

单目多光谱氧气吸收被动测距系统 光谱通道参数分析

闫宗群¹, 谢志宏¹, 陈 剑², 杨建昌¹, 陈静华³

¹装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072;

²中国人民解放军 66011 部队, 北京 102600;

³中国人民解放军 66061 部队, 北京 100144

摘要 为消除测距光谱通道位置和数量选取对氧气吸收衰减被动测距技术测距精度的影响, 基于氧气吸收衰减被动测距技术的基本原理, 分析氧气 A、B 吸收带光谱谱线特性。对于吸收带带肩上的光谱通道, 利用蒙特卡罗法, 以拟合非吸收基线与理想基线的误差平方和与相关度为指标, 分析光谱通道位置和数量及拟合多项式级次对非吸收基线拟合精度的影响。对于吸收带带内光谱通道, 分析不同光谱通道处吸收率大小对测距距离和测距精度的影响。结果表明: 在综合考虑系统实时性和测距精度要求的情况下, A 吸收带两带肩上光谱通道各为 1 个, B 吸收带单带肩上光谱通道为 2 个, 位置均宜选择在各带肩靠近吸收带一端; 吸收带内光谱通道可根据测距任务中对测程和测距精度的要求灵活选择其数量和位置。因此, 在无法一次性获取测距波段完整光谱曲线的情况下, 单目多光谱被动测距系统采用较少的光谱通道和最简单的直线拟合方法, 不仅可以保证系统的测距精度, 而且能够减少滤波片更替和软件计算的时间周期, 进而增强系统数据采集和解算的实时性。

关键词 大气光学; 被动测距; 单目多光谱系统; 光谱通道; 氧气吸收带; 基线强度

中图分类号 TN976; TN219 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1001002

Parametric Analysis of Spectral Channels in Monocular Multispectral Passive Ranging System Based on Oxygen Absorption

Yan Zongqun¹, Xie Zhihong¹, Chen Jian², Yang Jianchang¹, Chen Jinghua³

¹Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

²Army 66011 of PLA, Beijing 102600, China;

³Army 66061 of PLA, Beijing 100144, China

Abstract In order to eliminate the influence of the location and number of spectral channels on the ranging accuracy of the oxygen absorption attenuation passive ranging technology, we discuss the basic principle of passive ranging technology based on oxygen absorption attenuation, and analyze the spectral line characteristics of oxygen A and B absorption bands. For spectral channels in the shoulder of the absorption band, the Monte Carlo method is used to analyze the influence of the position and the number of spectral channels and degree of fitting polynomial on the accuracy of non-absorption baseline fitting according to the sum of error squares and the correlation between the non-absorption baseline and the ideal baseline. For the spectral channels in the absorption band, the influence of the absorption rates in different spectral channels on the measurement range and the ranging accuracy is analyzed. Considering the real-time and precision of the system comprehensively, we find that each shoulder of the A absorption band has one spectral channel, and single shoulder of the B absorption band has two spectral channels. The location of spectral channels all should be chosen at the end of each shoulder near the absorption band. The spectral channels in the absorption band can be flexibly selected according to the requirements on the measurement range and ranging accuracy. Therefore, if the complete spectral curve in the ranging waveband cannot be collected in

收稿日期: 2017-05-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-31

基金项目: 院校创新基金(2016CJ10)

作者简介: 闫宗群(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事多目标跟踪、高光谱分析和被动测距技术方面的研究。

E-mail: yanzongqun@163.com

one-time exposition, the monocular multispectral passive ranging system, using the fewer spectral channels and the simplest linear fitting method, will not only ensure the ranging accuracy of the system, but also reduce the time period of filter replacement and software calculation, and thus enhance the real-time performance of data acquisition and calculation.

Key words atmospheric optics; passive ranging; monocular multispectral system; spectral channel; oxygen absorption band; baseline intensity

OCIS codes 010.1030; 010.1285; 050.1940; 050.1970

1 引 言

氧气吸收被动测距技术^[1-2]是一种利用大气成分中氧气成分的吸收带,通过对目标辐射的吸收来被动获取目标距离的测距技术。该单目被动测距技术由 Michael 等^[3]提出后,凭借其无源隐身、探测简便、动态范围宽、作用距离远和精度高等优势在无源被动测距技术领域获得了迅速发展。

根据该测距技术的基本原理和工程应用可知,该技术不仅要准确测量氧气吸收带及其带肩内的目标辐射,还要在一定空间范围内实现实时监控和测量。这要求被动测距系统是一个具有多光谱采集能力的面成像系统,这类系统包括多光谱成像系统和高光谱成像系统。2010 年美国学者 Anderson^[4]在安德森空军基地采用由中心波长分别为 752,762,778 nm,带宽为 5~7 nm 的三光谱通道液晶可调谐滤波器和 ICCD(增强 CCD)相机构成的多光谱成像被动测距系统,对 F-16 飞机发动机尾喷焰进行地面静态测距实验,其测距平均误差为 12%。Anderson 等^[5-8]于 2011 年利用 MR304 傅里叶变换光谱仪点探测系统对氧气 762 nm(A 吸收带)和 690 nm(B 吸收带)的近红外和可见光吸收带不同距离上的测距能力进行测试,其测试对象分别为 405 m 和 900 m 距离上的静态地对空导弹和全尺寸固体火箭发动机尾喷焰、13 km 距离处起飞的 Falcon 9 火箭发动机尾焰,近距离上 A 吸收带的测距误差均在 8% 左右,远小于 B 吸收带的测距误差,而远距离上二者正好相反。余皓等^[9]利用中心波长分别为 752,765,780 nm 的窄带滤光片和光电倍增管组成的三光谱通道非成像被动测距系统对 100~400 m 距离上的目标进行被动测距实验,氧气 A 吸收带不到 5% 的最大测距误差充分证明了基于氧气吸收的单目多光谱被动测距系统用于被动测距的可行性。

