

GTD 模型在目标谐振区散射机理建模中的适用性分析

王党卫 马兴义 关鑫璞 王少刚 粟毅
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 为了弄清光学区目标散射模型——GTD 模型在目标谐振区散射机理分析中的适用性, 该文提出了一种基于匹配追踪的 GTD 参数提取新算法。在此基础上, 利用该算法和 Li 的最小二乘拟合方法, 分别使用 GTD 模型, Altes 模型以及扩展了的 Altes 模型对导体球体谐振区理论散射场和实测有限长柱体的超宽带散射场进行了分析, 并通过对提取的散射类型参数与拟合结果的对比分析给出了几点有意义的结论。

关键词: 目标识别; GTD 模型; 散射机理

中图分类号: TN957.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1455-05

Applicability Analysis of GTD Model for Target Scattering Mechanism Modeling in Resonance Band

Wang Dang-wei Ma Xin-yi Guan Xin-pu Wang Shao-gang Su yi

(School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to demonstrate the effectiveness of GTD model, usually used to model the target scattering behaviors in optical frequency band, for target resonance band, a new method for the GTD model parameters extraction based on matching pursuits is proposed in this paper. Then, the proposed method and Li's least-square-fitting scheme are used to analyze the resonance scattering data of a aluminum sphere and the measured ultra-wide band scattering data of a finite-length cylinder through the GTD model, Altes model and extended Altes model. Furthermore, after contrasting the scattering behavior parameters and fitting results, some important conclusions are obtained.

Key words: Target identification; GTD model; Scattering mechanism

1 引言

自雷达问世以来, 雷达目标识别, 尤其是基于谐振区散射特性的目标识别技术一直是人们研究的热点^[1-5]。由于目标谐振区散射机理十分复杂, 因而, 对目标能否识别的关键在于对目标谐振区散射特性的正确表述。谐振区目标散射特性的分析始于Baum^[6]。1971年, 其将传统电路理论中用留数定理求瞬态响应的方法推广到瞬态电磁场问题的处理中, 提出了奇点展开法(Singularity Expansion Method, SEM)为雷达目标特性分析奠定了理论基础。随后, 众多学者陆续对SEM理论进行了完善。1984年, Morgan从电磁场理论出发, 提出瞬态电磁波照射下导体目标的散射场可表示为^[7]

$$\bar{E}^s(t) = \bar{E}_{PO}^s(t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{E}_n^s(t)e^{s_n t} \quad (1)$$

其中 $s_n = \sigma_n + j\omega_n$ 为目标复频率, $\bar{E}_{PO}^s(t)$ 为导体表面感应电流产生的前时散射场。当入射场通过目标以后, 此物理光学场消失, 目标的后时谐振响应开始。显然, 由Morgan理论可知目标响应由前时响应和后时响应两部分组成。通常目

标后时响应在时域可建模为衰减指数正弦和, 所包含的目标复谐振频率信息表征了目标的整体属性, 且与入射波形、极化、目标姿态无关。与目标后时响应不同, 目标前时响应在时域常表现为类高斯波形窄脉冲之和, 包含了目标的多散射中心特征。对于每个独立的散射中心, Altes提出其传输函数可表示为^[8]

$$H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n(j\omega)^n e^{-jT\omega} \quad (2)$$

其中整数 n 为负时表示在时域中对 δ 函数进行 n 重积分, 为正时表示其进行 n 次微分, 等于零时则为 δ 函数本身。 T 为该散射中心的时间中心, 系数 b_n 均为常数。然而, 实际测量系统的带宽总是有限的, 因而, 通过有限个 n 的取值即可完成目标的散射中心精确描述。如文献[9]中, Li等人采用Altes模型结合最小二乘拟合方法, 在 $n = -2, -1, \dots, 1, 2$ 几个有限取值上, 分别对B-52, B-58等飞机缩比模型实测数据中的散射中心进行了拟和, 取得了令人满意的结果, 并成功用于雷达目标识别。而与Altes的工作不同, Poter等人则基于几何绕射理论(GTD)通过引入散射中心的频率依从因子 f^α , 对光学区目标散射中心传输函数进行了建模, 提出所谓的GTD模型^[10]

