

## 通用大气辐射传输软件(CART)及其应用

魏合理<sup>1</sup>, 陈秀红<sup>1</sup>, 戴聪明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 大气光谱透过率和背景辐射的计算在诸如大气遥感、光电工程等领域有重要应用。根据所提出的中分辨率大气分子吸收快速计算方法、大气气溶胶衰减计算方法、大气多次散射快速算法, 研制了一套通用大气辐射传输计算软件(CART), 该软件可根据大气参数快速计算可见光到远红外波段的大气光谱透过率和大气背景辐射, 光谱分辨率  $1 \text{ cm}^{-1}$ , 覆盖可见光到远红外波段。介绍了该软件的计算模型、主要功能和计算实例、部分实际验证结果以及应用领域。CART 在目标辐射特性测量的大气修正、光电设备的设计和性能评估将有广泛的应用。

**关键词:** CART; 大气光谱透过率; 大气背景辐射; 大气修正; 目标辐射特性

**中图分类号:** P427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)12-3360-07

## Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications

Wei Heli<sup>1</sup>, Chen Xiuhong<sup>1</sup>, Dai Congming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The atmospheric spectral transmittance and background radiance have important applications in many research areas, such as atmospheric remote sensing, optical-electronical engineering, etc. Based on our algorithms of fast computation of atmospheric molecular absorptions, the aerosol extinction, and atmospheric multiple-scattering, a combined atmospheric radiative transfer (CART) software was developed. The CART was used to compute atmospheric spectral transmittance and background radiance from visible to far infrared wavelength range efficiently, the spectral resolution of the CART is  $1 \text{ cm}^{-1}$ . The algorithms, the computation functions, and some calculating examples of the CART were introduced. Some experimental results for the validation of the CART were also shown. CART could be used in many fields such as atmospheric transmittance correction for target radiative characteristics measurements, the design and performance evaluation of optic-electronic devices, etc.

**Key words:** CART; atmospheric spectral transmittance; atmospheric background radiance;  
atmospheric correction; target radiative characteristics

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61077081), 国家 863 计划

作者简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大气辐射传输模式研究、卷云辐射传输模式方面的研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

## 0 引言

光波辐射通过大气传输时,要受到大气的吸收和散射<sup>[1]</sup>。一方面,大气衰减来自目标的辐射,使信号减弱,形成大气衰减效应;另一方面,大气散射的太阳辐射以及大气和地表的热辐射形成背景辐射。在实际大气中进行目标辐射特性测量研究中,由于受到大气的影响,同样目标照度条件下,不同的大气传输特性条件,导致测量得到的目标光学特性有不同的表现结果。为了获得目标的本征辐射特征,在辐射特性测量时,必须定量地修正辐射传输路径的大气的衰减<sup>[2]</sup>。同时,为了评估仪器性能(如对比度、作用距离等),还必须研究环境的背景辐射<sup>[3]</sup>。

在实际应用中,大多数情况下无法进行实时大气透射和背景辐射的测量,如何利用易测的大气参数来获得大气传输的信息成为目前研究的热点。因此,根据已有的大气辐射传输知识,建立快速而具有相当精度的大气光谱透过率和环境背景辐射量的计算模式软件是非常必要的。在大气辐射传输的研究中,建立实用的具有自主知识产权的通用大气辐射传输计算软件(CART)。文中介绍了其主要计算模型、功能、计算实例以及部分实际验证结果。CART 在目标辐射特性测量的大气修正、大气环境背景辐射计算、光电设备的设计和性能评估、大气遥感等方面将有广泛的应用。

