

基于柱面近场声全息的植物病害胁迫分析*

王秀清 王尹超 杨世凤 赵继民 张静雅

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

【摘要】 为了解植物受病害胁迫时产生声发射信号的分布规律,探寻植物病害程度与声发射位置的关系,利用近场声全息技术,建立了基于空间声场变换的重建模型,给出了重建算法,并利用 Matlab 软件进行模拟仿真。通过不断调整全息柱面尺寸、测量点间距、重建半径等参数,获取最佳参数配置,并利用窗函数去除混入的高斯噪声。仿真结果显示,可用于指导实际全息检测和定位,实现对植物病害的声发射信号的准确识别与定位。

关键词: 植物 病害胁迫 近场声全息 声发射信号

中图分类号: S122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0179-05

Plant Disease Stress Analysis Based on Cylindrical Near-field Acoustic Holography

Wang Xiuqing Wang Yinchao Yang Shifeng Zhao Jimin Zhang Jingya

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract

When plant suffered from disease, the acoustic emission signal released. In order to understand the acoustic emission signal distribution regularities, the relationship between the degree of plant disease and acoustic emission signal's position was analyzed. The near-field acoustic holography based on spatial transformation of sound fields was used for the purpose of reconstruction model. The reconstruction algorithm was given out in order to realize the simulation through Matlab software. The parameters, such as the size of holographic cylindrical, the spacing of measurement points, the holographic radius, the reconstruction radius and so on should be adjusted constantly to obtain the optimal parameters. In view of the impact of environmental noise and acoustic emission signal characteristics, the window function was introduced into ultrasonic frequency signal to obtain the optimum simulation results. It was showed that cylindrical near-field acoustic holography based on spatial transformation of sound fields can be applied for recognition and positioning of acoustic emission signal accurately.

Key words Plant, Disease stress, Near-field acoustic holography, Acoustic emission signal

引言

病虫害监测多集中于遥控遥测和图像处理方面^[1],对植物病害胁迫下声发射信号的研究少有报道。相关研究表明:植物在遇病害、水分等胁迫时会产生可检测的声发射(AE)信号。为了更好地判断病害胁迫程度、探究病害原因和影响因素,为精准防

治提供依据,可通过分析 AE 信号源位置分布,建立 AE 信号位置与不同病害种类、时期及程度的关系模型,从而指导自动化农药喷施。

近场声全息(NAH)技术^[2-5]兴起于 20 世纪 80 年代,其原理是在紧靠被测声源物体表面的测量面上记录全息数据,通过空间声场变换算法重构三维空间声场。由于 NAH 技术可通过记录有限场点的

收稿日期: 2011-12-01 修回日期: 2012-03-02

* 国家自然科学基金资助项目(61071207)

作者简介: 王秀清,教授,主要从事信息检测与智能化技术研究,E-mail: lwxqly@163.com

全息声压,实现重建和预测整个三维空间场内声学信息,现已广泛应用于汽车、水下舰艇、航空航天器等低频声源定位。

NAH 技术多专注于低频段的定位与实现,对于高频段及超高频段的研究与应用较少,在农业领域也少有应用。本文将 NAH 技术应用于植物病害胁迫声源定位研究。

1 基于空间声场变换的柱面 NAH 基本算法

近场声全息是在声源附近建立一个测试的扫描面,此扫描面可为平面、柱面或球面,采用传声器阵列或机器人定位的传声器组进行测试,利用空间声场变换(STSF)计算出近场区域的平行面内的声场。测试得到的 2-D 声场数据能够“变换”到其他面上形成声场的完整 3-D 描述。STSF 能计算声压、声强或质点速度等任意声场参数与位置之间的关系。

