

基于双波段近红外光谱的森林凋落物含水率测量方法

刘卫平^{1,2} 丁一寒¹ 苏南³ 郑一力¹ 赵燕东^{1,2}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;
3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 南京 210012)

摘要: 在森林防火监测中,地表凋落物含水率是评估区域火险等级的关键指标。现有基于单波段近红外光源的含水率测量系统易受环境光干扰,导致自然光照变化条件下测量误差较大。本研究通过近红外光谱分析实验发现,凋落物中水分子对中心波长 1 450 nm 波段近红外光的吸收强度显著强于中心波长 1 350 nm 波段。基于此原理,本研究设计了一种基于双波段近红外法的凋落物含水率测量系统。与单波段系统不同,该系统并非依赖单一波段的模数转换器(ADC)数值进行含水率标定,而是利用中心波长 1 450 nm 与 1 350 nm 波段 ADC 数值的差值进行标定。该系统硬件由单片机、双波段红外发射器、ADC 采集模块、串口通信模块、外置电源及不锈钢防护外壳等组成。在常温及室内稳定光照条件下标定实验表明,系统 ADC 采集值与凋落物含水率之间关系符合三次多项式模型($R^2 = 0.9859$)。为验证双波段设计在动态自然光照下的测量鲁棒性,将充分吸水的凋落物样本置于户外自然干燥,定时检测其含水率与质量变化,共获取 23 组样本数据。通过对比中心波长 1 350 nm 与 1 450 nm 波段 ADC 数值变化曲线,证明双波段系统在自然光干扰下仍能保持较高测量精度。实验结果表明,该传感器的平均绝对误差为 2.74%。本研究所设计的双波段近红外测量系统有效克服了单波段系统在环境光变化下的误差问题,显著提升了抗干扰能力。

关键词: 森林凋落物; 含水率检测; 近红外光谱; 单片机; 光电传感器

中图分类号: S762.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0292-08 OSID: 

Measurement Method for Moisture Content in Forest Litter Based on Dual-band Near-infrared Spectroscopy

Liu Weiping^{1,2} Ding Yihan¹ Su Nan³ Zheng Yili¹ Zhao Yandong^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: In forest fire monitoring, the moisture content of surface litter is a key indicator for assessing regional fire danger levels. Existing moisture content measurement systems based on a single near-infrared (NIR) light band are susceptible to ambient light interference, leading to significant measurement errors under natural light variations. Through near-infrared spectroscopy experiments, it was found that water molecules in litter exhibited significantly stronger absorption intensity at 1 450 nm band compared with 1 350 nm band. Leveraging this principle, a dual-band NIR measurement system for litter moisture content was designed. Unlike single-band systems which relied solely on the analog-to-digital converter (ADC) value of one wavelength for calibration, this system utilized the difference between the ADC values at 1 450 nm and 1 350 nm. The hardware comprised a microcontroller, dual-band infrared emitters, an ADC acquisition module, a UART communication module, an external power supply, and a stainless-steel protective enclosure. Calibration experiments under stable room temperature and indoor lighting showed that the relationship between the system's ADC values and litter moisture content fitted a cubic polynomial model ($R^2 = 0.9859$). To verify the system's robustness against dynamic natural light during measurement, water-saturated litter samples were dried naturally outdoors while their moisture content and weight were monitored periodically, yielding 23 datasets. Comparative analysis of ADC value trended at 1 350 nm and 1 450 nm demonstrated that the dual-band system maintained high accuracy

despite natural light interference. Experimental results indicated a mean absolute error (MAE) of 2.74%. The designed dual-band NIR measurement system effectively overcame the limitations of single-band systems under ambient light variations and significantly enhanced interference resistance.

Key words: forest litter; moisture content detection; near-infrared spectroscopy; microcontroller; photoelectric sensor

0 引言

森林资源被视为地球上极为重要的自然财富，为众多生物的生存提供了必要条件。绿色是人类视觉系统感知最敏感的光谱波段，绿色的森林环境能够带给人们平静与舒适的感受^[1-3]。林火作为一种突发性自然灾害，具有显著的生态破坏性，将对生态系统造成严重损害。这种灾害不仅会直接威胁到自然环境，还会给人类经济带来巨大的损失，甚至危及生命安全^[4-7]。因此，保护森林资源、预防森林火灾显得尤为重要。

森林火灾与森林中的可燃物有密切的关系^[8-10]，火灾发生的根本原因在于可燃物、火险天气条件以及火源的存在。在森林中，活体树木的可燃物含水率受自身生理机制调控，其变化幅度相对有限，通常具有较高的含水率^[11]，从而不易燃烧。相较之下，以凋落物为主的地表可燃物则更容易受到外界环境的影响，比如大气湿度、降雨和蒸发等环境因素。尤其是位于地表的半分解的凋落物，在潮湿或者降雨环境中，凋落物吸水，含水率增大，而在干燥的大气中，森林地表凋落物的含水率往往较低，更容易发生燃烧^[12]。