## 1 CART 辐射传输模型

大气衰减包括大气各分子和气溶胶粒子的吸收和散射引起辐射能量的损失;大气背景辐射包括地表和大气散射的太阳辐射和及其热辐射。

### (1) 中分辨率大气分子吸收模型<sup>[4-5]</sup>

笔者在 CART 模式中提出了一个基于逐线积分拟合的中等分辨率(光谱分辨率  $1 \text{ cm}^{-1}$ )的大气分子吸收透过率计算模型。

考虑大气中主要的吸收气体包括水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化碳、氧化二氮、甲烷和氧气这七种气体分子,提出了基于逐线积分拟合的快速计算模式<sup>[4]</sup>,用逐线积分计算程序计算  $1 \text{ cm}^{-1}$  带宽内的平均大气透过率,将该平均大气透过率表示为指数 4 阶非线性拟合的关系式:

$$\bar{T}_v(t, p, u) = \exp \left\{ -u \cdot \exp \left( \sum_{i=0}^4 c_i(t, p) [\log(u)]^i \right) \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_v(t, p, u)$  为某种大气份在给定波数  $\nu \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$  范围内、温度  $t$ 、气压  $p$  和吸收含量  $u$  下的平均透过率;  $c_i(t, p)$ ,  $i=0, 1, 2, 3, 4$  是拟和系数,预先计算各种吸收气体从  $1 \sim 25\,000 \text{ cm}^{-1}$  ( $0.4 \mu\text{m}$ —远红外)、 $200 \sim 320 \text{ K}$  温度范围内的 9 种温度、 $0.05 \sim 1\,100 \text{ hPa}$  气压范围内的 9 种气压、50 种气体含量(跨 7 个数量级)下的拟合系数。这些参考气压、参考温度和 50 种气体含量涵盖了实际大气中所有可能的大气条件。形成各种气体在各种温度、气压和波数网格点上的拟合参数数据库,在计算时可根据实际情况快速插值得到给定温度和气压的拟合系数,进而根据公式(1)快速得到大气透过率。对于非均匀大气,采用 C-G 近似,获得路径等效拟合系数。给定大气参数(温度、气压和吸收气体含量的路径分布)就可以快速计算出各个波长处各种大气分子吸收的衰减。目前,该拟合参数是基于 2008 版的大气高分辨率分子吸收数据库 HITRAN2008 的大气分子吸收参数计算的。分子连续吸收采用 MT\_CKD1.2<sup>[6]</sup>方法计算。

### (2) 大气气溶胶衰减模型<sup>[7]</sup>

在 CART 模式中提出了一个根据气溶胶种类(或提供气溶胶复折射率)、地面能见度、实测气溶胶尺度谱分布、消光高度分布廓线用 Mie 散射公式计算气溶胶衰减的模式。

实际观测表明近地面气溶胶尺度谱分布  $\frac{dN}{dr}$  近似为容格(Junge)谱分布。因此,有荣格指数近似地可以得到气溶胶粒子谱分布。气溶胶的复折射率  $m$  由气溶胶种类决定。根据气溶胶的复折射率和谱分布,用 Mie 程序计算气溶胶衰减效率因子  $Q_e$ , 得到地面上归一化到  $0.55 \mu\text{m}$  波长气溶胶的相对衰减系数  $\sigma_c^1(0, \lambda)$ :

$$\sigma_c(0, \lambda) = \int_n^n \pi r^2 Q_e(\lambda, m) \frac{dN}{dr} dr \quad (2)$$

$$\sigma_c^1(0, \lambda) = \frac{\sigma_c(0, \lambda)}{\sigma_c(0, 0.55)} \quad (3)$$

实际气溶胶的衰减由归一化消光系数和由地面能见度换算的  $0.55 \mu\text{m}$  波长气溶胶的消光系数的乘积得到。

除了选用自定义的以荣格指数表示的气溶胶粒子尺度谱分布和自定义的气溶胶介质复折射率的气溶胶种类外,还可以选用 MODTRAN 的乡村型、城

市型、海洋型、沙漠气溶胶类型,同时还集成了广泛使用的 OPAC 的气溶胶种类(干净大陆型、城市型、海洋型、沙漠型)。

在低对流层 0~10 km 高度范围内,气溶胶随高度近似按指数衰减,则给定高度  $h$  上的气溶胶衰减系数、吸收系数为:

$$\sigma_A(h, \lambda) = \sigma_A(0, \lambda) e^{(-\frac{h}{Z})} \quad (4)$$

式中:  $Z$  为气溶胶标高。CART 模式中的气溶胶消光高度分布廓线具有标高选项,也可以直接采用实际测量(如用激光雷达测量的气溶胶的高度分布廓线)的结果。另外,还可以选用了 MODTRAN 中气溶胶消光的高度分布模式。

