

卫星遥感数据的像元地面反射率反演计算*

李先华 黄雪樵 王小平

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)
(水利部)

池天河

(中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室)
(国家计划委员会)

刘毅

(中国科学院遥感应用研究所)

1992年11月10日收稿

摘 要

本文探讨了一种在卫星遥感数据地面辐射改正的基础上,利用少量离散分布的观测数据逐点的计算研究区域卫星像元地面反射率的方法。该项研究在遥感应用基础和山地辐射状况的研究中有重要意义。

关键词 遥感 反射率 反演

地物反射率(波谱特性)的测定研究是遥感器工作参数的选择、遥感试验策划、地面目标特征信息提取和遥感图像处理分析等工作的必要依据和基础。它理所当然地受到了国际遥感界的重视与优先发展

利用卫星遥感数据进行像元地面反射率的逐点反演计算,比起使用仪器进行逐点实地测定的传统方法有着不言而喻的优越性。同时在地面辐射研究中该方法有着重要的意义。

一、卫星遥感数据的像元地面反射率计算原理、方法及条件

利用水平地面的若干参数的实测点值计算各像元点地面水平时的对应参数值;利用水平地面的像元遥感数值与像元地面反射率之间的定量关系,逐点反演计算各像元地面反射率。其原理、方法与条件叙述如下:

* 本文是国家重点实验室(中国科学院地理研究所资源与环境信息系统实验室)基金课题:“卫星遥感信息的地形、大气影响及计算机修正模型”的部分研究内容和国家引进国外人才办公室资助项目:“遥感数据的地面辐射场研究”。

1. 卫星遥感数据的像元地面反射率计算原理和方法

CCT 记录的像元遥感数据 (DN_{ij}) 与地面光谱辐照度 H_{ij} 、像元地面反射率 R_{ij} 、像元大气光谱透过率 τ_{ij} 以及大气程辐射遥感值 D_{Aij} 、有如下关系^[1]:

$$DN_{ij} = K \cdot R_{ij} \cdot \tau_{ij} \cdot H_{ij} / \pi + D_{Aij} \quad (1)$$

式中: K 为 MSS 系统所固有的比例系数。

由公式(1)则有像元地面反射率反演公式

$$R_{ij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot \pi / K \cdot \tau_{ij} \cdot H_{ij} \quad (2)$$

由公式(2)可知: 欲通过像元遥感数值计算像元地面反射率, 必须知道该像元的地面辐照度、大气透过率和大气程辐射遥感值。

一般而言, 像元大气透过率、大气程辐射遥感值和水平地面辐照度在研究区域内都是连续变化的物理量, 它们都可通过已知的离散分布的点值进行适当的插值处理来得到。由于采用这样的处理方法得到的是水平地面上的辐射度(由于地形影响, 非水平地面上的辐照度及其各分量都不是连续变化的量, 不能通过简单的插值处理得到), 这时的像元遥感数值必须是地面水平时的遥感数值。而非水平地表像元的水平地表遥感数值可通过地形改正(包括云层阴影修正)得到^[1]。

进行卫星遥感数据的像元地面反射率反演计算的流程图如下:

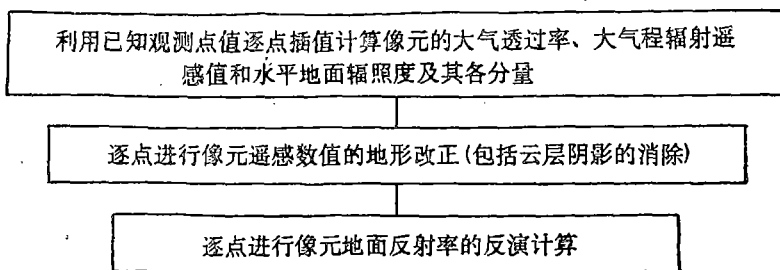


图1 计算流程图

Fig. 1 Procedure of inverse computation of ground albedo

2. 进行遥感数据的地面反射率反演计算的条件

如上所述, 要进行卫星遥感数据的地面反射率的反演计算, 应该首先计算像元各项有关参数, 同时进行卫星遥感数据的地形改正。为保证这两步的完成应满足如下条件:

(1) 为简化计算, 研究区域地表满足朗伯假定;

(2) 研究区域地形业已数字化并且与对应卫星像片相匹配;

(3) 离散分布在水平地面上像元点(不少于9点)的有关参数实测值(同步或准同步)已知。它包括: 大气透过率, 大气程辐射遥感值和水平地面上的辐照度及其各分量(主要是直, 散射辐射)。

二、地面反射率反演计算中的几个参数

像元大气透过率, 大气程辐射遥感值和水平辐照度及其分量都是像元地面反射率反演计算中必不可少的参数。前两个参数是与大气状况有关的物理量, 它们都受大气中气溶胶含量、种类和大气成份的影响。而水平地面照度(直射, 散射)也与它们直接相关。在遥感信息处理中它们通常以如下方法取得: 文献[2、3、4]给出了求大气透过率 τ 的图表法, 文献[1]、[5]给出了求 D_A 近似值方法。它们的不足之处在于假定整个区域上为一常数, 这通常是难以满足的。这里分两种情况讨论:

1. 大气状况均匀的小区域像元 τ 和 D_A 计算

设水平(或地形条件相同)地面小范围(一般不大于 $80 \times 60\text{m}^2$) 内有两种非同类像元(如草场、水域) P_1 、 P_2 其对应遥感数值、地面照度、地面反射率和程辐射遥感值分别由(1)式有:

$$DN_1 = K \cdot \tau_1 \cdot H_2 \cdot Y_1 + D_{A1}$$

$$DN_2 = K \cdot \tau_2 \cdot H_2 \cdot Y_2 + D_{A2}$$

由于范围很小, 大气状况可视为均匀, 加之地面水平, 则有:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau$$

$$H_1 = H_2 = H$$

$$D_{A1} = D_{A2} = D_A$$

上面方程组可改写为:

$$DN_1 = K \cdot \tau \cdot H \cdot \gamma_1 + D_A$$

$$DN_2 = K \cdot \tau \cdot H \cdot \gamma_2 + D_A$$

解之可得:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{DN_1 - D_A}{DN_2 - D_A} \quad (3)$$

$$\text{或: } D_A = DN_1 - \gamma_1(DN_1 - DN_2)/(\gamma_1 - \gamma_2) \quad (4)$$

公式(4)的意义是: 相邻非同类水平两像元如果任一像元反射率和程辐射遥感值已知, 则另一像元地面反射率便可由(4)式得到(图2)。

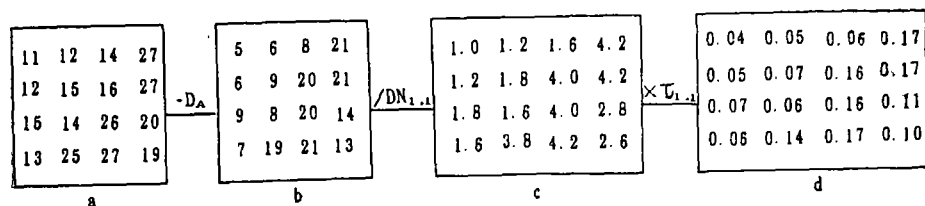


图2 小区域地面反射率反演计算示意图。

Fig. 2 An example of inverse computation of ground albedo

图 2 中 a 为河滨小区域 MSS 4 波段卫星像片原始亮度图, 该区地地平坦、实地同步测得像元 $P_{1,1}$ (水体) $P_{2,2}$ (冲积土河滩地) 的对应地面反射率分别为: $\gamma_{1,1} = 0.04$ $\gamma_{2,2} = 0.07$

$$\begin{aligned} \text{由公式(4)得: } D_A &= DN_{1,1} - \gamma_{1,1} \times (DN_{1,1} - DN_{2,2}) / (\gamma_1 - \gamma_2) \\ &= 11 - 0.04 \times (11 - 15) / (0.04 - 0.07) = 6 \end{aligned}$$

