

多光谱对地观测激光雷达接收通道选择方法

杜霖¹ 马盈盈¹ 祝波¹ 史硕¹ 龚威¹ 宋沙磊²

(¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)
² 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要 多光谱对地观测激光雷达是一种新型植被监测手段,其应用越来越广泛。现有多光谱对地观测激光雷达系统大多采用光栅分光、多通道光敏阵列探测的数据接收模式。单纯地增加接收通道以提高光谱分辨率、增加接收光谱范围会带来数据冗余、系统集成难度大以及成本过高等问题。讨论了如何确定通道数目并通过闪耀光栅以及中心闪耀波长的选取将特征波长调节至合适通道的中心位置;同时,利用基于主成分分析的特征权重波长修正方法,对落在通道外或不在通道中心位置的特征波长进行修正。在不减少植被光谱信息的前提下,此过程可提高信息接收的有效性,还在一定程度上对波长选择理论进行了补充,提高了多光谱对地观测激光雷达系统在实际应用中的适应性。

关键词 遥感;多光谱对地观测激光雷达;通道选择;特征权重;光敏探测器阵列;闪耀光栅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0828001

A Method to Select Receiving Channels for the Multi-Spectral Earth Observation LiDAR

Du Lin¹ Ma Yingying¹ Zhu Bo¹ Shi Shuo¹ Gong Wei¹ Song Shalei²

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying,

Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

² Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

Abstract A multi-spectral earth observation LiDAR is a new means to monitor vegetation, and its applications are increasingly widespread. The existing multi-spectral earth observation LiDAR system adopts blazed grating and multi-channel photosensitive detector arrays as its data reception mode. Increasing the number of receiving channels only to improve the spectral resolution and receiving range will cause such problems as data redundancy, difficulty in system integration and high cost *etc.* How to determine the number of channels and how to adjust the characteristic wavelength just to the center of the appropriate channel by selecting blazed grating and its blazed wavelength is discussed; in the meantime the characteristic wavelength outside the channel or not at the center of the channel is amended by using the feature weighting method based on the principal component analysis. Thus, not only the effectiveness on receiving information is improved, but also the wavelength selection theory is supplemented to some extent while spectral information of vegetation is not reduced, and the adaptation of the multi-spectral earth observation LiDAR system in practical applications is improved as well.

Key words remote sensing; multi-spectral earth observation LiDAR; channel selection; feature weighting; photosensitive detector arrays; blazed gratings

OCIS codes 280.3640; 040.1240; 040.1880; 050.2770

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-24

作者简介: 杜霖(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学与激光遥感、多光谱对地观测激光雷达等方面的研究。

E-mail: 576772806@qq.com

导师简介: 龚威(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光学和激光遥感、地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@whu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

精细农业是全球农业发展的必然趋势^[1],多光谱对地观测激光雷达作为一种新兴的遥感手段,在精细农业监测方面可发挥重要作用,原因在于它可以同时获得植被精准的空间信息和丰富的光谱信息。多光谱对地观测激光雷达系统多采用连续型激光器作为激光发射光源,接收系统采用光栅光谱仪分光、多通道光敏阵列探测作为光电接收设备^[2-3]。然而,通过此类多光谱对地观测激光雷达系统采集得到的是一个庞大的植被信息群,包括于其中的冗余数据不仅对研究没有太大意义,反而还会增加数据存储的难度并带来数据传输过程的延迟,为下一步的信息处理与交流带来很大的不便。另外,一般光敏探测器都需要在高压低温环境下工作,单纯地增加探测器的通道数目以增加接收到的植被信息会大幅增加系统研发成本,而且通道越多数据读取与转换的实现难度也将越大^[4-5]。因此,剔除冗余数据并与多通道探测器进行集成是多光谱对地观测激光雷达系统实现其功能的关键。

研究发现不同氮胁迫下植被的反射光谱具有不同的特征,尤其是可见光波段的绿光及近红外区域,其反射率表现出了明显的差异^[6-7]。因此,借助波长选择理论从植被反射光谱中选择出感兴趣并与植被氮含量相关性较大的波长用于表征不同氮含量下植被的生长状态是必要和可行的。在解决数据冗余、确定敏感波长的位置和数目之后,对硬件系统集成中遇到的首要问题——接收通道的选取进行分析与讨论。首先介绍了不同施氮水平下的植被特征波长,在此基础上依据现有大部分多光谱对地观测激光雷达硬件系统确定了光敏探测器通道数与光栅型号,并分析了各种特征波长的通道分布与光栅闪耀波长的关系,从而选取了合适的光栅闪耀波长,使这些特征波长尽可能多地落在分立的探测通道中;然