考虑到植物茎秆为柱体,利用柱面进行测量可获取更多、更准确的声场信息,提高重建精度,故采用柱面作为全息测量面进行重建。由波动方程,可得不依赖于时间变量的稳态声场的 Helmholtz 方程,即

$$\nabla^2 p(x,y,z) + (\omega/c)^2 p(x,y,z) = 0 \tag{1}$$

其中
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

式中 $p(x,y,z)$ ——空间点的复声压

- ω ——角频率
- r ——圆柱坐标系中的半径
- θ ——圆柱坐标系中的角度
- z ——圆柱坐标系中的高度
- c ——声速,取 $c = 340 \text{ m/s}$

令 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$,将直角坐标系转换为柱面坐标系,令 $k = \omega/c$ 。

假设声场为自由声场,则可将柱面所包围的无源三维空间区域内任意场点上的复声压 $p(r, \theta, z)$ 分解变量^[6]为 $p(r) \cdot p(\theta) \cdot p(z)$,其中 $p(r)、p(\theta)、p(z)$ 分别只与 $r、\theta、z$ 变量有关。将分离变量后的复声压代入柱面坐标系下的 Helmholtz 方程,得到

$$\frac{r}{p(r)} \cdot \frac{dp(r)}{dr} + \frac{r^2}{p(r)} \cdot \frac{d^2p(r)}{dr^2} + \frac{1}{p(\theta)} \cdot \frac{d^2p(\theta)}{d\theta^2} + \frac{r^2}{p(z)} \cdot \frac{d^2p(z)}{dz^2} = -r^2 k^2 \tag{2}$$

令
$$\frac{1}{p(\theta)} \cdot \frac{d^2p(\theta)}{d\theta^2} = -\xi^2 \tag{3}$$

$$\frac{1}{p(z)} \cdot \frac{d^2p(z)}{dz^2} = -k_z^2 \tag{4}$$

分别解得
$$p(\theta) = A e^{i\xi\theta} \tag{5}$$

$$p(z) = B e^{ik_z z} \tag{6}$$

式中 $A、B$ ——待定系数

k_z —— z 的波数域形式

将式(3)和式(4)代入式(2),可得

$$r^2 \frac{d^2p(r)}{dr^2} + r \frac{dp(r)}{dr} + (\xi^2 + r^2 k_r^2) p(r) = 0 \tag{7}$$

其中
$$k_r = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_z^2} & (k_z^2 \leq k^2) \\ i \sqrt{k_z^2 - k^2} & (k_z^2 > k^2) \end{cases}$$

式中 k_r —— r 的波数域形式

方程(7)的行波解为

$$p(r) = CH_n^{(1)}(k_r r) + DH_n^{(2)}(k_r r) \tag{8}$$

式中 $C、D$ ——待定常数

$H_n^{(1)}(k_r r)$ ——阶数为 n 的第一类 Henkel 函数

$H_n^{(2)}(k_r r)$ ——阶数为 n 的第二类 Henkel 函数

本文主要研究外辐射问题,只需关注第一类 Henkel 函数。由式(5)、(6)、(8)可得 Helmholtz 方程在柱面坐标系下的通解为

$$p(r, \theta, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{i\xi\theta} \int_{-\infty}^{+\infty} EH_n^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z} dk_z \tag{9}$$

式中 E ——待定常数

若将 Fourier 级数看作广义 Fourier 变换,则 $EH_n^{(1)}(k_r r)$ 为 $p(r, \theta, z)$ 的二维 Fourier 变换,即

$$P(r, k_\theta, k_z) = EH_n^{(1)}(k_r r) \tag{10}$$

令 r_s 为重建横截面半径、 r_h 为全息横截面半径 ($r_s < r_h$)、 θ 的范围为 $0 \sim 2\pi$,可得重建柱面和全息柱面上的声压二维 Fourier 变换之间的关系为

$$P(r_s, k_\theta, k_z) = \frac{H_n^{(1)}(k_r r_s)}{H_n^{(1)}(k_r r_h)} P(r_h, k_\theta, k_z) \tag{11}$$

