

《遥感概论》课程

第八章 定量遥感基础

主讲教师：秦其明

北京大学地球与空间科学学院



本节主要目录

- 定量遥感基础
- 遥感信息模型
- 定量遥感主要研究内容



定量遥感基础

- 利用遥感器获取的地表地物的电磁波信息，在计算机系统支持下，通过数学的或物理的模型将遥感信息与观测地表目标参量联系起来，定量地反演或推算出某些地学、生物学及大气等目标参量，是当前遥感发展的前沿。定量遥感分为：

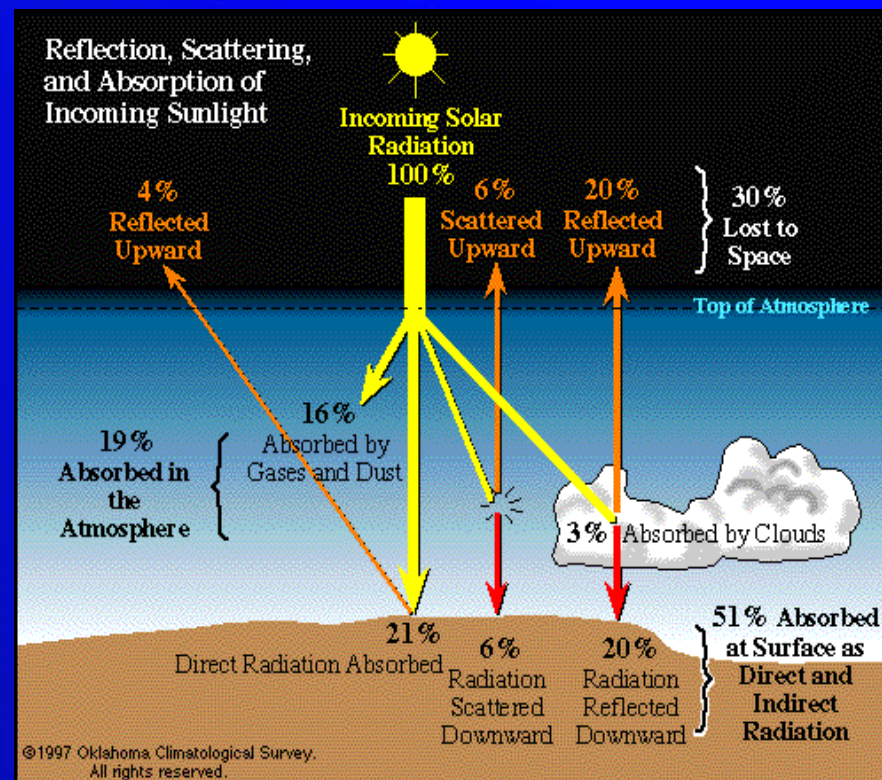
- 可见光、近红外波段的定量遥感
- 热红外波段的定量遥感
- 微波遥感的对地观测



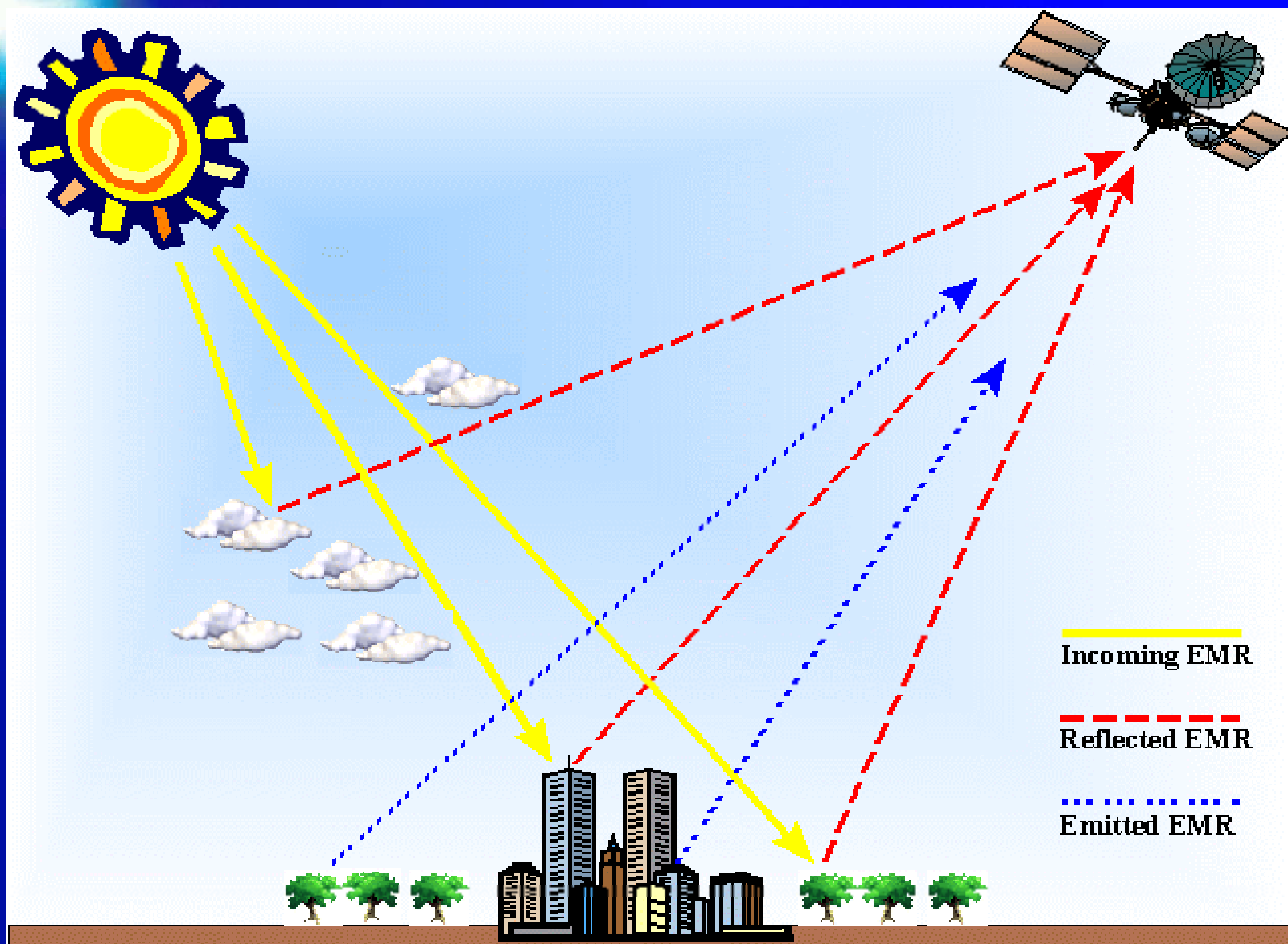
可见光、近红外波段定量遥感基础

遥感的基本过程可以看作是电磁波与大气相互作用过程以及电磁波与地表的相互作用过程的叠加。

- 电磁波与大气相互作用形成大气效应。大气效应是电磁辐射在太阳-目标物-传感器系统的传输过程中受到大气分子、水气、气溶胶和尘粒等散射、吸收和折射等影响
- 地表非朗伯体特性，大多数情况下的地面物质都不是均一的朗伯体，朗伯体的假设给计算带来很大的误差，用地表的二向反射率分布函数（BRDF）来描述地表的非朗伯体特性