后换用刻线较密的光栅重新分析了特征波长所在的通道分布情况,并解决了通道分布过于集中,相邻通道之间容易产生信息干扰的问题;最后,依据波长特征权重算法^[8],对一些落在通道之外或不在通道中心位置的波长进行评判,最终使多光谱对地观测激光雷达系统的通道选择达到最优化。

2 不同施氮水平下的植被特征波长

作为植被生长不可或缺的营养元素之一,氮的含量高低直接影响到植被的光合作用,而且它还参与叶绿素的合成^[9-10]。叶绿素决定农作物的初级生产量,它可以吸收和反射光用于光合作用,所以可以利用多光谱对地观测激光雷达对植被叶绿素的探测与监测来反映不同氮水平下植被的生长状态^[11]。

在可见光与近红外范围,叶绿素对光的吸收和反射特性使得植被的反射光谱具有不同的特征。叶绿素 a 和叶绿素 b 对蓝光、紫光有很强的吸收(尤其是在 450 nm 附近),所以在 400~490 nm 左右光谱具有较低的平均反射率;在 550 nm 附近是叶绿素的强反射区,光谱会出现一个相对较大的反射峰;600~700 nm 范围内中主要有叶绿素 a 的四个吸收峰,分别是 670、680、695、700 nm,其中在 680 nm 和 700 nm 处最为明显;700~750 nm 间的波谱曲线急剧上升,当叶绿素的含量超过 4~5 g/m² 时,曲线斜率与叶绿素 a、b 总量的相关性变得不明显,反射率处在一个稳定的峰值范围;植被光谱中存在反射率对波长的二次微分为零的一个点,即所谓的“红边”,一般在 680(670)~800 nm 的范围内。另外,在 500~620 nm 的范围内,植被含氮量越高,叶绿素含量越多,对入射激光的吸收作用也就越明显,表现在光谱上即为反射率越低;而在 750~900 nm 的范围内,情况刚好相反^[12]。

表 1 多种波长选择算法得到的氮胁迫下植被的特征波长

Table 1 Characteristic wavelengths of vegetation under nitrogen stress computed by some wavelength selection algorithms

No.	Wavelengths higher related to the nitrogen content of vegetation /nm												
1	440	450	552	565	573	605	620	640	680	695	740	749	780
2	410	422	447	509	556	660	694	717	750	755	758	770	776
3	405	459	550	585	675	692	700	705	720	730	734	759	777

表 1 为理论波长以及通过多种波长选择算法得到的不同氮胁迫下水稻光谱的物理波长预测值^[8,13-15]。不同含氮量条件下,植被的反射光谱在这些波长、波段上表现出了明显的差异性,所以在实际应用中,可以从表 1 中选取需要的特征波长用于

研究植被的生长状态。

3 通道选择原理

现有多光谱对地观测激光雷达系统采用的是光栅分光、多通道光敏阵列探测的数据接收模式。

图1为用于分光探测的光谱仪[图1(a)]与光敏阵列[图1(b)]的结构示意图。从狭缝进入光谱仪的光信号准直后到达闪耀光栅,经光栅分光后由聚焦镜将光聚焦至连接在接收孔(1或2)处的光敏阵列;光

