

王倩, 杨忠东, 毕研盟. CO₂ 高光谱遥感仪器的光谱参数和信噪比需求. 应用气象学报, 2014, 25(5): 600-609.

CO₂ 高光谱遥感仪器的光谱参数和信噪比需求

王倩¹⁾²⁾ 杨忠东²⁾ 毕研盟^{2)*}

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081) ²⁾(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要

卫星短波红外 CO₂ 遥感获得大气低层 CO₂ 浓度信息, 已成为目前国际热点研究领域。结合气候变化及碳源、汇观测需求, 利用高精度大气辐射传输模式研究了高光谱分辨率、高精度 CO₂ 探测目标的可实现性。针对高光谱 CO₂ 探测器光栅分光、阵列探测器特点, 分析了光谱分辨率、光谱采样率等关键技术指标对 CO₂ 探测的可能影响; 基于辐射敏感度因子分析了不同探测精度要求下的信噪比需求。结果表明: 高光谱 CO₂ 探测器首先应具有足够高的光谱分辨率, 以便从太阳反射连续谱段中分辨出 CO₂ 吸收线; 为保证 CO₂ 光谱的准确性, 光谱仪所用探测器面元应该保证光谱采样率大于 2; 尽管探测边界层内 CO₂ 浓度 1% 变化所要求的信噪比难以达到, 但探测整层大气 CO₂ 浓度 1% 的变化所需要的信噪比是可以实现的。

关键词: 高光谱; CO₂; 遥感; 碳卫星

引 言

CO₂ 是影响地球辐射平衡的最重要的温室气体^[1]。化石燃料的燃烧和人类活动每年至少向大气中排放 300 亿吨的 CO₂。全球地面监测显示: 这些人排放的 CO₂ 有近一半累积在大气中, 剩余的被海洋和陆地生物圈等 CO₂ 汇吸收^[2-3]。目前地面 CO₂ 监测网络能对全球尺度的 CO₂ 提供准确测量^[4-6], 但它依然缺乏对区域尺度上 CO₂ 源、汇及离散点源的监测能力。星载仪器探测大气 CO₂ 浓度能改善地面监测站点分布不均、观测数据少等不足^[7]。

人类活动和自然过程会改变近地表 CO₂ 浓度, 这种影响在边界层最大, 变化可以达 8% (大于 30×10^{-6}), 随高度的升高快速减小, 这种变化在区域到全球尺度上不超过 2% (约 8×10^{-6})。CO₂ 浓度东西向变化通常不超过 0.3%~0.5%。由于大气 CO₂ 浓度变化主要发生在大气边界层内, 所以在测量精度能够达到要求的条件下, 对 CO₂ 柱浓度的测量能很好地代表与地表源、汇相关的 CO₂ 浓度变

化, 根据 X_{CO_2} (CO₂ 柱浓度与干空气柱浓度之比) 的时空梯度可以推断出 CO₂ 的源、汇分布。模式研究显示: 如果在区域尺度上 (大陆上小于 100 km, 海洋上小于 1000 km 的范围), X_{CO_2} 的月平均准确度可达 0.3%~0.5% ($1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$), 那么空基测量的 X_{CO_2} 能显著减小 CO₂ 源、汇分布的不确定性, 尤其在地面监测站点稀少的海洋和热带草原区域^[7]。因此, 利用卫星定量遥感大气 CO₂ 浓度变化将在大气成分研究中发挥越来越重要的作用。

搭载于欧洲 ENVISAT 卫星的 SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) 探测器利用 1.58 μm 的 CO₂ 弱吸收带实现了对 CO₂ 的试验性探测^[8], 采用以经典 DOAS 方法为基础的改进算法, 证实从空间观测大气 CO₂ 梯度的可能性^[9]。日本 GOSAT 卫星搭载的 TANSO-FTS 探测器对 CO₂ 和 CH₄ 柱总量进行探测, 反演算法采用的是基于贝叶斯理论的最优估计方法^[10]。尽管搭载高光谱 CO₂ 探测器的美国 OCO 卫星首次发射失败, 但美国 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 随后启动 OCO-2 任务, 并于 2014 年 7 月发射, 用于探测全球 CO₂ 源、汇分

2013-08-29 收到, 2014-07-24 收到再改稿。

资助项目: 国家 863 计划 (2011AA12A104)

* 通信作者, email: biym@cma.gov.cn

布^[11]。我国正在研制中的碳卫星预计 2015 年发射,同样搭载了短波红外高光谱 CO₂ 探测器。

上述卫星探测 CO₂ 皆在太阳短波红外波段,除 GOSAT 卫星采用傅里叶变换分光干涉技术外,SCIMACHY 探测器、OCO 卫星以及我国的碳卫星皆采用光栅分光技术,因此,针对光栅式高分辨率光谱仪特点,从探测大气 CO₂ 柱含量需求出发,分析了仪器光谱参数(包括光谱分辨率、光谱采样率)及信噪比等关键指标的设计要求,这些因素可以直接影响探测数据本身的谱线形状、噪音水平,从而最终影响 CO₂ 含量反演结果。

受研制水平限制,基于面阵探测的光栅光谱仪或多或少会受到光谱欠采样问题的影响^[12],给 CO₂ 光谱的解译造成困难,从而直接影响数据的反演分析。这一问题最早在 GOME(Global Ozone Monitoring Experiment)上发现,人们在拟合 GOME 观测的 O₃ 光谱时发现,存在大的系统性拟合残差和误差,即使在辐射率和辐照度之间进行多普勒频移订正后,上述残差和误差仍然存在。Chance 等^[12]针对 GOME 从反演的角度展开如何修正欠采样光谱的问题。本文针对高光谱 CO₂ 探测器高光谱分辨率的特点,紧扣正在研制的 CO₂ 探测器,对欠采样问题进行分析,从仪器技术指标分析角度讨论如何避免欠采样问题的出现,并尝试寻找解决这一问题的方案。

