

文章编号: 1001-4322(2006)07-1149-05

# 强电磁脉冲信号激励下复杂目标的散射<sup>\*</sup>

李 毅, 梁步阁, 张光甫, 袁乃昌

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 用时域有限差分法仿真了某飞行器缩比模型及该模型涂敷雷达吸波材料的散射特性, 得到了鼻锥方向、侧向和后向 ns 级脉冲激励下模型的时域响应和频域雷达散射截面; 并在外场用 ns 级脉冲源进行了该金属模型的探测实验。仿真与外场实验结果均得到了模型的鼻锥方向回波幅度最小, 侧向最大; 鼻锥方向回波脉宽最宽, 侧向最窄的结论。研究结果表明: 外形隐身和材料隐身对 ns 或亚 ns 级窄脉冲的隐身效果不明显, ns 或亚 ns 级窄脉冲能发现和识别隐身目标。

**关键词:** 脉冲; 时域有限差分方法; 外形隐身; 材料隐身; 雷达散射截面

**中图分类号:** O441

**文献标识码:** A

近年来, 高功率微波的研究取得了重大进展, 大功率脉冲信号源研制取得了突破, GW 级脉冲源已研制成功<sup>[1]</sup>。极短脉冲信号功率大, 信号频谱宽, 在探测隐身目标方面有独特优势, 可以减轻现有雷达尤其是军用雷达面临的多种威胁, 因此冲激雷达(即无载波雷达)的研究空前活跃起来, 后来把这种雷达列为超宽带雷达(ultra-wideband radar)或超宽谱雷达(ultra-wide spectrum radar)的一种<sup>[2-3]</sup>。复杂目标在超宽带信号照射下, 回波信号有别于窄带雷达, 接收机输入端的信号不再是简单发射信号的延迟和多普勒频移, 而是发射信号与目标冲激响应的卷积, 它反映了目标强散射中心在径向距离轴上的投影分布, 即 1 维距离像。

现在隐身技术主要手段是外形隐身与材料隐身。某些飞行器不但有复杂的隐身外形, 表面还有吸波材料(RAM)涂层, 是非常复杂的目标。本文就以某飞行器为例, 用时域有限差分法(FDTD)<sup>[4]</sup>计算了该飞行器的 1:12 缩比金属模型和其表面涂敷吸波材料情况下的瞬态散射特性, 得到了该模型在 ns 级脉冲激励下的回波特征, 并与外场实验结果互相验证。

## 1 复杂目标的散射仿真

### 1.1 激励脉冲

对于瞬态散射等时域问题, FDTD 是一种比较成熟可靠的方法, 也是当前电磁场数值计算常用的方法。因为在外场实验中脉冲源脉宽是 ns 级, 所以在仿真计算缩比模型的瞬态散射特性时, 选用双高斯脉冲作为入射平面波。双高斯脉冲的特点是只有三个时间瓣且幅度差别明显, 无直流分量, 通过调整常数  $\tau_1, \tau_2$  可以比较容易地控制其有效频谱范围。双高斯脉冲幅度为

$$p(t) = \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau_1^2}\right] - \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau_2^2}\right], \quad 0 < \tau_1 < \tau_2 \quad (1)$$

式中:  $\tau_1, \tau_2$  是根据需要可以调整的常数。脉冲峰值出现在  $t=t_0$  时刻。  $p(t)$  的频谱  $p(f)$  为

$$p(f) = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \{ \exp[-(\pi \tau_1 f)^2] - \exp[-\pi \tau_2 f)^2] \} \quad (2)$$

式中:  $f$  是电磁波频率。当  $t_0=3$  ns,  $\tau_1=0.8$  ns,  $\tau_2=1$  ns 时, 该双高斯脉冲的时域波形及频谱如图 1 所示, 其有效频率范围为 0.05~1.00 GHz。

### 1.2 涂敷的介质材料

本文主要探索隐身飞行器隐身的一般规律, 因此主要研究了飞行器两种主要的隐身方式: 机体外形隐身和材料隐身。所以考虑该模型为全金属模型和模型表面全部涂敷介质的情况。