因此，通过对森林中凋落物含水率的实时监测，可以有效评估某一地点发生火灾的风险并制定预防措施。除了称量法测量凋落物含水率，前人针对森林凋落物含水率测量已经提出了气象要素预测法：通过对凋落物所在地的地表温度、空气湿度、风速、日照等环境因素的监控，建立森林可燃物含水率的预测模型^[13-19]；近红外单吸收峰含水率预测法：通过中心波长 1 450 nm 波段的近红外光向被测物照射，建立反射光线强度与被测物含水率关系模型^[20]。基于近红外单吸收峰法设计的传感器虽然可以通过计算近红外光被凋落物水分子吸收的程度来测量被测物的含水率，但是在室外日光变化的情况下，特别是日出、日落、气候变化的情况下，日光中自带的近红外光强的剧烈变化^[21-24]也会影响光电接收器采集到的光照强度。如果只使用 1 450 nm 作为测量光源，将会导致较为严重的测量误差。

本文参照前人对于水的近红外吸收光谱曲线分析，引入水分子吸收较少的中心波长 1 350 nm 的波

段近红外光作为参照光源，利用水分子对于中心波长 1 450 nm 和 1 350 nm 两个波段的近红外光吸收率的较大差值制作了双波段近红外含水率传感器。在自然日光强度剧烈波动时，由于中心波长 1 350 nm 波段的反射强度受水分吸收影响较小，可将其作为基准值，通过其与中心波长 1 450 nm 波段光照反射强度的差分计算，降低环境光因素对传感器读数的影响，提高含水率测量的准确性。

1 研究原理

1.1 检测系统原理

凋落物含水率的测量采用近红外法，原理基于水分子的近红外吸收光谱。凋落物中的水分子包含大量羟基（O—H），水分子对于近红外光吸收主要通过羟基的伸缩振动和变形振动来实现，随着照射凋落物的近红外光源波段的变化，不同含水率的凋落物样本会呈现不同的近红外光谱吸收曲线。本文以橡树叶为主体的多种森林凋落物混合样本作为被测样本，得到了凋落物在不同含水率条件下的红外吸收光谱，为后文制作凋落物含水率检测系统提供理论基础。

1.2 实验材料

凋落物样本采集地点在北京西郊鹫峰国家森林公园（39°54'N, 116°28'E），在林区采集多种凋落物混合样本，剔除其中石块，将样本剪碎至均匀的粒径 2~5 mm 的颗粒。

1.3 样本制作及光谱分析

将凋落物样本浸泡于蒸馏水中至饱和状态后，取出样本放入烘干箱中，调节烘干箱温度至 65℃，以 10 min 为间隔周期取样凋落物样本，使用美国赛默飞 Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪进行红外光谱测量，获取 9 组梯度含水率凋落物样本的红外吸收光谱特征，如图 1 所示，凋落物样本从 1 号到 9 号含水率逐渐增大。

由图 1 可以看出，在 1 100 nm 以下的波段，水的吸收光谱呈现振荡特征，所以 1 100 nm 以下的红外光不适合作为检测系统的光源，在 1 100~2 750 nm 的红外光波段内，水分子对于 1 450 nm 和 2 050 nm 左右波段的红外光吸收峰最强，但是由于 1 600 nm 以上波段的 LED（发光二极管）光源成本较高，所

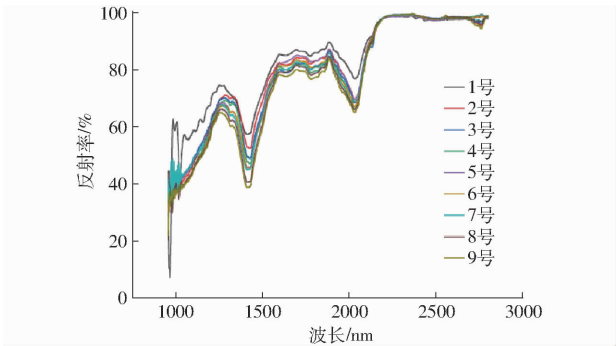


图1 不同水分含量的被测物样品红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of test samples with different moisture contents

以本文采用了中心波长 1 450 nm 波段的近红外 LED 光源作为测量光源。从图 1 可以看出,当照射波长从 1 350 nm 逐渐增大时,高含水率样本的反射率迅速减小,而低含水率样本的反射率下降速率则远低于前者。综上所述,本文设计的传感器采用中心波长1 350 nm 波段的 LED 红外光源作为对照光源。

2 系统设计

系统采用分时复用控制策略,交替发射等光强的中心波长 1 350 nm 与 1 450 nm 双波段近红外光至被测物表面。不同波段光源发射时,其对应的反射光信号在不同时刻被光电接收器分别捕捉。由于凋落物中的水分子对中心波长 1 350 nm 波段近红外光的吸收远弱于对中心波长 1 450 nm 波段的吸收,因此被测物含水率与这两个波段反射光强度之差存在正相关关系。

