

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.019

基于混合差分AIC算法的植物茎体超声回波位置检测

吕丹桔^{1,2} 施心陵¹ 董易¹ 王跃民¹ 王霞¹ 王超³

(1. 云南大学信息学院, 昆明 650091; 2. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 昆明 650224;

3. 西南林业大学林学院, 昆明 650224)

摘要: 在植物茎体超声回波检测中, 超声一次回波位置的确定是超声检测的基础。因茎体为非均匀、强衰减的介质, 超声在其传播过程中形成了复杂的传播路径, 这导致超声一次回波位置不易判定。提出了混合差分的最小信息准则(Akaike of information criterion, AIC)算法, 可自动有效地获取茎体超声一次回波位置信息。首先, 分析该算法的实现过程并通过仿真实验验证了该检测方法的准确性; 其次, 以茎体木块为检测对象, 分析了超声一次回波位置变化与茎体水分变化的关系, 发现超声一次回波位置可有效跟踪茎体水分变化。最后, 以不同土壤湿度环境下种植的向日葵为检测对象, 在09:00—19:00期间完成向日葵茎体超声一次回波位置的动态检测。实验结果表明, 向日葵茎体超声一次回波位置的变化与土壤湿度变化呈正相关。不同土壤湿度的向日葵茎体超声检测差异明显: 当土壤短时缺水, 茎体超声一次回波位置与土壤水分变化波动明显, 符合因短时缺水导致的植物抗旱调节活动与正常的水分吸收与蒸腾活动不断转换的生理活动特点; 当土壤水分充盈时, 茎体超声一次回波位置和土壤水分变化缓和, 同时, 在11:00—12:00期间, 出现土壤水分最小值与超声一次回波位置最大值, 符合因蒸腾作用导致茎体水分下降的生理特点。混合差分AIC算法可自动、有效地获取植物茎体的超声一次回波位置, 该信息可作为动态跟踪植物茎体生长状态的检测特征。

关键词: 植物茎体; 超声回波; 最小信息准则; 位置检测

中图分类号: TP391; S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0153-07

Automatic Primary Echo Position Detection on Ultrasound in Plant Stem with Mixed Difference of Akaike Information Criterion

LÜ Danju^{1,2} SHI Xinling¹ DONG Yi¹ WANG Yuemin¹ WANG Xia¹ WANG Chao³

(1. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China

2. School of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

3. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Detecting the primary echo position is the basis of ultrasonic detection for plant stems. Due to the inhomogeneity and strong attenuation of plant stems, the ultrasonic propagation paths in them are more complex than those in the homogeneous medium, which makes the primary ultrasonic echo position difficult to detect. An improved Akaike of information criterion (AIC) was proposed to detect the position of the ultrasonic primary echo in plant stems. First of all, the improved algorithm was analyzed and its accuracy was verified by a set of simulated signals. Then, a set of cutting wood samples was taken to the ultrasonic detection in the process of the water absorption. The results showed that ultrasonic primary echo positions dynamically indicated changes of water content in wood. Finally, living sunflowers with different soil moistures were set to the ultrasonic detection from 09:00 to 19:00 in situ. The results showed that the soil moisture and the primary ultrasonic echo position had the positive correlation. Meanwhile, the results showed the ultrasonic detection of sunflower stems with different soil moistures were significantly distinct. When the soil was short of water, the primary echo position and the soil moisture both fluctuated greatly and accordantly, which was consistent with the physiological activities, switching from drought resistance regulation to normal water absorption and transpiration. In contrast,

收稿日期: 2017-11-30 修回日期: 2018-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61661050)和昆明市林业信息工程技术研究中心重点项目(2015FIA02)

作者简介: 吕丹桔(1977—), 女, 博士生, 西南林业大学副教授, 主要从事林业信息智能检测与分析研究, E-mail: lvdanjv@hotmail.com

通信作者: 施心陵(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理与控制研究, E-mail: lshi@ynu.edu.cn

when the soil moisture was filling, the primary echo position and the soil moisture both vitiated slightly. Under this condition, it was found that the soil moisture reached minimum value and the primary echo position reached maximum values in 11:00—12:00, which were consistent with the dropped water content in stems to the minimum caused by the strongest transpiration at that time. Therefore, the primary echo position of plant stems detected by mixed difference AIC can be a feature to the dynamic detection of the growth status of plant stems.

