

基于 RADARSAT SAR 估测热带人工林叶面积指数研究

高帅^{1,2}, 牛铮¹, 刘晨洲^{1,2}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 研究了雷达后向散射系数 σ^0 与热带人工林叶面积指数(LAI)的相关性。通过对水云模型的修正,提出了一种半经验性的估测热带人工林叶面积指数方法。利用 Radarsat-1 SAR 数据对广东雷州人工林进行实验,验证表明,其主要林种的估测相关系数 R^2 接近 0.5。该方法充分考虑了森林的特点以及雷达成像的特性,对于估测多云雨地区热带森林叶面积指数具有一定的参考价值。

关键词: 水云模型; 叶面积指数(LAI); 合成孔径雷达(SAR); 后向散射系数; Radarsat

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2008)04-0035-04

0 引言

叶面积指数(LAI)是陆面过程中的一个十分重要的结构参数,是表征植被冠层结构最基本的参量之一,在植被的光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等研究中具有重要的作用^[1]。在多云雨的热带森林地区,由于水汽、云等条件的影响,难以获得高质量的光学影像,因此,如何借助于微波遥感的特点,获得微波估测森林叶面积指数的方法成为对广大遥感工作者的一大挑战。

在微波遥感中,前人很早就关注于植被结构参数与雷达后向散射系数关系的研究。水云模型(Water Cloud)首次将雷达的冠层后向散射与植被含水量及高度等结合起来^[2],从而对雷达后向散射系数与农作物参数的相关关系做了较好的描述。1984年, Ulaby 等通过对在美国堪萨斯冬小麦、玉米及高粱等作物的研究,将 LAI 引入到水云模型中,取得了较好的效果,各种作物相关系数 R^2 分别达到 0.62(玉米)、0.74(高粱)和 0.90(小麦)^[3]。此后,陆续有学者利用星载雷达数据对作物雷达后向散射系数与 LAI 的相关性进行了研究,Paloscia 在对意大利中部农作物研究表明:L、C、P 波段都与 LAI 有一定的相关性,通过对不同波段的组合建立与叶面积指数相关的雷达后向散射模型,取得了较好的效果^[4]; Y Inouea 研究了水稻田在多频段(Ka, Ku, X, C 及 L)、多极化及多入射角情况下的后向散射

系数变化,表明 C 波段在作物成熟前对作物生长敏感,并建立了相关关系^[5]; L E A Dente 在意大利南部地区的研究中就利用了 C 波段不同极化方式的比值信息^[6],建立与小麦叶面积指数的关系并以此进行了小麦产量的估算。

研究表明,雷达后向散射系数与植被的 LAI 确实存在着相关性,C 波段尤其显著,但以往研究主要集中在农作物上,并且大多数模型对 SAR 散射的机理没有较好地描述,而在森林的 LAI 与 SAR 散射关系的研究上并没有可以借鉴的方法。基于前人的研究成果,本研究试图通过机理性的 MIMICS 模型(Michigan Microwave Canopy Scattering Model)^[7]的模拟,分析雷达后向散射系数与森林叶面积指数的相关性,从而对广泛应用的水云模型进行修正,使之适应森林地区的特点。

1 研究方法

1.1 模型研究

Ulaby 等人认为,均匀植被冠层的雷达后向散射可以简单分为 3 个部分:植被本身的直接散射、土壤背景的散射及二者之间相互作用的二次散射。在对植被叶片进行了大小均一球分布的假设后,根据光线在云粒与雨滴中的传播规律,提出了适用于植被的水云模型。1984年,将 LAI 因子引入到水云模型后,其标准形式表述如下:

$$\sigma_{\text{can}}^0(L) = A' L^n [1 - \exp(-\alpha' L)] + C' \exp(-\alpha' L) \quad (1)$$

