

# 超宽带探地雷达中TRM-SAR成像技术研究

郑文军<sup>1</sup>, 赵志钦<sup>2</sup>, 张 薇<sup>2</sup>, 聂在平<sup>2</sup>

(1. 中国西南电子技术研究所 成都 610036; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**将时间反转镜成像技术和SAR成像技术相结合, 通过理论分析和仿真实验将它应用到超宽带探地雷达成像中。实验采用了粗糙地面和电参数随机的泥土真实反映复杂探地环境。将相应的时间反转镜成像技术-SAR成像结果与时域后向投影成像算法进行了对比, 结果显示, 时间反转镜成像技术凭借其统计自平均特性和空时匹配滤波特性, 能够为超宽带探地雷达系统提供更高分辨率的成像结果。

**关键词** 后向投影算法; 探地雷达; 超分辨; 时间反转镜像技术; 超宽带

中图分类号 TN957

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.03.006

## Study of TRM-SAR Imaging Technique in the UWB Ground Penetrating Radar

ZHENG Wen-jun<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-qin<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, and NIE Zai-ping<sup>2</sup>

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology Chengdu 610036;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Time reversal mirror (TRM) technique is based on the principle of reciprocity. This technique perfectly caters to the demands of detection range and resolution in the complex environment. Therefore, it attracts more and more attention recently. This paper combines the TRM technique with SAR (synthetic aperture radar) imaging technique, and introduces it to the ultra-wideband ground penetrating radar (UWB-GPR) system through numerical simulation and theoretical analysis. For real applications, we consider the detection environment of rough surface and random electrical parameter. The corresponding TRM-SAR images are compared with these of back projection (BP) method. Results show that TRM technique can provides the UWB-GPR system with higher resolution image.

**Key words** back projection (BP); ground penetrating radar (GPR); super resolution; time reversal mirror (TRM); ultra-wideband (UWB)

对复杂多散射环境中隐蔽目标的探测具有重要的理论意义和应用价值。其理论意义在于探索如何从复杂多散射强背景噪声中正确检测和识别待探测目标; 理论成果可以应用于一系列复杂环境下的目标探测。从技术上讲, 时域超宽带(冲激脉冲)成像技术由于能较好地兼顾高损耗传播环境中探测范围和高分辨率的要求, 因此被广泛地应用于隐蔽目标的探测中。传统信号处理方法是直接利用接收的信号进行处理, 实际上它基于信号在自由空间或均匀介质中传播之假设, 并没有充分利用电磁波传输的物理过程, 在复杂多散射环境中, 由于多径效应, 信道衰落严重, 接收的目标信号微弱, 因而性能大大降低。时间反转镜像(time reversed mirror, TRM)技

术的出现为解决该领域的技术难题提供了一条有效的途径, 近年来该技术受到电磁场与微波技术及信号与信息处理领域学者的广泛关注。

TRM技术是对光学相位共轭镜(PCM)的一种推广, 最早应用于声学领域, 并得到了广泛的理论和实验研究。文献[1-3]对于声学TRM技术在海洋通信、非破坏探测及医疗等领域进行了大量的实验研究, 取得了丰硕的应用成果。文献[4-6]从理论方面建立声学TRM的宏观模型, 定量分析了TRM技术的超分辨特性、时空匹配滤波特性和统计稳定特性。

与声波和超声波相比, 电磁波有其独有的特性, 主要表现在不同目标的电磁特性随频率的变化有较大的变化, 因此对复杂背景下的隐蔽目标的检测,

收稿日期: 2009-11-06; 修回日期: 2010-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(60771042); 新世纪优秀人才支持计划; 高等学校学科创新引智计划(B07046)

作者简介: 郑文军(1981-), 男, 博士生, 主要从事复杂环境目标探测、计算电磁学、微波致热超声成像等方面的研究。

如隐蔽在森林中的坦克及埋在地下的金属目标等的检测,电磁成像有更好的对比度。并且利用TRM技术可以使系统成像分辨率更高、质量更好、检测性能更优。文献[7]首次将TRM技术引入电磁领域,文献[8]进行了丛林环境下电磁TRM系统的实验研究。文献[9-10]则将TRM技术应用于穿墙雷达探测,得到了较好的成像结果。

本文将结合SAR成像技术,将TRM-SAR应用于超宽带探地雷达(ground penetrating radar, GPR)实验中。通过仿真实验,实现对复杂地表环境下掩埋目标的初步探测。相应的成像结果与后向投影(back projection, BP)算法进行对比,结果表明,TRM技术在成像分辨率方面优于BP方法。

