

MLFMA 在运动目标多普勒回波数值仿真中的应用*

向道朴, 周东明, 何建国

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出了一种应用准静态技术, 结合快速多级子算法计算任意形状的运动目标多普勒信号的方法, 对目标的几种典型的微动多普勒信号进行了仿真, 并应用高分辨时频分析算法对仿真得到的微多普勒信号进行了分析, 提取出了微多普勒瞬时频率, 并与相应微动规律的点目标微多普勒瞬时频率进行对比。结果表明, 二者具有相同的变化规律, 从而证明本文提出的方法是有效的。

关键词: 准静态; 快速多级子; 微动; 时频分析

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

The Application of MLFMA in Doppler Echo Simulation with Motion Body Target

XIANG Dao-pu, ZHOU Dong-ming, HE Jian-guo

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

Abstract: A method based on quasi-static and Multi-level Fast Multi-pole Algorithm (MLFMA) is introduced to compute the micro-Doppler echo by motion body targeting with arbitrary shape. The joint time frequency analysis algorithm is used to calculate some typical motion's micro-Doppler echo. Furthermore, efforts were made to extract the instantaneous frequency and then compare it with the point target's instantaneous frequency in accord with the same micro-motion. The results indicate that they share the same trend and the current method is efficient.

Key words: quasi-static; Multi-level Fast Multi-pole Algorithm(MLFMA); micro-motion; joint time frequency analysis

雷达回波数值模拟在雷达系统的设计、研制和测试阶段发挥着十分重要的作用, 它使得雷达设计师可以在一种近似实物仿真的条件下来分析雷达系统的性能。近年来, 目标特性控制技术, 如隐身、伪装等获得了飞速发展, 对目标探测与识别提出了更高的技术要求。随着先进传感器的测量能力和时频信号处理水平的提高, 对目标细节的描述和刻画, 尤其是目标运动状态的精细刻画已经成为一个新的技术热点, 目标微动特性在目标探测与识别领域的重要价值开始引起国内外学术界和工程界的广泛关注^[4]。

目标微动会对入射电磁波产生复杂的幅度和相位调制, 目标运动状态的细节信息将包含在回波多普勒信号中, 微多普勒特征反映了目标的电磁特性、几何特性与运动特性, 为雷达目标特征提取和目标识别提供了新的途径。据现有的文献来看, 目前对微动目标多普勒信号的数值模拟, 都基于点目标模型, 对模型处理粗糙, 不适用于现阶段目标识别^[3, 5]。

快速多级子算法, 在计算精度和求解问题的规模方面具有其他数值方法不具备的优势, 但现有的快速多级子算法只能处理静止目标的散射场, 不能处理运动目标的散射场。本文提出一种应用准静态技术结合快速多级子算法计算任意形状运动目标的多普勒信号的方法, 并应用该方法对常见的几种典型运动形式的多普勒信号进行了仿真计算。

1 基本原理

时谐电磁场的复数表示式和瞬时表示式之间存在以下关系:

$$u(\mathbf{r}, t) = E_m(\mathbf{r}) \cos(\omega t + \varphi_m(\mathbf{r})) = \operatorname{Re}\{E(\mathbf{r}) \exp(j\omega t)\} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009-09-03

作者简介: 向道朴(1980-), 男, 博士生。

其中, ω_c 为角频率, $\varphi_m(\mathbf{r})$ 为初相, $E_m(\mathbf{r})$ 为振幅, $E(\mathbf{r})$ 为复振幅矢量, $\text{Re}[\cdot]$ 为取实部算子。 $u(\mathbf{r}, t)$ 与信号 $\cos(\omega_c t)$ 相乘后取差频分量得 $\frac{1}{2}\text{Re}[E(\mathbf{r})]$ 。频域快速多级子算法求解电磁散射问题将得到时谐稳态解,由式(1)可知,时谐稳态解相当于实际的连续波零中频雷达混频器的输出,本文将利用这种对应关系,应用准静态技术结合快速多级子算法,计算运动目标多普勒信号。

1.1 微多普勒数学原理^[1]

如图 1 所示,雷达位于坐标原点 O , \hat{u}_i 为入射电磁波方向单位矢量, \hat{u}_r 为接收电磁波方向单位矢量。 $t = 0$ 时刻,点目标位于 \mathbf{r}_0 点,设点目标的运动轨迹为 $\mathbf{r}(t)$,目标在 t 时刻的位置矢量为 $\mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}(t)$,目标在 t 时刻的远场表达为

$$E(\mathbf{r}') = \sigma \exp[jk\mathbf{r}'(t) \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r)] E(\mathbf{r}_0) \quad (2)$$