式(11)即为基于 STSF 的柱面 NAH 重建公式^[7-10]。

2 植物病害胁迫分析模型

以植物茎秆作为被测对象,假设植物 AE 信号位于植物中心位置,以此声源点作为空间坐标原点建立空间直角坐标系(r, θ, z)如图 1 所示。其中 h_1 为全息面高度, c_1 为全息横截面周围长。利用均匀安装在全息面上的传声器阵列获取 AE 信号。通过重建算法实现对横截面半径为 r_s ($r_s < r_h$) 的声源柱面的重建。

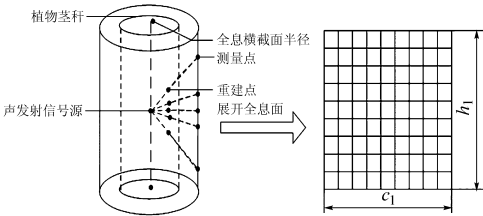


图 1 全息变换的空间关系图

Fig. 1 Space relation diagram of holographic transformation

3 仿真

3.1 仿真流程

首先,获取空间域声源声压信息,经二维离散傅里叶变换使声压信号由空间域变换至波数域,进行声源重建。为实现超声波声源的识别,必要时在波数域增加窗函数对声压进行滤波,再进行声压重建,并经离散二维傅里叶逆变换使其由波数域变换至空间域。

软件仿真主要分为 4 个阶段:参数设定、输入数据、数据处理和决策输出。首先需要对相关全息参数进行设定,如全息面尺寸、测量点间距、全息横截面半径和重建横截面半径等参数。模拟植物超声发射信号,获取测量声压,进行声压重建,从而得到重建声压信息,显示声源位置。

3.2 仿真结果与分析

有关研究表明,植物在水或病害胁迫下的声发射频率分布在一个较宽的频带范围内,几乎包含了 0 ~ 1 MHz 的所有频段。由于在低频范围内,环境噪声比较大,为避免环境噪声对声发射测定可能产生的影响,目前的仪器均测定超声波。本实验采用 R15 型声发射传感器进行测量,其谐振频率为 150 kHz,工作频率范围为 50 ~ 200 kHz,故选用 50 ~ 200 kHz 作为仿真频率范围。通过不断修改全息面尺寸(即全息横截面半径及全息柱面高度)、测量点间距及重建横截面半径等实验参数,探索达到最佳仿真效果的参数范围,实现声源重建。

假定声发射信号源在植株轴向中心,故可认为所产生的声场同圆柱的转角无关,仅随 z 坐标的变化而变化,可将柱面展开显示,凸起位置即为 AE 信号源位置。

3.2.1 单声源仿真

设点声源(声发射信号源)半径为 0.001 m,位于圆柱体的中心位置,其振动频率为 50 kHz,振速为 2.5 m/s;全息圆柱面以点声源为中心包围点声源,其底面半径为 0.1 m、高为 0.9 m,测量点为 9 个 $\times$ 9 个;重建圆柱面的底面半径为 0.002 m;三维重建声压图、重建声压与理论声压二维对比如图 2、3 所示。

由图可识别声源位置,但重建声压和理论声压的幅值不吻合,存在一定误差。

不改变点声源的基本参数,修改相关参数。将全息圆柱面底面半径缩减至 0.03 m,其他参数不变。三维重建声压图、重建声压与理论声压二维对比图如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知,声源声压幅值凸显明显,各测量点的重建声压与相应理论声压吻合,可实现声源识

