

文章编号 :1001-2486(2001)00-0113-07

一种高频区复杂雷达目标二维散射的参数模型*

孙真真 陈曾平 庄钊文 郭桂蓉

(国防科技大学 ATR 重点实验室 湖南长沙 410073)

摘要 :为描述高频区雷达目标复杂的二维散射,提出采用更贴近散射机理的、特征含量更为丰富的二维散射中心模型——类型区分的几何绕射理论(TD-GTD)模型。将一种高效的基于 AGR 的参数估计初始值选取方法,以及引入 RELAX 技术的最大似然估计算法(ML-RELAX),用于模型参量的估计。解决了同时估计多个散射中心这一造成计算量过大的根源问题。实验证实了 TD-GTD 模型的合理性以及 ML-RELAX 算法估计性能的优越性。

关键词 :参数模型 ;散射中心 ;参数估计 ;散射特征

中图分类号 :TN957.51 **文献标识码** :A

A Parametric Model for High Frequency Complex 2-D Radar Scattering

SUN Zhen-zhen ,CHEN Zeng-ping ,ZHUANG Zhao-wen ,GUO Gui-rong

(ATR Key Lab. , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract :A 2-D Type-Discriminated Geometric Theory of Diffraction based(TD-GTD) model that discriminates between the localized and distributed scattering centers of the radar target is presented. This scattering model provides a more physical-relevant and richer description of high frequency complex scattering behavior compared with either point scattering models or prony models. To estimate the TD-GTD model parameters , Maximum Likelihood Estimation(MLE) algorithm is developed. An effective method of parameter initialization is proposed. Since estimating parameters of all scattering centers at the same time is the cause of high computational cost and complexity , RELAX technique is introduced into MLE algorithms to get around that difficulty. The efficiency and feasibility of the method is confirmed by the test based on the measured data.

Key words :parametric model ; scattering center ; parameter estimation ; scattering feature

雷达目标在高频区总的散射可认为是若干散射中心局部散射的相参合成^[1]。在 SAR 或 ISAR 成像雷达体制下,通过建立合理的二维散射中心模型,并对模型参数进行估计,可提取到目标的精细结构描述,为目标识别提供有效特征。由于复杂目标上往往并存着散射特性各异的子结构,某些等效散射中心的后向散射显示出对入射波频率或观测角复杂的依赖关系^[3],一般的点散射中心模型和 Prony 模型^[2]无法贴切地反映上述散射特性。为此,本文在几何绕射理论(GTD)模型的基础上,研究区分局域性与展布式散射中心类型的 GTD(TD-GTD)模型及其参数估计方法。

1 类型区分的二维散射中心模型

在高频区,频率为 f 的电磁波以角度 θ 照射目标,目标总的散射 $E(f, \theta)$ 可以用各散射中心响应的矢量叠加来表示。基于几何绕射理论(GTD)的模型是一种贴近实际散射机理的散射中心模型,具体形式为^[1]:

$$E(f, \theta) = \sum_{i=1}^P A_i \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} e^{\beta_i \theta} \exp \left\{ \frac{-j4\pi f}{C} (x_i \sin \theta + y_i \cos \theta) \right\} \quad (1)$$

其中, C 为电磁波空间传播速度, f_c 为中心频率。模型的参数 $\{A_i, x_i, y_i, \alpha_i, \beta_i\}_{i=1}^P$ 表征目标中 P 个独立的散射中心。对于第 i 个散射中心:

A_i 表征相对散射幅度的复标量, $A_i \in \mathbb{C}$;

* 收稿日期:2001-04-02
基金项目:国家部委基金资助项目(3.2.5)
作者简介:孙真真(1973-)女,博士生。

x_i 和 y_i 分别是散射中心相对于参考点的横向和纵向距离；

α_i 表征几何形状,即频率影响参数, $\alpha \in \{1, 1/2, 0, -1/2, -1\}$;表 1 列出了五种散射机制的参数 α ;

β_i 表征方位角 θ 对散射的影响, $\beta_i \in \mathbf{R}$.

