

# 农作物冠层结构参数自动测量系统设计与试验

屈永华, 王锦地, 董 健, 姜富斌

(北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室,  
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:** 农作物冠层的结构参数, 如叶面积指数与平均叶倾角, 是影响太阳辐射在农田内进行重新分配的重要参数。在农业工程中, 以玉米与小麦为例, 这些参数的测量以传统的手持仪器为主, 需要消耗较大的人力和时间, 难以被应用于大区域尺度、长时间序列结构参数获取。该文设计并实现了一种基于无线传感器网络技术的农作物结构参数自动测量系统。系统由冠层上、下部光强测量节点、数据汇聚节点以及数据无线传输的路由节点组成, 通过测量不同太阳高度角下冠层透过率来求解冠层的结构参数。数值模拟结果与野外实测结果表明, 该文所用的结构参数反演算法稳定, 测量系统可以较好的探测一天之中不同太阳高度角下的植被冠层太阳辐射透过率, 基于方向透过率计算得到的叶面积指数与 LAI2000 仪器测量结果有较好的相关性, 平均叶倾角和理论分布模式计算结果基本一致。该系统可以应用于对大区域尺度上的农作物长时间序列连续观测, 提高农作物结构参数测量的自动化程度。

**关键词:** 农作物, 结构参数, 测量, 无线传感器网络, 冠层

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.028

中图分类号: 430

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0160-06

屈永华, 王锦地, 董 健, 等. 农作物冠层结构参数自动测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 160—165.

Qu Yonghua, Wang Jindi, Dong Jian, et al. Design and experiment of crop structural parameters automatic measurement system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 160—165. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

农作物通过截获太阳辐射获得光能进行光合作用, 而农作物冠层结构参数, 如叶面积指数 (leaf area index, LAI) 与平均叶倾角, 是影响太阳辐射在冠层内进行重新分配的重要因素。因此, 获取农作物结构参数信息是研究农作物生长发育状态及其蓄积生物量的一个重要途径。

叶面积指数的获取方法有直接量测法和间接量测法<sup>[1]</sup>, 其中直接法包括破坏性测量法和手工原位量测以及落叶法。间接测量大多基于光学原理, 通过获取植被冠层截获的光能量的多少来推断 LAI 取值, 如通过测量入射光在冠层中的衰减量估算 LAI<sup>[2-4]</sup>。而目前常用的植被冠层分析仪, 即是属于一种间接测量方法, 它们是通过测量植被冠层内的方向间隙率, 根据间隙率与叶面积指数和叶倾角分布的关系来估计结构参数。目前能够对植被结构参数间接测量的商业化仪器有 2 种类型, 一种是通过测量冠层内透过的太阳辐射量来估算冠层透过率, 如 TRAC, SunScan 和 Demon<sup>[5-7]</sup>, 一种是利用半球成像技术来获取视场内的植被与背景信息, 通过分类的方法统计各自的像素数来计算冠层内的方向间隙率, 如 LAI2000 冠层分析仪和通常的鱼眼相机方法<sup>[4,8]</sup>。而冠层平均叶倾

角的测量方法目前还是以手工测量为主。

虽然间接测量仪器的出现在一定程度上提高了植被结构参数的获取效率, 然而, 当利用当前传统测量仪器面向大区域、长时间序列产植被结构参数获取应用时, 仍然是通过设计一定的采样方案, 选择合适的时间, 依靠人工到野外进行逐点测量。靠人工采样获取植被结构参数的方法从根本上制约了这类仪器难以在大空间尺度上进行长时间序列的连续观测。正如在目前的农业及生态观测网络中, 虽然人们一致认为叶面积指数为一个重要的地表参数, 然而只有很少站点常规观测能提供较小空间范围内、若干离散时间点上的叶面积指数数据<sup>[9-11]</sup>, 而能够提供连续时间序列平均叶倾角观测数据的站点则很少有报道。