2.1 传感器设计

传感器光源模块集成 1 350 nm 与 1 450 nm 双波长发光二极管。对于红外检测器的选择,常用的红外检测器分为热电型和光电型。其中,热电探测器基于目标红外辐射引起的探测器敏感材料温度变化(导致电阻、电压等变化)来探测辐射热。而光电型红外探测器基于光电效应,通过接收光辐射而改变内部材料的电导率,从而实现对红外光强度的检测。相较于热电型探测器,光电型探测器(如光电二极管)具有更快的响应速度。其中,采用 InGaAs (钢镓砷)材料的光电二极管因其响应速度快、归一化探测率高、体积小等优点,被选为本系统的光电探测器。

本系统使用中心波长 1 350 nm 和 1 450 nm 双波段的红外发射二极管(LED)作为光源。红外发射器和接收器排列如图 2 所示,其中中心波长 1 350 nm 波段的 LED 和中心波长 1 450 nm 波段的 LED 采用分时复用的顺序发射近红外光,接收器在

不同的时间分别接收中心波长 1 350 nm 波段和中心波长 1 450 nm 波段的反射光。此外,为了使 InGaAs 光电二极管采集到强度足够的电压信号,本系统分别将 3 个中心波长 1 350 nm 波段和中心波长 1 450 nm 波段 LED 串联起来,如图 2 所示,近红外光线的发射接收光路如图 3 所示。

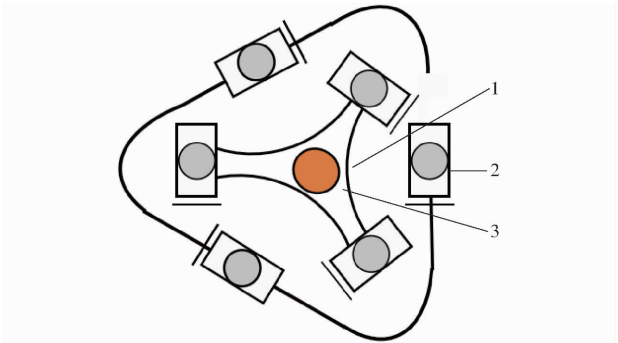


图2 红外发射器、接收器阵列

Fig.2 Integrated infrared emitter and receiver array

1. 中心波长 1 350 nm 光源阵列 2. 中心波长 1 450 nm 光源阵列
3. 光电接收器

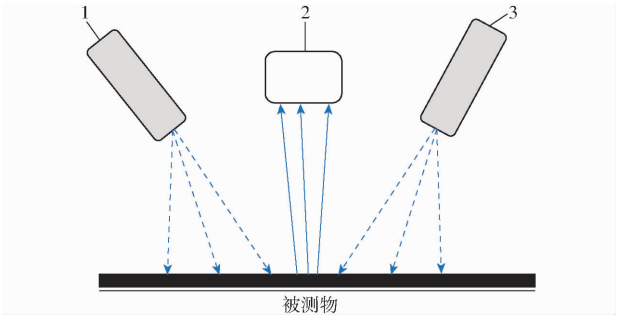


图3 近红外光测量时光路示意图

Fig.3 Schematic of optical path during near-infrared (NIR) light measurement

1. 中心波长 1 350 nm 光源阵列 2. 光电接收器 3. 中心波长 1 450 nm 光源阵列

2.2 系统总体设计

系统主控芯片采用国产兆易创新的 32 位微控制器 GD32F103C8。GD32F103C8 是一款基于 ARM 架构的 32 位单片机,主频可达 108 MHz,支持丰富的外设接口,具有优秀的处理能力和灵活的扩展能力。该芯片内置高达 64 KB 的闪存及 20 KB 的 SRAM(静态随机存储器),能够满足多种应用程序的存储需求,使得开发者可以灵活地设计和实现复杂的功能。系统通过 LED 恒流驱动模块控制两路 LED 光源发射近红外光线,接收器(光电二极管)接收到被测物反射的近红外光后,其输出的模拟信号由模数转换器(ADC)转化为数字信号,主控芯片再将光照强度的数字信号和激光测距数据与温度数据打包,通过 RS-232 串行通信协议实现与上位机的数据传输,系统的整体工作框图如图 4 所示。

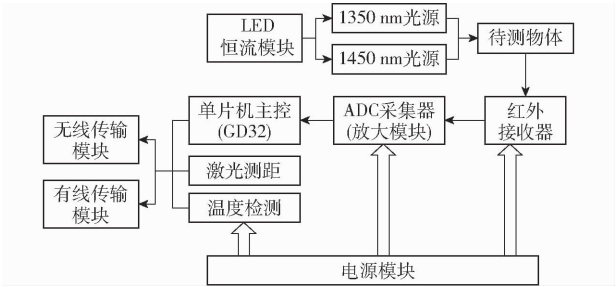


图 4 检测系统工作示意图

Fig. 4 Schematic of detection system operation

本系统的中心波长 1 350 nm/1 450 nm 波段近红外光源的驱动模块电路使用 PT4115 芯片来驱动一组 LED。PT4115 是一款连续电感电流导通模式的降压恒流源,它具有较宽的直流 8 ~ 30 V 输入电压范围,驱动恒流大小可按应用方案设定。本系统采用两个 PT4115 芯片驱动 6 个近红外光源,并使用电容、二极管、电感等器件形成保护电路。