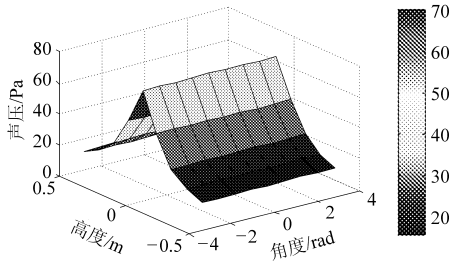


图 2 单声源三维重建声压图(半径 0.1 m)
Fig. 2 3-D reconstruction sound pressure for one source

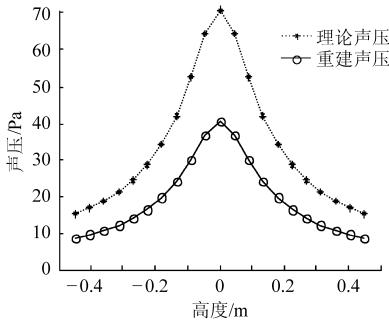


图 3 单声源重建声压与理论声压二维对比(半径 0.1 m)
Fig. 3 2-D comparison diagram of reconstruction sound pressure and theory sound pressure for one source

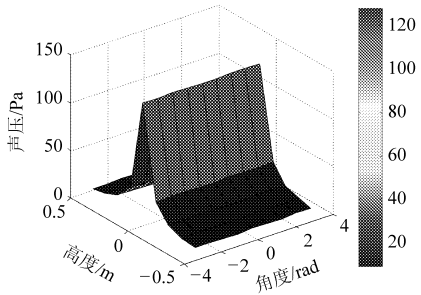


图 4 单声源三维重建声压图(半径 0.03 m)
Fig. 4 3-D reconstruction sound pressure for one source

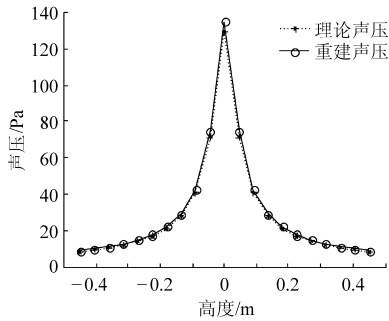


图 5 单声源重建声压与理论声压二维对比(半径 0.03 m)
Fig. 5 2-D comparison diagram of reconstruction sound pressure and theory sound pressure for one source

别。

经过不断调整参数进行仿真,全息柱面的底面半径取为重建柱面的底面半径的 10 ~ 20 倍时,可获取最佳仿真结果。获取声压信息的精度会随着全息柱面的高度以及测量点数的增加而提高^[11],但考虑到实际可操作性以及经济实用性,选取全息测量高

度为 0.9 m,测量点为 9 个×9 个。

3.2.2 双声源仿真

由于植物生理特殊性,声发射信号并非单一发生。简化起见,以双声源为例进行分析。理想状态下获取的三维重建声压图及重建声压与理论声压二维对比分别如图 6、7 所示。由图可判断在 $z = -0.2\text{ m}$ 和 $z = 0.3\text{ m}$ 处同时有声发射信号,声压强度分别为 350 Pa 和 250 Pa。通过计算可知这两点的声源频率分别约为 200 kHz 和 100 kHz。

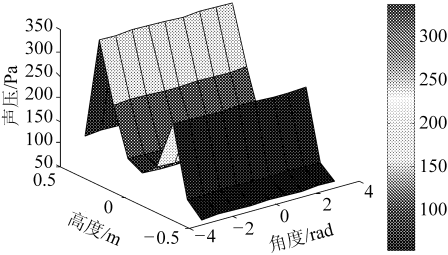


图 6 双声源三维重建声压图 (半径 0.03 m)
Fig. 6 3-D reconstruction sound pressure for two sources

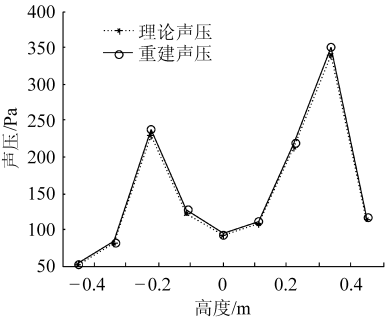


图 7 双声源重建声压与理论声压二维对比 (半径 0.03 m)
Fig. 7 2-D comparison diagram of reconstruction sound pressure and theory sound pressure for two sources

