

半盲反卷积重构大气瑞利-米散射高分辨谱*

吴义芳 杨帆 熊爱民 赵奕平 郑乐民
(北京大学电子学系, 100871)

摘 要 详细讨论了在获取大气瑞利-米散射谱中, 反卷积技术适用的条件、遇到的困难和采取的算法, 以及为什么在信噪比为 20 这一松弛条件下能重构出原线型。还讨论了用低分辨光谱分析元件获取高分辨光谱的可行性和途径。

关键词 半盲反卷积, 瑞利-米散射谱, 原子共振滤波器。

1 引 言

对大气瑞利-米散射光进行光谱分析, 可获取大气温度、气溶胶含量和风速等大气信息^[1~4], 因而越来越受到关注, 然而, 由于大气散射光强度弱、线宽窄, 尤其是其中的米散射更窄(约 0.1 GHz), 用经典的高分辨光谱方法困难很大。为此作者发展了一种用低分辨光谱分析元件获取高分辨光谱的方法^[5]。这种新方法与传统高分辨光谱方法最重要的差别之一是要进行反卷积运算。反卷积技术目前还在发展中, 反卷积运算在理论上、算法上有许多问题需要研究, 而文献[5]未能对这方面的问题作深入讨论。本文详细讨论与反卷积有关的概念遇到的困难和选用的算法。

2 方法概述

用性能稳定的、高 Q 值、宽视场但带宽相对较宽(约 2 GHz)的 Na 原子共振滤波器 (ARF) 为光谱分析元件, 当把原子共振滤波器的中心频率扫过大气散射光线型时(在实验上等价于将散射光中心频率扫过原子共振滤波器线型), 记录散射光 $s(\nu)$ 经原子共振滤波器后的输出 $g_1(\nu)$,

$$g_1(\nu) = \int_0^{\infty} h_1(\nu) s(\nu') d\nu' \quad (1)$$

式中 $h_1(\nu)$ 为原子共振滤波器的传递函数, 对(1)式作反卷积运算可重构出原函数 $s(\nu)$ 。

由大气散射理论知道瑞利散射谱具有高斯线型

$$s(\Delta\nu, T) = [\exp(-\pi\Delta\nu^2/b^2T)]/bT^{1/2} \quad (2)$$

式中 $b^2 = |\mathbf{K}| k_B/2\pi M$, \mathbf{K} 为入射波矢与散射波矢之间的矢量差, k_B 为玻尔兹曼常数, M 为空气

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 6 月 8 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 16 日

气分子量, T 为大气温度。按照(2)式瑞利谱线宽度是 T 的函数。米散射来自气溶胶粒子, 由于气溶胶粒子质量远大于空气分子, 由气溶胶粒子随机运动引起的谱线加宽远小于瑞利谱宽。假设米散射也为高斯型, 归一化的大气散射谱线型函数为

$$s(\Delta\nu, T) = A_1 \exp(-4 \ln 2\Delta\nu_1^2/B_1^2) + A_2 \exp(-4 \ln 2\Delta\nu_2^2/B_2^2) \quad (3)$$

式中 A_1 、 B_1 和 A_2 、 B_2 分别是瑞利谱和米谱的振幅和线宽, 在室温和可见光波段, 瑞利谱和米谱线宽分别近似为 1~2 GHz 和 0.1 GHz。

本文选用 Na 的 D_2 线作为原子共振滤波器, 波长为 589 nm, 与实验中使用的大气散射光波长相匹配。由原子谱理论给出的 Na D_2 线吸收线型为:

$$h_1(\nu) = 1 - [c_1 \exp(-4 \ln 2\nu^2/\Delta\nu_1^2) + c_2 \exp(-4 \ln 2\nu^2/\Delta\nu_2^2)] \quad (4)$$

式中 $c_1/c_2 = 3/5$, c_1 、 c_2 的绝对值取决于 Na 的原子强度、原子气室温度和长度。Na 的 D_2 线由间距为 1.77 GHz 双线组成, 故吸收线型是两条高斯曲线的叠加。因为本文所用的原子共振滤波器为带阻型滤波器, (4) 式恰好也是原子共振滤波器传递函数表示式。