$$H(\omega) = b_n e^{-jT\omega} (j\omega)^\alpha \quad (3)$$

同时分别给出了几种典型散射体频率依赖因子 α 的取值,如 $\alpha = 1$ 为平板反射, $\alpha = 0.5$ 为单曲面反射, $\alpha = 0$ 为点散射或双曲面反射, $\alpha = -0.5$ 为边缘绕射, $\alpha = -1$ 为角绕射等,并利用实测和电磁计算的平板散射场数据证实了该模型的有效性。显然,式(3)表示的模型实际上是Altes模型的推广,该模型的参数具有了极其鲜明的物理意义,且较之Altes模型更为简单,因此,更有助于目标识别。然而,正如Morgan的理论,相比光学区,目标谐振区散射回波中包含了大量低频谐振分量,散射中心之间的相互作用更为强烈,GTD模型是否仍然能够对各种散射中心传输函数进行有效近似?同时,相比Altes模型,GTD模型的精度如何?

为了解答这些疑问,针对我们的时域超宽带暗室系统,本文首先提出了一种基于匹配追踪的GTD模型参数提取新算法,在此基础上,结合GTD模型和Altes模型,分别利用该算法和最小二乘拟合方法^[9]对导体球理论散射场和实测有限长柱体散射场进行了参数提取和拟合,并通过对比分析两种模型的拟合结果以及Altes模型拟合系数能量的分布情况,得出了一些有意义的结论,为以后的目标识别新方法的研究指明了方向。

2 一种基于匹配追踪的 GTD 参数提取新算法

传统的GTD模型参数提取方法主要分为两种,即基于模型的参数法GTD参数提取和非参数法GTD参数提取,其中参数法主要有修改的MUSIC法^[11]和矩阵束法^[12],而非参数法中则以最大似然估计法最具代表性^[10]。由于参数法通常要求输入信号严格满足算法的模型假设,同时模型阶的选择对算法的性能有较大影响,因而算法的使用受到了限制。与参数法不同,为了达到给定的参数提取精度,非参数法中的最大似然估计法通常需要复杂的全局搜索,过程十分耗时。近来,文献[13]提出了一种利用目标多种电磁散射信号作为原子的自适应匹配追踪分解算法。该方法利用预先建立好的原子库能够逐次提取出目标的GTD模型参数和谐振频率,为目标GTD模型参数提供了一条新的途径。但是,该方法对目标散射特征参数提取的精度和速度,完全依赖于原子库原子参数的精度和原子的个数。为了改善参数提取精度,通常需要构建十分庞大的原子库,因而,如同最大似然估计方法,这种分解也是十分耗时的。

针对这些问题,根据文献[10]中关于 GTD 模型参数之间相互依赖关系的结论,本节提出了一种基于匹配追踪的 GTD 参数提取新算法。与文献[13]中方法不同,该算法仅利用文献[13]中提供的波前模型作为基函数,在给定频率依赖因子 α 的条件下,利用变时间分辨力的搜索策略,实现了散射中心位置参数的一维超分辨搜索和估计,然后,通过比较不同 α 取值下原子与原始信号的匹配度(即模型中的系数 a_n)确定该散射中心的类型参数。由于新算法对每个散射中心参数的提取仅通过两个一维搜索来完成,因而,相对文献

[13]的匹配追踪算法更为有效。下面首先对匹配追踪算法作一简要回顾。

2.1 匹配追踪算法

匹配追踪是一种用于信号分解的非线性迭代算法,其基本思想是根据最大匹配投影原理在“原子”波形库上逐层寻找最佳基函数,以此达到信号的自适应分解。设 $D = (g_r(t))_{r \in \Gamma}$ 为一波形“原子”库,其中 Γ 为所有“原子”的索引集,定义任意信号与原子 $g_r(t)$ 的内积为

$$\langle y, g_r \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) g_r^*(t) dt \quad (4)$$

其中上标“*”表示复共轭。

若“原子” $g_r(t)$ 满足关系 $\|g_r\|^2 = \langle g_r, g_r \rangle = 1$,则按照匹配追踪思想^[14],任意信号 $y(t)$ 的匹配追踪分解可按下列步骤完成:

首先把信号 $y(t)$ 按照式(4)的内积分别投影到原子库中每个原子 $g_r(t)$ 上,最匹配原子满足关系:

$$|\langle y, g_{r_0} \rangle| \geq |\langle y, g_r \rangle|, \quad \forall r \in \Gamma \quad (5)$$

相应分解为

$$y(t) = \langle y, g_{r_0} \rangle g_{r_0} + R^1 y \quad (6)$$

其中 $R^1 y$ 为一次分解后剩余的残差分量。然后,重新对残差 $R^1 y$ 实施上面的匹配分解过程,则 $Q+1$ 次后,可得

$$y(t) = \sum_{n=0}^Q \langle R^n y, g_{r_n} \rangle g_{r_n} + R^{Q+1} y \quad (7)$$

其中 $R^0 y = y(t)$, $|\langle R^n y, g_{r_n} \rangle| \geq |\langle R^n y, g_r \rangle|$, $\forall r \in \Gamma$ 。

2.2 基于匹配追踪的 GTD 模型参数提取新算法

显然,匹配追踪算法实际上是利用原子对输入信号进行局部匹配滤波的过程。如果,原子能够与输入信号局部完全匹配,那么通过这种分解即可快速实现对信号局部分量的零误差提取。基于此原理,本文仍然选用目标的波前模型作为匹配追踪分解的基函数,目标的波前模型可表示为^[13]

$$g_\omega(t; \tau, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\omega \exp(j\pi/2)]^\alpha \hat{h}(\omega) \exp[j\omega(t - \tau)] d\omega \quad (8)$$

其中 $\hat{h}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt$ 为激励信号的频谱, $\alpha \in \{0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2, \pm 2.5\}$, τ 为连续时延参数。实际上,该原子是含有入射波形的 GTD 模型的时域形式。为了便于分解,本文直接使用上述模型的频域能量归一化形式作为原子,即

$$g_\omega(\omega; \tau, \alpha) = [j\omega]^\alpha \hat{h}(\omega) \exp(-j\omega\tau) / \sqrt{G_\omega} \quad (9)$$

其中 $G_\omega = \|g_\omega(\omega; \tau, \alpha)\|^2$ 为信号的能量。在此基础上,对于目标的 N 维时域散射场采样信号向量 $s = [s(0), s(T_s), \dots, s((N-1)T_s)]$,本文给出如下参数提取算法:

(1) 对散射场采样向量 s 依次进行 Hilbert 变换和 FFT;

(2) 设定 $\tau = 0, T_s, \dots, (N-1)T_s$ 为 τ 的“粗”的时间搜索网格, $\alpha \in \{0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2, \pm 2.5\}$;

(3) 对于给定的 α 取值,变化 τ 的取值,逐一计算每

个“粗”时间网格上的 $g_\omega(\omega; \tau, \alpha)$ ，并与散射信号 s 的频谱进行式(7)定义的内积运算；

(4)选择最大内积时的 τ 值作为第一个散射中心位置的初始估计值 τ_0 ；

(5)改变时间分辨率，在“细”时间网格 $\{\tau_0 - T_s/2, \tau_0, \tau_0 + T_s/2\}$ 上重新分别计算 $g_\omega(\omega; \tau, \alpha)$ ，然后再与散射信号 s 进行内积，并选择最大内积时的时间位置为散射中心位置。为了提高对散射中心位置的估计精度，该“细”搜索过程需要重复进行多次，第 i 次搜索的时间网格为 $\{\tau_0^{(i-1)} - T_s/2^i, \tau_0^{(i-1)}, \tau_0^{(i-1)} + T_s/2^i\}$ ，其中 $\tau_0^{(i-1)}$ 为前次搜到的散射中心位置(搜索过程示意图如图1)；