国内外被动测距实验均已证明基于氧气吸收衰减的单目多光谱被动测距方案的可行性^[10-16],但多光谱通道中心波长和带宽的不同也导致了不同的测距实验误差。多光谱成像系统通过快速更替滤波片的方法获取固定带宽和固定中心波长光谱信息;虽然实时性较好,但是光谱信息过少会为后续数据处理引入一定的误差,同时光谱通道中心波长位置差异和带宽不同也会带来较大的测距误差,之前研究人员并未就多光谱各通道中心波长位置、通道带宽和积分时间等参数对测距误差的影响展开详细的讨论。本文从单目多光谱被动测距系统的优化设计出发,从理论上详细分析了光谱通道个数、中心波长位置、通道带宽和积分时间等参数对被动测距系统测距误差及测程的影响,为单目多光谱被动测距系统的设计提供了理论支撑。

2 单目多光谱氧气吸收被动测距系统

基于氧气吸收衰减的被动测距技术主要利用大气中氧气分子在 A 吸收带和 B 吸收带的吸收。与其他气体吸收带相比,这两个吸收带具有吸收气体混合比稳定、吸收带纯净、吸收动态范围大、吸收相对较弱和测量便捷等优势。在已知大气路径上氧气吸收率与辐射传输距离关系的前提下,通过测量氧气 A 或 B 吸收带位置处的氧气吸收率来反演目标距离;大气路径上氧气吸收率与辐射传输距离的关系可通过相关 K 分布算法快速解算^[17],目标辐射传输路径上的氧气吸收率计算公式为

$$A_{O_2, \lambda_3} = 1 - \tau_{O_2, \lambda_3} = 1 - \frac{I_{\lambda_3}}{I_{b, \lambda_3} \cdot \tau_{\text{optic}, \lambda_3} \cdot R_{\text{Cam}, \lambda_3}}, \quad (1)$$

$$I_{b, \lambda_3} = \frac{I_{\lambda_1}}{\tau_{\text{optic}, \lambda_1} \cdot R_{\text{Cam}, \lambda_1}} + \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{I_{\lambda_2}}{\tau_{\text{optic}, \lambda_2} \cdot R_{\text{Cam}, \lambda_2}} - \frac{I_{\lambda_1}}{\tau_{\text{optic}, \lambda_1} \cdot R_{\text{Cam}, \lambda_1}} \right), \quad (2)$$

式中 λ_1, λ_2 和 λ_3 分别表示 A 或 B 吸收带带肩及吸收带内某位置的波长; $\tau_{\text{optic}, \lambda_i}$ 和 $R_{\text{Cam}, \lambda_i}$ 分别为仪器光学系统和探测器在波长 λ_i 上的光谱透过率和光谱响应度,用于对目标辐射强度测量值进行修正,均为已知量; I_{λ_i} 为探测系统在波长 λ_i 处所响应的目标辐射强度,该参量为可测量; I_{b, λ_i} 为各波长位置处的光谱基线强度

(无气体吸收时仅由大气湍流、散射等效效应衰减后的目标辐射强度),因氧气 A、B 吸收带附近仅存在氧气一种气体的吸收,所以该值为氧气吸收作用前的目标光谱强度。经光学系统光谱透过率和探测器光谱响应度修正后氧气 A 吸收带频段的大气总光谱曲线如图 1 所示。

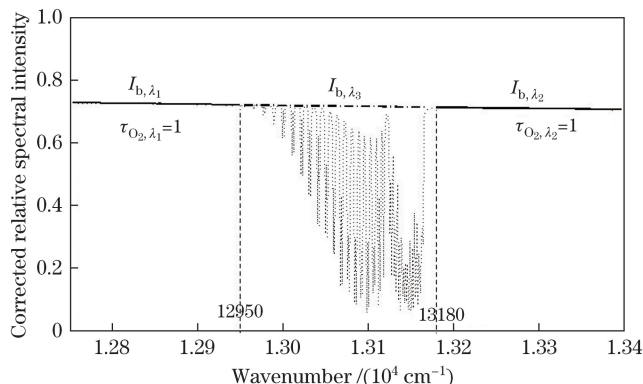


图 1 修正后氧气 A 吸收带频段的大气总光谱曲线

Fig. 1 Corrected atmospheric total spectrum curve of oxygen A absorption band

由于氧气吸收带两侧带肩上无氧气吸收存在,所以光谱基线强度 I_{b, λ_1} 和 I_{b, λ_2} 等于对应波长上修正后的系统测量光谱强度 I_{λ_1} 和 I_{λ_2} ;吸收带内光谱基线强度 I_{b, λ_3} 可由带肩上的光谱基线强度通过插值方法求得。由(1)式可知:只需测得氧气 A 或 B 吸收带左右带肩及吸收带内 3 个或多个波长上的目标辐射强度,便可测得目标辐射传输路径上对应氧气吸收带的氧气吸收率,然后再由氧气吸收率与路径距离关系被动解算出目标距离。

根据基于氧气吸收衰减被动测距技术的基本原理,单目多光谱氧气吸收被动测距系统应由若干个中心波长分别处于氧气 A 或 B 吸收带带肩和带内且带宽一定的滤波片组合、成像光学镜头和探测器组成,如图 2 所示。