10~30 km 上的气溶胶衰减变化随时间变化不大,提供三种选择:背景平流层型、中等火山型和强火山型模式。30 km 以上可忽略气溶胶的衰减。

### (3) 大气多次散射快速计算方法<sup>[8]</sup>

大气气溶胶和分子的单次散射有分析解,根据几何位置和介质的散射相函数可以直接计算,建立了一个单次散射的辐射传输计算模式。

多次散射可根据每个高度层大气介质的光学厚度、单次散射反照率和单次散射相函数采用离散坐标法(DISORT)计算。但是在每个波长上执行DISORT计算特别费时。笔者提出了采用分段拟合 DISORT 计算结果的方法建立多次散射快速计算模式,计算精度(均方根误差)可以达到 2% 以内,计算速度比直接调用 DISORT 提高 200 多倍。在该算法中,多次散射是介质吸收光学厚度、散射光学厚度和地表反照率组合的光滑的单值函数。因此,在一定带宽范围内,只要计算几个采样波数处的多次散射,即可快速得到几千个波数范围的多次散射结果<sup>[8]</sup>。

### (4) 大气热辐射计算模型

建立了热辐射、太阳直接辐照度的计算模式。

### (5) 国内若干地区的大气平均模式

中国幅员辽阔,大气条件千差万别,直接采用外的标准大气模式,与实际情况可能有很大差别。在 CART 模式中,除了六种标准大气模式(美国标准大气、副极地夏季、副极地冬季、中纬度夏季、中纬度冬季、热带)外,还嵌入了国内典型地区大气模式,包括东南沿海、内陆地区、和西北地区逐月平均的大气参

数模式,供计算时方便地调用。还可根据具体情况,输入不同地方的大气模式。

## 2 CART 主要功能和计算实例

根据上述模型,编制了实用的大气辐射传输软件 CART。其主要架构和功能模块如图 1 所示。主要功能包括:大气水平透过率 CART1 和斜程光谱透过率 CART2 计算、散射太阳辐射 CART3(包括单次散射和多次散射及地表反射)计算、大气热辐射 CART4(包括大气程辐射和地表热辐射)计算、太阳直接辐照度 CART5 的计算五个部分。

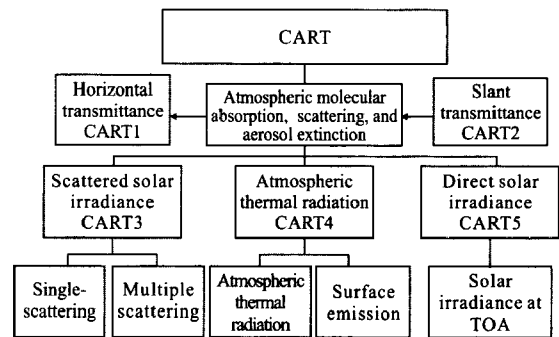


图 1 CART 的总体构架

Fig.1 General framework of CART

编制了方便易用的 CART 的界面输入输出菜单,包括大气模式的选择和输入、气溶胶模式(种类选择)及其有关参数(地面能见度、荣格指数、复折射率选择、气溶胶标高或高度分布廓线)的输入、太阳方位和观测空间几何位置的输入、环境参数(地表反照率、温度等)、光谱范围和仪器函数的输入、输出结果的查看绘图等等。界面菜单方便易用,可根据实际大气参数快速计算所关心情况下的大气光谱透过率和环境背景辐射。

图 2 给出 CART 模拟计算的东南沿海地区 1 月和 7 月的地面到大气顶斜程大气光谱透过率(观测天顶角 30°,地面能见度 23 km,海洋型气溶胶模式)。从图上可以看出:由两个季节的(1 月代表冬季;7 月代表夏季)大气模式计算的大气透过率差别明显,尤其是在中红外和长波红外波段(冬季大气透过率几乎是夏季透过率的两倍),因为这两个波段受水汽影响较大。因此,大气模式对传输路径上的大气辐射传输起至关重要的影响。