相对于传统的手持测量设备, 基于无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 技术的数据自动测量与采集系统的应用正越来越受到人们的关注。WSN 是一种新型的信息获取和处理技术, 它具有低功耗、低成本、分布式和自组织的特点, 充分利用无线传感器网络的技术特点, 可以很好地实现近距离对农作物生长状况的持续观测<sup>[12]</sup>。

本文将传统的农作物冠层结构参数测量原理与基于无线传感器网络的数据采集与数据传输技术相结合, 设计开发了一种可以应用于农作物结构参数动态变化监测的无线传感器网络系统。本文从基本原理与方法、主要网络节点的硬件设计的角度对该系统进行了阐述, 并从数值模拟与野外试验两方面对系统原型进行了测试与验

收稿日期: 2011-06-23 修订日期: 2011-08-11

项目资助: 国家 863 计划项目 (2009AA122101)

作者简介: 屈永华 (1972—), 男, 博士, 研究方向为定量遥感。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。Email: qyh@bnu.edu.cn

证分析。

## 1 原理与方法

### 1.1 基本原理

太阳直射光照射于植被冠层, 在冠层下方能够形成太阳光斑 (Sun Fleck), 单位地表面积上的太阳光斑面积被称为光斑密度。太阳高度角与冠层结构参数是影响光斑密度大小的主要物理量。在实际冠层中, 在光斑和树冠阴影之间还会形成一些弱光区, 被称为半影区。已有研究成果表明<sup>[8-10]</sup>, 不论是否存在半影现象, 冠层内太阳直接辐射透过率的平均值是相同的。也就是说, 在同一条测量路径上观测的冠层间隙率数值, 可通过光感应器测量的太阳直接辐射平均透过率获得。

根据太阳直接辐射在植被内传输衰减的 Beer-Lambert 定律, 在植被中太阳辐射的衰减公式按照下式计算

$$I_1 = I_0 \times e^{-\int_0^{\pi/2} k(\theta, h) LAI d\theta} \quad (1)$$

写成透过率的形式有

$$T_s(h) = e^{-\int_0^{\pi/2} k(\theta, h) LAI d\theta} \quad (2)$$

式中,  $I_1$  和  $I_0$  分别是冠层下部与冠层上部测量到的太阳直射光辐射 ( $\text{W/m}^2$ );  $LAI$  为叶面积指数;  $T_s(h)$  为直射光透过率;  $k(\theta, h)$  为光在植被中的衰减系数, 是太阳高度角( $h$ )和叶倾角( $\theta$ )的函数, 有如下表达式

$$k(\theta, h) = A(\theta, h) \hat{g}(\theta) \quad (3)$$

式中,  $\hat{g}(\theta)$  为叶倾角分布函数,  $A(\theta, h)$  为一三角函数

$$A(\theta, h) = \begin{cases} \cos \theta & \theta \leq h \\ \cos \theta [1 + 2(\tan \theta_0 - \theta_0) / \pi] & h < \theta < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\theta_0 = \arccos(\tan h \cot \theta)$ 。综合式 (1) ~ (4), 并对式 (2) 两边分别求对数, 可得

$$P(h) = -\ln(T_s(h)) = \int_0^{\pi/2} A(\theta, h) \hat{g}(\theta) LAI d\theta \quad (5)$$

式 (5) 是从多个太阳高度角观测中求解 LAI 的基本理论依据, 方程的求解过程实质上求解第一类 Fredholm 积分方程, 采用文献[13]中的方法来计算冠层叶倾角分布函数与 LAI。

### 1.2 直射透过率近似测量方法

由式 (5) 可知, 结构参数求解的基础是获取一天之中不同太阳高度角下直射光透过率。在不考虑植被冠层对光子的多次散射情况下, 冠层下传感器垂直向上观测时接受到太阳辐射包括直射光与散射光两部分。而只有直射透过率在冠层内的衰减符合 Beer-Lambert 定律, 下面分析一下如何获取或者近似获取冠层下直射光透过率。