对 a 实施大气程辐射修正: $DN_{ij} - D_A$ 则得到数字图像 b; b 中每个像元亮度值除以 $DN_{1,1}$ 得到数字矩阵 c (即 $(DN_{ij} - D_A) / DN_{1,1}$), 矩阵每个元素乘以 $\gamma_{1,1}(0.04)$, 即得到与该区域对应的像元地面反射率所组成的数字矩阵 d。如果同步测到地面 4 波段辐射照度 $H = 23.80$ (毫瓦/厘米²)

则由公式(1)有该区域大气透过率:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot \pi / K \cdot \gamma_{ij} \cdot H_{ij} \\ &= (11 - 6) \times 3.14 / 25.40 \times 0.04 \times 23.80 = 0.65 \end{aligned}$$

MSS 4 波段最大亮度为 2.48 毫瓦/厘米² · 立体角(低增益), 则有:

$$\begin{aligned} 63 &= K \times 2.48 \\ K &= 25.40 \end{aligned}$$

假设实测得该区域像元地面(精度检验点)反射率: $\gamma_{3,1} = 0.07$; $\gamma_{2,3} = 0.08$; $\gamma_{2,2} = 0.17$

则所得地面反射率绝对误差的均值由下面公式给出:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{N} \sum_{L=1}^N |\gamma_L - \gamma'_L| \\ &= \frac{1}{3} (|0.06 - 0.07| + |0.06 - 0.08| + |0.16 - 0.17|) \\ &= 1.33\% \end{aligned} \quad (5)$$

γ_L, γ'_L 分别为精度检验点像元地面反射率计算值和实测值。N 为检验点个数。

2. 非均匀大气条件下的有关参数计算

对于大气状况均匀的, 地势平坦的小范围区域可采用前面介绍的方法, 利用几个点的实测值便可计算反演地面反射率所需的全部参数。对于地形复杂, 大气状况非均匀的区域, 该法不适用。对于这种情况, 我们采用以下方法处理。

(1) 首先在研究区域内, 选择符合条件的小区域(以点状、小块状离散分布在大气状况非均匀区域中), 使用前面的方法计算像元上各项所需参数。

(2) 利用小区域(或像元点)上已知(计算和实测)的各项参数, 插值计算大气状况非均匀区域内所有像元点的有关各项参数。

插值算法很多, 通常采用二次曲面拟合插值法, 近点按距离加权平均法、加权最小二乘拟合法等方法。

插值的精度, 除算法外主要取决于研究区域各项参数变化的复杂程度, 实测点的数量与几何分布、真实地表与朗伯体的近似程度等因素。

应该指出,采用插值算法的先决条件是:

计算的各项参数在该区域内是个连续变化的量。但是由于光辐射在起伏地表上的再分配(特别是有山体和云层阴影时)计算的各项参数一般不都是连续变化的量。因此,这时得到的还不是像元真实地面上的各项参数。它们仅能符合地面平坦且无云层阴影,大气状况均匀的情况。换言之,这时还不能利用它们进行卫星遥感数据的地面反射率的反演计算。

三、卫星遥感数据的地形改正

由于地表所在地形环境和地表与太阳的相对位置和几何取向等原因使得同一时刻的光辐射在起伏的地表上产生了再分配。有了这样的再分配,在不同地形条件下,坡度、坡向不同的地表上光辐射的强度是不尽相同的。将不同辐射条件下 CCT 磁带所记录的遥感数据转换为相同辐射条件下(地表水平)的遥感数据,便是遥感数据的地形改正。

为了使像元遥感数据与插值算出的各项参数相匹配,以便进行遥感数据的地面反射率的反演计算。因此遥感数据的地形改正是十分必要的。

1. 卫星遥感数据的地形改正原理和方法

粗略的遥感数据地形改正,仅考虑受地形影响的地表光辐射两个主要分量(直射和散射)。它要求的条件不很严格,其原理、方法以及所要求条件见文献[1]。

经地面辐射改正后的某像元遥感值[1]:

$$DN'_{ij} = (DN_{ij} - D_A) \cdot (1 + L) / (FG \cdot L) + D_A \quad (6)$$

式中: DN_{ij} 为像元原始遥感数值; D_A 、 L 、 F 、 G : 分别为像元程辐射遥感值,水平地表上天空散射光与直射光强度之比; F 为直射光改正系数; G 为天空光改正系数。对不同像元来讲它们都是变量,因此经大气程辐射、地形改正后的像元遥感值可写为:

$$DN''_{ij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot (1 + L_{ij}) / (F_{ij} + G_{ij} \cdot L_{ij}) \quad (7)$$

