

文章编号 1004-924X(2016)06-1482-08

## FEKO 稀疏微多普勒建模及 CS 重构方法

郝云胜<sup>1</sup>, 叶艺山<sup>2\*</sup>, 邓振淼<sup>2</sup>, 冯 仑<sup>1</sup>

(1. 太原卫星发射中心 太原 030027; 2. 厦门大学 信息科学与技术学院 厦门 361005)

**摘要:**提出了利用压缩感知解微多普勒模糊的方法。由于目前雷达无法实现发射脉冲的随机性,采用电磁仿真软件 FEKO 来实现具有随机发射时刻的雷达回波模拟,用于算法验证。仿真过程中,考虑微动目标运动的复杂性,采用 FEKO 结合 MATLAB 的方式实现目标姿态的动态更新。首先由 MATLAB 计算出每个稀疏时刻目标的运动状态,然后把参数传递给 FEKO,获得不同时刻对应的姿态角下目标的电磁散射数据,最后利用本文算法解出无模糊的微多普勒频率。对 5 种不同的微动模型进行仿真,仿真结果均与理论结果一致,由此验证了该算法的可行性和仿真模型的有效性。

**关键词:**微多普勒;雷达;压缩感知;FEKO;电磁散射;

**中图分类号:**TN-911 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1482

## FEKO sparse micro-doppler modeling and CS reconstruction method

HAO Yun-sheng<sup>1</sup>, YE Yi-shan<sup>2\*</sup>, DENG Zhen-miao<sup>2</sup>, FENG Lun<sup>1</sup>

(1. *Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, 030027, China;*

2. *College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: 450274388@qq.com*

**Abstract:** The method of understanding and resolving the micro-Doppler was proposed. As the radar cannot achieve the randomness of the transmission pulse, and the electromagnetic simulation software FEKO was adopted to achieve the radar echo simulation with random emission time, and it was used for algorithm verification. In the progress of simulation, by considering about the complexity of the jogging target movement, the combination of FEKO and the MATLAB was adopted to realize the dynamic updating of the target's posture. Firstly, the motion state of each sparse moment target was to be calculated by MATLAB, then the parameters would be transmitted to the FEKO so as to obtain the electromagnetic scattering data under the corresponding attitude angle of different moments, at last, the micro-Doppler frequency without blurry would be worked out with the algorithms hereof. The simulation was executed to five different jogging models, and the simulation results have no difference with the theoretical results, therefore, the feasibility of the algorithm and the efficiency of the simulation model can be verified.

**Key words:** Micro-doppler; radar; compressed sensing; FEKO; electromagnetic scattering

收稿日期:2016-01-08;修订日期:2016-03-07.

基金项目:自动目标识别(ATR)国家实验室开放基金资助项目

## 1 引言

电磁场的数值计算本质上就是在不同的边界条件下解麦克斯韦方程组。电磁场计算软件 FEKO 的核心算法是矩量法,而矩量法是基于频域的求解方法,具有精度高、稳定性好的优点,对于计算目标电磁散射特性有广泛应用<sup>[1]</sup>。文献[2]通过研究基于电磁散射建模的目标回波生成法,证明了 FEKO 能够准确计算目标的散射场,且能真实地反映目标的散射特性,使得回波数据较为准确。文献[3-6]主要讨论了基于 FEKO 的复杂目标雷达散射截面(RCS)的仿真方法,研究了目标的散射特性和一维距离项(High Resolution Range Profile, HRRP)等。文献[7-8]在前面的基础上,实现了基于电磁散射数据的目标成像仿真。文献[9-10]对具有微动特征的目标进行了仿真建模,研究了目标的微多普勒效应,但是没有涉及微多普勒模糊,而这正是本文的研究重点。

微多普勒效应是雷达观测目标普遍存在的一种现象。利用回波提取微多普勒是雷达借助微多普勒进行目标识别的重要方法和手段。传统理论中,目标微多普勒频率与雷达脉冲重复频率(PRF)必须满足奈奎斯特采样定律,否则会存在模糊现象。借助压缩感知的手段,能够降低对 PRF 的要求。基于此本文开展了基于压缩感知理论的解微多普勒模糊方法的研究,提出了一种微多普勒解模糊方法。为验证该方法,本文又提出了一种基于 FEKO 的电磁仿真模型,该模型可根据计算出的电磁散射数据产生目标的稀疏微多普勒频谱的雷达回波。最后,利用本文提出的基于 CS 的微多普勒解模糊方法恢复出无模糊的微多普勒频谱,以验证模型的有效性。

## 2 数学模型

雷达发射并接收线性调频信号(LFM),回波信号表达式为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \text{rect} \left[ \frac{\hat{t} - 2R_t/c}{T_p} \right] e^{j\pi\gamma \left( \hat{t} - \frac{2R_t}{c} \right)^2} e^{-j\frac{4\pi f_c R_t}{c}} \quad (1)$$

其中:rect 表示矩形包络, $f_c$  是中心频率, $T_p$  是脉宽, $r$  是调频率, $\hat{t}$  是快时间, $t_m$  是慢时间, $t$  是全时