本系统的 ADC 采集电路主要包含 1 个 InGaAs 光电二极管、1 个电压基准源和 1 个 24 位 $\Sigma - \Delta$ 模数转换器(ADC),可以将光电二极管产生的电流信号转换为电压并最终转换为数字信号。当红外光照射到光电二极管上时,它会产生与光强成正比的电流。

本系统的激光测距模块选用 VL53L0x 型集成化激光测距传感器,通过发射激光脉冲并测量其从目标物体反射回来的时间来计算传感器与被测物距离。温度测量模块选用 TMP102 型数字温度传感器。TMP102 是一款由德州仪器公司开发的小型高精度数字温度传感器,采用 I²C 接口进行通信。

系统由外部 12 V 直流电源统一供电。该 12 V 电源直接为 LED 恒流驱动模块供电。同时,通过电压转换电路为主控单片机等数字电路部分提供稳定的 3.3 V 工作电压,并为高精度 ADC 采集电路提供其工作所需的特定电压。

2.3 系统外壳设计

本系统应用于森林、草原等野外环境,需配置特殊防护外壳以应对室内传感器无需考虑的极端环境条件(如日晒雨淋、生物侵蚀等)。外壳使用 Solidworks 软件进行三维建模,并选用不锈钢材料加工制造。不锈钢外壳建模图和分解图如图 5 所示,外壳实物如图 6 所示。

3 数据采集与模型建立

本系统基于近红外光谱法测量森林凋落物含水率,标定方法如下:将一份已知状态的半分解凋落物样本置于传感器下测量,获取传感器读数;同时,采用标准烘干法测定该样本的实际含水率;通过比较

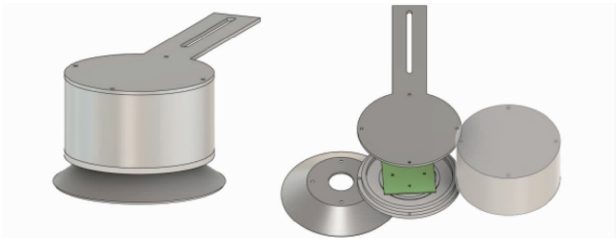


图 5 检测系统不锈钢外壳建模图

Fig. 5 Modeling diagram of stainless steel housing for detection system

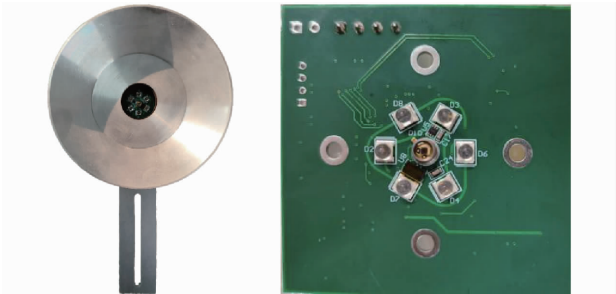


图 6 不锈钢外壳和 PCB 实物图

Fig. 6 Physical diagram of stainless steel housing and PCB

传感器读数与实际含水率,建立二者之间的关系模型(标定曲线)。在本系统中,被测物反射两个波段的近红外光。反射光由 InGaAs(铟镓砷)光电二极管接收并转换为电信号,经 ADC 采样后得到对应于中心波长 1 350 nm 和 1 450 nm 波段的两个 16 位数字值(记为 ADC_{1350} 和 ADC_{1450})。研究表明,这两个数值之差的绝对值与样品含水率呈正相关关系。本章根据标定实验结果建立含水率模型,实现对被测物含水率的检测。

3.1 传感器标定实验

本次实验测试凋落物采集自北京西郊鹫峰国家森林公园(39°54'N,116°28'E),在林区选取凋落物层堆积较均匀的调查样方 2 m × 2 m,多种森林类型地表死凋落物混合取样,使用耙子收集样方内所有凋落物(包括树枝、果实、半分解枯叶、枯草等),装入密封袋带回实验室。标定实验步骤主要包括:

放入 65℃ 烘箱中烘干 48 h,冷却至室温(20℃)后称量,记录该样方(2 m × 2 m)凋落物的总质量(g)。此质量数据用于后续制备与野外凋落物堆积密度相当的实验样本。

一次性取出适量的凋落物样本放入混合容器中,保证凋落物样本松散程度与野外采集样方相同。逐量加入去离子水,直到半分解状凋落物样本吸水饱和,记录下当前混合凋落物样本的质量含水率。重复制备 5 份待测样品,如图 7 所示。