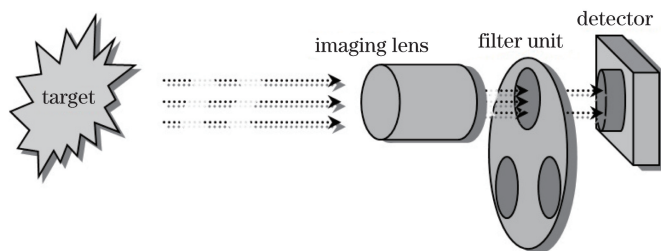


图 2 3 个测距光谱通道的单目多光谱系统示意图

Fig. 2 Schematic of monocular multispectral system with three spectral channels for ranging

图 2 中单目多光谱系统具有 3 个测距光谱通道。测距光谱通道是指专门用于测距、具有固定中心波长和带宽的窄光谱滤波片。3 个光谱通道中心波长分别对应在氧气吸收带左肩、吸收带内部和吸收带右肩,其主要功能是对经过大气衰减和光学镜头成像后的目标辐射进行相应的滤波,实现单光谱成像。

该被动测距技术利用的光谱区间的光谱曲线可看作平滑的直线或曲线,因此仅需带肩上的两个或多个点处的光谱强度便可插值拟合得到吸收带内的非吸收基线强度。但是对于一个多光谱系统而言,在成像光学镜头和探测器性能一定的情况下,单个滤波片带宽和滤波片数量都会对单幅图像采集时间和单次距离测量总时间产生重要的影响;滤波片的数量会通过影响带肩基线强度拟合精度的方式来影响吸收带内非吸收基线的插值精度,从而影响测距精度。同时,作为硬件的滤波片不但制作费用较为昂贵、过程复杂,而且一旦制成便无法更改其中心波长和带宽等参数。由此可见,在不影响测距精度的基础上,可通过选择一定数量的光谱测量点来减少设备的单次测量时间,从而增强系统的实用性和实时性。对于一个多光谱系统而言,测距光谱通道的设计是整个系统设计中最重要的一环。因此,本文主要对氧气 A、B 吸收带测距光谱通道数目、通道中心波长位置及非吸收基线强度插值方法进行讨论分析。

3 测距光谱通道的数目与位置

根据文献[2]中测距原理成立的两个基本假设可知,在氧气吸收带及周围较窄波段范围内的光谱曲线由于没有辐射源自身的选择性吸收,因而可以作为直线或曲线进行处理。该段光谱区域内的基线拟合属于曲线插值拟合问题。常用的曲线拟合方法有拉格朗日插值拟合法、多项式插值拟合法和三次样条拟合法等。宗鹏飞等^[18-19]对这3种拟合方法的基线拟合性能进行了对比分析,得出精度最高且最适合用于基线拟合的方法为多项式插值拟合法。本文将在此基础上讨论多项式拟合下,拟合精度与带肩点位置、数目及多项式级次之间的关系。

氧气吸收衰减被动测距技术主要测距对象是具有尾喷焰的飞行器,例如飞机、导弹的尾喷焰,此类目标的温度范围为900~2000 K。根据黑体辐射定律和维恩位移定律可知,氧气A、B吸收带及其带肩所处的波长范围均在目标辐射峰值波长的短波方向上,且温度越高曲线斜率越大。因为所研究波段的辐射强度是波数的单调函数,所以在确定带肩点位置时便有一定的规律可循。

3.1 氧气A吸收带

研究表明中心波长为762 nm的氧气A吸收带是所有氧气吸收带中最适于被动测距的吸收带。不仅因为其吸收动态范围大、吸收深度适当,更重要的是该吸收带两端的无吸收带肩是进行非吸收基线拟合的理想带肩。因此,首先讨论A吸收带的测距光谱通道数量及其位置分布规律。

因为A吸收带波段范围内的辐射曲线斜率会随着目标温度的升高而变大,所以测距光谱通道的选取只要能够满足温度上限情况下的基线拟合精度要求,便可满足研究温度范围内任何温度目标的拟合要求。假定目标飞行器尾焰温度为2000 K,根据黑体辐射定律可得该高温辐射体的光谱辐射强度分布;将氧气A吸收带波段内的黑体辐射光谱曲线作为该吸收带的理想基线曲线。该波段的大气透过率曲线由Modtran软件仿真提供,条件设置为中纬度夏季大气模式、农村能见度23 km气溶胶模型、无云雨气象、距离10 km、天顶角45°,波长范围为740~800 nm。则目标辐射经过该路径大气衰减后的光谱强度曲线与理想基线如图3所示。

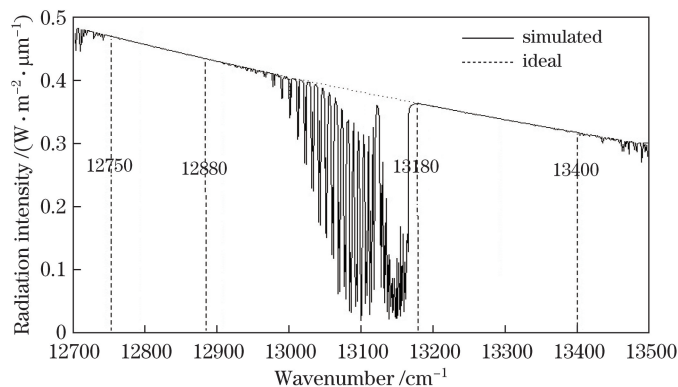


图3 目标辐射经大气衰减后的光谱强度曲线与理想基线

Fig. 3 Ideal baseline and spectral intensity curve of target radiation after atmosphere attenuation

