

超光谱空间干涉数据切趾函数与信噪比关系研究

李志伟^{1,2}, 施海亮^{1,2}, 罗海燕^{1,2}, 熊伟^{1,2*}

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

2. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 干涉光谱技术在大气遥感、天文探测及地物勘察等诸多领域的应用是当前国内外研究热点, 光谱重构作为遥感数据处理的重要环节与探测精度紧密相关。干涉数据由于有限光程差采样导致复原光谱出现频率泄露, 切趾函数在光谱重构过程中可以起到平滑光谱、保持复原光谱和其他类型分光技术探测光谱一致性的作用, 但同时会造成重构光谱的分辨率下降。已有研究表明切趾函数并没有提高反演精度, 同时多个典型大气遥感载荷地面数据处理过程中并未使用切趾函数。空间外差光谱技术由于其诸多优点在国内外引起广泛关注, 中科院安光所基于该技术成功研究出用于大气 CO₂ 探测的原理样机。信噪比是光谱仪的核心指标之一, 从信噪比、光谱分辨率和探测精度之间的关系出发研究切趾函数在干涉数据光谱重构中的影响。针对当前传统切趾函数并没有达到最优旁瓣抑制效果, 以诺顿-比尔切趾函数为基础, 在分辨率降低相同的情况下, 获取最大的旁瓣抑制程度为判据构造了 10 种不同光谱展宽程度的切趾函数。利用 SCIATRAN 辐射传输模型分析了大气 CO₂ 遥感探测中不同气体浓度造成的大气层顶的辐亮度差异, 推导了典型条件下不同光谱分辨率满足 1% 探测精度需求的信噪比要求。以实验室空间外差光谱仪样机参数为基础, 通过仿真干涉数据和本文构造切趾函数分析了不同切趾程度下光谱分辨率和信噪比的变化关系。最后利用实验室研制的样机开展了实验验证, 通过观测稳定均匀积分球辐射源获取干涉数据在不切趾的情况下计算信噪比, 以及干涉数据进行不同程度切趾后复原光谱信噪比。仿真和试验结果表明干涉数据由于切趾对噪声的抑制信噪比逐渐升高, 同时造成光谱分辨率逐渐下降, 而探测精度由于分辨率下降对光谱信噪比的要求也逐渐升高。探测精度对信噪比的需求提高明显高于切趾作用下光谱信噪比的升高趋势, 仿真数据和实测数据信噪比分别在切趾程度大于 1.6 倍和 1.8 倍的情况下低于探测精度对仪器信噪比需求, 即白噪声在噪声中占主导的情况下不切趾更有利于探测精度的保障。该研究结果可以作为干涉数据光谱重构的参考。

关键词 遥感; 空间外差光谱技术; 切趾函数; 信噪比; 光谱分辨率

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)01-0029-05

引言

干涉光谱技术具有光谱分辨率高、光通量大和宽光谱范围覆盖等优点, 通过搭载卫星平台实现全球覆盖能够有效获取气体分子光谱, 反演大气成分及浓度分布, 是了解大气循环、光化学过程、气候变迁的重要手段, 同时在天文探测、地物勘察等领域应用也是当前研究热点^[1-4]。

干涉仪对有限光程差的数据采样导致复原光谱出现旁瓣振荡, 因此在干涉数据的处理过程中常常采用切趾函数抑制

频率泄露。切趾函数应用最初是为了保持干涉型光谱仪光谱平滑变化且与其他分光类型光谱仪输出光谱一致。但是谱平滑的代价是光谱半高宽的展宽和频域能量分布形式的变化, 这些变化并没有直接体现在最终的数据测量精度上。当前国际大气成分探测干涉载荷地面数据处理系统正常默认不进行切趾处理^[5-6], 切趾函数对反演过程和反演结果稳定性分析表明切趾并不会改进反演精度^[7-8]。

空间外差光谱技术作为新型静态干涉分光技术, 由于其诸多技术优点在国内外引起广泛关注, 中科院安光所致力于基于空间外差光谱技术的大气遥感探测研究, 目前已经成功

收稿日期: 2018-11-04, 修订日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(11703061, 41605014), 合肥物质科学研究院院长基金项目(YZJJ201607), 实验室创新基金项目(CXJJ-17S002), 遥感科学国家重点实验室开放基金项目(Y7Y00100KZ)资助

