

基于影像的 Landsat TM/ETM⁺ 数据正规化技术

徐涵秋¹

(1 福州大学环境与资源学院数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福州市工业路 523 号,350002)

摘 要:阐述了基于影像的 Landsat TM/ETM⁺ 的数据正规化技术及其发展。该技术通过将 Landsat 影像的亮度值转换成传感器处的辐射值和反射率来对影像进行辐射校正。实例表明,使用正规化技术处理后的影像可以明显削弱日照和大气的影 响,去除它们产生的噪声;其所求的传感器处的反射率与地面实测反射率的 RMS 值非常小。

关键词:Landsat TM/ETM⁺;辐射校正;数据正规化

中图法分类号:TP751

卫星数据在接收的过程中由于受到许多因素的干扰,使影像的质量受到一定程度的影响。如果将没有经过辐射校正的影像直接用于各种应用中,特别是在基于像元光谱值的变化检测应用时,由于不同时相影像之间的光照、大气条件的差异,会造成这些影像的像元光谱值发生变化,从而使其准确性受到很大的影响。因此,在进行变化检测前,必须对不同时相的影像进行辐射校正^[1]。许多学者先后开发出了多种算法和模型,但这些算法和模型(如大气校正模型)往往需要各种各样难以获取的同步参数,而难以付诸实施或效果不佳^[2, 3]。因此,基于影像自身光谱值的正规化校正技术就显得更为重要。本文介绍了 Landsat 5、7 的数据正规化技术的发展及其定标参数的若干重要变化,并指出了使用中必须注意的重要事项。

1 Landsat TM/ETM⁺ 的数据正规化技术

1.1 日照差异纠正模型(illumination correction model, ICM)

纠正日照差异的数据正规化技术主要是通过将影像的灰度值统一到像元在卫星传感器处的反射率来达到对影像数据的辐射校正。该算法先将影像中每个像元的灰度值(DN)转换为该像元在传感器处的光谱辐射值,然后再进一步将其转

换为传感器处的反射率。这一技术主要源于 Markham 等为 Landsat 4、5 开发的算法^[4]。

对于 Landsat 5 TM 数据,其转换的基本公式为:

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}})}{Q_{\max}} Q_{\lambda} + L_{\min_{\lambda}} \quad (1)$$

式中, λ 为波段值; L_{λ} 为像元在传感器处的光谱辐射值; Q_{λ} 为以 DN 表示的经过量化标定的像元值; Q_{\max} 为 8 位 DN 值的理论最大值(取 255); $L_{\max_{\lambda}}$ 为根据 Q_{\max} 拉伸的最大光谱辐射值; $L_{\min_{\lambda}}$ 为根据 8 位 DN 值的理论最小值(取 0)拉伸的最小光谱辐射值。 $L_{\max_{\lambda}}$ 和 $L_{\min_{\lambda}}$ 的值可以从表 1 或影像的头文件获得。

对于 ETM⁺ 卫星数据,NASA 对式(1)进行了修改,引入了 Q_{\min} 值^[5],即

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}})}{Q_{\max} - Q_{\min}} (Q_{\lambda} - Q_{\min}) + L_{\min_{\lambda}} \quad (2)$$

式中, Q_{\min} 为 8 位 DN 值的最小值。必须注意的是,对于 Landsat 7 的 Level 1 产品,美国宇航局的 LPGS 系统的 Q_{\min} 取值为 1,而美国地质调查局的 NLAPS 系统的 Q_{\min} 在 2004 年 4 月 5 日之前取值为 0,之后统一取为 1。从笔者所购的 2003 年 5 月 29 日的 ETM⁺ 数据来看,中科院遥感卫星地面站产品的 Q_{\min} 取值为 1(数据的处理日期为 2004 年 4 月 27 日)。

