

# 复杂多散射环境下EM-TRM成像技术应用研究

郑文军

(中国西南电子技术研究所 成都 610036)

**【摘要】**将电磁时间反转(EM-TRM)技术与射线追踪(Ray-tracing)方法相结合,建立了复杂多散射环境下隐蔽目标成像模型。通过该模型开展了数字仿真,分析了模型环境的多散射效应,并对单目标和多目标的情况进行EM-TRM成像实验。仿真结果表明,在复杂多散射背景下,EM-TRM技术可对隐蔽目标实现高分辨和高对比度的成像。

**关键词** 复杂多散射环境; 隐蔽目标; 电磁时间反转技术; 成像; 射线追踪方法

中图分类号 TN957

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.009

## Application of EM-TRM Imaging Technique in Complex and Multi-Scattering Environment

ZHENG Wen-jun

(Southwest China Institute of Electronic Technology Chengdu 610036)

**Abstract** In this paper, by combining the electromagnetic time reversal mirror (EM-TRM) technique with ray-tracing method, we design an imaging model for the detection of concealed target in the complex and multi-scattering environment. Based on the imaging model, the multi-scattering effect of the environment is demonstrated, and EM-TRM imaging experiments are carried out for single and multiple targets. Results show that, in the complex and multi-scattering environment, EM-TRM technique can image the concealed targets with high resolution and contrast.

**Key words** complex and multi-scattering environment; concealed target; EM-TRM technique; imaging; ray-tracing method

复杂多散射环境中目标探测具有重要的军事意义。在局部战争中,把机动目标或武器平台隐藏在丛林等环境中可以有效地骗过现有的高科技侦察手段。因此,各国历来都十分重视多散射环境下的隐蔽目标成像问题。对于电磁波、丛林等环境具有典型的复杂多散射特性,树木等障碍会导致电磁波产生多径效应,信道衰落相当严重。在类似环境中进行隐蔽目标探测,接收的目标信号微弱且杂乱无章。在成像处理中,传统的阵列信号处理方法将面临很大的挑战。

近年来,一种新型成像技术——时间反转(time reversal mirror, TRM)技术逐渐被引入隐蔽目标成像领域。TRM有效地结合波多径传输原理与阵列信号处理技术,使原来导致目标隐蔽的多散射特性反而变得为成像所用,增强了复杂环境下对隐蔽目标的成像能力。TRM技术先是在声学领域提出<sup>[1]</sup>,得到了广泛的验证和应用<sup>[2-4]</sup>。目前该技术已经被引入电

磁领域(EM-TRM)<sup>[5]</sup>,并已经开展了部分理论和实验研究<sup>[6-9]</sup>。

鉴于传统阵列信号处理算法的不足及EM-TRM技术的独特优势,本文将EM-TRM技术与射线追踪(ray-tracing)方法相结合,建立了复杂多散射环境隐蔽目标成像仿真模型,初步探讨了EM-TRM技术在这一领域的应用。

### 1 复杂多散射环境仿真模型

本文的目标成像选用被动侦测成像模型(主动探测模型成像可采用类似处理方法)。复杂多散射环境由一定数目的圆柱体随机生成,电磁计算和信号模拟传播则基于Ray-tracing方法。

