

基于 Hough 变换提取土体介电常数的方法

王晋国,孟灵鑫,徐春龙

(长安大学 理学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了无损定性分析公路工程中填土路基的含水量,针对土体介电常数对含水量的变化非常敏感,研究一种快速提取土体介电常数的方法。基于此思想,通过探地雷达数据,应用现代数学理论中的 Hough 变换方法,利用计算机 Matlab 语言编程,快速提取电磁波在介质中的传播速度获取土体介质的介电常数。将所提取的介电常数数据与实际试验测试数据相比较,基本一致。研究结果表明:基于 Hough 变换提取土体介电常数在无损获取介质介电常数方面是一种行之有效的方法,它可作为一种无损快速检测技术,推广应用于填土路基工程质量的评定。

关键词:道路工程;Hough 变换;介电常数;波速

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Method for obtaining soil dielectric constant based on Hough transformation

WANG Jin-guo, MENG Ling-xin, XU Chun-long

(School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the water content of highway soil-fill roadbed, while the dielectric constant of soil body is sensitive to the change of water content in it, a fast method for obtaining the dielectric constants was studied. This research used ground penetrating radar and adopted the mathematical theory of Hough transformation and MATLAB programming languages to quickly extract the velocity of wave in the medium so as to obtain the dielectric constants. The data obtained in this way were largely in correspondence with the actual experimental data. The research results show that this is an effective method in obtaining dielectric constants in a non-destructive way, which can be popularized and applied in the quality evaluation of soil-fill roadbed project. 2 tabs, 4 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; Hough transformation; dielectric constant; wave speed

0 引 言

公路填土路基土体含水量是决定路基承载力的主要因素,如何应用探地雷达快速长距离连续检测土体路基的含水量,是公路无损检测技术目前亟待解决的难题。由于探地雷达接受的信号是电磁波,

当电磁波穿过土体路基时,对探地雷达信号影响最明显的电磁参量是土体的介电常数,路基土体的介电常数对含水量的变化响应非常敏感,所以从雷达信号中提取介质的介电常数来预测土体的含水量就有可能实现。

2010 年,王晋国等提出利用小波变换提取土体

介电常数计算含水量的方法,该方法对噪声的响应非常敏感,在实际应用中比较困难^[1]。国外研究者也研究了应用探地雷达检测土壤含水量的方法,这些方法要借助于现场试验测试数据才能完成,操作非常复杂^[2-4]。因此,研究一种便捷能快速无损定量提取土体介电常数的方法就显得非常重要。

由于 Hough 变换是一种现代数学图像处理技术,1994 年,Carlson 等提出将曲线的 Hough 变换用于空中雷达图像,进而提高了雷达检测目标的能力^[5];2002 年,徐毓等利用 Hough 变换,将航迹映射到参数空间进行聚类,从而达到航迹自动综合的目的^[6];2009 年,孔敏等提出基于规格化 Hough 变换的检测前跟踪算法^[7]。通过对 Hough 变换的特性分析和研究,本文首次提出将该变换推广应用于探地雷达数据,利用 Matlab 语言编程,快速提取探地雷达目标曲线进行波速估计,实现无损提取土体介质介电常数;并将提取的数据与试验数据进行了比较。结果表明,该方法在快速提取土体介电常数是切实可行的,该方法的优点是抗噪能力强,操作方便,将其应用于填土路基含水量的快速无损测量成为可能。

1 Hough 变换的基本思想

Hough 变换于 1962 年由 Paul Hough 提出,其常用于检测图像中直线、圆、椭圆等,还能够应用改进型的 Hough 变换提取一定函数关系描述的曲线。Hough 变换的基本原理是将空间中的曲线变换到相空间中去,通过检测相空间中的特定点,确定出该曲线的描述参数,从而提取曲线的空间特征。其基本思想为:

首先考察直线的情况,设方程式为 $y = mx + c$, (m 为斜率, c 为截距)在直线上任意点 (x_0, y_0) 满足此方程式,即下式成立

$$y_0 = mx_0 + c \quad (1)$$

在这里,如果将 (m, c) 看作为变量,则在 $m-c$ 平面上可以画出式(1)所描述的直线。将一条线上的每一点都进行同样的处理,在 $m-c$ 平面上可得到一组相交于一点 (m_0, c_0) 的直线群。这个交点即是所求参数的值,即特定点。如图 1 所示,通过点 A、B、C 的直线群在 $m-c$ 平面上分别为直线 A、B、C,这 3 条直线相交于点 (m_0, c_0) 。