由图3可知:A吸收带右侧带肩波长范围为746.3~758.7 nm(13400~13180 cm^{-1}),吸收带左侧带肩波长范围为776.4~784.3 nm(12880~12750 cm^{-1})。若要准确计算吸收带的吸收率,则需在吸收带两侧干净平滑的带肩上选择用于拟合插值非吸收基线的光谱通道和一个获取吸收带内光谱信息的光谱通道。在两带肩上各取一个光谱通道用于非吸收基线拟合时,此时系统为最简多光谱系统,共3个测距光谱通道。除此之外,还可在两带肩上分别选取2、3、4、5等多个光谱通道用于非吸收基线的拟合。随着带肩上光谱通道数目的增多,对光谱曲线的描述变得愈加详细准确,对拟合精度的提高也有一定的帮助,但多光谱系统中滤波片数量的增多将导致单次测距时间的增大,会降低系统的实时性。

下面将分别在两带肩上取 $N(N=1,2,3,4,5)$ 个光谱通道作为拟合数据点,对A吸收带的非吸收基线进行插值拟合。与利用全部带肩作为拟合数据点的情形进行不同级次多项式拟合效果的对比分析,以此确定合理的带肩光谱通道数目和拟合多项式级次。

为方便对相同拟合数据点下不同级次多项式的拟合效果,以及同一级次多项式对不同拟合数据点的拟合效果进行对比,以拟合所得非吸收基线与理想基线的误差平方和及相关性作为衡量指标。这些指标衡量了拟合所得非吸收基线与理想基线各点之间的误差偏差大小和线型相关性大小,分别表明了利用非吸收基线与理想基线计算所得氧气吸收率的误差和拟合曲线的相似性。利用蒙特卡罗方法在不同 N 值下随机选取 10000 个拟合数据点,分别得到误差平方和与相关度的分布情况。

1) $N=1$ 情形

当 $N=1$ 时,在吸收带左右带肩上各取一个光谱通道作为拟合数据点进行多项式拟合。用于拟合的数据点仅有两个,只适合进行唯一的直线插值,因此仅对 $N=1$ 情形下的直线插值拟合效果进行分析,结果如图 4 所示。

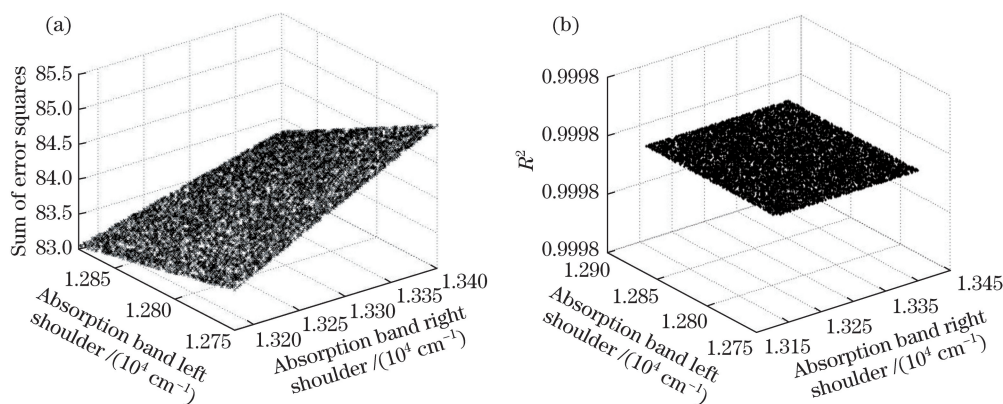


图 4 $N=1$ 情形下直线拟合非吸收基线的(a)误差平方和与(b)相关度分布

Fig. 4 Distributions of (a) sum of error squares and (b) R^2 of non-absorbing baseline by linear fitting when $N=1$

由图 4 可知:随着吸收带左肩取值点波数的不断增大和吸收带右肩取值点波数的不断减小,插值拟合所得非吸收基线的精度有了明显提高,误差平方和明显减小。在两带肩紧邻吸收带的端点处误差平方和最小,在其最远端点处的误差平方和最大,但是非吸收基线与理想基线的相关度并没有发生明显的改变,造成该现象的原因是氧气 A 吸收带及其带肩的波段范围位于目标辐射曲线单调上升一侧。对于单调函数而言,拟合数据点越靠近被拟合区域,则拟合精度越高。因此,对于 $N=1$ 的情形应采用直线拟合方法进行非吸收基线的拟合,测距光谱通道应当选择在各带肩靠近吸收带的一端。

2) $N>1$ 情形

当 $N>1$ 时,除了直线拟合外,还可对拟合数据点进行 $2N-1$ 次多项式拟合。下面首先计算 $N=2$ 时所有循环下一次、二次、三次多项式拟合所得非吸收基线的误差平方和,然后分析各误差平方和与所有误差平方和均值的偏差分布情况,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,直线拟合下非吸收基线误差平方和的偏差随着两拟合数据点间距离差的减小而变大。通过对 $N=1$ 情形的分析可知,当带肩上的两拟合数据点都在靠近吸收带一端时误差平方和最小,反之最大。随着拟合多项式级次的增加,虽然非吸收基线与理想基线误差平方和的均值并没有明显减小,但其方差却降低了数个数量级,这说明对于高次多项式拟合而言,带肩上拟合数据点的位置分布对拟合精度的影响可忽略不计。由此可推定对于 $N=3,4,5$ 的情形,直线拟合时带肩上的测距光谱通道应尽可能分布在靠近吸收带的一端;在进行二次以上多项式拟合时,测距光谱通道位置便可任意选择,也可根据目标识别、背景去除等信息处理的需要进行选取。这主要是因为 N 个离散数据点便可准确确定唯一一条 $2N-1$ 次或者低次多项式曲线,离散点位置的分布并不会对曲线形状产生影响。

以上对不同测距光谱通道数下通道位置的选取进行了分析,结果表明:当左右带肩各取一个测距光谱通道时,光谱通道的位置应选在靠近吸收带一端;当左右吸收带各选多个测距光谱通道时,直线拟合时的测距光谱通道仍应集中在靠近吸收带一端,高次多项式拟合时可忽略测距光谱通道位置对非吸收基线拟合精度的影响。