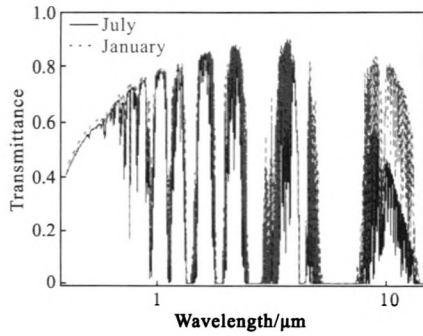


图 2 CART 模拟计的东南沿海地区 1 月和 7 月大气光谱透过率  
Fig.2 Examples of calculated atmospheric spectral transmittance by  
CART for the atmospheric model of south-east coast in  
January and July

图 3 给出了 CART 计算的散射辐射的计算实例:大气顶(TOA)垂直向上的大气散射和地表反射的太阳辐射(灰色)和地面垂直向下大气散射的太阳辐射(黑色)(内陆大气模式,陆地地表,太阳天顶角 30°,相对方位角 180°)。可以看出,当波数大于 4000cm<sup>-1</sup>(即波长小于 2.5 μm)时,无论是大气向上还是大气向下传输,大气散射的影响不可忽略。且大气向上的总辐射由于包括了地表反射辐射,一般比大气向下的散射辐射大。大气向下的散射辐射跟大气状况、太阳角度参数、观测方位参数有关,而大气向上的总辐射除跟上述参数有关外,还和地表反照率参数关系较大,特别是大气窗口区,取决于观测点的地表类型。在该软件中提供了七种地表类型的根据实测值统计平均的地表反照率参数:分别为雪、海水、草地、土壤、沙漠、森林、农作物,光谱分辨率比 MODTRAN 中提供的地表反照率的光谱分辨率高。因此,该软件可以模拟计算各个方向、可见光到中波红外波段高光谱分辨率的大气背景辐射。

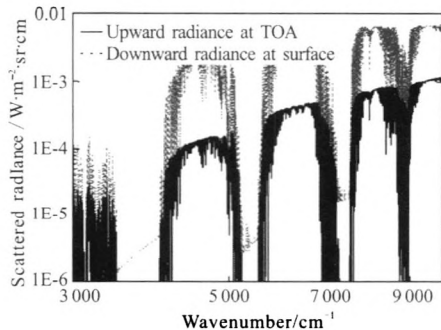


图 3 CART 模拟计算大气顶向上和地面向下的散射辐射  
Fig.3 Scattered upward radiance at TOA and downward radiance  
at the surface by CART

图 4 给出 CART 模拟计算的西北地区大气顶地表和大气向上的热辐射(黑色)以及在地面上大气向下的热辐射(灰色)。地表温度为 290 K,沙漠型地表,海拔高度为 1 km。760~990 cm<sup>-1</sup>及 1 100~1 200 cm<sup>-1</sup>两个波段是大气窗区,因此在地面上观测到的这两个波段范围内的大气向下的热辐射很小,而在大气顶观测到的主要是透过大气的地表发射辐射。15 μm(667 cm<sup>-1</sup>)CO<sub>2</sub>吸收带、9.6 μm(1 041 cm<sup>-1</sup>)O<sub>3</sub>吸收带附近、以及 6.2 μm(1 600 cm<sup>-1</sup>附近)水汽吸收带,地面上观测到的大气向下辐射较大,在大气顶则相反。

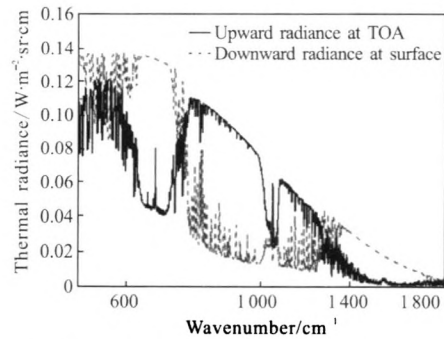


图 4 CART 模拟计算大气顶向上和地面向下的大气热辐射  
Fig.4 Upward thermal radiance at TOA and downward at the  
surface by CART