## 1 探地雷达下TRM-SAR技术原理

探地雷达系统中TRM-SAR技术的基本原理如图1所示。由微波脉冲功率源发射微波脉冲,脉冲穿入随机泥土层照射到埋在地下的隐蔽待测目标。信号经目标反射,被放置在激励源一侧的接收天线接收,接收信号先被记录下来。保持发射天线不动,在一平行于地面的直线上移动接收天线至下一个位置,重复发射-接收操作。

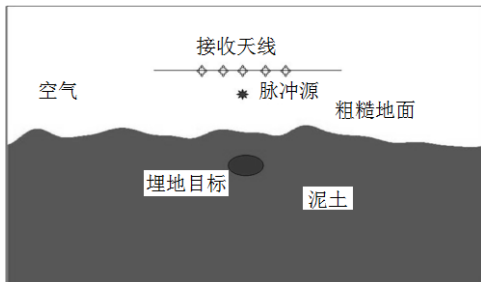


图1 探地雷达下TRM-SAR示意图

获取 $N$ 个位置信号后,由于源点-地面-接收单元的相对位置信息是确定的,因而可以对信号进行相应的去地面反射处理,然后在时域上对信号进行时间反转(或者是在频域上做相位共轭),反转后的信号再由发射天线从各自的接收位置发射出去,经过同样的路径,信号将汇聚在二次源的位置(即目标位置)。这是因为二次发射和接收的信号经历了相同的传播路径,互易原理使它们能在目标的位置准确聚集,而噪声并无此特性。同时,多散射引起的相位漂移在目标点可以得到精确的抵消,但在其他位置上却是完全随机的,也即多径的相干叠加在目标点是共显性的,在其他点上则是完全随机性的。接收-发射天线合成的阵列就被称为时间反转镜(TRM)。

相应的物理过程描述如下:假设一位于 $r_s$ 处的

激励源发射一时域窄脉冲 $p(t)$ ,信号经由时不变媒质照射到位于 $r_m(m=1,2,\dots,M)$ 处的目标,此时 $r_m$ 点的入射场为:

$$U_F(r_m, \omega) = \hat{p}(\omega) \hat{G}_F(r_m, r_s, \omega) \quad (1)$$

其中:

$$\hat{p}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{j\omega t} dt \quad (2)$$

其中,前向格林函数 $\hat{G}_F(r_m, r_s, \omega)$ 满足:

$$\nabla^2 \hat{G}_F(r, r_s, \omega) + \varepsilon \mu \omega^2 \hat{G}_F(r, r_s, \omega) = -\delta(r - r_s) \quad (3)$$

式中, $\varepsilon$ 为介电常数; $\mu$ 为磁导率。第 $m$ 个目标处入射场等效的反射场为:

$$U_R(r_m, \omega) \approx c_m(\omega) U_F(r_m, \omega) \quad (4)$$

式中, $c_m(\omega)$ 为目标的频率相关反射系数, $m=1,2,\dots,M$ 。

目标反射信号经过泥土层,被 $K$ 个接收单元接收,即用 $K$ 个合成的接收位置实现阵列方式,信号记录的时间 $T$ 足够长,以保证多散射信号被准确接收。在第 $k$ 个接收单元上信号为:

$$u_T(r_k, t) = \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} U_R(r_m, \omega) \hat{G}_F(r_k, r_m, \omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (5)$$

在探地雷达中,根据源点-地面-接收单元相对位置信息,可有效滤除各接收位置的一次地面反射信号,表示为 $u_G(r_k, t)$ 。因此,在频域上有:

$$U_B(r_k, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \chi(r_k) (u_T(r_k, t) - u_G(r_k, t)) e^{j\omega t} dt \quad (6)$$

对各位置的接收信号做时间反转,时域上的时间反转相当于频域上的相位共轭。反转后的信号从各自的位置被重新发射回去,在任意场点 $r$ 处的场为:

$$I(r, t) = \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{\infty} U_B(r_k, \omega) \hat{G}_C(r, r_k, \omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (7)$$