下面分别对不同拟合数据点下的拟合精度进行对比,数据点依据上述分析结果进行选择。因为实际光谱采集集中存在多种因素影响,所以在光谱曲线中加入一定随机噪声。

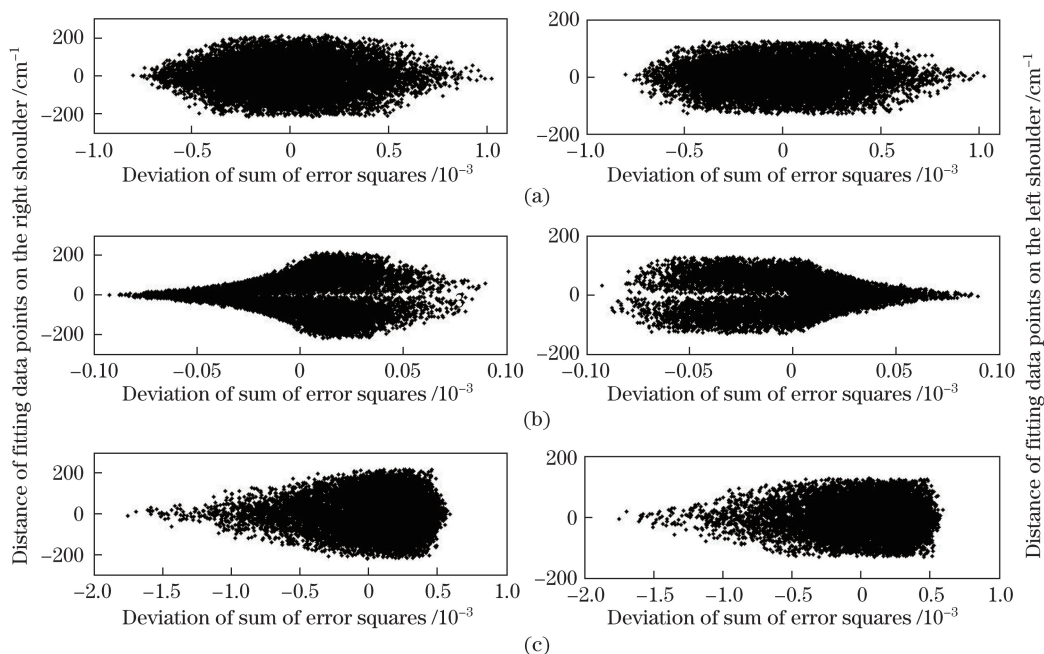


图 5 $N=2$ 情形下不同多项式拟合非吸收基线误差平方和的偏差分布。(a)直线拟合(均值:83.9008,方差:0.0889, R^2 :0.9998);
 (b)二次多项式拟合(均值:82.6881,方差: 8.8413×10^{-4} , R^2 :1);
 (c)三次多项式拟合(均值:82.6742,方差: 1.2449×10^{-7} , R^2 :1)

Fig. 5 Deviation distribution of sum of error squares of non-absorbing baseline by different polynomial fittings when $N=2$.

- (a) Linear fitting (mean: 83.9008, variance: 0.0889, R^2 : 0.9998);
- (b) quadratic polynomial fitting (mean: 82.6881, variance: 8.8413×10^{-4} , R^2 : 1);
- (c) cubic polynomial fitting (mean: 82.6742, variance: 1.2449×10^{-7} , R^2 : 1)

图 6 所示为不同拟合数据点的位置及利用直线拟合所得的非吸收基线。可以看出:拟合所得的非吸收基线皆高于理想基线且 $N=1$ 时的误差最小;随着拟合数据点的增多,直线拟合下的非吸收基线相对集中。这是因为本文虽将该波段的光谱曲线近似为平滑直线,但其实质上仍为一段向上微弯的平滑弧线;这时利用拟合基线计算得出的氧气吸收率均大于实际吸收率,导致解算距离长于实际目标距离;因此基线拟合误差是氧气吸收被动测距技术的一个固有误差。

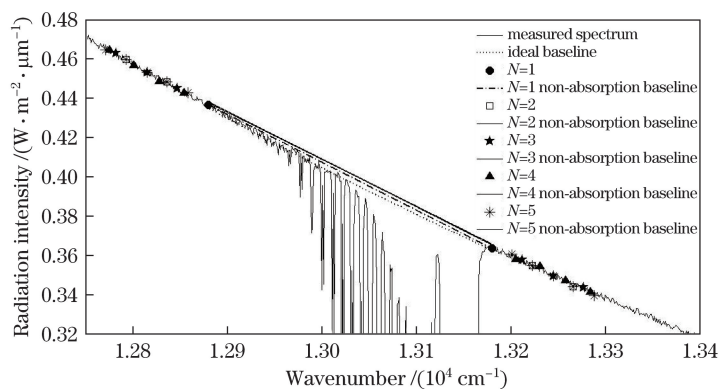


图 6 不同拟合数据点的位置及直线拟合下的非吸收基线

Fig. 6 Non-absorbing baseline by linear fitting and position of different fitting data points

表 1 和表 2 分别列出了不同拟合数据点、不同拟合多项式下非吸收基线与理想基线的误差平方和以及根据拟合非吸收基线计算的氧气 A 吸收带吸收率。从表 1 可知,在相同级次多项式下,拟合数据点的增加对误差平方和的影响并不大;在相同拟合数据点下,高次多项式曲线形状的弯曲使得误差平方和有所减小,但是减小幅度非常有限,特别是当多项式级次超过 4 阶以后,精度基本达到饱和,此时多项式级次的提高只会导致算法复杂性和计算时间的逐渐增加。