Key words: plant stem; ultrasonic echo; Akaike of information criterion; position detection

0 引言

植物茎体生长是其自身发展和长期受环境影响的结果,这一结果表现为从树皮至髓形成了差异很大的茎体结构^[1-2]。利用先进设备对植物茎体的内部性质进行检测,研究动态的茎体结构生长特点、探寻植物茎体内部的液体动态变化已成为研究热点^[3-6]。超声检测具有无损在线检测优势^[7-8],为动态跟踪植物茎体生长状况提供了有效的检测手段^[9-10];但因植物茎体是非均匀各向异性的非金属材料,茎体内部存在着广泛复杂的声阻抗不同的界面^[11-12],导致超声波在其中传播时,产生多次折射与反射,形成复杂的超声回波信号^[13-14]。这种复杂性造成植物茎体超声基础参数(超声一次回波位置)提取困难^[15-17]。目前,常用的超声一次回波检测法有包络法^[18-19]和最小信息准则(AIC)算法^[20-21]。包络法是根据阈值电平判定一次回波的位置信息,但不同植物茎体结构差异显著^[1-2],导致检测不同植物茎体时需设定不同的阈值,影响检测结果的一致性^[18]。AIC算法无需设定阈值,它利用全局最小值有效区分噪声部分与超声回波,准确发现超声回波的初动位置^[23]。研究者依据不同的研究对象,相继提出了基于AIC的改进算法,如AIC与小波的混合算法提高了超声一次回波位置检测的可靠性^[24];利用加权平均的AIC算法在临床医学中实现了快速自动的超声肿瘤检测的回波位置定位^[25]。因植物茎体为强衰减非均匀的物质,超声回波信号受到较强的噪声干扰^[26-27],超声一次回波位置不易检测。针对上述问题,本文提出混合差分AIC算法,以期实现准确、自动提取植物茎体超声一次回波位置信息的目的。

1 植物茎体超声回波 AIC 算法的一次回波位置检测分析

因为植物茎体是一种非金属、非均匀的各向异性介质,超声回波传播路径复杂、能量衰减比较严重,导致一次与多次的茎体超声回波信号难以区分^[11,14],从而影响了超声一次回波位置确定。

AIC 超声一次回波检测原理:假设回波信号

$s(k)$ 由具有自相关性的局部平稳信号和噪声干扰信号交替出现而组成。AIC 信号计算公式^[24]为

$$s_{AIC}(k) = k \lg(s_{\text{var}}(s(1, k))) + (N - k + 1) \cdot \lg(s_{\text{var}}(s(k + 1, N))) \quad (1)$$

其中

$$s_{\text{var}}(s(i, j)) = \sigma_{j-1}^2 = \frac{1}{j-i} \sum_{l=i}^j s_{\text{var}}(s(l, l) - \bar{s})^2 \quad (2)$$

式中 $s(1, k)$ ——超声回波从采样点 1 至采样点 k 的采样信号

$s_{\text{var}}(s(1, k))$ —— $s(1, k)$ 的方差

\bar{s} —— $s(i, j)$ 的均值

i, j ——超声回波采样点序号, $i \leq j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$

N ——超声回波采样信号总数

k ——超声回波采样点序号, $k = 1, 2, \dots, N$

茎体超声回波信号 $s(k)$ 根据式(1)计算 AIC 信号 $s_{AIC}(k)$, $s_{AIC}(k)$ 的全局最小值 $s_{AIC_{\min}}$ 所处的位置即是一次回波位置(信号与噪声交接位置)。当超声一次回波位置确定后,便可计算超声回波在茎体内的回波速度等参数,为有效准确构建植物茎体超声图像奠定基础。