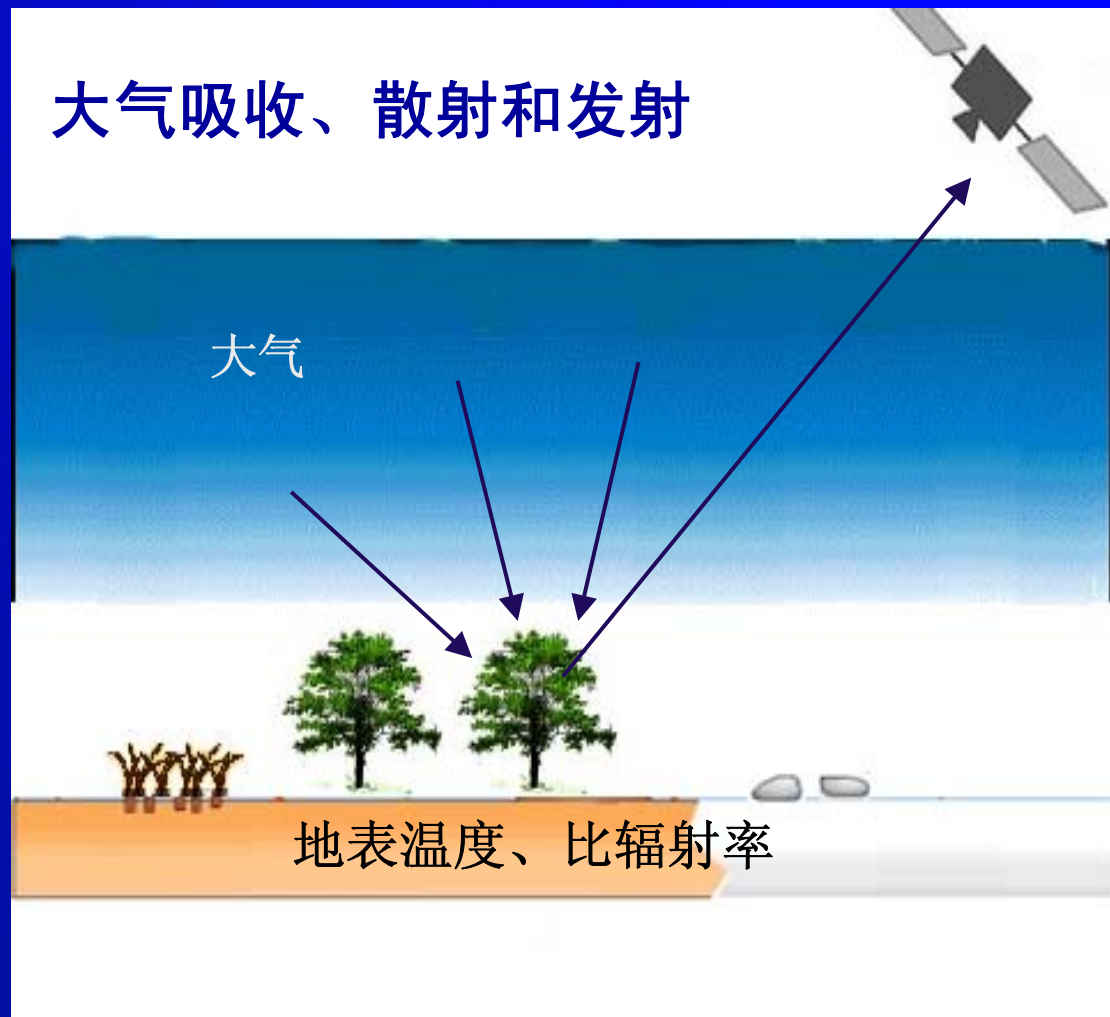


可见光、近红外波段定量遥感基础



热红外波段的定量遥感基础

- 测定地表温度和比辐射率
- 传感器所测量的量是辐射能



热红外波段的定量遥感基础

- 在热学中，温度是物质分子热运动平均动能的量度，描述了物质内部分子热运动的剧烈程度。正是由于物质内部微观粒子的运动导致了物质向外发射电磁波，即热辐射
- 热红外波段遥感测量的正是地表物质的热辐射。地球环境的代表性温度为300K，它对应的接近 $10\ \mu\text{m}$ ，正接近热红外大气窗口区
- 对于非黑体而言，由于其辐射亮度受自身比辐射率的影响，所以比辐射率是联系亮温与真实温度的桥梁



微波遥感的对地观测基础

- 合成孔径雷达二维成像过程是通过安装在运动平台上的雷达天线不断地发射脉冲信号, 接受它们在地面的回波信号, 经信号的成像处理形成二维SAR影像, 影像中的每一像素的幅度只与目标的后向散射系数有关
- 随着应用的需要, 不仅希望得到SAR照射场景的二维信息, 而且希望能得到该区域的高度信息
- 获取地表形态垂直变化的遥感测量传感器主要有干涉雷达, 即干涉测量合成孔径雷达



定量遥感主要研究内容

- 遥感器定标
- 大气纠正
- 定量遥感模型
- 尺度效应与混合像元分解
- 多角度遥感



遥感器定标

- 遥感器定标是指建立遥感器每个探测元件所输出信号的数值量化值与该探测器对应像元内的实际地物辐射亮度值之间的定量关系
- 由于卫星运行时所获取的遥感信息受到诸多因素影响，如遥感器系统的畸变、大气传播的干扰、地形影响等都会造成遥感器采集到的辐射能量与目标地物实际的辐射能量之间存在较大偏差
- 遥感器定标是遥感数据定量化处理中的最基本环节，遥感器的定标精度直接影响到遥感数据的可靠性和精度
 - 遥感器实验室定标
 - 遥感器星上内定标
 - 遥感器场地外定标



遥感器实验室定标

- 是指对比分析与研究空中遥感器接收到的电磁波能量信号与地物光谱仪接收到的电磁波能量信号的定量关系，以及电磁波能量信号与地物的物理特性的关系，以便对获取的空中遥感器信号进行纠正。
- 遥感器实验室定标主要包括光谱定标与辐射定标两大部分。
 - 一 光谱定标是测量遥感器随入射辐射波长变化的响应。
 - 一 辐射定标用以确定遥感器入瞳处的准确辐射数值。



遥感器星上内定标

- 卫星发射后，探测探测器元件老化或者工作温度变化都会影响到遥感器的响应，因此需要遥感器星上内定标。
- 星上内定标主要是绝对辐射定标，在可见光和反射红外区采用电光源（灯定标）和太阳（太阳定标）作为高温的标准辐射源，在热红外区采用卫星上的标准黑体（黑体定标）作为高温的标准辐射源，以宇宙空间作为低温标准辐射源。

遥感器场地外定标

- 是在遥感器飞越辐射定标场上空时，在定标场选择若干像元区，测量遥感器对应的各波段地物的光谱反射率，并用大气辐射传输模型给出遥感器入瞳处各光谱带的辐射亮度，最后确定它与遥感器输出的数字量化的数量关系，求解定标系数，并进行误差分析。
- 通过地面辐射场地外定标对于提高辐射定标精度具有重要意义，这因为场地外定标方法可以实现全孔径、全视场、全动态范围的定标，并考虑到大气传输和环境的影响。
- 该定标方法可以实现在遥感器运行状态下与获取地面图像完全相同条件下的绝对订正。

大气校正

- 大气校正是消除遥感图像在大气传输中所引起质量退化的一种图像处理方法。对于一个已经经过绝对辐射标定的遥感图像，还必须经过大气校正才可以得到地表目标的正确信息
- 由于遥感器在空中获取地表信息过程中，受到大气分子、气溶胶和云粒子等大气成份的吸收与散射的影响，以及大气中水汽和气溶胶含量具有很大的时空变化特性，其结果是目标反射辐射能量被衰减，空间分布被改变，部分和目标物无关的大气散射辐射进入遥感器视场

大气校正方法

■ 实验方法

- 直方图调整法 (Histogram Matching)
- 黑暗目标法 (Dark Object Method)
- 固定目标法 (Invariant Object)
- 对比减少法 (Contrast Reduction)
- 查找表法LUT (Look Up Table)

■ 理论方法

- LOWTRAN (Low Resolution Transmission)
- MODTARN (Moderate Resolution Transmission)
- SHARC (Standard High Altitude Radiation Code)
- ATCOR (A Spatially-Adaptive Fast Atmospheric Correction)
- 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)



大气校正实验方法

- 直方图调整 (Histogram Matching)

假设清楚目标和模糊目标反射率直方图是一样的，在图像中找到清楚的目标，用清楚目标的反射率直方图来调整模糊目标的反射率直方图。常用的图像处理软PCI，EARDAS等使用了此方法。

优点：简单、实用。

缺点：1) 对于由具有不同反射特征的目标物组成的混合像元，以上假设是不成立的；2) 气溶胶空间分布变化大时，此方法校正结果不正确。

大气校正实验方法

- 黑暗目标法(Dark Object Method)

若图像中存在浓密植被或水体，它们在可见光（浓密植被）和红外（水体）具有低反射，根据其在此特征波段的反射率和其他波段反射率之间的相关关系，进行大气校正。比如，在ETM+ / TM7波段（ $2.1\mu\text{m}$ ）左右水体反射率应该为零，但由于大气效应往往是非零，确定此差距，用来可以移除其他波段像元中的大气干扰。

优点：此方法方便，目前在中分辨率成像光谱仪MODIS、MERIS等数据处理中广泛使用。

缺点：图像中没有大范围分布的浓密植被或水体存在，比如北半球冬天的图像或沙漠的图像，方法无法使用。

大气校正实验方法

- 固定目标法 (Invariant Object)

假设图像中某像元反射率已知或“固定”，利用这些像元反射率和各波段光谱反射率之间的线性关系，可对整个图像进行校正和均一化。

如果得到卫星同步的地面观测反射率数据，此方法是绝对大气校正方法。

- 对比减少法 (Contrast Reduction)

地表反射率稳定的区域，若不同时期获取的卫星信号发生变化，说明该区大气光学特征发生了变化。这样，变化差值可用于反演大气气溶胶厚度。但由于地表反射率是一般随时间和空间变化的，稳定地表反射率假设限制了其广泛实用性。

大气校正实验方法

一 查找表法LUT (Look Up Table)

是指利用辐射传输模型事先计算不同大气条件下的气溶胶光学厚度、单次散射反照率和相函数等，形成查找表，以便在进行校正时调入使用。



大气校正理论方法

实验方法依赖于某种假设或实测数据，其适用性受到了限制。对大气—地表—遥感器之间的辐射传输过程进行模拟，可以模拟出卫星同步的大气参数和地表的真实反射率，常用的有MODTRAN和6S。



大气校正理论方法

- MODTARN (Moderate Resolution Transmission)

MODTRAN是由美国空军地球物理实验室 (AFGL) 开发的计算大气透过率及辐射的软件包。MODTRAN从LOWTRAN发展而来, 提高了LOWTRAN的光谱分辨率。当前最新的版本是MODTRAN4。MODTRAN的基本算法包括透过率计算, 多次散射处理和几何路径计算等。需要输入的参数有四类: 计算模式, 大气参数, 气溶胶参数和云模式。MODTRAN有四种计算模式: 透过率, 热辐射, 包括太阳或月亮的单次散射的辐射率, 直射太阳辐照度计算。用MODTRAN进行大气纠正的一般步骤是: 首先输入反射率, 运行MODTRAN得到大气层顶 (TOA) 光谱辐射, 解得相关参数; 然后利用这些参数带入公式进行大气纠正。

大气校正理论方法

6S描述了大气如何影响辐射在太阳—地表—遥感器之间的传输。需要输入的参数有：几何参数（遥感器类型、成像年月日和经纬度；大气中的水和臭氧浓度；气溶胶浓度；辐射条件、观测波段和海拔高度；地表覆盖类型和反射率。6S预先设置了50多种波段模型，包括MODIS, AVHRR, TM等常见传感器的可见光近红外波段。