表 1 不同拟合数据点、不同拟合多项式下非吸收基线与理想基线的误差平方和
Table 1 Sum of error squares between ideal baseline and non-absorbing baselines by different fitting polynomials with different fitting data

N	Linear polynomial	Quadratic polynomial	Cubic polynomial	Quartic polynomial	Quintic polynomial
1	47.959				
2	48.355	47.818	47.658		
3	48.417	47.439	47.627	46.562	51.167
4	48.332	47.570	47.962	46.201	47.367
5	48.341	47.835	47.294	47.954	48.458
All data points	48.504	47.791	47.789	47.788	47.677

表 2 不同拟合数据点、不同拟合多项式拟合非吸收基线下的氧气 A 吸收带吸收率

Table 2 Absorptivity of oxygen A band with non-absorbing baseline by different fitting polynomials with different fitting data

N	Linear polynomial	Quadratic polynomial	Cubic polynomial	Quartic polynomial	Quintic polynomial
1	0.2215				
2	0.2247	0.2203	0.2215		
3	0.2251	0.2171	0.2192	0.2176	0.2463
4	0.2244	0.2182	0.2218	0.2066	0.2171
5	0.2245	0.2204	0.2163	0.2213	0.2253
All data points	0.2257	0.2200	0.2203	0.2201	0.2192

利用理想基线计算得到整个 A 吸收带的平均吸收率为 0.2170。从表 2 可以看出,多数情况下氧气吸收率皆大于利用理想基线所得的平均氧气吸收率,这与非吸收基线误差平方和的情况相同。利用左右带肩所有数据点拟合得到的非吸收基线,除了直线拟合下的误差平方和与吸收率最大外,其他多项式拟合所得的非吸收基线均优于其他情形下的非吸收基线,且比 $N=1$ 情形的拟合效果更好。由此可知,拟合精度与计算速度相互制约。对于 A 吸收带带肩上的测距光谱通道而言,在无法获取完整光谱曲线的情况下在左右带肩靠近吸收带一端各取一个测距光谱通道,利用直线拟合方法便可达到较好的拟合效果。同时最少的光谱通道数和最简单的直线拟合方法还可减少滤波片更替和软件计算的时间消耗,增强系统数据采集和解算的实时性。

下面将分析 A 吸收带内光谱通道位置的选取要求。A 吸收带的波长范围为 758.7~776.4 nm(13180~12880 cm^{-1})。在这 18 nm 带宽范围内不同波长处的吸收系数差别很大,而非吸收基线的差异却很小,如图 7 所示。因此,当利用吸收带内不同波长位置的实际吸收光谱与非吸收基线计算氧气吸收率时也会有较大的差别。

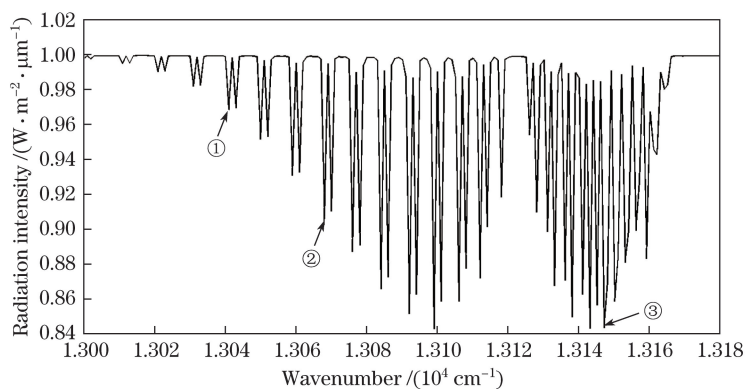


图 7 氧气 A 吸收带内吸收系数的差异

Fig. 7 Difference of absorption coefficients in the oxygen A absorption band

为了比较吸收带内不同波数位置吸收率随路径长度的变化趋势,选择 12880 cm^{-1} 和 13200 cm^{-1} 作为吸收带左右带肩上的测距光谱通道,利用直线拟合方法拟合吸收带内的非吸收基线,然后分别计算吸收带内①、②、③($13041, 13076, 13147\text{ cm}^{-1}$)处吸收率随路径长度的变化。光谱数据来源于 Modtran 软件在海拔 5 km 、视在天顶角 95° 方向上 150 km 路径长度内的仿真数据,计算结果如图 8 所示。

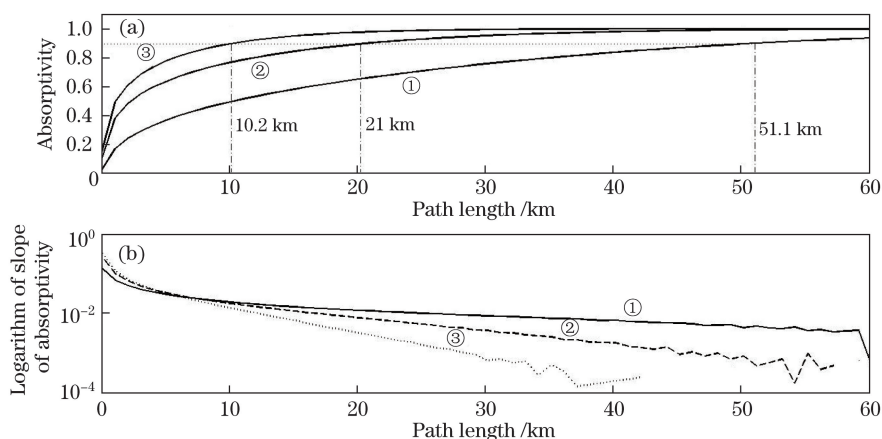


图 8 (a)吸收率和(b)吸收率斜率与路径长度的关系

Fig. 8 Variation in (a) absorptivity and (b) slope of absorptivity with path length