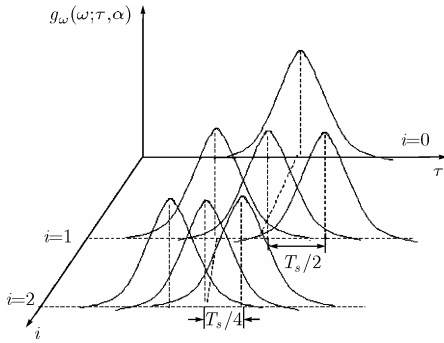


图1 变时间网格搜索示意图

(6)经过指定次数的“细”搜索后，得到该散射中心最终的位置估计值 τ_1 ，然后在此位置上，遍历所有的 α 取值，逐一计算 $g_\omega(\omega; \tau_1, \alpha)$ 与散射信号 s 的频谱内积值，并选择具有最大内积值的 α 值为该散射中心的类型参数 α_1 ，同时该内积值作为 GTD 模型中的系数 b_1 ；

(7)计算 $s - b_1 g_\omega(\omega; \tau_1, \alpha_1)$ 形成分解残差，然后返回到(3)，重复上述搜索过程，提取下一个散射中心的参数。

由上面给出的参数提取过程可以看出，本文新算法具备了时间超分辨率能力，且对模型3个参数的提取过程只需两个一维搜索即可完成，因而，算法的效率大大提高。同时，由于该算法通过利用不同散射机理的原子与目标散射信号局部进行匹配，因而，通过分解系数的大小可以直接反映出该散射中心与各散射机理的原子波形的相似度，算法具有鲜明的物理意义。此外，该新算法是一种循环提取算法，完全避免了参数法 GTD 模型参数提取算法对输入散射信号的严格模型假设的要求，且不需要预先对模型阶进行确定，因而，新算法具有更强的鲁棒性。

3 标准散射体散射场的 GTD 和 Altes 模型逼近

为了分析 GTD模型对于谐振区目标散射机理建模的适用性，本节利用上文提出的新算法分别对两种典型目标：导体球谐振区理论散射场和实测有限长柱体超宽带散射场进行了分析，同时本节还使用最小二乘拟合方法^[9]通过 Altes 模型(模型参数 n 仅取整数和可取整数和分数两种情况)对上述散射场进行了拟合，并对两种模型的拟合结果进行了对

比分析。

3.1 导体球理论散射场数据

导体球是一种散射场具有精确表达式的导体，其散射场在理论上可以通过 Mie 级数精确求解。本文使用双高斯脉冲作为激励波形，该波形的表达式为

$$e_i(t) = A_1 e^{-\alpha_1(t-t_0)^2} - A_2 e^{-\alpha_2(t-t_0)^2} \quad (10)$$

其中 $A_m = \sqrt{\alpha_m} / (\sqrt{\alpha_1} - \sqrt{\alpha_2})$ ， $m = 1, 2$ ， $\alpha_1 = 80.08 \times 10^{18}$ ， $\alpha_2 = 180.35 \times 10^{18}$ ， $t_0 = 15 T_s$ 。设定采样间隔 $T_s = 25\text{ps}$ ，数据长度 $N = 256$ ，得到的入射激励波形如图2所示，其中大图为双高斯激励的时域波形，插图为其频谱。利用 Mie 级数求得双高斯激励下导体球(半径 7.45cm)的散射场如图3所示。经过两次循环后，本文方法提取的两个主要散射中心的 GTD 模型参数详见表1，设置 α 分别取值 $\{0, \pm 1, \pm 2\}$ ，和 $\{0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2\}$ ，通过最小二乘拟合方法提取的 Altes 模型参数详见表2和表3。利用上述两种模型参数重构的球体散射场误差分别叠加于图4，其中 Altes 模型1和模型2分别为 α 取值 $\{0, \pm 1, \pm 2\}$ 和 $\{0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2\}$ 时的 Altes 模型。