敏探测器阵列的主体由 M 个相同的光电阴极排列组成,每一个光电阴极都有独立的光电倍增器,对落入到该通道上的光谱信息进行放大。

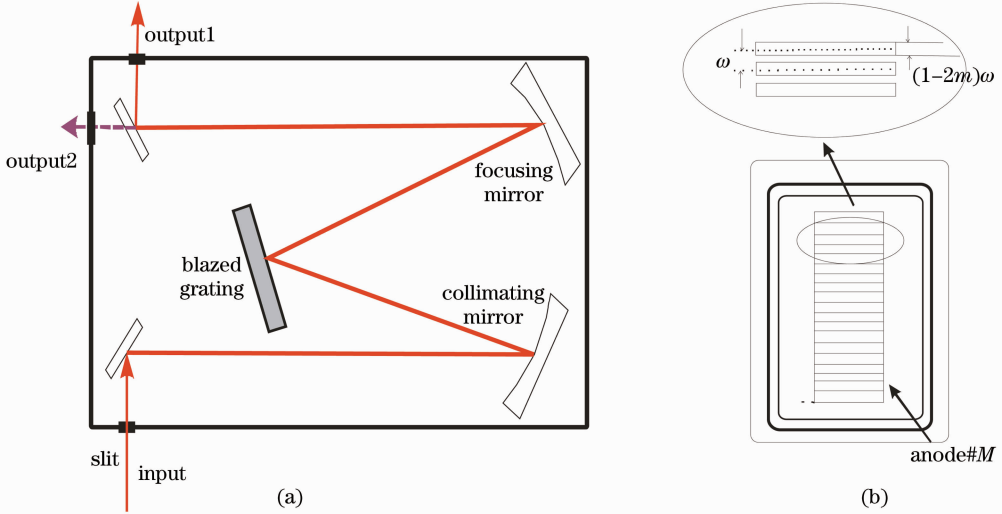


图1 分光设备结构示意图。(a)光栅光谱仪; (b)多通道光敏阵列

Fig. 1 Schematic of the light-splitting equipment. (a) Grating spectrograph; (b) multi-channel light-sensitive arrays

特征波长的数目与位置确定之后,主要工作就是让尽可能多的波长落入特定光敏探测器的不同通道上,并且使其处在相应通道的中心。最后依据特征权重对不能满足上述要求的特征波长进行代替处理及修正,以使波长与通道的选取均达到最优化。

3.1 确定通道数目及位置

光栅的选取主要取决于兴趣波长的范围,光栅刻线越稀疏,分光范围越大;即使同一光栅,不同的中心闪耀波长会引起通道分布的变化^[16-17]。假设闪耀光栅的中心波长为 λ_0 , 相邻通道之间的间隔为

$2m\omega$ (其中 ω 是光栅的色散,代表散落在每毫米的波长范围),那么落在通道实际接收范围中的波段宽度为 $(1-2m)\omega$ 。现依据通道数目 M 的奇偶性分两种情况讨论任意波长与闪耀光栅及通道数目之间的依赖关系。

1) 通道数目 M 为偶数。

此时在探测器中心两通道 ($n_a, n_a + 1$, 且 $n_a = M/2$) 间隔中心的波长应该是 λ_0 , 分别标出一部分通道边缘处波长[图2(a)], 则有

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_0 - (1-m)\omega \\ \lambda_2 = \lambda_1 + (1-2m)\omega \end{cases}, \begin{cases} \lambda_3 = \lambda_2 + 2m\omega \\ \lambda_4 = \lambda_3 + (1-2m)\omega \end{cases}, \begin{cases} \lambda_5 = \lambda_4 + 2m\omega \\ \lambda_6 = \lambda_5 + (1-2m)\omega \end{cases}, \dots, \\ \begin{cases} \lambda_{2(k+1)-1} = \lambda_{2(k+1)-2} + 2m\omega \\ \lambda_{2(k+1)} = \lambda_{2(k+1)-1} + (1-2m)\omega \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

然后分别计算 $\Delta\lambda = \frac{\lambda_i - \lambda_0}{\omega}, i = 1, 2, 3, \dots, 2(k+1)$, 得到

$$\begin{cases} \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\omega} = -(1-m) \\ \frac{\lambda_2 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_1 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = -m \end{cases}, \begin{cases} \frac{\lambda_3 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_2 + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = m \\ \frac{\lambda_4 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_3 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = m + (1-2m) \end{cases}, \\ \begin{cases} \frac{\lambda_5 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_4 + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = 3m + (1-2m) \\ \frac{\lambda_6 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_5 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = 3m + 2 \times (1-2m) \end{cases}, \dots, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\lambda_{2(k+1)-1} - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_{2(k+1)-2} + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = (2k-1)m + (k-1)(1-2m) \\ \frac{\lambda_{2(k+1)} - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_{2(k+1)-1} + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = (2k-1)m + k(1-2m) \end{cases} \quad (2)$$