图 5 给出了 CART 计算的内陆地区不同高度上(地面和 10 km 高度)太阳直接辐射。可以看出,在地面上观测到的太阳直接辐射可以看到显著的大气吸收结构,而在 10 km 高度上这种大气吸收结构不明显,是因为大气吸收成分(水汽占主要部分)主要分布在 10 km 以下高度。

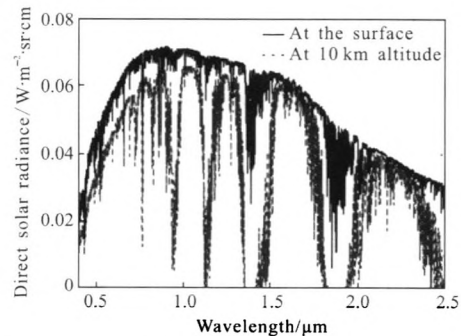


图 5 CART 模拟计算地面和 10 km 高度上太阳直接辐照度  
Fig.5 Direct solar irradiance at surface and at an altitude of  
10 km by CART

### 3 CART 计算结果的部分实验验证

前期采用各种方法对通用大气辐射传输模式软

件 CART 的计算结果作了大量的实验验证工作,部分结果如下。

(1) 水平大气光谱透过率测量和计算的比较

图 6<sup>[9-10]</sup>为用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, MR170 型) 和 1000 °C 标准黑体+平行光管组成的水平大气红外光谱透过率测量系统测量的水平 320 m 距离上的红外大气光谱透过率与 CART 计算结果的比较。可以看出,计算值和测量值符合得非常好,在 2~10 μm 波段,两者的均方根偏差为 5.4%。

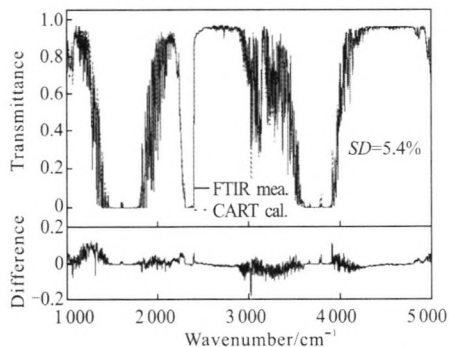


图 6 CART 计算和 FTIR 测量的水平红外大气光谱透过率比较

Fig.6 Comparison of atmospheric IR spectral transmittance along horizontal path between CART calculation and FTIR measurement

(2) 斜程大气光谱透过率的验证

图 7<sup>[10]</sup>为用 PGS100 型光栅太阳辐射计测量的可见光到近红外波段(0.4~1.0 μm)斜程整层大气光谱透过率与计算结果的比较。其中计算值是根据观测的 Junge 指数、激光雷达消光廓线、地面大气参数计算的垂直大气透过率用 CART 计算得到的。图中将计算值和观测值同时平滑到 10 nm 带宽内,计算值与观测值的标准偏差为 8%。

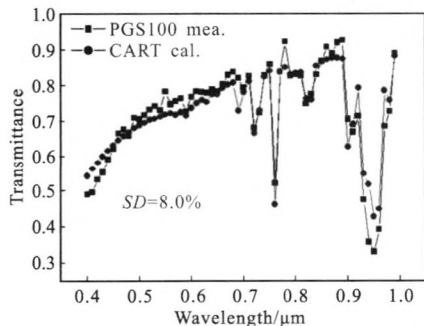


图 7 CART 计算和 PGS100 实测的大气斜程光谱透过率比较

Fig.7 Comparison of atmospheric spectral transmittance along slant path between CART calculation and PGS100 measurement

(3) 大气和地表散射太阳辐射计算结果的验证

图 8<sup>[10]</sup>为搭载在 NASA ER2 飞机上的 (AVIRIS) 从 20 km 高度上测量的地表和大气的散射辐射和 CART 计算结果的比较。当地的大气参数廓线(如温度、气压和相对湿度)由附近的气象部门提供。根据这些参数,用 CART 模拟计算该波段范围的大气向上的辐射光谱,并将该光谱平滑到 10 nm 带宽。模拟结果和观测值的均方根误差为 7.4%。