太阳高度角为  $h$  时冠层直射光透过率可以表达为

$$T_s(h) = \frac{I_1}{I_0} = \frac{Q_1 - D_0 \times T_d}{Q_0 - D_0} \quad (6)$$

式中  $T_s$ ,  $h$ ,  $I_1$ ,  $I_0$  含义同式 (1),  $Q_1$  和  $Q_0$  分别是冠层

下和冠层上总辐射, 而  $D_0$  则为冠层上散射辐射,  $T_d$  为散射光在冠层内的透过率, 其数值大小与太阳高度角无关。

式 (6) 可以进一步变换为

$$T_s(h) = \frac{Q_1/Q_0 - D_0/Q_0 \times T_d}{1 - D_0/Q_0} = \frac{T_Q - \eta T_d}{1 - \eta} \quad (7)$$

式中,  $T_Q$  表示总辐射透过率,  $\eta$  为总辐射中天空散射光所占比例。该式表明, 如果要精确测量直射光透过率, 应该首先要测量得到散射光透过率以及不同太阳高度角 (对应不同时刻) 的天空光散射光所占比例。实际应用表明, 要实现以上 2 个参数的自动测量, 将会大大增加系统设计与开发成本。为简单起见, 根据太阳光谱不同波段光在散射光中所占的比例的差异来近似测量直射光透过率。在晴朗天空光照条件下, 天空以直射光为主, 同时存在部分的散射光, 且以瑞利散射 (Rayleigh scattering) 为主, 即散射光的强度与波长的四次方成反比。这样, 在可见光部分, 散射光中波长较长的红色波段所占的比例相对较少。因此, 在设计传感器的时候, 对光传感器增加了一个中心波长在 650 nm, 半带宽在 8 nm 的带通滤波片, 保证只有红色部分的光能进入传感器, 从而最大程度保证进入传感器的光以直射光为主, 此时测量得到的冠层透过率近似等于直射光透过率。

## 2 WSN 节点功能设计

本文所设计的无线网络测量系统由 3 种类型的节点组成, 分别是数据采集节点、路由节点、汇聚节点。下面具体介绍三种节点的硬件实现方案。

### 2.1 数据采集节点

数据采集节点是精简功能的设备, 它只能与汇聚节点或路由节点进行单向的通信, 数据采集节点之间不能通信。在此系统中, 数据采集节点的主要功能是负载基于 I<sup>2</sup>C 总线的光传感器, 进行光亮度数据采集, 同时数据采集节点自身可以进行测量时间、电池剩余电量的记录, 并且将这些数据一起发送给汇聚节点。

根据数据采集节点完成功能分析, 数据采集节点主要包括传感器部分、实时时钟部分、串口通信部分、供电部分、仪器工作状态监测部分及通信/微处理器部分, 如图 1 所示。