如果波长 λ_i 经过计算后在区间 $[(2k-1)m + (k-1)(1-2m), (2k-1)m + k(1-2m)]$ 之内, 那么其所处通道为

$$n = n_a + k, \quad (3)$$

扩展至整个阵列, 有 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(n_a-1)$, n_a , 显然当 $\lambda_i \geq \lambda_0 + m\omega$ 时, k 取正数; 当 $\lambda_i \leq \lambda_0 - m\omega$ 时, k 取 0 及负数。

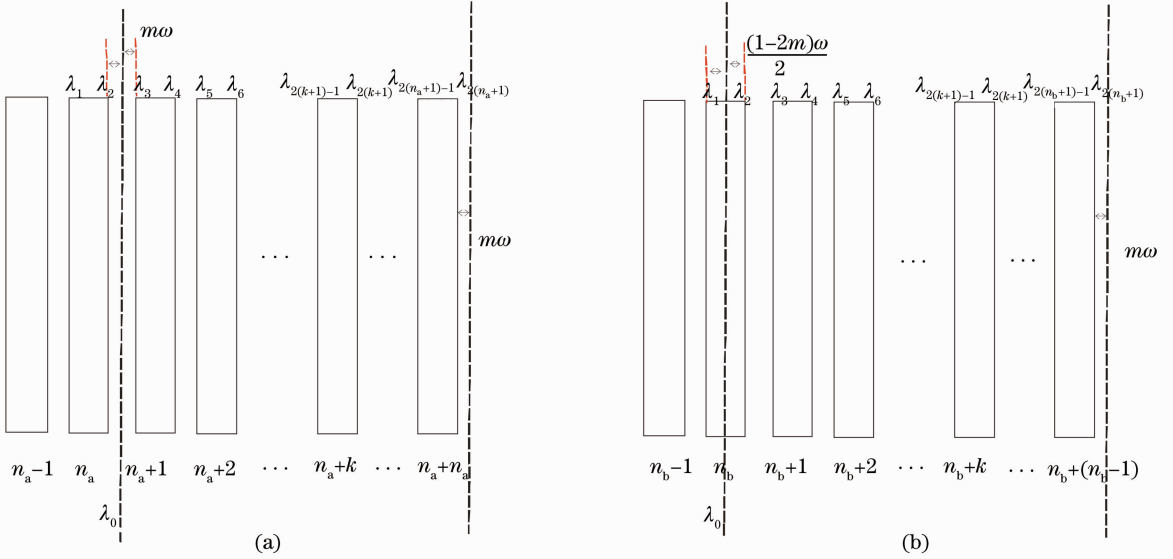


图 2 波长对应具体通道位置的计算。(a) 通道数目 M 为偶数; (b) 通道数目 M 为奇数
Fig. 2 Calculation of channel positions for specific wavelengths. (a) Even number of channels; (b) odd number of channels

2) 通道数目 M 为奇数。

假设此时探测器中心通道为 n_b ($n_b = \frac{M+1}{2}$),

则在通道 n_b 中心的波长是 λ_0 , 同样计算一些通道边缘的波长[图 2(b)], 可得

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_0 - \frac{1}{2}(1-2m)\omega \\ \lambda_2 = \lambda_1 + (1-2m)\omega \end{cases}, \quad \begin{cases} \lambda_3 = \lambda_2 + 2m\omega \\ \lambda_4 = \lambda_3 + (1-2m)\omega \end{cases}, \quad \begin{cases} \lambda_5 = \lambda_4 + 2m\omega \\ \lambda_6 = \lambda_5 + \omega \end{cases}, \quad \dots, \\ \begin{cases} \lambda_{2(k+1)-1} = \lambda_{2(k+1)-2} + 2m\omega \\ \lambda_{2(k+1)} = \lambda_{2(k+1)-1} + (1-2m)\omega \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

