{\max}}$ 为单位有效反射亮度对应的灰阶。 $R_0 = -a/\hat{\epsilon}$,当地面反射为零时,空中传感器的响应值。它包含大气散射亮度和传感器零输入响应等因素的影响。

(10) 式是图像的一种线性变换,但它是具有特殊函意的变换。其结果是给出与地面反射亮度有确定比例系数的影像,以供定量处理或分析使用。

我们以安新试验区第 9'' 线第三波段数据为例子。其回归方程为:

$$W = 0.0585R - 2.551 = 0.0585(R - 43.6)$$

该影像的 P 值为:

$$P = \frac{255}{12.4} / (w/m^2 \cdot sr)$$

因此

$$R' = \frac{255}{12.4} W = 1.2(R - 44) \quad (11)$$

根据(11)式可把原始数值 R 的影像转换为对应地面有效反射亮度的 R' 的影像。封三图 4 的右半部是原始值 R 的影像,左半部是变换后的 R' 的影像,两者相比 R 影像上明显蒙上了一层“白雾”(由大气及传感器零输入响应所致), R' 影像则已消除,因而 R' 影像的反差加大,且层次增加。

(五) 波段反射率和反射率影像

反射亮度图像其值的大小除了取决于地物的反射能力以外,还与入射光照的强弱有关[如(4)式]。为了消除光照强弱的影响,可以引入波段反射率(或波段反射亮度系数),它的定义为:

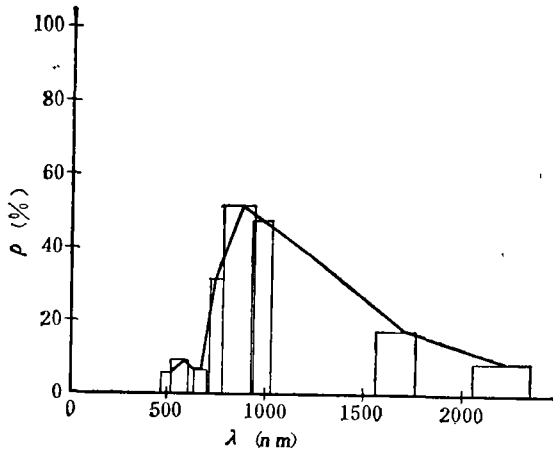


图5 大白菜的波段反射率

Fig. 5 The band reflectance of vegetation

(由相关性公式推得)

$$\bar{\rho}_{ij} = \frac{W_{ij}}{W_{iL}} \Big|_{\text{同样入射和测量条件}}$$

$$= \frac{\int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{E_e(\lambda)}{\pi} S_{ni}(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{E_e(\lambda)}{\pi} S_{ni}(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

它实质上相当于地面上使用与空中传感器特性相同的多波段辐射计测得的地物波段反射率,式中

$$W_{iL} = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{E_e(\lambda)}{\pi} S_{ni}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

W_{iL} 为 $\rho = 1$ 的理想朗伯体对应的各波段反射亮度。若具备高度分布

参数和同步测量时的大阳高度角和方位角,可考虑地形的影响,对(12)式进行修正。

对于某一地物,根据各波段的有效反射亮度 W_{ij} , 由(12)和(13)式可求得各波段的波段反射率图。图5就是根据金海湖试验计算得到的大白菜波段反射率图。

同样,对于任一波段的 W_{ij} 影像,只要除以 W_{iL} 便得到该波段的波段反射率 $\bar{\rho}_{ij}$ 影像。统一规定 255 灰阶表示 100% 的波段反射率,就可获得各波段、各地点、各时相的规一化的波段反射率影像。这种影像无论在实用上(例如,影像镶嵌时,无需进行灰阶调整)和定量处理上都有很大价值。

参 考 文 献

- [1] 冯家璋等,长春遥感论文集,吉林人民出版社,18—25,1981。
- [2] 童庆禧等,遥感应用的实践与创新,测绘出版社,240—248,1990。
- [3] P. Y. Deschamps, Remote Sensing of Environment, pp. 89—92, 1983.
- [4] 浙江大学数学系,概率论与数理统计,人民教育出版社,306—320,1979。
- [5] 周晓中等,概率论及数理统计,黑龙江人民出版社,430—449,1983。

THE RELATIONSHIP BETWEEN SENSOR'S RESPONSE AND SPECTRAL SIGNATURE OF THE TARGET

Lang Aijun

(Center for Remote Sensing in Geology Ministry of Geology & Mineral Resources)

Abstract

According to the theory analysis, mathematical mode showing the lineal relationship between the response of airborne scanner and the effective reflected brightness of targets has been established under the reasonable assumption, exact physical significance for related parameters is given.

The measuring method of absolute parameters i.e. solar reflected radiance distribution function on the ground, has been solved under the condition of the field measurement, and it makes the synchronous measurement become practible.

Based on the airborne and field data obtained in Gold-Sea Lake, Gaoyaing and Anxing counties, 59 regressive equations were obtained by regressive analysis at different area, temporal, height and detective angles.

t test and r test show that the correlations are obvious or quite obvious. The correlative coefficient are almost larger than 0.98, the remainder are not smaller than 0.93, various factors influence on the regressive coefficient, the formation of the reflected brightness image and band reflectance image have been researched.

郎爱军: 航空多光谱数据与地面光谱数据之间相关性研究

Lang Aijun: The Relationship Between Sensor's Response and Spectral Signature of the Target

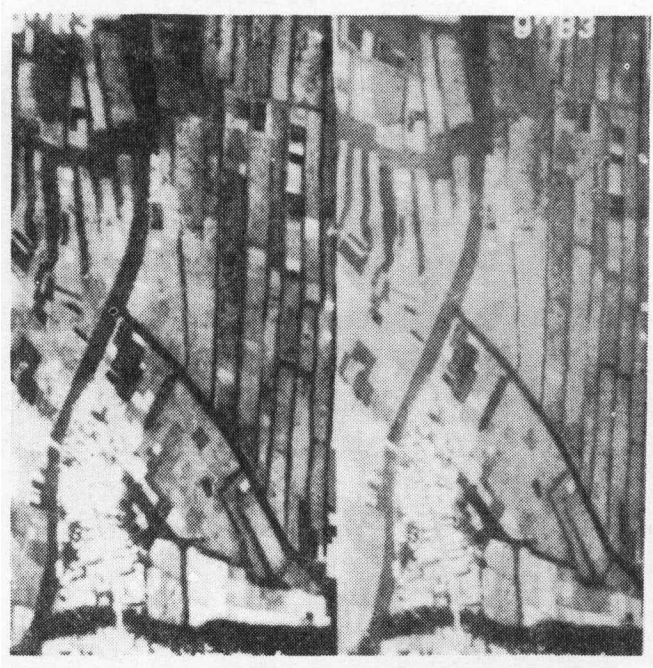


图4 原始数值 R 的影像(右)和地面有效反射亮度影像(左)

Fig.4 The original image and effective reflective radiance image