大气校正理论方法

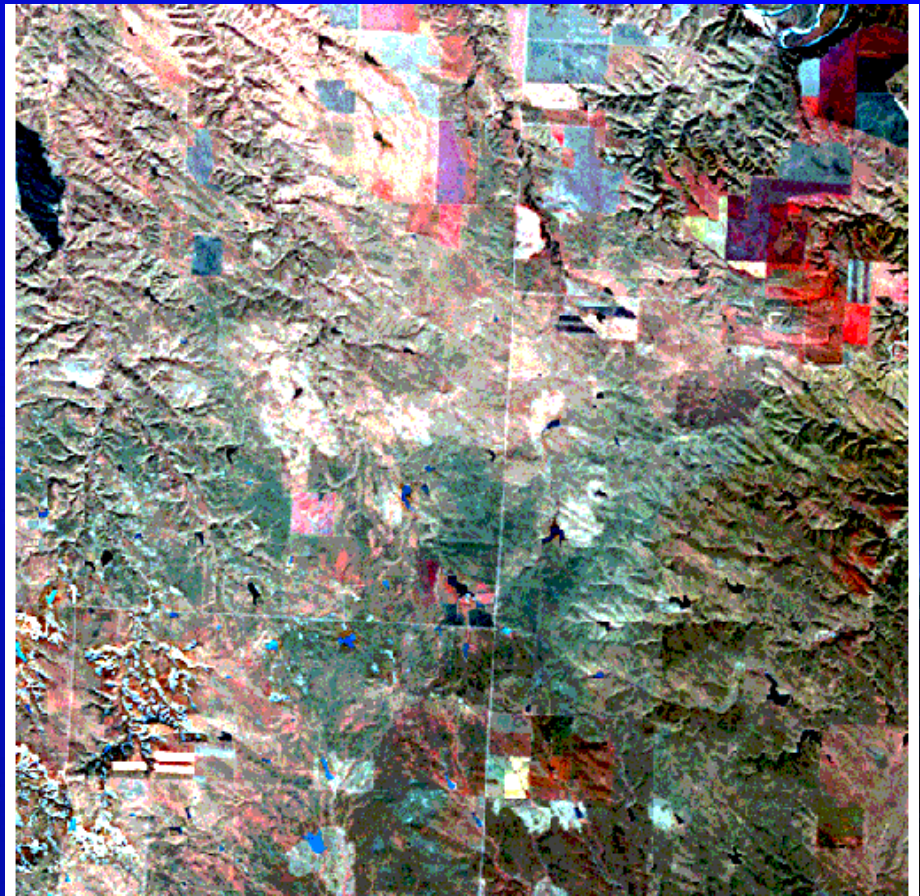
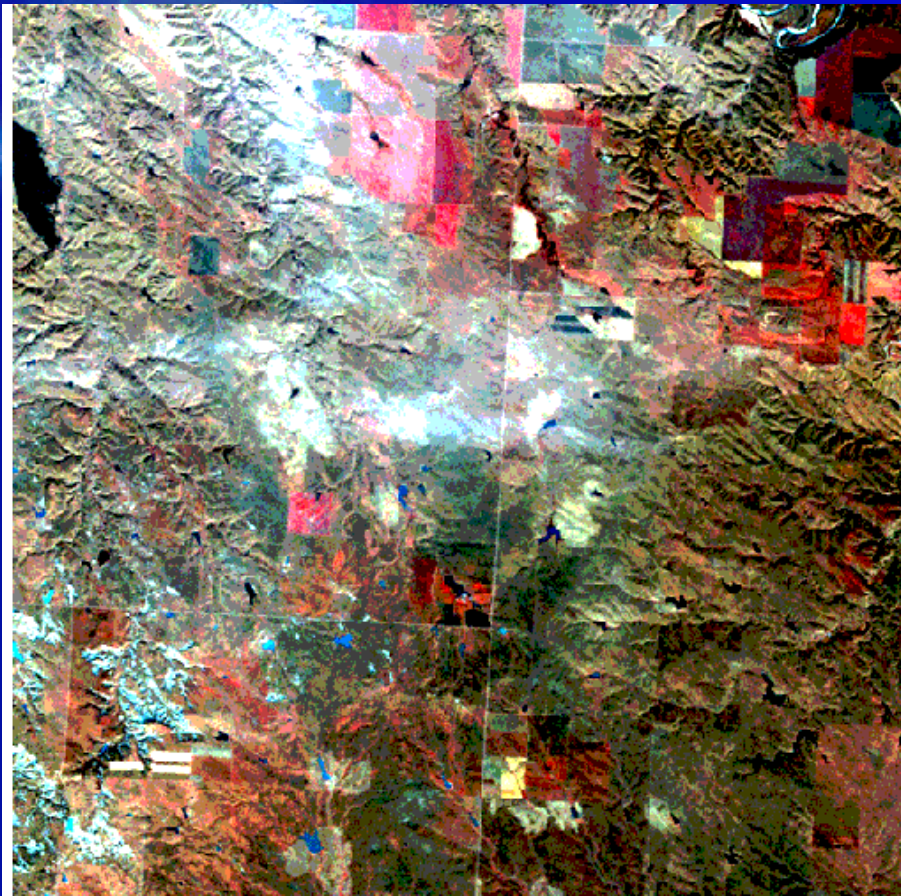
和MODTRAN比较，MODTRAN解决的是正问题，给出反射率，MODTRAN能计算出大气层顶辐射；6S解决的是反问题，给出大气层顶辐射，计算地表的反射率。MODTRAN可以计算的波段范围是0.20 μm 到无穷，而6S只能计算太阳反射光谱波段（0.25—4.0 μm ）的大气传输参数，两者进行大气校正的操作也不相同，MODTRAN得到大气传输参数，需要带入传输公式，得到校正后的反射率；6S输入表观反射率，直接能得到校正后的地面反射率。



ETM+ 图像的大气校正

大气校正前

大气校正后

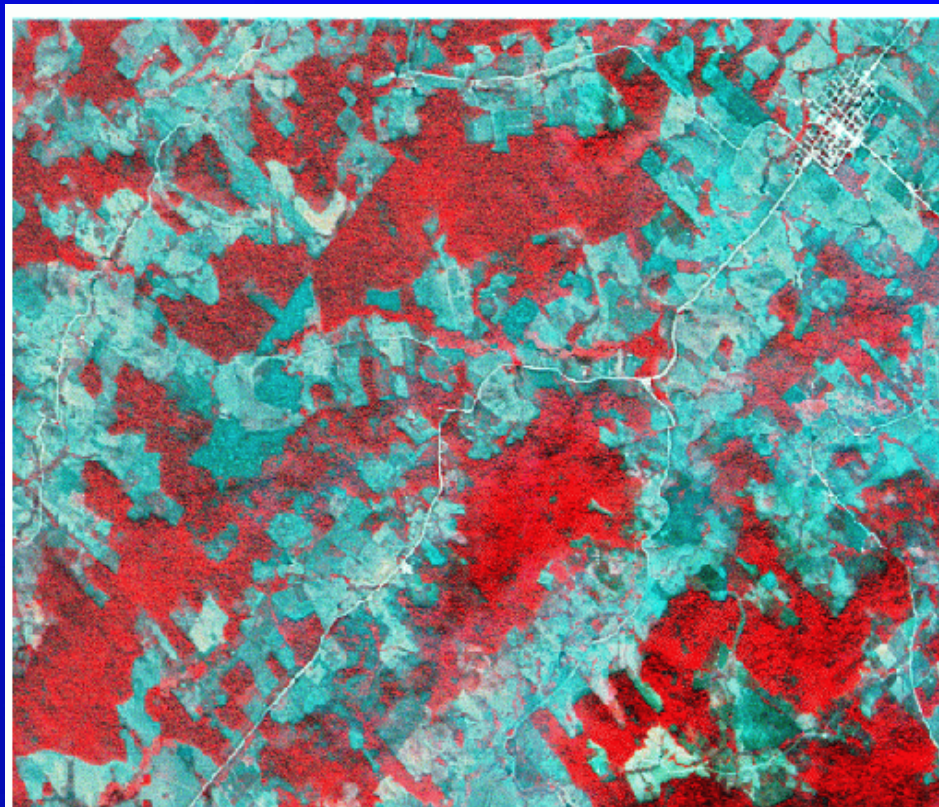
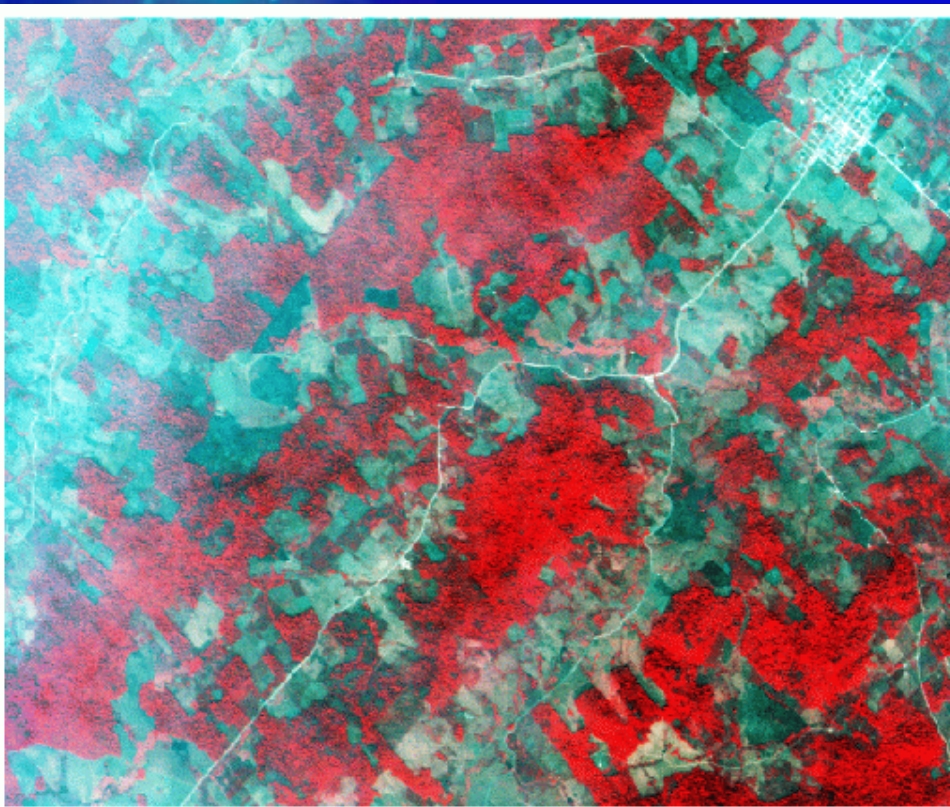