再分别计算 $\Delta\lambda = \frac{\lambda_i - \lambda_0}{\omega}, i = 1, 2, 3, \dots, 2(k+1)$, 得到

$$\begin{cases} \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\omega} = -\frac{1}{2}(1-2m) \\ \frac{\lambda_2 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_1 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{1}{2}(1-2m) \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{\lambda_3 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_2 + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{1}{2}(1-2m) + 2m \\ \frac{\lambda_4 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_3 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{3}{2}(1-2m) + 2m \end{cases}, \\ \begin{cases} \frac{\lambda_5 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_4 + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{3}{2}(1-2m) + 4m \\ \frac{\lambda_6 - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_3 + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{5}{2}(1-2m) + 4m \end{cases}, \quad \dots, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\lambda_{2(k+1)-1} - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_{2(k+1)-2} + 2m\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{2k-1}{2}(1-2m) + 2km \\ \frac{\lambda_{2(k+1)} - \lambda_0}{\omega} = \frac{\lambda_{2(k+1)-1} + (1-2m)\omega - \lambda_0}{\omega} = \frac{2k+1}{2}(1-2m) + 2km \end{cases} \quad (5)$$

如果波长 λ_i 经过计算后在区间 $\left[\frac{2k-1}{2}(1-2m) + 2km, \frac{2k+1}{2}(1-2m) + 2km\right]$ 之内, 那么其所处通道为

$$n = n_b + k, \quad (6)$$

扩展至整个阵列后 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(n_b - 1)$ 。通过计算, 其中落在通道 n_b ($k = 0$) 中的波长 λ_i 满足 $\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\omega} \in \left[-\frac{1}{2}(1-2m), \frac{1}{2}(1-2m)\right]$ 。

3.2 基于主成分分析的特征权重波长修正

波长在特定光敏阵列探测器上的通道位置与光栅的类型及其闪耀中心波长有关, 通过旋转光栅选取合适的中心波长可以使波长位于最佳的通道位置。然而在实际应用中由于波长选择理论的局限性以及探测器的固有缺陷等因素, 可能还会存在一些问题。首先, 波长组合中的一些波长被探测器的几何间隔所挡没有进入通道, 或者虽然进入通道范围但太过靠近通道的边缘, 不利于信号的接收; 另外, 一些波长处在相邻通道甚至是同一个通道, 从而会带来信号之间的干扰。解决上述问题的做法是: 在以需要修正的特征波长为中心、光栅的色散为区间的范围内, 用能够落在其他通道中心且特征权重相对较大的波长代替原来的波长。

权重的计算过程基于主成分分析, 分为 2 个部分。首先是得到同一类样本的散度, 公式详见文献 [8]。由于原始数据的大多数信息由前几个主成分携带, 所以经过修正后的散度为

$$D = \sum_{r=1}^R \beta \times D(r), \quad (7)$$

式中 R 是每一个样本中的波段数, $D(r)$ 表示第 r 个波段的散度, 系数 β 是该类样本中相关矩阵的第 r 个特征值的函数 ($r = 1, 2, 3, \dots, R$)。

其次计算这一类样本中每一个波长的特征权重。首先计算参数

$$\alpha_c(r) = \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R \sigma_j \times (X_{ij})^2, \quad (8)$$

式中 $\sigma_j = \frac{D(j)}{D}$, $j = 1, 2, 3, \dots, R$ 。将计算类相关矩阵的特征值时得到的特征向量作为列向量组成 $R \times R$ 的方阵, 取该矩阵的矩阵元, 即为 X_{ij} ; 将该类样本经过处理之后形成的 $R \times 1$ 序列作降序排列, 依照上述步骤对 N 类不同样本进行类似处理。最后查找每

一个序列中特定波长的位置, 记为 L_c^r ($c = 1, 2, 3, \dots, N$), 代入下式得到第 r 个波长的权重值为

$$w(r) = \frac{1}{R} \sum_{c=1}^N (R - L_c^r + 1), \quad (9)$$

$w(r)$ 值越大表示该波长与植被的氮含量相关性越高, 可以作为表征不同氮含量下植被生长状态的依据。

4 实验与讨论

当通道数目 M 为奇数时, 判断通道位置的依据相对复杂, 故而实践中更倾向于 M 取偶数。另外, 实验研究的光谱在 400~800 nm 波段, 范围较宽, 可以选用 150 g/mm 的光栅 ($\omega = 13.07$ nm/mm), 接收通道数目可初步定为 32, 这样即可获取任意波长在多通道光敏阵列上的具体位置。由于用于反映植被生长状态的特征波长已经确定, 并且形成了一系列的理论波长组合 (表 1), 以此为前提并依照上述步骤对特征波长的通道分布进行实验。

4.1 通道分布

从表 1 中选取以下波长组合的光谱数据作为实验对象 [14], 并根据探测阵列对光谱的灵敏度以及通道的边缘效应对中心波长进行适当地调节, 使足够的特征波长移至最优通道的中心位置。