使用传感器分别测量这 5 份吸水饱和样品。待双波段读数稳定后,记录 ADC 采集的数字差值。该差值即被测物在饱和含水率状态下的传感器读数。



图 7 5 份待测凋落物样本

Fig. 7 Five portions of litter samples for testing

在测试时,由于 LED 光源的发散角度为 30° ,要保证被测物面积能够覆盖 LED 光斑,如图 8 所示,本次标定实验中,被测物被装在直径为 90 mm、高为 15 mm 的圆形塑料盘中。由于 ADC 采集数值与测量距离也呈正相关,过近的测量距离会使得经过放大的 ADC 数值溢出 16 位二进制数值范围,经过数学运算和实际测试,传感器距离被测物 100 mm 时数据较为合理。

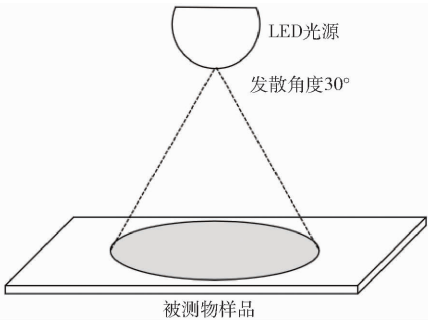


图 8 LED 发散角与被测物示意图

Fig. 8 Schematic of LED divergence angle and tested object

将 5 份凋落物样本一起放入烘干箱中,在 65°C 下烘干 10 min 后取出分别称量记录,再将 5 份样品分别使用近红外凋落物含水率传感器检测含水率并记录。重复多次以上操作,直到同一份样品前后两次的称量结果不再变化,此时可认为被测物含水率为 0。

对 5 组样品分别执行上述烘干—测量—记录过程,最终得到所有样本点的含水率及其对应的传感器双波段 ADC 差值数据,绘制成散点图,如图 9 所示。随后对数据进行多项式曲线拟合分析。

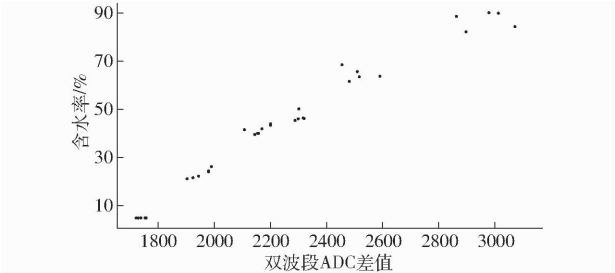


图 9 ADC 差值与含水率散点图

Fig. 9 Scatter plot of ADC difference versus moisture content

由图 9 可知,含水率的数值与双波段近红外光

ADC 差值存在明显的正相关性,使用多项式方程对样本散点进行拟合。其中,样本点使用一次多项式拟合曲线,如图 10 所示,其方程为: $Y = 0.065\,59x - 104.3$,其中 Y 为样本含水率, x 为双波段 ADC 的差值,该拟合方程的残差平方和为 625.2,其回归模型拟合决定系数 R^2 为 0.970 5。

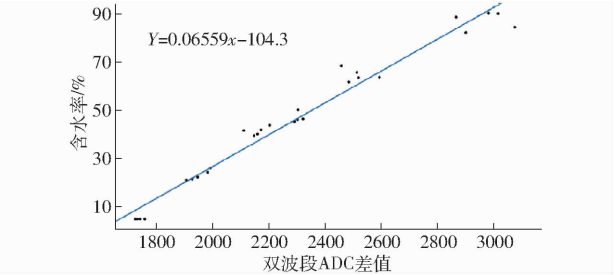


图 10 一次多项式拟合曲线

Fig. 10 Linear polynomial fitting curve

二次多项式拟合曲线如图 11 所示,其方程为: $Y = -1.962 \times 10^{-5}x^2 + 0.158\,2x - 210.2$,该拟合方程的残差平方和为 307.4, R^2 为 0.985 5。

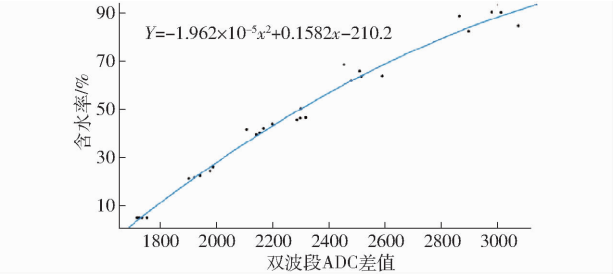


图 11 二次多项式拟合曲线

Fig. 11 Quadratic polynomial fitting curve

三次多项式拟合曲线如图 12 所示,其方程为: $Y = -1.105 \times 10^{-8}x^3 + 5.853 \times 10^{-5}x^2 - 0.022\,33x - 74.08$

