

# 单目多光谱氧气吸收被动测距系统光谱通道带宽分析

闫宗群<sup>1</sup>, 杨建昌<sup>1\*</sup>, 张瑜<sup>2</sup>, 谢志宏<sup>1</sup>, 陈剑<sup>3</sup>

<sup>1</sup>陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072;

<sup>2</sup>军事科学院系统工程研究院, 北京 100010;

<sup>3</sup>中国人民解放军 66011 部队, 北京 102600

**摘要** 基于测距光谱通道数量和位置选定规则,以氧气 A 吸收带为例,从系统探测距离、目标与背景信噪比、系统工作海拔等约束条件对带宽的限制出发,利用 MODTRAN 和 MATLAB 软件综合仿真分析了满足系统实时性、目标信噪比及不同探测距离条件下通道带宽上下限的取值范围。结果表明:相同条件下,系统平台海拔越高,带宽下限取值越小、范围越大、选取越灵活,系统探测距离越远,有效探测范围也越大;目标信噪比要求越高,带宽下限取值越大、范围越小、选取越受限,探测距离和有效探测范围越小。因此,设计系统时应根据任务要求,确定光谱通道位置和数量,计算系统工作实时性、目标信噪比、系统最大最小工作距离等多重约束条件下各通道带宽取值上下限曲线,通过确定能够同时满足最大及最小工作距离条件的上下限曲线最小交集,便可在曲线交集区域内选定满足设计要求的通道带宽取值。这为单目多光谱被动测距系统的参数设计和工程化提供有效的理论支撑和计算方法,从而设计出高低精度搭配、远近距离兼顾的多光谱被动测距系统。

**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; 带宽

中图分类号 TN976; TN219

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0601003

## Analysis of Spectral Channel Bandwidth of Monocular Multispectral Passive Ranging System Based on Oxygen Absorption

Yan Zongqun<sup>1</sup>, Yang Jianchang<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>2</sup>, Xie Zhihong<sup>1</sup>, Chan Jian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Weapon and Control, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

<sup>2</sup>System Engineering Research Institute of Military Sciences, Beijing 100010, China;

<sup>3</sup>Army 66011 of PLA, Beijing 102600, China

**Abstract** Taking the oxygen absorption band A as an example, we consider some constraints of the system such as detection distance, target and background signal-to-noise ratio (SNR), system operating altitude on the channel bandwidth based on the selection rules of number and position of ranging spectrum channels, and simulate and analyze the range of the channel bandwidth upper and lower limits to meet the real-time performance of system, target SNR and different detection distance conditions by using MODTRAN and MATLAB softwares. The results show that the higher the platform altitude is, the lower the lower limit of bandwidth is, the larger the range is, the more flexible the selection is, the longer the system detection distance is and the larger the effective detection range is under the same conditions; the higher target SNR requirement is, the larger the lower limit of bandwidth is, the smaller the detection range is, the less flexible the selection is, the smaller the effective detection range and scope are under the same conditions. Therefore, in the design of passive ranging system, we should firstly determine the location and number of spectrum channels based on the task design requirements, and then calculate the upper and lower limits curves of each channel under multiple constraints of the real-time system, the signal to noise ratio, and the maximum and minimum working distance of the system. Secondly it will be determined that the minimum intersection based on the upper and lower limit curves that satisfy both the minimum and maximum working distance. Finally, the best channel bandwidth values that meet the design requirements could be selected in the

收稿日期: 2018-01-02; 收到修改稿日期: 2018-01-20

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、光学被动测距等方面的研究。

E-mail: yanzongqun@163.com

\* 通信联系人。E-mail: xinyue\_022@xina.com

intersection. It can provide an effective theory support and calculation method for the parameter design and engineering of single-lens multi-spectrum passive ranging system with arbitrary precision and arbitrary distance.

**Key words** atmospheric optics; passive ranging; monocular multispectral system; spectral channel; oxygen absorption band; bandwidth