其中, $E(\mathbf{r}_0) = \sigma \exp[jk\mathbf{r}_0 \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r)]$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为雷达工作波长, σ 为与 RCS 相关的比例系数^[2,7]。从式(1)中可以看出,目标因运动会对雷达回波产生复杂的调幅和调相,即 $\sigma \exp[jk\mathbf{r}(t) \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r)]$ 。对于点目标,问题变得十分简单,此时 σ 为常数,设雷达工作频率为 f_c ,雷达发射信号为

$$s(t) = \text{Re}[\exp(j2\pi f_c t)] \quad (3)$$

回波为

$$u(t) = \text{Re}[E(\mathbf{r}') \exp(j2\pi f_c t)] \quad (4)$$

$u(t)$ 经过零中频混频后得到的多普勒信号为

$$u_d(t) = \text{Re}\{\exp[jk\mathbf{r}'(t) \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r)]\} \quad (5)$$

点目标多普勒信号相位为

$$\phi(t) = k\mathbf{r}'(t) \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r) \quad (6)$$

对相位求导得微多普勒频率为

$$f_{\phi m}(t) = \frac{k}{2\pi} \frac{d[\mathbf{r}'(t) \cdot (\hat{u}_i - \hat{u}_r)]}{dt} \quad (7)$$

对于后向散射,有 $\hat{u}_i = -\hat{u}_r$,点目标多普勒信号相位可简单表示为 $\phi(t) = 2k\mathbf{r}(t) \cdot \hat{u}_r$,其中 \hat{u}_r 为点目标位移单位矢量,设点目标沿径向运动,有 $\hat{u}_r = \hat{u}_r$,故 $\hat{u}_r \cdot \hat{u}_r = 1$,点目标多普勒频率为

$$f_d(t) = \frac{k}{\pi} \frac{dr(t)}{dt} \quad (8)$$

其中, $r(t)$ 为点目标在雷达径向相对雷达位移的大小^[1]。

实际目标比点目标复杂,一般很难得到 σ 具体的解析表达式,基于点目标模型是无法模拟实际微动目标微多普勒信号的。快速多级子算法在求解电大目标散射场问题上具有其他数值算法不具备的优势,本文将应用准静态技术结合快速多级子算法计算微动目标微多普勒信号。

1.2 准静态方法求解运动目标多普勒信号

对于运动目标,相对雷达半波长的距离变化将导致 360° 相位改变,如果在所考虑的一小段时间内,目标因运动引起的相对雷达的距离变化远小于雷达工作波长,则可以用它在离散时间步上处于一系列静止位置的频域解来模拟时域解^[1]。应用准静态技术结合快速多极子算法求解运动目标的散射场,目标在各个采样时刻被认为处于静止状态,该时刻的散射场用快速多级子算法计算。快速多级子算法求解静止目标的散射场最终归结为求解线性方程组,其矩阵形式为 $Z\mathbf{I} = \mathbf{V}$,其中 Z 为阻抗矩阵, \mathbf{I} 为电流系数向量, \mathbf{V} 为激励向量。阻抗矩阵 Z 表征了目标表面各离散单元之间的相互作用,对于刚体目标,不

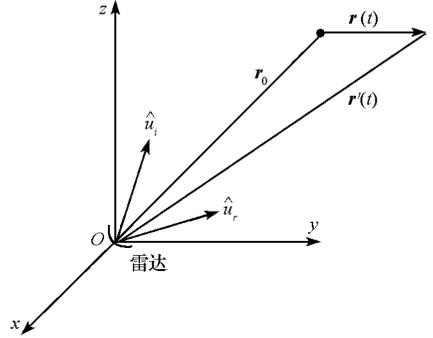


图 1 微动点目标雷达观测几何图
Fig. 1 The geometry of micro-motion point and radar

论目标的运动规律多么复杂,目标表面离散单元之间的相对位置保持不变,故阻抗矩阵 Z 在运动过程中保持不变,计算过程中 Z 只需要计算一次。不同时刻目标相对雷达将有不同的姿态,通过三维坐标变换,某时刻目标的姿态可由初始时刻目标的姿态经坐标变换得到。得到目标在新时刻的姿态后,重新计算出激励向量 V 并求解 $ZI = V$,得到新时刻的电流 I ,由电流 I 计算出远场并记录各个时刻的远场数据即得运动目标多普勒信号。