该拟合方程的残差平方和为 298.3, R^2 为 0.985 9。

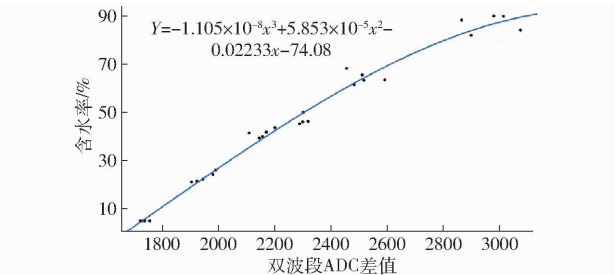


图 12 三次多项式拟合曲线

Fig. 12 Cubic polynomial fitting curve

从上述不同次数多项式的拟合过程中不难发现,使用三次多项式拟合样本点产生的回归模型拟合决定系数 R^2 最大,所以本系统采用三次多项式拟合曲线作为系统测量曲线。

3.2 传感器测试

在前人的研究中,已经使用 1 450 nm 单波段传

传感器的 ADC 数值来表示森林凋落物的含水率,然而因为自然光中也含有丰富的近红外光,在单波段近红外传感器工作期间的自然光线变化也会影响传感器 ADC 数值,从而对传感器测量含水率造成测量误差。

为了验证单一波段的近红外传感器测量会受到自然光线变化的影响,本文设计了实验,将已经完全干燥的凋落物样本与本文研制的双波段测量系统置于户外干燥通风处,从 12:00—20:00 每隔 5 min 测量一次。在此期间,户外天气晴朗,凋落物样本含水率无变化。分别得到中心波长 1 350 nm 波段和中心波长 1 450 nm 波段的 ADC 数值变化曲线,如图 13 所示。

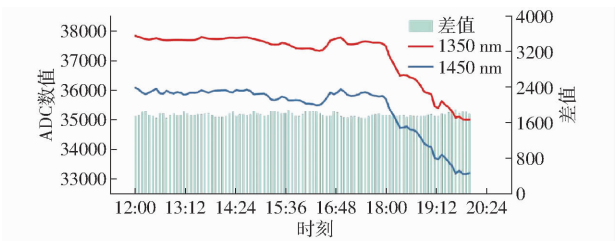


图 13 中心波长 1 350 nm 和 1 450 nm ADC 变化曲线
Fig. 13 Change curves of ADC at 1 350 nm and 1 450 nm

从图 13 可以看出,无论是 1 350 nm 还是 1 450 nm 的 ADC 数值都在 12:00—18:30 期间随着日照光线强度变化而振荡,在接近日落时,传感器 ADC 数值开始快速下降,然而在这期间,凋落物样本的含水率并没有变化,所以使用单波段传感器进行凋落物含水率的检测会较大程度地受到自然光线影响,特别是日出日落时分,影响更加显著。从图 13 中可以看出虽然中心波长 1 350 nm 和 1 450 nm 的 ADC 数值会随着自然光线的变化而变化,但是两者的差值却保持稳定,这说明了双波段传感器以 1 350 nm 与 1 450 nm 红外光的差值作为含水率的参照物是可行的。

为了进一步验证本双波段近红外含水率检测系统在自然光变化的环境下也具有较高的测量精度与稳定性,本文设计了长时间连续测试实验。先制作被测物样本,制作过程相同于标定实验,将一定量半分解状的凋落物放入塑料培养皿,逐量加入去离子水,直到半分解状凋落物样本吸水饱和,记录下当前混合凋落物样本的含水率。将样本和传感器装置一起放置到户外通风干燥处,模拟真实测量环境等待被测物逐渐自然风干,如图 14 所示。

从 14:00 到 20:00 每隔 15 min 测量样本质量和对应的传感器读数,直到被测物质量不再变化,连续收集得到 23 个被测物样本点,如表 1 所示。

23 个样本点(如表1所示)按时间顺序从上到

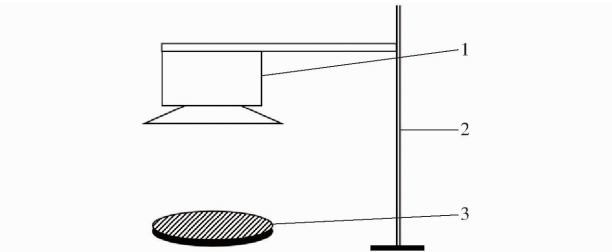


图 14 户外长时间自然风干测试实验示意图
Fig. 14 Schematic of experiment for outdoor longterm natural wind drying test
1. 双波段近红外检测系统 2. 被测凋落物样本 3. 支撑杆

表 1 传感器精度测试实验样本点 Tab.1 Sample points for sensor accuracy test experiment			
序号	双波段差值	传感器检测 含水率/%	真实含水 率/%
1	3 034	88.34	93.50
2	2 945	85.55	89.90
3	2 898	83.82	86.90
4	2 832	81.12	82.54
5	2 776	78.59	78.00
6	2 731	76.40	72.90
7	2 676	73.55	69.82
8	2 520	64.50	63.72
9	2 477	61.79	60.00
10	2 418	57.92	55.60
11	2 365	54.31	51.36
12	2 304	50.03	46.20
13	2 260	46.85	42.27
14	2 203	42.64	38.36
15	2 134	37.43	34.37
16	2 067	32.25	29.20
17	1 989	26.11	25.09
18	1 935	21.80	19.45
19	1 867	16.34	14.18
20	1 800	10.92	9.18
21	1 760	7.68	4.55
22	1 723	4.68	2.76
23	1 702	2.90	0.65