1 模拟观测系统

正演模式通过描述大气中的辐射传输过程、地表反射过程以及仪器效应对仪器接收辐射的影响这一完整的观测物理过程,模拟仪器接收的反射太阳光谱。完整的正演模式系统由太阳模型、辐射传输模式、地表模型以及仪器模型 4 个部分组成。太阳模型提供所需的太阳光谱;正演辐射传输模式是整个模拟观测系统的核心,用于模拟太阳辐射穿透大气,被地表反射回空间这一全部物理过程;仪器模型将高分辨率的光谱与仪器线型函数卷积,修正仪器效应,模拟仪器观测光谱。

1.1 短波红外 CO₂ 遥感的基本原理

短波红外 CO₂ 遥感主要利用太阳辐射短波红外部分穿过大气时被 CO₂ 分子吸收,形成特有的

CO₂ 吸收谱线,吸收谱线的深度随 CO₂ 含量的增加而加强,根据 1.6 μm 波段的光谱形态,通过高精度的辐射传输模拟计算进行定量反演^[13]。在平面平行大气晴空条件下,观测的辐射强度可表示为

$$I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) = F_0(\lambda) \cos \theta_0 \cdot \alpha(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) \cdot \langle \exp\{-\int_0^s \sum_{m=1}^M [\sigma_m(\lambda, s) N_m(s)] ds\} \rangle. \quad (1)$$

其中, $I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0)$ 是在波长 λ 处观测的辐射强度。 θ 和 φ 是观测天顶角和方位角, θ_0 和 φ_0 是对应的太阳天顶角和方位角。 $F_0(\lambda)$ 是大气顶的太阳通量, $\alpha(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0)$ 是地表反射率, $\sigma_m(\lambda, s)$ 和 $N_m(s)$ 分别表示光学路径上气体的吸收截面和数密度,积分路径 s 表示入射太阳光从大气顶进入大气层后,由地表反射到空中,最后到达仪器的路径。“ $\langle \rangle$ ”表示所有光学路径的平均^[14]。

辐射传输模式能在一定的观测几何和地表大气状态下得到高分辨率的模拟光谱,而仪器实际获得的 CO₂ 吸收光谱分辨率由 CO₂ 探测器特征所决定^[15],模拟的光谱需要通过与仪器线型函数卷积对仪器效应修正才能与观测光谱比较。因此,仪器模型将模拟光谱和仪器线形函数(ILS)卷积,模拟 CO₂ 探测器的观测光谱:

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\lambda') \times \text{ILS}(\lambda, \lambda') d\lambda'. \quad (2)$$

1.2 正演辐射传输模式

LBLRTM 逐线积分辐射传输模式是在 FASCODE 模式基础上发展起来的一种高效、准确的逐线积分辐射传输模式,它以最精细的光谱分辨率精确计算孤立的、重叠的分子谱线,通过对每一层大气分子的吸收和一些连续吸收的计算,得到高精度透过率、光学厚度等物理量^[16],LBLRTM 模拟精度可以达到 0.5%^[17-18]。该模式的局限性在于不能计算云和气溶胶的多次散射。

SCIATRAN 大气辐射传输模式是在 GOMETRAN 模式基础上开发的高分辨率的大气辐射传输模式,最新研发的 SCIATRAN 3.1 版本,能快速准确地模拟光谱,还可以用于地基、空基及大气中任意高度观测光谱的模拟。辐射传输计算的光谱范围为 175.44 nm ~ 40 μm,考虑了 23 种痕量气体、云、气溶胶及地表反照率的影响,能够结合仪器观测特点模拟辐射率、权重函数、垂直光学厚度等多种参数,具有很强的可调节性^[19]。

本研究充分利用 LBLRTM 对 CO_2 分子透过率光谱高精度计算的优势,深入了解 CO_2 吸收线特征,研究光谱分辨率和采样率等仪器关键指标对获取的 CO_2 光谱的影响,结合 SCIATRAN 模式强可调节性的特点,分析信噪比需求的问题。

2 CO_2 遥感仪器光谱参数

2.1 光谱分辨率

美国和中国皆在发展高光谱 CO_2 探测器,其典型特点是采用光栅光谱仪,工作波段分别为 $0.76 \mu\text{m}$ 的 O_2 -A 带, $1.61 \mu\text{m}$ 的 CO_2 弱吸收带和 $2.06 \mu\text{m}$ 的 CO_2 强吸收带。 CO_2 柱含量的探测主要依赖弱吸收带,谱段范围在 $1594 \sim 1624 \mu\text{m}$,约 30 nm 带宽;碳卫星光谱分辨率初步设计为 0.08 nm (0.312 cm^{-1}),与 OCO 卫星相似。工作时通过探测吸收带内 CO_2 吸收线强度的变化获取 CO_2 浓度信息。为了从整个连续谱带中准确辨别出 CO_2 吸收线,探测器应该具有高的光谱分辨率。

标准状态(温度为 273 K ,气压为 1013 hPa)下, $1.6 \mu\text{m}$ 波段的 CO_2 吸收线宽度约为一常数值

0.07 cm^{-1} ^[20],考虑到仪器对 CO_2 浓度变化的灵敏度和信噪比水平,高光谱探测器分辨率能达到 0.07 cm^{-1} 是最理想的情况^[21]。但实际上,受仪器研制水平的限制,在保证信噪比的条件下,仪器光谱分辨率达到 0.07 cm^{-1} 是非常困难的。