表 1 典型散射体的几何类型参数

Tab.1 Type parameters for canonical scattering mechanisms

α	散射中心类型
1	平板反射、二面角
1/2	单曲面反射
0	点散射、双曲面反射、直边镜面反射
-1/2	边绕射
-1	角绕射

在(1)式所示的一般 GTD 模型基础上,进一步研究散射中心的散射强度对方位角 θ 的依赖关系,根据其散射随方位角变化所表现出的不同特性,将散射中心区分为两种类型:

一类是局域性的(localized)散射中心,对应 ISAR 图像横向距离上的单一位置。典型代表是三面角反射、角绕射以及边缘绕射。其散射强度随方位角的慢变化,可采用衰减指数函数来表示

$$S(f, \theta) = A_i \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \theta) \quad (2)$$

其中, γ_i 表征局域性散射中心的散射对方位角轻微的依赖性。

另一类是展布式的(distributed)散射结构,通常在 SAR/ISAR 图像中沿横向延伸跨越若干个像素单位,即具有一定的长度。其典型代表是二面角反射、平板反射和圆柱体的反射。根据物理光学(PO)方法,所有这些散射对方位角的依赖关系都具有 sinc 函数的形式:

$$S(f, \theta) = A_i \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{C} L_i \sin(\theta - \bar{\theta}_i) \right] \quad (3)$$

其中, L_i 和 $\bar{\theta}_i$ 分别表征散射中心的长度和其相对于雷达的方向。

综上,得到本文所采用的类型区分的 GTD 模型:

$$E(f, \theta) = \sum_{i=1}^P A_i \left(\frac{if}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left\{ -\frac{j4\pi f}{C} (x_i \sin \theta + y_i \cos \theta) \right\} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi f}{C} L_i \sin(\theta - \bar{\theta}_i) \right] \cdot \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \theta) \quad (4)$$

模型的参数 $\{A_i, x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, \bar{\theta}_i, L_i\}_{i=1}^P$ 表征目标中 P 个独立的散射中心,各个参数都分别具有与目标物理机制直接对应的明确解释:

$(x_i, y_i), A_i, \alpha_i$ 定义与 GTD 模型(1)式中的相同;

γ_i —表征局域性的散射中心的散射对方位角轻微的依赖性; L_i —展布式散射中心的长度;







$\bar{\theta}_i$ —展布式散射中心相对于雷达的方向角;且 $L_i = 0$ 时, $\gamma_i \neq 0, \bar{\theta}_i$ 无定义; $L_i > 0$ 时, $\gamma_i = 0, \bar{\theta}_i$ 有定义。

特别重要的是,参数 L 和 α 包含了散射中心的几何结构信息。 L 是散射中心所对应的实际散射结构的长度的直观描述; α 实际上与散射中心局部的表面曲率信息相联系。不同于一般 GTD 模型的是,作为有效刻画散射体几何结构(长度、曲率)的数量指标,参数 L 和 α 两者的组合可以更为准确、详细地区分不同类型的基本散射结构,从而提供更加丰富全面的可用于 ATR 的目标结构特征。图 1 给出了部分以 L 和 α 不同取值区分的基本散射结构。

总之,在一般 GTD 模型基础上,TD-GTD 模型将局域性的与展布式的两种类型散射中心区分开来,并增加了反映目标方位(方向)的信息,从而提供了一种特征含量更为丰富的散射中心描述方法。

2 TD-GTD 模型的参数估计

散射模型一经确定,散射中心的提取问题就转化成为散射模型中的参量的估计。首先需要对雷达目标二维成像测量数据及 TD-GTD 模型进行规范化,以便于参数估计。

	$\alpha = 1$	$\alpha = 1/2$	$\alpha = 0$
$L = 0$	 三面角	 帽状顶	 球体(点散射)
$L > 0$	 二面角	 圆柱体	 直边