本文研究的飞行器缩比模型的外形有良好的隐身性能<sup>[5]</sup>, 所以文中不再另行设计隐身外形, 主要考虑飞行器模型的涂敷吸波材料的隐身。在仿真计算中, 飞行器的涂层吸波材料按照一般吸波材料的参数进行设置, 以

\* 收稿日期: 2006-02-05; 修订日期: 2006-04-24

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 李 毅(1977—), 男, 博士生, 主要从事电磁散射、电磁场数值算法及超宽带雷达的研究及应用; liyihny@sina.com。

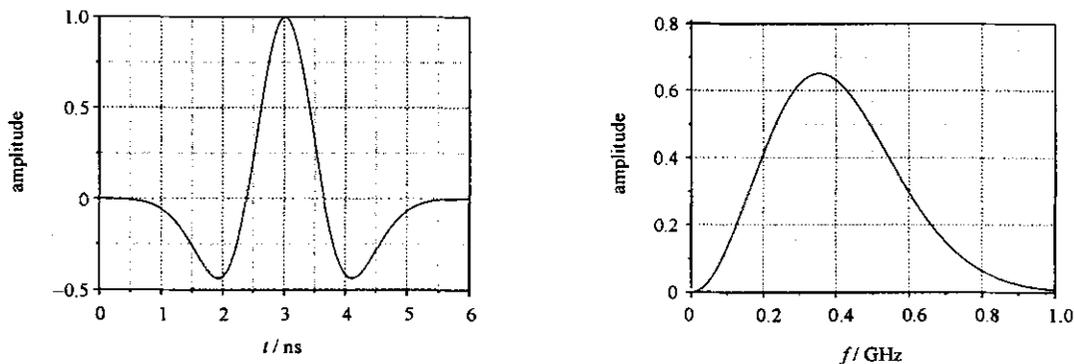


Fig. 1 Time-domain waveform and amplitude spectrum of double Gaussian pulse

图 1 双高斯脉冲时域波形及幅度谱

考察吸波材料的一般规律。就目前的技术水平,一种吸波材料实现全波段吸波是不可能的,因此将吸波材料的吸波频段设置在 X 波段,这符合实际情况。假设有某种雷达吸波材料,其相对介电参数  $\epsilon_r = 9.40 - j3.79$ , 相对磁导率  $\mu_r = 1.0$ , 涂敷厚度为 2.5 mm。

图 2 为用 FDTD 模拟垂直极化平面波垂直照射到 200 mm×200 mm 金属板表面和涂敷厚度 2.5 mm 吸波材料的平板的散射情况,其纵坐标  $\sigma$  为雷达散射截面(RCS)。

为了直观地了解不同电磁波频率下吸波材料反射率的大小,也为了检验 FDTD 方法的准确性,图 3 给出了吸波材料反射率的解析值和通过比较金属平板和涂敷吸波材料的平板的散射得到的吸波材料的反射率。对电磁波频率在 1 GHz 以下的低频段,200 mm×200 mm 的金属平板相对电磁波的波长太小,FDTD 仿真得到的反射率不准确,故图中没有给出电磁波频率在 1 GHz 以下的吸波材料的反射率。由图 3 可见,两条曲线吻合很好,因此 FDTD 计算涂敷介质的导体目标是可行的。这种吸波材料在电磁波频率约为 10 GHz 有很好的吸波效果,在中心频率 10 GHz 处,达到 -60 dB 的反射率;从图 2 可以看出,电磁波频率小于 4 GHz 时两条曲线几乎重合,表明涂敷吸波材料与不涂敷吸波材料的金属平板的散射几乎相同,这说明吸波材料对频率在 4 GHz 以下的电磁波反射率接近 0 dB,几乎没有吸波作用。