设点目标相对雷达最大的径向速度为 u_n ,则最大微多普勒频率 $f_{D_{\max}} = \frac{2u_n}{\lambda}$,为保证高分辨时频分布不发生混叠,要求对多普勒信号的采样率 $f_s \geq 4f_{D_{\max}}$ 。设采样间隔为 Δt ,有 $f_s = \frac{1}{\Delta t} \geq \frac{8u_n}{\lambda}$,故 $u_n \Delta t \leq \frac{\lambda}{8}$,即一个波长内至少采 8 点,才能保证高分辨时频分布不发生混叠。对于实际的目标,目标表面各点相对雷达的运动速度比点目标复杂,且目标姿态变化会对入射电磁波产生复杂的幅度和极化调制,故实际的运动目标将引起微多普勒谱展宽。为了分辨出实际目标精细的微动特征,采样率应高于点目标情况下的采样率 f_s 。

2 数值结果与讨论

为了验证本文提出方法的有效性,本文将给出仿真结果与点目标模型在相同微动规律下微多普勒频率变化规律的对比,所有数值算例电尺寸都位于谐振区,可以推测,仿真结果与点目标引起的微多普勒频率变化趋势应该相同。

对于微动目标,微多普勒特征提取关键在于瞬时频率的计算。微动激励的多普勒谱是时变频谱,由于简单的傅立叶分析不包含时间信息,不能用于微多普勒谱的分析。高分辨时频分布是动态信号分析的一种有效工具^[3],本文将应用 Choi+Williams 分布对仿真所得到的微多普勒信号进行分析,从中提取出微多普勒信息^[6]。

解析信号 $s(t)$ 的 Choi+Williams 分布为

$$CW(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \frac{1}{\sqrt{\tau^2/\sigma}} \exp[-\frac{(u-t)^2}{4\tau^2/\sigma} - j\omega\tau] \times s^*(u - \frac{1}{2}\tau) s(u + \frac{1}{2}\tau) du d\tau \quad (9)$$

其中, σ 为 Choi+Williams 分布核函数的参数,随 σ 的增大,Choi+Williams 分布抑制交叉项的能力减弱,通过数值试验发现取 $\sigma = 0.05$ 能有效抑制交叉项,同时对整个分布的时频分辨率影响较小。Choi+Williams 分布在时频面内的投影即为瞬时频率曲线。单成分信号 $z(t) = \alpha(t) \exp\{j2\pi\Phi(t)\}$ 的理想时频分布为一曲面,理想的时频分布在时频面内的投影即为瞬时频率曲线,实际的时频分布由于受测不准原理的限制,不能同时达到时间和频率的聚焦。

2.1 自转导体球

算例 1 为一半径为 0.2m 的金属球,球心位于坐标原点,绕 y 轴以 200π rad/s 的角速度自转,入射电磁波频率 $f_c = 300\text{MHz}$,沿 $-\hat{z}$ 方向。仿真过程中采样率 $f_s = 3000\text{Hz}$,数据长度 $N = 600$,从图 2 中可以看出,多普勒信号包含交流成分,这是由数值计算过程中用薄片三角形逼近球面所致。

2.2 复杂运动中的立方体

算例 2 为边长为 0.2m 的立方体,沿 z 轴运动。设雷达发射信号为沿 $-\hat{z}$ 方向的单频连续平面波,信号频率 $f_c = 300\text{MHz}$, $t = 0$ 时刻目标距离雷达 $r_0 = 3000\text{m}$ 。

2.2.1 沿雷达径向机动

设目标在雷达径向运动方程为 $r(t) = r_0 + 10t + 30t^2 - 40t^3 + 25t^4$,由式(8)得相应运动规律的点目标微多普勒频率为 $f_d(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} = 2(10 + 60t - 120t^2 + 100t^3)$,仿真过程中采样率 $f_s = 1000\text{Hz}$,数据长度 $N = 600$ 。图 3 示出了立方体沿雷达径向作复杂机动时多普勒信号 G-W 分布及其在时频面内的投影,其中参考结果为相应运动规律点目标瞬时频率分布。