3.2.3 利用窗函数去噪

上述仿真均为理想状况,实际上,不可避免存在环境噪声等因素的干扰而不能准确识别声压信号。为此,引入白噪声作为噪声源进行滤波分析。将高斯白噪声加至频率为 150 kHz 的声源,使声压测量的信噪比为 35 dB,其三维重建声压图如图 8 所示。

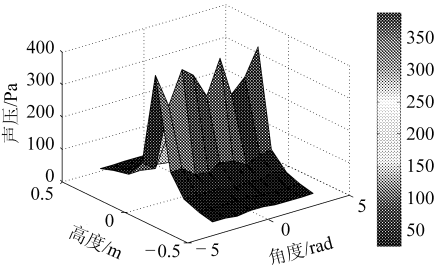


图 8 单声源含高斯噪声的三维重建声压图
Fig. 8 3-D reconstruction sound pressure with Gauss noise for one source

从图可以看出,全息重建对高空间频率的误差非常敏感,加入噪声后的重建声压值不稳定,不能识

别声源。采用 Veronesi 和 Maynard 提出的一种窗函数^[12]进行空间域加窗滤波以获取最优结果,其表达式为

$$W(kz) = \begin{cases} 1 - 1/[2e^{(k_z/k_c - 1)/\alpha}] & (k_z \leq k_c) \\ 1/[2e^{(1 - k_z/k_c)/\alpha}] & (k_z > k_c) \end{cases} \quad (12)$$

式中 α ——窗函数的陡度系数
 k_c ——截止波数

图 9、10 分别为经过滤波的重建声压图和理论重建声压图。经滤波后的重建声压分布与理论声压分布非常接近,可以准确地判别声源的位置和大小。

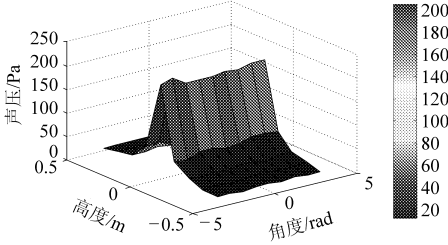


图 9 经滤波单声源含高斯噪声三维重建声压图
Fig. 9 3-D reconstruction sound pressure with Gauss noise after filter for one source

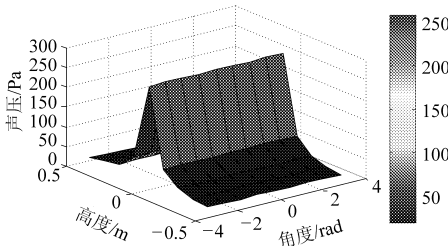


图 10 理论三维重建声压图
Fig. 10 3-D reconstruction theory sound pressure

综上,利用基于 STSF 的柱面 NAH 重建算法在经过合理设置相关参数之后,重建声压幅值与理论声压幅值很好吻合,能够通过重建声压的分布实现对高频率声源的准确识别与定位。通过 R15 型声发射传感器阵列获取声压信息,经重建算法即可获得不同病害程度下的声发射源位置的分布情况。对含有随机噪声的声源定位,可通过添加窗函数进行空间波数域滤波来实现。

4 结论

(1) 利用基于 STSF 的柱面 NAH 技术实现了对植物茎秆处产生的噪声发射信号的准确识别与定位。仿真结果表明:在一定的声源基本参数下,全息测量面以及重建面的相关参数设定直接影响实验效果的优劣。首先,全息测量面应远远大于被测对象(即被测点声源),一般,全息测量面与被测对象的距离不可过远,选取为被测点声源半径的 10~20 倍可获取最佳效果;其次,将重建半径设为等于或略大

于声源半径时,可保证重建效果的精准性。另外,测量点设置越多,获取声场信息越全面,重建越精准,但考虑实际安装及经济适用性等问题,在保证识别声源的情况下可适当缩减测量点数至合理点数。