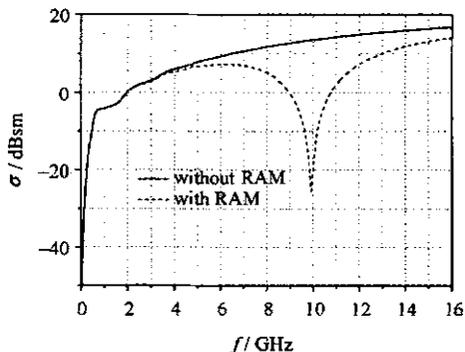


Fig. 2 Monostatic RCS of 200 mm×200 mm metal plane

图 2 200 mm×200 mm 金属平板的单站 RCS

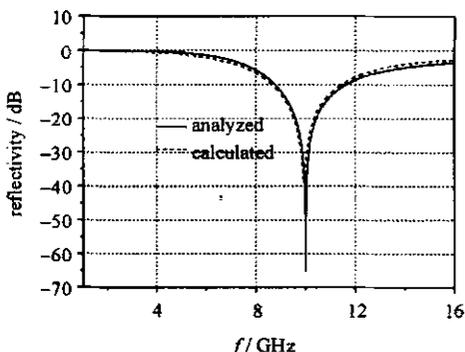


Fig. 3 Reflectivity of RAM

图 3 吸波材料的反射率

### 1.3 仿真与分析

仿真中金属模型长 1.702 m,翼展 1.110 m,高 0.193 m(不包括起落架)。在用 FDTD 法仿真计算中,原则上网格小一些,计算精度要高一些。但考虑到计算机内存的限制以及涂敷吸波材料厚度为 2.5 mm,模型采用 2.5 mm 均匀网格剖分,同时用基尔霍夫积分进行电磁场的近远场变换。对这样的复杂目标,首先在 AutoCAD 建模软件中建立实体模型,再利用其网格剖分功能生成目标的网格模型,导入到 FDTD 计算程序中。按此方法生成的某型隐身飞机缩比模型的网格模型如图 4 所示。因为图 4 是金属飞机模型的网格模型,而吸波材料厚度为 1 个网格,所以涂敷吸波材料的飞机模型的网格模型需要在此模型表

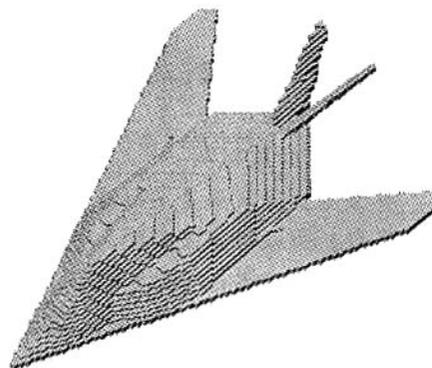


Fig. 4 Grid model of some fight plane

图 4 某型飞机的网格模

面再加一层网格。

在双高斯脉冲作用下,模拟计算了飞机鼻锥方向、尾部、侧面垂直极化平面波入射的单站散射。图 5~7 是缩比模型的仿真结果。从图 5~7 的瞬态散射回波来看,鼻锥方向回波幅度最小,侧向最大;鼻锥方向回波脉宽最宽,侧向最窄;涂敷吸波材料后的瞬态散射回波幅度比未涂敷吸波材料在每个方位上的都有一定的减小,但下降幅度很小;三个方位上瞬态散射回波波形有明显差异,未涂敷与涂敷吸波材料的散射回波幅度和波形也有差异,因此可以通过检测瞬态散射回波识别目标。实际上瞬态散射回波就是目标的 1 维距离像,检测回波的极值就可得到目标散射中心。如果得到目标一定角度范围内的回波,就可得到目标的 2 维像。

从图 5~7 的频域 RCS 看,涂敷吸波材料的 RCS 整体而言比未涂敷小,但不明显。这是由于这种吸波材料的工作频段在 X 波段,是窄带吸波材料,在 X 波段外几乎没有吸波能力。事实上,就目前的技术水平,即使涂敷在飞机上的是宽带吸波材料,也很难对 1 GHz 以下的电磁波有吸收作用。要在 1 GHz 频率以下实现吸波,就必须加厚吸波材料,但受飞机重量、机动性要求的限制,吸波材料不可能做得太厚。三个方位的 RCS 值最大处都超过 -10 dBsm,侧向更是接近 0 dBsm;据电磁相似律<sup>[6]</sup>,用缩比金属模型的 RCS 值估算全尺寸金属模型 RCS 值的计算公式为

$$\sigma_{\text{RCS,full}} = \sigma_{\text{RCS,scal}} + 10\lg 12^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\text{RCS,full}}$ 是全尺寸目标的 RCS, $\sigma_{\text{RCS,scal}}$ 是缩比模型的 RCS。所以全尺寸金属目标的 RCS 最大处将超过 11.5 dBsm,证明这种飞机在低频区的隐身性能并不好,这是因为在瑞利区,目标的 RCS 取决于目标的体积而不是它的外形。

