

从遥感多光谱数据中产生分要素图像的 最小二乘混合模型

Y. E. Shimabukuro, J. A. Smith

I. 介绍 卫星传感器记录的辐射是传感器瞬时视场 (IFOV) 内所有地物辐射的综合。因此, 探测到的辐射是许多不同地物辐射的混合加上大气效应所形成的。已有几个研究者对混合现象作过研究。大多数自然景观的非单一性总是导致大量要素成混合状况。由于不同像之中各种地物比例的变化使得问题更加复杂。

处理混合问题一般是从两个方面着手: (i) 分类技术, (ii) 企图使一个像元中各要素的类型和比例与要素的光谱响应模型化。

第二种方法已有一些研究人员在地球资源应用领域采用。线性混合模型被用来分析植被和岩石的混合信号, 决定矿物的类型和丰度, 进行图像中的阴影提取来建立专题制图仪 (TM) 的响应同植被的高度和分布类型的关系, 以及产生阴影图像解释森林结构的变化。

本文的目的是用最小二乘混合模型从遥感多光谱数据中产生分要素图像。把限制的最小二乘 (CLS) 和加权的最小二乘 (WLS)

混合模型应用到巴西圣保罗州莫吉—高库市一个区域的陆地卫星 MSS 数据中。像元中的三种要素被考虑: 桉树, 土壤 (树下) 和阴影。比较了两种方法产生的阴影要素图像的效果和计算机运行时间。

II. 基本概念 利用一个线性关系表达遥感系统像元中目标的光谱混合。按照这个方法, 任何波段中每个像元的响应可以认为是混合像元中每一个要素响应的线性组合。因此, 每一个图像像元, 有一个处于灰度尺中的数值, 包含了地面像元中每一种要素的比例和光谱响应的信息。

因此, 给出一幅多光谱图像, 有可能对这幅图像每个像元的光谱作为有限个要素的线性组合进行建模:

$$r_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + e_1$$

.....

$$r_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + e_m$$

或

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij}x_j) + e_i \quad (1)$$

原因, 是能量测片蚀程度。景观中细沟和沟蚀较明显, 可用摄影或地形测量法较易地得到其发展速度, 而片蚀则是隐伏的。

本文论及的各种方法对估算土壤流失都是适用和需要的。表 3 列出了研究规模及其相应的常用方法。其一部分适于短期调查, 另一些则适于长期目的。令人吃惊的是, 其中一些研究采用了不止一种方法 (表 4 略)。表 4 列出的 16 篇论文中, 10 篇发表于 1986—87 年, 这或许表明了了在单项研究中采用多种方法的一种趋势。

表 2 侵蚀估测规模与测量方法

方 法	时间尺度	空间规模
小 区	> 1 次	1—5000 m ²
风蚀收集器	> 1 次	实验场
侵 蚀 针	> 0.5 年	山坡/实验场
测 平 仪	> 1 次	山坡/实验场
皮尺与盒尺	> 1 次	山坡/实验场
剖面重构	> 10 年?	不限
铯—137	1954 到现在	场地不限
铁—59	< 0.5 年	山坡

石英涛摘译自《Progress in Physical Geography》Vol. 13, No. 2 June, 1989

这里, r_i 为包含一个或更多要素的像元在第 i 个光谱波段的平均光谱反射; a_{ij} 为像元中第 j 个要素在第 i 个波段的光谱反射, x_j 为像元中第 j 个要素的比例值; e_i 为第 i 个波段的残差项; $j=1, 2, \dots, n$ (问题所考虑的要素数目); $i=1, 2, \dots, m$ (传感器系统的波段数)。

因为任何像元中各要素的比例之和必须是 1, 因此, 一个线性限制被增加。另外, 比例值必须是非负的。考虑要素的数目 (n) 小于波段数 (m), 这个方程组是超定方程组, 可以用几种方法求解。本文所描述的方法是利用最小二乘法来计算像元中每一要素的比例。