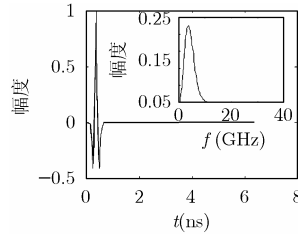


图2 双高斯激励的时域波形与频谱

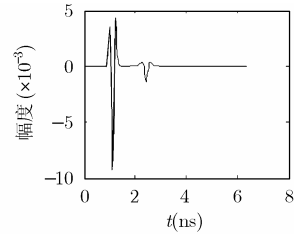


图3 双高斯激励下的球体散射场

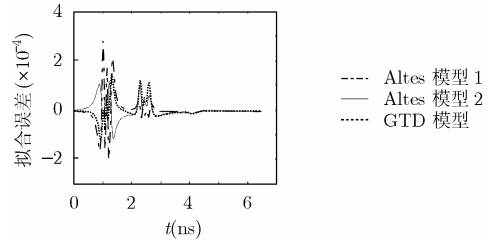


图4 两种模型重构的球体散射场误差

表1 本文方法提取的 GTD 模型参数

	α	$\ b_i\ /G$	位置 (ns)
散射中心 1	0	0.3856	1.114
散射中心 2	-1.5	0.0632	2.415

表2 最小二乘提取的 Altes 模型参数

α	散射中心 1		散射中心 2	
	$\ b_i\ /G$	位置 (ns)	$\ b_i\ /G$	位置 (ns)
-2	0.0041	1.050	0.0068	2.350
-1	0.0201	1.050	0.0627	2.350
0	0.3842	1.050	0.0003	2.350
1	0.0086	1.050	0.0026	2.350
2	0.0178	1.050	0.0077	2.350

表 3 最小二乘提取的 Altes 模型参数

α	散射中心 1		散射中心 2	
	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)
-2	0.0263	1.050	0.0036	2.350
-1.5	0.0124	1.050	0.0629	2.350
-1	0.0038	1.050	0.0005	2.350
-0.5	0.0017	1.050	0.0027	2.350
0	0.3831	1.050	0.0014	2.350
0.5	0.0009	1.050	0.0006	2.350
1	0.0020	1.050	0.0036	2.350
1.5	0.0054	1.050	0.0009	2.350
2	0.0313	1.050	0.0019	2.350

由上面各表的计算结果可以看出利用GTD模型提取的散射中心位置参数和利用Altes算法对于散射中心位置的估计十分相近,且主要散射中心的相对幅度 $\|b_{\parallel}\|/G$ (其中能量 $G = \sqrt{\|g_{\omega}(\omega; \tau, \alpha)\|^2}$,以下同)也大致相等(如表 1 中 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = -1.5$,如表 2 中 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = -1$ 以及表 3 中 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = -1.5$ 时),特别是当Altes模型的参数 α 同时可以取整数和分数时(此时,GTD模型可视为Altes的一阶近似),利用GTD模型提取的散射中心的散射机理与Altes模型提取的主散射机理是完全相同的。同时,由表 3 的结果可以看出谐振区目标散射机理是十分复杂的,单个散射中心通常包含了多种散射机理分量,但这些散射行为中存在一些主要散射现象,如两个主散射机理 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = -1.5$ 所占的能量分别为该散射中心所有散射机理能量的 82%和 81%,其中尤其是球体的第 2 个散射中心,其本质上是球体表面的爬行波形成的,是球体的谐振分量。这表明尽管GTD模型不能完全描述谐振区目标的散射行为,但其可以对其中主要的散射机理进行合理的建模,关于这一点,图 4 的结果给予了更充分的说明。如图 4 所示, α 取值扩展了的Altes模型对散射数据拟合的误差最小,而尽管GTD模型的拟合误差较之更大,但相对于传统Altes模型的拟合误差,则要小很多。这主要是因为,采用分数 α 后,模型更接近目标实际的散射机理,因而,对散射数据的拟合误差随之降低。

此外,由表 1 的计算结果可以看出,本文提出的GTD模型参数提取新算法可以搜索到 $1/2^i$ 时间网格(对应雷达的距离分辨单元),实现了散射中心位置的超分辨。

3.2 实测有限长柱体散射场数据

为了进一步验证 GTD 模型对目标谐振区散射建模的有效性,本文使用一时代超宽带暗室测量系统对一底面半径 2.5cm,长 10cm 的有限长铝制柱体目标的散射场进行了测量。该系统的暗室长 9.7m,宽 4.6m,高 3.2m,暗室的所有墙壁均置有一层长 46cm 的锥形吸波材料。测量目标置于距离天线 3.2m 的低密度泡沫聚苯乙烯转台之上,通过转台内置电机的转动可测量不同入射角角度时目标的散射回波。系统收发天线均为工作带宽 1.0~18GHz 的超宽带桥式加脊同轴喇叭天线,直接由脉冲源输出的时宽 < 30ps(半幅值之间的宽度)、幅值为 30V 的负极性周期冲击脉冲信号激励。系统接收机为一台 Tektronix 8000B 系列采样示波器,该示波