作者简介: 李志伟, 1985 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所助理研究员 e-mail: lizhiwei@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: frank@aiofm.ac.cn

研制出用于大气 CO₂ 探测的样机^[10]。信噪比是干涉光谱仪的核心指标之一,在一定程度上决定了仪器探测能力,而切趾作为干涉数据到光谱域转换处理方法除了改变光谱分辨率以外,必然对光谱数据信噪比造成影响。本文首先针对当前切趾函数并非最优情况进行了优化,以大气 CO₂ 为例通过辐射传输仿真分析建立了切趾函数、光谱分辨率和探测精度对信噪比需求的关系。最后讨论分析了空间外差光谱仪仿真数据和实测数据不同切趾程度后信噪比、光谱分辨率变化和探测精度需求信噪比之间的关系。

1 切趾函数优化

目前常用的切趾函数在旁瓣抑制和分辨率降低二者之间并没有达到最优化,定义 Sinc 函数的半高宽为 W_0 、次级主极大的高度为 h_0 ($h_0=0.217\ 23$),切趾后的半高宽为 W 、次级主极大的高度为 h ,在次级旁瓣振幅限制在一定高度的情况下,其分辨率的降低最小程度可以用式(1)表示

$$\log_{10} \left| \frac{h}{h_0} \right| = 1.939 - 1.401 \left(\frac{W}{W_0} \right) - 0.597 \left(\frac{W}{W_0} \right)^2 \quad (1)$$

诺顿比尔窗在不同的切趾程度上分辨率的降低与旁瓣抑制程度上比较接近最优边界值。其表达式一般形式如式(2)

$$NB \left(\frac{l}{U} \right) = \sum_{i=0}^n x_i \left[1 - \left(\frac{l}{U} \right)^2 \right]^i \quad (2)$$

其中 U 为最大光程差, $l \in [-U, U]$ 代表不同光程差采样点, $n=0, 1, 2, 3, \dots$ 为多项式的个数,且各项系数之和为 1,即 $\sum_{i=0}^n x_i = 1$ 。最优切趾函数就是需要找到一组合适的系数 x_i 使得切趾后单色光光谱半高宽 W 与不切趾时半高宽 W_0 比值一定时,切趾后光谱次级主极大满足式(1)。

寻找多项式系数 x_i 的过程就是一个最优化问题求解过程,即对于给定的一个目标函数(或代价函数)

$$\chi = [|W' - W| \quad |h' - h|] < [10^{-4} \quad 10^{-4}] \quad (3)$$

构造最优切趾函数就是寻找一组系数 x_i ,使得代价函数 χ 的值最小。本文选择的代价函数使构造出的切趾函数转换为光谱的半高宽 W' 和次级主极大 h' 与目标切趾函数转化到光谱域的半高宽 W 和次级主极大 h 的差同时满足小于 10^{-4} 。

迭代公式的一般形式可表示为

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (4)$$

其中, $a_k d_k$ 为修正项,它由搜索方向 d_k 和步长因子 a_k 两部分组成。本文采用 Gauss-Newton 迭代法求解最优化系数,构造出 10 种优化后不同程度的切趾函数如图 1(a)所示,对应的傅里叶变换后半高宽展宽与不切趾时相比从 1 倍变化到 2 倍,间隔为 0.1,如图 1(b)所示。图中为 10 种切趾函数对应的复原光谱,从光谱中心区域的放大图像可以看出,旁瓣振荡程度随着切趾程度的增加而降低,同时光谱半高宽逐渐增大。