**OCIS codes** 010.1030; 010.1285, 050.1940; 050.1970

## 1 引 言

单目多光谱氧气吸收被动测距系统是利用大气中氧气对目标辐射的吸收衰减效应进行被动测距的系统<sup>[1]</sup>。系统由成像光学镜头、若干滤波片、滤波片旋转机和探测器组成;滤波片中心波长分别处于氧气 A、B 吸收带带肩和带内,且带宽一定。自 2005 年氧气吸收带被用于被动测距<sup>[2]</sup>以来,国内外机构先后采用傅里叶变换光谱仪<sup>[3]</sup>、液晶可调谐滤波器式测距样机<sup>[4]</sup>、高光谱成像光谱仪<sup>[5]</sup>和滤波片式测距样机<sup>[6]</sup>等作为探测系统进行了地面和飞行测试;美国在 2011 年利用滤波片式样机对飞行中的 F-16 和 Falcon9 火箭实施了跟踪和光谱数据采集,测距结果表明,在长达 90 km 飞行过程中,最大测距误差小于 5%<sup>[7]</sup>;国内军械工程学院也在 2013 年至 2016 年分别利用成像光谱仪和滤波片式样机进行了地面中短距离的被动测距实验,其测距误差在 5%~8%之间<sup>[8-11]</sup>。虽然国内外已经对氧气吸收被动测距技术的可行性和测距精度进行了实验,但对测距用光谱通道特性参数的讨论较少。

测距光谱通道(简称通道)带宽指的是光谱通道所能透射光谱的起止波长差,是单目多光谱系统滤波器的重要参数。对多光谱系统而言,通道带宽还是影响系统光谱分辨率的一个重要因素。减小带宽虽然可以提高系统的光谱分辨率、增加通道选择的灵活性,但带宽的减小使得同样条件下透过滤波片的辐射能量变弱,达到相同信噪比(SNR)所需的积分时间增长,牺牲了系统的实时性。带宽增大虽可增大通道的透光量,减少单通道图像获取的积分时间,保障系统的实时性,但带宽的增大却增大了通道内光谱信息的平均范围、降低了通道的可选择性,同时大带宽也会造成探测器因曝光过度而无法工作。所以,通道带宽的确定不仅要受到探测器面最小照度和最大曝光量的限制,还要在设定信噪比基础上满足系统实时性对积分时间的要求。本文在确定通道最佳数量和位置的选定规则后,根据通道带宽对系统作用距离、目标背景信噪比、探测器噪声等性能参数的影响,对通道带宽进行优化设计,进而确定单目多光谱测距系统光谱测距通道带宽的选定规则。

## 2 通道带宽影响因素分析

通道带宽直接影响到达探测器表面的辐射光通量。具有尾焰的飞行器由于发动机的正常或加力工作会产生高温尾喷焰;尾焰辐射经大气吸收、散射等衰减后到达单目多光谱测距系统的入瞳;后经光学系统和滤波片吸收衰减后被探测器响应、量化和采集。不同测距系统平台与目标的相对位置关系如图 1 所示。

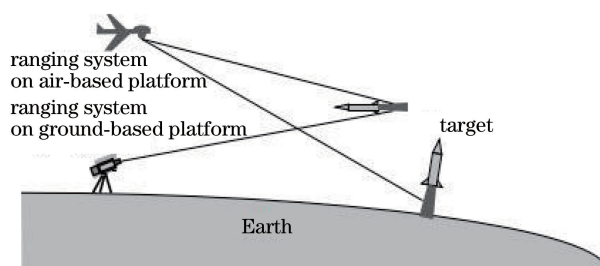


图 1 地基和空基平台上测距系统与目标的相对位置关系图  
Fig. 1 Relative position relation between ranging system and target on air-based and ground-based platforms

探测面上的辐射通量由系统入瞳处的辐射亮度、光学系统相对孔径、滤波片的带宽和透过率等参数共同决定。假设飞行器尾焰为发射率为  $\epsilon$ 、温度为  $T$  的灰体。受光谱通道带宽的限制,目标辐射光谱中只有位于  $\lambda_i \sim (\lambda_i + \Delta\lambda_i)$  范围内的辐射能透过第  $i$  个通道并被探测器所接收,其中  $\lambda_i$  和  $\Delta\lambda_i$  分别为第  $i$  个通道的起始波长和带宽( $i=1,2,3,\dots$ )。

探测器所接收的第  $i$  个通道的辐射通量为<sup>[1]</sup>

$$\Phi_i = \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i} (L_{e,\lambda} \tau_{opt,i} \Omega \pi D^2 / 4) d\lambda, \quad (1)$$

式中: $\tau_{opt,i}$  为第  $i$  个通道的光学系统透过率,是波长的函数; $D$  为光学镜头口径; $\Omega$  为目标相对于探测系统的空间立体角,等于  $A_{target} / f^2$  ( $f$  为光学镜头焦距,  $A_{target}$  为目标在探测器上的成像面积);  $L_{e,\lambda}$  为探测系统前端的目标辐射亮度,可表示为

$$L_{e,\lambda} = \frac{\epsilon}{\pi} \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2 / (\lambda T)] - 1 \}} \tau_{atm,\lambda}, \quad (2)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$  为第一、第二辐射常数; $\tau_{atm,\lambda}$  为目标至探测系统前端的大气透过率。