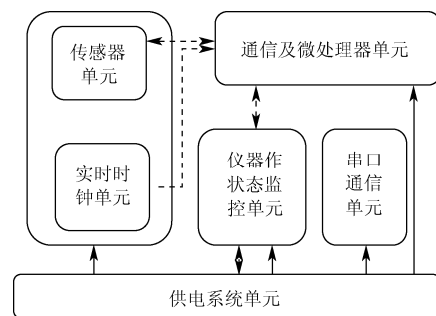


图1 数据采集节点硬件模块设计

Fig.1 Design for data collection node

其中传感器单元部分实现光亮度数据采集, 为保证单个节点采集光亮度的覆盖面积, 使一个节点负载多个

光传感器,同时保证所使用的传感器对同样辐射强度条件下要具有一致的响应度。选择传感器类型时考虑节点对低能耗的要求,以保证整个节点功耗不会过高。对冠层上与冠层下测量节点,分别安装了3个和9个TSL2561光传感器来实现太阳总辐射与冠层透过辐射的采集。在实时时钟部分,选择高精度实时时钟芯片,保证芯片具备低能耗特性。对于通信及微处理芯片,选择带有 ZigBee 协议栈的 Jennic 芯片<sup>[14]</sup>,该芯片同时集成了通信和微处理的功能。在仪器监测部分,主要通过 LED 灯的不同闪烁方式来反映节点的工作状态。串口通信部分,主要服务于系统控制程序下载以及单个节点的性能调试。由于所使用的器件所需供电均为 3 V,因此供电系统是利用两节五号电池提供稳定的 3 V 电压。

## 2.2 路由节点

路由节点是汇聚节点与数据采集节点沟通的桥梁,当数据采集节点不能直接与汇聚节点进行通信的时候,需要通过路由节点进行数据的中继。在此系统中,路由节点硬件设计最为简单,但是路由节点所起的作用非常重要,因为路由节点作为全功能设备,彼此之间可以进行数据的通信,从而保证了网络的健壮和稳定。

在此系统中路由节点主要完成数据中继和实时时钟的计时功能,因此硬件电路设计非常简单,结构示意图如图2所示。

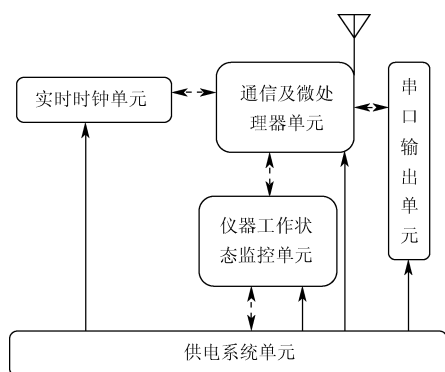


图2 路由节点硬件模块设计

Fig.2 Design for route node

其中实时时钟部分、通信及微处理芯片、串口通信部分均与数据采集节点的硬件要求相同。而仪器监控单元部分,LED灯不同闪烁方式,反映路由节点工作状态以及路由节点与数据采集节点通讯状况。在供电单元部分,由于路由节点不能够进行休眠,相对于数据采集节点而言,功耗较高,因此利用太阳能电池为路由节点提供3V供电。

## 2.3 汇聚节点

汇聚节点是整个网络系统的中心,负责建立网络,向路由节点和数据采集节点下达命令及发送配置信息。当数据采集节点完成数据采集后,将数据发送给汇聚节点,汇聚节点将数据进行汇总,通过 GPRS 将数据发送给后台服务器。汇聚节点包括:通信及微处理芯片、实时时钟部分、仪器监测部分、供电部分、数据存储部分、串口通信部分及 GPRS 通信部分,其结构示意图如图3示。

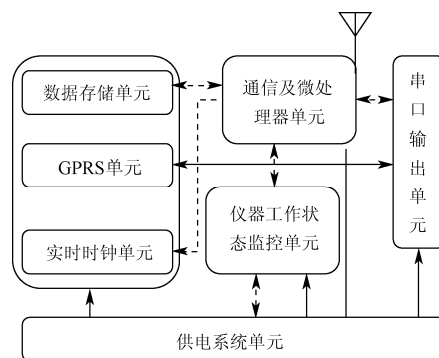


图3 汇聚节点硬件设计

Fig.3 Design for sink node

其中实时时钟单元和通信及微处理器单元的相关内容,与路由节点和数据采集节点完全相同。数据存储单元的主要作用是暂时存放数据采集节点发送来的数据,防止当 GPRS 模块出现故障,无法将数据及时发送给后台服务器而造成数据的丢失。GPRS 单元通过串口与汇聚节点进行通信,其供电电压为 9 V。由于 GPRS 部分供电电压与汇聚节点其他芯片所需电压不同,因此供电系统单元需要提供 9 V 和 3 V 两组电压。