L_{λ} 也可由增益值(g)和偏置值(b)求得^[5]:

$$L_{\lambda} = g_{\lambda} \cdot Q_{\lambda} + b_{\lambda} \tag{3}$$

由式(2)不难看出：

$$g_{\lambda} = \frac{L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \tag{4}$$
$$b_{\lambda} = L_{\min_{\lambda}} \tag{5}$$

式中, g_{λ} 和 b_{λ} 分别为波段 λ 的增益值与偏置值,它们可从影像的头文件或表 1 和表 2 中获得。

在无明显大气影响的条件下,由以上求出的 L_{λ} 值可以进一步代入下式以求像元的传感器处的反射率值：

表 1 Landsat 5 TM 辐射校正参数表/ $W \cdot m^{-2} \cdot ster^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

Tab. 1 Landsat 5 TM Postcalibration Dynamic Range

波段	2003 年 5 月 5 日前				2003 年 5 月 5 日后			
	L_{min}	L_{max}	b	g	L_{min}	L_{max}	b	g
1	-1.52	152.1	-1.52	0.602 431	-1.52	193.00	-1.52	0.762 824
2	-2.84	296.81	-2.84	1.175 098	-2.84	365.00	-2.84	1.442 510
3	-1.17	204.3	-1.17	0.805 765	-1.17	264.00	-1.17	1.039 882
4	-1.51	206.2	-1.51	0.814 549	-1.51	221.00	-1.51	0.872 588
5	-0.37	27.19	-0.37	0.108 078	-0.37	30.20	-0.37	0.119 882
6	1.24	15.30	1.24	0.055 158	1.24	15.30	1.24	0.055 158
7	-0.15	14.38	-0.15	0.056 980	-0.15	16.50	-0.15	0.065 294

表 2 Landsat 7 ETM⁺ 辐射校正参数表/ $W \cdot m^{-2} \cdot ster^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

Tab. 2 Landsat 7 ETM⁺ Postcalibration Dynamic Range

波段		低增益影像					高增益影像				
		L_{\min}	L_{\max}	b	$g(Q_{\min}=0)$	$g(Q_{\min}=1)$	L_{\min}	L_{\max}	b	$g(Q_{\min}=0)$	$g(Q_{\min}=1)$
2000 年 7 月 1 日 前使用	1	-6.20	297.50	-6.20	1.190 980	1.195 669	-6.20	194.30	-6.20	0.786 275	0.789 370
	2	-6.00	303.40	-6.00	1.213 333	1.218 110	-6.00	202.40	-6.00	0.817 255	0.820 472
	3	-4.50	235.50	-4.50	0.941 176	0.944 882	-4.50	158.60	-4.50	0.639 608	0.642 126
	4	-4.50	235.00	-4.50	0.939 216	0.942 913	-4.50	157.50	-4.50	0.635 294	0.637 795
	5	-1.00	47.70	-1.00	0.190 980	0.191 732	-1.00	31.76	-1.00	0.128 471	0.128 976
	6	0.00	17.04	0.00	0.066 824	0.067 087	3.20	12.65	3.20	0.037 059	0.037 205
	7	-0.35	16.60	-0.35	0.066 471	0.066 732	-0.35	10.93	-0.35	0.044 243	0.044 417
	8	-5.00	244.00	-5.00	0.976 471	0.980 315	-5.00	158.40	-5.00	0.640 784	0.643 307
2000 年 7 月 1 日 后使用	1	-6.20	293.70	-6.20	1.176 078	1.180 709	-6.20	191.60	-6.20	0.775 686	0.778 740
	2	-6.40	300.90	-6.40	1.205 098	1.209 843	-6.40	196.50	-6.40	0.795 686	0.798 819
	3	-5.00	234.40	-5.00	0.938 824	0.942 520	-5.00	152.90	-5.00	0.619 216	0.621 654
	4	-5.10	241.10	-5.10	0.965 490	0.969 291	-5.10	157.40	-5.10	0.637 255	0.639 764
	5	-1.00	47.57	-1.00	0.190 471	0.191 220	-1.00	31.06	-1.00	0.125 725	0.126 220
	6	0.00	17.04	0.00	0.066 824	0.067 087	3.20	12.65	3.20	0.037 059	0.037 205
	7	-0.35	16.54	-0.35	0.066 235	0.066 496	-0.35	10.80	-0.35	0.043 725	0.043 898
	8	-4.70	243.10	-4.70	0.971 765	0.975 591	-4.70	158.30	-4.70	0.639 216	0.641 732