当探测器第  $i$  个通道的积分时间为  $t_{int,i}$  时,目标辐射在单通道单像元上的曝光量为

$$E_i = \Phi_i \times t_{\text{int},i} = \frac{t_{\text{int},i} A_{\text{pixel}} \epsilon D^2}{4f^2} \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i} \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2/(\lambda T)] - 1 \}} \tau_{\text{atm},\lambda} \cdot \tau_{\text{opt},i} d\lambda, \quad (3)$$

式中:  $A_{\text{pixel}}$  为探测器上单个像元的面积。

若探测器在波长  $\lambda$  的量子效率为  $\eta_\lambda$ , 则第  $i$  个通道内入射光谱辐射能量所产生的信号电子数为

$$S_{e,i} = \frac{t_{\text{int},i} A_{\text{pixel}} \epsilon D^2}{4f^2 hc} \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i} \lambda \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2/(\lambda T)] - 1 \}} \eta_\lambda \tau_{\text{atm},\lambda} \cdot \tau_{\text{opt},i} d\lambda, \quad (4)$$

式中:  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光在真空中的光速。

由(1)~(4)式可知, 当目标辐射亮度和系统参数一定时, 单个像元上曝光产生的光生电子数随积分时间和通道带宽的增加而增大。

### 2.1 探测器势阱容量的影响

探测器的最大势阱容量决定了探测器积分时间和带宽增大的上限。若探测器像元的最大势阱容量为  $Q_{\text{max}}$ , 则要保证各个通道上积分时间和带宽所决定的信号电子数均小于  $Q_{\text{max}}$ , 即

$$\max\{S_{e,i}\} \leq Q_{\text{max}}. \quad (5)$$

### 2.2 探测器噪声的影响

探测器信噪比是决定能否有效探测到目标的重要因素<sup>[12]</sup>。当照度一定时, 如果目标信号弱到与探测器系统噪声同处一个数量级, 那么无论目标的成像尺寸如何均无法确保其被探测到。因此, 探测器信噪比决定了通道带宽和积分时间的取值下限。

因氧气吸收被动测距技术所选用的吸收带正好位于可见光红光光谱区, 不仅容易受到太阳辐射的影响, 而且也偏离了目标尾焰的峰值辐射光谱区。为提高对目标的探测能力、减小系统噪声, 可选择具有片上信号放大作用的电子倍增 CCD(EMCCD) 作为测距用探测器<sup>[13-14]</sup>。对于 EMCCD 而言, 主要的噪声是光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声、假信号噪声和噪声因子<sup>[15]</sup>。

#### 1) 噪声因子

噪声因子  $F$  是由于电子倍增增益的不确定性而引入系统的额外噪声。因为电荷在倍增中的独立性, 可令  $F = \sqrt{2}$  且与带宽和积分时间无关, 这样便可利用它对光子散粒噪声和暗电流噪声进行修正<sup>[16]</sup>。

#### 2) 光子散粒噪声

光子散粒噪声是由入射光子及光电转换的随机性造成的, 其大小等于入射光子信号值的平方根。由于 EMCCD 中光子散粒噪声随有用信号一起被放大  $G$  倍, 所以增益后的光子散粒噪声为

$$\sigma_{\text{shot}} = G \cdot F \cdot \sqrt{S_e}. \quad (6)$$

由于入射光子信号  $S_e$  与积分时间和带宽有关, 因此

光子散粒噪声也是积分时间和带宽的函数。

#### 3) 暗电流噪声

EMCCD 虽有效抑制了读出噪声, 但暗电流噪声却因电子倍增效应被放大, 这是降低探测器信噪比的主要因素。本文所用 EMCCD 单像元单位时间内无光照下产生的电子数为  $n_{\text{dark}} = 0.0087$ , 所以单像素上增益后的输出暗电流为

$$\sigma_{\text{dark}} = G \cdot F \cdot \sqrt{n_{\text{dark}} \times t_{\text{int}}}, \quad (7)$$