## 3 结果与分析

### 3.1 数值模拟测试

为了验证从直射光透过率中反演冠层结构参数算法,首先根据式(5)生成一系列模拟数据,然后用此模拟数据进行反演的试验。在模拟数据生成中,假定冠层叶倾角分布模型为喜直型<sup>[15-16]</sup>,其概率密度函数为

$$\hat{g}(\theta) = e^{0.583\theta} - 1 \quad (8)$$

这样,模拟了 LAI 从 1 到 10 以 0.5 的步长变化时,不同太阳高度角从 0~90°以 5°间隔变化下的冠层透过率数据。由于实际观测数据难免含有一定的随机噪声,在本次试验中,为透过率增加的随机噪声比例分别是 0、5% 和 10%,然后用这些数据来分别反演冠层结构参数。

3 种情况下叶面积指数的反演结果如图4所示。

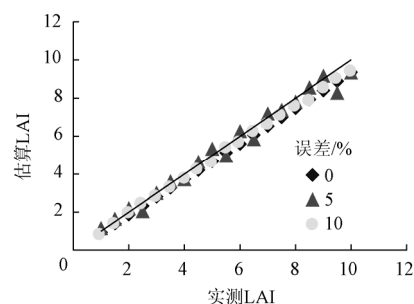


图4 不同噪声比例条件下叶面积指数反演结果比较

Fig.4 Comparison for LAI results of different error levels

图4中3种噪声水平下的反演 LAI 值与真实值非常接近,均方根误差约等于 0.09,决定系数约等于 0.99。表明反演算法能够适应不同的观测噪声条件下的叶面积指数反演。

在 3 种误差等级下,计算得到的叶倾角概率密度函

数与真实叶倾角密度函数的关系如图5所示。

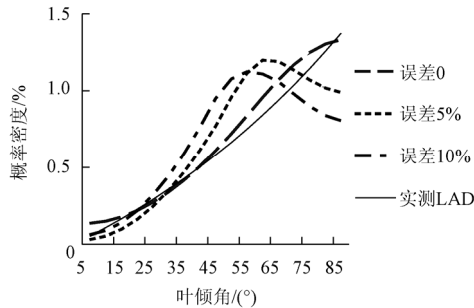


图5 叶倾角概率密度函数分布图

Fig.5 Probability distribution function for leaf incline angle

图5中给出了用不同误差等级的模拟数据反演得到的叶倾角概率密度分布(Error=0~10%)与理论计算结果(True LAD)比较结果。由图可以看出,当模拟数据没有噪声的时候(Error=0),反演结果与理论分布非常接近,而当误差在5%~10%变化的时候,反演得到的概率密度分布形状在大叶倾角的区间略有差异。但是,3种误差水平下,根据反演的概率密度函数计算得到反演的平均叶倾角分别是60.26°,60.12°,60.78°,而根据叶倾角模式为喜直型的概率密度函数计算得到的模拟的平均叶倾角为60.59°,结果表明,各种误差等级下反演结果能够很好地描述植被冠层叶倾角的总体分布情况。

以上反演结果表明,在增加模拟数据(透射率)误差的情况下,反演得到的叶面积指数与平均叶倾角仍能非常接近真实的数值,表明反演算法具有很好的实用性和稳定性。

### 3.2 野外试验

为了验证仪器在野外真实环境下测量植被结构参数的性能,分别选择了玉米与冬小麦2类作物进行了5次实地测量,其中玉米样方为北京师范大学校内生物园(经纬度:E116.37°,N39.93°),测量时间为2010年9月26日,冬小麦样地选择在北京市农林科学院试验田(经纬度:E116.28°,N39.94°)和北京市昌平区小汤山农业示范基地(经纬度:E116.43°,N40.15°)2个试验区分别进行了2次观测,测量时间分别是2011年5月12—13日以及5月24—25日。野外试验传感器布设方法如图6所示。