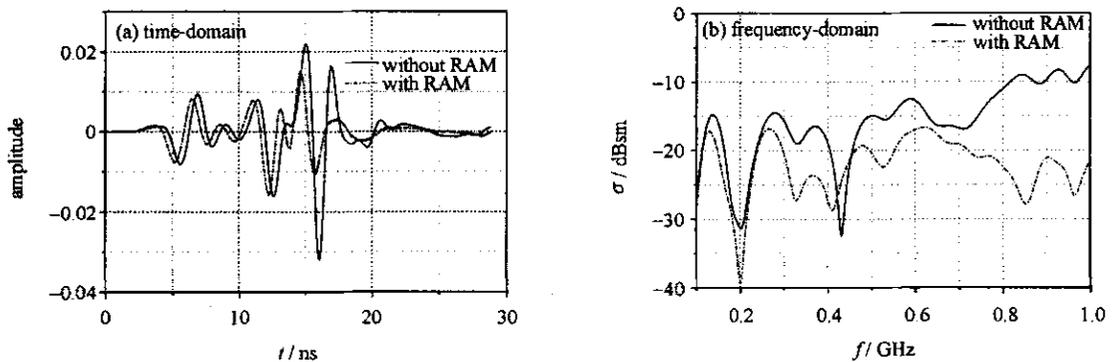


Fig. 5 Monostatics scattering of nose-angle incidence

图 5 鼻锥入射情况下的后向散射的瞬态响应和频域 RCS

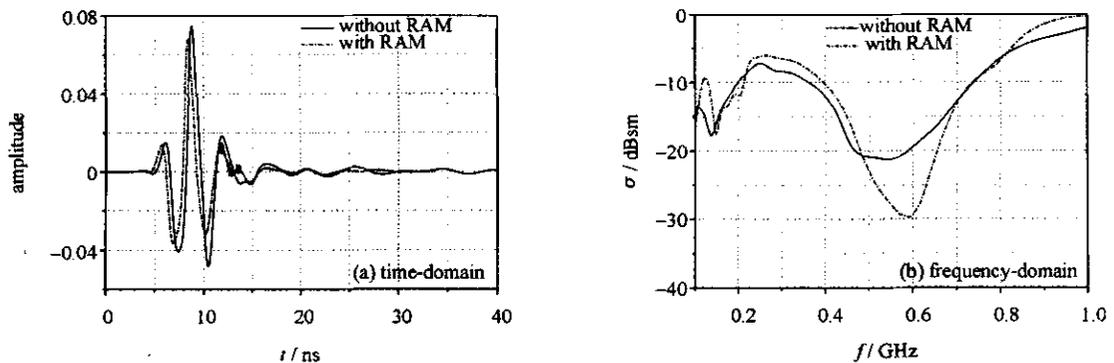


Fig. 6 Monostatics scattering of side-angle incidence

图 6 侧向入射情况下的后向散射的瞬态响应和频域 RCS

## 2 外场实验

为了进一步验证仿真得到的目标散射特点,我们用高功率固态脉冲源<sup>[7]</sup>在外场对该飞机进行了模型的探测实验。因为现在的隐身飞机主要针对高频隐身,图 2,3,5~7 证实涂敷吸波材料对低频雷达探测影响非常小,所以我们只用金属缩比模型进行探测实验。实验脉冲源功率 1 MW,分 8 个通道,每个通道的瞬时功率是 0.125 MW,每个通道接 1 个天线辐射信号,在空间上实现辐射功率合成<sup>[8]</sup>,图 8 为一个通道的归一化远场辐