器带宽为 0~50GHz,噪声的均方根值 $\leq 1.8mV$,测量数据由计算机离线处理。

设定采样间隔为 25ps,经过 1024 次平均,去除背景杂波、天线耦合和目标与暗室相互作用产生的杂波等预处理后,按照文献[15]解卷积方法,得到的不同入射方向下柱体实测散射场分别如图 5(a),5(b),5(c)所示,其中图 5(a)为垂直圆柱底面入射时的散射场,图 5(b)为柱体水平旋转 45°后的散射场,图 5(c)为垂直圆柱侧面入射时的散射场。通过本文新算法和最小二乘拟合方法,利用GTD模型和Altes模型对各方向散射场的拟合结果分别叠加于图 5 各图,提取的垂直圆柱底面入射散射场模型参数如表 4、表 5 和表 6 所示。

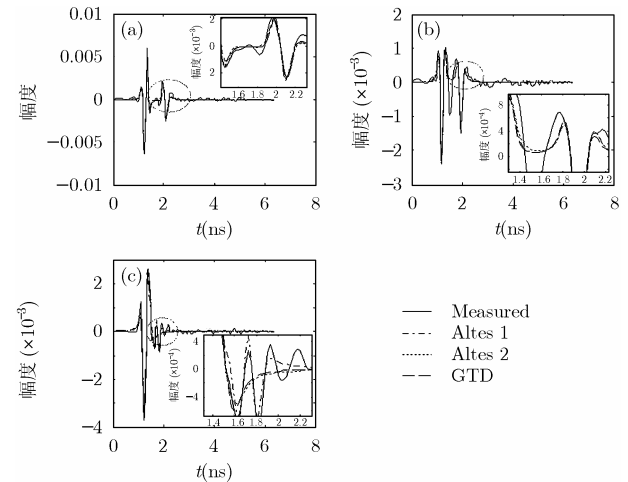


图 5 不同入射角下柱体的散射场与拟合结果

表 4 本文方法提取的 GTD 模型参数

α	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置 (ns)
散射中心 1	0.5	1.292
散射中心 2	-0.5	2.049

表 5 最小二乘提取的 Altes 模型参数

α	散射中心 1		散射中心 2	
	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)
-2	0.0063	1.225	0.0169	1.975
-1	0.0137	1.225	0.1248	1.975
0	0.0119	1.225	0.0164	1.975
1	0.3033	1.225	0.0069	1.975
2	0.0184	1.225	0.0137	1.975

表 6 最小二乘提取的 Altes 模型参数

α	散射中心 1		散射中心 2	
	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)	$\ b_{\parallel}\ /G$	位置(ns)
-2	0.0226	1.225	0.0099	1.975
-1.5	0.0055	1.225	0.0055	1.975
-1	0.0016	1.225	0.0077	1.975
-0.5	0.0005	1.225	0.1263	1.975
0	0.0031	1.225	0.0148	1.975
0.5	0.3040	1.225	0.0028	1.975
1	0.0016	1.225	0.0015	1.975
1.5	0.0019	1.225	0.0095	1.975
2	0.0171	1.225	0.0215	1.975

由以上实测散射场数据的计算结果可以看出与导体球理论散射场相似的结果, 利用 GTD 模型提取的散射中心位置参数与利用 Altes 模型估计的散射中心位置也十分相近, 且由表 4, 表 5 和表 6 的结果可以看出, 利用 GTD 模型提取的散射中心的散射机理与 α 扩展了的 Altes 模型提取的主散射机理也是完全相同的, 均为 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = -0.5$ 。同时, 由表 6 的结果可以看出, 柱体谐振区单个散射中心也包含了多种散射机理分量, 而且这些散射行为中也存在一些主要散射现象, 如垂直底面入射时, 两个主散射机理 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = -0.5$ 所占的能量分别为所有散射机理能量的 84.96% 和 63.34%。这进一步表明, 尽管 GTD 模型不能完全描述谐振区目标的散射行为, 但对其中主要的散射机理是可以合理建模的。此外, 由上面的数据可以看出, 柱体阴影部分端面处的主散射能量仅占该散射中心所有散射机理能量的 63% 左右, 因而, 相比 α 扩展了的 Altes 模型的拟合误差, 通过 GTD 模型拟合时, 拟合误差必然会增大, 但是, 可以看出其拟合误差仍然小于传统 Altes 模型 (α 仅取整数) 的拟合误差, 这从图 5(a) 的实验结果中可以明显看出。相似的情况也可在图 5(b) 和 5(c) 中观测到。因而, GTD 模型是适合于谐振区雷达目标建模的。