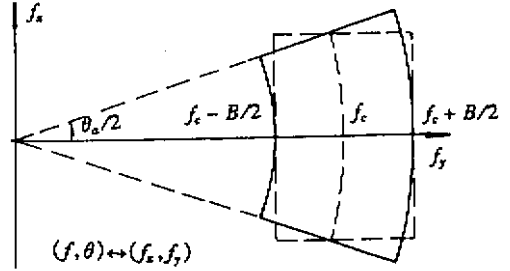


图1 部分以 L 和 α 不同取值区分的基本散射结构

图2 二维测量谱域数据范围示意图

Fig.1 Scattering primitives and their corresponding L and α values

Fig.2 2D data collection range

2.1 目标二维散射数据及模型的规范化

通常,ISAR 成像的谱域数据是按频率 f 和转角 θ 的间隔变化进行采集的极坐标格式数据,如图2所示,其数据范围对应一扇形区域(图中实线部分),观测角 $\theta \in [-\theta_a/2, \theta_a/2]$, 频率 $f \in [f_c - B/2, f_c + B/2]$, 其中 f_c 为载频, B 为带宽。首先将模型由极坐标形式转换为直角坐标形式,并将原来非均匀间隔的数据插值到二维直角坐标的矩形均匀栅格中。插值后的数据 $E(f_{xm}, f_{yn})$ 包含了图2中虚线所示矩形区域内等间隔的数据点,且 $f_{xm} \in [-f_c \sin(\frac{\theta_a}{2}), f_c \sin(\frac{\theta_a}{2})]$, $f_{yn} \in [f_c - B/2, f_c + B/2]$ 。

$$\text{此时,方位角 } \theta \text{ 可写为: } \theta = \arctan(f_{xm}/f_{yn}) \quad (5)$$

最终得到直角坐标系下等数据间隔的规范化的 TD-GTD 模型:

$$E(m, n) = E(f_{xm}, f_{yn}) = \sum_{i=1}^P A_i \left(\frac{j\sqrt{f_{xm}^2 + f_{yn}^2}}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{C}(xif_{xm} + yif_{yn})\right\} \cdot \exp(-2\pi f_{xm} \gamma_i) \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi\sqrt{f_{xm}^2 + f_{yn}^2}}{C} L_i \sin\left(\arctan\left(\frac{f_{xm}}{f_{yn}}\right) - \bar{\theta}_i\right)\right] \quad (6)$$

2.2 TD-GTD 模型的参数最大似然估计算法

在测量噪声为白噪声的条件下,最大似然估计(MLE)方法将散射中心提取问题转化为非线性规划问题。作为一种精确的非线性最小二乘法,MLE 能够达到 Cramer-Rao 下界。在低信噪比下,具有比 AR 方法和 MUSIC 方法更高的估计准确度^[4-6]。

令 $D(f, \theta)$ 表示雷达目标后向散射的谱域测量数据。假定这些测量数据中包含有与 TD-GTD 模型精确匹配的模型项 $E(f, \theta; \xi)$ 和一个加性复高斯白噪声项 $N(f, \theta)$, 其中 $\xi = \{\xi_i\}_{i=1}^P, \xi_i = \{A_i, x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, L_i, \bar{\theta}_i\}$ 表示待估计的参数组。对于规范化的数据,可表示为:

$$D(m, n) = E(m, n; \xi) + N(m, n) = e_{mn} \cdot a + N(m, n) \quad (7)$$

其中 $a^T = (A_1, A_2, \dots, A_P)$

$$\text{为了书写简洁,令: } f_{mn} = \sqrt{f_{xm}^2 + f_{yn}^2}, \theta_{mn} = \arctan(f_{xm}/f_{yn}) \quad (8)$$