说明：本表除 b 和 g 的数据为本次计算的外，其余数据源于 Irish (2002)。

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{\text{SUN}_{\lambda}} \cdot \cos\theta_s} \tag{6}$$

式中, ρ_{λ} 为像元在传感器处的反射率或称大气顶部反射率^[1]; $E_{\text{SUN}_{\lambda}}$ 为大气顶部的平均太阳辐照度(表 3); θ_s 为太阳天顶角,即太阳高度角的余角,如直接采用太阳高度角,则要改用正弦函数的形式,太阳高度角可从影像的头文件获得; d 为日-地距离(天文单位),可以据表 4 用内插法求得,其中 DOY 为儒略日天数(1~365 或 366 d)。

在地面辐射率均一的条件下,Landsat TM/ETM⁺ 的热红外波段(6 波段)的灰度值经转换成传感器处的光谱辐射值(L_{λ})后,可以进一步转换

表 3 大气顶部的平均太阳辐照度/ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

Tab. 3 Average Solar Spectral Irradiances

波段	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM ⁺
1	1 957.00	1 969.00
2	1 826.00	1 840.00
3	1 554.00	1 551.00
4	1 036.00	1 044.00
5	215.00	225.700
7	80.67	82.07
8	—	1 368.00

表 4 日-地距离表/天文单位

Tab. 4 Earth-Sun Distance in Astronomical Units

DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d
1	0.983 2	74	0.994 5	152	1.014 0	227	1.012 8	305	0.992 5
15	0.983 6	91	0.999 3	166	1.015 8	242	1.009 2	319	0.989 2
32	0.985 3	106	1.003 3	182	1.016 7	258	1.005 7	335	0.986 0
46	0.987 8	121	1.007 6	196	1.016 5	274	1.001 1	349	0.984 3
60	0.990 9	135	1.010 9	213	1.014 9	288	0.997 2	365	0.983 3

成传感器处的温度值(T),或称大气顶部温度值^[1]:

$$T=K_2/\ln(K_1/L_\lambda+1)$$

(7)

式中, K_1 和 K_2 分别为定标参数,对于 Landsat 5 TM, $K_1=607.76\text{ m}^2\cdot\text{ster}\cdot\mu\text{m}$, $K_2=1\,260.56\text{ K}$;对于 Landsat 7 ETM⁺, $K_1=666.09\text{ m}^2\cdot\text{ster}\cdot\mu\text{m}$, $K_2=1\,282.71\text{ K}$ 。

1.2 纠正日照和大气条件差异的模型(IACM)

ICM 模型虽然也能一定程度上削弱大气的影响^[6,7],但它主要考虑的是日照条件(式 6),因此,美国尤他州立大学遥感与地理信息系统实验室对其进行了修改,引进了大气影响修正参数,提出了综合考虑日照和大气条件的纠正模型,并被广泛应用于美国西部的项目中^[8,9]。其公式为:

$$\rho_\lambda=\frac{\pi\cdot((Q_\lambda g_\lambda+b_\lambda)-(h_\lambda g_\lambda+b_\lambda))\cdot d^2}{E_{\text{SUN}_\lambda}\cdot\cos\theta_s\cdot\tau}$$

(8)

如果令 $L_h=h_\lambda\cdot g_\lambda+b_\lambda$,则上式可以简化为:

$$\rho_\lambda=\frac{\pi\cdot(L_\lambda-L_h)\cdot d^2}{E_{\text{SUN}_\lambda}\cdot\cos\theta_s\cdot\tau}$$