图 1 是用文献[1]所描述的实验装置记录的 $h_1(\nu)$ 和 $g_1(\nu)$ 。 $h_1(\nu)$ 有两个清晰可辨的峰, 那是 Na 的 D_2 线的特征双峰, 但在 $g_1(\nu)$ 中这种双峰结构消失了。这意味着 $g_1(\nu)$ 中包含着原函数 $s(\nu)$ 的信息。

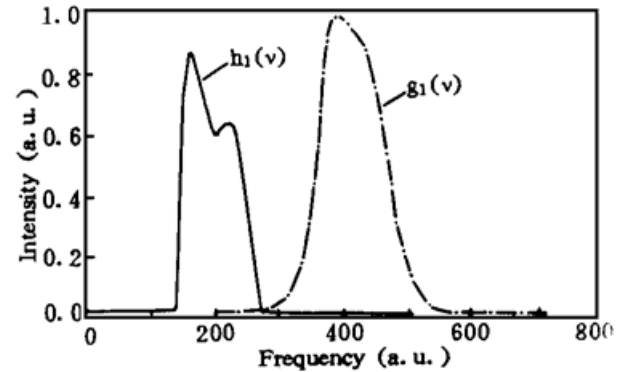


Fig. 1 Na D_2 absorption spectrum $h_1(\nu)$ (solid line) and convolution spectral $g_1(\nu)$ (dot-and-dash line), with taking 512 sampling points

3 反卷积运算

3.1 半盲反卷积定义

信号 $g_1(\nu)$ 、 $s(\nu)$ 和 $h_1(\nu)$ 都是有限时宽信号(或时限信号)。用离散形式重写(1)式, 有

$$g_1(n) = s(n) * h_1(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h_1(i) s(n-i) \quad (5)$$

符号* 表示卷积。根据信号重构理论^[6], 已知 $g_1(n)$ 求 $s(n)$ 或 $h_1(n)$ 是盲反卷积, 一般情况下存在无穷多个 $s(n)$ 或 $h_1(n)$ 解。若不仅 $g_1(n)$, 还知道部分的 $s(n)$ 和 $h_1(n)$, 这是半盲反卷积问题, 有可能得到唯一的 $s(n)$ 或 $h_1(n)$ 。显然本文的问题是半盲反卷积问题。半盲反卷积重构信号要解决的问题, 一是唯一重构信号所需的条件, 二是重构信号的有效算法。下面讨论这两个问题。讨论中的离散信号均假定为对连续信号进行等间距采样得到的, 采样频率大于或等于奈奎斯特采样频率。

3.2 用离散傅里叶变换和逆离散傅里叶变换解卷积方程

解卷积方程的算法有: 1) 矩阵算法; 2) 迭代算法; 3) 离散傅里叶变换(DFT)和逆离散傅里叶变换(IDFT)。本文选用离散傅里叶变换和逆离散傅里叶变换算法。

首先进行傅里叶变换。由于原子共振滤波器为带阻型滤波器, 其传递函数 $h_1(\nu)$ 在时域绝对不可积, 因而不会有傅里叶变换。作变换

$$h(\nu) = 1 - h_1(\nu), \quad g(\nu) = 1 - g_1(\nu)$$

注意到 $s(\nu)$ 是归一化的, 故有

$$g(\nu) = s(\nu) * h(\nu) = 1 - g_1(\nu) \quad (6)$$

(6)式与(1)式等价,但 $g(\nu)$ 和 $h(\nu)$ 皆绝对可积,于是存在傅里叶变换。设 $g(\nu) \rightleftharpoons G(f)$ 、 $h(\nu) \rightleftharpoons H(f)$ 、 $s(\nu) \rightleftharpoons S(f)$ 是傅里叶变换对。对(6)式两边取离散傅里叶变换,有

$$G(K) = S(k) H(k) \quad (7)$$

或者

$$S(K) = G(K)/H(K) \quad (8)$$

对(8)式作逆离散傅里叶变换,即可复原出 $s(n)$ 。

3.3 0/0 不定式的出现

如果所使用的光谱分辨元件在时域的带宽很窄,其传递函数可视为 δ 函数,那么它是一个全通滤波器,频域中的截止频率是 ∞ ,这时的观测量 $g(\nu)$ 便是 $s(\nu)$ 。但是,如果光谱分辨元件在时域的线宽不够窄,它便是一个低通滤波器,设其截止频率为 K_{\max} ,当 $K \geq K_{\max}$, $H(K)$ 等于零, $G(K)$ 也为零,因而出现 $S(K) = 0/0$,反卷积失败。