式中, σ_{can}^0 为冠层上总的散射; 等式右边前一项是植被散射, 后一项是土壤散射; L 为叶面积指数; A'_i, C'_i 分别为植被直接散射与土壤直接散射常数; α'_i 为与水分相关的常数项; n 为对不同作物的调整因子, $n=0$ 时为玉米跟高粱的情况, $n=1$ 时为小麦的情况。以后陆续有学者对水云模型做过一些修正, 从而在不同农作物的研究中得到广泛的应用。

尽管如此, 经验模型还是有对散射机理的描述性差及适用范围有限等缺点, 因此各种机理模型得到广泛应用, 尤其是各种辐射传输模型, 如 MIMICS 模型、KARAM 模型^[8] 及 SUN 模型^[9] 等。这些模型将树林的各个部分(树冠、树干、地表等)模拟成具有一定形状和分布的散射体。例如, 树冠层由介电圆柱体(代表枝干跟针叶)和介电圆盘(代表树叶)构成, 树干层由介电圆柱体构成; 而粗糙地表则根据地表类型含水量等的不同, 应用不同的地表模型^[10] 模拟, 例如几何光学模型、物理光学模型和小扰动模型等。这些模型大多是由辐射传输理论推导而来, 符合电磁波传播的规律, 同时又经过了大量的地面实验验证, 从而使得模型具有很强的适应性。

1.2 水云模型的修正

本研究使用 MIMICS 模型来模拟研究区的森林散射, 从而确定森林地区水云模型的适用条件。

MIMICS 模型的重要输入参数如表 1 所示。关于传感器及森林结构参数是实测结果, 而地表参数则借鉴前人的研究成果, 具体见参考文献[7, 11]。

表 1 MIMICS 模拟数据重要输入参数

类别	参数	数值
地表参数	频率/Hz	5.3
	体积含水量	0.33
	表面均方差高度/cm	2.0
	表面相关长度/cm	8(7~9) ^①
树干参数	重量含水量	0.5
	重量含水量	0.8
叶片参数	叶片直径/cm	2.5
	叶片厚度/cm	0.06
	重量含水量	0.4
树枝参数	树枝干密度/kgm ⁻³	0.1
	树枝密度/m ⁻³	9.2
	树枝直径/cm	3.5
	树枝长度/cm	72.5
环境因素	温度/°C	24
	重量含水量	0.8
针叶参数	长度/cm	10
	直径/cm	0.25

①注: () 中为取值范围。

图 1 为模拟的结果图, 模拟叶面积指数与雷达后向散射系数的相关关系, 图 1(右)为选取左图中部分参数进行局部放大图。

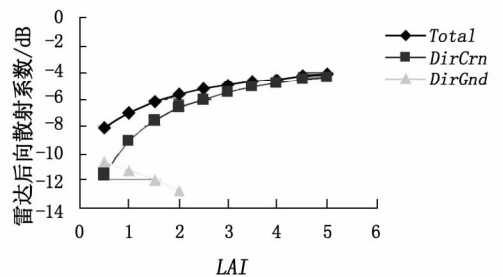
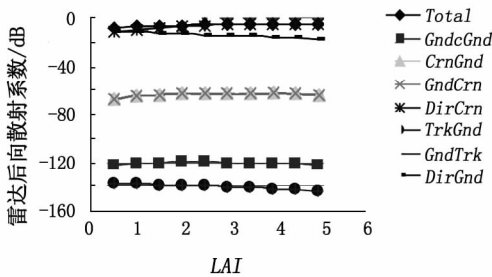


图 1 模拟的雷达后向散射系数与叶面积指数的关系(右图为局部放大)

(GndcGnd: 微波穿过冠层经过地表镜面反射到达树冠层, 再经冠层散射回的电波再经过地表镜面反射穿过冠层; CrnGnd: 微波经过树冠层的散射, 经过地表反射穿过冠层的部分; GndCrn: 同 CrnGnd 项, 但方向相反; DirCrn: 微波与树冠层相互作用, 由树冠层散射到空中; TrkGnd: 微波经过树冠层透射到树干上, 经树干地表散射后穿过冠层; GndTrk: 与 TrkGnd 相同只是微波与地表、树干作用的顺序关系不同; DirGnd: 地表的直接散射)