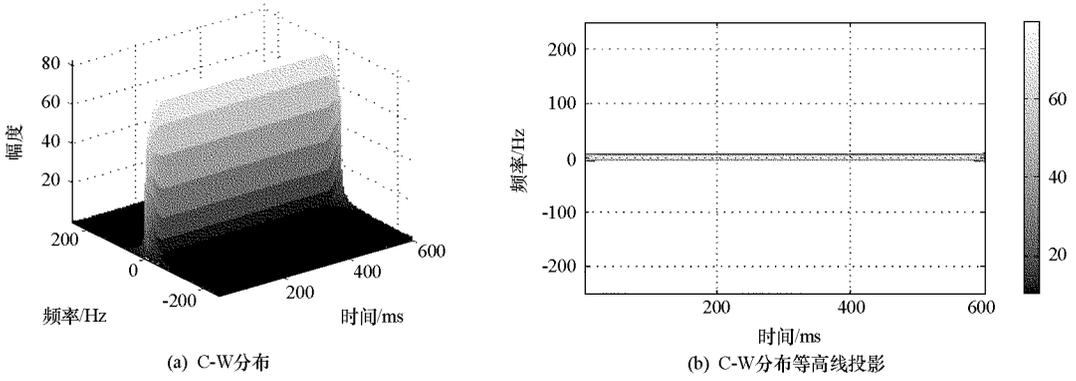


图2 匀速转动金属球多普勒信号 G-W 分布及其等高线投影
Fig.2 G-W distribution and its projection for uniform rotation sphere

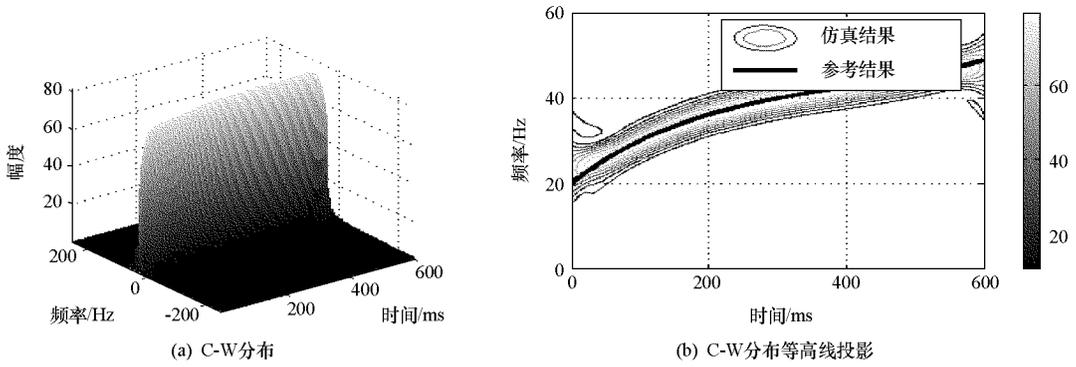


图3 立方体机动多普勒信号 G-W 分布及等高线投影
Fig.3 G-W distribution and its projection for maneuvering cubic

2.2.2 沿雷达径向小幅振动

设目标在雷达径向振动方程为 $r(t) = r_0 + 0.3\sin(12\pi t)$, 由式(8)得相应运动规律的点目标多普勒频率为 $f_d(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} = 7.2\pi\cos(12\pi t)$, 仿真过程中采样率 $f_s = 1000\text{Hz}$, 数据长度 $N = 600$ 。图4示出了立方体在雷达径向作小幅振动时多普勒信号 G-W 分布及其在时频面内的投影, 其中参考结果为相应运动规律点目标瞬时频率分布。

2.2.3 沿雷达径向滚动

设目标在雷达径向运动方程为

$$r(t) = r_0 - 20t^2 + 0.3\sin(12\pi t)$$

由式(8)得相应运动规律的点目标多普勒频率为

$$f_d(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} = -80t + 7.2\pi\cos(12\pi t)$$

仿真过程中采样率 $f_s = 1000\text{Hz}$, 数据长度 $N = 600$ 。图5示出了立方体沿雷达径向滚动时多普勒信号 G-W 分布及其在时频面内的投影, 其中参考结果为相应运动规律点目标瞬时频率分布。

由图3~图5可以看出, 多普勒信号 G-W 分布在时频面内的投影呈现带状, 这是因为仿真过程中计算的数据长度有限所致, 另外, 实际的时频分布由于测不准原理的限制, 不能同时达到时间和频率的聚焦。由仿真结果可以看出, 从仿真多普勒信号中提取出的多普勒瞬时频率变化与相应运动规律点目标瞬时频率变化有相同的趋势, 这是因为仿真过程中立方体的电尺寸位于谐振区, 立方体可近似为点目标。

