

文章编号: 2095-4980(2022)02-0170-06

基于散射中心模型的目标时域回波快速仿真

付松¹, 李新²

(1.中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036; 2.武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为快速获取超宽带电磁脉冲激励下雷达目标在时域上的电磁响应, 提出一种基于属性散射中心正向建模的方法用于目标时域回波仿真。从目标几何模型出发, 利用射线追踪、分集技术对空间中所有射线进行标记与归类, 分离并定量表征目标的强散射源。基于属性散射中心模型, 正向确定模型参数, 构建出目标属性散射中心模型, 在选定的辐射源激励下进行仿真计算, 快速获取目标时域回波信号。以典型目标简化坦克为例, 选取不同形式的超宽带电磁脉冲信号作为辐射源, 基于正向建模方法构建简化坦克的散射中心模型, 快速获取给定电磁脉冲激励下的雷达回波信号, 并与利用高频仿真方法得到的一维距离像对比, 结果具有较好的一致性, 从而验证了利用散射中心模型快速进行不同辐射源激励下回波仿真的有效性。

关键词: 散射中心模型; 超宽带电磁脉冲; 高分辨力距离像; 回波仿真; 正向建模

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020186

Fast simulation of target time-domain echo based on scattering center model

FU Song¹, LI Xin²

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

2.Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: A forward modeling method is proposed based on attribute scattering center for target time domain echo simulation in order to quickly obtain the electromagnetic response of the radar target in the time domain under the excitation of Ultra-Wideband(UWB) electromagnetic pulses. Starting directly from the target geometric model, ray tracing and diversity techniques are adopted to mark and classify all rays in space, the strong scattering source of the target is separated and quantitatively characterized. Based on the form of the attribute scattering center model, the model parameters are positively determined, the target attribute scattering center model is constructed, and the simulation calculation is performed under the excitation of the selected radiation source to quickly obtain the target time-domain echo signal. Taking a typical target simplified tank as an example, different types of UWB electromagnetic pulse signals are selected as the radiation source, and a simplified tank scattering center model is constructed based on the forward modeling method to quickly obtain radar echo signals under the excitation of a given electromagnetic pulse. Compared with the one-dimensional distance profile obtained by the high-frequency simulation method, the results of the proposed method have good consistency, which verifies the effectiveness of using the scattering center model to quickly perform echo simulation under the excitation of different radiation sources.

Keywords: scattering center model; UWB electromagnetic pulse; High Resolution Range Profile; echo simulation; forward modeling

近年来,随着雷达系统以及计算机技术的发展,雷达系统的仿真需求也变得更加复杂和多样。在雷达系统研究及研制过程中,模拟仿真技术的使用愈发得到重视。其中,雷达回波信号模拟仿真作为雷达系统研制开发的前端工作^[1],不仅在雷达系统的开发过程中至关重要,对数据进行进一步处理时也发挥重要作用。相较于窄带雷达,宽带雷达具有更高的分辨力和更远的作用距离,应用更为广泛。因此,深入探究宽带雷达复杂目标的时域回波模

拟仿真技术具有深远的研究意义。

对于宽带雷达回波仿真的研究,文献[2]给出一种用于获取雷达目标速度的模拟算法,主要基于线性调频信号,原理简单且计算量小,但缺乏广泛的适用性。文献[3]为解决弹载雷达系统运算量大的问题,引入慢时间概念,给出一种雷达回波快速仿真方法。文献[4]利用弹跳射线和等效边缘电磁流等高频电磁计算方法模拟仿真宽带雷达回波,在简化计算过程的同时提高了雷达回波重构的实时性。以往多采用高频电磁仿真方法计算目标特性,对于超宽带,由于频域采样点过多,造成运算时间过长且数据量庞大的问题。因此,对以属性散射中心模型为代表的目标散射中心建模研究越来越广泛。散射中心及其参数的提取方法共有两种^[5]:一种是通过反演进行参数估计;另一种方法即本文采用的正向建模方法,基于目标 CAD 模型,采取近似解析办法对目标散射中心进行推导分离。该方法相较反演法,具有计算量小且参数物理意义明确的优势。同时,对于不同形式但调制频率一致的辐射源,基于正向建模的时域回波仿真方法只需在已有的属性散射中心模型上考虑入射波变化,简单便捷,为快速获取所需回波信号提供可能。