下排列。被测物因水分蒸腾,含水率逐渐降低。检测系统根据 ADC 读数与三次拟合模型推算出含水率预测值,如图 15 所示。

由图 15 可知,双波段传感器采集到的含水率预测曲线与含水率在 0 ~ 80% 的实际凋落物样本点重合度较高,在含水率大于 80% 的样本中,可能凋落物样本吸水已经存在过饱和现象,从而影响近红外光的反射。计算得到传感器测量的平均绝对误差为 2.74%。在室外自然光光线变化的情况下,双波段近红外传感器系统测量的含水率与被测物实际含水率的绝对误差处在比较低的数值,证明了本系统在

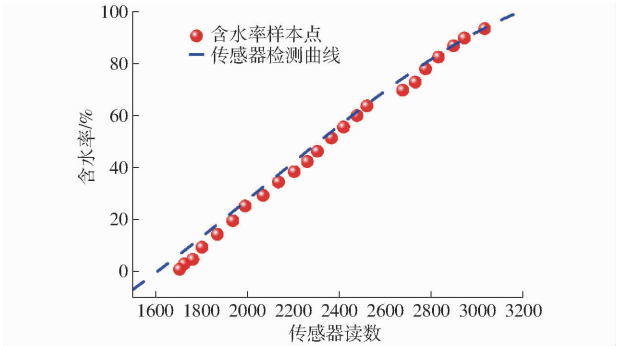


图 15 含水率预测曲线和样本点图

Fig. 15 Predicted moisture content curve and sample points

实际测量可燃物含水率的精确度较高,具有较高的实用价值。

4 结论

(1)基于特定波段近红外光照射在水分子上会有不同的吸收特性的原理设计了一种无接触式、便携、精确的凋落物含水率检测系统,其使用国产GD32F103C8作为主控,采用InGaAs(铟镓砷)光电传感器作为近红外光的接收器,中心波长1350nm波段和中心波长1450nm波段的光源模组分时照射被测物样本,分别记录光电传感器ADC数值,则其差值与被测物的含水率存在正相关关系。为了使其能够胜任野外复杂多变自然环境,本文设计了一个不锈钢外壳来保护整个传感器系统。

(2)本文通过对比实验验证了自然光变化对单波段近红外传感器测量森林凋落物含水率的干扰机制。实验结果表明,在恒定含水率条件下(完全干燥样本),采用1450nm单波段传感器获取的ADC数值在12:00—18:30日照强度变化期间呈现显著波动,特别是在太阳高度角变化显著的日落时段(18:30—20:00)出现快速衰减现象。这证实了前人研究中单波段测量系统易受环境光强变化的固有缺陷,其根本原因在于自然光谱中近红外成分的动态变化直接影响传感器接收的总光强。双波段(1350nm与1450nm)同步测量数据显示,虽然单波段ADC值均受光照强度调制,但两波段信号差值在整个观测周期内保持稳定。这种差分特性有效抵消了环境光强波动对单通道信号的干扰,说明基于1350nm/1450nm双波段差分检测方法可显著提升含水率测量的环境鲁棒性。

(3)将本文设计的传感器通过标定实验进行双波段LED光源下ADC读数的差值与含水率的回归分析,确定出两者可以使用三次多项式进行拟合,拟合方程的残差平方和为298.3, R^2 为0.9859。最后进行了长时间样本自然风干实验来测试传感器的精度,在户外环境连续测试6h之后收集到23个样本点,将传感器测量含水率与其称量法获得的含水率相比,平均绝对误差为2.74%,处在较低水平。

参 考 文 献

[1] 徐飞鸿,李想,徐阳. 基于绿色健康理念的高密度城市人居环境建设研究[J]. 设计,2024,9(6):239-246.
Xu Feihong, Li Xiang, Xu Yang. Research on the construction of human settlements in high-density cities based on the concept of green health[J]. Design, 2024,9(6):239-246. (in Chinese)

[2] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.

[3] 张双全,徐畅,钟永德. 森林景观色彩对大学生心理健康的影响研究[J]. 自然保护地,2022,2(4):100-108.
Zhang Shuangquan, Xu Chang, Zhong Yongde. A study on the effect of forest landscape color on college students' mental health [J]. Natural Protected Areas, 2022, 2(4): 100-108. (in Chinese)

[4] 狄丽颖,孙仁义. 中国森林火灾研究综述[J]. 灾害学,2007(4):118-123.

[5] 苏立娟,何友均,陈绍志. 1950—2010年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学,2015,51(1):88-96.
Su Lijuan, He Youjun, Chen Shaozhi. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 88-96. (in Chinese)

[6] Carta F, Zidda C, Putzu M, et al. Advancements in forest fire prevention: a comprehensive survey[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6635.

[7] 林运科. 林业资源保护和森林防火管理措施[J]. 农村科学实验,2024(13):138-140.