由于云层阴影的存在使得地表辐射中直射光分量为零,造成区域地表辐射的非连续变化。云层阴影消除公式由[1]:

$$DN''_{ij} = DN'_{ij} - D_{Aij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot (1 + L_{ij}) / L_{ij} G_{ij} \quad (8)$$

2. 关于遥感数据地形改正的几点说明

由于文献[1]仅从遥感图像室内处理的角度来解决遥感数据的地形改正问题,没有引入野外实测参数,将像元大气程辐射遥感值 D_A 和水平地面上的散射,直射辐照度之比 L 都按常规作了简化处理(整个处理区域为常数)。事实上它们在整个区域上一般来讲是个连续变化的量,可利用离散分布的已知观测值通过插值运算而得到。由文献[1]得:

$$F_{ij} = 1 - (\operatorname{tg} l_{ij} \cdot \operatorname{ctg} \theta_{ij} \cdot \cos w_{ij})$$

式中: $\operatorname{tg} l_{ij}$ 为像元所在地表的坡角; $\operatorname{ctg} \theta_{ij}$ 为太阳高度角; $\cos w_{ij}$ 为该地表坡向与太阳方位角之夹角。它们都可以从与卫星像片匹配的数字地形图得到。

而像元散射辐射改正系数: G_{ij} 为像元 P_{ij} 天空散射光照立体角与水平地面上天空

散射光照射立体角之比。

数字地形图上 G_{ij} 的计算方法详见文献[7]。

四、卫星遥感数据的像元地面反射率的反演

前面通过插值的运算得到了研究区域每个像元点上水平地面的各项有关参数; 通过遥感数据的地形改正得到该区域各像元点地面呈水平状态时的遥感数据。有了这些准备便可以进行卫星遥感数据的地面反射率的反演计算。

1. 卫星像元地面反射率反演计算

由公式(1)可求得卫星像元地面反射率反演计算公式:

$$\gamma_{ij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot \pi / K \cdot \tau_{ij} \cdot H_{ij} \quad (9)$$

这里由于地面辐照度 H_{ij} 是由观测点值插值得到的水平地面辐照率 H_{ij} 与此对应的像元遥感值应为地形改正后的像元遥感值 DN''_{ij} 而经大气程辐射修正后的像元遥感值 DN''_{ij} 由(8)式给出, 因此有

$$\begin{aligned} \gamma_{ij} &= DN''_{ij} \cdot \pi / K \cdot \tau_{ij} \cdot H_{ij} \\ &= (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot (1 + L_{ij}) \cdot \tau / K \cdot L_{ij} \cdot H_{ij} \cdot (F_{ij} \cdot G_{ij} \cdot L_{ij}) \end{aligned} \quad (10)$$

如果像元地面被云层阴影遮挡则由(8)式有:

$$\gamma_{ij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot (1 + L_{ij}) \cdot \pi / K \cdot \tau_{ij} \cdot H_{ij} \cdot L_{ij} \cdot G_{ij} \quad (11)$$

这样实施地面反射率反演计算的步骤是:

首先判断卫星像片中云层阴影: 若像元是云层阴影则用公式(11)进行地面反射率反演计算, 反之则用公式(10)进行, 逐点按以下步骤进行便可完成该区域每个像元点的反演计算。

云层阴影的判断原则是:

$h_{ij} \geq \theta_{ij}$ 则像元 P_{ij} 是云层阴影, 反之则反。 h_{ij} 在太阳照射方向上, 为像元点与地面任一点连线与水平地面最大夹角, h_{ij} 可由数字地形图算出; θ_{ij} 为像元点上太阳高度角。