根据式(1)将本文构造切趾函数与传统切趾函数在相同展宽下次极大的抑制程度作图结果如图 2 所示,从图中可知优化后切趾函数次极大抑制程度达到了最优边界。

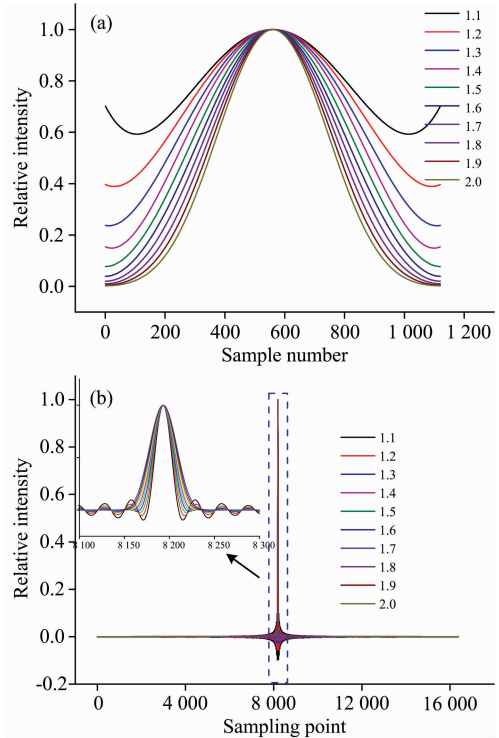


图 1 (a) 优化后不同程度展宽切趾函数; (b) 优化后切趾函数对应的复原光谱

Fig. 1 (a) Optimized apodizing functions with different broadening; (b) Spectrums recovered by optimized apodizing functions

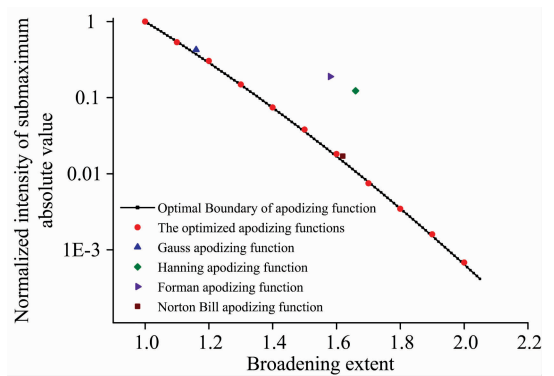


图 2 优化后切趾函数与传统切趾函数比较

Fig. 2 Comparison between optimized apodizing functions and traditional apodizing functions

2 实验部分

2.1 切趾函数、信噪比与探测精度关系仿真分析

以大气 CO₂ 探测为例,理论上仪器光谱分辨率越高,相同浓度的 CO₂ 变化造成大气顶光谱强度的变化越大,然而光谱分辨率的提高往往会受限测量光谱带宽和导致信噪比的降低。利用辐射传输软件对仪器信噪比需求进行分析^[10],这里以 CO₂ 的 1.58 μm 波段为例,选择 1976 年美国标准大气模型,在太阳天顶角 30°,地面反射率为 0.3 的情况下,CO₂ 体

积混合比 380×10^{-6} 作为输入条件, 采用辐射传输软件 SCI-ATRAN 进行模拟计算。首先计算出太阳光返回大气顶的光谱 R_1 , 在相同条件下, 将 CO_2 体积混合比设置为 381×10^{-6} , 再次计算返回大气顶的光谱 R_2 。干涉光谱仪理想仪器线形函数为 Sinc 函数。本文采用半高宽为 0.2 cm^{-1} 的 Sinc 函数分别对模拟光谱进行卷积得到 R'_1 和 R'_2 。大气中 CO_2 含量 1×10^{-6} 的变化造成大气顶出射光谱强度变化百分比可以用下式求出

$$\Delta R = \frac{R'_1 - R'_2}{R'_1} \times 100\% \quad (6)$$

CO_2 浓度变化 1×10^{-6} 造成大气顶出射光谱强度的变化平均值约为 0.12% 。即需求仪器能够探测大气中 1×10^{-6} CO_2 的变化, 则仪器信噪比要求要达到 830。研究表明 CO_2 探测仪器至少需要满足 1% 的测量精度才能用于后续进一步的分析, 即仪器至少探测 CO_2 约 4×10^{-6} 变化的量, 则对仪器信噪比的要求为 200 左右。

用前节构造的不同程度的切趾函数与矩形窗相乘(相当于对矩形窗切趾), 然后对矩形窗做傅里叶变换得到不同半高宽的光谱, 将光谱与模拟谱卷积。通过对矩形窗不同程度的切趾得到的不同分辨率的模拟仪器线形函数, 然后与辐射传输计算得到超分辨率的模拟谱进行卷积。根据式(6)计算出不同分辨率下 CO_2 探测精度 1% 时信噪比需求, 结果如表 1 所示, 随着光谱受不同切趾函数展宽, 其光谱分辨率逐渐降低, 探测器相同浓度的 CO_2 变化所需的信噪比则逐渐增大。