植物茎体的超声回波信号的构成特点如图 1 所示。信号由茎体超声回波信号与噪声信号(因植物茎体的强衰减特性,使茎体回波信号被噪声淹没)交替出现构成。图 1 中,当采用 AIC 算法确定超声一次回波位置时,由 $s_{AIC_{\min}}$ 确定的位置并非是超声一次回波位置,而是超声一次回波内超声信号与噪声的交接处;真正一次回波位置是出现在 $s_{AIC_{\min}}$ 所处位置后的第 1 个局部凸拐点处。因而采用经典的 AIC 算法是无法准确获取植物茎体超声一次回波位

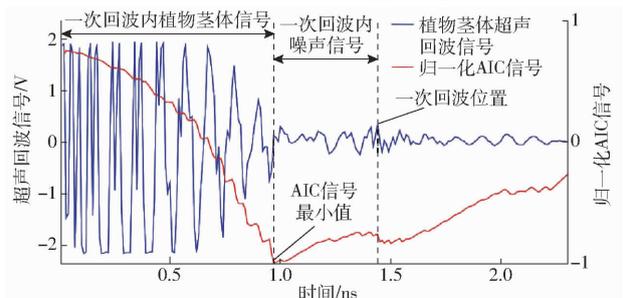


图 1 检测 2 cm 厚木块的超声回波及归一化 AIC 曲线

Fig. 1 Ultrasound in 2 cm block and AIC curve

置信息的。

2 混合差分AIC算法

首先,利用差分运算将植物茎体超声一次回波处的AIC位置信息突显;通过AIC算法与差分AIC算法混合,抑制差分干扰,最终准确计算出超声一次回波位置。具体步骤如下:

(1) 利用式(1)计算茎体超声回波AIC信号 $s_{AIC}(k)$ 。

(2) 求取 $s_{AIC_{min}}$ 对应的位置信息 k_{min} , 从 $s_{AIC}(k)$ 的 $k_{min} + 1$ 位置处截取 $s_{AIC}(k)$, 记为 $s_{AIC_{seg}}(n)$ 。

n 为截断 s_{AIC} 信号的采样序号, $n = k_{min} + 1, k_{min} + 2, \dots, N$ 。

(3) 对 $s_{AIC_{seg}}(n)$ 进行 M 阶差分运算, 得 $s_{Diff_{AIC_{seg}}}(n)$, 并归一化。

$$s_{Diff_{AIC_{seg}}}(n) = \Delta^M s_{AIC_{seg}}(n) = \Delta^{M-1} s_{AIC_{seg}}(n+1) - \Delta^{M-1} s_{AIC_{seg}}(n) \quad (3)$$