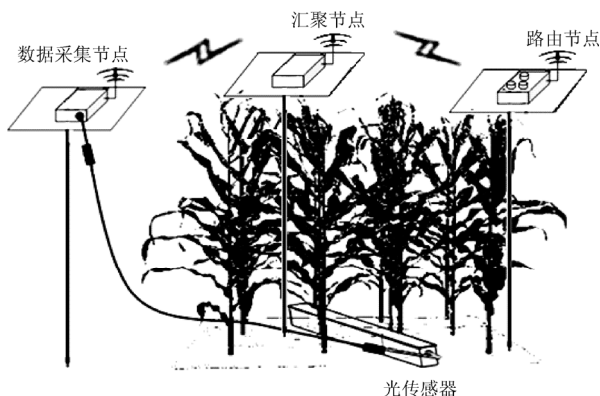


图6 野外试验仪器布设示意图

Fig.6 Instrument layout in field experiment

同时,为了将本文设计的仪器与目前主要的LAI测量仪器进行比对分析,在本文所述仪器布设点的周边半径为2~3m范围内用LAI2000测量得到相应地块的叶面积指数,然后分析两种仪器测量LAI的相关性以及误差。不同日期下2种仪器的测量结果散点图如图7所示。

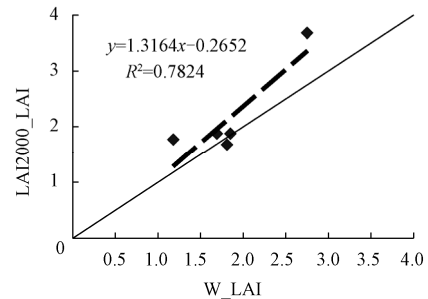


图7 本文仪器测量LAI(即W\_LAI)与LAI2000测量结果比较

Fig.7 Comparison for measurement results from the proposed instrument(W\_LAI) and LAI2000(LAI200\_LAI)

由图中可以看出,用本文设计的仪器测量的LAI数值与LAI2000测量值之间存在着很强的相关性,两者之间的线性回归的决定系数 $R^2$ 为0.78。两种仪器LAI的测量值的绝对偏差在0.03~0.93之间。造成两种仪器观测值之间的偏差主要原因可能来源于它们两者之间观测方式的差异,LAI2000的观测值是以本文系统部署点为中心,在距离中心2~3m范围内周边进行了8次测量进行平均计算得到的。这样看来,本文仪器的观测值应该属于LAI2000观测范围内的一个样本,LAI2000的观测值代表的是采样样方内的LAI数值的总体分布。当测量样方内植被生长状况存在非均匀分布的情况下,不同测量方式会引起测量结果的差异。这种情况在已有的研究成果中也有类似的报道。刘谔源等发现不同仪器之间的测量值之间虽然具有极大的相关性,但其最大均方根误差(RMSE)可达0.51<sup>[17]</sup>。

根据小麦的发育期以及小麦生长状况,在本文试验期间,小麦的叶倾角概率分布模式基本上属于喜直型<sup>[16]</sup>。虽然在抽穗期,部分叶片已经舒展开来,不再像拔节期那样直立,部分叶片的叶倾角可归类为喜平型。但是这时候由于麦穗已经占了冠层很大比例,植被对光能的截获能力受到叶穗的影响,这时测量得到的平均叶倾角应该是整体冠层所有地上部分器官的平均倾角,即不仅考虑叶片倾角,也要考虑麦穗倾角,由于麦穗均为直立生长,故这几个发育期的小麦的叶倾角概率密度函数仍然可以认为直立型。玉米的株型为紧凑型,叶片类型主要由2类组成,分别是平直型与弯曲线,正处于乳熟期。由于缺乏玉米叶倾角的实测数据,参考刘建栋等对紧凑型玉米株型测量结果,乳熟期玉米的叶倾角分布类型近似满足直立型,其实测平均叶倾角为59.1°<sup>[18]</sup>。根据式(8),计算得到直立型小麦冠层平均叶倾角的理论值60.6°。而根据本文算法计算得到的2种作物类型植被冠层平均叶倾角在56°~64°之间,本文测量值与理论值以及参考值的误差基本在±4°左右。