本文以超宽带电磁脉冲作为雷达信号,旨在研究该发射信号激励下的雷达目标时域电磁响应。选用 2 种不同形式的脉冲作为雷达发射信号进行时频域特性分析。然后从目标几何模型出发,利用射线追踪、分集技术提取目标强散射中心,采取正向建模方法计算出参数化模型的相关参数,从而构建出用于描述雷达目标电磁散射特性的参数化属性散射中心模型。最后将目标的散射中心模型与选定的雷达发射信号进行仿真计算,从而获取目标在选定发射信号下的时域回波。基于散射中心模型获取的回波数据不仅在目标识别领域,其在模拟战场训练、雷达系统的研制、性能评估等领域都起着重要的促进作用。

1 超宽带电磁脉冲信号时频域特性

对目标进行时域回波仿真不仅需要获取雷达目标自身的电磁散射特性,同时雷达发射信号的相关信息也应该被准确包含在雷达的模拟回波中^[6]。作为回波仿真的基础,采用不同形式的雷达发射信号,对应的模拟回波形式也会相应发生改变。本文选用超宽带电磁脉冲信号以验证基于正向建模的回波仿真方法在不同辐射源激励下的有效性,因此首先对不同形式的超宽带电磁脉冲信号进行介绍。

1.1 调制高斯脉冲

基于美国联邦通信委员会频谱限制考虑^[7],可以把绝对带宽较小的高斯脉冲信号与高频正弦波相乘,将信号的中心频率搬移到所需要的频率点,由此获得调制高斯脉冲信号,并具有超宽带特点。

调制高斯脉冲信号的时域表达式为:

$$E(t) = \cos(2\pi f_m t) \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\cos(2\pi f_m t)$ 为基波表达式, f_m 为调制高斯脉冲的中心频率;指数部分为基本高斯脉冲的时域表达式; t_0 为时间延迟,信号在 $t=t_0$ 时刻出现脉冲峰值; τ 为高斯脉冲的宽度常数。

对式(1)表示的调制高斯脉冲做傅里叶变换,得到信号频谱形式为:

$$E(f) = \frac{\tau}{4} \exp\left(-\frac{\pi(f-f_m)^2 \tau^2}{4}\right) \exp[-j2\pi(f-f_m)t_0] \quad (2)$$

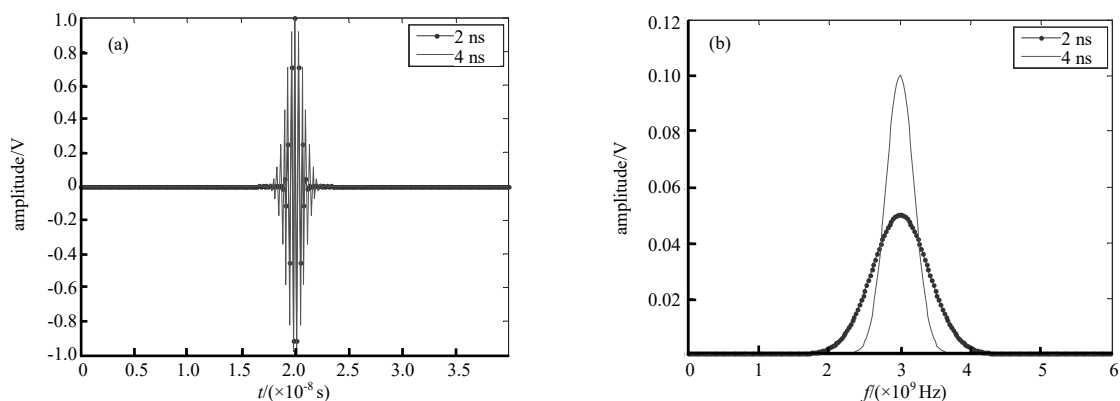


Fig.1 Transmit signal waveform(a) and spectrum(b)

图 1 发射信号波形(a)和频谱(b)

