

文章编号 1005-0388(2011)03-0562-05

介质圆柱的单站微波成像方法

刘 昆 郭在华

(成都信息工程学院电子工程学院, 中国气象局大气探测
重点实验室, 四川 成都 610225)

摘 要 提出一种对介质圆柱实现单站微波成像的方法。该方法通过时域有限差分法进行电磁场正过程的仿真计算, 采用整数微分进化策略实现逆过程的寻优计算。分别分析 TE 模式和 TM 模式的近场散射信号得到介质成像目标在电磁波传播方向上尺寸大小的估计, 并以此为依据, 确定成像目标的尺寸范围, 从而确定逆过程的寻优区间。该方法无需像传统成像方法围绕成像目标设置多个发射/接收天线以获取成像信息, 从而大大减少了成像的必要条件。采用该方法, 在 TE 模式和 TM 模式下分别对介质圆柱目标进行仿真成像, 获得了良好的效果。

关键词 微波成像; 时域有限差分法(FDTD); 整数微分进化策略(IDES)

中图分类号 TN957.5

文章标志码 A

1. 引 言

由于电磁逆散射在目标识别、无损探伤、生物医学成像、地震学、探地雷达等领域的应用价值, 近二十年来引起了电磁理论工作者的广泛重视, 人们提出了一系列的算法^[1-3], 并在很多领域得到广泛应用。这些方法, 多数是在频域解决电磁散射问题, 而且为了得到整个形状的信息, 常常需要采用多站发射和多站接收的方法^[4-5], 其中有学者也讨论了基于宽带信号的成像, 但是仍然是基于多站进行成像^[5]。众所周知, 单频或窄带信号携带信息量有限, 与此同时, 通过多站可以采集到关于成像目标形状、特性参数等方面丰富的信息, 因此导致了这种情况之下, 进行多站采集信息的必要性; 而宽带或超宽带信号对一些特定目标, 如二维凸多边形的导体来说, 多站采集在获得关于目标特性丰富信息的同时, 也带来了大量的冗余信息。通过文献[3]的仿真实验, 对于二维凸多边形导体目标, 在超宽带信号下, 使用单站进行成像是可行的。

从电磁场的波动方程出发, 以时域脉冲作为信号源, 其中包含丰富的频域信息, 以期获得介质圆柱目标成像。在求解正问题时, 通过时域有限差分方

法(FDTD)来获得目标的散射场仿真值。同时, 本文将讨论二维重构问题的两种模式: TM 模式—入射电场平行于柱面的轴向方向; TE 模式—入射磁场平行于柱面的轴向方向。

逆散射问题本质上是一个非线性、病态解问题^[7-8]。因此, 这类病态问题的求解常常诉诸于全局优化算法和不同类型的调整项来处理。逆问题中, 本文采用在导体成像逆问题处理中表现较优秀的整数微分进化策略^[9], 而介质散射体的描述采用截断傅里叶级数, 优化变量为傅里叶级数的系数。

2. 问题描述

2.1 模型及入射信号设置

如图 1 所示, 考虑平面波照射截面形状为圆形的介质柱, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 3.5$, 入射场为高斯脉冲, 即

$$f_{\text{inc}} = \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (1)$$

式中 τ 为常数, 决定了高斯脉冲的宽度, 峰值出现在 $t=t_0$ 。将一个介质圆柱置于计算区域, 平面波由左向右入射, 在点 A 处接收后向散射信号。这里, 设置 FDTD 计算网格为方形, 其宽度为 $\delta=0.025$ cm,

收稿日期: 2010-07-15

基金项目: 成都信息工程学院科研基金资助(KYTZ201019)

联系人: 刘昆 E-mail: liukun@cuit.edu.cn

介质目标的半径为 12δ 。取 $\tau=60\Delta t$ (Δt 为 FDTD 时间步长), $\Delta t=\delta/2c$ (c 为真空中光速), $t_0=0.8\tau$ 。

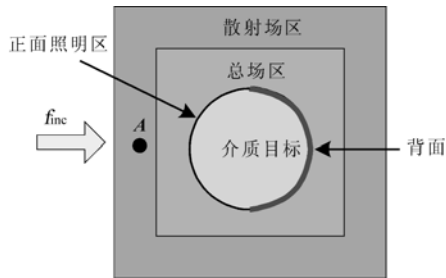


图1 柱体截面

2.2 目标描述函数——截断傅里叶级数

二维介质目标成像所需达到的描述要求与导体类似^[7],即只需要给出目标轮廓即可,因此,这里同样采用截断傅里叶级数对目标进行描述。截断傅里叶级数为

$$f_{\text{shape}} = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\theta) + \sum_{n=1}^N B_n \sin(n\theta) \quad (2)$$