#### 1.1 模型建立

复杂多散射环境仿真模型如图1所示,位于 $r_s$ 处的目标源辐射微波脉冲信号,位于 $r_k$ 处的(合成)阵列接收来波信号,在接收端经过信号处理,对目标辐

射源进行定位成像。

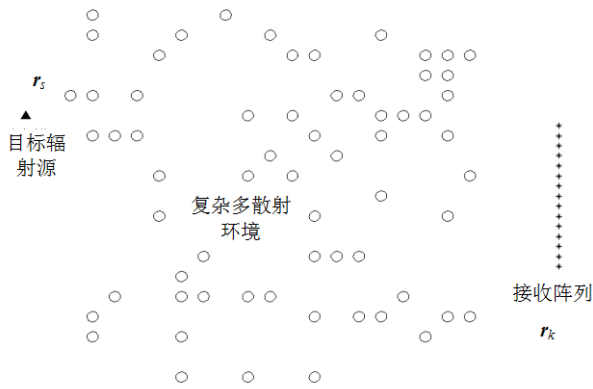


图1 复杂多散射环境仿真模型

较低频率电磁信号虽具有较好的穿透性，但成像分辨率不高，在复杂多散射环境下会导致无法对目标准确成像。鉴于此，本文探测模型选用C~X波段的微波脉冲信号为：

$$p(t) = \frac{j}{[j + 2\pi f_c(t - t_0)/4]^5} \quad (1)$$

式中， $j$ 表示基本虚数单元； $t_0=0$ ；信号中心频率 $f_c=5$  GHz。脉冲信号的时域和频域特征如图2所示。

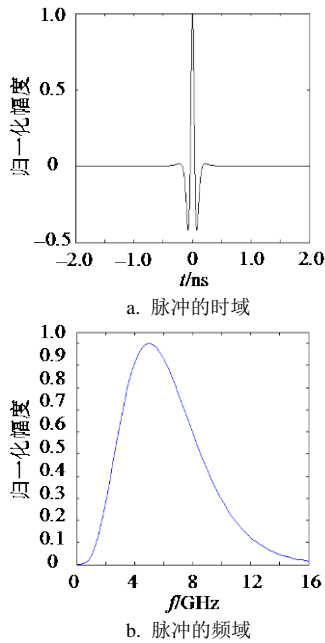


图2 式(1)中脉冲的时域和频域特征

## 1.2 模型计算

仿真模型的正演和反演均需要电磁计算。高频电磁计算方法按原理可分为基于电流法和基于射线法两类。在射线法中，Ray-tracing方法基于一致性几何绕射理论，采用局部场原理，具有计算速度快、所需计算机存储量少等优点，用于正演和反演计算。

Ray-tracing方法包括射线求迹和电磁计算两部分。射线求迹是对给定的场源分布，根据散射体的

结构特性，找出对总场有贡献的射线；电磁计算则主要由直射、反射和绕射等构成，有：

$$E^T = E^i A_T(s) e^{-jks} \quad (2)$$

$$E^r = \overline{R} E^i A_r(s) e^{-jks} \quad (3)$$

$$E^d = \overline{D} E^i A_d(s) e^{-jks} \quad (4)$$

式中， $E^T$ 、 $E^r$ 、 $E^d$ 分别为场点处的直射场、反射场和绕射场； $E^i$ 为参考点的入射场； $s$ 为参考点到场点的距离； $e^{-jks}$ 为这段距离上的相移； $A(s)$ 为该段距离上因射线发散造成的场强衰减； $\overline{R}$ 和 $\overline{D}$ 分别为反射系数和绕射系数。

## 2 复杂多散射环境EM-TRM成像原理

复杂多散射环境下，EM-TRM技术成像的基本原理如图3所示。设位于 $r_m$ ， $m=1,2,\dots,M$ 处 $M$ 个待测目标辐射信号 $P(\omega)$ ，信号经多散射环境，被另一侧接收天线阵列接收(天线单元位于 $r_k$ ， $k=1,2,\dots,K$ )。第 $k$ 个单元上接收信号为：

$$U_T(r_k, \omega) = \sum_{m=1}^M P(\omega) \overline{G}_F(r_k, r_m, \omega) \quad (5)$$

式中， $\overline{G}_F(r_m, r_s, \omega)$ 为前向传播格林函数。

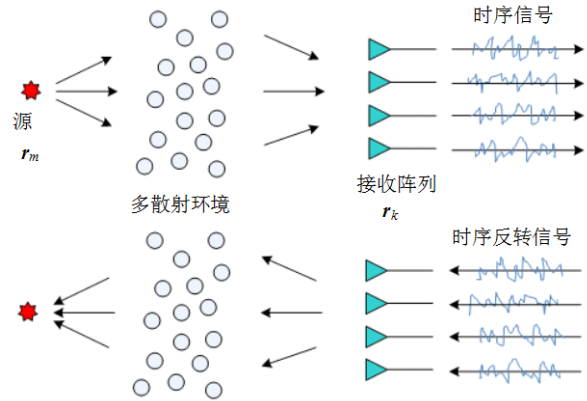


图3 复杂多散射环境下EM-TRM技术原理图

将接收到的信号在频域相位共轭(即为时域时间反转)，再由各自接收单元处重新发射回去，则在任意点 $r$ 处的场强为：

$$I(r, t) = \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{\infty} U_T(r_k, \omega)^* \overline{G}_C(r, r_k, \omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (6)$$

式中，“\*”为复共轭； $\overline{G}_C(r, r_k, \omega)$ 为计算格林函数。

当 $r=r_m$ ， $m=1,2,\dots,M$ 时，由互易原理可知，EM-TRM技术将实现信号的聚焦还原，也即是对目标的成像。

由式(6)可以看出，复杂多散射环境下EM-TRM成像需要计算或实测的格林函数 $\overline{G}_C(r_k, r, \omega)$ 。依据应用背景和所建立的模型，本文采用基于