式中:  $t_{\text{int}}$  为探测器的积分时间。(7)式表明暗电流噪声与积分时间有关。

#### 4) 假信号噪声

假信号噪声<sup>[4]</sup>是指时钟感生电荷, 由于 EMCCD 的电子倍增效应使之更加容易被察觉, 从而将降低探测器的信噪比。本文所用 EMCCD 的假信号噪声  $\sigma_f$  为 0.06~0.15, 即指单像元中的电子数。

#### 5) 读出噪声

读出噪声是由输出放大器和后续处理电路所产生的, 也是常规 CCD 最主要的噪声来源。由于 EMCCD 在信号读出前对信号进行了放大, 所以其读出噪声对输出信号的影响得到了有效抑制。该噪声仅与信号读出速率有关, 与积分时间和通道带宽无关。本文所用 EMCCD 的最大读出噪声  $\sigma_{\text{readout}}$  为 26.15 个电子。

通过上面对 EMCCD 主要噪声的分析可以得出第  $i$  个通道所对应的总噪声信号<sup>[5]</sup>为

$$N_{e,i} = G \cdot F \cdot \sqrt{[\sigma_{\text{dark}}/(GF)]^2 + S_{e,i} + \sigma_f^2 + [\sigma_{\text{readout}}/(GF)]^2}. \quad (8)$$

因此, 各通道上探测器输出信号的信噪比为

$$R_{\text{SN},i} = \frac{S_{e,i}}{\sqrt{n_{\text{dark}} \times t_{\text{int}} + S_{e,i} + \sigma_f^2 + [\sigma_{\text{readout}}/(GF)]^2}}. \quad (9)$$

根据探测器成像极限条件可知, 所有通道上的信噪比都必须大于 1 方能保证测距的正常进行。通常设定一个大于 1 的信噪比阈值  $T_{\text{SNR}}$  作为对目标成像质量的要求, 即

$$\min\{R_{\text{SN},i}\} > T_{\text{SNR}}. \quad (10)$$

通过上述对探测器单像素上响应信号量和信噪



比的分析可知:在一定的探测距离上,单个通道带宽和积分时间的上下限由探测器最大势阱深度和最小可探测信噪比所决定;在积分时间一定时,通道带宽既要满足最小信噪比的要求又要防止信号强度过大而引起探测器饱和;同样,在通道带宽一定时,积分时间除了要受到这些因素的制约,还要为了提高系统的处理速度而尽可能得小。

### 3 数值分析

已知氧气 A 带两侧带肩的理想通道位置在其靠近吸收带一端,因此将 A 带左右带肩通道的起始波长设定在吸收带两侧近端点处。故氧气 A 带右肩通道的起始波数为  $13190\text{ cm}^{-1}$ ,带宽最大值为  $210\text{ cm}^{-1}$ ,定为通道 1;左肩通道的起始波数为  $12880\text{ cm}^{-1}$ ,带宽最大值为  $130\text{ cm}^{-1}$ ,定为通道 2;对于 A 带内的通道可根据实际需求进行灵活选择:从测距精度角度出发可将测距通道的起始波长定在吸收带短波一端,并向长波方向讨论带宽上下限的变化情况;从测距范围角度出发可将起始波长定在吸收带长波一端,并向短波方向进行讨论。故吸收带内短波一侧通道的起始波数为  $13180\text{ cm}^{-1}$ ,定为通道 3,长波一侧通道的起始波数为  $12880\text{ cm}^{-1}$ ,定为通道 4,这两个通道的最大带宽均为  $300\text{ cm}^{-1}$ 。

固定距离上大气透过率可通过大气传输软件 Modtran 获得。地基探测器模式的计算条件为:中纬度夏季大气模型、倾斜路径、探测器海拔高度  $100\text{ m}$ 、目标海拔高度  $5\text{ km}$ 、气溶胶模型的能见度  $X_{\text{Rural-VIS}} = 23\text{ km}$ 、无云雨;空基探测器模式的计算条件为:中纬度夏季大气模型、水平路径、探测器高度  $5\text{ km}$ 、气溶胶模型的能见度  $X_{\text{Rural-VIS}} = 23\text{ km}$ 、无云雨。利用 Modtran 软件计算的不同模式下不同距离上的大气透过率曲线如图 2 所示。

假定探测对象为色温  $1500\text{ K}$  的类黑体目标,目标的发射系数为  $0.8$ ,天空背景的温度为  $300\text{ K}$ ;探测器单单元尺寸为  $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ ,探测器的平均量子效率为  $60\%$ ,单单元最大势阱深度为  $28928$  个电子,光学系统平均透过率为  $0.5$ 、焦距为  $300\text{ mm}$ 、口径为  $50\text{ mm}$ ,EMCCD 的总电荷增益为  $200$ ,图像信噪比阈值为  $50$ 。