其中, $\hat{G}_C(r, r_k, \omega)$ 表示从第 $k$ 个接收单元到场点的计算格林函数。

根据雷达成像原理,方位向的成像分辨率取决于接收阵列的孔径,在均匀媒质中,方位向的分辨率为 $\lambda L/a$ , $a$ 为物理孔径, $L$ 为传播距离, $\lambda$ 为载波波长。但是在非均匀媒质中,TRM技术具有超分辨特性,可以达到远大于实际物理孔径的有效孔径。文献[4]中,针对有限或高斯型的TRM,有效孔径为:

$$a_e(L) = a \sqrt{1 + L^3 \gamma / a^2} \quad (8)$$

从而使得 $\lambda L/a_e < \lambda L/a$ ,提高了分辨率。TRM的统计稳定特性和匹配滤波特性参看文献[5-6]。

## 2 TRM技术仿真探测

本文通过二维仿真实验将TRM-SAR技术引入

到超宽带探地雷达成像中。

### 2.1 BP成像算法

使用BP成像算法, 则合成孔径的方式改为发射天线和接收天线始终处于同一位置, 完成一次“发射-接收”之后, 在一平行于地面的直线上移动发射和接收天线至下一个位置, 重复“发射-接收”操作。假设在第  $k$  个接收位置接收到的信号为  $u_k(t)$ , 经逆滤波和幅度校正处理后信号为  $u'_k(t)$ , 则成像区域中点  $(p, q)$  处的像素为:

$$I_{BP}(p, q) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K u'_k(t + \tau_{k,(p,q)}) \quad t \geq 0 \quad (9)$$

式中,  $\tau_{k,(p,q)}$  为信号从第  $k$  个接收位置到点  $(p, q)$  的双程传播时间。

考虑到探地雷达的特殊探测环境, 本文在使用BP成像算法时做了适当的改进, 考虑了电磁波在分层介质中的不同传播速度以及在反向投影时界面的折射效应。

### 2.2 实验设置

由于超宽带雷达具有超宽带特性, 可以为探测提供更高分辨率的成像, 因此本文采用超宽带体制探地系统。

超宽带的脉冲源选择为:

$$p(t) = \frac{j}{[j + 2\pi f(t - t_0)/4]^5} \quad (10)$$

式中,  $j$  为虚数单元; 中心频率  $f = 2 \text{ GHz}$ , 信号的3 dB频带为1.4~3.0 GHz。

为保证仿真的准确性, 对于一维随机地面, 采用如下的高斯概率密度函数生成:

$$p(z) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2h^2}} \quad (11)$$

为了确保地面的适当平缓, 相关函数设置为:

$$R(\tau) = h^2 e^{-\tau/l} \quad (12)$$

式中,  $l$  为相关长度;  $h$  为均方高度。

仿真实验采用FDTD算法模拟, 网格步长设置为  $dx = 0.002 \text{ 8 m}$ , 边界采用PML完全匹配层吸收, 粗糙地面长度为1.4 m, 泥土深度为0.7 m, 相对介电常数为7, 电导率为0.01。实验中将泥土介电常数加入10 dB的高斯白噪声实现了泥土的非均匀性。接收天线位于地表上方, 并以0.075 m间距等距水平移动19个位置。目标为直径5 cm的圆盘, 相对介电常数为  $1.0 \times 10^6$ 。

### 2.3 TRM与反向投影成像对比

首先, 将目标放置在19个接收位置合成的阵列

的正下方, 埋地深度为0.2 m, 分别用BP算法和TRM-SAR对其进行成像, 对应的成像结果如图2和图3所示。对应纵轴0点的一条直线为成像后绘入, 表示地面。

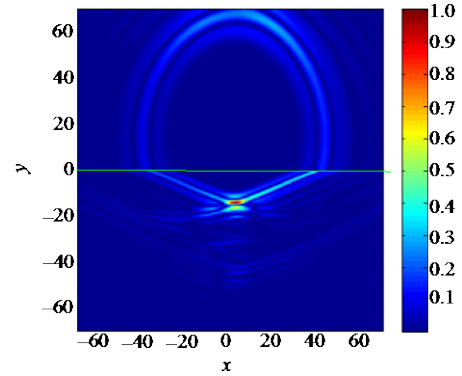


图2 BP算法成像结果

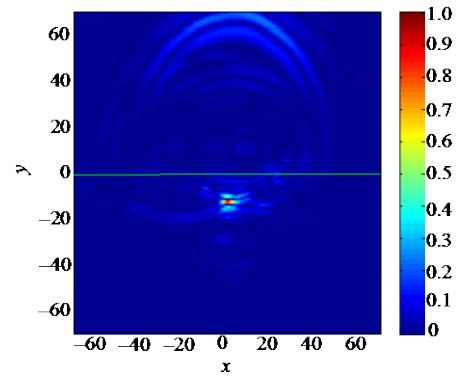


图3 TRM-SAR技术成像结果

对比两图可以看出, 改进的BP算法考虑了界面折射和介质波速。同时, 在综合阵列的主瓣方向上, 对于目标位置的相干叠加比较集中, 而TRM-SAR也具有时空匹配滤波特性, 因此两种算法对目标位置的定位均准确。但对比分辨率可以发现, 图2和图3成像区域最高幅值-3 dB范围分别为4.51 cm和3.27 cm, 表明TRM-SAR的聚焦效果好于改进的BP算法。