式中 Δ^M —— M 阶差分方程

(4) 计算 $s_{AIC_{seg}}$ 包络, 并归一化。

$$s_{Env}(n) = s_{AIC_{seg}}^3(n) \quad (4)$$

式中 $s_{Env}(n)$ —— 信号 $s_{AIC_{seg}}$ 的包络

因超声回波信号存在相位变化的情况, 故包络获取时保留上、下包络特性。

(5) 计算归一化混合差分AIC信号。

$$s_{Mix_{AIC}}(n) = s_{Env}(n) s_{AIC_{seg}}(n) \quad (5)$$

式中 $s_{Mix_{AIC}}(n)$ —— 混合差分AIC信号

该信号的最大值出现位置即为超声一次回波位置。

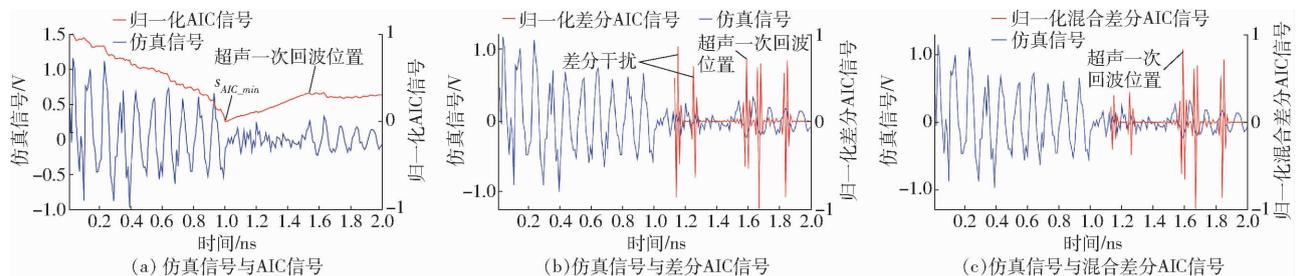


图2 混合差分AIC算法仿真

Fig. 2 Processing diagrams of mixed difference AIC

表1 仿真结果

Tab. 1 Experiment results of simulation signals

仿真信号 序号	$s_{AIC_{min}}$ 位置/ns	一次回波位置/ns	
		观测值	混合差分AIC算法
1	1.01	1.53	1.53
2	1.01	1.53	1.54
3	1.01	1.56	1.59

3.2 植物茎体超声一次回波实验

3.2.1 实验装置

实验装置采用基于LabVIEW的超声射频回波

混合差分AIC算法在突显植物茎体超声一次回波处的位置信息的同时,有效抑制了干扰,实现了超声一次回波位置信息的自动、准确检测。

3 仿真与实验

3.1 一次回波位置检测仿真

为了验证本文算法检测的有效性,根据上述植物茎体超声回波信号的组成特点,利用Matlab仿真了3组超声回波信号。图2a为其中1组仿真信号 $s(k)$: 0~1 ns为具有衰减特性的茎体回波信号, 1~1.55 ns为因衰减被噪声淹没的回波信号, 即噪声信号, 1.56~2.0 ns为超声一次回波信号。1.56 ns处为超声一次回波位置。

根据超声回波信号 $s(k)$ 计算AIC信号 $s_{AIC}(k)$, 如图2a所示。 $s_{AIC}(k)$ 信号从 $s_{AIC_{min}}$ 的位置 k_{min} 之后开始截取, 获得 $s_{AIC_{seg}}$, 该段信号不包含 s_{AIC} 的最小值。将截取后的 $s_{AIC_{seg}}$ 信号进行差分运算, 得 $s_{Diff_{AIC_{seg}}}$ 。 $s_{Diff_{AIC_{seg}}}$ 信号突显了一次回波位置处的局部最大凸拐点特征, 但与此同时, $s_{Diff_{AIC_{seg}}}$ 会出现差分干扰, 如图2b在1.15 ns和1.25 ns附近出现的干扰。为了排除上述差分干扰, 根据AIC算法的自相关性的局部平稳特性, 将 $s_{Diff_{AIC_{seg}}}$ 与 $s_{AIC_{seg}}$ 相乘, 构成归一化混合差分AIC信号 $s_{Mix_{AIC}}$, 如图2c所示。通过判断 $s_{Mix_{AIC}}$ 的最大值, 可自动确定一次回波位置为1.59 ns处。仿真结果如表1所示, 该算法获取的超声一次回波位置平均误差为0.01 ns。结果表明混合差分AIC算法可有效准确获取信号一次回波位置信息。

信号检测装置^[27], 检测设备参数设置为超声脉冲发射频率1 kHz, 脉冲宽度1 000 ns, 非金属超声探头频率1 MHz, 采样频率为10 MHz, 采样触发为上升沿, 超声补偿增益为50 dB, 2 000个采样点/触发。实物检测现场图如图3所示。

3.2.2 木块超声一次回波位置检测

植物茎体对液体变化最为敏感^[5]。为了分析植物茎体超声一次回波位置, 动态跟踪茎体中液体的变化, 对茎体样品进行浸水前后超声检测。实验



图3 植物茎体超声回波检测现场图

Fig.3 Ultrasonic detection picture of plant stem

选取3个不同密度的尺寸为2 cm × 4 cm × 10 cm 植物茎体样品,经干燥处理后作为检测对象,超声检测厚度均为2 cm。实验对比检测浸水前与浸水24 h后的茎体木块,提取超声一次回波位置及超声回波速度。其中,超声回波速度 v_l 计算公式为