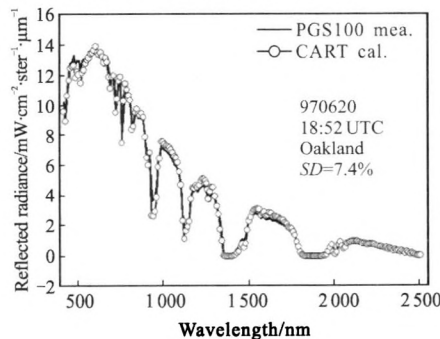


图 8 CART 计算与 AVIRIS 观测的大气散射辐射比较

Fig.8 Comparison of atmospheric scattering radiance between AVIRIS measurement and CART calculation

(4) 大气红外背景辐射计算结果的验证

(a) 地表大气向下的辐射

图 9 中<sup>[10-11]</sup>,图 (a)和图 (b)分别为用高分辨率

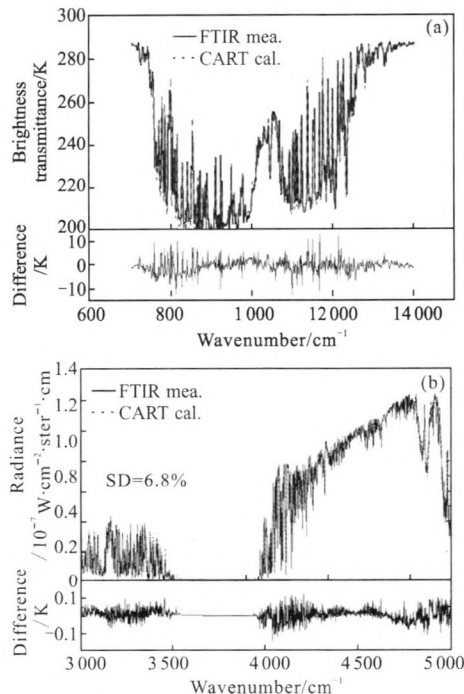


图 9 CART 计算和 FTIR 实际测量的在地面大气向下的红外背景光谱辐射的比较

Fig.9 Comparisons of downward IR atmospheric background spectral radiance between CART calculation and FTIR measurements at the surface

FTIR 在合肥地区测量的大气向下的红外光谱背景辐射及其与 CART 计算结果的比较。取安庆和阜阳当天 8:00 时刻探空的平均值近似作为当地当时的大气参数廓线,用软件计算了对应时刻和对应天空位置的大气背景辐射值。同样为了便于比较,把两者的分辨率同时降低到  $2\text{ cm}^{-1}$  光谱分辨率。可以看出,计算值和测量值较一致,在  $700\sim 1400\text{ cm}^{-1}$  波段内,两者的标准偏差为  $3\text{ K}$ ,在  $3000\sim 5000\text{ cm}^{-1}$  波段内,两者的相对误差为  $6.8\%$ 。其差别很大程度上是由于测量和计算的光谱分辨率不完全一致造成的。

#### (b) 大气顶地表和大气向上的背景辐射

图 10<sup>[4]</sup>为搭载在 NASA EOS-AQUA 卫星平台上 AIRS 卫星对地测量晴空条件下的高光谱分辨率大气红外背景辐射(实线),根据当时该象元的大气参数用 CART 模式模拟计算了该种情况下的大气背景辐射(虚线)。由于 AIRS 观测光谱和 CART 计算光谱分辨率不完全一致,图中是将两者的光谱平滑到了  $5\text{ cm}^{-1}$  间隔内的结果。可以看出,测量和计算的大气背景亮温非常吻合。

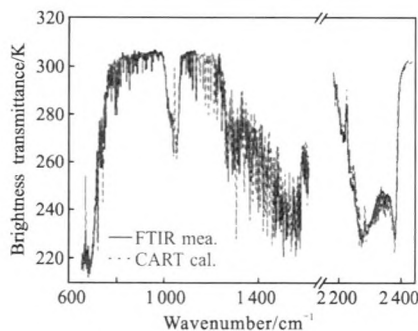


图 10 CART 模拟和 AIRS 观测的大气向上红外亮温光谱比较

Fig.10 Comparison of upward infrared spectral brightness temperature between CART calculation and AIRS measurement