3.4 频域中数据的拟合和外推

本文中的原子共振滤波器恰好是低通滤波器,因此反卷积出现0/0不定式是必然的。现在,关键的问题是如何排除0/0不定式。文献[7]提出一种频域迭代法消除频域中出现的零点,但该迭代法对含噪声情况不理想,而且计算量也大。本文提出用频域中出现0/0不定式前的部分 $S(K)$ 数据,进行拟合外推来排除0/0不定式。因为 $s(\nu)$ 和 $S(f)$ 都是高斯函数,又注意到 $s(\nu)$ 谱中米散射谱线宽远窄于瑞利谱宽,因此只需拟合外推米散射谱部分。

对带限连续信号 $s(\nu)$,由于它在全平面内是解析函数,按照解析延拓原理,可由 $s(\nu)$ 在区间 $(-T, T)$ 内的值确定整个区间 $(-\infty, \infty)$ 内的值。但对象高斯这类函数进行拟合时,如果用泰勒展开需要对 $s(\nu)$ 进行求导运算,求导运算对噪声很敏感,实际中难以应用。另外,当前欲拟合的对像是带限离散信号,由于它不具备全平面上的解析性,所以对离散信号的拟合与对连续信号的拟合有很大不同,只给定有限段离散信号,外推解可能不唯一。一般说来,为得到唯一解,须给出附加条件,例如取所有解中能量最小的解。由于这两方面的问题,必须精心选择算法。为此,再作变换。变换前首先注意到以上计算的函数,例如 $s(\nu)$,在区间 $[0, T]$ 为有界子集,为对高斯函数进行傅里叶变换,时域必须右移 A ,使在 $[0, T + A]$ 为有界子集,即 $s(\nu) \rightarrow s(\nu - A)$,这样经傅里叶变换,在频域有

$$S(f - A) = S(f) \exp[-i2\pi Af] \quad (9)$$

可以只拟合 $S(f)$,再按(9)式求 $S(f - A)$,就能得到频域的拟合值。设

$$S(f) = a \exp(-bf^2),$$

两边取对数后有

$$\ln S(f) = \ln a - bf^2 \quad (10)$$

这是一个一元二次三项式的拟合,它避开了求导运算而拟合又变得非常简单。拟合谱和解析谱十分吻合,改变拟合点所得结果仍相同。这表明所用的拟合方法对初始值不敏感,拟合外推解是唯一的。

3.5 含噪声信号的重构

实验测量总存在噪声,噪声的存在使计算结果的误差增大。噪声的影响主要表现在增大频谱的高频分量上,噪声对谱序列不一定真正为零,但谱的幅值较小的那些点影响也大。为减少噪声影响,除实验上努力提高信噪比外对观测量 $g_1(\nu)$ 、 $h_1(\nu)$ 进行采样平均、平滑和去倾处理,在数字处理过程中应用数字滤波,对可能出现的伪零点要进行剔除。

4 重构散射谱

采用前述的方法和算法后, 在信噪比为 20 条件下重构出完整的大气瑞利-米散射谱, 如图 2 所示。被重构的函数由两部分组成: 凸出的细尖峰是米散射谱, 宽度部分是瑞利谱, 线宽分别为 0.1 GHz 和 1.2 GHz, 和理论计算值十分相符。由(2)式设 $M = 28.8$, $T = 293$ K, $\lambda = 589$ nm, 瑞利谱的多普勒线宽为 1.16 GHz, 两分量峰值强度之比为 3:1, 由此可得气溶胶含量信息。