III. 限制的最小二乘 (CLS) 法 这个方法通过使残差的平方和最小来估计像元内每一要素的比例。比例值必须是非负的, 它们的和必须是 1。为了解决这个问题, 寻找一个准精密的解决方法 (例如赋近似值给变量来满足这个限制的解决方法)。在本研究中, 对提出的方法进行了讨论, 考虑像元内有三个要素。

混合模型 (1) 可以被改写成如下形式:

$$e_i = r_i - \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j) \quad (2)$$

在这个情况下, 需要取极小值的函数是:

$$F = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (3)$$

这里, 对陆地卫星的 MSS 和 TM 来说, m 分别是 4 和 6 波段。现在考虑第一个限制, 即 $x_1 + x_2 + x_3 = 1$, 或 $x_3 = 1 - x_1 - x_2$, 把 x_3 代入 (3), 取极小值的函数变成:

$$F = A_1 x_1^2 + A_2 x_2^2 + A_3 x_1 x_2 + A_4 x_1 + A_5 x_2 + A_6$$

系数 A_1 到 A_6 是反射值 a_{ij} (要素反射) 和 r_i (像元反射) 的函数。

解决这个问题的方法是找出使函数取最小值并且位于阴影线范围内的数值, 阴影线范围, $0 < x_1 < a$, $0 < x_2 < b$ 以及 $x_1/a + x_2/b = 1$, 这里 $a = b = 1$ 。

考虑这个函数取最小值, 为了找这个最

小值, 求偏导数并置零:

$$\partial F / \partial x_1 = 2 A_1 x_1 + A_3 x_2 + A_4 = 0$$

$$\partial F / \partial x_2 = 2 A_2 x_2 + A_3 x_1 + A_5 = 0$$

求 x_1 和 x_2 :

$$x_1 = (A_3 A_5 - 2 A_2 A_4) / (4 A_1 A_2 - A_3^2)$$

$$x_2 = (A_3 A_4 - 2 A_1 A_5) / (4 A_1 A_2 - A_3^2)$$

有 5 种可能的结果 (表 I)。

表 1 方程组解的 5 种可能结果

结果	x_1	x_2	在区域内	重新计划的值	x_3
1	正	正	是	—	$1 - x_1 - x_2$
2	正	正	否	x_1 和 x_2	0
3	负	正	否	x_2 ($x_1 = 0$)	$1 - x_2$
4	负	负	否	$x_1 = x_2 = 0$	1
5	正	负	否	x_1 ($x_2 = 0$)	$1 - x_1$

显示在表 I 中 5 种结果的 x_1 、 x_2 以及 x_3 的计算过程如下:

(1) 求出的数值位于阴影线范围内, 这样, 得出的 x_1 和 x_2 是最后结果, $x_3 = 1 - x_1 - x_2$ 。

(2) 求出的数值位于阴影线范围外, x_1 和 x_2 是正值, 在这种情况下, 限制的最小值在直线 $x_1 + x_2 = 1$ (即 $x_3 = 0$) 上求解。让 $x_2 = 1 - x_1$, 取最小值的函数变成:

$$F = (A_1 + A_2 - A_3) x_1^2 + (A_3 + A_4 - A_5 - 2 A_2) x_1 + (A_2 + A_5 + A_6)$$

求最小值,

$$\partial F / \partial x = 2 (A_1 + A_2 - A_3) x_1 + (A_3 + A_4 - A_5 - 2 A_2) = 0$$

$$x_1 = -(A_3 + A_4 - A_5 - 2 A_2) / 2 (A_1 + A_2 - A_3)$$

如果 $x_1 > 1$, 使 $x_1 = 1$, 如果 $x_1 < 0$, 使 $x_1 = 0$, $x_2 = 1 - x_1$ 。

(3) 求出的数值位于阴影线范围外, x_1 是负值, x_2 是正值, 在这种情况下, 使 $x_1 = 0$, 取最小值的函数变成:

$$F = A_2 x_2^2 + A_5 x_2 + A_6$$

求最小值, 得 $x_2 = -A_5 / 2 A_2$, 如果 $x_2 > 1$, 使 $x_2 = 1$, 如 $x_2 < 0$, 使 $x_2 = 0$, $x_3 = 1 - x_2$ 。