2. 像元地面反射率反演计算的改进

非水平地面多少都会受到来自周围地表的反射辐射, 它主要来自邻近的坡面, 亦称为邻坡反射。一般情况下邻坡反射强度不大, 仅占地表辐照度总量 5% 左右, 常略去不计。但是如果周围地面是冰雪等高反射率的物体时邻坡反射可达到地表总辐射量的 20% 左右的量级, 这时它的影响就不能忽略了。同时邻坡反射是受周围地形、下垫面种类与坡面自身距离、相对几何取向等因素制约的。它们区域变化是随机的、非连续的, 因此它是不能用前面介绍的方法通过插值计算得到。

这样, 在遥感数据的地形改正中应有邻坡反射影响消除的内容, 其原理方法见文献[6]。

其公式为: $DN''_{ij} = (DN_{ij} - DN_{Aij} - D_{Rij}) \cdot (1 + L_{ij}) / (F_{ij} + G_{ij} \cdot L_{ij})$ (12)
式中: D_{Rij} 为像元 P_{ij} 邻坡反射辐射的遥感数值, 其计算方法原理见文献[6]。

邻坡反射影响的消除,除了其算法复杂运算量大以外,主要困难是必需知道研究区域内各种下垫面的反射率,而地面反射率的计算正是本文所要解决的问题。在此以前几乎所有有关文献都对此回避。

这里,我们建议在邻坡反射较强其影响不容忽视时可采用迭代算法来反演计算地表反射率,并逐次逼近其真值。显然,这将大大增加其运算量。

为了叙述方便,这里称只含直、散分量的遥感数据的地形改正称为粗改正,利用它进行的像元地面反射率的反演计算方法称为粗算法。反之将考虑了直、散、邻坡反射等辐射的反射率反演计算称为精算法。精算法的原理及方法如下:

首先进行遥感数据的粗改正,利用它反演计算得到像元地面粗反射率 r^0 , 将 r^0 与同各点实测值(未参加运算,用于精度检验) r 相比较,如果其误差小于规定域值 ε 则认为粗算法精度满足要求、地面反射率的反演计算成功,便可退出运算。否则,便利用所得到的 r^0 进行遥感数据的精改正,再将其结果用于地面反射率的反演计算得到 r^k , 再将 r^k 与 r 相比较……如此反复迭代计算地面反射率使其逐次逼近地面反射率的“真值” r , 直至得到的地面反射率满足要求后方退出运算。最终完成遥感数据的地面反射率的反演计算(图 3)。

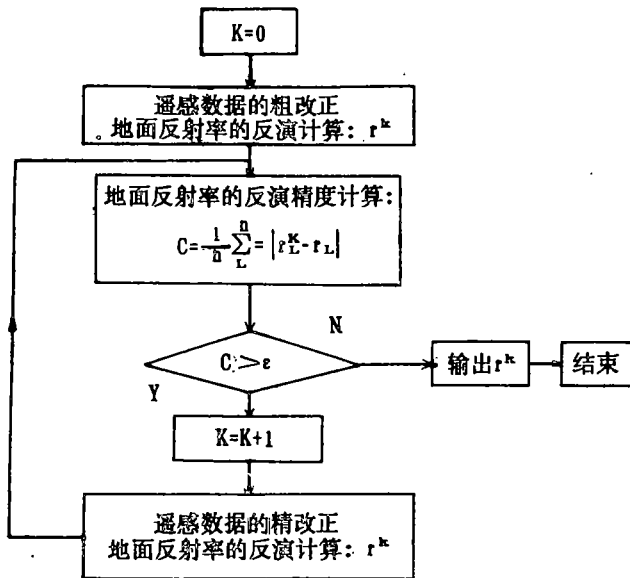


图 3 改进算法的计算框图

Fig. 3 Improved procedure of inverse Computation of ground albedo

n 为地面实测的精度检验点个数。

3. 方法讨论

以往关于地面反射率的反演计算都未考虑地面起伏与大气非均匀状况, 本文所讨论的方法是建立在地形改正, 大气程辐射与大气透过率逐点计算的基础上的, 并且进一步考虑了邻坡反射的影响, 同时通过迭代算法提高了地面反射率反演计算的精度。这是对已