模拟研究表明, 森林冠层上总的雷达后向散射 (Total) 主要来自冠层的直接散射 DirCrn 与地表的直接散射 DirGnd, 如图 1 所示, 其它几个部分贡献较少, 当叶面积指数接近 0.5 时, DirCrn 与 DirGnd 几乎相等; 而随着 LAI 的增大, 森林的雷达后向散射可以认为主要为 DirCrn, 并且其后向散射系数与 LAI 近似成指数关系, 这与前人在农作物中的研究是一致的, 表明在森林中也可以应用水云模型来近似模拟森林的的后向散射。

为了反演的方便, 针对研究区域和研究特点, 用冠层直接散射近似代替冠层上的散射。在本研究区, 水云模型可以近似表述为:

$$\sigma_{can}^0(L) = A'_i [1 - \exp(-\alpha'_i L)] \quad (2)$$

在本研究中, 人工林主要分布在入射角为 37°~39° 的范围内, 当不考虑入射角度变化的情况下, 式(2)的修正模型近似符合图 1 的模拟分析, 但是模型模拟并没有考虑森林各个生长周期的影响。前人的研究表明, 森林的雷达后向散射系数与树龄有很强的线性相关关系, 并且在 4~17 a 的成林或过

对于森林来讲, LAI 一般比较大 (>0.5), 同时

林尤其显著^[12]。树龄间接反映了森林的冠层含水量,结构等信息,这与雷达的后向散射直接相关。因此,在进行反演时必须考虑将树龄分组,或者直接在修正模型中添加树龄影响因子。研究表明,树龄与后向散射一般成线性关系,由于 A'_i 为常数项,因此将此因子放入指数项前做一限制,得到

$$\sigma_{can}^0(L) = A'_i [1 - Y \cdot \exp(-\alpha'_i L)] \quad (3)$$

式中, Y 为树龄相关因子。

$$LAI = -\frac{1}{\alpha'_i L} \ln\left(\frac{A'_i \cdot Y - \sigma_{can}^0}{A'_i \cdot Y}\right) \quad (4)$$

式(4)中各项意义与前相同。在研究区中,对于同一树种, α'_i 和 A'_i 可以认为是常数。以下将利用上式中的近似公式来估算森林的 LAI 。

2 实验验证

2.1 研究区概况

研究区域位于广东省雷州林业局辖区,隶属雷州、遂溪及廉江等5个县市。属热带海洋季风性气候,高温多湿,年降雨量近2000 mm,且集中在5~8月。该地区的主要树种为尾叶桉、刚果12号桉、尾细桉、雷1桉、湿地松及加勒比松等。林区南部平坦,大部分小班为无坡,北部靠近山区,有一定的地形起伏^[13]。

2.2 数据获取及处理

地面实测数据为林场2002年普查数据,包括小班树种、造林年度、公顷株数、郁闭度、平均高、平均胸径、公顷蓄积、地形、坡位、坡向、坡度、海拔、小班蓄积、散生蓄积、枯倒蓄积、杉蓄积、小班面积及龄组等,小班的叶面积指数可以由实测的郁闭度的值得到^[11, 14],所有属性数据输入到GIS中进行管理。

所用遥感影像为Radarsat-1 SAR数据,获取时间为2002年9月17日,为降轨成像,成像模式为W2,产品类型为SGF,其具体参数如表2所示。

表2 Radarsat-1 SAR数据的主要参数

参数项	内容
波段	C
极化方式	HH
入射角范围	30.1°~38.9°
中心位置	21.38N, 110.81E
视向	东西向偏北12°
分辨率	30 m

雷达数据的处理包括几何校正与辐射定标两个部分,均在ERDAS软件支持下完成。通过控制点拟合三次多项式进行几何校正,误差控制在1像元之内,从而和森林普查的矢量数据叠加显示处理。

利用产品头文件中包括的查找表文件(LUT),获得进行Radarsat SAR图像辐射定标的所有参数,完成图像辐射标定工作,具体可以分为如下2个步骤:

第1步,将像元的DN值转换为亮度值 β^0 ,即

$$\beta_j^0 = 10\lg[(DN_j + a_3)/A_j] \quad (5)$$

式中, β_j^0 是第 j 像元的亮度值; DN_j 是雷达图像第 j 像元的亮度值; A_j 是第 j 像元的增益; a_3 是固定的偏移量,这些参数可以从辅助数据文件中获取。

第2步,将 β^0 转换为雷达图像后向散射系数 σ^0 ,即

$$\sigma_j^0 = \beta_j^0 + 10\lg(\sin I_j) \quad (6)$$

式中, σ_j^0 是 j 像元对应的后向散射系数; I_j 是 j 像元的瞬时角。

经过上述2个步骤,得到经过几何校正的雷达后向散射强度图像,软件辐射校正的 σ^0 精度在1dB范围内,将此图像与2002年二次普查数据的小班图在ArcGIS软件中做叠加,提取每个小班后向散射系数的平均值作为雷达后向散射的真实值来进行研究。

2.3 结果及讨论

在2002年雷州地区森林普查数据中,我们选取了尾叶桉和按刚果12号桉这两种分布广泛的阔叶林树种。在研究区随机选择了样本,由于图像配准以及滤波的原因,在选择小班时要求地势平坦没有明显的坡向,面积大于3 km²,而且后向散射尽可能没有明显的变化,后向散射的方差较小。图2是利用公式(4)得到的 LAI 估测结果与实测值的关系。

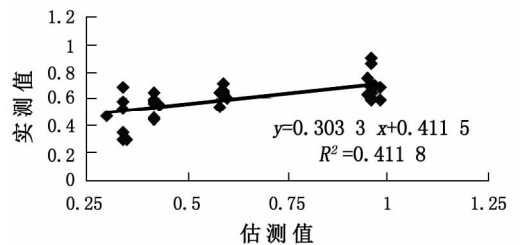
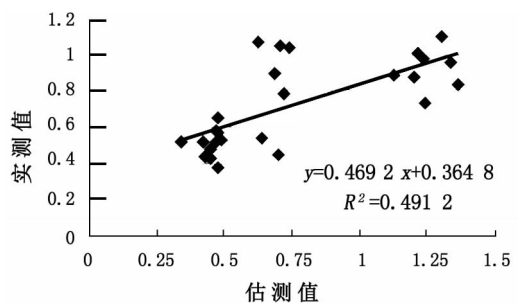


图2 实测与估测 LAI 对比

(上: 尾叶桉; 下: 刚果12号桉)

可以看出,尾叶桉和刚果12号桉的估测与实测值相关系数 R^2 接近0.5,研究地区的 LAI 普遍较小,因此 $DirGnd$ 仍较大,对于这些点单纯利用冠层的直

接散射 $DirCrn$ 来代表总散射 $Total$ 是不太合理的,这也是 R^2 较小的一个重要原因;但是对与一般的森林来讲, LAI 一般大于 1,模型还是有其普遍意义的,因此在一定的条件下,可以利用修正的水云模型来估测森林的 LAI 。同时研究发现,由于雷达数据受到地形的强烈影响,在山区反演估测森林结构参数生物量等时必须要有 DEM 的支持,但是由于研究区人工林大部分分布于地形平坦的地区,主要作为一种速生的经济林而种植的,因此本研究对于评价本地区热带人工林生长状况具有一定的价值。

3 结 论

(1)通过 MIMICS 模型模拟与前人的分析而建立的水云模型的修正模型,对于反演热带森林的叶面积指数具有一定的可行性,反演精度有所提高^[15]。这表明结合 SAR 成像的特点和森林与禾本作物的不同之后,将修正的水云模型引入到森林叶面积指数反演具有一定的理论和现实意义。

(2)本研究中修正的水云模型是我们经过模型模拟和前人大量的实验研究得到的,尽管研究表明可以用来反演热带人工林叶面积指数,但是并没有对模型的机理意义、各个因子(例如树龄与含水量、 LAI 等^[16,17])是否存在一定的相关关系进行深入的探讨,修正模型还是不太完善,这可能也是我们反演精度不是太高的一个重要原因。