图 8 分别为吸收带内不同波长处吸收率与路径长度的关系曲线以及吸收率斜率随路径长度的变化趋势。当吸收率为 0.9 时,波数①、②和③处对应的路径长度分别为 $51.1, 21, 10.2\text{ km}$ 。其中波数①(13041 cm^{-1})处的吸收系数最小,吸收率随路径长度变化缓慢且可测路径长度最大;但当 3 个波数都在有效测距内时,它的吸收率斜率最小、误差最大。波数③(13147 cm^{-1})处的吸收率斜率虽然最大,但其测程最短。由此可知,随着不同波数处吸收系数的增加,测距精度逐渐增高但测程却逐渐变短,同时非吸收基线拟合误差对吸收率计算精度的影响愈小;反之,测程越长,测距精度越低。因此,应根据实际测距系统的功能需求确定吸收带内测距光谱通道位置。当系统主要用于远程告警测距时,可选择误差较大但测程较远的波数位置;当系统主要用于近距离高精度告警、反击和规避时,可选择精度较高、测距有限的波数位置。当然也可以同时选择两个吸收系数相差较大的波数位置,一个用于远距离发现告警,另一个用于近距离跟踪,相互配合共同工作。

3.2 氧气 B 吸收带

B 吸收带与 A 吸收带不同,仅有一个纯净带肩可用来拟合吸收带内的非吸收基线,如图 9 所示。这意味着非吸收基线强度的获取不再是拟合数据点内的插值,而是在拟合数据点基础上通过外推得到的。下面对 B 吸收带带肩上测距光谱通道的位置及数目进行讨论。

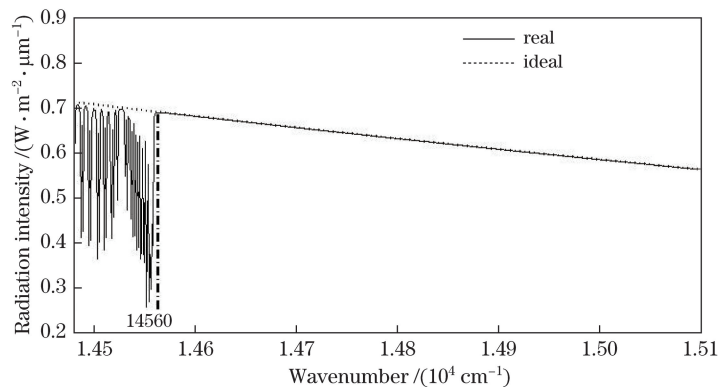


图 9 目标辐射经大气衰减后的光谱强度曲线与理想基线

Fig. 9 Ideal baseline and spectral intensity curve of target radiation after atmospheric attenuation

通过 B 吸收带独立性和动态范围的讨论,已经确定了 B 吸收带可用的频谱范围为 $14480\sim 14560\text{ cm}^{-1}$,而无吸收带带肩的频谱范围为 $14560\sim 15110\text{ cm}^{-1}$ 。拟合数据点 N 可取 2、3、4、5 或者全部波数点,仍用多

项式来拟合吸收带内的非吸收基线,利用蒙特卡罗法计算不同数量拟合数据点和不同拟合多项式下非吸收基线与理想基线的误差平方和及方差,结果如表 3 所示。

表 3 非吸收基线与理想基线的误差平方和及方差

Table 3 Variance and sum of error squares between non-absorbing baseline and ideal baseline

N	Sum of error squares/variance			
	Linear polynomial	Quadratic polynomial	Cubic polynomial	Quartic polynomial
2	39.4996/0.0954			
3	39.5432/0.0569	39.9073/0.0224		
4	39.5629/0.0384	39.9112/0.0048	39.8993/0.0325	
5	39.5747/0.0268	39.9105/0.0043	39.9001/0.0293	39.8674/0.1570
All data points	39.5997/0	39.8934/0	39.8523/0	39.7667/0

由表 3 可知,拟合数据点和拟合多项式级次的增加对误差平方和的影响很小。在相同拟合多项式下,数据点的增加使误差平方和的方差更小,拟合非吸收基线更加集中。因此 B 吸收带带肩上的光谱通道数量仍可确定为两个,从而可以在拟合精度相当的情况下尽可能简化多光谱系统,减少转换滤波片带来的时间损耗。两测距光谱通道在带肩上的不同位置分布对拟合精度的影响如图 10 所示。

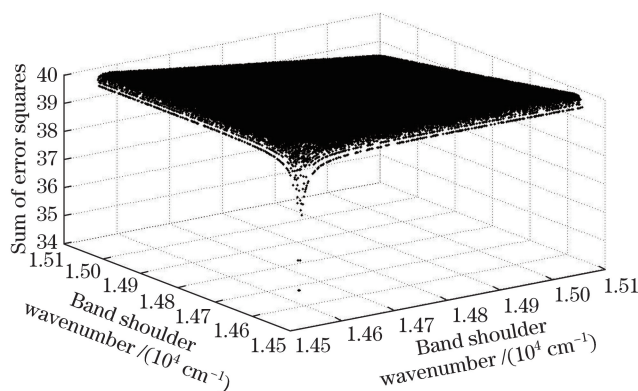


图 10 $N=2$ 情形下 B 吸收带直线拟合非吸收基线的误差平方和分布

Fig. 10 Distribution of sum of error squares of non-absorbing baseline by linear fitting when $N=2$