为此,本文在模拟计算中,选择 1976 年的美国标准大气模型,同时设置了多种分辨率进行比较(光栅光谱仪分辨率与光谱仪的焦距有关,涉及到光学系统优化,这里的讨论假设保持焦距不变),将 0.07 cm^{-1} 作为光谱分辨率(即仪器线型函数的半高全宽,full width at half maximum, FWHM)的参考标准,分别将 0.312 cm^{-1} (代表 OCO 卫星和碳卫星光谱分辨率)、 0.5 cm^{-1} 与之比较,分析 CO_2 吸收光谱的变化特征。LBLRTM 本身光谱分辨率可达 0.0014 cm^{-1} ,在模拟中采用三角型(triangle scanning)函数模拟光栅光谱仪的狭缝函数,并作为仪器线型函数,与 LBLRTM 原始光谱进行卷积获得所需要的上述 3 种光谱分辨率的透过率光谱。

基于上述条件,模拟了碳卫星星下点观测时 CO_2 透过率光谱,图 1 是在 3 种光谱分辨率下模拟的 $1.61 \mu\text{m}$ 谱段的 CO_2 透过率光谱,太阳短波红外

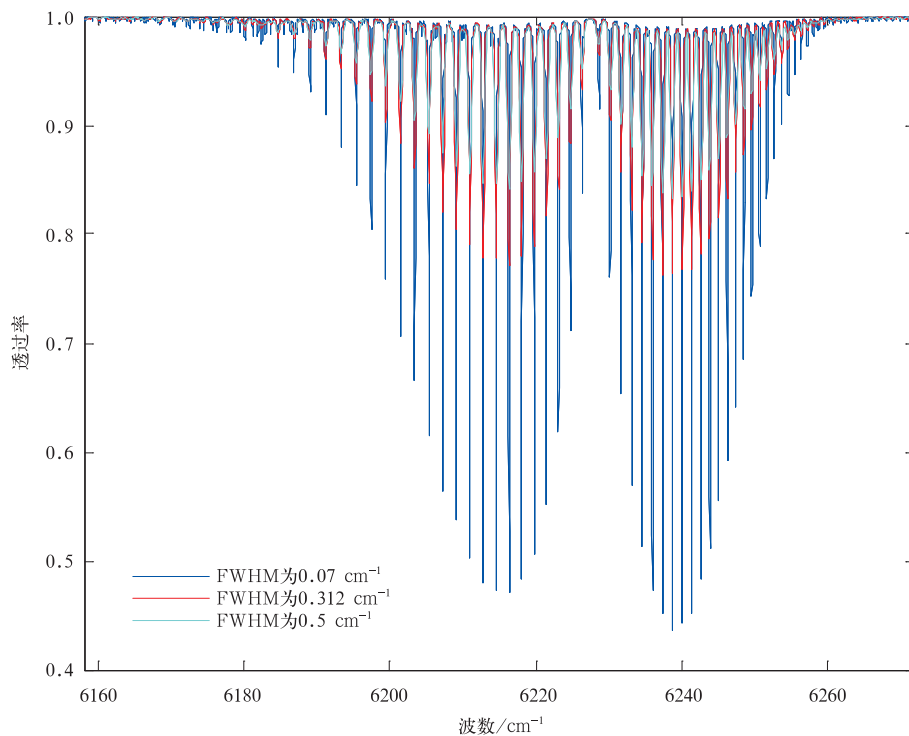


图 1 3 种光谱分辨率下的透过率光谱

Fig. 1 Transmittance spectra for three spectral resolutions

辐射穿透大气被地表反射回太空,因此大气顶出射辐射包含了 CO₂ 柱浓度的信息。1.61 μm 谱段的 CO₂ 透过率光谱图表现出规则的左右两支,分别是 P 支和 R 支,两支的分界中心约在 6230.81 cm⁻¹,P 支和 R 支透过率最低值中心分别约为 6214.58 cm⁻¹ 和 6241.20 cm⁻¹。由图 1 可以看到,随着光谱分辨率的降低,CO₂ 透过率整体增强,双峰型结构特征变弱。

图 1 是整层大气 CO₂ 吸收结果,直接反映了 CO₂ 分子吸收线位置和吸收强度。由图 1 可见,高光谱分辨率对 CO₂ 含量有高度敏感性,但在吸收线中心,穿透大气 CO₂ 的太阳能量也较低,这需要仪器有极高的信噪比水平。另一方面,在 0.5 cm⁻¹ 光谱分辨率下,能量透过率显著提升,但对 CO₂ 含量的敏感性也会下降。同时光谱分辨率为 0.312 cm⁻¹ (OCO 卫星和碳卫星的分辨率)时的透过率可较好解析 CO₂ 吸收谱线特征,对 CO₂ 含量有中等程度的敏感性,同时保持适中的辐射强度水平。

2.2 光谱采样率

光谱采样率是采样间隔与光谱分辨率之比,它表示在一个仪器线型函数的半高全宽上的采样点个数。高光谱 CO₂ 探测器光谱分辨率高,探测通道多,需要利用面阵式探测器将光栅分出的连续光谱以离散形式准确记录下来。如果光谱仪的分辨率和像元间隔相当,在更小尺度上的光谱特征可能在内插时被忽略,会出现欠采样问题。如果表征仪器分辨率的仪器线型函数的半高全宽(FWHM)与像元间隔之比增加,欠采样问题可以得到改善^[22]。因此,当探测器尺度不够(即采样空间频率低)时,探测器记录的光谱会受到欠采样问题影响^[22]。根据欧洲 SCIMACHY 和 GOME 探测器经验,为避免欠采样问题影响,光谱采样率应不小于 2。美国 OCO 卫星采用了高达 1024×1024 维度的短波红外探测器,以避免欠采样问题影响。

图 2 是在表 1 条件下模拟的 6237~6242 cm⁻¹ 波数范围的透过率光谱,该范围包含了 R 支最低值中心,分别是在仪器线型函数的一个半高全宽上取 1,2,4 个采样点得到的透过率光谱图。由图 2 可以看到,在同样的采样点数条件下,光谱分辨率越高(即仪器线型函数的 FWHM 越小),对吸收线型的

