

地表目标的复合散射法及其 SAR 成像分析

刘培国, 刘克成, 尹家贤, 郭汉伟, 刘继斌

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文研究了复合激励方法在电磁散射计算中的应用, 此方法首先分析地面的散射, 再将地面的散射与入射波一起作为激励作用于目标, 从而得到目标的电磁散射信号. 文章分析了地表背景下车体的电磁散射, 计算了目标的 RCS 和 SAR 成像, 并与试验作了对比, 两者吻合较好.

关键词: 散射; 时域有限差分; 合成孔径雷达; 雷达散射截面

中图分类号: TM15 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 06-0922-03

Method of Composite Scattering and SAR Imaging for Targets Upon Ground

LIU Peigu, LIU Kecheng, YIN Jiaxian, GUO Hanwei, LIU Jibin

(College of Electric, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A model called composite excitation method for targets upon ground in the application of electromagnetic scattering computation is described. The method comprises two steps: first calculates the scattering of ground, second step calculates the scattering of targets by imposing the scattering wave got at first step upon the targets. A truck is concerned in this paper. The scattering waves, RCS in UHF frequency and SAR imaging are calculated. Good agreements between calculated and experimental results are obtained. It shows the effectiveness of the method.

Key words: scattering; FDTD; SAR; RCS

1 引言

目标与表面(地面、海面等)的复合散射是复杂的电磁波散射问题. 当目标处在表面环境之中时, 不能将目标的散射和表面的散射割裂为两个孤立的问题来处理, 而应该将目标与表面作为一个整体看待, 既要考虑体目标与表面各自独立的电磁散射, 又要考虑目标与环境之间的相互作用对散射特性的影响. 因为, 当表面与其上方的目标相关联时, 目标与表面之间的相互作用与平面波均匀照射表面不同. 平面波均匀照射的情况只能解释为相互作用问题中在满足远场条件下的某一谐波分量的作用, 反之, 若目标与表面之间存在远场关系, 其相互作用也就没有太大的实际意义了. 其次, 由于相互作用, 表面上各点受场的作用不同, 所以目标与表面之间不是远区关系.

对于探测地表目标的 SAR 雷达, 雷达回波中不仅包含目标回波, 同时还包括地面回波以及目标与地面耦合产生的回波. 分析地表目标宽频带散射, 可以在频域中计算多个频点上的目标散射特性, 或者直接分析脉冲信号作用下目标的时域散射波形^[4]. 美国曼彻斯特技术研究所的林肯实验室应用电场积分方程(EFIE)方法研究了地表的目標^[5], 并给出了仿真与 SAR 系统 CARABAS 的测量结果. Ohio 和 Duke 大学运用矩

量法建立了树丛下的目标模型^[1,2,3], 把大地作为均匀体, 目标和大地耦合分析采用了复镜像法, 计算繁重. 本文采用的复合激励方法, 既考虑了地面与目标的耦合, 又避免了繁重的计算. 对地面车体的分析结果与实验数据吻合较好, 说明了此方法的有效性.

2 复合激励法模型

复合激励法分析地表复杂目标散射特性分为两步: 第一步分析地面的散射特性; 第二步考虑地面与目标耦合, 研究目标的超宽带散射特性. 下面以时域分析说明此方法, 此方法也适用于频域, 步骤与时域相同.

2.1 地面散射

不失一般性, 分析地面散射时, 可以将计算简化在二维空间进行, 从而大大减小对计算机内存以及计算时间的要求, 更重要的是, 在二维空间分析地面散射, 可以大大增加 FDTD 仿真时所考虑地面的尺寸, 从而使结果更有效. 图 1 中粗实线方框 S_1 代表计算空间, $E_i(t)$ 为激励信号. 计算并存储虚线方框 S 上的散射场分量 $E_s(t)$.

2.2 地面与目标的复合散射

计算空间如图 2 所示, 目标置于虚线方框 S 内, S 内同时也包括了部分大地, 面积应当不小于有效反射的菲涅尔区, 因

此与电磁波的入射角度和频率有关. 由于地表目标的电磁散射作用可以看作在入射波和地面反射波共同作用下产生的, 此时入射信号不仅仅是 $E_i(t)$, 地面散射场 $E_s(t)$ 也作用于目标, 所以 $E_i(t)$ 与 $E_s(t)$ 同时作为入射信号作用于目标, 即为复合激励. 此时计算空间内仍然保留一部分地面, 所以目标与地面的相互耦合也得到了考虑. 此时, 激励信号为:

$$E_0 = E_i + E_s \quad (1)$$

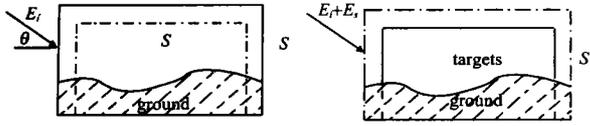


图 1 计算地面散射时的空间 图 2 计算地面与目标耦合时的空间
 本文采用 FDTD 作为计算方法, 此处仅给出场的一个迭代式. 例如最靠近面 S 的一层网格某一平面 ($i = i_0$) 上 FDTD 的磁场迭代为(此处仅写出 H_z 的迭代式, i, j, k 分别表示直角坐标系中 x, y, z 的离散值. $i = i_0 - 1$ 为 S 的内部, $i = i_0 + 1$ 为 S 的外部, 具体请参阅文献[6]):