表 1 不同程度切趾对应光谱分辨率及信噪比需求

Table 1 Spectral resolution and SNR requirements for apodization with different widening

FWHM extending	Spectral resolution/ cm^{-1}	SNR requirements for CO_2 detection accuracy of 1%
1.0	0.20	208
1.1	0.22	319
1.2	0.24	358
1.3	0.26	395
1.4	0.28	428
1.5	0.30	465
1.6	0.32	499
1.7	0.34	531
1.8	0.36	565
1.9	0.38	596
2.0	0.40	629

2.2 切趾函数与空间外差光谱仪光谱信噪比仿真分析

空间外差光谱技术通过衍射光栅代替传统迈克尔逊干涉仪中的平面镜, 不同频率光经一定角度摆放的两光栅衍射后再次相遇发射干涉, 在光程差空间上形成不同频率的干涉条纹。根据空间外差干涉数据基本方程及表 2 中的参数, 对理论干涉数据进行仿真。

目前国际上 CO_2 探测仪器信噪比设计指标约为 300, 以此作为空间外差光谱仪干涉数据仿真的输入条件。在假定噪

声为白噪声的情况下, 通过在干涉域添加噪声并且控制噪声的大小仿真出 100 条模拟实际干涉数据和光谱数据, 光谱数据满足光谱范围内平均信噪比为 300。

表 2 空间外差光谱仪干涉数据仿真主要参数

Table 2 Main parameters of simulation interferogram of spatial heterodyne spectrometer

Parameters	Performance index
Spectral range/nm	1 564~1 587.03
Grating groove density/(Line · mm^{-1})	450
Number of detector pixel N	640
Grating littrow angle/deg	20.600
Spectral resolution/ cm^{-1}	0.20

使用前节构造的最优化切趾函数对 100 条含有噪声的干涉数据进行不同的切趾, 对切趾后的干涉数据按照式(7)复原光谱 $B_i(\sigma)$ 并计算信噪比 S_{NR}

$$S_{\text{NR}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{B_i(\sigma)}{N}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [B_i(\sigma) - \bar{B}(\sigma)]^2}{N-1}}} \quad (7)$$

其中 N 为信噪比计算样本个数。以 1.1 倍半高宽展宽为例, 切趾前后光谱信噪比曲线的对比结果如图 3 所示。由于切趾函数对干涉数据噪声的抑制导致切趾后复原光谱信噪比升高, 信噪比曲线表现出与光谱吸收谱峰类似的特征。

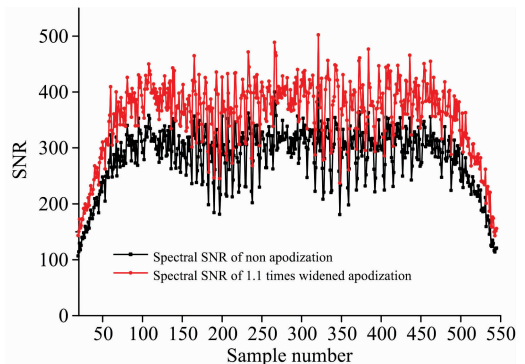


图 3 不切趾光谱信噪比曲线和 1.1 倍展宽切趾后光谱信噪比曲线

Fig. 3 The spectral SNR of non apodization and 1.1 times widened apodization

不同程度切趾和大气 1% 探测精度需求情况下, 仪器理论信噪比需求计算结果如表 3 所示。

2.3 切趾函数与空间外差光谱仪光谱信噪比试验测量

中国科学院安徽光学精密机械研究所成功研制出用于大气 CO_2 探测的空间外差光谱技术原理样机, 其主要性能参数如表 2 所示。近红外波段探测器除光子噪声外主要受热噪声的影响, 在制冷到 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下热噪声大大降低, 白噪声占噪声中的主导成分。实验室利用积分球开展切趾函数对信噪比影响分析实验, 调节积分球输出亮度与典型在轨条件下