$\theta \in [0, 2\pi]$

式中: N 为傅里叶级数中正弦和余弦项数,当 N 取值越大,则对目标的描述将会越精确; A_0 为轮廓上各点半径的平均长度; A_n 、 B_n 表征目标轮廓变化的程度,越大则轮廓变化幅度越大; n 的大小表征了第 n 项系数的变化相对于整体的程度,其值越小则其变化对整体的影响较大,反之,其变化更侧重于目标轮廓的局部调整。

当入射波以图1所示的方向照射到介质目标上,在正面照明区发生反射和透射,进入介质目标内部的波,传播到背面时,发生反射和透射,此时的反射波会回到正面照明区再次发生反射和透射,这种现象会在介质内部发生多次,直至能量完全透射出介质内部。而这种过程正可以反映出介质目标在波传播方向上的尺寸大小。

如图2所示,给出TM模式散射电场的情况,两个波谷分别是由正面照明区和背面反射回来的波,因此,这两个波谷点的时间差也就是波沿着传播方向通过介质内部一个来回所消耗的时间,由此,可以计算出介质目标在此方向上的尺寸大小。同时由图可知,由背面反射回来发生透射到达A点的波比第一次反射波到达A点的电场强度大,这实际上是由于介质圆柱对电磁波的聚焦作用,即在圆柱内部波速变慢,并且向中心线处聚合导致的。第一个波谷出现在 $t_1=209\Delta t$,第二个波谷出现在 $t_2=409\Delta t$,因此,消耗时间为

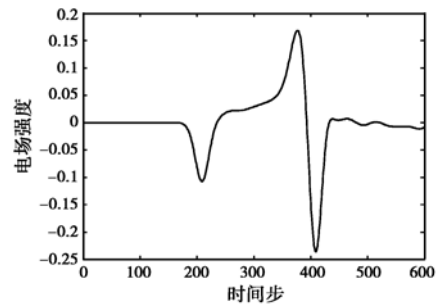


图2 TM模式A点散射场

$$t = t_2 - t_1 = 200\Delta t$$

再由前述 Δt 定义,可知

$$t = 200 \times (\delta/2c)$$

于是,波于此方向上在介质内部传播距离为

$$D = t \times c / \sqrt{\epsilon_r} = 53.45\delta$$

所以,从散射信号估计出介质目标在此方向上的长度为

$$r = 53.45\delta/4 = 13.4\delta$$

这个结果与实际目标的 12δ 较接近,可以为优化算法确定较为理想的搜索范围。由此,可以令 A_0 搜索范围为 $[6.7, 20.1]$, A_n 、 B_n 的搜索范围为 $[-2\pi r/4, 2\pi r/4]$, 即 $[-21, 21]$ ^[6]。

TE模式也可以得到类似的结论,如图3、图4所示。由散射场 E_x 分量和 E_y 分量可以分别估计出波在介质目标内的传播时间为

$$t_x = (417 - 208)\Delta t = 209\Delta t$$

$$t_y = (412 - 207)\Delta t = 205\Delta t$$

由平均值 $207\Delta t$ 给出 A_0 的搜索范围为 $[6.9, 20.7]$, A_n 、 B_n 的搜索范围为 $[-21.7, 21.7]$ 。

当成像目标为其他不规则形状时,也可以进行类似的估计。但是由于形状不规则,在其他方向上的尺寸有可能超出估计范围,优化算法无法搜出满足误差上限的解,此时,就需要将估计范围扩大,直至将目标在解空间的位置包含到所估计的解空间范围内。

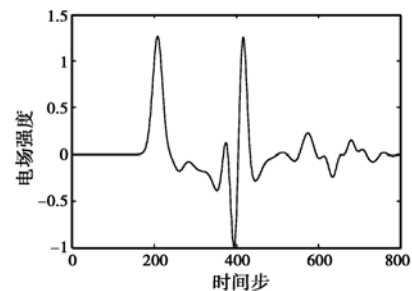
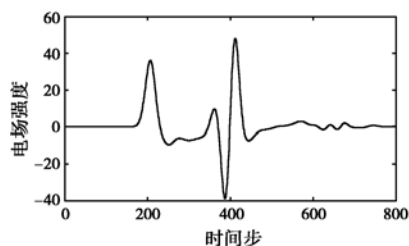


图3 TE模式A点散射场 E_x 分量

图4 TE模式A点散射场 E_y 分量

2.3 整数微分进化策略

微分进化策略(DES)^[10]是模拟肠道细菌变异过程的一种全局优化算法,而整数微分进化策略(IDES)^[9]是微分进化策略在编码上的修改。众所周知,通常意义下的整数编码指的是二进制编码,但文献[9]提出了直接使用整数进行编码的方法,对个体精度进行控制,从而将一些不稳定解过滤掉,达到提高计算效率的目的。从文献中可以看到对于二维导体目标进行单站成像,获得了较好的效果,因此,本文也将采用该优化算法来处理逆问题。