结构特征描述的越精准,包含了更多的吸收线信息;降低光谱分辨率减弱了吸收线特征,甚至使一些明显的结构特征消失。且在相同的光谱分辨率条件下,采样点越多,采样率越高,则吸收线越平滑规则,描述的吸收线越精细。所以,提高光谱分辨率和采样率,有利于获取接近 CO₂ 分子吸收线的高精度的光谱。

表 1 LBLRTM 模拟条件列表
Table 1 Simulation conditions of LBLRTM

模拟条件	参数
大气模型	美国标准大气
扫描函数	三角型函数
波数范围/cm ⁻¹	6237~6242
光谱分辨率/cm ⁻¹	0.0014,0.07,0.312,0.5
FWHM 内光谱采样数	1,2,4

受元器件限制,光谱分辨率和采样率不能无限提高。现以 512×512 维度和 1024×1024 维度两种探测器为例,假设探测器其他参数相同,仅考虑探测器像元数量的影响。在类似碳卫星和 OCO 卫星的探测器设计参数下,两种维度的探测器分别代表了在 1.61 μm 谱段的 CO₂ 吸收线部分采样、全采样两种情况,分别记为探测器 A 和探测器 B。

图 3 为模拟的两种探测器在不同光谱分辨率时的 CO₂ 透过率光谱,表 2 为模拟条件。图 3 中分别为探测器 A 和探测器 B 的透过率光谱,光谱分辨率分别为 0.312 cm⁻¹ 和 0.468 cm⁻¹。由图 3 可见,在光谱分辨率为 0.312 cm⁻¹ 时,透过率峰值都约为 0.777,光谱分辨率为 0.468 cm⁻¹ 时,透过率峰值约为 0.826,这表明仪器光谱分辨率的降低增强了 CO₂ 透过率,也减弱了光谱的双峰型结构特征。另外,在仪器光谱分辨率相同的情况下,两种探测器获得的 CO₂ 吸收线精度表现出一定差异。

图 4 是 6235~6245 cm⁻¹ 波数范围内两种探测器在表 2 条件下对应的透过率光谱。由图 4 可见,在仪器光谱分辨率为 0.312 cm⁻¹ 时,高采样率条件下吸收线结构的峰型特征明显更精细;结合表 2 可以看到,光谱分辨率降低为 0.468 cm⁻¹ 时,两种探测器的采样率均提高 50%,此时,图 4 中两种探测器探测到的 CO₂ 吸收线精度明显提高。

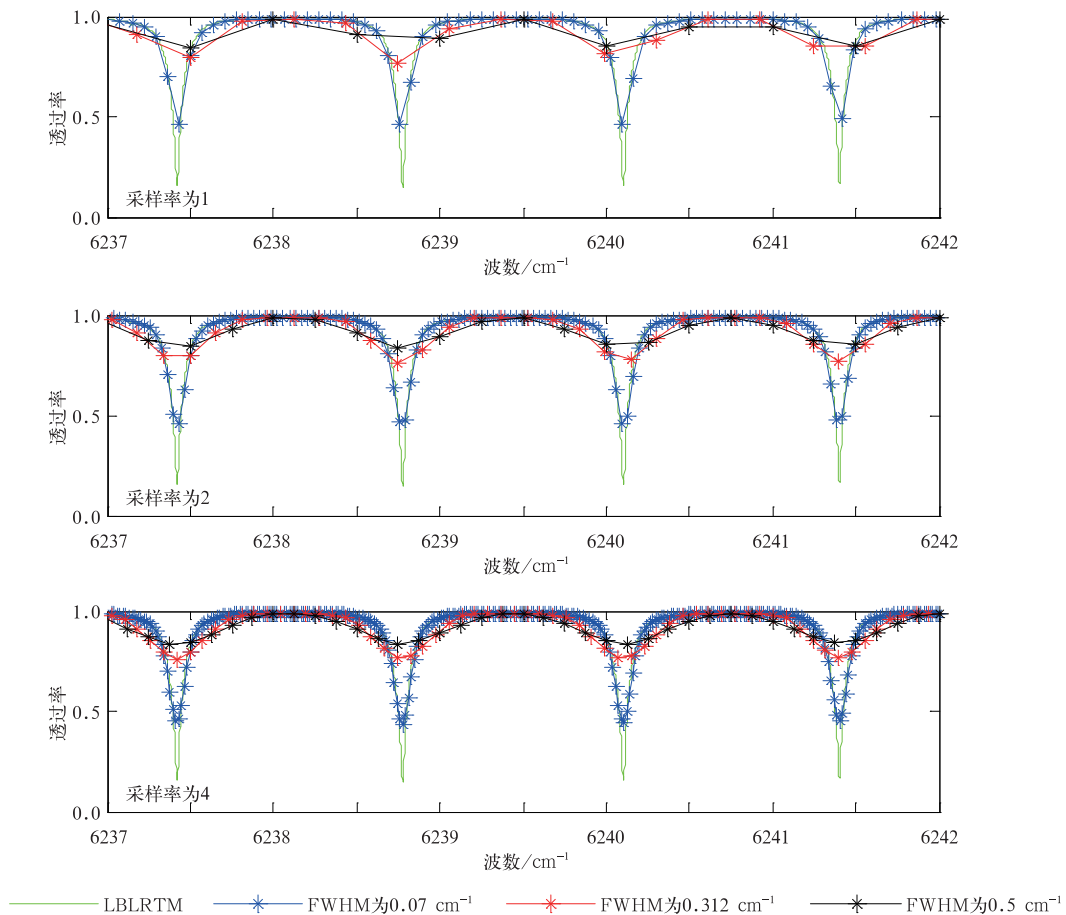


图 2 3 种光谱分辨率和采样率的透过率光谱

Fig. 2 Transmittance spectra for three spectral resolutions and sampling ratios

表 2 探测器的采样间隔和在两种光谱分辨率下的采样率

Table 2 Sampling spacing and sampling ratio for two spectral resolutions of detectors