#### 3.1 探测距离不变

在带宽约束下解算  $0\sim 200\text{ ms}$  不同积分时间下各通道的带宽取值范围,结果如图 3、图 4 所示。

图 3 为地基探测器模式下倾斜路径情形各通道在不同积分时间下的带宽取值情况;图 4 为空基探

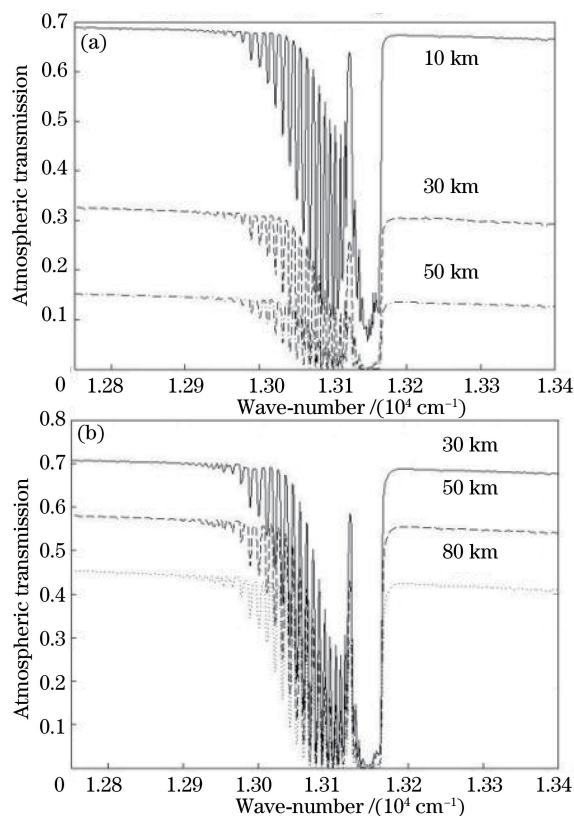


图 2 不同模式下不同探测距离上的大气透过率曲线。  
(a)地基探测模式;(b)空基探测模式

Fig. 2 Curves of atmospheric transmission of different detection ranges with different models. (a) Model of ground-based detecting; (b) model of air-based detecting

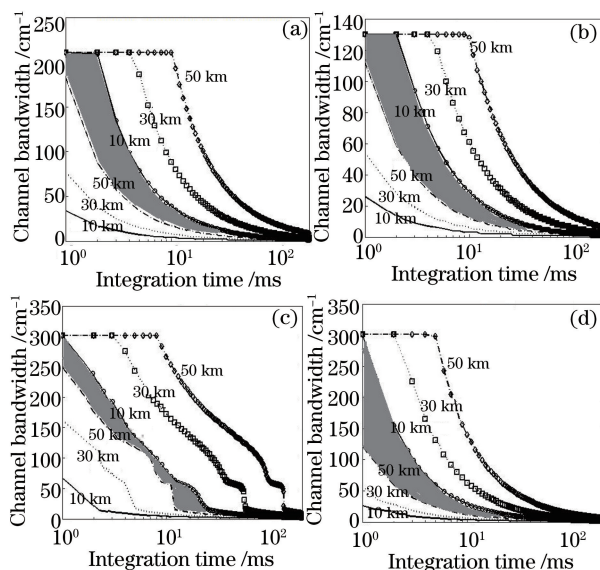


图 3 地基模式下不同积分时间各通道的带宽取值范围。  
(a)通道 1;(b)通道 2;(c)通道 3;(d)通道 4

Fig. 3 Bandwidth span of different channels of ranging system on ground-based mode with different integration time. (a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3; (d) channel 4



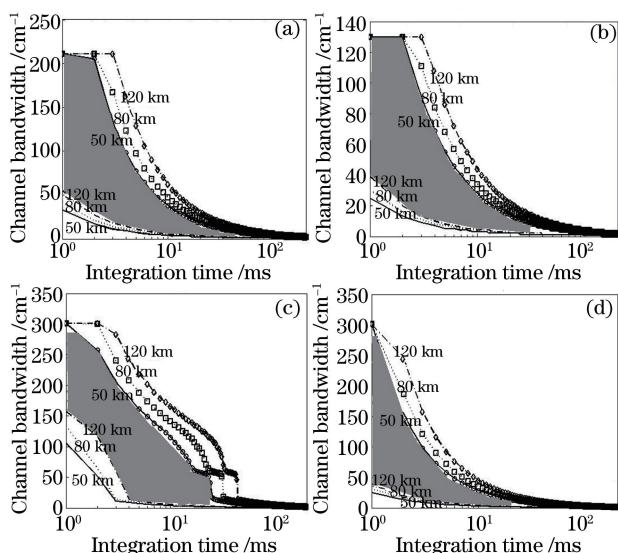


图4 空基模式下不同积分时间各通道的带宽取值范围。

(a)通道1; (b)通道2; (c)通道3; (d)通道4

Fig. 4 Bandwidth span of different channels of ranging system on air-based mode with different integration time.