引自Liang, Jan. 14, 2004, Beijing University

AVIRIS 图像的大气校正

大气校正前

大气校正后



引自Liang, Jan. 14, 2004, Beijing University

定量遥感模型

- 是从抽取遥感专题信息的应用需要出发，对遥感信息形成过程进行模拟、统计、抽象或简化，最后用文字、数学公式或者其他的符号系统表达出来。
- 定量遥感模型概括起来分为三类：
 - ✓ 物理模型
 - ✓ 统计模型
 - ✓ 半经验模型



物理模型

- 根据物理学原理建立的模型，模型中参数具有明确的物理意义，模型通常采用数学公式描述。
- 此类模型通常是非线性的，方程复杂，输入参数多、实用性较差，为了求解通常对多个非主要因素进行忽略或假定。
- 常见的“物理模型”有植被二向性反射的辐射传输模型、几何光学模型等

统计模型

- 又称为“经验模型”，其建模思路是对一系列观测数据作经验性的统计描述，或者进行相关分析，建立遥感参数与地面观测数据之间的回归方程。
- 优点是简便、适用性强，参数较少。
- 弱点是理论基础不完备，缺乏对物理机理的足够理解和认识，代表性差，模型应用受到区域实用性的限制

半经验模型

- 综合统计模型和物理模型的优点产生的
- “半经验模型” 建模思路既考虑模型的定性物理含义，又采用经验参数建模
- 有代表性的“半经验模型”有Rahman的地表二向反射模型等



定量遥感模型

- 辐射传输模型
- 几何光学模型及其应用
- 混合模型
- 计算机模拟模型



辐射传输模型

- 辐射传输模型的理论基础是辐射传输理论，描述光辐射和粒子（包括电子、质子、中子等基本粒子）在介质中传播的规律。其核心为辐射传输方程，即：

$$\frac{dI(s)}{ds} = -K(I - J)$$

I代表S方向的光强度，K为体积削弱系数，J代表源函数



几何光学模型

- 几何光学模型主要考虑地表的宏观几何结构，把地表假设为具有已知几何形状和光学性质，按一定方式排列的几何体，通过分析几何体对光线的截获和遮阴及地表面的反射来确定植冠的方向反射（赵英时等，2003）。
- 代表性的有Li-Strahler GOMS 模型

$$BRDF = \frac{\int_A R(s) \cdot \langle r, s \rangle \cdot I_s(s) \cdot \langle i, s \rangle \cdot I_r(s) d(s)}{A \cdot \cos \theta_r \cos \theta_i} = -K(I - J)$$



ds表示地表或树冠表面的面积元，R（s）是该面积元的反射率，（i，s）和（r，s）分别代表ds的法矢量与入射及观察的方向矢量夹角的余弦，Ii（s）表示受阳光直照与否的指数，数值为1（受直照）或0，Ir（s）是ds是否直接在观察者视场内的指数，为1（直接可见）或0，A是视场（FOV）在水平地面的投影。

混合模型

- 李小文等在1994年发展了植被BRDF几何光学与辐射传输几何模型(GORT)，试图综合用几何光学模型(GO)在解释树冠阴影和辐射传输模型(RT)在解释对此散射上各自的优势。GORT模型在解释林下辐照及总反射上比较成功，但当树冠浓密时，有过高估计对此散射的各向同性的倾向，从而导致偏亮的阴影。

$$L_s = K_g L_g + K_c L_c + K_t L_t + K_z L_z$$

L_s 为传感器所接收到的辐射亮度； L_g 为地表光照面所产生的亮度； L_c 为树冠光照面所产生的亮度； L_t 为树冠的阴影所产生的亮度； L_z 为地表的阴影所产生的亮度； K_g, K_c, K_t, K_z 分别为地表光照面、树冠光照面、树冠阴影面、地表阴影面在视场内的所占的面积比例

计算机模拟模型

- 计算机模拟模型是指为研究的物理过程营造一些概率模型，进行随即模拟和统计试验，通过估算这些模型的近似解的数值方法，蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法。
- 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法，或称计算机随机模拟方法，是一种基于“随机数”的计算方法。这一方法源于美国在第一次世界大战进研制原子弹的“曼哈顿计划”，目前在遥感信息领域广泛使用。

尺度效应问题

- 遥感图像像元所对应的地表单元具有从小于1米到数千米的不同尺度的空间分辨率。这些不同尺度的像元，反映出的同一地表物体的信息量是不同的，其空间异质性程度因尺度不同而有明显差异
- 在某一个尺度上观测到的性质，总结的定理和定律，在另一个尺度上不一定有效，需要验证与修正
- 尺度效应研究应该根据定量遥感反演需求确定不同的空间尺度，着重研究不同尺度信息的空间异质性的特点，尺度变化对信息量、信息分析模型和信息处理结果的影响，并进行尺度转换的定量描述

混合像元分解

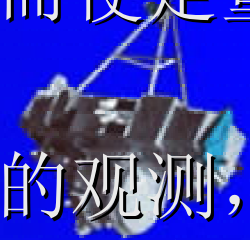
- 若像元只包含了一种类型，则为纯像元，像元中包括两种或两种以上地物类型，称为混合像元
- 从任一空间分辨率角度看，陆地表面在遥感像元尺度上总是混合像元，需要对其进行分解，进入像元内部，求得这些亚像元所占的比例。常用的方法为随即几何模型

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + \varepsilon_i$$

R_i 为混合像元反射率， f_i 为目标物在像元中的面积比例， R_{ik} 为该目标的反射率， ε 误差系数

多角度遥感

- 多角度遥感是指从两个以上的观测方向对下垫面进行观测，从不同的视角获取地表物信息。
- 单一方向的遥感只能得到地面目标一个方向的信息，缺乏足够的信息推断目标的时空特征，从而使定量遥感非常困难
- 多角度对地观测通过对目标进行多个方向的观测，获得更为详细可靠的地表三维空间信息，可以提高地表目标物的解译精度和参数反演的准确度



定量遥感建模

- 定量遥感建模的一般步骤
 - 模型准备
 - 模型假设
 - 模型形成
 - 模型求解
 - 模型分析
 - 模型检验
 - 模型应用
- 由于实际问题的复杂性和建模过程的针对性，以上步骤可以根据实际建模要求调整



定量遥感建模

- 模型是解决问题的工具, 在利用遥感技术解决问题时通常需要建立模型
- 模型是联系遥感可测参数（辐射强度、偏振、相位）与实际应用中所需参数的纽带和桥梁
- 遥感建模分为两类：
 - 正演模型
 - 反演模型



正演模型

- 已知地表上每一类目标地物的固有波谱特性等参数和大气各种参数，求出观测目标区域所有目标地物的电磁波（反射）辐射强度，称为正演建模问题，即前向建模问题。
- 正演建模是从遥感机理出发，用数学物理模型来描述电磁波传播过程，揭示电磁波与地表物质之间的相互作用规律，在此基础上形成遥感信息模型

反演模型

- 已知观测目标区域所有目标地物的电磁波（反射）辐射强度，求出不同尺度上辐射源、大气、地表物和遥感器有关的任一参数，则称为反演建模问题
- 对反演建模进行求解，称为反演，即从测量到的现象推求未知的原因或参数。遥感参数反演就是利用从地表地物接收到的电磁波信息，依据一定的计算模型，利用遥感影像成像时的各种环境参数如大气状况、成像时间等信息计算出大气和地表目标物的相关物理参数如温度、叶面积指数等

定量遥感模型应用

- 植被参数反演
- 反照率反演
- 陆面温度反演



植被参数反演

- NDVI是对地表植被状况的简单、有效的度量，通过两个或多个光谱观测通道组合得到：

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$$



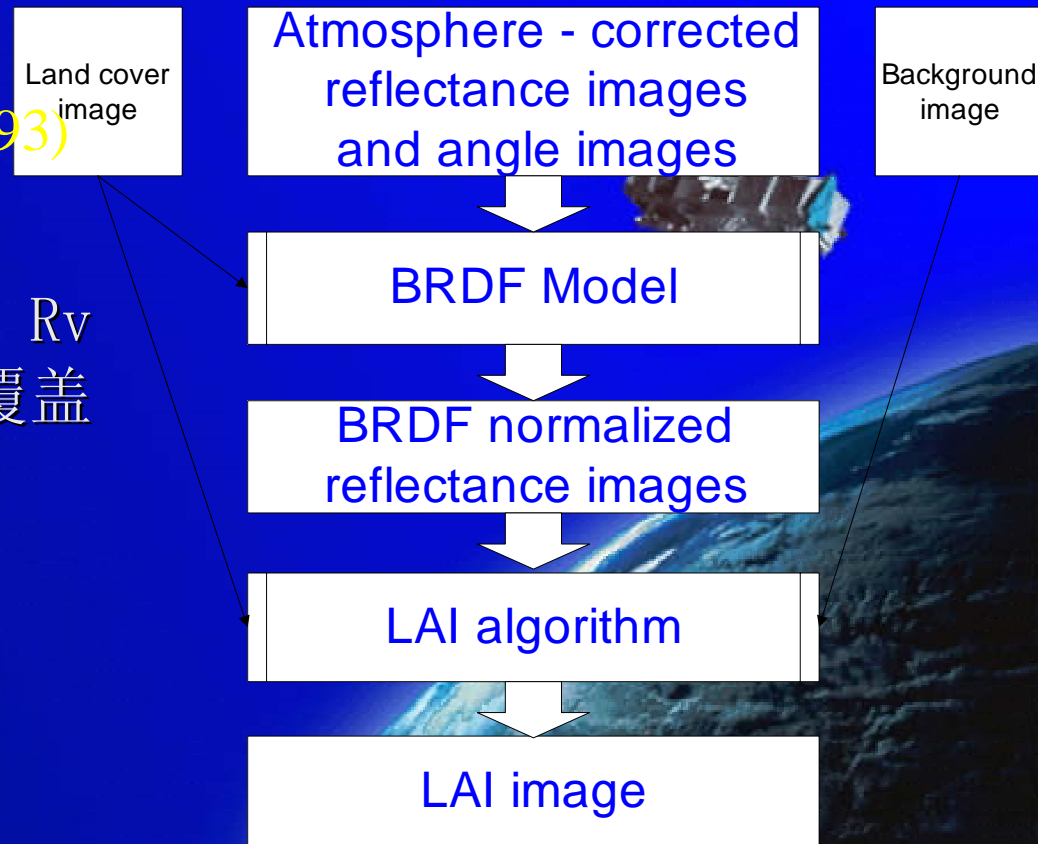
R_{nir} 和 R_{red} 分别为近红外和红光波段的反射率

植被参数反演

■ 叶面积指数LAI (Leaf Area Index) 是指单位地表面积上的单个侧面的所有绿色叶面积之和。

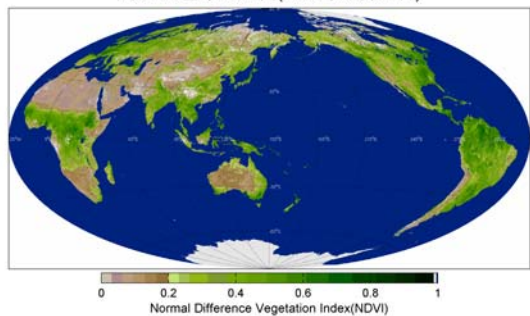
$$LAI = -\frac{1}{2k} \ln\left[\frac{R - R_v}{R_s - R_v}\right] \quad (\text{Price, 1993})$$