(9)

式中, L_h 就是大气影响的修正值,各波段的 h_λ 可以通过最暗像元法获得; τ 为大气透射率,根据 Chavez 的 COST 大气校正模型^[11],它可由下式获得:

$$\tau=\cos((90-\theta_s)\cdot\pi/180)$$

(10)

但该实验室的研究也发现,用 COST 模型计算会高估 τ 值,特别是以下三种情况:① 成像时晴空无云, τ 值很小;② 太阳天顶角很高;③ 北方的高纬度地区。因此在实际应用中, τ 值被忽略,式(9)被进一步简化为:

$$\rho_\lambda=\frac{\pi\cdot(L_\lambda-L_h)\cdot d^2}{E_{\text{SUN}_\lambda}\cdot\cos\theta_s}$$

(11)

2 验证与应用

2.1 实验

本次研究选用了一对时相、季相和太阳天顶角皆不相同的厦门幅 Landsat TM 影像(以 1998 年 12 月 17 日的影像为例)来进行实验(表 5)。

验证方法如下:① 先将以上两幅影像分别用上述两个模型进行正规化处理;② 在经过处理的

两幅影像和未经处理的原始 DN 影像中找出若干对应的、不随时间变化而发生变化的特征地物,如机场跑道、沙滩和深水体等,并在两幅影像的相同位置上对这些不变地物分别取样,以获得它们在两不同时相影像中各对应波段的像元值;③ 将像元值分别投到两时相各个对应波段的二维光谱特征空间上,求出它们投影点群的线性回归方程的斜率(为便于对比,令截距为 0)和各对应波段的均值差(表 6、图 1)。均值差可用以下公式求得:

$$D_i=\frac{1}{n}\sum_j\sum_k|B'_{ijk}-B_{ijk}|$$

(12)

式中, D 为均值差; B 和 B' 分别为两个不同时相的影像; i 为对应的波段; j 和 k 分别为取样位置的行、列值; n 为所有样品的像元数(本次实验共有 211 个像元)。

显然,当两个对应波段的光谱特征完全一致时,其均值差应为 0,散点投影图的斜率应为 1。因此,当均值差越小,斜率值越接近 1 时,这两个对应波段的光谱特征就越接近,据此可以定量地评估和对比原始影像及经过正规化处理的影像的不同。从表 6 可以看出,原始 DN 影像的各对应波段的斜率值都明显偏离 1,其平均偏离值的绝对值为 0.230 9,说明这些不变特征地物散点的分布都明显偏离斜率为 1 的对角线。另外,从各对应波段的均值差来看,其差值也都非常大,均值达到了 32.7。以上两个评价指标都说明了这些不变地物对应波段的光谱值在原始的两时相影像中仍然发生了变化。既然地物没有发生变化,则这些光谱值的变化显然是由大气、光照等因素引起的。然而,在经过将原始的 DN 值转变为反射率的正规化处理后,ICM 和 IACM 影像的斜率值接近于 1,其绝对偏离值分别缩小为 0.056 和 0.145,说明两种正规化影像中的这些不变地物的散点分布都接近于斜率为 1 的对角线。另外,各波段的均值差也明显小于原始影像(图 1),其平均均值差只是原始影像的 1/3 左右(表 6),这说明由大气和日照条件不同引起的影响在这两种经过正规化处理的影像中都被明显削弱。就本例而言,ICM 算法要好于 IACM 算法,这主要是因为该幅影像质量很好,大气条件清晰,所以纠正大气影响的 IACM 算法无法显现出它的优点。