对比文献[8], 要在信噪比至少为 500 才能复原出红外光谱信号, 本文对信噪比条件的要求是宽松的。这是因为: 1) 原子共振滤波器是新型优质光学滤波器, 在其带宽内有很好的信噪比; 2) 实验中噪声的影响经傅里叶变换后, 主要是增大频域中的高频分量。离散傅里叶变换与连续傅里叶变换的主要差别也表现在频域中高频分量增大。对数据处理而言, 原子共振滤波器是个锐截止低通滤波器, 它在截断光谱信号的高频分量时, 也截断了测量噪声和数据离散化带来的不利影响; 3) 找到了在频域拟合外推的简便算法, 能把被原子共振滤波器截断的光谱信号的高频分量很好地重构出来。根据频域和时域的对偶性, 有了好的频域信号就能重构出好的时域信号。

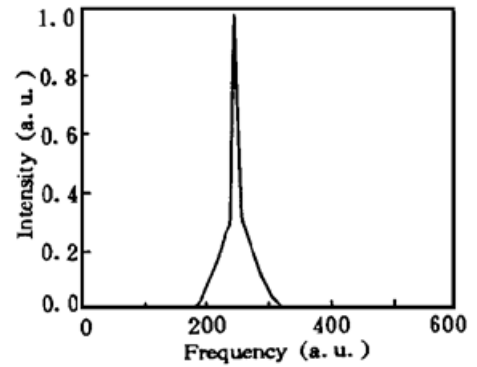


Fig. 2 Rayleigh-Mie scattering spectrum $S(\nu)$

结束语 反卷积重构信号技术在图像处理、光学信息处理、地震勘探、医疗层析术等许多不同领域有着广泛的应用, 本文提出反卷积运算在用低分辨光谱分析元件获取高分辨光谱中的应用。在光谱分析元件线宽比待分辨光谱线宽只宽一个量级且待测信号自身遵从的规律已知时, 有可能通过反卷积重构原函数, 从而为高分辨光谱探索出一条不同于经典方法的新路。当然, 这种新方法在实际上得到应用, 必须要解决实用的算法问题, 并且要使重构的信号对噪声不敏感。作者认为, 以获取大气瑞利-米散射线型为基础, 有可能发展起一种高分辨大气散射线型雷达新技术, 以提取大气温度廓线、气溶胶含量廓线和径向风速等诸多大气信息。这种技术对拓宽现有光谱分析仪器使用范围也有潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] G. Fiocco, J. B. Dewolf, Frequency spectrum of laser echoes from atmospheric constituents and determination of the aerosol content of air. *J. Atm. Sic.*, 1968, **25**(3): 488~ 496
- [2] H. Shimizu, S. A. Lee, C. Y. She, High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9): 1373~ 1381
- [3] C. Y. She, R. J. Alvarez II, L. M. Caldwell *et al.*, High-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar measurement of aerosol and atmospheric profile. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7): 541~ 543
- [4] P. Piironen, E. W. Eloranta, Demonstration of high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 234~ 236
- [5] Yifang Wu, Yiping Zhao, Fan Yang *et al.*, New method for acquiring a high-resolution atmospheric Rayleigh-Mie spectrum. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(4): 1195~ 1199
- [6] 李衍达, 常 迥, 信号重构理论及其应用. 北京, 清华大学出版社, 1991: 144~ 154
- [7] 王万树, 孟卫林, 频域数字反卷积新的迭代法. 计量学报, 1988, **9**(2): 151~ 156
- [8] 钱 霖, 李正直, 消卷积和自消卷积方法在红外光谱测量中的应用. 光学学报, 1984, **4**(6): 546~ 552

High-Spectral-Resolution Reconstruction of Atmospheric Rayleigh-Mie Scattering from Semi-Blind Deconvolution

Wu Yifang Yang Fan Xiong Aimin Zhao Yiping Zheng Lemin

(*Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871*)

(Received 8 June 1996; revised 16 September 1996)

Abstract The applied condition, uncountered difficulties and algorithm of the deconvolution technique used for acquiring a high-resolution atmospheric Rayleigh-Mie spectrum are discussed in detail. It is explained that why original spectrum lineshape can be reconstructed on the relax condition of signal-to-noise ratio of 20. We also discussed the feasibility and way of a lower-spectrum-resolution analyser used for a high-spectrum-resolution.

Key words semi-blind deconvolution, Rayleigh-Mie scattering spectrum, atomic-resonance filter.