## 4 结论与讨论

基于无线传感器网络技术与植被冠层多角度间隙率模型, 本文实现了一种基于无线传感器网络技术的农作物冠层结构参数测量系统。数值模拟试验结果表明, 该系统的结构参数反演算法较为稳定, 当测量植被冠层透过率在 10% 的误差范围之内时, 反演得到的植被结构参数与实际参数非常接近, 相对误差在 5% 以内。通过对玉米与冬小麦冠层分别用本系统与 LAI2000 测量结果比较, 它们两者之间决定系数为 0.78, 两者的绝对误差则在 0.03~0.93 之间, 造成两者误差产生的原因, 主要是由于两者之间测量方法不同所致, LAI2000 测量是通过多点平均的方式获取一定区域的 LAI 测量值, 为使两者之间有更好的比对结果, 后续工作中将会增加更多的冠层下测量节点, 从而可以实现对非均匀分布冠层的多次采样, 而这点恰恰是无线传感器网络的优势所在。

本文所完成的测量系统, 除了能够应用于农作物结构参数测量之外, 可以进一步应用于农作物吸收光合有效辐射比、植被覆盖度的测量。前者与 LAI 之间存在较好的统计关系<sup>[19]</sup>, 如果经过大量的实测获取相应的实测数据, 则很容易得到两者的确定统计函数。而覆盖度参数, 可以近似等于太阳垂直照射时的冠层透过率, 因而, 当 LAI 和平均叶倾角计算完成之后, 可以进一步计算得到植被覆盖度。同时, 需要说明的是, 本文测量得到的叶面积指数属于有效叶面积指数, 如果要计算到真实叶面积指数, 则需要通过聚集指数进行修正。因此, 在后续工作中, 可以在研究区内按照一定的采样方案部署多个冠层下测量节点, 获取植被冠层透过率在不同采样单元内的分布规律, 然后可以被用来计算植被的聚集指数, 从而得到冠层真实叶面积指数数据。

致谢: 感谢中国科学院遥感应用研究所孙刚工程师对本文硬件设计给出的有益建议与指导。

### [参 考 文 献]

- [1] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 19–35.
- [2] 项月琴, 周允华. 从透过率推算冠层几何结构参数 (I) 直接辐射透过率的模拟计算[A]. 农田生态系统能量物质交换[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 57–67.
- [3] 王锦地, 李小文, Strahler A H. 树冠叶面积体密度和叶面积指数的间接估值方法研究[J]. *环境遥感*, 1995, 10(4): 268–297.  
Wang Jindi, Li Xiaowen, Strahler A.H. Indirect estimation on canopy leaf area volume density and leaf area index[J]. *China Remote Sensing of Environment*, 1995, 10(4): 268–297. (in Chinese with English abstract)
- [4] Jindi W, Xiaowen L, Yueqin X. Tree computed tomography algorithm validation using measurement data of coniferous and deciduous crowns[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(Suppl): 62–70.
- [5] Chen J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80(2/4): 135–163.
- [6] Sone C, Futakuchi K. Comparison of three methods for estimating leaf area index of upland rice cultivars[J]. *Crop Science*, 2009, 49(4): 1438–1443.
- [7] Brenner A, Cueto Romero M, Garcia H. A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface areas of individual bushes[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1995, 18(11): 1332–1340.
- [8] Demarez V, Duthoit S, Baret F, et al. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4): 644–655.
- [9] Zerger A, Viscarra Rossel R A, Swain D L, et al. Environmental sensor networks for vegetation, animal and soil sciences[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(5): 303–316.
- [10] Hart J K, Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3/4): 177–191.
- [11] Quinn N W T, Ortega R, Rahilly P J A, et al. Use of environmental sensors and sensor networks to develop water and salinity budgets for seasonal wetland real-time water quality management[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(9): 1045–1058.
- [12] Suri A, Iyengar S S, Cho E. Ecoinformatics using wireless sensor networks: An overview[J]. *Ecological Informatics*, 2006, 1(3): 287–293.
- [13] 施云惠, 王子才. 第一类 Fredholm 积分方程的解析解[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2000(1): 18–21.  
Shi Yunhui, Wang Zicai. L2(Rp) frames and the analytic solution for the first kind fredholm integral equations[J]. *Journal of natural science of heilongjiang university*, 2000, 17(1): 18–21. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨玮, 吕科, 张栋, 等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 198–202.  
Yang Wei, Lü Ke, Zhang Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on ZigBee[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010(3): 198–202. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张小全, 徐德应, 赵茂盛. 林冠结构、辐射传输与冠层光合作用研究综述[J]. *林业科学研究*, 1999, 12(4): 410–421.  
Zhang Xiaoquan, Xu Deying, Zhao Maosheng. Review on forest canopy structure, radiation transfer and canopy photosynthesis[J]. *Forest Research*, 1999, 12(4): 410–421. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhao Chunjiang, Wang Jihua, Wu Huarui, et al. Simulation models and deduction system for interspace description of wheat leaf shape[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(5): 221–225.
- [17] 刘镭源, 王纪华, 杨贵军. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 220–224.