1.2 调制高斯脉冲的时频特性

选用 2 种形式的超宽带电磁脉冲, 中心频率 f_m 均选取为 3 GHz, 宽度常数 τ 分别取 2 ns 和 4 ns, 时延 t_0 取 50 ns, 将此参数下的调制高斯脉冲信号作为辐射源进行分析, 则对应雷达发射信号的波形及频谱如图 1 所示。

2 目标属性散射中心模型构建

当雷达在高频区域工作时, 目标的尺寸远远大于波长。根据电磁散射的局部性原理, 目标的总体后向散射场可看作是目标上多个独立散射中心散射场的叠加, 每个散射中心的散射场仅与该散射中心的入射场与散射中心附近的几何特征有关^[8]。因此, 对于高频雷达照射下的复杂目标, 可以通过描述一组散射孤立的散射中心来近似表示目标的散射特性。本文使用基于属性散射中心模型的正向建模方法实现对目标散射特性的描述。

2.1 属性散射中心模型

经过理想点散射模型及衰减指数和模型的发展, Potter 于 1995 年提出了基于几何绕射及物理光学理论, 以幂函数形式描述各散射中心响应对频率依赖关系的几何衍射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)模型; 1997 年, 在保留了 GTD 模型对频率描述的基础上, 采用指数函数对方位角进行建模; 1999 年, Potter 等再次提出更加完善的属性散射中心模型, 根据散射对方位角依赖的不同, 将属性散射中心分为分布型散射中心和局部型散射中心。具体的表达形式如下^[5,9]:

$$E_i^s(f, \varphi) = A_i \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \text{sinc}(kL_i \sin(\varphi - \varphi_i')) \exp(-kc\gamma_i \sin \varphi) \exp\{-j2k(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)\} \quad (3)$$

式中: E_i^s 为散射中心的散射场, i 为散射中心的序号, $i=1,2,\dots,p$, p 为散射中心总个数, 任一散射中心的散射场是频率 f 与方位角 φ 的函数; f_c 为雷达带宽的中心频率; c 为光速; $k=2\pi f/c$ 为波数; A_i 为该散射中心的幅度参数; α_i 为第 i 个散射中心散射场与频率的依赖关系; x_i, y_i 分别为散射中心在距离上和方位上的位置参数; $(L_i, \gamma_i, \varphi_i')$ 共同组成结构参数, 表征散射中心与方位的依赖关系, 其中 L_i 为该散射中心的长度参数; γ_i 为该散射中心的位置矢量在成像面上的投影, 称为衰减分量。长度参数 $L_i=0$ 时, 该散射中心为局部型散射中心, 在空间中表现出点散射特性, 此时用衰减参量 γ_i 描述这种散射中心随方位角变化而缓慢变化的轻微依赖特性。与之相对应, 分布型散射中心的散射特性在图像上表现为长度有限, 其幅度特征依赖于方位角, 因此使用长度参数 L_i 描述成像角度下散射中心在方位向上的有效展布长度; φ_i' 为姿态参数, 表示分布型散射中心成像方位角的偏离程度, 因此使用 sinc 函数表征分布型散射中心在方位角上的依赖特性^[9]。由此, 表达式中的 7 个参数 $(A_i, \alpha_i, x_i, y_i, L_i, \gamma_i, \varphi_i')$ 构成了一个参数集, 用于描述某个散射中心的物理特性。一般来说, 复杂目标的总散射场是由 p 个独立散射中心共同贡献所得, 即

$$E^s(f, \varphi) = \sum_{i=1}^p E_i^s(f, \varphi) \quad (4)$$

因此用参数集 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$ 作为复杂目标的散射中心模型, 用于描述整个目标的散射特性, 其中 $\theta_i = (A_i, \alpha_i, x_i, y_i, L_i, \gamma_i, \varphi_i')$ 即为用于描述单个散射中心的参数集。

2.2 雷达目标的属性散射中心模型构建

本文以简化坦克为例进行超宽带电磁脉冲下的雷达回波模拟, 首先从简化坦克的几何模型出发, 基于空间射线分集技术进行简化坦克的强散射源提取, 运用上述属性散射中心理论, 通过正向建模的方法简化坦克的散射中心模型构建。