Ray-tracing方法的计算格林函数。相应的成像处理过程为: 将各单元上的接收信号在频域做相位共轭, 得到  $U_T(\mathbf{r}_k, \omega)^*$ , 以此作为激励, 经由各自位置重新发射出去。电磁波传播则利用Ray-tracing方法按式(2)~式(4)进行计算, 设传播环境在正向和反演过程中遵从同一分布, 这样就以计算的方式得到任意场点与天线单元间的格林函数  $G_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \omega)$ , 从而得到反演后成像区域的场分布。

### 3 EM-TRM技术成像仿真

在本文建立的模型中, 设柱体64个, 直径为5 cm, 位置在二维平面上服从均匀分布, 分布区域为  $[1,3] \text{ m} \times [0,2] \text{ m}$  之间, 分布的概率密度为  $f(x,y)=1/4$ , ( $1 \leq x \leq 3, 0 \leq y \leq 2$ )。接收天线阵共有15个单元, 位置为  $(3.3 \text{ m}, 0.40+(k-1) \times 0.05 \text{ m})$ ,  $k=1, 2, \dots, 15$ 。

一点源信号在该模型下的多散射效应如图4所示。其中上半部分为不存在多散射条件下的直达波信号, 下半部分为多散射条件下非直达波贡献。由图可以看出, 信号传播路径较为复杂, 散射效应明显。当目标与接收单元之间完全被遮挡时, 接收信号则完全由多径贡献。因此在下面的成像仿真实验中, 只计算多径信号。

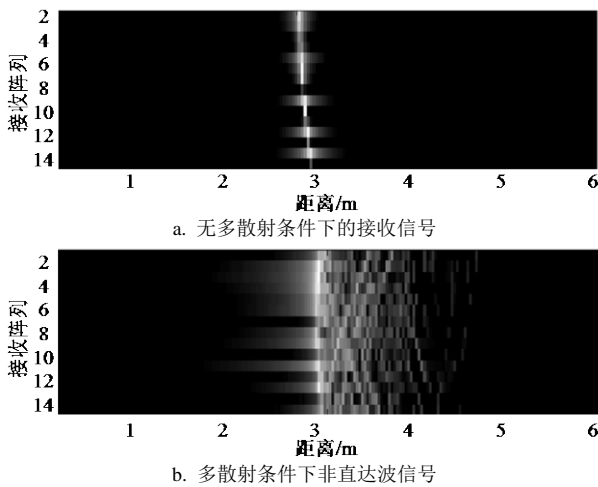
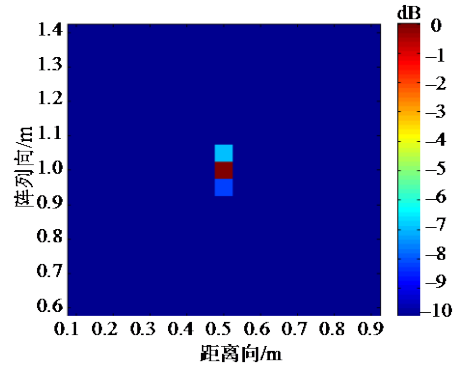
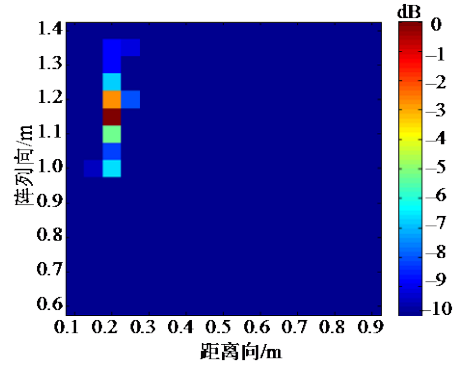


图4 点源信号在模型下的多散射效应

首先考虑单个目标情况, 成像区域选择为  $[0.1, 0.9] \text{ m} \times [0.6, 1.4] \text{ m}$  (下同)。图5a和图5b所示分别为单个目标置于  $(0.5 \text{ m}, 1.0 \text{ m})$  和  $(0.2 \text{ m}, 1.15 \text{ m})$  时对应的EM-TRM成像结果。由图可以看出, EM-TRM技术可以准确地实现对单个目标的成像。对于多目标的情况, EM-TRM成像采用迭代TRM技术<sup>[10]</sup>。图6a给出了两个目标位于  $(0.2 \text{ m}, 0.7 \text{ m})$  和  $(0.35 \text{ m}, 1.25 \text{ m})$  的EM-TRM成像情况, 图6b给出了3个目标分别位于  $(0.2 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 、 $(0.45 \text{ m}, 1.25 \text{ m})$  和  $(0.65 \text{ m}, 0.75 \text{ m})$  的成像情况。