$$\text{则: } \mathbf{e}_{mn}^T = \begin{pmatrix} (j f_{mn}/f_c)^{p_1} \exp\{-j4\pi/C \cdot (x_1 f_{xm} + y_1 f_{yn})\} \exp(-2\pi f_{xm} \gamma_1) \\ \cdot \text{sinc}(2\pi/C \cdot L_1 f_{mn} \sin(\theta_{mn} - \bar{\theta}_1)) \\ (j f_{mn}/f_c)^{p_2} \exp\{-j4\pi/C \cdot (x_2 f_{xm} + y_2 f_{yn})\} \exp(-2\pi f_{xm} \gamma_2) \\ \cdot \text{sinc}(2\pi/C \cdot L_2 f_{mn} \sin(\theta_{mn} - \bar{\theta}_2)) \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于未知参量 ξ 的最大似然估计, 代价函数 F 为:

$$F = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |D(m, n) - \mathbf{e}_{mn} \mathbf{a}|^2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |D_{mn} - \mathbf{e}_{mn} \mathbf{a}|^2 \quad (10)$$

使得 F 达到其最小值时的参数取值 $\hat{\xi}$, 即为 ξ 的最大似然估计, 即:

$$\hat{\xi}_{ML} = \underset{\xi}{\text{argmin}} F(\xi) \quad (11)$$

由于幅度向量 \mathbf{a} 在模型中是线性的, 因此对于给定的参数组 $\{x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, L_i, \bar{\theta}_i\}_{i=1}^P$, 可以直接得到 \mathbf{a} 的最小均方解:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^H \mathbf{D} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{D} = (D_{11}, D_{12}, \dots, D_{1N}, D_{21}, D_{22}, \dots, D_{MN})^T$ $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_{11}, \mathbf{e}_{12}, \dots, \mathbf{e}_{1N}, \mathbf{e}_{21}, \mathbf{e}_{22}, \dots, \mathbf{e}_{MN})^T$

将(12)式代入(10)式, 可得:

$$F = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |D_{mn} - \mathbf{e}_{mn} (\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^H \mathbf{D}|^2 \quad (13)$$

参数 $\{x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, L_i, \bar{\theta}_i\}_{i=1}^P$ 的最大似然估计过程实质上就是上式的最小化过程。

然而, 上述 MLE 参数估计问题的求解非常困难。首先对于(13)式所示的最小化问题, 优化方法往往会收敛到其局部最小点, 以致造成参量估计偏差。其次, 因为 MLE 算法是同时估计所有的散射中心的参量, 当散射中心的个数较多时, 该问题的维数非常高, 计算量很大。针对上述问题, 下面探讨参数初始值的选取方法和降低估计问题维数的算法。

2.3 TD-GTD 模型参数估计初始值选取方法

为了确保(13)式所示的最小化过程能正确、快速地收敛到全局最小点, 待估参数初始值的选取要尽可能地接近其真值。特别是对于 TD-GTD 模型, 参数初始值的确定暗含着对散射中心类型的判断。

一般的初始值选取方法多基于傅立叶变换, 利用二维 FFT 变换后的图像域峰值位置、宽度等直观信息选择参数的初始值, 该方法取值较为粗糙, 且人为干预因素较多。文献[7]研究了一种雷达目标二维散射数据的时频分析方法——自适应高斯基表示(AGR)方法。该方法可自动地将 ISAR 图像中的理想点散射中心与非点散射中心区分开来。本文利用其结果选取 TD-GTD 模型参数的初始值, 具体方法如下:

(1) 散射中心类型的判断:

对 ISAR 图像进行横向 AGR 分解, 得到的高斯基函数小方差分量对应不随方位角变化的点散射成分, 亦即 TD-GTD 模型中的局域性的散射中心。相反地, 大方差分量对应展布式的散射中心。因此, 适当设置方差门限 σ_{th} , 即可进行散射中心类型的自动区分。

(2) 散射中心个数(模型阶数)的确定:

在模型参数估计中, 确定模型阶数是值得展开专门研究的难点。本文提出基于 AGR 分解的结果, 通过能量截取来确定散射中心个数的方法。其中, 散射中心的能量可以直接用它们各自对应的 AGR 分量的展开系数来表示[7]。

2.4 TD-GTD 模型参数的 ML-RELAX 估计算法

为了充分发挥最大似然估计方法在参数估计准确度上的优势, 并解决同时估计多个散射中心这一造成计算量过大的根源问题, 引入 RELAX 技术, 提出基于最大似然(ML)估计的 RELAX 算法(以下简称 ML-RELAX)。其基本思想是: 在用 MLE 方法估计当前散射中心的参数时, 固定其余散射中心的参数,

逐个依次调整,以达到内部收敛。注意到在此算法中,MLE方法只用于估计单个散射中心参数,从而避免了同时估计多个散射中心参数的困扰。

对具有 P 个散射中心的模型,其代价函数可写为:

$$J_f(\xi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left| E_{mn} - \sum_{i=1}^P E_{mn}^i \right|^2 \quad (14)$$

$$E_{mn}^i = A_i \left(\frac{jf_{mn}}{f_c} \right)^{\alpha_i} \exp \left\{ \frac{-j4\pi}{C} (x_j f_{xm} + y_j f_{yn}) \right\} \exp \left(-2\pi f_{xm} \gamma_i \right) \text{sinc} \left(\frac{2\pi f_{mn}}{C} L_i \sin(\theta_{mn} - \bar{\theta}_i) \right) \quad (15)$$

易见,各个散射中心的参数之间是相互独立的。假定 $\{\xi_i\}_{i \neq k}^{P-1}$ 已经求出,则第 k 个散射中心参数 ξ_k 对应的代价函数 $J(\xi_k)$ 可写为:

$$J(\xi_k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left| E_{mn} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^P E_{mn}^i - E_{mn}^k \right|^2 \quad (16)$$

因此代价函数 $J(\xi_k)$ 的极小化等效于下式的极小化:

$$J'(\xi_k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |E_{mn} - E_{mn}^k|^2 \quad (17)$$

这相当于估计单个散射中心的参数,可直接采用MLE算法进行估计。

ML-RELAX算法中每一步的内部收敛判据为:比较代价函数在两次迭代过程中的变化值,若此变化值小于某个预设门限,则认为该过程内部收敛。

假定已知散射中心的数目为 P ,ML-RELAX算法的步骤如下:

(1) 设散射中心的个数 $i=1$,利用MLE算法计算 A_1 和 $\{x_1, y_1, \alpha_1, \gamma_1, L_1, \bar{\theta}_1\}$,从而得到第一个散射中心的参量 ξ_1 。

(2) 设散射中心的个数 $i=2$ 。

a) 利用步骤(1)得到的 ξ_1 求出 $\{E_{mn}^1\}_{m=1, n=1}^{M, N}$,并令 $\{E_{mn} = E_{mn} - E_{mn}^1\}_{m=1, n=1}^{M, N}$,利用MLE算法计算 ξ_2 ;

b) 利用 ξ_2 求出 $\{E_{mn}^2\}_{m=1, n=1}^{M, N}$,然后利用MLE算法重新计算 ξ_1 ;

c) 上述过程反复迭代,直至内部收敛。

(3) 设散射中心个数 $i=3$ 。

a) 由步骤(2)得到的 ξ_1 和 ξ_2 求 $\{E_{mn}^1\}_{m=1, n=1}^{M, N}$ 和 $\{E_{mn}^2\}_{m=1, n=1}^{M, N}$,令 $\{E_{mn} = E_{mn} - E_{mn}^1 - E_{mn}^2\}_{m=1, n=1}^{M, N}$,利用MLE算法计算 ξ_3 ;

b) 用同样方法,由 ξ_2 和 ξ_3 重新计算 ξ_1 ,类似地,由 ξ_1 和 ξ_3 重新计算 ξ_2 ,由 ξ_1 和 ξ_2 重新计算 ξ_3 ;