$$v_l = \frac{2D}{t} \quad (6)$$

式中 D ——超声回波在介质中经历的单程直线路径长度,m

t ——超声一次回波位置的出现时间,s

实验结果如图4所示,图4a为未浸水木块的超声回波信号,由于茎体的超声衰减大,导致超声一次

回波位置和 s_{AIC} 信号的局部凸拐点不明显。如图4a所示,通过差分 AIC 算法将超声一次回波位置处的局部凸拐点信息突显,并经混合差分 AIC 处理后,有效抑制干扰信息,准确定位超声一次回波位置在 1.34 ns 处。该样品在浸水 24 h 后的超声一次回波位置在 1.49 ns 处,如图4b所示。3个样品检测结果如表2所示。

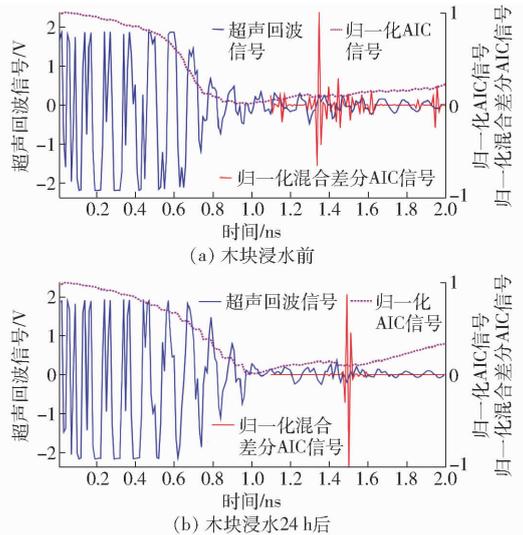


图4 木块浸水前后的超声回波信号、AIC 信号及混合差分 AIC 信号曲线

Fig.4 Ultrasounds and curves of AIC and mixed difference AIC before and after immersion of wood block

表2 浸水前后3个样品检测结果

Tab.2 Experiment results of three samples before and after immersion

样品	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	质量/g	一次回波位置/ns		超声回波速度/($m \cdot s^{-1}$)		
			观测值	混合差分 AIC 算法	观测值	混合差分 AIC 算法	
浸水前	样本 1	0.41	32.36	1.31	1.34	3 053.4	2 985.1
	样本 2	0.50	39.66	1.42	1.46	2 816.9	2 739.7
	样本 3	0.55	44.30	1.44	1.45	2 777.8	2 758.6
浸水后	样本 1	0.68	54.57	1.44	1.49	2 777.8	2 684.6
	样本 2	0.76	60.72	1.55	1.58	2 580.6	2 531.6
	样本 3	0.78	62.10	1.60	1.64	2 500.0	2 439.0

实验结果表明,用混合差分 AIC 算法计算的一次回波位置与通过观察后确定的位置信息基本一致。3个木块样品在浸水前后质量平均增加 20.35 g,浸水 24 h 后的超声一次回波位置出现时间均大于浸水前的位置,平均增加 0.15 ns,超声回波速度在木块浸水后均有所下降,波速平均下降了 276 m/s。上述结果说明,利用超声一次回波位置可无损动态跟踪茎体内液体的状态变化。