为获取目标的总电磁散射响应, 需要得到目标上多个独立散射中心的电磁响应, 因此需要对目标的强散射源进行提取。不同于以往由目标散射回波数据进行散射中心筛选的传统方法, 利用空间射线分集技术进行目标强散射源提取, 不仅计算便捷, 且具有明确的物理意义。基于几何光学的理论, 将入射波看作光学中的入射光线, 则电磁波的传播方向与光线的传播方向相同。因此借助光线的直线传播定律、反射定律及折射定律, 通过模拟空间中的回波路径从而实现对空间中射线反射特性及散射特性进行描述的目的。该方法也被称为射线追踪方法。在使用该方法的基础上, 空间射线分集技术就是通过对空间中的不同射线进行标记, 将来自不同部件、不同方向或不同路径的射线分离开来, 并将来自同一部件、路径相同的射线进行归类分集。

具体的实现方法为^[10]: 对目标进行分解之后, 将分解得到的 M 个实体部件分别标记为 I_1, I_2, \dots, I_M 。当入射射

线 r_i 进行照射时，假设 r_i 照射到的目标三角面元为 t_i ，入射射线的作用点为面元的中心点 Q_i ，则记录下该三角面元的索引号 $[I_{Q_i}]$ 。由几何光学反射定律可知，该三角面元产生的反射射线可看作新的入射射线，作用于目标的其他面元，顺序记录下该三角面元的索引号，直到该入射射线 r_i 不再作用于目标的任何其他面元时停止记录。假设该入射射线的所有作用点按顺序排列为 $[Q_1, Q_2, \dots, Q_N]$ ，则该条射线按路径标记的对目标作用的区域索引号为 $[I_{Q_1}, I_{Q_2}, \dots, I_{Q_N}]$ 。据上述方法完成射线追踪之后，即可得到所有射线路径的射线总集，并且明确了每条射线先后经过的目标区域。因此可以根据射线路径的不同，对所有射线进行归类，将具有相同路径的射线归为一类，并放入同一个射线子集合 $S_j = \{r_{j_1}, r_{j_2}, \dots, r_{j_n}, \dots, r_{j_{N_j}}\}$ 中，其中 j 为射线子集的编号， N_j 为集合 S_j 中射线的条数，由此通过对空间中射线进行归类、分集的方法实现目标中各散射中心的分离，并且完成分离出的散射中心与目标的实体部件一一对应。

将需仿真的雷达目标简化坦克进行分区(简化坦克尺寸为 $9.5 \text{ m} \times 3.56 \text{ m} \times 2.57 \text{ m}$)，共分为 32 个区，具体的分区如图 2 所示，其中部件 30 为后部圆柱支架，部件 31 及部件 32 在图 3 中标出。

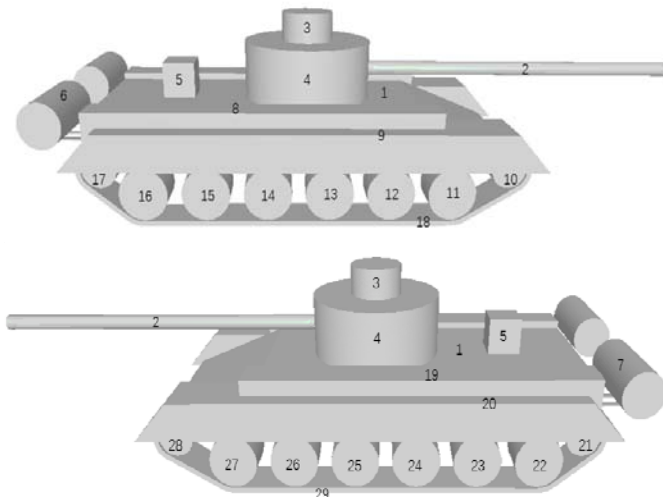


Fig.2 Simplified tank partition model
图 2 简化坦克分区模型

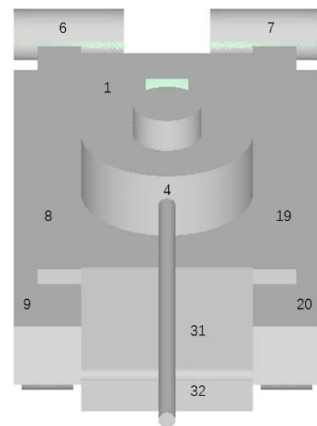


Fig.3 Simplified tank under incidence $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$
图 3 $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$ 入射下的简化坦克