具体用程序来实现直角坐标下直线的 Hough 变换,则存在 2 个问题:一是交点的求解;二是 $m-c$ 空间数组大小的设定。前者比较容易解决,即给出

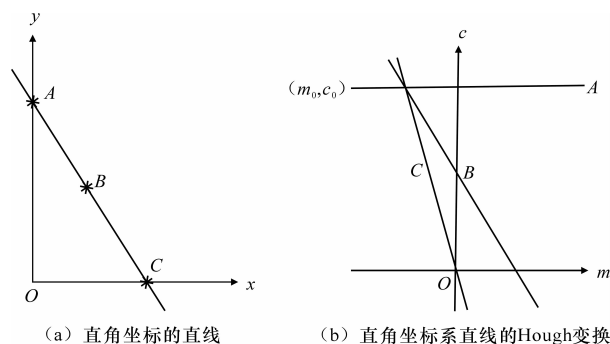


图 1 直角坐标系直线和直线的 Hough 变换

Fig. 1 Straight line in coordinate system and its Hough transformation

在 $m-c$ 空间的二维数组,在 $m-c$ 平面上画直线的操作实际上就是将通过直线数组元素多加 1 个的操作。后者的解决方法就比较困难。因为与 y 轴平行的直线的斜率 m 为无限大,如果要求精度很高,再多的数组也不够。所以通常用线性方程描述,即

$$\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (2)$$

式中: ρ 为从原点引到直线的垂线长度; θ 为垂线与 x 轴正向的夹角。

用式(2)来描述的话,则 $x-y$ 平面上通过一点的直线群在 $\theta-\rho$ 平面上就成了一条正弦曲线。图 2(a) 中通过点 A、B、C 的直线群在 $\theta-\rho$ 平面上变成了图 2(b) 中的 3 条正弦曲线,这 3 条曲线相交于一点 (θ_0, ρ_0) , 该点就是需要找的点。用与 $m-c$ 平面上求交点相同的方法,可以在 $\theta-\rho$ 平面上求此交点。

根据定义, ρ 是图像的对角线的长度, θ 取 0 到 π 就可以了,因此, $\theta-\rho$ 空间被广泛应用。

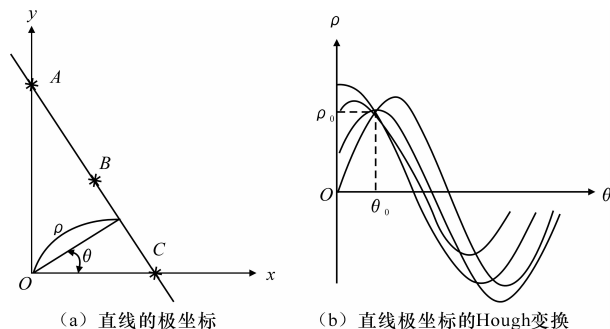


图 2 $\theta-\rho$ 空间的 Hough 变换

Fig. 2 Hough transformation in $\theta-\rho$ space

对应不同的曲线, Hough 变换的不同就在于参数方程的选取不同,通常将曲线的 Hough 变换函数分解为 2 项,固有项和位移项,这种分解允许将高维参数空间分解为曲线固有参数子空间和位移参数子空间,即多个相空间来研究。在 Hough 变换后的相

空间中,不同参数的交点就反映了原曲线的特性。

2 基于 Hough 变换的波速估计方法

对于浅地层探地雷达原始图像,被测目标所提取的曲线为双曲线。由于探地雷达信号受到地表强回波等杂波成分的影响,使得反映地下目标的双曲线特征不明显。因此,首先对原始图像作一定处理以加强反映目标的双曲线特征。这里采用均值法去除背景杂波,使反映目标的双曲线特征在探地雷达图像中得到相对增强。其次对图像灰度进行量化处理,并且求其梯度幅度。梯度幅度 $TM(x,y)$ 应用差分法来实现,其数学表达式为

$$TM(x,y)=|f(x,y)-f(x+1,y)|+|f(x,y)-f(x,y+1)| \tag{3}$$

将梯度幅度图像每一列上的最大梯度幅度值设置为 1,每列上的其他值设置为 0;则 1 所在位置就反映了双曲线存在的位置。通过上述处理,对于单目标的数据可提取出单条双曲线,对于多目标的数据可提取出多条双曲线。