3.2.3 植物茎体样品超声一次回波位置检测

植物茎体在线检测为径向检测,为了进一步说明该检测方法也适用于圆柱体的茎体检测,实验选取直径 6 cm、高 6 cm 的杨树茎体截断样品,经干燥

处理后作为检测对象,检测方向如图 5a 所示。图 5b 为活体向日葵茎体样品。



图5 植物茎体检测样品

Fig.5 Detection samples of plant stems

对样品进行浸水前后超声检测,检测结果如

图 6 所示。浸水前由本文算法计算得超声一次回波位置为 2.61 ns 处,浸水 24 h 后变为 3.60 ns 处。其它检测参数如表 3 所示。

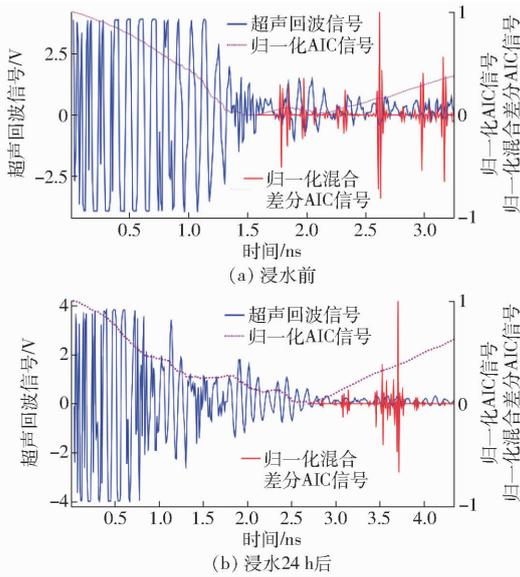


图 6 截断植物茎体的超声回波信号、AIC 信号及混合差分 AIC 信号曲线

Fig. 6 Ultrasounds and curves of AIC and mixed difference AIC of truncated plant stem

实验结果表明,检测对象为圆柱形时,用混合差分 AIC 算法计算的一次回波位置与通过观察后确

表 3 截断植物茎体超声检测参数

Tab. 3 Ultrasonic detection parameters of truncated plant stem

	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	质量/ g	一次回波位置/ ns		超声回波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	
			观测值	混合差分 AIC 算法	观测值	混合差分 AIC 算法
浸水前	0.61	104	2.66	2.61	4 511	4 615
浸水后	0.83	140	3.52	3.60	3 409	3 243

定的位置信息基本一致,可用于植物茎体活体径向超声检测。

3.2.4 活体向日葵日间茎体超声一次回波位置检测

为研究超声一次回波位置在活体植物茎体日间变化特点,对比分析不同土壤湿度下,超声一次回波位置的变化。实验选取 2 株盆栽健康生长向日葵作为检测对象。实验前 1 天,样品 1 正常浇水 100 mL,样品 2 不浇水。实验所用设备为 ZY-05 型土壤湿度检测仪和 AR837 型空气温湿度检测仪。超声探头放置于样品茎体距土壤表面 6 cm 处,如图 5b 所示。其中,样品 1 检测处的周长为 4 cm,样品 2 检测处周长为 7 cm。检测日期为 2017 年 7 月 13 日,检测时段为 09:00—19:00,检测频率为 1 次/h。实验结果如表 4 和图 7 所示。

表 4 向日葵日间检测数据

Tab. 4 Detecting data of sunflowers in daytime

检测参数	样本检测处		检测时刻										
	周长/cm		09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
空气温度/ $^{\circ}C$			20.3	19.5	20.6	23.6	23.5	22.2	21.5	20.9	21.1	21.2	21.0
空气湿度/%			78	82	77	64	61	73	72	74	74	76	81
土壤湿度/%	4		62	63	60	60	63	65	65	65	65	65	70
	7		70	68	45	70	50	60	50	60	60	70	70
超声一次回波位置/ns	4		1.32	1.42	1.38	1.39	1.41	1.42	1.42	1.41	1.43	1.42	1.44
	7		1.51	1.43	1.93	2.07	1.42	1.68	1.43	1.87	1.43	1.47	1.84
超声回波速度/($m \cdot s^{-1}$)	4		1 929	1 793	1 845	1 832	1 806	1 793	1 793	1 806	1 781	1 793	1 768
	7		2 951	3 116	3 206	2 153	3 138	2 653	3 116	2 383	3 116	3 032	2 422

实验结果表明,向日葵茎体超声一次回波位置变化与土壤湿度变化存在一定的相关性,两者总体变化趋势基本保持一致。根据表 4 样品 1(12:00—18:00)及样品 2(11:00—16:00)的超声一次回波位置与土壤湿度的数据进行拟合,得到决定系数为 0.92。样品 1 土壤湿度的平均值为 64%,超声一次回波位置均值为 1.40 ns,超声回波平均速度为 1 813 m/s;样品 2 的土壤湿度平均值为 61.8%,超声一次回波位置均值为 1.65 ns,超声回波平均速度为 2 844 m/s。由表 4 可知,样品 1 的超声回波速度低于样品 2 的超声回波速度。这与木块浸水实验结