3. 数值仿真

3.1 TM 模式

在本文的数值仿真中, TM 模式的适应度函数取为

$$F = \int_T \|\mathbf{E}_A^{\text{sim}} - \mathbf{E}_A^{\text{meas}}\|^2 dt / \int_T \|\mathbf{E}_A^{\text{meas}}\|^2 dt \quad (3)$$

其他参数设置及取值范围估计如上述步骤确定,图5、图6和图7是 TM 模式成像过程中的情况及结果。

图5为 IDES 初始化群体中一个个体的情况,由图可知,随机初始化的结果是很不规则的,而这也正是为了能够使初始个体尽可能均匀分布于解空间,较大概率找到全局最优解。

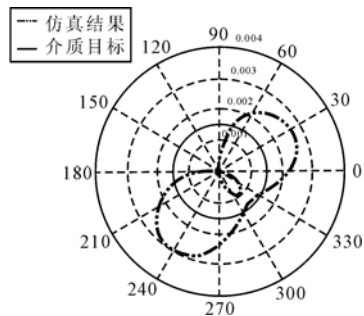


图5 TM模式初始情况

图6为 IDES 进化过程中其中一代的最优解,显然,此时的解已经明显优于初始情况,同时也较大

程度的趋于目标形状。

图7是 IDES 经过了300代左右的运算获得的解,虽然上述的解并没有非常精确的拟合出目标的位置,但是目标形状已经非常接近。实际上,此解与成像目标的误差已在10%以下,所以,该解位于全局最优解所在区域的概率已经很大。所以,如果此时再经过更长时间的迭代,或者通过其他局部搜索能力较强的优化算法,将会很快获得一个更加优秀的解。

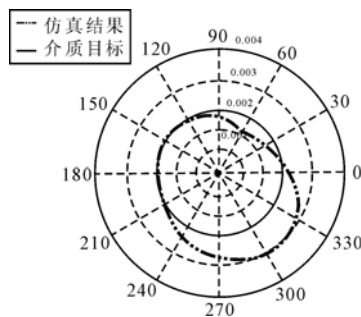


图6 TM模式进化中的情况

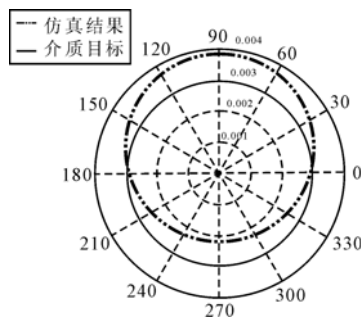


图7 TM模式进化结果

3.2 TE 模式

当入射波为 TE 模式时,适应度函数取为:

$$F = \left(\int_T \|\mathbf{E}_{Ax}^{\text{sim}} - \mathbf{E}_{Ax}^{\text{meas}}\|^2 dt / \int_T \|\mathbf{E}_{Ax}^{\text{meas}}\|^2 dt + \int_T \|\mathbf{E}_{Ay}^{\text{sim}} - \mathbf{E}_{Ay}^{\text{meas}}\|^2 dt / \int_T \|\mathbf{E}_{Ay}^{\text{meas}}\|^2 dt \right) / 2 \quad (4)$$