$$H_z^{n+1/2}(i_0 + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) = H_z^{n-1/2}(i_0 + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) + \frac{\Delta t}{L \Delta y} [E_x^n(i_0 + \frac{1}{2}, j + 1, k) - E_x^n(i_0 + \frac{1}{2}, j, k)] - \frac{\Delta t}{L \Delta x} [E_y^n(i_0 + 1, j + \frac{1}{2}, k) - E_y^n(i_0, j + \frac{1}{2}, k)] + E_{iy}^n(i_0, j + \frac{1}{2}, k) + E_{sy}^n(i_0, j + \frac{1}{2}, k) \quad (2)$$

$E_{iy}^n(i_0, j + \frac{1}{2}, k)$: 入射信号 $E_i(t)$ 的 y 分量在 n 时刻的值, $E_{sy}^n(i_0, j + \frac{1}{2}, k)$: 地面散射场 $E_s(t)$ 的 y 分量在 n 时刻的值. 其它场分量以及其他连接面上的场具有相似的迭代式^[6]. 由于 $E_s(t)$ 是由 2.1 节中的二维空间得到的, 而此时的计算空间为三维空间, 所以 S 表面上不同点的 $E_{s,t}(t)$ 需根据该点位

置的时延确定.

3 仿真与试验结果

分析对象是某型号卡车, 如图 3, 车体的主要尺寸为: 总长 6.45m, 宽 2.5m, 高 2.2m, 车厢 4.05m, 驾驶室高 1.2m, 轮高 1m. 建立坐标系为: 车头的朝向为 $+x$ 轴 ($U = 0^\circ$), 地面的法向为 $+z$ 轴 ($H = 0^\circ$). 计算时采用完全匹配层 (PML) 技术, 入射信号为幅度归一的高斯脉冲. 对于不同角度的入射波, 得到目标的散射波, 通过时频变换后可以得到频域数据.

3.1 地面散射

按照 2.1 节的二维计算区域, 将地面看作有耗色散介质, 采用色散 FDTD 方法得到高斯脉冲作用下的地面散射波形如图 4, 图中角度为入射波与地面夹角, 横坐标为时间.

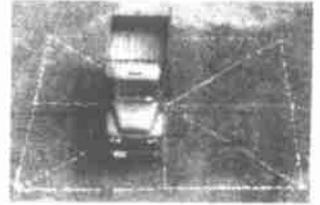


图 3 分析目标

3.1.2 车体散射

根据 2.1.2 节, 由 3.1.1 节得到地面的散射波与入射的高斯脉冲共同构成式 (1) 的 E_0 , 作为地表车体的入射信号, 采用 FDTD 方法计算得到地表车体的复合散射波. 定义目标的传递函数:

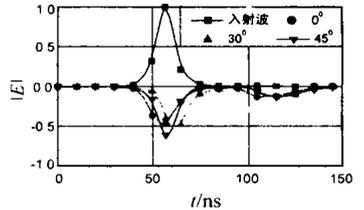


图 4 地面散射波形

$$H(X) = \frac{S_r(X)}{S_i(X)} \quad (3)$$

$S_r(X)$: 目标散射波的福里叶变换; $S_i(X)$: 入射波的福里叶变换. 由传递函数可以计算目标的雷达散射截面.

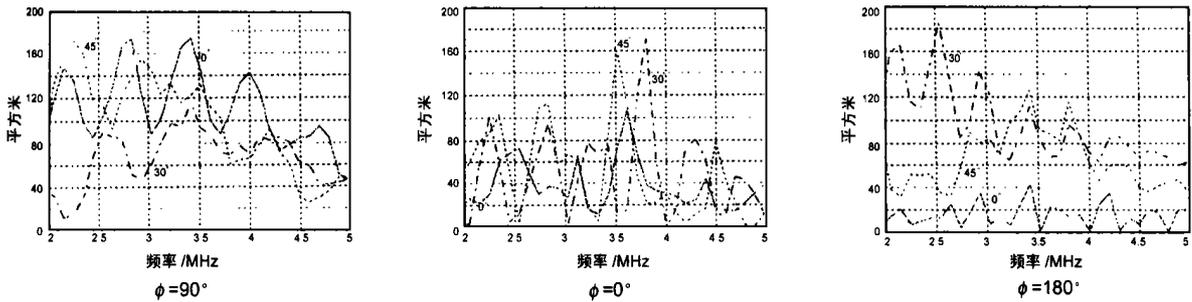


图 5 地表车体的单站 RCS

应用 UWISAR 系统对目标试验得到目标的一维像和复合激励方法计算得到的结果示于图 6. 其中入射波与地面的夹角为 30° ($H = 60^\circ$), 分析图 6 可以看到一些明显的强散射中心. 以图 6 (a) 为例, 信号从车头入射时, 车头与地面构成二面角, 产生强反射; 坐舱反射也比较强, 而且由于坐舱为腔体, 所以此处反射有振荡; 车厢底板与后挡板构成二面角, 所以也有较强的反射. 图 6 (b), (c) 与此类似.