探测器	采样间隔 /cm ⁻¹	采样率	
		FWHM 为 0.312 cm ⁻¹	FWHM 为 0.468 cm ⁻¹
A	0.234	1.33	2
B	0.117	2.67	4

图 5 是 6235~6245 cm⁻¹ 波数范围内, 两种探测器对应表 2 条件下的采样率与标准条件相比得到的相对误差的柱状图, 其中, 将采样率为 4 个作为标准条件。由图 5 可见, 在仪器光谱分辨率为 0.312 cm⁻¹ 时, 与探测器 B 相比, 探测器 A 由于采样率仅为 1.33, 在大部分吸收通道上出现了明显误差, 最大误差出现在 6238.7 cm⁻¹ 通道, 约为 4.7%, 平均误差为 2.41%; 仪器光谱分辨率降低为 0.468 cm⁻¹ 后, 探测器 B 的采样率达到标准条件 4, 探测器 A 的采样率达到 2, 此时, 探测器 A 在吸收通道处的误差明显减小, 在部分通道的误差减小为零。表 3 是在 6235~6245 cm⁻¹ 波数范围内的吸收通道中, 部分采样引起的平均误差。可以明确的是, 欠采样引起的误差随着采样率提高逐渐减小。

根据奈奎斯特定理^[23], 要获得完整的光谱信息, 光谱分辨率须满足以下条件:

$$H \leq \frac{L}{2N} \quad (3)$$

式(3)中, N 为探测器空间采样频率, L 为谱段宽度, H 为光谱分辨率(FWHM)。在仪器线型函数较为对称的情况下, 须满足式(3)才能保证不受欠采样问题影响。因此, 实际工作中可采取两种方法避免欠采样问题影响。第 1 种是在工作带宽 L 保持不变的情况下, 降低光谱分辨率 H , 以增加采样率; 第 2 种方法, 如果保持光谱分辨率 H 不变, 则需要缩短带宽以增加光谱采样率。具体采用何种方法应该综合考虑仪器研制水平、精度反演需求等多方面影响。

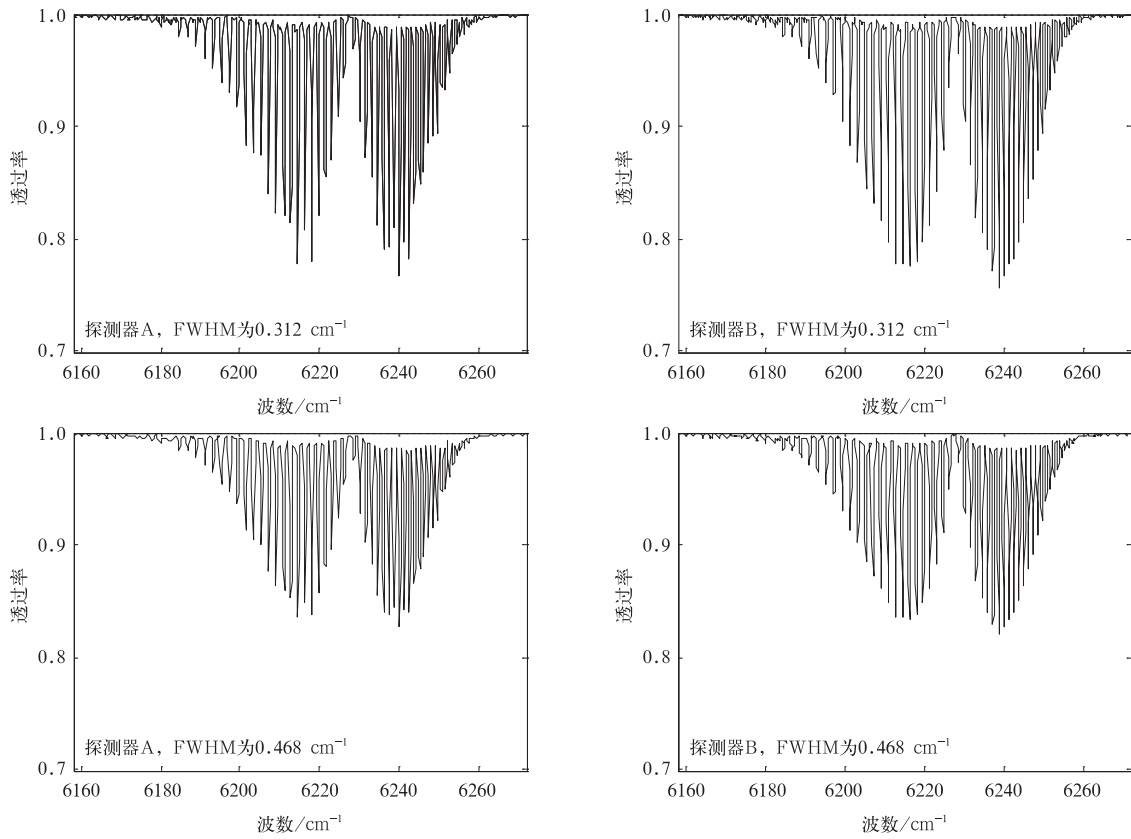


图 3 两种探测器在两种光谱分辨率时 CO₂ 透过率光谱
Fig. 3 Transmittance spectra for two spectral resolutions of two detectors