2.2 大型土地覆盖数据库建库和制图

Landsat 影像数据的正规化已是目前美国建立大型土地利用/覆盖数据库中必不可少的一个重要环节。美国多分辨率土地特征联盟是一个由

表 5 试验影像对的主要参数

Tab. 5 Properties and Parameters of Experimental Image

时相/季相	面积/km ²	太阳天顶角/(°)	日-地距离/天文单位
1998-12-17/ 落叶后	1 750	53.0	0.984 18
1999-04-08/ 落叶前		32.0	1.001 17

表 6 各对应波段两时相光谱特征空间散点图的线性回归方程的斜率值和均值差
Tab. 6 Slope Values of Scatter Plots and D Values of Each Corresponding Bands

		斜率值			均值差		
		DN 原始影像	ICM 处理影像	IACM 处理影像	DN 原始影像	ICM 处理影像	IACM 处理影像
波段	1	0.696 2	0.961 7	1.213 2	37.76	4.34	6.09
	2	0.717 2	0.988 0	1.288 4	19.68	6.09	11.85
	3	0.721 3	0.999 9	1.208 6	27.55	7.45	12.35
	4	0.695 8	0.975 1	1.110 0	25.37	9.09	11.11
	5	0.658 7	0.915 0	0.938 1	50.85	12.41	10.07
	7	1.125 7	0.823 2	1.111 1	34.99	17.06	16.94
	均值	0.769 2	0.943 8	1.144 9	32.70	9.40	11.40

说明：ICM 波段的斜率值代表取样的像元点在由 ICM 处理过的 1998 年影像的波段和对应的 1999 年影像的波段所构成的特征空间坐标散点图中的斜率；IACM 波段的均值差代表所有取样的像元点在经 IACM 处理的 1998 年影像波段的平均值和对应的 1999 年影像波段的平均值的差。

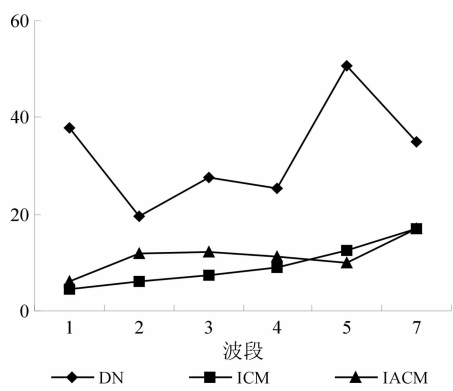


图 1 DN、ICM 和 IACM 影像两时相各对应波段的均值差变化图
Fig. 1 Changes in D Values of Each Corresponding Bands

许多联邦官方机构组成的机构,其宗旨是联合购买 Landsat 数据,建立全国土地覆盖数据库,以满足各联邦机构对全美不同时代的土地覆盖数据和遥感影像的不断需求,其中以 Landsat 7 影像为主的称为 NLCD2001,共有 1 780 幅影像,每幅影像的 1~5 和 7 波段都被转换为传感器处的反射率,而 6 波段则转换为传感器处的温度值。实验表明,正规化方法可以使得拥有大量影像的数据库很好地整合在一起,而不必用传统的直方图匹配镶嵌法^[10]。

美国西南地区生物多样性保护计划包含了美国西南部 5 个州,其第一步就是制作全区的土地覆盖图。项目选用的数据源为 Landsat 影像,而数据的正规化处理是建库必须进行的一环,目的是使不同时空的影像数据能够进行对比和镶嵌^[9, 11]。在进行了数据正规化处理的基础上,再进一步制作了缨帽变换图、植被指数图和土地覆盖分类图。

2.3 不同传感器影像的比较研究

当前,不同传感器的数字影像产品主要都是

以亮度值(DN)的格式来分发的,但基于这种 DN 值的不同传感器影像之间的对比往往会导致严重的错误,因为不同的传感器系统在将信号转换成 DN 值时采用的方法是不相同的。因此,在对比前,必须对不同传感器的影像先进行正规化处理。Goward 等研究了 ETM⁺ 与 IKONOS 对应波段的可比性^[12]。两种传感器的对比影像都先采用式(3)、式(6)将它们 DN 值转换成光谱反射率,然后再制作植被指数图进行对比。Goward 等指出,除非不同传感器之间的对应波段的波长范围完全相同,且它们的时相也完全一致,否则,单将 DN 值转换成辐射值是不够的,必须将其都“归一”成光谱反射率才真正具有可比性。