- Liu Rongyuan, Wang Jihua, Yang Guijun, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 220—224. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘建栋, 于强, 吴乃元. 黄淮海地区夏玉米株型结构特征分析[J]. 中国农业气象, 2001, 22(1): 6—14.
- Liu Jiangdong, Yu Qiang, Wu Naiyuan. Analysis of the characters of plant type of summer maize in huanghuaihai region[J]. Agricultural Meteorology, 2011, 22(1): 6—14. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李贺丽, 罗毅, 薛晓萍, 等. 冬小麦冠层对入射光合有效辐射吸收比例的估算方法评价[J]. 农业工程学报, 2011(4): 201—206.
- Li Heli, Luo Yi, Xue Xiaoping, et al. Assessment of approaches for estimating fraction of photosynthetically active radiation absorbed by winter wheat canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2011(4): 201—206. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of crop structural parameters automatic measurement system

Qu Yonghua, Wang Jindi, Dong Jian, Jiang Fubin

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, 100875, China)

**Abstract:** The presented work aims to develop an automatic measurement system to collect crop parameters. In this paper, the structure parameters of land surface crops are considered. Crop structural parameters, such as leaf area index(LAI) and average leaf angle(ALA), are the main factors that can effect the solar energy re-assignment in the canopy. The traditional method to measure such parameters for crops, e.g. maize and wheat, is relied on the handy instrument, so it is difficulty to carry out the measurement on the large spatial region and on the long time series. An automatic measuring system which is designed on the basis of wireless sensors network(WSN) is present in this paper. The system is comprised of three types of node, i.e. two solar irradiance measurement nodes which are deployed beneath and above the canopy respectively, a sink node which is used to collect data from the measurement nodes, and the last type is a route node which is acted as a repeater of wireless communication. Canopy structural parameters can be calculated from the direct transmittance which is the ratio of sun radiation captured by the measurement node beneath and above the canopy on different sun altitude angles. Numeric simulation and the field preliminary validation results showed that the designed system could detect the directional canopy transmittance which is the basis to calculate the target parameters. And the further validation results revealed that the measured LAI values between LAI2000 instrument and our propose measurement system had high correlation coefficient and the calculated average leaf angles were very proximity to the theoretical values. So it is promising in the agriculture application to utilize the proposed system in measuring the crop structural parameters, and it can be an efficient way to measure such parameters in the large spatial region and on the long time series automatically.

**Key words:** crops, structural parameters, measurement, wireless sensor networks (WSN), canopy