1) 12 波长组合: 405、565、585、605、620、640、660、680、695、705、740、780 nm。图 3 给出了以上 12 个波长所对应的通道组合, 从中可以清楚地看到需要选用的 12 个通道在光谱曲线的具体位置, 经过计算与最优化考虑此时所使用的光栅的中心闪耀波长为 599 nm;

2) 10 波长组合: 410、422、556、660、675、694、705、755、758、776 nm。同样将光栅的中心闪耀波长调整为 599 nm, 得到其通道分布如图 4 所示;

3) 4 波长组合: 552、675、705、776 nm。在光栅的闪耀波长为 679 nm 时 552、675、776 nm 的通道分别是 7、16、24, 而 705 nm 落在了间隔之中, 如图 5 所示;

4) 3 波长组合: 450、550、700 nm, 光栅的中心闪

耀波长为 573 nm,通道分别为 7、15、26,如图 6 所示。

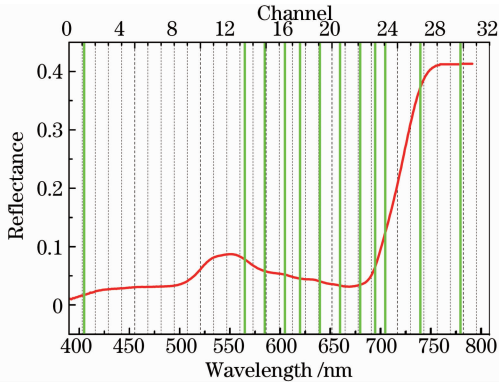


图 3 所选 12 波长在水稻光谱上的具体位置及对应的通道

Fig.3 Specific positions and corresponding channels in the rice reflectance spectrum for the selected 12 wavelengths

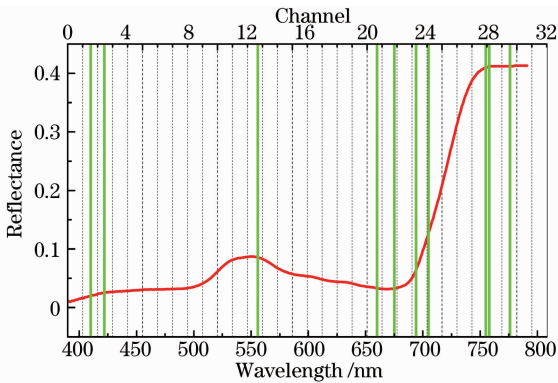


图 4 所选 10 波长在水稻光谱上的具体位置及对应的通道

Fig.4 Specific positions and corresponding channels in the rice reflectance spectrum for the selected 10 wavelengths

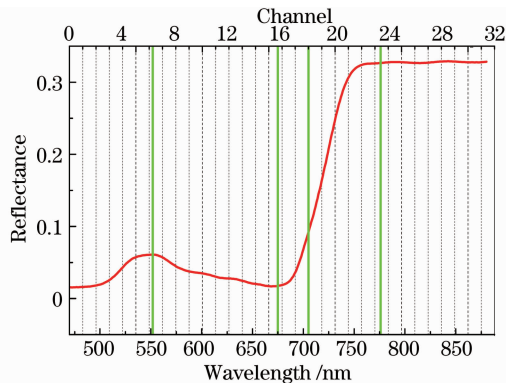


图 5 所选 4 波长在水稻光谱上的具体位置及对应的通道

Fig.5 Specific positions and corresponding channels in the rice reflectance spectrum for the selected 4 wavelengths

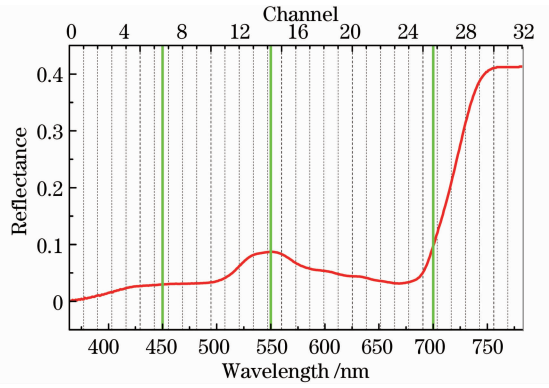


图 6 所选 3 波长在水稻光谱上的具体位置及对应的通道

Fig.6 Specific positions and corresponding channels in the rice reflectance spectrum for the selected 3 wavelengths