图 10 表明带肩上两光谱通道的距离越远,拟合所得的非吸收基线与理想基线的误差平方和越大,反之越小;在整体趋势上误差平方和变化不大,随着光谱通道位置向短波方向的移动,误差平方和逐渐减小,但在带肩长波方向上误差平方和下降得很快,且最小值也在该方向上。因此,在 B 吸收带带肩上选定测距光谱通道位置时,可在吸收带带肩两端选取,但最好在靠近吸收带一端选择。通过分析确定了 B 吸收带带肩上测距光谱通道的数量、位置及用于拟合非吸收基线的直线拟合方法。B 吸收带带内的测距光谱通道选择方式与 A 吸收带类似。

4 结 论

针对带肩上不同数量、不同位置的光谱通道,利用不同级次多项式拟合的方法,对比分析了拟合所得非吸收基线与理想基线的误差平方和与相关度;在综合考虑拟合效果和 multispectral system 实时性要求的情况下,确定 A 吸收带两带肩各取一个测距光谱通道,B 吸收带单带肩上取两个测距光谱通道;A 吸收带带肩上测距光谱通道位置应选择在各自靠近吸收带的一端,B 吸收带带肩上两个测距光谱通道的位置也选择在靠近吸收带一端,距离愈近愈好。吸收带内的测距光谱通道则应当根据系统实际应用需要选取。若偏重于远距离被动告警,则可选择吸收带内吸收率较小位置作为带内光谱通道,从而保证目标辐射的传输距离;若偏重于中近距离高精度被动测距需要,则可选择吸收带内吸收率较大位置作为测距通道,从而保证氧气吸收率随距离的变化率尽可能大。同时,在确定各光谱通道位置时还需考虑通道带宽的影响,确保不会将不属于本通道的信

号引入通道内。由于各光谱通道带宽还会对系统实时性和系统测距范围产生影响,所以下一步工作中将根据系统作用距离、目标与背景的信噪比、探测器系统噪声和技术参数等因素对通道带宽进行优化设计。通过分析所得的测距光谱通道数量和位置选取规则可为单目多光谱成像式被动测距系统的进一步优化设计提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- [1] Hawks M R, Perram G P. Passive ranging of emissive targets using atmospheric oxygen absorption lines[C]. SPIE, 2005, 5811: 112-122.
- [2] Yan Zongqun. Research on technology of passive ranging based on oxygen absorption[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2014.
闫宗群. 基于氧气吸收的被动测距技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
- [3] Hawks M R. Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [4] Anderson J R, Szczukowski L M, Abel B R, *et al.* Monocular passive ranging[R]. Air Force Flight Test Center, 2009: AFFTC-TIM-09-10.
- [5] Anderson J R. Monocular passive ranging by an optical system with band pass filtering[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [6] Vincent R A. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011.
- [7] Hawks M R, Vincent R A, Martin J, *et al.* Short-range demonstrations of monocular passive ranging using $O_2(X^3\Sigma_g^- \rightarrow b^1\Sigma_g^+)$ absorption spectra[J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(5): 513-519.
- [8] Anderson J R, Hawks M R, Gross K C, *et al.* Flight test of an imaging $O_2(X \rightarrow b)$ monocular passive ranging instrument[C]. SPIE, 2011, 8020: 802005.
- [9] Yu Hao, Liu Bingqi, Zhang Yu, *et al.* Multi-spectral non-imaging measurement for average transmission of oxygen A absorption band[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0401003.
余皓, 刘秉琦, 张瑜, 等. 氧气 A 吸收带平均透过的多光谱非成像测量[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0401003.
- [10] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2744-2750.
闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 利用氧气吸收被动测距的近程实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2744-2750.
- [11] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S. Theoretical analysis of the effect of meteorologic factors on passive ranging technology based on oxygen absorption spectrum[J]. Optik, 2013, 124: 6450-6455.
- [12] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* The refraction absorption error of passive ranging technology by oxygen absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0901002.
闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 氧气吸收被动测距技术中的折射吸收误差[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0901002.
- [13] Li Jinhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin. Passive ranging of infrared target using oxygen A-band and Elsasser model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2582-2586.
李晋华, 王召巴, 王志斌. 基于 Elsasser 模型的氧气 A 带红外目标被动测距[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2582-2586.
- [14] Wei Heli, Dai Congming, Wu Pengfei, *et al.* The calculation of the atmospheric absorption of oxygen A band for passive ranging[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2015, 38(5): 409-413.
魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 用于被动测距的氧气 A 带大气吸收仿真计算[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(5): 409-413.
- [15] Fu Xiaoning, Shan Lanxin, Wang Rui. A new ranging formula for oxygen absorption based passive ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1201001.
付小宁, 单兰鑫, 王蕊. 一个新的氧吸收法被动测距公式[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1201001.
- [16] Zhang Yu, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Experimental research of passive ranging in extreme winter weather[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0613002.
张瑜, 刘秉琦, 华文深, 等. 冬季极端天气条件下被动测距实验[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0613002.
- [17] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* The application of the CKD method in the passive ranging technology

by oxygen absorption[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 667-677.

闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 相关 K 分布法在氧气吸收被动测距技术中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(3): 667-677.

- [18] Zong Pengfei, Wang Zhibin, Zhang Jilong, *et al.* Study on baseline fitting method based on passive infrared range measurement[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 174-176.

宗鹏飞, 王志斌, 张记龙, 等. 基于红外被动测距技术的基线拟合算法研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 174-176.

- [19] Zong Pengfei, Wang Zhibin, Chen Yuanyuan, *et al.* Oxygen A absorption band LBLRTM and distance inversion algorithm based on baseline fitting[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2013, 24(1): 79-84.

宗鹏飞, 王志斌, 陈媛媛, 等. 基于氧气 A 吸收带的 baseline 拟合距离反演算法[J]. *光散射学报*, 2013, 24(1): 79-84.