4 结论

本文利用提出的 GTD 模型参数提取新算法和 Li 的最小二乘拟合方法分别对导体球谐振区理论散射场和实测的有限长柱体的超宽带散射场的散射机理进行了研究, 通过对提取的散射类型参数与拟合结果的对比分析, 得出如下结论:

- (1) GTD 模型适合于谐振区雷达目标散射特性的描述, 通过该模型可以有效提取目标散射中心的主散射机理;
- (2) 相比传统 Altes 模型, 对于具有分数 α 散射机理的散射中心, GTD 模型拟合误差更小;
- (3) α 取值扩展到分数的 Altes 模型能够对目标散射行为进行更为精确的描述, 该模型的使用有助于改善现有基于 GTD 模型目标识别方法的性能, 但相比 GTD 模型, 其应用于目标识别时需要的存储量将大量增加。

此外, 本文提出的 GTD 模型参数提取新方法可以推广到 Altes 模型的参数提取方法, 且研究得到的结论为同时利用前时和后时响应的雷达目标识别新方法的研究具有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] Chen K M. Radar waveform synthesis method—A new radar detection scheme. *IEEE Trans. on AP*, 1981, 29(4): 553–566.
- [2] Baum C E, Rothwell E J, and Chen K M, *et al.*. The singularity expansion method and its application to target identification. *Proc. IEEE*, 1991, 79(10): 1481–1492.
- [3] Mooney J E, Ding Z, and Riggs L S. Robust target identification in white Gaussian noise for ultra wide-band radar systems. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1998, 46(10): 1817–1823.
- [4] Li Q, Ilavarasan P, Ross J E, and Rothwell E J, *et al.*. Combination of early-time and late-time based E pulses to improve target identification. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1998, 46(9): 1272–1278.
- [5] Turhan-Sayan G. Real time electromagnetic target classification using a novel feature extraction technique with PCA-based fusion. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2): 766–776.
- [6] Baum C E. On the singularity expansion method for the solution of electromagnetic interaction problems. AFWL Interaction Notes, Note88, Dec, 1971.
- [7] Morgan M A. Singularity expansion representations of fields and currents in transient scattering. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1984, 32(5): 466–473.
- [8] Altes R A. Sonar for generalized target description and its similarity to animal echolocation systems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1976, 59(1): 97–105.
- [9] Li Q, Rothwell E J, Chen K M, and Nyquist D. Scattering center analysis of radar targets using fitting scheme and genetic algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1996, 44(2): 198–206.
- [10] Potter L C, Chiang D M, and Carriere R. A GTD-based parametric model for radar scattering. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1055–1066.
- [11] Moghaddar A, Ogawa Y, and Walton E K. Estimating the time-delay and frequency decay parameter of scattering components using a modified MUSIC algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1994, 42(10): 1412–1418.
- [12] 姜文利, 唐白玉, 徐可斌等. 高频区雷达目标散射模型及其参数估计. *电子学报*, 1998, 26(3): 70–74.
- [13] McClure M R and Carin L. Matching pursuits with a wave-based dictionary. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(12): 2912–2927.
- [14] Mallat S and Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(10): 3397–3415.
- [15] Morgan M A. Time-domain impulse scattering measurements. *IEEE Trans. on Antennas And Propagation*, 1994, 42(6): 840–846.

- 王党卫: 男, 1976 年生, 博士生, 从事雷达目标特性与目标识别、信号处理的研究。
- 马兴义: 男, 1970 年生, 博士生, 从事计算电磁学、雷达目标特性及识别的研究。
- 栗毅: 男, 1961 年生, 教授, 主要从事信号处理、雷达系统、遥感信息处理的研究。