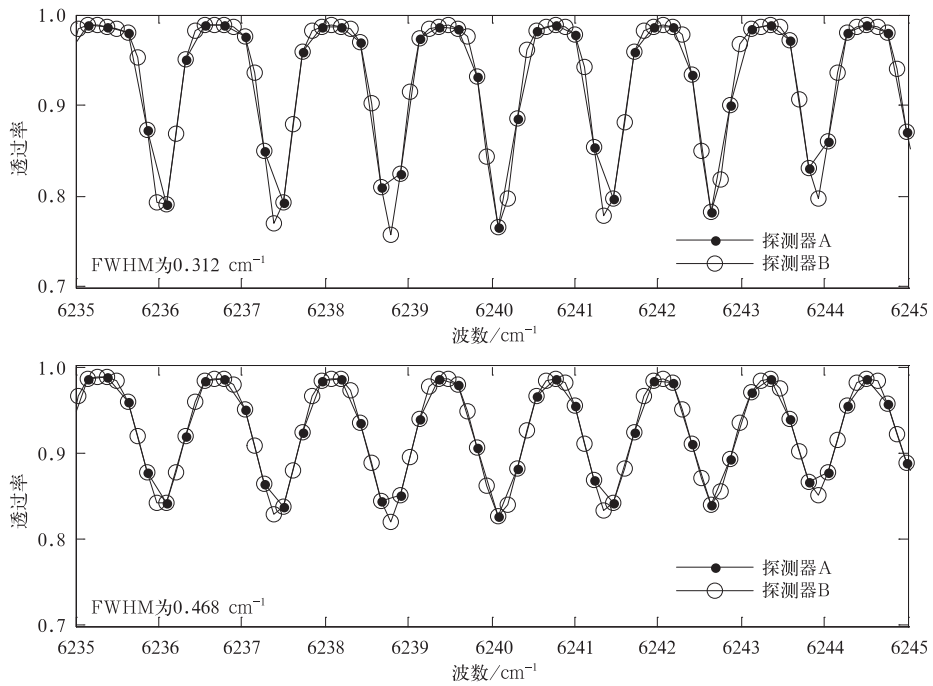


图 4 两种探测器在表 2 采样率下的 CO₂ 透过率光谱
Fig. 4 Transmittance spectra for two detectors under the sampling ratios listed in Table 2

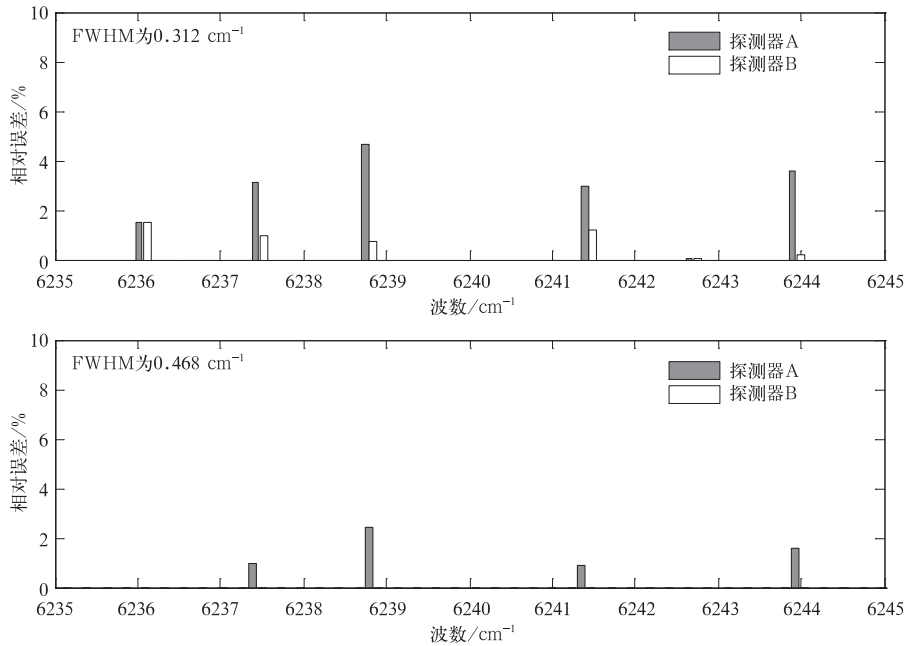


图 5 两种探测器在不同光谱分辨率条件下的透过率相对误差

Fig. 5 Transmittance relative errors for two detectors under two spectral resolutions

表 3 波数范围在 6235~6245 cm⁻¹ 的吸收通道中, 两种探测器在不同光谱分辨率条件下的透过率平均误差

Fig. 3 Transmittance average errors for two detectors under two spectral resolutions, referred to those under the baseline in the absorption channels between 6235—6245 cm⁻¹

探测器	FWHM 为 0.312 cm⁻¹	FWHM 为 0.468 cm⁻¹
A	2.41%	0.92%
B	0.57%	0

3 信噪比需求

信噪比是信号的能量水平和噪声水平之比,是保证 CO₂ 信号可用性的重要指标,直接影响分析结果的准确度和精度。国内外相关研究表明,了解区域尺度的 CO₂ 通量循环,CO₂ 柱浓度精度需要达到 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ [24]。世界气象组织(WMO)提出的 CO₂ 产品精度需求(误差)为 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 。因此,综合不同领域研究需要,CO₂ 柱浓度(X_{CO_2})观测精度需求为 $1 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ (约 1%,OCO 卫星设定的精度为 1×10^{-6}),这

一观测精度对仪器信噪比提出了很高的要求。 X_{CO_2} 定义为 CO₂ 柱浓度和干空气柱浓度之比,表示为如下形式:

$$X_{\text{CO}_2} = \int_0^{\infty} N_{\text{CO}_2}(z) dz / \int_0^{\infty} N_{\text{air}}(z) dz. \quad (4)$$

式(4)中, $N_{\text{CO}_2}(z)$ 为高度 z 的函数,表示 CO₂ 的数密度, $N_{\text{O}_2}(z)$ 为 O₂ 数密度, $N_{\text{O}_2}(z) = 0.20955 N_{\text{air}}(z)$,因此式(4)可以写为

$$X_{\text{CO}_2} = 0.20955 \int_0^{\infty} N_{\text{CO}_2}(z) dz / \int_0^{\infty} N_{\text{O}_2}(z) dz. \quad (5)$$