有方法的改进和创新。

另外由于通常真实地表面并不完全满足朗伯假定,地面反射率具有二向性。这样,势必影响像元地面反射率的反演计算精度,这时的像元地面反射率可考虑用下面方法进行反演计算:

(1) 利用卫星像片各像元地面水平时的散射辐射遥感值进行像元地面反射率的反演计算。其主要理由是: 其一水平地面上的天空散射光是一个连续变化的物理量, 可满足插值计算条件。其二天空散射光可视为各向同性, 在其照射下地物反射率无二向性。各像元地面水平时的散射辐射遥感值的取得见文献[7]

(2) 利用卫星像片各像元直射辐射遥感值进行像元地面反射率的反演计算: 对地物二向性进行研究, 并在其基础上建立一个各向异性的反射率反演模型: $\gamma_{hij} = f(\theta, A, \alpha, W)$ 。各像元的直射光辐射遥感值和太阳高度角 θ 、方位角 A 的取得见另文, 像元地面的坡度 α , 坡向 W 从与卫星像片相匹配的数字地形图中获取。散射光辐射、直射光辐射下的反射率的反演方法步骤(除建模以外)与前面相似。

(3) 自然光(散射、直射)照射下的卫星像片像元地面反射率 γ_{ij} , 为上述二者的加权平均值:

$$\gamma_{ij} = (D_{ij} \cdot \gamma_{Dij} + \bar{S}_{ij} \cdot \bar{\gamma}_{Sij}) / (D_{ij} + S_{ij}) \quad (13)$$

式中: γ_{Dij} 是像元 P_{ij} 地面在散射辐射 D_{ij} 照射下的散射光反射率; $\bar{\gamma}_{Sij}$ 是像元 P_{ij} 地面在直射辐射 \bar{S}_{ij} 照射下的直射光反射率, 由于二向性它们应是矢量。

显然, 将地面自然光及其遥感值分解成太阳直射光, 天空散射光及其对应的遥感值, 避免了两种不同光学特性(有方向性、与无方向性)的光及其遥感值的相互混淆和影响, 对深入研究和了解地物二向性特性, 提高像元地面反射率反演精度有着积极的意义。

参 考 文 献

- [1] 李先华, 遥感信息的地形影响与改正, 测绘学报, 测绘出版社 15 卷 2 期 107 页, 1986 年 5 月。
- [2] 阎守邕, 童庆禧编译, 地球资源技术卫星, 科学出版社, 102 页, 1980 年。
- [3] (美) P、H、斯韦恩、S、M 戴维主编, 遥感定量方法, 科学出版社, 22 页, 1984 年 4 月。
- [4] (日) 卡农公司图像研究室编辑, 遥感技术的发展及应用研究, 科学出版社, 135 页, 1983 年 9 月。
- [5] (美) P、H、斯韦恩、S、M 戴维主编, 遥感定量方法, 科学出版社, 79 页, 1984 年 4 月。
- [6] 李先华等, 遥感数据的地面反射辐射计算与改正, 遥感技术与应用, 遥感与地理信息系统专刊, 20—23 页, 1991 年。
- [7] 李先华等, 遥感数据的地面散射辐射计算与改正, 遥感技术与应用, Vol. 7/No. , 16--22 页, 1992 年 1 月。

Inverse Computation of Ground Albedo from Remotely Sensed Data

Li Xianhua Huang Xueqiao Wang Xiaoping

(Institute of Mountain Disaster and Environment, Chinese Academy of Sciences)

Chi Tianhe

*(National Laboratory of Resources and Environment Information System,
Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences)*

Liu Yi

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This paper presents a method of computation of ground albedo for satellite image pixel with a few scarcely distributed ground data based on radiance correction of remotely sensed data. Firstly, a number of known ground data, including atmospheric transmittance, path radiance component of the value of remote sensed data and ground horizontal radiance for each pixel are used. Then, terrain effect on remote sensing value of each pixel is corrected with DTM. Last, inverse computation of ground albedo is conducted with the corrected data.

Key words Remote sensing Albedo Computation