步进单位对应波速范围内的每一个波速值,进行置 0 置 1,处理后的梯度幅度图像进行 Hough 变换,其变换方程为

$$j=\sqrt{\frac{4\Delta x^2}{\Delta t^2 v^2}(i-i_0)^2+j_0^2} \tag{4}$$

式中: Δt 为雷达的采样间隔时间; Δx 为雷达的采样间隔距离; (i_0,j_0) 为原空间的坐标, (i_0,j_0) 的值是由梯度幅度图像矩阵中“1”所在位置决定的; (i,j) 为参数空间的坐标, (i,j) 的取值范围与梯度幅度图像矩阵的行与列相同。

探地雷达数据进行处理。在探地雷达的原始剖面图中含有被测目标的双曲线特征,经过 Hough 变换后提取的双曲线如图 3、图 4 所示。

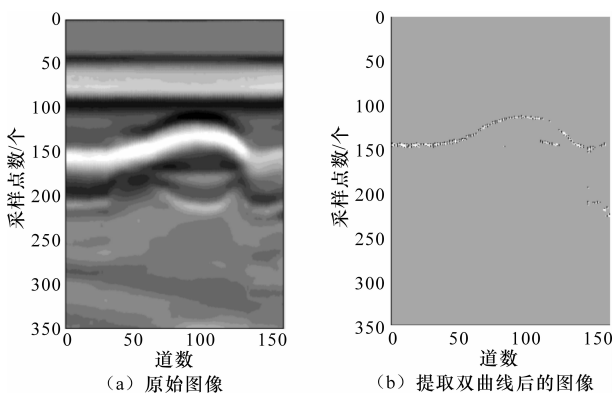


图 3 单目标的 Hough 变换

Fig. 3 Hough transformation of single object

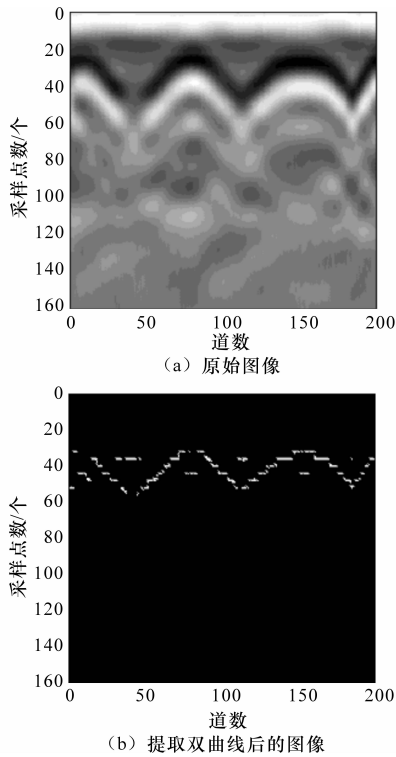


图 4 多目标的 Hough 变换

Fig. 4 Hough transformation of multi object

根据介质的特性,确定波速的范围 $v(\min, \max)$,并选定一个波速步长 Δv ,以 Δv 为步,应用计算机编程对提取的曲线数值进行迭代运算,可以从曲线数值中找出最大值对应的波速 v ,即波在该介质中传播的速度。波速与介电常数的关系为

$$\epsilon_r=(c/v)^2 \tag{5}$$

式中: ϵ_r 为计算被测介质的相对介电常数; c 为电磁波在空气中的传播速度。

3 Hough 变换提取的土壤介电常数与实测数据的比较

表 1 是采用中国电波所研制的 LTD-2100 型探地雷达和 900×10^6 Hz 天线,对陕西填土路基土样在不同含水量条件下,应用 Hough 变换提取的土体介电常数。

表 1 Hough 变换提取不同含水量土样的相对介电常数

Tab. 1 Hough transform for obtaining dielectric constants from different water contents

| | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 土样含水量/% | 2.69 | 4.50 | 5.98 | 12.47 | 14.66 | 15.51 |
| 变换提取 ϵ_r | 3.15 | 3.90 | 4.53 | 7.58 | 8.75 | 9.23 |
| 土样含水量/% | 19.24 | 21.46 | 24.06 | 24.75 | 25.29 | 26.01 |
| 变换提取 ϵ_r | 11.57 | 13.23 | 15.69 | 16.52 | 17.28 | 18.54 |