3 结 语

在遥感进入定量化、精确化、多平台、多时相综合研究的今天,单纯依靠亮度值(DN)所进行的研究和应用在很多情况下会出现错误的结果。总地说来,在进行多时相变化检测研究、大范围影像建库和镶嵌以及不同传感器影像之间的对比时,必须对数据进行正规化处理。但在进行数据正规化处理时,应根据影像产品的日期和其他相关条件选用正确的定标参数,以获得正确的结果。

参 考 文 献

[1] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2 674-2 677

[2] Du Yong, Philippe M T, Cihlar J. Radiometric Normalization of Multitemporal High-resolution Satellite Images with Quality Control for Land Cov-

er Change Detection[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1): 123-134

[3] 覃志豪, Zhang Minghua, Karnieli A, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466

[4] Markham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-satellite Temperature[J]. EO-SAT Landsat Technical Notes, 1986(1): 3-8

[5] Irish R. Landsat 7 Science Data Users Handbook [OL]. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html, 2004

[6] Huang Chengquan, Yang Limin, Homer C, et al. At-satellite Reflectance: a First Order Normalization of Landsat 7 ETM⁺ Images[C]. USGS Science for a Changing World, EROS Data Center, Sioux Falls, USA, 2001

[7] Huang Chengquan, Wylie B, Homer C, et al. Derivation of a Tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8): 1 741-1 748

[8] Ramsey R D, Wright D L Jr, McGinty C. Evaluating the Use of Landsat 30 m Enhanced Thematic Mapper to Monitor Vegetation Cover in Shrub-steppe Environments[J]. Geocarto International, 2004, 19(2): 39-47

[9] Lowry J, Kirby J, Langs L. SWReGAP Land Cover Mapping Methods Documentation[OL]. http://earth.gis.usu.edu/swgap/data/landcover/map_methods/UT/UT5_Methods.pdf, 2004

[10] Homer C, Huang Chengquan, Yang Limin, et al. Development of a 2001 National Landcover Database for the United States[OL]. http://landcover.usgs.gov/pdf/NLCD_pub_august.pdf, 2001

[11] Waller E. SWReGAP Land Cover Mapping Methods Documentation “Colorado”[OL]. http://earth.gis.usu.edu/swgap/data/landcover/map_methods/CO/CO_Statewide_Methods.pdf, 2004

[12] Goward S N, Davis P E, Fleming D, et al. Empirical Comparison of Landsat 7 and IKONOS Multi-spectral Measurements for Selected Earth Observation System (EOS) Validation Sites[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1): 80-99

作者简介:徐涵秋, 教授, 博士, 博士生导师。主要从事环境资源遥感应用研究。
E-mail: fdy@public.fz.fj.cn

Image-based Normalization Technique Used for Landsat TM /ETM⁺ Imagery

XU Hanqiu¹

(1 Key Laboratory of Data Mining and Information Sharing, Ministry of Education, College of Environment and Resources, Fuzhou University, 523 Gongye Road, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The development of the image-based normalization technique used for Landsat Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus imagery is reviewed. The techniques perform radiometric calibration by converting the digital number of the Landsat imagery to at-satellite radiance and then to at-satellite reflectance using data normalization method. The validation case in this study shows that the illumination difference between the tested multi-temporal Landsat TM images can be considerably reduced to one-third of that of the original DN-based image through the normalization technique.

Key words: landsat TM/ETM⁺; radiometric calibration; data normalization

About the author: XU Hanqiu, professor, Ph. D, Ph. D supervisor. His main research includes remote sensing applications in environment and natural resources.
E-mail: fdy@public.fz.fj.cn