利用上述方法对 $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$ 观察角， $f=3 \text{ GHz}$ 频率下的简化坦克进行强散射源的提取，并利用正向建模方法构建简化坦克的属性散射中心模型。图 3 为简化坦克在 $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$ 观察角下的姿态图，表 1 为简化坦克在该入射角及频率下的散射中心及对应的散射来源。从表中可以看出，简化坦克在该入射角下共有 22 个散射中心，本文从散射机理出发，主要分析表 1 中的前 6 个散射中心。最强的散射中心为 20-右轮盖下立方体和 19-右轮盖上立方体形成的二面角结构；9-左轮盖下立方体和 8-左轮盖上立方体形成的二面角散射强度与右侧强度相差不大；散射贡献排第三、第四的分别为 7-右后部圆柱和 6-左后部圆柱，32-机身前竖直面是第 5 个强散射中心，第 6 是 4-炮塔下圆柱与 1-机身上表面所形成的顶帽结构。同时各个散射中心对应的相对幅值参数 A ，频率依赖参数 α 以及三维位置参数 $r(x, y, z)$ 也在表 1 中依次给出。

表 1 简化坦克目标散射中心模型及参数， $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ, f=3 \text{ GHz}$

Table1 Simplified tank target scattering center model and parameters, $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ, f=3 \text{ GHz}$

number	source of scattering	amplitude parameter A	frequency dependent parameters α	3D position parameters $r(x, y, z)$
1	20-19	15.767 5	1.0	(1.949 8, 1.247 3, 1.269 9)
2	9-8	15.763 5	1.0	(1.949 8, -1.247 5, 1.269 9)
3	7	14.793 3	0.5	(-3.442 6, 1.143 9, 1.519 7)
4	6	14.748 0	0.5	(-3.442 6, -1.139 9, 1.519 7)
5	32	12.256 6	0.5	(3.250 3, -0.004 8, 0.795 4)
6	4-1	9.424 4	0.5	(0.987 2, -0.004 8, 1.370 1)
7	3-4	8.435 1	0.5	(0.3985, 0.001 9, 2.169 6)
8	9	2.327 1	1.0	(3.200 0, -1.390 0, 1.019 9)
9	20	2.327 1	1.0	(3.200 0, 1.390 0, 1.019 9)
10	2-4	1.299 2	0.5	(0.999 5, 0.000 8, 1.867 0)

3 结果分析

获取目标基于属性散射中心模型的时域回波需要结合雷达发射信号及雷达目标的电磁散射特性两方面信息。基于参数化模型中各散射中心的可叠加性,将目标看作单独散射中心的组合,对分离开的散射中心单独进行研究。具体步骤如下:利用正向建模方法确定模型参数,并将由此获得的散射中心模型用于表征对应散射中心的电磁散射特性,再将单个散射中心电磁特性的时域数据序列与选定的雷达发射电磁脉冲信号进行卷积运算,从而获得单个散射中心的模拟回波,最后将得到的多个散射中心回波进行叠加,模拟出整个雷达目标的回波信号。

在对目标进行回波仿真之前,为验证其有效性,首先利用 GO-PO(Geometrical Optics-Physical Optics)相结合的方法计算步进频率信号激励、相同角度下简化坦克的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),并由 RCS 得到相应的目标一维距离像,如图 4 所示。图中标出幅度较大的 4 个点 P1~P4,在只考虑距离向的情况下,由 20-右轮盖下立方体和 19-右轮盖上立方体形成的二面角结构与由 9-左轮盖下立方体和 8-左轮盖上立方体形成的二面角重合,对应于一维距离像中的 P1;同理,P2 为散射中心 7-右后部圆柱与 6-左后部圆柱在该角度下的成像点,P3 为散射中心 32-机身前竖直面,P4 则对应了由 4-炮塔下圆柱与 1-机身上表面构成的顶帽结构。