[8] 蔡志勇,孙龙,孙家宝. 大兴安岭森林可燃物燃烧危险性评估[J]. 东北林业大学学报,2025,53(1):73-78.
Cai Zhiyong, Sun Long, Sun Jiabao. Risk assessment of forest fuels combustion in the greater kringan range[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(1): 73-78. (in Chinese)

[9] 赵颖慧,高利. 塔河林业局森林可燃物类型区划分的研究[J]. 林业科技情报,2008(1):16-17.
Zhao Yinghui, Gao Li. Study on dividing forest fuel type area of tahe forest bureau[J]. Forestry Science and Technology Information, 2008(1): 16-17. (in Chinese)

[10] Zong X, Tian X, Yao Q, et al. An analysis of fatalities from forest fires in China, 1951—2018[J]. International Journal of Wildland Fire, 2022, 31(5): 507-517.

[11] 王玉婷,徐华东,周涵婷,等. 环境温度对活立木内部含水率变化的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):107-113.
Wang Yuting, Xu Huadong, Zhou Hanting, et al. Effects of environmental temperatures on internal moisture content of standing trees[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2017,41(5):107-113. (in Chinese)

[12] 贺红士,常禹,胡远满,等. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望[J]. 植物生态学报,2010,34(6):741-752.
He Hongshi, Chang Yu, Hu Yuanman, et al. Contemporary studies and future perspectives of forest fuel and fuel management [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(6):741-752. (in Chinese)

[13] 包玉龙,张继权,赵云升,等. 基于高光谱的草地可燃物含水率估测方法[J]. 红外,2011,32(7):38-42.
Bao Yulong, Zhang Jiquan, Zhao Yunshen, et al. Estimation of moisture content of grassland fuel based on hyperspectra[J]. Infrared,2011,32(7):38-42. (in Chinese)

[14] Posell M,Bell T L. The influence of fuel moisture content on the combustion of *Eucalyptus* foliage[J]. International Journal of Wildland Fire,2013,22(3):343-352.

[15] 孙龙,刘祺,胡同欣. 森林地表死可燃物含水率预测模型研究进展[J]. 林业科学,2021,57(4):142-152.
Sun Long, Liu Qi, Hu Tongxin. Advances in research on prediction model of moisture content of surface dead fuel in forests [J]. Scientia Silvae Sinicae,2021,57(4):142-152. (in Chinese)

[16] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等. 森林可燃物含水率及其预测模型研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(3):64-69.
Hu Haiqing, Luo Sisheng, Luo Bizhen, et al, Forest fuel moisture content and its prediction model[J]. World Forestry Research,2017,30(3):64-69. (in Chinese)

[17] 张运林. 蒙古栎和红松凋落物含水率动态变化影响因素及预测模型研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.
Zhang Yunlin. Study on influencing factors and prediction model of dynamic change of litter moisture content of Mongolian oak and *Pinus koraiensis*[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2019. (in Chinese)

[18] 伊伯乐,刘晏铭,张恒. 内蒙古大兴安岭主要火环境因子对地表死可燃物含水率的影响[J]. 东北林业大学学报,2021,49(3):81-86.
Yi Bole, Liu Yanming, Zhang Heng. Effects of major fire environmental factors on moisture content of surface dead fuel in Daxing'an Mountains, Inner Mongolia[J]. Journal of Northeast Forestry University,2021,49(3):81-86. (in Chinese)

[19] Batchelor J L, Eric R,Susan P, et al. Quantifying forest litter fuel moisture content with terrestrial laser scanning[J]. Remote Sensing,2023,15(6):1482.

[20] 叶颖慧. 森林死可燃物含水率在线测量技术研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.

[21] 周禹,张睿加,袁伟东,等. 近红外光谱及成像检测影响因素与校正方法研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(4):39-48.
Zhou Yu, Zhang Ruijia, Yuan Weidong, et al, Research progress on influencing factors and correction methods of near infrared spectroscopy and imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2024,61(4):39-48. (in Chinese)

[22] 韩岷杰,王相友,许英超,等. 马铃薯近红外光谱无损检测影响因素研究[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(1):37-42.
Han Minjie, Wang Xiangyou, Xu Yingchao, et al. Research on the factors influencing the non-destructive detection of potatoes by near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2023,43(1):37-42. (in Chinese)

[23] 龚志远,李轶凡,刘燕德,等. 光源照射角度对苹果糖度近红外光谱检测的影响研究[J]. 激光与光电子学进展,2016,53(2):241-246.
Gong Zhiyuan, Li Yifan, Liu Yande, et al. Study on influence of irradiation angle on detection of sugar content of apple by near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2016,53(2):241-246. (in Chinese)

[24] Dong C,Ye Y, Zhang J, et al. Detection of thrips defect on green-peel citrus using hyperspectral imaging technology combining PCA and b-spline lighting correction method[J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(10):2229-2235.

[25] 杨宝城,鲁向晖,张海娜,等. 基于无人机多光谱影像的矮林芳樟叶片含水率与叶水势反演[J]. 农业机械学报,2024,55(2):220-230,267.
Yang Baocheng, Lu Xianghui, Zhang Haina, et al. Inversion of leaf water content and leaf water potential of *Cinnamomum camphora* based on UAV multispectral images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):220-230,267. (in Chinese)