果一致。

如图 7a 所示,当向日葵(样品 1)总体处于水分基本充盈时,样品 1 从 11:00—14:00 时,其茎体的超声一次回波位置变化为日间最活跃阶段,与植物此时进行的水分吸收与蒸腾活动明显、茎体内具有较低的水分特点相符。

如图 7b 所示,当向日葵(样品 2)短时轻度土壤缺水时,在 12:00 时,超声一次回波位置出现时间出现局部最大值 2.07 ns,超声回波速度出现局部最小值 2 153 m/s(表 4),表明此时植物茎体的水分增加。该检测结果符合植物为保持一定的水分,叶片

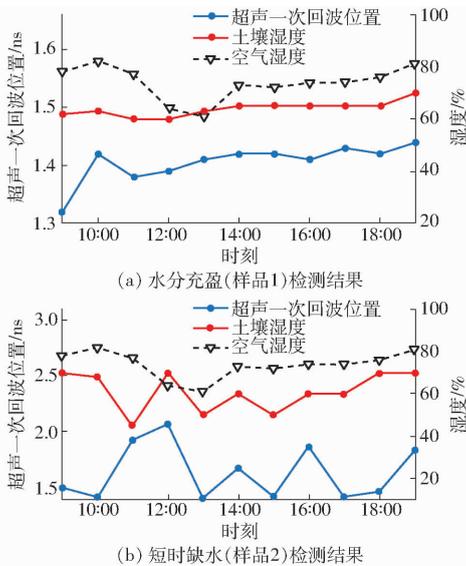


图7 向日葵水分充盈与短期缺水检测参数变化曲线

Fig.7 Parametric curves of water filling and short term water shortage in sunflowers

水势下降,气孔关闭,限制 CO_2 摄取和光合作用速率,蒸腾活动受到抑制,导致植物体内水分累积增加的生理现象。此后,因体内水分充足,样品2进行正

常的水分吸收与蒸腾活动,在 13:00 时,蒸腾活动为全天最活跃时期,茎体内水分迅速下降,土壤湿度下降至 50%,超声一次回波位置出现时间也降至 1.42 ns,回波速度升至 3 138 m/s(表4)。

4 结论

(1)针对植物茎体的超声信号特点,混合差分 AIC 算法可自动有效检测植物茎体超声一次回波位置信息。作为非均匀的各向异性的非金属材质,植物茎体内部存在着广泛复杂的声阻抗不同界面,形成复杂的超声回波信号。实验结果表明,利用混合差分 AIC 算法可实现植物茎体超声一次回波位置的准确获取,为植物茎体超声检测奠定研究基础。

(2)实测木块浸水实验结果表明,超声一次回波位置可有效跟踪植物茎体水分的变化特点。

(3)向日葵从 09:00—19:00 的超声一次回波位置与土壤湿度的变化趋势基本一致,不同土壤湿度的向日葵,其茎体内液体含量变化不同,利用超声一次回波可有效跟踪其变化特点。