(4) 求出的数值位于阴影线范围外, x_1 和 x_2 是负值, 在这种情况下, x_1 和 x_2 等于零,

$x_3 = 1$ 。

(5) 求出的数值位于阴影线范围外, x_1 是正值, x_2 是负值, 在这种情况下, 使 $x_2 = 0$, 取最小值的函数变成:

$$F = A_1 x_1^2 + A_4 x_1 + A_6$$

求最小值, 得 $x_1 = -A_4/2A_1$, 如果 $x_1 > 1$, 使 $x_1 = 1$, 如 $x_1 < 0$, 使 $x_1 = 0$, $x_3 = 1 - x_1$ 。

限制的最小二乘 (CLS) 法表达了和二次规划相似的概念, 即两者都通过使残差的平方和达到最小来寻求解决方法。

IV. 加权的 最小二乘 (WLS) 法 考虑使一条曲线同有如下形式数据的曲线拟合:

$$R = f(A_1 x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$= x_1 f(A) + x_2 f(A) + \dots + x_n f(A)。$$

从属变量 R 同系统 x_1, x_2, \dots, x_n 是线性关系。尽管有许多曲线拟合的方法, 但最小二乘法可用于许多种曲线拟合问题, 包括不确定系数的线性形式。系数通过使残差的平方和达到最小来确定。这种解法从数学来说是可行的, 但是在某些情况下, 从实际意义上说是无意义的, 是不能接受的 (因为某些限制被涉及, 例如系数必须是非负的, 和为 1)。因此, 它变成一个限制的最小二乘问题, 限制等式 (方程式) 应当加上。为了解决这个问题, 对最小二乘应用权重概念是必要的。

有时, 在一个实验中获得某些数据可以比同一实验中获得的其他数据更准确, 原因是被测变量的变化范围是有差异的, 而使用设备的测量精度往往是一致。在其它情况下, 利用某些额外信息 (事先已知) 使方法同实际联系起来是方便的。这样, 就要求把更大“权重”给那些被认为对问题更准确和更重要的数据。为了使问题的解和实际更密切, 使方法可以接受, 要给某些数据加权重 (例如随加信息)。

在本研究里, $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ 和 $0 < x_1, x_2, x_3 < 1$ 是为了有一个可以接受的解必须满足的条件。然后, 四个方程式被加到方程组 (1), 即一个对应于条件 ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$), 另三个对应于条件 x_j 必须是非负 ($x_j = 1$,

$j = 1, 2, 3$)。为解这个问题, 当限制没有被满足时, 利用一个对角矩阵 W , 该矩阵包含同需要解的方程组有关的权重系数。最初, 沿着矩阵 W 对角线的前 m 个值, 意味着对应的方程式对这个问题的解是同等重要。下一个权重值表示了一个非常大的权重, 它对应于第一个限制 ($\sum x_j = 1$) 的等式, 这个限制必须严格满足。因此, 如果 x_j 值被满足, 即如果它们的值在 $0 - 1$ 范围内, 问题就最后解决了。否则有必要利用叠代过程使所有 x_j 的值在这个范围内, 这个过程通过增加最后三个方程式的权重 (最初它们等于零) 来完成, 每次的增量是小的。问题的解通过使下式的值达到最小来实现, $W_1 e_1^2 + W_2 e_2^2 + \dots + W_{(m+n+1)} e_{m+n+1}^2$, 这里, W_1, W_2 等是权重系数, 是实数, e_1, e_2 等是每个方程式的残差。

这样, 利用 WLS 法来解方程组。这个方法的实施是基于高斯消去法及前后代换法算法。

V. 实验描述 这两个方法在科罗拉多州立大学森林计算机应用实验室中 VA×11/750 上实验。

在本研究中, 选择了几个小的研究子区显示这两个方法的运用。选择的研究区域位于圣保罗州的莫吉—高库市, 南纬 $22^\circ 15'$, 西径 $47^\circ 10'$, 主要是松树和桉树种植园。圣保罗州森林研究所凯皮宁赫松树实验站 (IFSP) 和切姆品纸浆厂和纸张公司 (CCP) 的圣塔坦勒津赫桉树种植园也位于这个区域。分类是: 湿地松, 除湿地松外的其它松树, 树龄从 8 个月到 2 年的桉树和树龄大于 2 年的桉树。