R为植被与土壤混合反射率， R_v 为土壤反射率， R_s 为植被覆盖的反射率， k 为待定系数

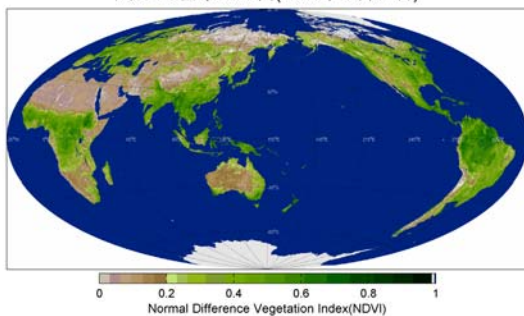


全球 NDVI 连续变化 (2002年9月—12月)

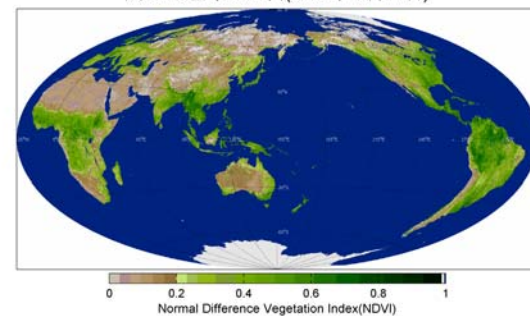
风云-1D全球NDVI图(2002年09月21日)



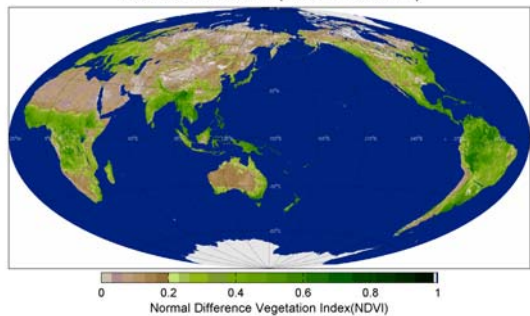
风云-1D全球NDVI图(2002年10月01日)



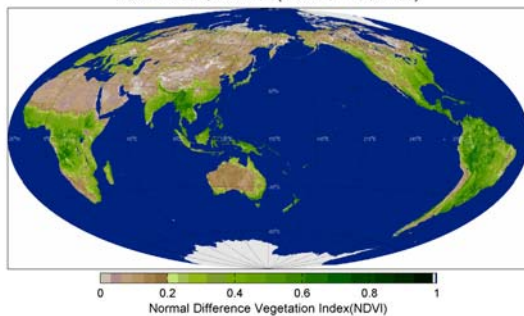
风云-1D全球NDVI图(2002年10月11日)



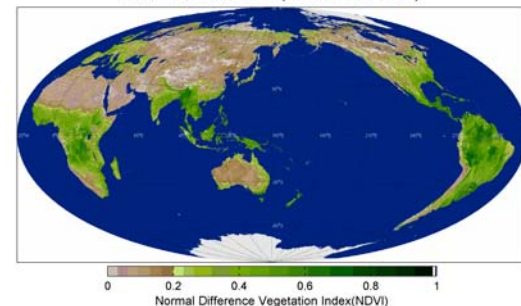
风云-1D全球NDVI图(2002年10月21日)



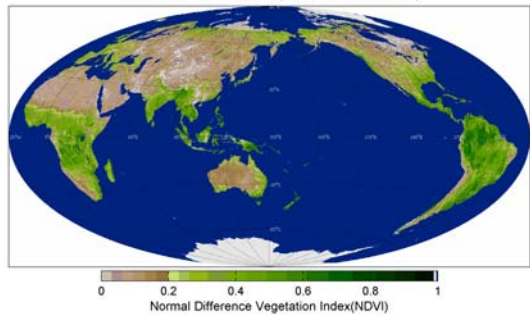
风云-1D全球NDVI图(2002年11月01日)



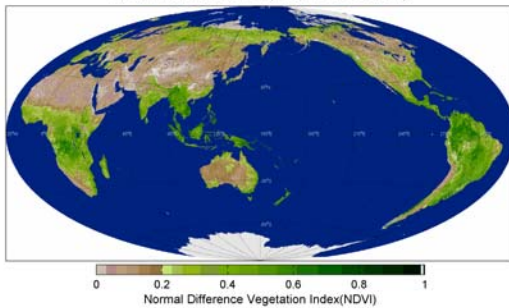
风云-1D全球NDVI图(2002年11月11日)



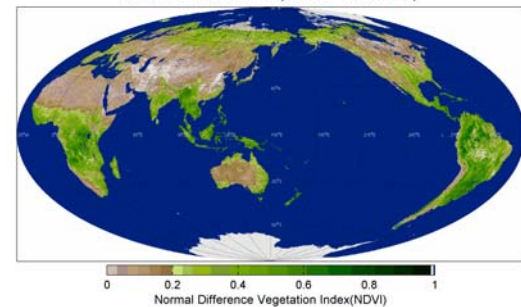
风云-1D全球NDVI图(2002年11月21日)

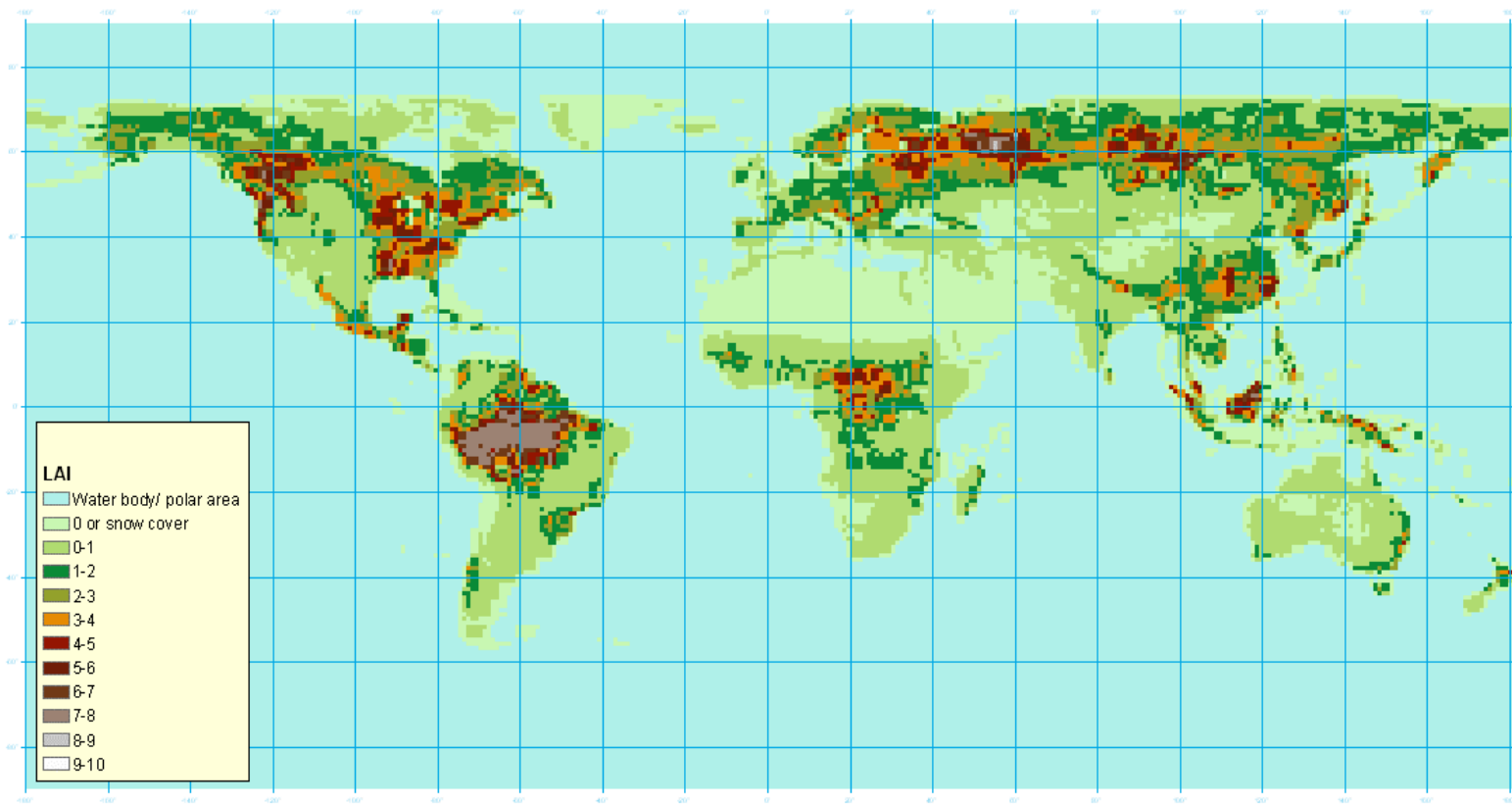


风云-1D全球NDVI图(2002年12月01日)