根据复合激励法方法对地表车体进行 SAR 成像仿真. 积累角为 40° ($+20^\circ \sim -20^\circ$), 航迹与目标的最小距离为 240 米, 航迹到目标视线与地面的角度为 30° . 目标与航迹的方位关系如图 3, 此图为航迹与目标的最近时的照片. 图 7 给出了仿真 SAR 成像与通过轨道 SAR 系统得到的实验成像, 上侧为轨道 SAR 测试结果, 下侧为复合激励法方法的计算结果. 从图中可见地表车体 SAR 成像有三块高亮区, 分别对应车头、座舱和

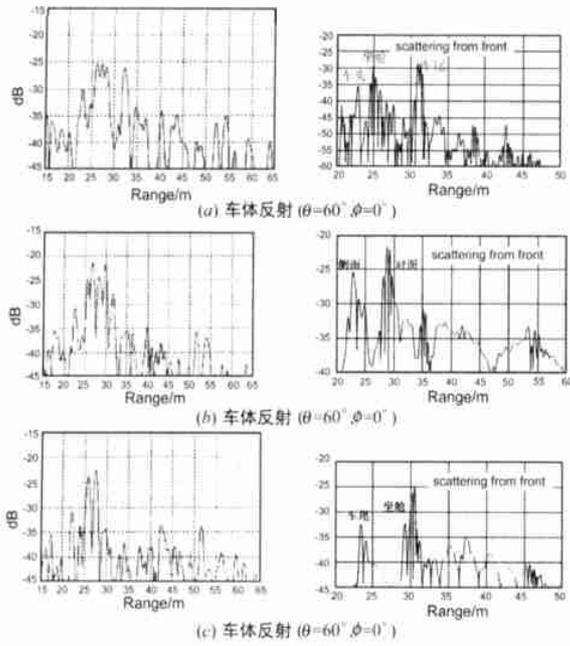


图 6 车体的一维像

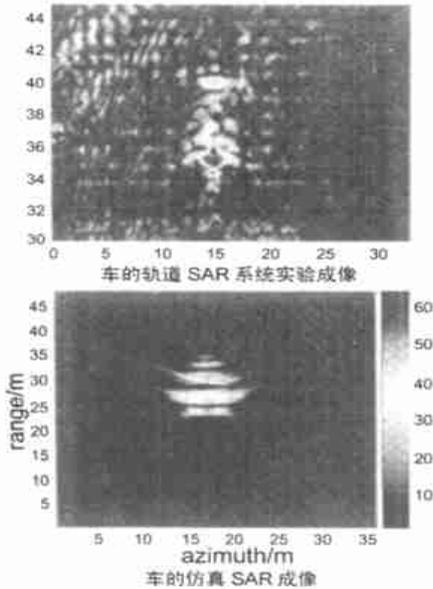


图 7 卡车的 SAR 图像

车厢后挡板三个高反射区. 从图中可见两副图具有很好的可比性, 说明仿真算法是比较成功的.

4 结论

本文提出了分析地表目标的复合激励方法, 并采用 FDID 方法分析了地表车体的电磁散射, 得到了不同角度电磁波入射时车体的 RCS 及其 SAR 像, 与试验结果对比表明此方法是有效的.

参考文献:

- [1] R Rajagopal, L L Potter. On polarimetric calibration for UWB radar [J]. SPIE(3704) 1999, 4: 66- 74.
- [2] Anders Sullivan, Jangqi He. Phenomenological modeling for FOPEN SAR: Tree2trunk scattering on flat terrain and with concealed targets [J]. SPIE(3721), 1999, 4: 224- 234.
- [3] Norbert Geng, Lawrence Carin. UWB SAR for detection of subsurface unexploded ordnance (UXO): Measurement modeling and signal processing [J]. SPIE(3704), 1999, 4: 75- 83.
- [4] Erik H Lenzing, R A Pastore Jr. UltraWide Band Antenna for High2 Power Operation. UltraWide band ShortPulse Electromagnetics [M]. New York: Plenum Publishing Corporation, 1994.
- [5] Ckeck F Lee, Bradiey T Binder. UWB SAR signature investigations based on electromagnetic models and measurements [J]. SPIE 2487: 56 - 70.
- [6] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

作者简介:



刘培国 男, 1969 年生于山东, 博士, 国防科技大学副教授, 已发表论文 20 余篇, 获部级科技进步一、二、三等奖各一项, 研究领域为电磁场数值分析、目标特性以及电磁兼容等.

刘克成 男, 1937 年生于江苏, 国防科技大学教授, 电子学会高级会员, 多家期刊的编委, 出版专著 3 部, 发表论文 40 余篇, 获各级科技进步等奖 10 余项, 研究领域为天线与电磁传播、超宽带技术等.