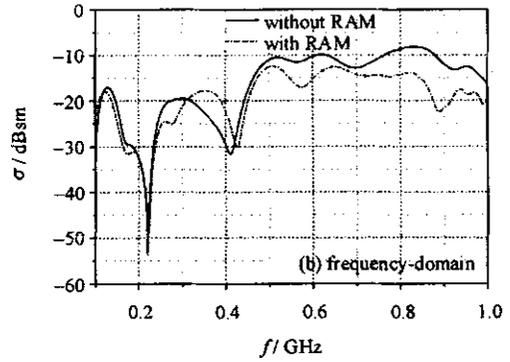
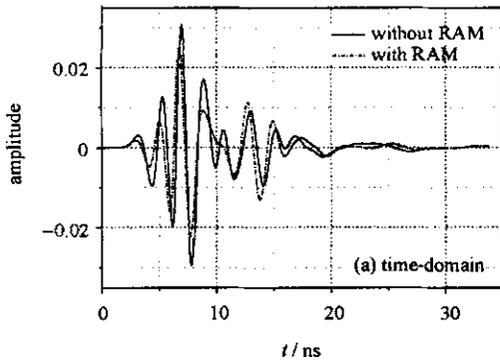


Fig. 7 Monostatics scattering of back-angle incidence

图 7 后向入射情况下的后向散射的瞬态响应和频域 RCS

射波形,脉宽 2 ns。目标放置于距离脉冲辐射源 460 m 远的 6 m 高的泡沫塔上。图 9 是接收目标的三个不同方位的散射回波图,纵坐标是回波幅度,横坐标是辐射源到飞机模型的距离。因为辐射的脉冲已不是仿真所用的双高斯脉冲,接收信号已经过 IQ 解调处理,所以接收回波与仿真所得回波形状不同,但可以定性分析。

由图 9 可知,鼻锥回波幅度最小,侧向最大;鼻锥脉冲回波脉宽最宽,后向最窄。这证实了仿真结果,因此冲激雷达可以探测隐身目标。如果是对空探测全尺寸目标,增大发射源功率,就可以实现远距离的探测。1997 年国外已有作用距离达到 25 km 的实验型冲激雷达<sup>[9]</sup>,并能跟踪上百批次目标。

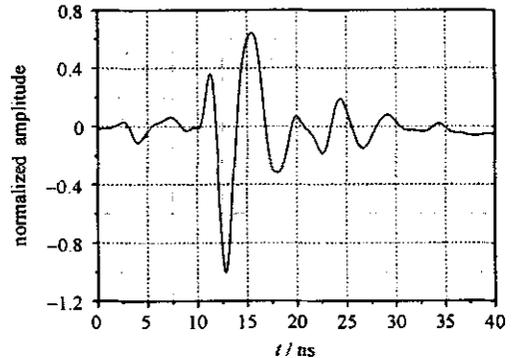


Fig. 8 Normalized far-field waveform of radiation signal of single channel

图 8 单通道辐射信号的归一化远场波形

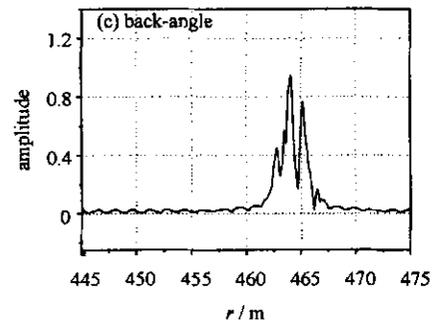
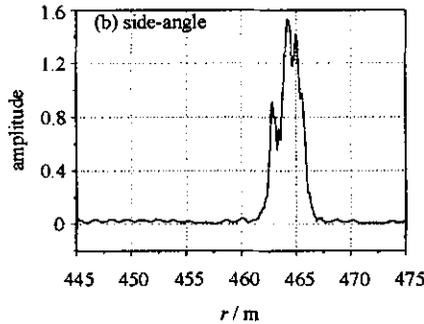
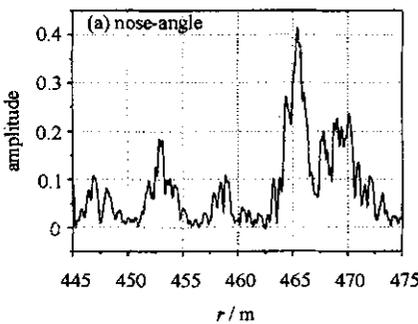