图 3~6 中用虚线隔成 32 个独立的通道,红色为典型植被光谱曲线。可以看出,所选特征波长处于植被光谱的各个峰谷值且与通道位置分布理论值匹配较好,但并不是所有的波长都恰好在对应的通道内,例如 585 nm 和 755 nm 处于通道的间隙之上,还有一些波长落在相邻的通道上,存在相互串扰,如表 2 所示。

为此,更换光栅为展开光谱范围更小、单通道散射光谱更窄的型号(300 g/mm, $\omega=6.46$ nm/mm)。表 3 是更换光栅后重新计算得到的通道分布(中心闪耀波长分别为 658 nm 和 728 nm),从中可以看到,虽然分光范围只有 205 nm 左右,位于波长组合两端的几个波长(405、410、422、556、780 nm)不能被接收到,但各个特征波长的通道分布变得分散,接收效果得到明显改善。

4.2 波长修正

经过分布验算之后有 5 个波长(605、620、640、675、755 nm)太过靠近通道边缘,而 755 nm 与 758 nm 处在同一个通道(表 3)。此时利用 3.2 节所述方法得到以需要修正波长为中心、300 g/mm 光栅的光谱分辨率($\omega=6.46$ nm)为周期的一系列波长的特征权重(表 4),用该范围内权重相对较大且不能太靠近通道边缘的波长代替原来的波长。

- 1) 605 nm;可以代替的波长有 604 nm,通道为 8;
- 2) 620 nm;可以代替的波长有 615 nm,通道为 10;
- 3) 640 nm;可以代替的波长有 642 nm,通道为 14;
- 4) 675 nm;可以代替的波长有 679 nm,通道为 9;
- 5) 755 nm;可以代替的波长有 750 nm 和 757 nm, 757 nm 和 758 nm 都在通道 21,显然不是最优选择,所以只能用 750 nm 代替,选取通道 20。

表 2 12、10 波长组合在光栅为 150 g/mm、中心闪耀波长为 599 nm 时的通道分布

Table 2 Channel distribution of the 12, 10 wavelength combination with grating of 150 g/mm and central blazed wavelength of 599 nm

Wavelength /nm	405	565	585	605	620	640	660	680	695	705	740	780
Channel	2	14	—	17	18	20	21	23	24	25	27	30
Wavelength /nm	410	422	556	660	675	694	705	755	758	776		
Channel	2	3	13	21	22	24	25	—	29	30		

表 3 12、10 波长组合在光栅为 300 g/mm、中心闪耀波长分别为 658/728 nm 时的通道分布

Table 3 Channel distribution of the 12, 10 wavelength combination with grating of 300 g/mm and central blazed wavelength of 658/728 nm

Wavelength /nm	Channel (blazed wavelength 658 nm)	Range of channel	Wavelength /nm	Channel (blazed wavelength 728 nm)	Range of channel
405	—	—	410	—	—
565	2	561.746,566.914	422	—	—
585	5	581.126,586.294	556	—	—
605	8	600.506,605.674	660	6	657.586,662.754
620	11	619.886,625.054	675	8	670.506,675.674
640	14	639.266,644.434	694	11	689.886,695.054
660	17	658.646,663.814	705	13	702.806,707.974
680	20	678.026,683.194	755	21	754.486,759.654
695	22	690.946,696.114	758	21	754.486,759.654
705	24	703.866,709.034	776	24	773.866,779.034
740	29	736.166,741.334			
780	—	—			

表 4 605、620、640、675、755 nm 附近波长的权重

Table 4 Weights of wavelengths near 605, 620, 640, 675, 755 nm

Wavelength /nm	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610
Weight	1.42	1.09	1.16	1.76	1.86	1.34	1.78	1.15	1.82	1.71	1.23
Wavelength /nm	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625
Weight	2.24	1.31	1.44	1.57	1.60	1.85	1.62	1.92	1.49	0.71	1.24
Wavelength /nm	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645
Weight	1.76	1.20	1.35	1.70	1.18	1.27	1.38	1.94	1.77	1.20	1.47
Wavelength /nm	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680
Weight	1.38	1.14	1.57	1.25	1.56	1.84	1.26	2.07	1.69	1.93	1.72
Wavelength /nm	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760
Weight	1.55	1.34	1.32	1.55	1.64	2.13	1.47	1.75	1.74	1.47	2.01