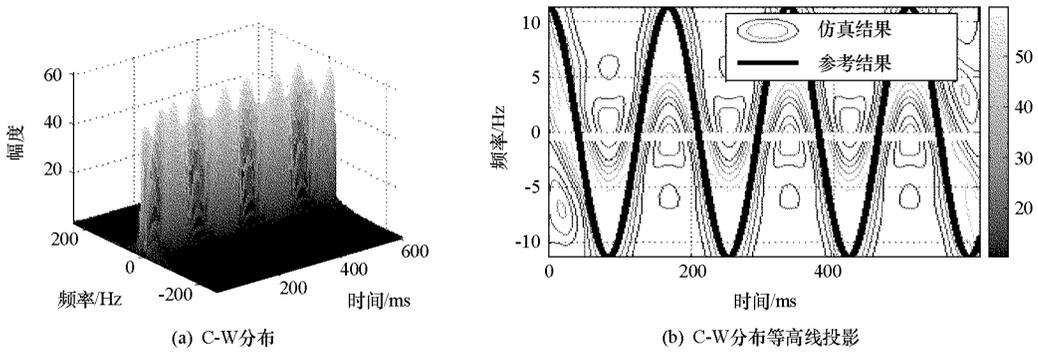


图4 立方体振动多普勒信号 G-W 分布及等高线投影

Fig. 4 G-W distribution and its projection for rotation cubic

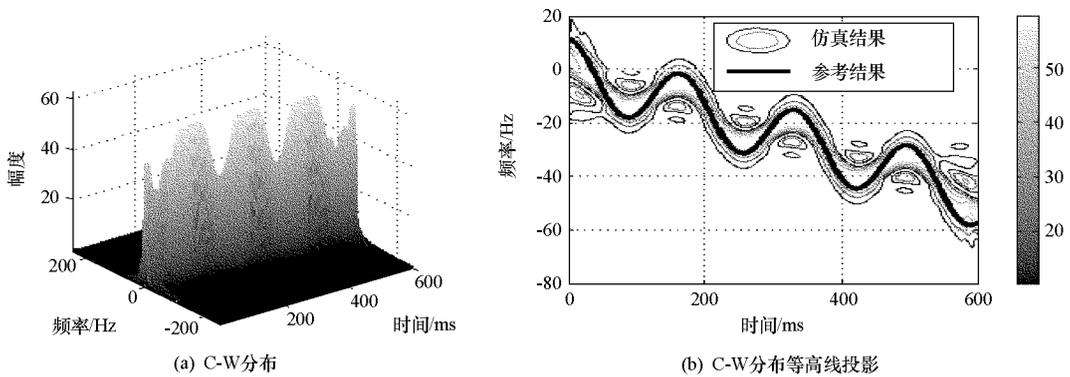


图5 立方体滚动多普勒信号 G-W 分布及等高线投影

Fig. 5 G-W distribution and its projection for tumbling cubic

3 结束语

应用快速多级子算法计算复杂运动目标电磁散射特性,因建模困难且计算量巨大,一直以来都没能很好地解决。本文应用准静态技术,结合快速多级子算法,对复杂目标在几种典型的运动形式下的多普勒回波进行了仿真计算,仿真过程中目标的电尺寸位于谐振区,这样便于与点目标微多普勒瞬时频率变化相比较,从而验证本文方法的有效性,其实应用本文提出的方法模拟电大尺寸运动目标多普勒信号也是可以的。快速多级子算法,能求解复杂目标的散射场,应用本文提出的方法,可以方便地得到所关心的目标在复杂运动状态下的多普勒信号,仿真数据可直接用于微动特性识别及各种仿真分析。

参考文献:

- [1] Chen V C, Li F. Analysis of Micro Doppler Signatures[J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2003, 150(4): 271- 276.
- [2] Cooper J. Scattering of Electromagnetic Fields by a Moving Boundary: The One dimensional Case[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1980, 28(11): 791- 795.
- [3] 陈行勇,刘永祥,等. 雷达目标微多普勒特征提取[J]. 信号处理, 2007, 23(2): 222- 226.
- [4] 赵艳丽,周颖,王雪松,等. 基于动力学模型的有源佳目标鉴别方法[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 60- 65.
- [5] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 521- 525.
- [6] 邹红星,周小波,李衍达. 时频分析:回溯与前瞻[J]. 电子学报, 2000, 9(28): 78- 84.
- [7] 刘鹏,金亚秋. 动态起伏海面上低飞目标电磁散射 Doppler 频谱的有限元- 区域分解法数值模拟[J]. 中国科学 G 辑, 2004, 34(3): 265- 278.