c) 反复迭代上述步骤,直至内部收敛。

(4) 令 $i=i+1$,上述步骤持续进行,直至 i 等于散射中心的总数,即 $i=P$ 。

3 实验研究结果

下面用仿真数据来检验TD-GTD模型及其参数估计算法的性能。产生ISAR仿真数据的条件如下:雷达发射频率范围:19.4GHz~20.6GHz,频率步长为20MHz。测量角度范围: $-3^\circ \sim 3^\circ$,步长为 0.1° 。按(4)式所示的TD-GTD模型,以两个局域性散射中心(S_{l1}, S_{l2})和两个展布式散射中心(S_{d1}, S_{d2})产生频域信号。四个散射中心参数的取值见表2。其中横向距离 x 、纵向距离 y 和长度 L 的单位都是米(m),参数 γ 的取值比其余的参数小得多(通常相差若干数量级),为了保证估计过程中优化算法的数值稳定性,将其规范化为 $\gamma' = \gamma \cdot f_c$,并对 γ' 进行参数估计。对上述极坐标格式的散射数据采用三次样条进行插值,将其转换为直角坐标格式下的二维频域散射数据 $s_{M \times N}$,数据长度 $M=N=61$ 。

定义信噪比SNR为:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\sigma_s^2 / \sigma_n^2 \right) \text{dB} \quad (18)$$

其中:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |s(m, n)|^2 \tag{19}$$

表2 散射中心参数的取值

Tab.2 Values of scattering centers

参数 散射中心	A	x	y	α	γ'	L	$\bar{\theta}$
S_{11}	1	0.5	-1	0	0.8	—	—
S_{12}	1	0	0	1	0	—	—
S_{d1}	6	-1	2.2	0	—	1.2	2°
S_{d2}	6	0	3	1	—	0.8	-1°

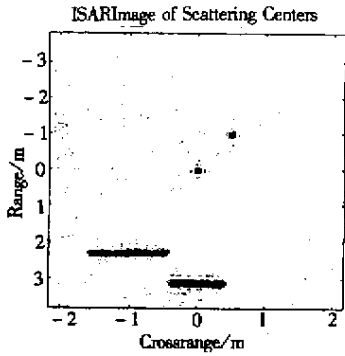


图3 散射中心的 ISAR 图像

Fig.3 ISAR image of scattering centers

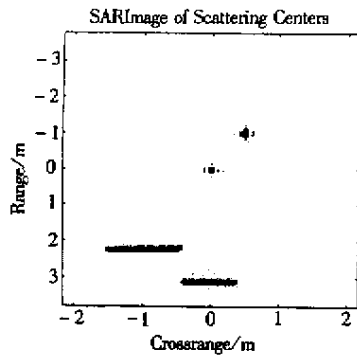


图4 重构的散射中心 ISAR 图像

Fig.4 Reconstructed ISAR image

取 SNR = -1dB ,对信号 s 加入高斯白噪声 n ,对得到二维仿真数据 $y = s + n$ 作二维傅立叶反变换 ,得到图3所示的 ISAR 图像。从中可以看到局域性散射中心 S_{11} 和 S_{12} 在图3中表现为两个“点”。而展布式的散射中心 S_{d1} 和 S_{d2} 则在图中具有一定的横向长度。

对上述仿真数据运用 ML-RELAX 方法进行参数估计。估计结果见表3 ,利用参数估值 ,依照 TD-GTD 模型重建的二维 ISAR 图像如图4。易见 ,重构图像不但较为准确地再现了原散射中心图像 ,而且有效去除了背景噪声 ,提高了图像质量。