选取目标为表 1 所示的简化坦克散射中心模型,坦克目标相对于雷达的方位角为 0°,俯仰角为 60°,采用上述方法在 $\tau=2\text{ ns}$ 的超宽带电磁脉冲信号下对简化坦克进行照射,得到的简化坦克雷达回波信号如图 5 所示。

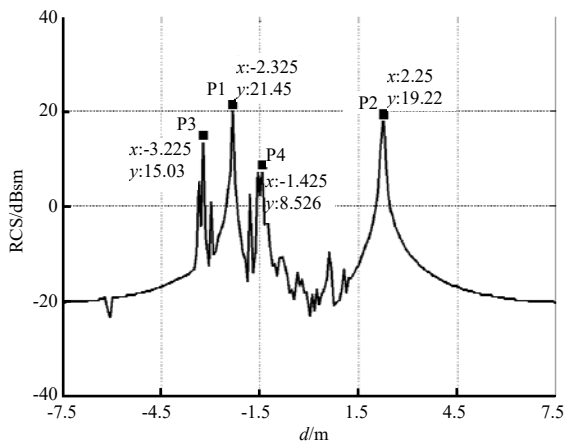


Fig.4 High resolution range profile of simplified tank
图 4 简化坦克的一维距离像

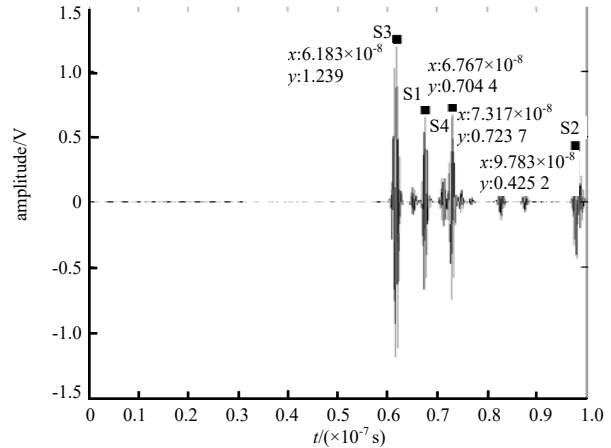


Fig.5 UWB electromagnetic pulse radar echo signal of simplified tank, $\tau=2\text{ ns}$
图 5 简化坦克的 UWB 电磁脉冲雷达回波信号 $\tau=2\text{ ns}$

表 2 对一维距离像及仿真回波信号进行了对比分析。表中第 3 列是由投影原理计算的前 6 个散射中心在雷达探测方向上距零点的距离,第 4 列为一维距离像中 P1~P4 四个强散射点与散射中心结构的对应关系,第 5 列为目标仿真回波中 S1~S4 四个强散射点与散射中心结构的对应关系。可以看出,S1~S4 分别对应了最强散射的二面角结构、产生一次镜面散射的圆柱面、产生一次镜面散射的竖直面以及第 6 个强散射中心顶帽结构。同时一维距离像及仿真回波结果均与理论计算吻合,验证了使用散射中心进行时域回波仿真的正确性。

表 2 简化坦克回波仿真位置验证

Table2 Position verification of simplified tank echo simulation

number	source of scattering	distance from zero point in radar detection direction	HRRP	simulated echo signal
1	20-19	-2.323 6	P1	S1
2	9-8	-2.323 6	P1	S1
3	7	2.221 6	P2	S2
4	6	2.221 6	P2	S2
5	32	-3.212 6	P3	S3
6	4-1	-1.540 1	P4	S4

为获取不同形式入射波信号激励下的目标回波,对上文采用的辐射源进行更改,将脉冲的宽度常数 τ 改为 4 ns,并保持其余参数不变,同样采用正向建模的方法在相同的入射角度下对简化坦克进行回波仿真,得到时域回波信号如图 6 所示。将图 6 中几个强散射点分别标记为 S1'~S4',其相应的散射中心结构及各自之间的位置关系与图 4 中 P1~P4 和图 5 中 S1~S4 表示的散射中心结构一一对应,位置也相互吻合。对比图 5、图 6 可以发现,改变雷达发射信号后,仿真得到的回波信号波形也随之发生改变,具体表现为:图 6 的回波信号波形相较图 5 在时域上