(a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3; (d) channel 4

测器模式下水平路径情形各通道在不同积分时间下的带宽取值情况。其中,相同线型内部区域表示的是同一探测距离上的带宽取值范围;无标示符号曲线表示的是由信噪比阈值决定的带宽下限;带标示符号曲线表示的是由像元最大势阱深度决定的带宽上限;图中带宽上限前端的水平直线则是因通道带宽最大值限制而产生的带宽上限。

地基探测器模式下,地面附近的氧气浓度较大,探测距离增加,导致透过率减小幅度大于空基探测器模式,所以在积分时间一定时地基模式下不同探测距离间的通道带宽上下限相差较大;而空基模式的通道带宽上下限差异则要小得多。同样由于相同探测距离下空基模式的透过率大于地基模式,所以该模式下各通道可以使用整个通道带宽的时间要小于地基模式。图中阴影部分表示的是在不同积分时间下能够同时满足3个探测距离的通道带宽取值范围;由于空基模式下不同探测距离的上限值曲线和下限值曲线相对比较集中,所以该模式下能够同时满足所有探测距离要求的通道带宽范围也比较大。

对于吸收带内的通道3,随着带宽的逐渐增加,带宽下限值从长波端逐渐减小;由于长波端的光谱吸收率很小且其在整个带宽内的占比较小,所以在吸收带P分支内带宽下限值曲线变化较为平缓;当通道终止波数逐渐减小到吸收带R分支时,刚开始由于该分支的光谱吸收率很小,所以积分时间没有

大的改变,但是在该分支的最后部分由于透过率值迅速变化且其在整个带宽中的占比迅速增加,使得很小的带宽变化便会引起积分时间的迅速改变。

对于吸收带内的通道4,通道带宽从带宽极限值开始逐渐向长波方向减小;虽然在吸收带R分支内减小时,透过率变化较大,但是由于其在整个通道内所占比重较小,所以积分时间变化较为平滑;在吸收带P分支内尤其到最后,虽然单位波数的透过率在整个通道内所占比重逐渐增大,但是由于其值变化较为平缓,所以积分时间变化也较为平滑。因此该通道的带宽变化曲线要比通道3的带宽变化曲线平滑得多。由以上分析可知:探测器所处海拔位置越高,信噪比和探测距离一定时不同积分时间下的带宽可选择范围越大,带宽一定时探测器所能探测的距离范围越大。

### 3.2 积分时间不变

通常情况下探测器的曝光积分时间是固定的;为了保证系统的实时性又同时兼顾探测精度和测程,假定多光谱系统有4个通道,左右带肩各一个,参数同前文所述;吸收带内2个通道的起始波长位置不变,只是为了保持各自的吸收率变化率,将通道4的带宽最大值设为 $190\text{ cm}^{-1}$ ,通道3的带宽最大值设为 $90\text{ cm}^{-1}$ ,而不再是整个吸收带。各通道的积分时间设为 $10\text{ ms}$ 以保证单位时间内各个通道25帧的实时采集,计算结果如图5所示。

图5以地基探测器情形为例,给出了探测器在 $100\text{ m}$ 海拔高度、探测水平路径上不同距离目标时各通道的带宽取值范围。图中可以清晰地看出由探测器像元最大势阱深度所决定的唯一一条通道带宽上限值曲线和由信噪比取值所决定的对应通道带宽下限曲线。当信噪比取值一定时,带宽上限随距离增加而迅速增大直至通道带宽最大值,这是因为探测器所接收的目标能量随距离增大而迅速减小,像元变得愈加不容易达到饱和状态。虽然带宽下限也随距离增加而增大,但是曲线变化速率却与信噪比取值相关;当信噪比取值较小时,较窄的通道带宽便能满足信噪比要求,所以带宽下限曲线变化缓慢;随着信噪比取值逐渐增大,系统对目标能量的要求愈来愈高,要求带宽也愈来愈宽,所以信噪比下限曲线迅速抬起并达到通道带宽最大值。其中,吸收带内侧重测距精度的光谱通道由于吸收率较大,所以带宽下限随距离增加而增大得更快。