风云-1D全球NDVI图(2002年12月11日)



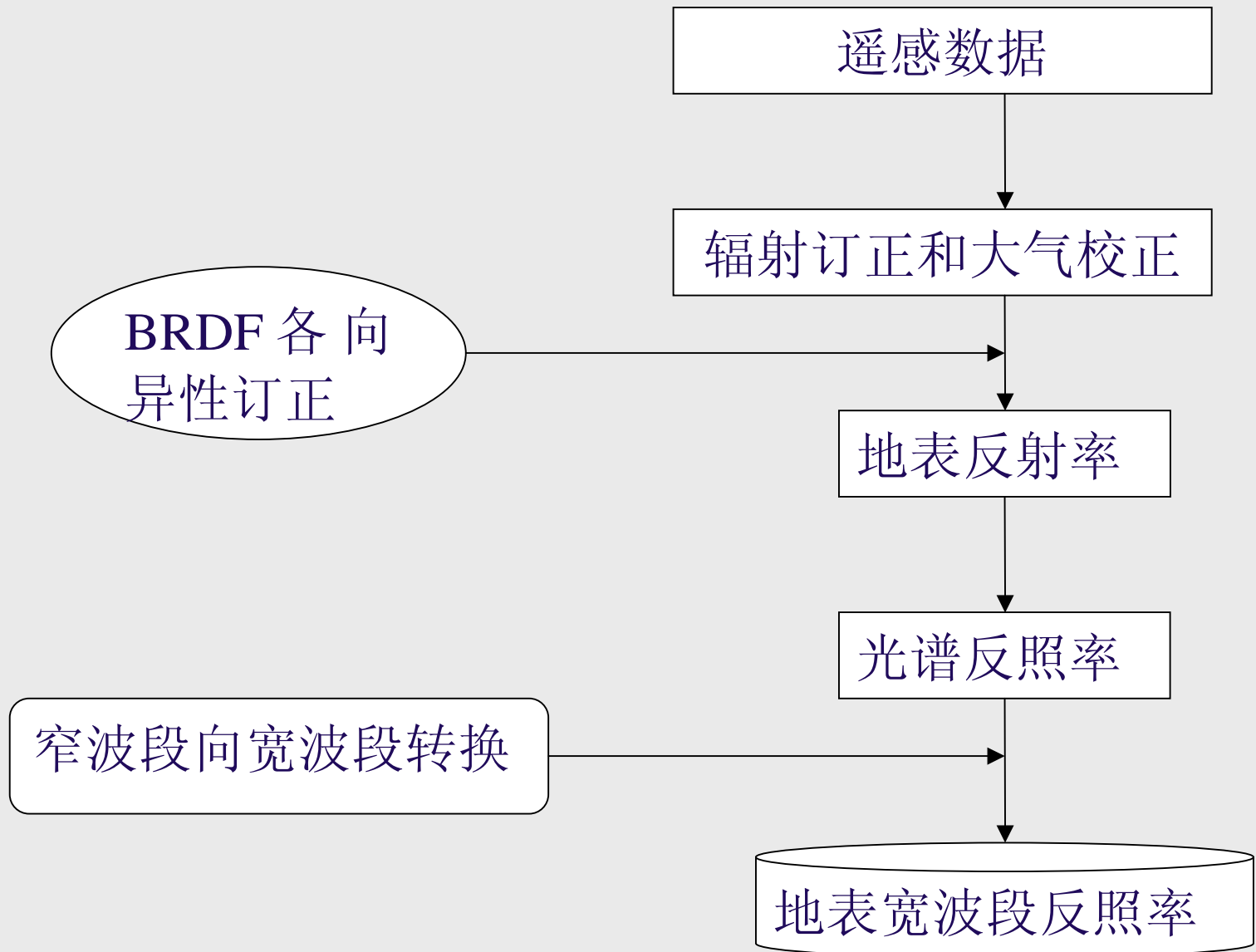


The Global Leaf Area Index Map - July 21st, 2003

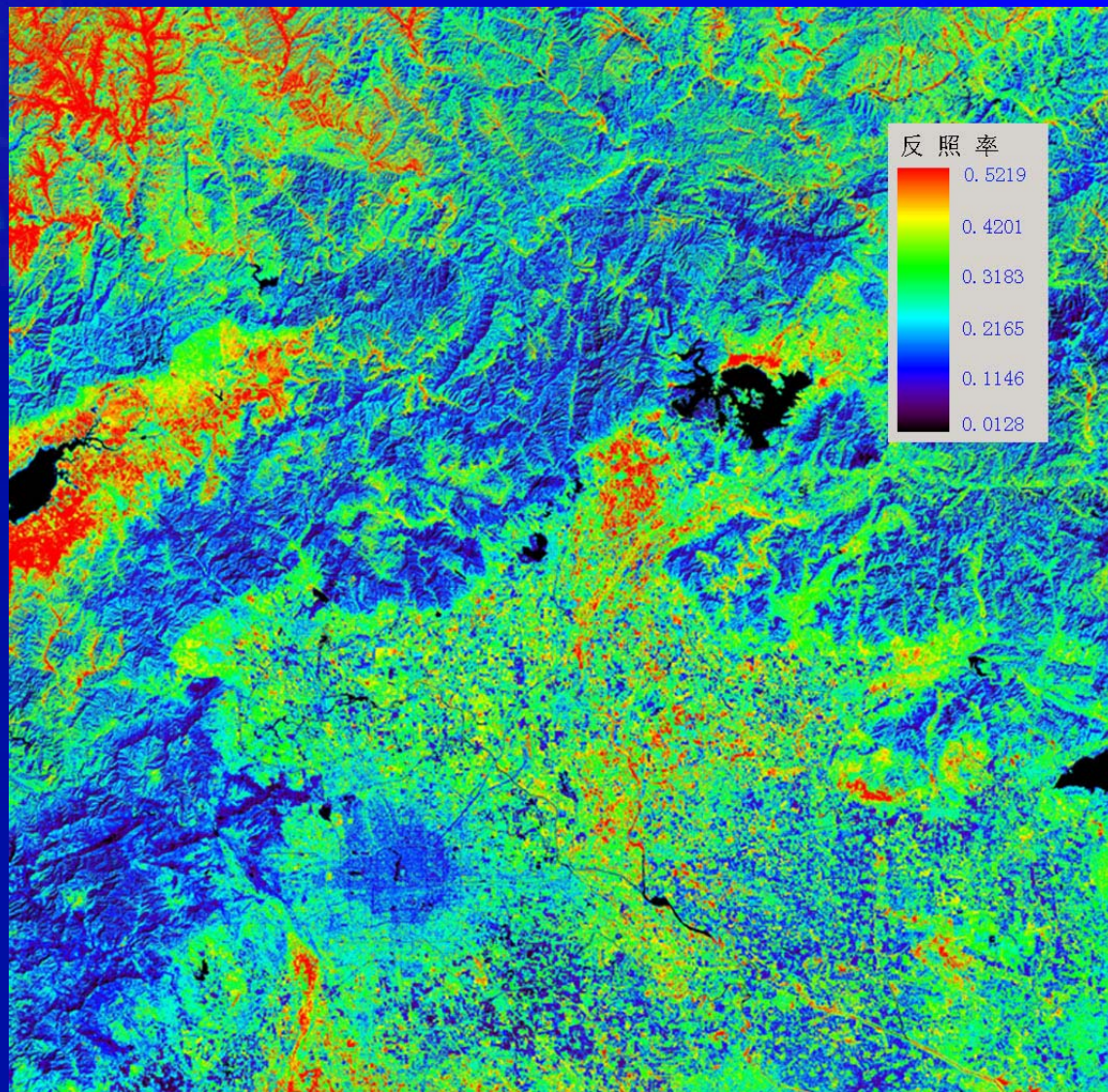
反照率反演

- 反照率是在反射体表面半球空间的全部短波段（0.30--5.0 μm ）反射辐射通量与总入射辐射通量之比
- 地表反照率研究在揭示局部和区域气候形成的内在机制和中长期气候预报和全球变化研究具有重要的意义
- 反照率的计算包括辐射纠正、大气校正、光谱反照率的计算和光谱反照率向宽波段反照率的转换等步骤