有所展宽,这与二者入射波的时域特性保持一致,同时图 6 中展宽后的回波信号仍能清晰反映出目标自身的电磁散射特性,由此证明本文提出的基于属性散射中心正向建模进行目标时域回波仿真方法在不同激励源入射情况下的可用性。

4 结论

本文提出了一种基于散射中心正向建模的目标时域回波仿真方法。以超宽带电磁脉冲作为辐射源进行研究,首先设置合理的仿真参数利用正向建模的散射中心模型对简化坦克进行仿真,然后与通过高频方法获取的一维距离像相比较,从而初步验证基于散射中心仿真目标回波的准确性。同时改变辐射源形式,再次将所得结果与一维距离像对比,发现所得回波同样可以很好地描述目标电磁特性。因此证明了本文提出的基于散射中心正向建模的回波仿真方法在不同辐射源激励情况下的有效性。

参考文献:

- [1] 孙佳敏. SAR 回波仿真技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (SUN Jiamin. Research on SAR echo simulation technology[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [2] 邵晟,王晓铭,刘莹. 一种线性调频雷达目标速度模拟方法[J]. 制导与引信, 2015,36(3):16-19,24. (SHAO Sheng,WANG Xiaoming,LIU Ying. A method for simulating the speed of linear frequency modulation radar target[J]. Guide and Fuze, 2015,36(3):16-19,24.)
- [3] 杨瀚涛. 基于快速回波算法的雷达仿真[J]. 西安邮电大学学报, 2014(5):86-90,100. (YANG Hantao. Radar simulation based on fast echo algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014(5):86-90,100.)
- [4] 王海彬. 基于高频电磁散射理论的电大复杂目标宽带雷达回波快速计算方法[J]. 电子学报, 2010,38(3):561-566. (WANG Haibin. A fast calculation method for broadband radar echoes of complex targets based on high-frequency electromagnetic scattering theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2010,38(3):561-566.)
- [5] POTER L C,CHIANG D M. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1995,43(10):1058-1066.
- [6] 蔡武. 宽带雷达目标的模拟系统的设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015. (CAI Wu. Design and implementation of simulation system for wideband radar target[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.)
- [7] 詹铁坚. 电磁脉冲滤波器设计技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (ZHAN Tiejian. Electromagnetic pulse filter design technology[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [8] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (HUANG Peikang,YIN Hongcheng,XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [9] HE S Y,DENG F S,CHEN H T,et al. Range profile analysis of the 2D target above a rough surface based on the electromagnetic numerical simulation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009,57(10):3258-3263.
- [10] 薛俊. 复杂目标高频 RCS 可视化预估及雷达成像研究[D]. 武汉:武汉大学, 2009. (XUE Jun. Research on high-frequency RCS visual prediction and radar imaging of complex targets[D]. Wuhan,China:Wuhan University, 2009.)

作者简介:

付 松(1986-), 男, 湖北省孝感市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为目标特性研究、复杂电磁环境构建与评估等方向.email:fusong1215@163.com.

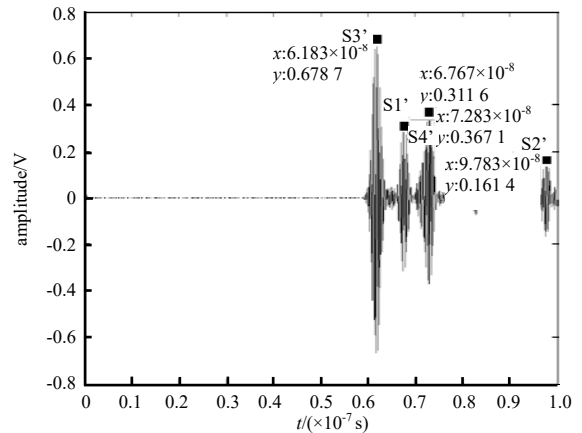


Fig.6 UWB electromagnetic pulse radar echo signal of simplified tank, $\tau=4$ ns
图 6 简化坦克的 UWB 电磁脉冲雷达回波信号 $\tau=4$ ns

李 新(1995-), 女, 河南省南阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁仿真。