(2) 考虑到实际情况会有噪声存在,为此,将其视为高斯白噪声并进行仿真,仿真表明:当信噪比小

于 35 dB 时,噪声对重建效果影响较大。采用窗函数进行空间域滤波,合理选取窗函数的陡度系数和截止波数,最终可获取最佳重建结果。关于窗函数的陡度系数和截止波数这两个基本参数的选取,可依据实验进行调整。

参 考 文 献

1 刘龙申,沈明霞,孙玉文,等. 基于 FPGA 的农田图像采集与 3G 无限传输系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(12): 186 ~ 190.
Liu Longshen, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Acquisition system and wireless transmission by 3G for farmland image based on FPGA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12):186 ~ 190. (in Chinese)

2 陈心昭. 噪声源识别技术的进展[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(5):609 ~ 614.
Chen Xinzhaoh. Progress of techniques for noise source identification[J]. Journal of Hefei University of Technology:Natural Science,2009,32(5):609 ~ 614. (in Chinese)

3 周广林,陈心昭,陈剑,等. 声全息技术的研究现状与展望[J]. 声学技术,2003,22(2):120 ~ 125.
Zhou Guanglin, Chen Xinzhaoh, Chen Jian, et al. Review and outlook of researches on acoustical holography [J]. Technical Acoustic, 2003, 22(2): 120 ~ 125. (in Chinese)

4 李卫兵,陈剑,于飞,等. 柱面内声全息技术在声源识别与定位中的应用[J]. 农业机械学报,2005,36(4):103 ~ 106.
Li Weibing, Chen Jian, Yu Fei,et al. Application of cylindrical interior NAH in the identification and localization of sound sources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(4):103 ~ 106. (in Chinese)

5 何元安,何祚镛. 用声场空间变换识别水下噪声源[J]. 应用声学,2000,19(2):9 ~ 13.
He Yuanan, He Zuoyong. Underwater noise source identification by use of spatial transform of sound field [J]. Applied Acoustics, 2000,19(2):9 ~ 13. (in Chinese)

6 于飞,陈剑,周广林. 声源识别的柱面声全息方法与数值实现研究[J]. 振动工程学报,2004,17(3):354 ~ 358.
Yu Fei, Chen Jian, Zhou Guanglin. Study on noise sources identification using cylinder acoustic holography method and its numerical implementation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2004,17(3):354 ~ 358. (in Chinese)

7 Williams E G. Regularization methods for near-field acoustical holography[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2001,110(4): 1 976 ~ 1 988.

8 Williams E G, Houston B H, Herdic P C, et al. Fast Fourier transform and singular value decomposition formulations for patch near-field acoustical holography[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003,114(3): 1 322 ~ 1 333.

9 Moohyung Lee, Stuart Bolton J. A one-step patch near-field acoustical holography procedure[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 122(3): 1 662 ~ 1 670.

10 郑凯,郑四发,杨殿阁. 声全息分析噪声场的空间频域重建算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(2):247 ~ 250.
Zheng Kai, Zheng Sifa, Yang Diange. Spacial frequency domain reconstruction method for acoustic holography analysis of noise fields [J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology, 2002, 42(2): 247 ~ 250. (in Chinese)

11 毛荣富,朱海潮,张劲松. 近场声全息 (NAH) 中减少测量点数的研究[J]. 声学技术,2009,28(3):287 ~ 294.
Mao Rongfu, Zhu Haichao, Zhang Jingsong. A study of measurement point reduction in near-field acoustic holography [J]. Technical Acoustic,2009,28(3):287 ~ 294. (in Chinese)

12 Veronesi W A, Maynard J D. Near-field acoustic holography (NAH)II. holographic reconstruction algorithms and computer implementation[J]. Journal of the Acoustical Society of America,1987,81(5):1 307 ~ 1 322.