从上述计算结果和实际测量结果的比较来看,CART 可以较准确地模拟计算大气光谱透过率、大气散射背景辐射、大气和地表的热辐射。

## 4 CART 应用领域

CART 能够模拟计算大气可见光到远红外波段的大气光谱透过率和环境大气背景辐射,可以应用于目标辐射特性测量的大气修正、光电设备的设计和性能评估、光学大气遥感数据的解译等方面。

### (1) 用于目标辐射量测量的大气修正

在大气中的目标辐射特性测量研究中,由于受到大气的影 响,在同样的目标照度条件下,不同的大气传输特性条件,导致测量得到的目标光学特性有不同的表现结果。CART 可以根据实际测量的大气参数计算得到测量时刻的仪器响应波段的平均大气透过率,对测量信号进行修正,得到扣除大气影响的 目标的本征辐射值。

目标辐射特性测量的大气修正归结为等效大气透过率的获得。要获得高的大气修正精度,需要实时探测测量条件下影响光传输的大气参数廓线。其中,重要的大气参数包括大气水汽廓线、大气气溶胶消光廓线、大气温度廓线以及重要的微量气体成分廓线。另外,建立当地的平均的大气参数模式,相对于用标准大气模式,可以显著地提高大气修正精度。

### (2) 用于光电仪器的设计和性能评估

工作于大气中的光电仪器其性能要受到大气的影 响,大气透过率和大气背景辐射影响仪器的作用距离和仪器成功使用的概率。所以在设计和仪器性能评估时,根据仪器使用区域的大气特性范围,需计算大气透过率和背景辐射的变化范围,估计仪器的信噪比和目标背景的对比度,CART 能够计算特定光电仪器的大气透过率和背景辐射(包括太阳、天空和地面的辐射),从而在光电设备的设计和性能评估中得到应用。

### (3) 用于大气遥感中的大气透过率和背景辐射计算

对于主被动光学大气遥感,首先要建立光辐射大气传输的前向模式(forward model),模拟计算各种情况下大气光谱透过率和背景辐射。CART 可以用来针对特定的光电设备,建立专用的前向辐射传输模式。

## 5 结 论

建立了一套具有自主知识产权的基于国内大气模式的中分辨率快速辐射传输模式及软件——CART。在该项工作中:(1) 提出了基于逐线积分非线性拟合的分子吸收快速计算算法;(2) 建立了基于国内部分地区大气模式的中分辨率大气分子吸收快速计算模式;(3) 建立了根据实测地面大气参数、气溶胶尺度谱分布和气溶胶高度分布计算气溶胶消光



的气溶胶衰减计算模式;(4) 建立了一个基于 DISORT 的多次散射快速计算模式;(5) 建立了热辐射、太阳直接辐照度的计算模式。并通过地面实验观测数据、卫星或飞机上观测数据,部分验证了 CART 软件的可靠性和计算精度。

CART 将在目标辐射特性测量的大气修正、光电设备的设计和性能评估、光学大气遥感数据的解译等方面得到应用。

#### 参考文献:

- [1] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002.
- [2] Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, et al. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)  
魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量中的大气修正. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 472-478.
- [3] Wang Weihua, Niu Zhaodong, Chen Zengping. Research on operating range of staring IR aging system in sea sky background [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2006, 25(2): 150-152. (in Chinese)  
王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 150-152.
- [4] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8360-8370.
- [5] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan, et al. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)  
陈秀红, 魏合理, 徐青山, 等. 红外大气透过率的计算模式 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.
- [6] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 91: 233-244.
- [7] Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21 (2): 183-189. (in Chinese)  
陈秀红, 魏合理, 李学彬, 等. 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21 (2): 183-189.
- [8] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy conditions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(1): 109-118.
- [9] Chen Xiuhong, Wei Heli. A combined atmospheric radiative transfer model(CART): a review and applications[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 14(3): 190-198.
- [10] Chen Xiuhong. Development of the combined atmospheric radiative transfer software[D]. Hefei: Hefei Physical Institutes of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)  
陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)研制[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2011.
- [11] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. The ground-based measurements of Infrared atmospheric background spectral radiances[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284-290. (in Chinese)  
魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 284-290.