总之,在满足系统实时性要求的前提下,左右带肩通道及吸收带内长波端通道的带宽变化规律一

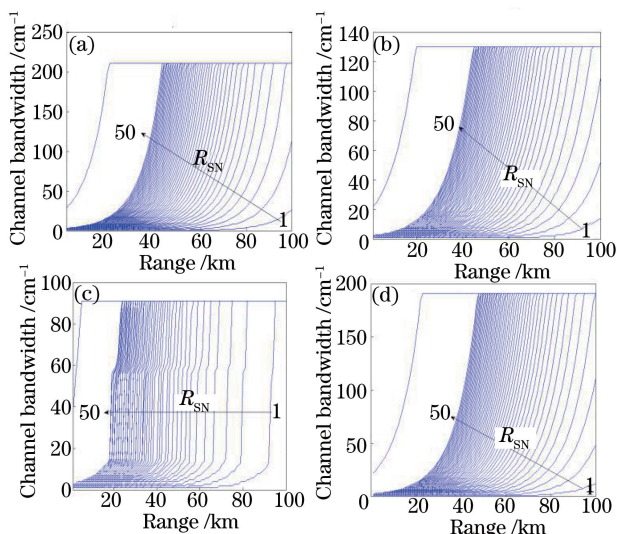


图 5 不同距离上不同信噪比下各通道的带宽取值范围。

(a)通道 1(13190  $\text{cm}^{-1}$ ); (b)通道 2(12280  $\text{cm}^{-1}$ );  
(c)通道 3(13180  $\text{cm}^{-1}$ ); (d)通道 4(12280  $\text{cm}^{-1}$ )

Fig. 5 Bandwidth span of different channel with different  $R_{SN}$  and ranges. (a) Channel 1(13190  $\text{cm}^{-1}$ );  
(b) channel 2(12280  $\text{cm}^{-1}$ ); (c) channel 3(13180  $\text{cm}^{-1}$ );  
(d) channel 4(12280  $\text{cm}^{-1}$ )

致,带宽上下限曲线连贯平滑;而吸收带内短波段通道则由于吸收率较大,同样信噪比下的带宽可选择范围要比其他 3 个通道要小。当探测距离一定时,可以利用带宽上下限曲线之间的垂直落差得到各个通道的带宽选择范围;当带宽一定时,便可根据带宽上下限曲线之间的水平间隔得到各个通道可探测的距离范围。

为了对固定信噪比下 4 个通道的带宽变化进行比较,特意给出了不同信噪比下通道带宽下限与距离的关系,如图 6 所示。

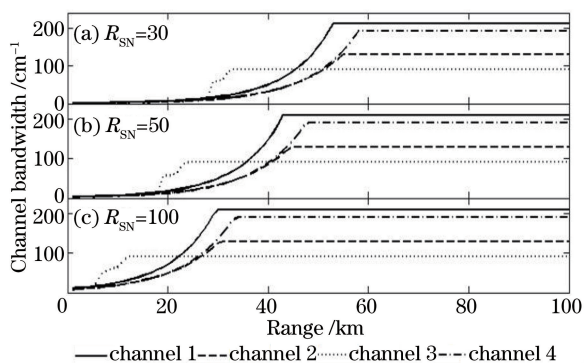


图 6 不同信噪比下测距光谱通道带宽下限与距离的关系曲线  
Fig. 6 Relative curves between range and lower bandwidth of ranging spectrum channel with different  $R_{SN}$

由图 6 可知:同一信噪比下,通道 1,2,4 的带宽下限变化曲率相差不大,并且它们达到各自带宽最

大值的距离也很接近,即这 3 个通道在相同信噪比要求下的最大可探测距离基本相同,尤其是通道 2 和通道 4;而侧重于测距精度的通道 3 由于吸收率较其他 3 个通道都大,所以其可探测距离上限值要明显小于其他 3 个通道。通过对比可以看出,随着对图像信噪比要求的提高,系统可探测距离明显下降,尤其是当包含通道 3 时,系统最大可探测距离则由通道 3 的可探测距离决定。