(3)森林群落的实测 LAI 是根据实测森林郁闭度信息得到的,从某种程度上说还有误差,这有可能导致了 LAI 与后向散射相关关系的误差,要对模型进行准确的研究尤其是验证还需要实测的 LAI ,仅仅是森林普查的数据还不够,当然对于在地面条件复杂的条件下,利用普查数据间接获取的 LAI 还是可行的^[18]。

(4)我们研究的区域热带森林主要是人工林,叶面积指数比较小,而且受到轮伐的影响,对反演造成一定的困难,模型是否适应于大范围的地区还需要大量的验证。

基于上述分析,在多云雨的森林地区,如果借助可见光优势及一些成熟的研究手段^[19,20],将两种遥感手段融合研究以反演热带森林 LAI ,可能会取得更好的结果。

参 考 文 献:

[1] 方秀琴,张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感,2003,(3): 58-62.

- [2] Attenma E P W, Ulaby F T. Vegetation Modeled as a Water Cloud [J]. Radio Science, 1978, 13(2): 357-364.
- [3] Ulaby F T, Allen C T, Eger G. Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 14, 113-133.
- [4] Paloscia S. An Empirical Approach to Estimating Leaf Area Index from Multifrequency SAR Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2): 359-364.
- [5] Inouea Y, Maenob H, Aenob, et al. Season-long Daily Measurements of Multifrequency (Ka , Ku , X , C , and L) and Full-polarization Backscatter Signatures over Paddy Rice Field and their Relationship with Biological Variables [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81, 194-204.
- [6] Dente L E A. Assimilation of Leaf Area Index Derived from ASAR and MERIS Data into CERES-Wheat Model to Map Wheat Yield [J]. Remote Sensing of Environment, 2008(In Press).
- [7] Ulaby F T, Sarabandi, Kamal, et al. Michigan Microwave Canopy Scattering Model [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [8] Mostafa A, Karam R H L. A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(4): 767-784.
- [9] Guoqing SUN. A Radar Backscatter Model for Discontinuous Coniferous Forests [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(4): 639-650.
- [10] 戈建军,王超,张卫国. 土壤湿度微波遥感中的植被散射模型进展 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4): 209-214.
- [11] 齐家国,王翠珍. 微波/光学植被散射模型及其在热带森林中的应用 [J]. 电波科学学报, 2004, 19(4): 409-417.
- [12] Donald A, Stellingwerf Y A H. Measurements and Estimations of Forest Stand Parameters Using Remote Sensing [M]. Utrecht: VSP, 1997.
- [13] 王国立,牛铮,郭治兴,等. Radarsat SAR 的森林生物物理参数信号响应及其蓄积量估测[J]. 国土资源遥感, 2005,(2): 24-28.
- [14] WANG C. Quantitative Estimation of Forest Biophysical Attributes with Synergistic Use of Optical and Micro Remotely Sensed Data in Tropical Forests [D]. Michigan: Michigan State University. 2004.
- [15] 王国立. 雷达与光学遥感结合在森林净初级生产力研究中应用 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [16] 郑光,田庆久,陈镜明,等. 结合树龄信息的遥感森林生态系统生物量制图[J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 932-940.
- [17] 巩合德,杨国平,张一平,等. 哀牢山 4 类植物群落叶面积指数比较[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(3): 34-36.
- [18] Zhang Na, Yu Guirui, Zhen Liang, et al. Simulation of Leaf Area Index and Biomass at Land Landscape Scale [J]. Journal of Geographical Sciences 2003, 13(2): 139-152.
- [19] 陈艳华,张万昌,雍斌. 基于 TM 的辐射传输模型反演叶面积指数可行性研究[J]. 国土资源遥感, 2007,(2): 44-49.
- [20] 蔡博峰,绍霞. 基于 PROSPECT + SAIL 模型的遥感叶面积指数反演[J]. 国土资源遥感, 2007,(2): 40-44.