Fig. 9 Backscatter stimulated by nose-angle, side-angle and back-angle incident wave

图 9 鼻锥、侧向和后向脉冲激励下的后向散射的时域回波

### 3 结 论

本文用 FDTD 实现了对复杂目标飞行器及其表面涂敷介质的瞬态散射仿真,仿真结果和外场实验表明 FDTD 方法能有效处理复杂目标的瞬态散射;飞行器表面涂敷吸波材料在低频区隐身效果不明显,隐身飞行器对冲激雷达难以隐身;短脉冲信号具有精细分辨能力;通过分析目标的瞬态散射回波信号的波形、幅度及延时可以得到关于目标的形状、尺寸和材料等信息;外形隐身和材料隐身对 ns 或亚 ns 级窄脉冲的隐身效果不明显,ns 或亚 ns 级窄脉冲能发现和识别隐身目标。

### 参考文献:

[1] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1 000 PPS high-voltage nanosecond pulse generator[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1997, 25(2): 258-265.

[2] Taylor J D. Ultra-wideband radar technology[M]. London: CRC Press, 2000.

[3] Heyman E, Mandelbaum B, Shiloh J. Ultra-wideband short-pulse electromagnetics 4[M]. Boston: Kluwer Academic Pub, 1999.

[4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. (Ge D B, Yan Y B. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves. Xi'an: Xidian University Press, 2002)

- [5] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998:17-22. (Ruan Y Z. Radar cross section and stealth technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1998:17-22)
- [6] Currie N C. Radar reflectivity measurement: techniques and applications[M]. Boston: Artech House, 1989.
- [7] 梁步阁, 朱畅, 张光甫, 等. 高功率全固态微波纳秒级脉冲源的设计与应用[J]. 国防科学技术大学学报, 2004, 26(6):38-43. (Liang B G, Zhu C, Zhang G F, et al. The design of high-power nanosecond pulser based on microwave PCB and its application. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(6):38-43)
- [8] 梁步阁, 张光甫, 袁乃昌, 等. 超宽带雷达用 MW 级全固态高重频纳秒脉冲源的多路相干合成实现技术研究[C]//中国第一届超宽带短脉冲电磁学会议. 镇江: 江苏大学出版社, 2005:179-183. (Liang B G, Zhang G F, Yuan N C, et al. Study on synchronization of MW multi-channel full-solid high-repetition-rate pulse sources using in UWB impulse radar systems//China 1st Conference of Ultra Wideband Pulse and Electronic Field. Zhenjiang: Publishing House of Jiangsu University, 2005: 179-183)
- [9] 何建国, 陆仲良, 刘克成. 超宽带反隐身机理综述[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(1):71-76. (He J G, Lu Z L, Liu K C. Anti-stealth mechanism of UWB radar. *Journal of National University of Defense Technology*, 1997, 19(1):71-76)

## Simulation and experiment for scattering of complex objects stimulated by powerful electromagnetic pulse

LI Yi, LIANG Bu-ge, ZHANG Guang-fu, YUAN Nai-chang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The scattering characteristics of an airplane model and the radar absorbing material covered on the model are simulated by the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the time-domain echoes and frequency-domain radar cross section echoes of the model from nose-angle, side-angle and back-angle stimulated by an ns pulse are obtained. The results of the simulation and outdoor experiment show that the echo amplitude of the nose-angle is the lowest and that of the side-angle is the highest. The pulse-width of the nose-angle echo is the widest and that of the side-angle is the narrowest. The shape-stealth and material-stealth are not effective for ns or sub-ns pulse signals.

**Key words:** Pulse; Finite-difference time-domain method; Shape-stealth; Material-stealth; Radar cross section