反照率计算流程



青藏高原地表反照率分布图



ETM+地表宽波段反照率，北京，2001年4月17日，北京大学遥感所

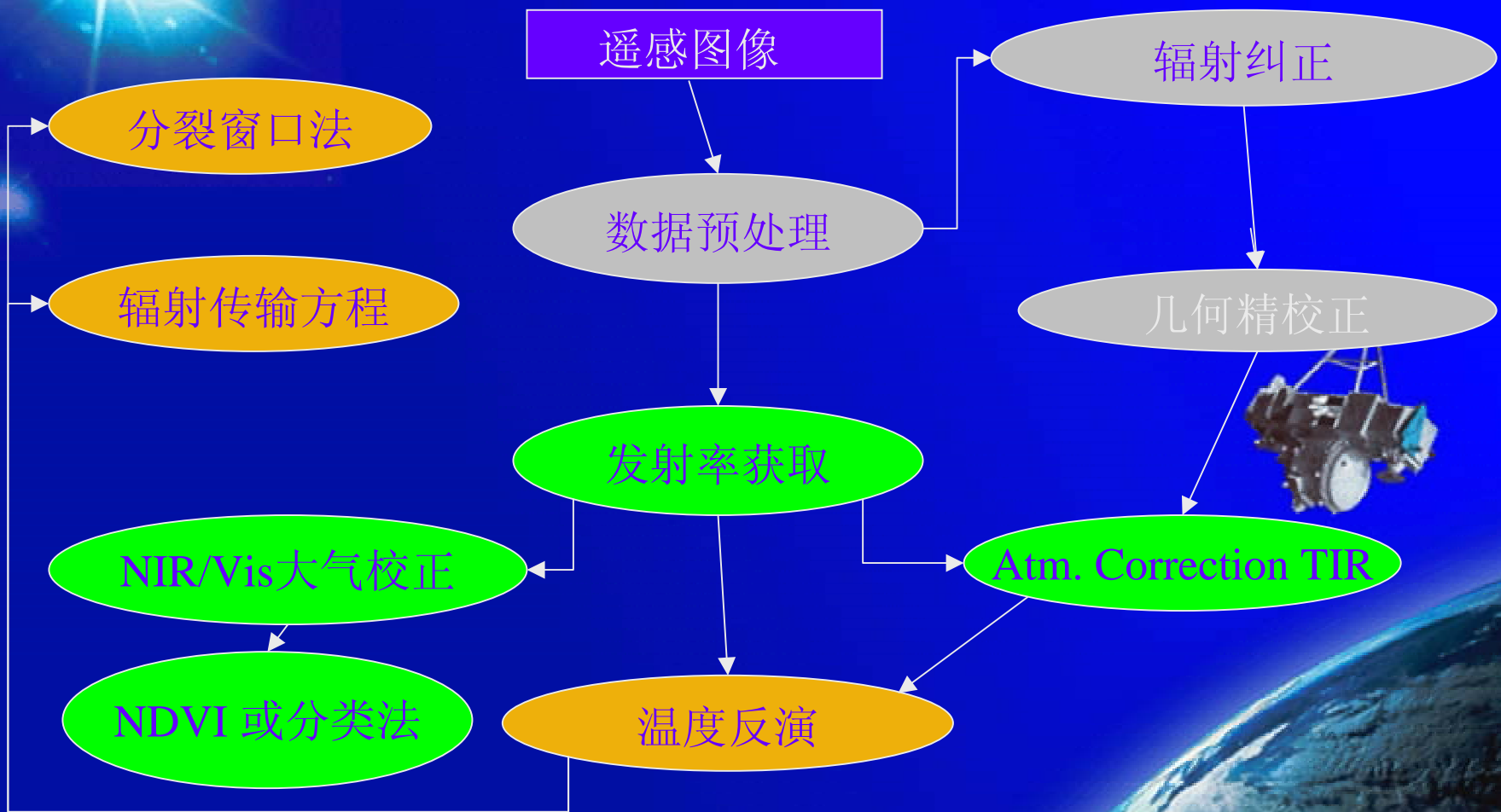
陆地温度反演

- 陆地表面温度反演的方法有两大类：
 - 实验方法是在实际工作中利用地面定标，实测处在卫星传感器过境时的地面温度，建立图像灰度值和地面温度的回归方程，求出地面温度图像；
 - 理论方法是通过求解辐射传输方程，消除大气影响，求出陆地表面温度如分裂窗法
- 下式为基于NOAA/AVHRR数据的温度反演算法：

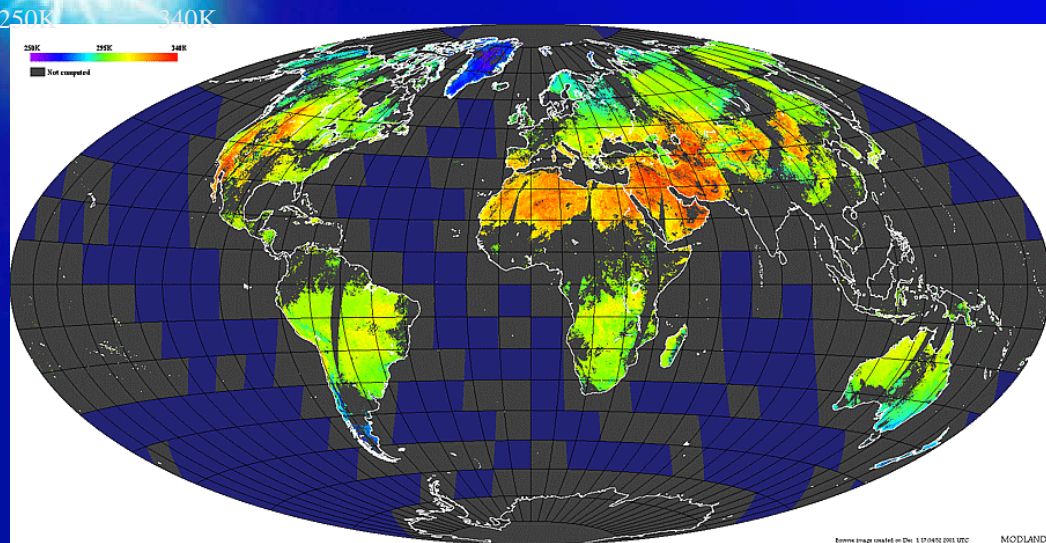
$$LST = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)] \left(\frac{3.5 + \varepsilon_4}{4.5} \right) + 0.75T_5(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$$

LST是地表温度，T4，T5分别为NOAA/AVHRR第4，5通道亮度温度， ε_4 ， ε_5 分别为第4，5通道发射率

陆面温度反演技术流程图



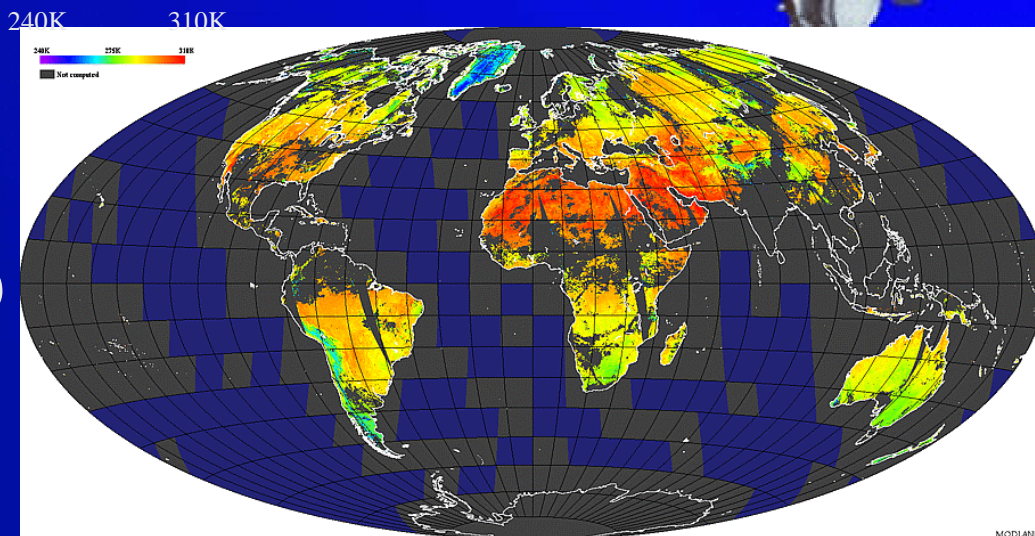
Examples of the Global MODIS LST Product



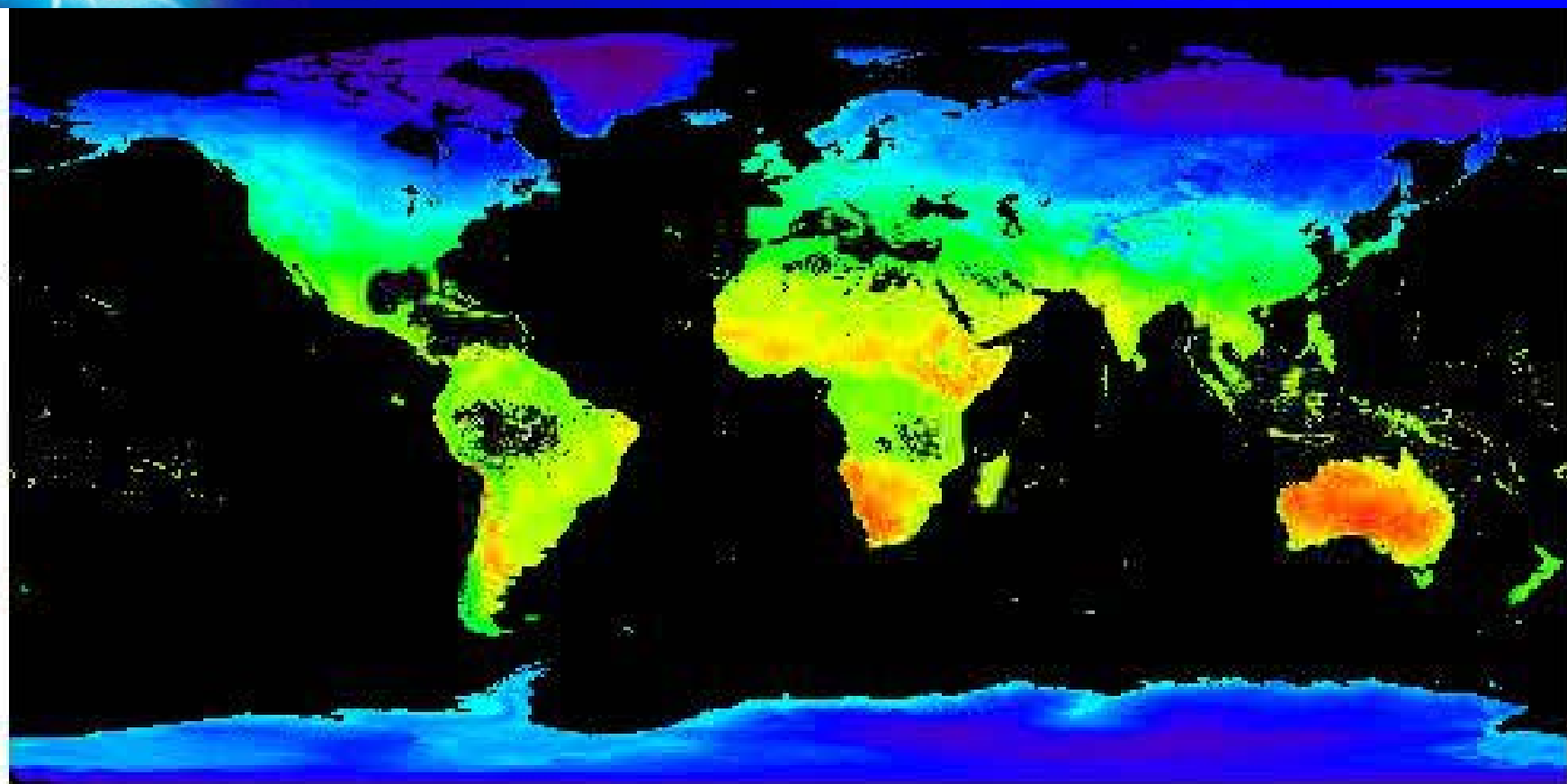
(daytime 3 Aug 2001)