一致,待仪器和积分球稳定后采集干涉数据 100 个^[11]。采用本文构造的切趾函数分别对样机测量干涉数据进行不同程度的切趾,并复原光谱分析信噪比的变化情况,将信噪比与探测精度仿真分析、切趾函数与信噪比仿真分析及实测结果在同一图中绘出结果如图 4 所示。

表 3 仿真数据不同切趾程度下光谱信噪比计算结果
Table 3 Spectral SNR under different apodization functions of simulation interferogram

FWHM extending	Spectral resolution/cm ⁻¹	Spectral SNR
1.0	0.20	300
1.1	0.22	381
1.2	0.24	413
1.3	0.26	439
1.4	0.28	457
1.5	0.30	477
1.6	0.32	497
1.7	0.34	514
1.8	0.36	531
1.9	0.38	552
2.0	0.40	562

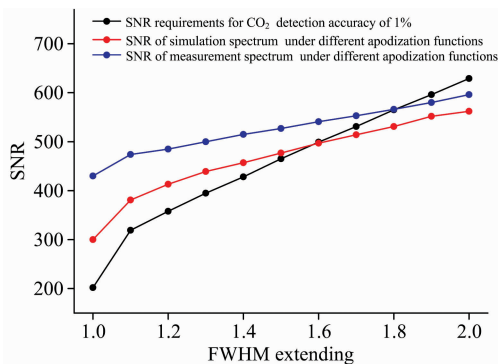


图 4 探测需求信噪比和光谱信噪比随切趾程度的变化
Fig. 4 SNR requirements and spectral SNR with different apodization functions

3 结果与讨论

(1)从图 4 中可以看出,在不切趾的情况下,空间外差光谱仪光谱仿真数据和实测的信噪比高于探测精度对仪器信噪比的需求,实测信噪比高于仿真结果由于实际仪器设计时在有限硬件资源条件下会尽量提高信噪比指标;

(2)在不同的切趾程度下,空间外差光谱仪仿真数据和实测数据信噪比逐渐升高,本质上是因为切趾函数对干涉数据噪声的抑制。探测精度对仪器信噪比需求也逐渐升高,这是由于切趾情况下复原光谱分辨率降低,对大气 CO₂ 变化灵敏度降低,需要更高的信噪比才能满足探测精度需求;

(3)初始条件(干涉数据不切趾)仿真和仪器信噪比设计值高于探测精度对信噪比需求,随着切趾程度的增加仿真和实测数据的信噪比与探测精度对仪器信噪比需求逐渐接近。仿真数据和实测数据信噪比分别在切趾程度大于 1.6 倍和 1.8 倍的情况下低于探测精度对仪器信噪比的最低要求。仿真数据和实测数据信噪比随着切趾程度的增加而略有不同,是由于实测数据噪声并非是完全理想的白噪声,在探测器制冷条件下仍存在小部分的热噪声。

4 结 论

干涉数据复原光谱的过程中使用切趾函数能够有效抑制有效光程差截断造成的旁瓣振荡影响,但同时造成光谱分辨率的下降。本文首先以分辨率降低一定程度下旁瓣抑制最优为判据,构造了十种不同程度的切趾函数。通过典型条件下辐射传输仿真 CO₂ 含量变化及大气层顶辐射强度的变化关系分析,得出不同光谱分辨率下 1% 探测精度对信噪比的需求。以空间外差光谱仪干涉数据为例,开展了不同切趾程度下仿真数据和实测数据的信噪比的变化研究,对比分析了相同光谱分辨率下仿真和实测数据的信噪比与探测精度对仪器信噪比需求,分析结果表明白噪声在噪声中占主导的情况下不切趾更有利于探测精度的保障。本文研究结果可以作为类似干涉数据处理的参考,实际反演精度与仪器其他性能指标、数据处理、反演方法等多项因素相关,下一步将从实际测量数据反演精度角度对干涉数据切趾影响进行研究。