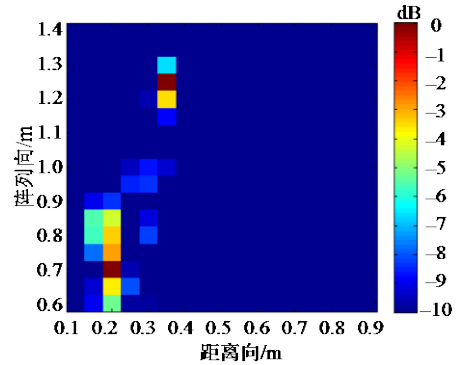


a. 单个目标置于  $(0.5 \text{ m}, 1.0 \text{ m})$  的成像结果

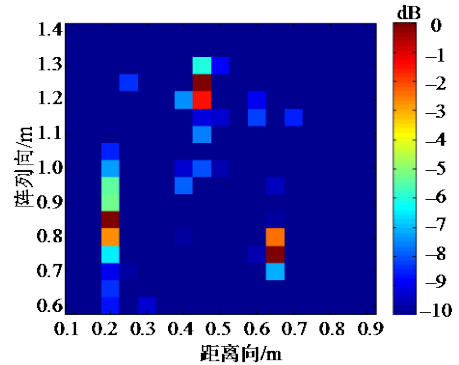


b. 单个目标置于  $(0.2 \text{ m}, 1.15 \text{ m})$  的成像结果

图5 单目标的EM-TRM成像



a. 2个目标的成像情况



b. 3个目标的成像情况

图6 多目标的EM-TRM成像

从图5和图6可知, 不论是单目标还是多目标, 也不论位置是否位于阵列的主轴方向上, EM-TRM都可以实现对复杂多散射环境下的隐蔽目标进行高分辨率和高对比度的成像。4幅图中目标与背景的对

比度均在10 dB以上, 3 dB成像分辨率也在0.1 m以内。

为了对比成像质量, 本文尝试利用BP(后向投影)算法对接收数据进行分析, 但未得到可展示的成像结果。其原因在于BP等算法主要利用的是直达波信息, 而在复杂多散射环境下, 目标与阵列天线间已基本被遮挡, 直达波信号非常微弱, 故BP算法难以获得较好的成像结果。这一结果也充分说明了EM-TRM成像技术在复杂多散射环境下的优势。

## 4 结束语

在复杂多散射环境下的目标探测中, 直达波信号非常微弱(甚至没有), 传统的阵列信号处理方法将无法进行有效的检测。本文利用EM-TRM技术, 结合Ray-tracing方法, 通过仿真分析实现了对复杂多散射环境下, 单目标和多目标的高分辨率和高对比度成像。EM-TRM技术基于互易原理, 充分利用环境信息, 从匹配滤波角度和统计意义上增加了探测有效的孔径, 从而可以实现对隐蔽目标的高精度成像。上述结果对丛林探测等应用背景具有一定的推广意义。

### 参 考 文 献

- [1] FINK M, PRADA C. Acoustic time reversal mirror[J]. *Inverse Probl*, 2001, 17(R): 1-38.
- [2] BLOMGREN P, PAPANICOLAOU G, ZHAO H. Super-resolution in time-reversal acoustics[J]. *J Acoust Soc Am*, 2002, 111(1): 230-248.
- [3] PAPANICOLAOU G, RYZHIK L, SOLNA K. Statistical stability in time reversal[J]. *SIAM J Appl Math*, 2004, 64(4): 1133-1155.
- [4] 夏云龙. 时间反转镜聚焦和成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
XIA Yun-long. Reserch of focusing and imaging with time reversal mirror[D]. Harbin : Harbin Engineering University, 2008.
- [5] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Time reversal of electromagnetic waves[J]. *Phys Rev Letts*, 2004, 92(19): (193904)1-3.
- [6] ZHENG W J, ZHAO Z Q, NIE Z P, et al. Evaluation of TRM in the complex through wall environment[J]. *Prog Electromagn Res*, 2009, 90(1): 235-254.
- [7] CHEN G P, ZHAO Z Q, ZHENG W J, 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.
- [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] LIU D, KANG G, LI L, et al. Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment[J]. *IEEE Trans Antenna Propag*, 2005, 53(9): 3058-3066.
- [10] MONTALDO G, TANTER M, FINK M. Revisiting iterative time reversal processing: Application to detection of multiple targets[J]. *J Acoust Soc Am*, 2004, 115(2): 776-784.

编辑 黄 莘