其次, 再将目标水平位置向左偏移0.28 m, 埋地深度为0.22 m, 采取相同的方式分别用BP算法和TRM-SAR技术成像, 对应的成像结果如图4和图5所示。

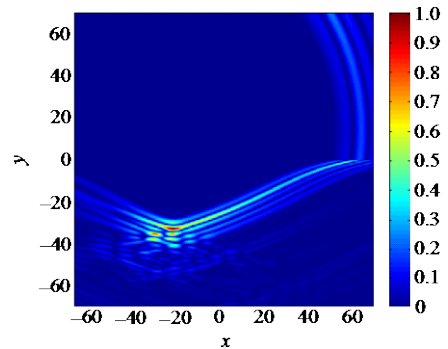


图4 目标移动后BP算法成像结果

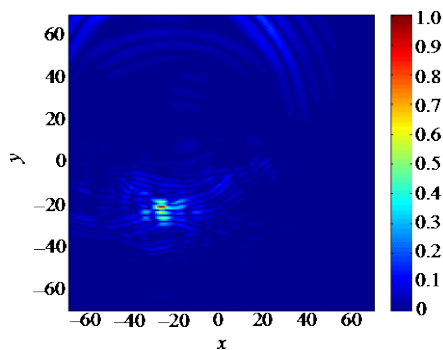


图5 目标移动后TRM-SAR技术成像结果

对比发现,在偏离合成阵列中心的方向上,TRM-SAR和BP算法两种技术对目标所成图像区域最高幅值 $-3\text{dB}$ 范围分别为 $6.70\text{ cm}$ 和 $15.66\text{ cm}$ 。由此可见,TRM-SAR的成像分辨率要远远好于BP算法。这是因为,TRM算法是基于波传播物理过程的成像方法,探地环境充当了一个匹配滤波的作用,时空匹配滤波特性使得在多径干扰的环境中也可以对目标进行精确的聚焦;而在BP算法中,当目标偏移阵列主瓣方向时,其“延迟-求和”的基本思想使得来自各个接收位置的相干叠加在非目标位置上增强,从而影响了成像的分辨率。

### 3 总 结

本文将TRM-SAR技术通过数值仿真引入超宽带探地雷达成像中,将相关的成像结果与BP成像算法进行了对比。结果显示,TRM-SAR技术充分利用了波传播物理过程的信息,可以为超宽带探地雷达系统提供优于改进的BP算法的成像效果。

考虑更实际的情况,在探地雷达工作环境下,接收端的噪声干扰、地表的粗糙性及地层媒质的随机性都将对TRM和BP成像质量带来影响,评估这些

影响对TRM-SAR技术在探地雷达中的发展将具有重要应用意义。

### 参 考 文 献

- [1] KUPERMAN W A, HODGKISS W S, SONG H C, et al. Phase conjugation in the ocean: experimental demonstration of a time reversal mirror[J]. *Acoust Soc Am*, 1998, 103(1): 25-40.
- [2] FINK M, PRADA C. Acoustic time reversal mirror[J]. *Inverse Probl*, 2001, 17: R1-R38.
- [3] CHEN G, ZHAO Z, ZHENG W, et al. Application of time reversal mirror in microwave-induced thermo-acoustic tomography system[J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(7): 2087-2095.
- [4] BLOMGREN P, PAPANICOLAOU G, ZHAO H. Super-resolution in time-reversal acoustics[J]. *Acoust Soc Am*, 2002, 111(1): 230-248.
- [5] BAL G, PAPANICOLAOU G, RYZHIK L. Self-averaging in time reversal for the parabolic wave equation[J]. *Stochastics and Dynamics*, 2002, 2: 507-531.
- [6] PAPANICOLAOU G, RYZHIK L, SOLNA K. Statistical stability in time reversal[J]. *SIAM J Appl Math*, 2004, 64: 1133-1155.
- [7] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Time reversal of electromagnetic waves[J]. *Phys Rev Letts*, 2004, 92(19): (193904) 1-3.
- [8] LIU D, KROLIK J, CARIN L. Electromagnetic target detection in uncertain media: Time-reversal and minimum-variance algorithms[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45(4): 934-944.
- [9] ZHENG W, ZHAO Z, NIE Z. Application of TRM in the UWB through wall radar[J]. *Progr Electromagn Res*, 2008, 87: 279-296.
- [10] ZHENG W, ZHAO Z, NIE Z, et al. Evaluation of TRM in the complex through wall environment[J]. *Progr Electromagn Res*, 2009, 90: 235-254.

编辑 税 红