(nighttime 3 Aug 2001)



MODIS数据反演的2001年全球月平均地表温度



220.00

[01-2001]

280.00

340.00

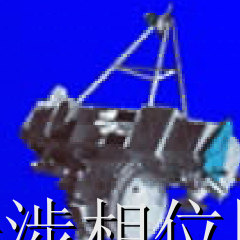
来自MODIS产品网站: <http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>

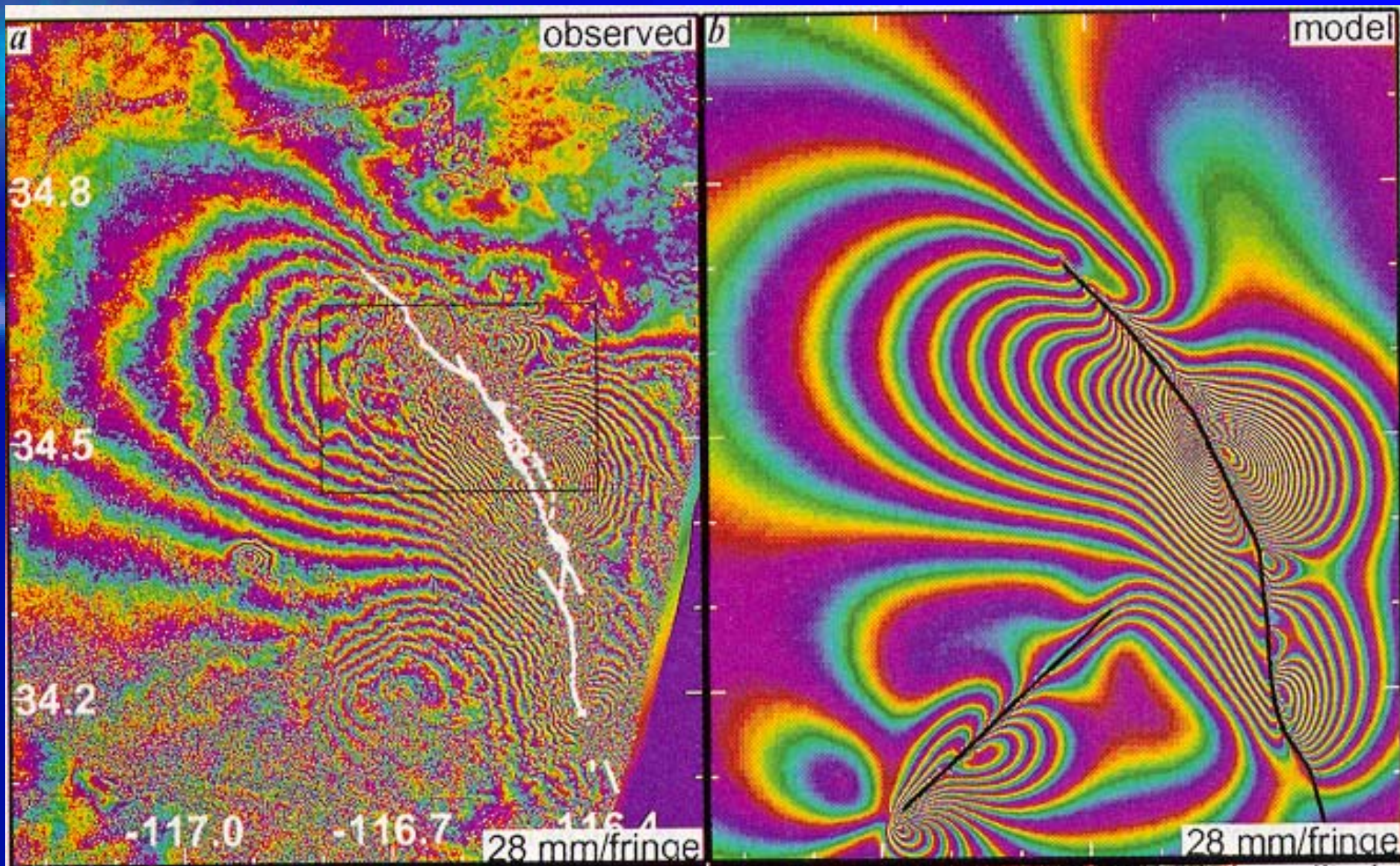
InSAR测量地面高程

- 干涉成像雷达 (InSAR) 就是利用SAR两次成像观测的相位差，按照一定的几何关系进行变换，可以得到观测区域的地形高度
- INSAR技术原理是通过两副天线同时观测（单轨模式），或两次平行观测（重复轨道模式），获取地面同一景观的复数影像对。由于目标与天线位置的几何关系，在复图像上产生相位差，形成干涉条纹图
- 干涉条纹图包含了斜距向上的点与两天线位置之差的精确信息

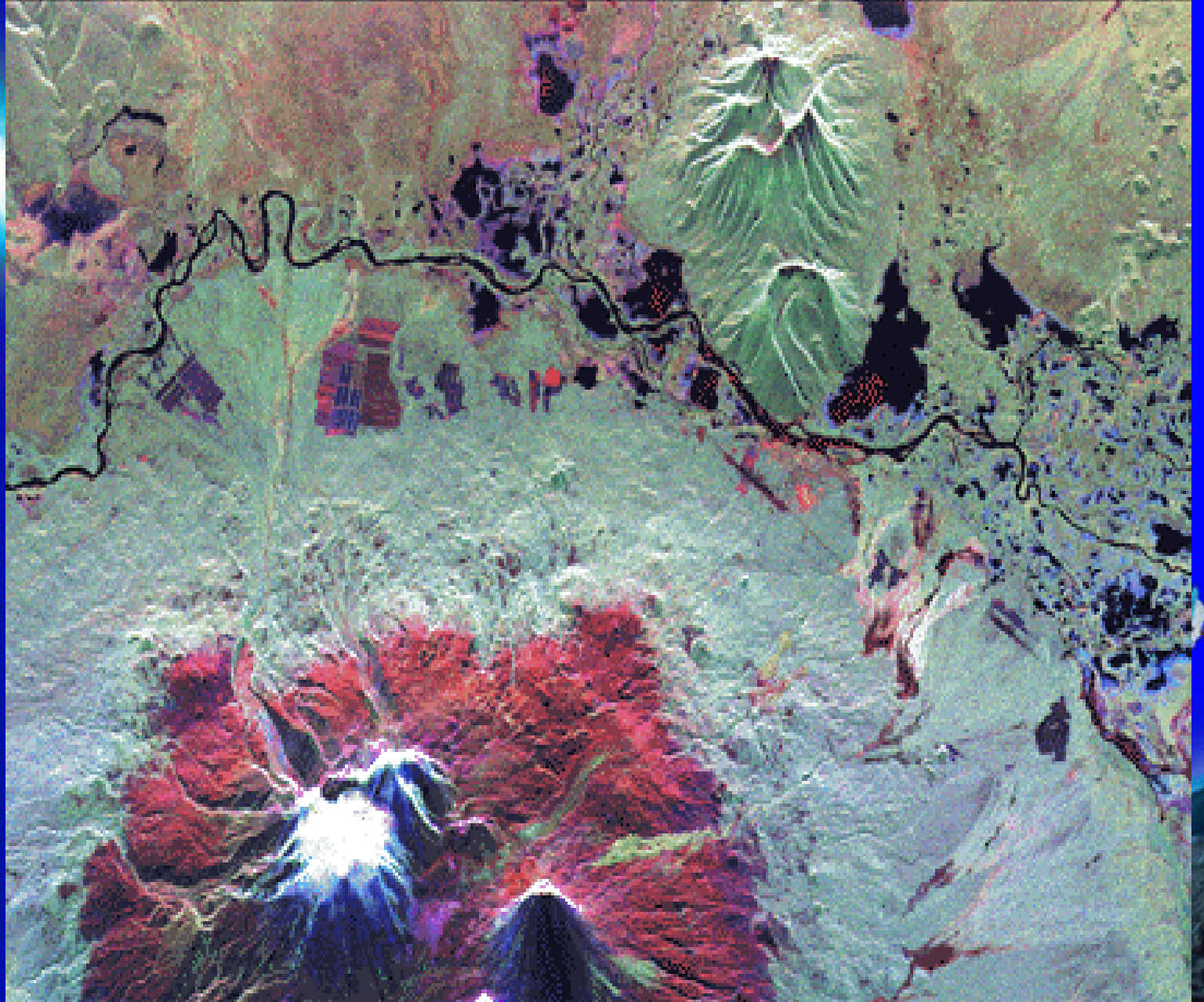
干涉雷达测量地形

- 利用传感器高度，雷达波长，波束视向及天线基线距之间的几何关系，可以精确地测量出图像中每一点的三维位置
- 使用2幅SAR图像数据与DEM数据进行雷达差分干涉检测处理。
- 其处理流程为：
 - 对两干涉相位图进行图像配准，两干涉相位图求差，同时进行利用已知的地面数字高程模型，根据成像关系合成一副干涉图，在此基础上进行地形相位改正，用此干涉图减去原来的干涉图，去除地形的影响，生成差分干涉图，通过相位解缠，得到解缠相位图，然后进行相位到位移的变换，得到位移图。





Landers Earthquake, April 24, 1992



Kliuchevskoi Volcano in Kamchatka (Russian Siberia) as captured by SIR-C in 3 polarization modes

Pasadena/San Gabriel Valley viewed by JPL TOPSAR

Acquisition: May 26, 1994, 2am local time



AIRSAR/TOPSAR, from which a multiband perspective view of the mountains just north of JPL's home in Pasadena, Calif

美国SRTM雷达地表影像（2000， 2）