在传统 DOAS 反演气体成分方法中,吸收通道和非吸收通道的比值用于估算 CO₂ 含量,因此,选择在 1.61 μm 谱段信息量很大的典型的吸收通道 1602.88 nm (6238.77 cm⁻¹) [25],模拟边界层 CO₂ 浓度变化和 CO₂ 柱浓度变化对应的信噪比需求。中纬度地区设定的模拟条件见表 4。其中,辐射变化率定义为

$$f = \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{T - T_0}{T_0}. \quad (6)$$

式(6)中, f (单位:%)为辐射变化率,这是一种相对变化,也称为敏感度; T_0 为背景大气条件下仪器接收到的辐射, T 为 CO₂ 浓度变化后仪器接收到的辐射。

表4 SCIATRAN 模型模拟条件列表

Table 4 Simulation conditions of SCIATRAN

模拟条件	参数
背景 CO ₂ 浓度	373.6×10^{-6}
气溶胶条件	晴空无气溶胶
太阳天顶角	60°
地表反照率	0.15
狭缝函数类型	高斯型
光谱分辨率	0.08 nm
光谱范围	1594~1624 nm

模拟结果显示:CO₂ 浓度变化越大,仪器接收到的辐射变化率越大。边界层 CO₂ 浓度变化和 CO₂ 柱浓度变化引起的辐射变化率和对应的信噪比需求分别见表5和表6。由表5可见,探测边界层 1×10^{-6} 的 CO₂ 浓度变化信噪比需达到1900,这是一个极高的要求,目前难以实现。由表6可见,探测整层大气 CO₂ 柱浓度 1% 的浓度变化,需要的信噪比约为 200~300,这一需求可以实现。

表5 探测边界层 CO₂ 浓度变化的信噪比需求Table 5 SNR requirements of detecting CO₂ concentration variation in boundary layer

CO ₂ 浓度变化	$f/\%$	信噪比
1×10^{-6}	-0.0524	1900
2×10^{-6}	-0.1048	950
3×10^{-6}	-0.1571	640
4×10^{-6}	-0.3252	300

表6 探测 CO₂ 柱浓度变化的信噪比需求Table 6 SNR requirements of detecting CO₂ concentration variation in the whole column

CO ₂ 柱浓度变化	$f/\%$	信噪比
1×10^{-6}	-0.1219	820
2×10^{-6}	-0.2441	410
3×10^{-6}	-0.3580	280
4×10^{-6}	-0.4874	200

需要说明的是,模拟的敏感性与地表状况、大气条件以及太阳入射条件密切相关。尽管在高纬度地区,太阳以较低的高度角入射时,由于大气路径长度的加长,CO₂ 辐射敏感性会更高,但高纬度地区观测面临更大的挑战,如仪器动态范围、云的影响及地表冰雪低的反照率条件,均不利于 CO₂ 探测。因此,适宜于 CO₂ 探测的地球范围是中低纬度地区。在地球广大的海洋地区,水面反照率也较低,为提高信噪比,OCO 卫星和碳卫星皆采用了海洋耀斑的形式进行观测。

另外,CO₂ 探测精度要求的区域尺度与仪器单点探测的信噪比和对应区域尺度密切相关。目前,

OCO 卫星、碳卫星高光谱 CO₂ 探测器单次观测像元尺度为 1 km,探测 CO₂ 柱浓度变化需要的信噪比可以通过在一定区域、时段内合并单点探测像元的方式来实现,如 1 个月时段内在 100 km×100 km 区域上进行平均,则可有效降低探测随机噪音,提高 CO₂ 探测精度;但在各种不同观测条件下,单次探测合并方法以及精度提高程度,仍需进一步研究。另一方面,在反演处理中,如果整个谱段上的 N 条 CO₂ 吸收线全部使用,探测噪音约按 $1/\sqrt{N}$ 倍下降,因此,基于全谱段最优拟合估计方法,可以降低 DOAS 方法中对单吸收谱线的高信噪比需求。

综上所述,1.6 μm 短波红外高光谱 CO₂ 探测器设定 $1 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 的 CO₂ 柱浓度目标可以实现。

4 小 结

面对全球 CO₂ 浓度持续上升的现状,利用短波红外的 CO₂ 吸收带遥感 CO₂ 全球分布已成为前沿热点研究区域。本文结合我国正在研制的碳卫星高光谱 CO₂ 探测器应用需求,分析了高光谱探测器光谱分辨率、采样率以及信噪比等关键指标对高精度 CO₂ 定量遥感的可能影响,结果表明:

1) 在模拟的多种光谱分辨率中,碳卫星光谱分辨率不仅可以较好地分辨 CO₂ 光谱谱线特征,而且对 CO₂ 含量有中等程度的敏感性,同时保持适中的辐射强度水平。

2) 基于 512×512 维度的小尺寸面阵探测器的光栅光谱仪,在工作带宽 30 nm 保持不变的条件下,降低光谱分辨率使探测器面元的光谱采样率大于 2 时,避免了光谱欠采样问题对 CO₂ 吸收光谱的可能影响。

3) 受仪器信噪比的限制,太阳短波红外被动遥感难以获得探测边界层 CO₂ 浓度 1% 变化所需要的高信噪比,但探测出 CO₂ 整层大气柱浓度 1% 变化是可以实现的。

本研究结果不但对高光谱 CO₂ 探测器研制具有一定的应用价值和指导意义,而且有助于提高对 CO₂ 探测任务艰巨性的理解。今后将对欠采样问题的定量影响进行评估,进一步开展对欠采样光谱的订正方法研究,建立欠采样问题的修正模型。