由图 5 和图 6 可知:在地基探测器模式下,当系统中不包含侧重测距精度的通道时,单目多光谱测距系统在  $R_{SN} = 30$  时的最大可探测距离可达 50 km、 $R_{SN} = 50$  时的最大可探测距离为 40 km、 $R_{SN} = 100$  时的最大可探测距离只有 30 km;若系统中包含侧重测距精度的通道,则最大可探测距离将大大缩短。不过这仅是在地面水平路径上多光谱系统能够实时探测的最大距离;当探测平台海拔增加或路径天顶角减小时,路径上减小的氧气吸收会使得系统测程逐渐增加。

## 4 结 论

通过分析可知,选择测距光谱通道带宽时需主要考虑系统实时性要求下曝光积分时间、系统作用距离约束下目标信噪比、系统工作海拔高度下氧气吸收率这 3 个因素的影响。相同积分时间和信噪比下,测距系统工作海拔越高,带宽下限取值越小、范围越大、选取越灵活,系统探测距离越远、范围越大;相同工作海拔和相同积分时间下,目标信噪比要求越高,带宽下限取值越大、范围越小、选取越困难,系统探测距离越小。相同情况下,吸收带内侧重测程光谱通道与带肩上两通道的探测距离相当,侧重测距精度光谱通道的探测距离较其他 3 通道小得多。系统可设计为 4 通道系统,吸收带内侧重测程通道用于目标的远距离发现、低精度测距,侧重测距精度通道用于目标抵近状态下近距离、高精度被动静默测距,二者搭配实现自带尾焰飞行目标远近全程、高低精度的被动测距。

综上所述,单目多光谱测距系统的通道设计应当首先根据平台实际需求和通道选定规则确定测距光谱通道的数量和位置;然后在系统作用距离、系统工作实时性、探测器性能和目标信噪比要求下计算各个通道的带宽上下限曲线;最后便可根据带宽上下限曲线确定系统合适的带宽取值。

## 参 考 文 献

[1] Yan Z Q, Xie Z H, Chan J, et al. Parametric

- analysis of spectral channel of the monocular multispectral passive ranging system based on oxygen absorption[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001002
- 闫宗群, 谢志宏, 陈剑, 等. 单目多光谱氧气吸收被动测距系统光谱通道参数分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001002.
- [2] Hawks M R, Perram G P. Passive ranging of emissive targets using atmospheric oxygen absorption lines[C]. *SPIE*, 2005, 5811: 112-122.
- [3] Hawks M R. Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [4] Anderson J R, Szczukowski L M, Abel B, *et al.* Monocular passive ranging (project air cyclops)[R]. Edwards, AFB, CA: Air Force Flight Test Center, 2009.
- [5] Yan Z Q. 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.
- [6] Anderson J R. Monocular passive ranging by an optical system with band pass filtering[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [7] Vincent R A. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation [D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2011.
- [8] Yu H, Liu B Q, Zhang Y, *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 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401003.
- [9] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S, *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
- [10] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S, *et al.* Refraction absorption error of passive ranging technology based on 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.
- [11] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S, *et al.* Application of CKD method to passive ranging 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中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 667-677.
- [12] Liu N, Chen Q, Gu G H, *et al.* Analysis on the integration time and SNR of  $640 \times 512$  cooled IR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 43-48.  
刘宁, 陈钱, 顾国华, 等.  $640 \times 512$  制冷探测器积分时间与 SNR 分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 43-48.
- [13] Xu W J, Li J W, Wei J, *et al.* Application of EMCCD in space-based space surveillance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(1): 42-45.  
许武军, 李建伟, 危峻, 等. 电子倍增 CCD 在天基空间监视中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(1): 42-45.
- [14] Gong D Z, Wang L, Lu X. Research on application of faint light detection based EMCCD in high sensitivity star sensor [J]. *Aerospace Control and Application*, 2008, 34(2): 44-48.  
龚德铸, 王立, 卢欣. 微光探测 EMCCD 在高灵敏度星敏感器中的应用研究[J]. *空间控制技术与应用*, 2008, 34(2): 44-48.
- [15] Tang H M, Wei H G, Liao S. Analysis of noise performance of EMCCD [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 386-390.  
唐红民, 魏宏刚, 廖胜. 电子倍增 CCD 的噪声特性分析[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 386-390.
- [16] Chen C, Xu W J, Weng D S, *et al.* The noise sources and SNR analysis of electronic multiplying CCD[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(11): 634-637.  
陈晨, 许武军, 翁东山, 等. 电子倍增 CCD 噪声来源和信噪比分析[J]. *红外技术*, 2007, 29(11): 634-637.