表 5 选择的特征波长与修正后的特征波长的通道与权重对比

Table 5 Comparison of channels and weights between the selected wavelength and the amended wavelength

Wavelength-selected /nm	605		620		640		675		755	
	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight
	8	1.34	11	1.85	14	1.27	8	1.84	21	2.13
Wavelength-amended /nm	604		615		642		679		750	
	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight	Channel	Weight
	8	1.86	10	2.24	14	1.94	9	1.93	20	1.55

从实验结果来看,特征波长的通道分布符合理论计算值,而且通过选择闪耀光栅及其闪耀波长可将大多数特征波长投射到探测器合适通道的中心位置,通道分布过于集中易产生信息干扰等问题也得

以解决(表 3)。此外,从表 5 中发现经修正后的波长的权重均大于原来波长的权重(755 nm 除外),可见此方法不仅使通道选择较原来更为合理,也使波长选择理论对评价植被生长状态更加有效。

5 结 论

在植被特征波长已经确定的前提下,对多光谱对地观测激光雷达系统在实际应用中的通道选择问题进行了理论分析与验证。首先确定使用 32 通道的光敏探测器组建其主要的信号采集系统;然后使用不同的光栅及其不同的闪耀波长得到了特征波长的通道分布;最后在换用 300 g/mm 的光栅的情况下,依据特征权重对无法进入合适通道的波长进行修正,得到最优化的通道。该方法在保证不丢失光谱信息的前提下,不仅完善了波长选择理论,使其能够更加真实地反映植被在不同胁迫下的生长状态,还使多光谱对地观测激光雷达在植被观测中的应用更加灵活有效。

参 考 文 献

- 1 Wang Changyao, Niu Zheng, Tang Huajun. Technologies of Earth Observation and Precision Agriculture [M]. Beijing: Science Press, 2001. 1—24.
王长耀, 牛 铮, 唐华俊. 对地观测技术与精细农业 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1—24.
- 2 I H Woodhouse, C Nichol, P Sinclair, *et al.*. A multispectral canopy LiDAR demonstrator project [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2011, 8(5): 839—843.
- 3 T Hakala, J Suomalainen, S Kaasalainen, *et al.*. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning [J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 7119—7127.
- 4 N Zhang, M Wang, N Wang. Precision agriculture—a worldwide overview [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 36(2): 113—132.
- 5 A Camilli, C E Cugnasca, A M Saraiva, *et al.*. From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 58(1): 25—36.
- 6 M Schlemmer, A Gitelson, J Schepers, *et al.*. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 25: 47—54.
- 7 J G P W Clevers, A A G Gitelson. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 344—351.
- 8 R Huang, M He. Band selection based on feature weighting for classification of hyperspectral data [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2005, 2(2): 156—159.
- 9 C Daughtry, C Walthall, M Kim, *et al.*. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229—239.
- 10 H W Olf, K Blankenau, F Brentrup, *et al.*. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 414—431.
- 11 A A Gitelson, A Viña, S B Verma, *et al.*. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D8).
- 12 Li Minzan. Technologies of Spectral Analysis and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2006. 176—195.
李民赞. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 176—195.
- 13 L J Renzullo, A L Blanchfield, K S Powell. A method of wavelength selection and spectral discrimination of hyperspectral reflectance spectrometry [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE*, 2006, 44(7): 1986—1994.
- 14 S Song, W Gong, B Zhu, *et al.*. Wavelength selection and spectral discrimination for paddy rice, with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(5): 672—682.
- 15 P M Hansen, J K Schjoerring. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542—553.
- 16 F Kneubühl. Diffraction grating spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 1969, 8(3): 505—519.
- 17 Zhang Faguo, Yu Honglin. Principle of blazed grating and its applications [J]. *Journal of Chongqing Liberal Arts College (Natural Science)*, 2008, 27(1): 48—51.
张发国, 喻洪麟. 闪耀光栅原理及其应用 [J]. *重庆文理学院学报 (自然科学版)*, 2008, 27(1): 48—51.

栏目编辑: 殷建芳