References

- [1] Louis Moreau, Yan Montembeault, Michel Roux. Light, Energy and the Environment Congress © OSA, 2016.
- [2] Schütze C, Sauer U. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10): 919.
- [3] YANG Yu-han, YIN Qiu, SHU Jiong(杨雨晗, 尹 球, 束 炯). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2018, (5): 545.
- [4] XIONG Wei(熊 伟). Spacecraft Recovery & Remote Sensing(航天返回与遥感), 2018, (3): 14.
- [5] Kuze A, Suto H, Shiomi K, et al. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5: 2447.
- [6] Helen Worden, Reinhard Beer, Kevin W Bowman, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1288.
- [7] Umberto Amato, Daniela De Canditiis, Carmine Serio. Applied Optics, 1998, 37(27): 6537.
- [8] Christopher D Boone, Sean D McLeod, Peter F Bernath. Applied Optics, 2002, 41(6): 1029.
- [9] SHI Hai-liang, LI Zhi-wei, LUO Hai-yan, et al(施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(3): 933.

- [10] WANG Qian, YANG Zhong-dong, BI Yan-meng(王 倩, 杨忠东, 毕研盟). Journal of Applied Meteorological Science(应用气象学报), 2014, (5): 600.
- [11] LUO Hai-yan, XIONG Wei, SHI Hai-liang, et al(罗海燕, 熊 伟, 施海亮, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, (6): 0612001.

Study on the Relationship Between Apodization Function and Signal-to-Noise Ratio of Hyperspectral Spatial Interferogram

LI Zhi-wei^{1,2}, SHI Hai-liang^{1,2}, LUO Hai-yan^{1,2}, XIONG Wei^{1,2*}

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The application of interferometric spectroscopy in many fields, such as atmospheric remote sensing, astronomical exploration and geophysical prospecting, is a research hotspot at home and abroad. Spectral reconstruction, as an important part of remote sensing data processing, is closely related to the detection accuracy. Interferogram due to limited optical path difference sampling results in frequency leakage in the restored spectrum. The apodization function can play a role in smoothing the spectrum, maintaining the spectral consistency of the interferometric spectroscopy and other spectroscopy techniques, but at the same time, the resolution (Full Width at Half Maximum, FWHM) of the reconstructed spectrum will be reduced. It has been shown that the apodization function does not improve the inversion accuracy, and the apodization function is not used in the ground data processing of several typical atmospheric remote sensing loads. Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) has attracted wide attention at home and abroad due to its many advantages. Based on this technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences has successfully developed a prototype for atmospheric CO₂ detection. Signal-to-noise ratio (SNR) is one of the key indicators of spectrometer. This paper studies the influence of apodization function on spectral reconstruction of interferogram from the relationship between SNR, spectral resolution and detection accuracy. In view of the fact that the traditional apodization function does not achieve the optimal side-lobe suppression, this paper constructs ten apodization functions with different spectral extending based on Norton-Beer apodization function and the criterion of obtaining the maximum side-lobe suppression under the same resolution reduction. Radiative transfer Model of SCIATRAN was used to analyze the difference of atmospheric top radiance caused by different gas concentration in atmospheric CO₂ remote sensing. The spectral SNR requirement of different spectral resolution meets the requirement of 1% detection accuracy under typical conditions was calculated. Based on the parameters of the laboratory prototype, the relationship between spectral resolution and SNR under different extending was analyzed by simulating interferogram and constructed apodization function in this paper. Finally, the experimental verification was carried out by using a prototype developed by the laboratory. The interferograms were obtained by observing the stable uniform integrating sphere, and the SNR was calculated without apodization, and the SNR was calculated after different apodization extending. The simulation and experimental results show that of the SNR is gradually increased due to the reduction of noise by apodization, and the spectral resolution is gradually reduced, while the requirement of SNR for detection accuracy is gradually increased due to the decrease of resolution. The spectral SNR requirement of detection accuracy is obviously higher than that under the apodization. The SNR of simulation data and measured data is lower than that of the requirement of detection accuracy when apodization extendings are greater than 1.6 times and 1.8 times, respectively. The need for the SNR of the instrument, that is, the white noise is dominant, is not conducive to the detection accuracy. The results of this paper can be used as a reference for spectral reconstruction, and the influence of inversion accuracy will be further analyzed in the future.

Keywords Remote sensing; Spatial heterodyne spectroscopy; Apodization function; Signal to noise ratio; Spectral resolution

(Received Nov. 4, 2018; accepted Mar. 19, 2019)

* Corresponding author