表3 ML-RELAX 方法的参数估计结果

Tab.3 Estimated parameters using ML-RELAX algorithm

参数 散射中心	\hat{A}	$\hat{x}(m)$	$\hat{y}(m)$	$\hat{\alpha}$	$\hat{\gamma}'$	$\hat{L}(m)$	$\hat{\bar{\theta}}$
S_{11}	0.9611	0.5063	-1.0015	0	0.8710	—	—
S_{12}	0.9947	0.0064	0.0021	1	0	—	—
S_{d1}	5.8917	0.9833	2.1973	0	—	1.1086	1.8710°
S_{d2}	6.0370	0.0328	3.0049	1	—	0.7651	-1.0558°

为了考察 ML-RELAX 估计算法在不同信噪比条件下的性能 ,分别在 SNR 为 -3dB ,0dB ,3dB ,6dB ,9dB ,12dB 时 ,进行蒙特-卡罗实验 ,估算出各个参数在不同 SNR 下的估计方差 ,以展布式散射中心 S_{d1} 的参数为例 ,估计方差值和理论计算的 CRB 值如图5 ,其中表示方差值的 y 轴为对数刻度。可以看到

ML-RELAX算法估计参数的方差在不同信噪比条件下都接近 CRB 曲线,而在较低信噪比下的估计性能也是较为理想的。

4 结论

本文针对高频区雷达目标散射行为的复杂性,采用 TD-GTD 模型来模型化目标二维散射数据。该模型在几何绕射理论基础上,将复杂目标上并存的局域性与展布式散射中心区分开来,从而提供更贴近目标实际散射的、特征含量更为丰富的二维散射中心描述。在对 TD-GTD 模型参量的最大似然估计(MLE)中,引入 RELAX 技术,提出 ML-RELAX 参数估计方法,解决了同时估计多个散射中心这一造成计算量过大的根源问题。实验证实了 TD-GTD 模型的合理性以及 ML-RELAX 算法估计性能的优越性。

参考文献：

- [1] Keller J B. Geometrical Theory of Diffraction[J]. J. Opt. Soc. Am., 1962, 52(9):116-130.
- [2] Joseph J S, William M S, Randolph L M. Full polarization two-dimensional Prony modeling with application to radar target identification[J]. SPIE Vol.1960 Automatic Object Recognition III, 1993.
- [3] Rihaczek A W, Heershkowitz S J. Man-made target backscattering behavior: Applicability of conventional radar resolution theory[J]. IEEE Trans. A. E. S., 1996, 32(4):809-824.
- [4] Tufts D W, Kumaresan R. Estimation of Frequencies of Multiple Sinusoids: Making Linear Prediction Perform Like Maximum Likelihood[J]. Proc. IEEE, 1982, 70(9):975-989.
- [5] Stoica P, Nehorai A. Music, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound[J]. IEEE Trans. ASSP, 1989, 37(5):720-741.
- [6] Bresler Y, Macovski A. Exact Maximum Likelihood Parameter Estimation of Superimposed Exponential Signal in Noise[J]. IEEE Trans ASSP, 1986, 34(10):1081-1089.
- [7] Luiz C T, Hao L. Joint Time-Frequency ISAR Using Adaptive Processing[J]. IEEE Trans. A. P., 1997, 45(2):221-227.

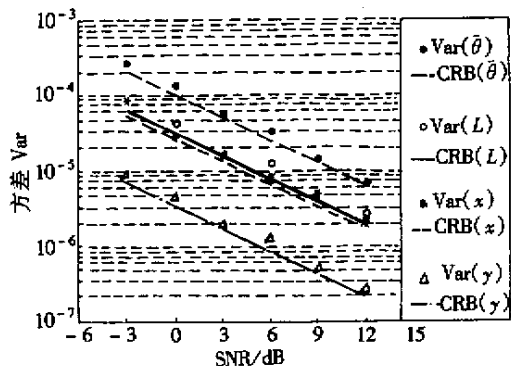


图5 不同 SNR 下的参数估计方差及其 CRB

Fig.5 Parameter estimate variances and CRB versus SNR