参 考 文 献

- XIAO Y, JIE Z, WANG M, et al. Leaf and stem anatomical responses to periodical waterlogging in simulated tidal floods in mangrove *Avicennia marina*, seedlings [J]. *Aquatic Botany*, 2009, 91(3):231-237.
- ABBASI M, FAGHANI E, KHANI A H. Evaluating drought resistant wheat cultivars based on stem anatomical characteristics [J]. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2017, 5(3):332-340.
- TRTIK P, DUAL J, KEUNECKE D, et al. 3D imaging of microstructure of spruce wood [J]. *Journal of Structural Biology*, 2007, 159(1):46.
- 赵燕东, 高超, 张新, 等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):310-316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160142&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042.
- ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):310-316. (in Chinese)
- ZHOU H, SUN Y, TYREE M T, et al. An improved sensor for precision detection of in situ stem water content using a frequency domain fringing capacitor [J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1):471-481.
- MINER G L, HAM J M, KLUITENBERG G J. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 246:86-97.
- ARCINIEGAS A, PRIETO F, BRANCHERIAU L, et al. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees [J]. *Trees*, 2014, 28(6):1559-1567.
- ESPINOSA L F, ARCINIEGAS A F, PRIETO F A, et al. Standing tree decay detection by using acoustic tomography images[C]// *Twelfth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 2015:1-4.
- BERTOLDO C, GONÇALVES R. Influence of measurement position, tree diameter, and bulk wood density on models that predict wave propagation velocity in logs according to the velocity in trees [J]. *Forest Products Journal*, 2015, 65(3-4):166-172.
- 高珊. 环境温度对美国红松活立木及原木声波传播及力学特性的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012. GAO Shan. Effects of environmental temperature on acoustic and mechanical properties of American red pine standing trees and logs [D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- HASEGAWA M, TAKATA M, MATSUMURA J, et al. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(3):296-302.
- 彭辉, 蒋佳荔, 詹天翼, 等. 木材密度和含水率对其轴向超声波传播速度的影响[J]. *林业科学*, 2016, 52(10):117-124. PENG Hui, JIANG Jiali, ZHAN Tianyi, et al. Influence of density and moisture content on ultrasound velocities along the longitudinal direction in wood [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(10):117-124. (in Chinese)

- 13 余斌, 高珊, 王立海, 等. 超声波在原木内部传播理论研究[J]. 森林工程, 2014, 30(1): 92-95.
YU Bin, GAO Shan, WANG Lihai et al. The study on the propagation law of ultrasonic wave in log [J]. Forest Engineering, 2014, 30(1): 92-95. (in Chinese)
- 14 HASEGAWA M, YANO Y, MATSUMURA J, et al. Prospects for within-tree variation of the acoustoelastic behaviors in Japanese cedar [J]. NDT and E International, 2012, 49(7): 57-63.
- 15 高珊, 王立海, 杨冬辉, 等. Sylvatest-Duo 装置的探针触式与计示压强对木材超声波测量精度的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(5): 875-880.
GAO Shan, WANG Lihai, YANG Donghui, et al. Prob-wood contact and gauge pressure with Sylvatest-Duo for precision ultrasonic measurements of wood [J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2016, 33(5): 875-880. (in Chinese)
- 16 ENAYATI A. Investigation on transversal variation of poplar tension wood quality using ultrasound wave parameters [J]. Organization Studies, 2016, 33(5-6): 791-814.
- 17 SAADATNIA M, BRANCHERIAU L, GALLET P, et al. Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood [J]. Bioresources, 2011, 6(2): 1172-1185.
- 18 BECALL F C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties [J]. Wood Science and Technology, 2002, 36(3): 197-212.
- 19 YANAGIDA H, TAMURA Y, KIM K M, et al. Development of ultrasonic time-of-flight computed tomography for hard wood with anisotropic acoustic property [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(8A): 5321-5325.
- 20 AKAIKE H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle [J]. International Symposium on Information Theory, 1973, 1: 610-624.
- 21 SCHUBERT S I. A simple anisotropy correction procedure for acoustic wood tomography [J]. Holzforschung, 2006, 93(5): 567-573.
- 22 ST-ONGE A. Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data [J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2011: 4424.
- 23 ZHANG H. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(5): 1904-1912.
- 24 LI C, HUANG L, DURIC N, et al. An improved automatic time-of-flight picker for medical ultrasound tomography [J]. Ultrasonics, 2009, 49(1): 61.
- 25 张训亚. 兴安落叶松木材性质的声-超声技术预测[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
ZHANG Xunya. Modeling wood properties of Larch using acousto-ultrasonic technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Science, 2011. (in Chinese)
- 26 ARCINIEGAS A, BRANCHERIAU L, LASAYGUES P. Tomography in standing trees: revisiting the determination of acoustic wave velocity [J]. Annals of Forest Science, 2015, 72(6): 685-691.
- 27 吕丹桔, 施心陵, 董易, 等. 基于超声射频的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 195-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171024&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.024.
LÜ Danju, SHI Xinling, DONG Yi, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on ultrasonic radio frequency [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 195-201. (in Chinese)