混合的反射数据从陆地卫星上得到, 要素的反射值从其它文献中获得。混合模式中利用的反射数据通过对陆地 MSS 数据转换得到。CLS 和 WLS 法应用到本研究区的桉树种植园。混合像元中被考虑的三种要素是: 桉树, 土壤 (树下) 和阴影。由于要素的光谱信号从同一 MSS 图像中提取, 它们可以在利用这个模型时应用。如果要素的光谱信号是

80年代美国国际汽车贸易空间结构

Barney Warf

国际汽车贸易的重要性不仅在于它影响着全球及美国经济,而且它还造就了一门富有特色的与产品空间结构相联系的地理学。汽车及其零部件的进出口对美国个别地区产生了巨大的经济影响。船业公司、公路和铁路运输公司、航空部门、贸易货栈、装卸工人、保险公司等都从汽车贸易收入中获取了利益。公共管理机构诸如港务局、联邦海关行署等

地从中抽取部分税额。汽车贸易格局的变化反映了美国的宏观经济政策及其在国际竞争中的竞争水平,极大地影响着美国80年代口岸之间的整体贸易结构。全球汽车贸易之巨大、对专业口岸及其商号之重要,使各州、市等行政单元之间的竞争在过去十年中急剧加快。有些口岸象杰克森维尔、佛罗里达专门设立了为汽车贸易而建设的设施。

在不同条件下从野外或实验室测量或是多时相的卫星数据;在应用这个模型前应对数据进行校正。

根据CLS和WLS方法得出的分要素图像包含像元内要素比例的信息。在本实验中,分要素图像(阴影图像)包含像元内阴影要素的信息。阴影要素和其它要素的结果值要换算成0—255之间的数值。

这两种方法通过比较产生的阴影图像(目视及产生差值图像)和比较它们在运行时所需的机时来评价。

表II CLS和WLS方法机时比较

研究子区的大小(像元)	时机	
	WLS	CLS
50×50	9分44秒	3分51秒
25×55	15分14秒	2分9秒
28×32	9分15秒	1分38秒
32×32	3分55秒	1分46秒
30×40	4分57秒	1分55秒
32×50	5分48秒	2分21秒

VI. 结果 桉树林研究区。应用限制的最小二乘法和加权的最小二乘法所需的机时表示在表II。

从表中可以看出,两种方法机时的变化是不同的。CLS方法随着分析图像尺寸的变化,机时也有规则的变化,而WLS方法是不

规则变化,表明它对图像的特征更加敏感。根据这两种方法的特点也可以解释,即CLS方法是利用一个准紧密的解法,而WLS方法是基于迭代处理。

研究区分别用两种方法得出的结果具有好的一致性。比较CLS和WLS方法得出的分要素图像(阴影图像)同地面的真实信息,可以看出,这个图像同林冠结构有关,在这里,是由种植桉树的不同树龄产生。图像显示了幼龄桉树有较少的阴影(深灰)比成熟桉树(浅灰),野外检验发现由于植被的高度成熟桉树林具有更大的不均匀性。

VII. 结论 两种方法(CLS和WLS)都使用了最小二乘概念解决线性混合模型;即寻找解决方法使残差平方和最小。WLS方法,从数学上来说更加精确,但是CLS方法具有运行速度比WLS快的优点。尽管只表示了阴影这一种分要素图像,但这两种方法都能产生混合像元内任何一种要素的图像。实验所产生的阴影图像显示了利用遥感多光谱数据最小二乘模型的一个可能应用。分要素图像(阴影图像)同树冠结构有关,这里,树冠结构是由于种植桉树的树龄差异所引起。

吴健平译自《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》, Vol. 29, No. 1, Jan, 1991, 张立 校