参 考 文 献

- [1] 江志红,丁裕国,金莲姬. 中国近百年气温场变化成因的统计

- 诊断分析. 应用气象学报, 1997, 8(2): 175-185.
- [2] Canadell J G, Le Quéré C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(47): 18866-18870.
- [3] 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 等. 长江下游农业生态区 CO₂ 通量的观测试验. 应用气象学报, 2006, 16(6): 828-834.
- [4] 程红兵, 王木林, 温玉璞, 等. 我国瓦里关山, 兴隆温室气体 CO₂, CH₄ 和 N₂O 的背景浓度. 应用气象学报, 2003, 14(4): 402-409.
- [5] 温玉璞, 汤洁. 瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究. 应用气象学报, 1997, 8(2): 129-136.
- [6] 周凌晔, 刘立新, 张晓春, 等. 我国温室气体本底浓度网络化观测的初步结果. 应用气象学报, 2009, 19(6): 641-645.
- [7] Rayner P J, O'Brien D M. The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(1): 175-178.
- [8] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 127-150.
- [9] Buchwitz M, Beek R, Burrows J P, et al. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(4): 941-962.
- [10] Bréon F M, Ciais P. Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. *Compte Rendus Geoscience*, 2010, 342(4): 412-424.
- [11] Pollock R, Haring R E, Holden J R, et al. The Orbiting Carbon Observatory instrument: Performance of the OCO instrument and plans for the OCO-2 instrument. Remote Sensing. *International Society for Optics and Photonics*, 2010: 78260W-78260W-13.
- [12] Chance K, Kurosu T P, Sioris C E. Undersampling correction for array detector-based satellite spectrometers. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1296-1304.
- [13] 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-253.
- [14] Crisp D, Boesch H, Brown L, et al. OCO-2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis. http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2_L2_FP_ATBD_v1_rev4_Nov10.pdf. 2010.
- [15] Natraj V. Radiative Transfer Modeling for the Retrieval of CO₂ from Space. Pasadena: California Institute of Technology, 2008.
- [16] 孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 149-153.
- [17] Clough S A, Iacono M J, Moncet J L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1992, 97(D14): 15761-15785.
- [18] Clough S A, Iacono M J. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates 2. Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide and the halocarbons. *J Geophys Res*, 1995, 100(D8): 16519-16535.
- [19] User's Guide for the Software Package SCIATRAN (Radiative Transfer Model and Retrieval Algorithm) Version 3. 1, November 15, 2011.
- [20] 廖国男. 大气辐射导论(第二版). 郭彩丽, 周诗健, 译. 北京: 气象出版社, 2004: 21-23.
- [21] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 914-927.
- [22] Roscoe H K, Fish D J, Jones R L. Interpolation errors in UV-visible spectroscopy for stratospheric sensing, implications for sensitivity, spectral resolution, and spectral range. *Applied Optics*, 1996, 35(3): 427-432.
- [23] Goldman S. Information Theory. New York: Prentice-Hall, 1953.
- [24] Denning A S, Fung I Y, Randall D. Latitudinal gradient of atmospheric CO₂ due to seasonal exchange with land biota. *Nature*, 1995, 376(6537): 240-243.
- [25] 毕研盟, 杨忠东, 卢乃锰, 等. 近红外高光谱 CO₂ 探测通道选择分析. 应用气象学报, 2014, 25(2): 143-149.

Spectral Parameters and Signal-to-noise Ratio Requirement for CO₂ Hyper Spectral Remote Sensor

Wang Qian¹⁾²⁾ Yang Zhongdong²⁾ Bi Yanmeng²⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

With the stable increase of carbon dioxide (CO₂) concentrations, space based measurement of CO₂ concentration in lower atmosphere by reflected sunlight in near infrared band has become a hot research topic. Recently, instruments sensitive to total CO₂ column data in near-surface have become available through the SCIAMACHY instrument on ENVISAT and TANSO-FTS on GOSAT. The developing hyper spectral CO₂ detector in China carried by TANSAT is going to be launched in 2015. Hyper spectral CO₂ detector is designed to provide global measurements of CO₂ in lower troposphere, employing high resolution spectra of reflected sunlight taken simultaneously in near-infrared CO₂ (1.61 μm and 2.06 μm) and O₂ (0.76 μm) bands.

Associated with climate change and observation requirements of carbon sources and sinks, the feasibility of making CO₂ column concentration measurements with high-resolution and high-precision is studied by high resolution atmosphere radiation transfer model. In consideration of the application requirements, effects of key specifications of the hyper spectral CO₂ detector such as spectral resolution, sampling ratio and sign-to-noise ratio (SNR) on CO₂ detection are analyzed.

Typical characteristics of hyper spectral CO₂ detector on TANSAT are grating spectrometer and array-based detector. To achieve the column averaged atmospheric CO₂ dry air mole fraction (X_{CO_2}) precision requirements of $1 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6}$, hyper spectral CO₂ detector should provide high resolution at first to resolve CO₂ absorption lines from continuous spectra of reflected sunlight. Compared to a variety of simulated spectral resolutions, the spectral resolution of hyper spectral CO₂ detector on TANSAT can resolve CO₂ spectral features and maintain the moderate radiance sensitivity. Since small size array detector-based instruments may suffer from undersampling of the spectra, influences of spectral undersampling to CO₂ absorption spectra are studied, indicating that sampling ratio should exceed 2 pixels/FWHM to ensure the accuracy of CO₂ spectrum.

SNR is one of the most important parameters of hyper spectral CO₂ detectors to ensure the reliability. SNR requirements of CO₂ detector to different detection precisions are explored based on the radiance sensitivity factors. Results show that it is difficult to achieve SNR to detect $1 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6}$ CO₂ concentration change in the boundary layer by solar shortwave infrared passive remote sensing, limited by the instrument development condition and level at present. However, the instrument SNR to detect 1% change in the CO₂ column concentration is attainable. These results are not only conducive to universal applications and guides on developing grating spectrometer, but also helpful to better understand the complexity of CO₂ retrieval.

Key words: hyper spectral; CO₂; remote sensing; TANSAT