图8、图9和图10是 TE 模式的成像过程中的情况及结果。

图8是 TE 模式下, IDES 初始化群体中一个个体的情况。

图9是进化过程中,其中一代的最优解的情况,可以看到,此时已经大致勾画出了目标的区域。

图10是 IDES 进化到300代左右时的情况,可以看到此时得到的解,已经很精确地拟合出了目标形状。

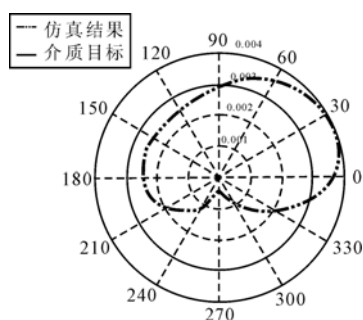


图8 TE模式初始情况

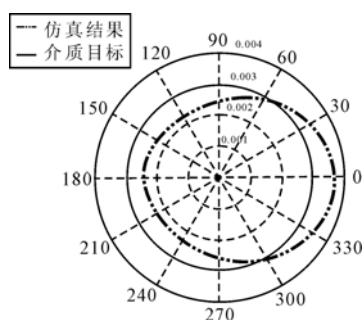


图9 TE模式进化中的情况

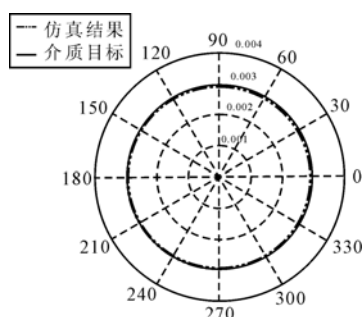


图10 TE模式进化结果

4. 结 论

由上述数值仿真结果,可以看到无论是 TM 模式还是 TE 模式,都可以较为准确地勾画出目标。但是,在同样的迭代次数的情况下,TE 模式可以获得更为精确的解。实际上,这种情况是正常的,因为两种模式都是依据电场分量来进行分析、搜索目标形状,但是由于 TE 模式的散射场电场具有 x 、 y 两个方向上分量,而 TM 模式仅具有 z 方向分量,因此, TM 模式本身所获得的信息量远不及 TE 模式。此外, TE 模式在未遇到介质目标产生散射场之前,电场仅具有 y 方向分量,因此散射场中电场在 x 方向分量的变化完全取决于介质目标的形状,于是 TE 模式将比 TM 模式携带更多介质目标的形状信息。由此,在 TE 模式情况下,一样搜寻代数,能够

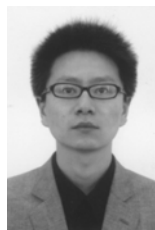
获得更精确的解是合理的。

参考文献

- [1] REKANOS I T, RAISANEN A. Microwave imaging in the time domain of buried multiple scatterers by using an FDTD-based optimization technique[J]. IEEE Trans. Magn., 2003, 39(3): 1381-1384.
- [2] DONELLI M, A MASSA. Computational approach based on a particle swarm optimizer for microwave imaging of two-dimensional dielectric scatterers[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2005, 53(5): 1761-1776.
- [3] 刘 昆, 廖 成, 卫 涛, 等. 基于时域有限元近场单站导体柱微波成像[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 969-972.
LIU Kun, LIAO Cheng, WEI Tao, et al. Near-field monostatic microwave imaging of conductor cylinder based on time-domain finite element[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 969-972. (in Chinese)
- [4] QING Anyong. Electromagnetic inverse scattering of multiple perfectly conducting cylinders by differential evolution strategy with individuals in groups (GDES) [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(5): 1223-1229.
- [5] REKANOS I T, RAISANEN A. Microwave Imaging in the time domain of buried multiple scatterers by using an FDTD-based optimization technique[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2003, 39(3): 1381-1384.
- [6] WEI Tao. Study for Ultra Wideband Microwave Imaging of Conductor Objects[D]. Chengdu: Doctorate dissertation of SouthWest Jiaotong University, 2008.
- [7] CUI T J, CHEW W C, YIN X X, et al. Study of resolution and super resolution in electromagnetic imaging for half-space problems[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2004, 52(6): 1398-1411.
- [8] DONELLI M, FRANCESCHINI G, MARTINI A, et al. An integrated multiscale strategy based on a particle swarm algorithm for inverse scattering problems [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2006, 44(2): 298-312.
- [9] 廖 成, 卫 涛, 陈 伟. 整数微分进化策略及其在微波成像中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(6): 647-652.
LIAO Cheng, WEI Tao, CHEN Wei. Integer coded differential evolution strategy and application to microwave imaging[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(6): 647-652. (in Chinese)

- [10] CAORSI S, DONELLI M, MASSA A, et al. Detection of buried objects by an electromagnetic method based on a differential evolution approach[C]//Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004: 1107-1111.

作者简介



刘 昆 (1979—), 男, 安徽人, 2008 年获得西南交通大学电磁场与微波技术专业博士学位。现任成都信息工程学院电子工程学院讲师, 主要研究方向为计算电磁学, 电磁散射与逆散射, 优化算法研究。

A near-field monostatic microwave imaging method for dielectric cylinder

LIU Kun GUO Zhai-hua

(Electronic Engineering College of Chengdu University of Information Technology,
Key Laboratory of Atmospheric Sounding of China Meteorological
Administration, Chengdu Sichuan 610225, China)

Abstract A new monostatic microwave imaging method for 2D dielectric cylinder in time domain is proposed. In this method, finite difference time domain (FDTD) and integer differential evolution strategy are used as an appropriate electromagnetic solver and global optimization method. A coarse radius solution of the dielectric object is achieved with the analysis of the TM mode and TE mode near-field. And then, with this solution as an initial guess for integer differential evolution strategy, the optimization is used to obtain the accurate solution. The main advantage of this method is its single-illumination single-view approach. It is not like the traditional method to obtaining the total shape information by multi-illumination multi-view approach. Thereby, imaging requirements is reduced greatly. Performance of the proposed method is demonstrated and discussed from dielectric cylinder profile reconstruction cases.

Key words microwave imaging; finite-difference time-domain; integer differential evolution strategy (IDES)