间  $t = \hat{t} + t_m$ ,  $A$  是散射点回波的幅度, $c$  是光速, $R_t$  为雷达与目标之间的瞬时距离。回波信号经过匹配滤波并变换到距离频域之后,其信号表现形式  $r(f_r, t_m)$  为

$$r(f_r, t_m) = A' \text{rect} \left[ \frac{f_r}{B} \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (f_r + f_c) R_t \right] \quad (2)$$

其中: $B$  是信号带宽。忽略目标的加速度、加加速度和转动角速度,那么  $R_t$  可以表示为

$$R_t \approx R_0 + vt_m + r_{\text{micro}}(t_m) \quad (3)$$

其中  $R_0$  为起始时刻目标与雷达的距离, $v$  为径向速度。将式(3)代入式(2)可以得到慢时间域雷达回波

$$r(f_d, t_m) = A'' \exp[-j2\pi f_d(t_m)t_m] \quad (4)$$

其中  $A'' = A' \exp \left[ \frac{2(f_r + f_c)R_0}{c} \right]$ , 多普勒频率  $f_d(t_m)$  为

$$f_d(t_m) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t_m)}{dt_m} = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t_m)}{dt_m} = \frac{2}{\lambda} \left[ v + \frac{dr_{\text{micro}}(t_m)}{dt} \right] = f_{b,d} + f_{m,d}(t_m) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,多普勒频率由两部分组成,其中  $f_{b,d}$  表示由平动产生的多普勒频率; $f_{m,d}(t_m)$  表示由微动产生的多普勒频率,即微多普勒频率。把各种形式的微动(自旋、进动、章动、摆动等)带入式(3)中的  $r_{\text{micro}}(t_m)$ ,然后将(2)中的  $r(f_r, t_m)$  代入(5)可得到各种微动的微多普勒频率。

## 3 压缩感知原理

压缩感知理论指出:如果信号  $\mathbf{x}(\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N)$  经过正交变换基  $\Psi$  投影后是稀疏或可压缩的,则可设计一个与  $\Psi$  不相关的测量矩阵  $\Phi$  线性测量信号,得到只包含信号主要信息的  $M(M \ll N)$  个测量值  $\mathbf{y}(\mathbf{y} \in \mathbb{R}^M)$

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (6)$$

通过对这  $M$  个测量值求解优化问题,可以实现原信号的近似重构。由于  $\mathbf{x}$  是可稀疏的

$$\mathbf{x} = \Psi \boldsymbol{\sigma} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \boldsymbol{\sigma} = \Theta \boldsymbol{\sigma} \quad (8)$$

式中  $\Theta = \Phi \Psi$  为  $M \times N$  的矩阵,称为感知矩

阵。只要矩阵  $\Phi$  服从“有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)”,就能够从  $M$  个测量值  $y$  重构出稀疏信号  $s$ 。

从式(5)可以看出,在某段时间( $f_{m,d}(t_m)$ 可看作为常数)内, $r(f_d, t_m)$ 在傅里叶变换域上可稀疏,因此稀疏矩阵  $\Psi$ 可取为傅里叶变换基,即

$$\psi_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left[-j2\pi \frac{ik}{N}\right], 0 \leq i, k \leq N. \quad (9)$$

信号重构是从测量值  $y$  中重建原始信号  $\bar{x}$ 。采用基于  $l_0$  最小化方法存在 NP(non-deterministic polynomial)难题,因此考虑基于解  $l_1$  范数的一个凸优化方法,将 NP 难题转化成线性规划问题求解。

为了得到精确的重构信号,通常  $M$  的取值与  $\Phi_{N \times N}$  和稀疏矩阵  $\Psi$  的相关度  $u(\Phi_{N \times N}, \Psi)$  需满足一定的关系式

$$M \geq C \cdot u^2(\Phi_{N \times N}, \Psi) \cdot K \cdot \log N, \quad (10)$$

式中: $C$ 为确定常数,相关度  $u(\Phi_{N \times N}, \Psi)$  越小,信号完全重构需要的  $M$  值越小。

本文采用的重构算法是正交匹配追踪算法(OMP),作为经典的信号重构算法,OMP 能够有效降低算法的复杂度,实现快速计算。

### 4 基于短时压缩感知的微多普勒解模糊原理

#### 4.1 基于稀疏采样的微多普勒解模糊方法

由目标微多普勒模型的分析可知,若目标上有  $L$  个散射点,每个散射点对应的微多普勒为  $f_{m,d}(t_m)$ ,则包含多个散射点的微多普勒雷达回波信号可以表示为

$$r(f_d, t_m) = \sum_{k=1}^L A''_k \exp(-j2\pi f_{m,d}(t_m) t_m), \quad (11)$$

式(11)在频域上可以表示为

$$S(f, t_m) = \sum_{k=1}^L A''_k \delta[f - (f_{m,d}(t_m))], \quad (12)$$

其中,式(12)表示一组稀疏信号, $\delta(\cdot)$ 为冲激函数。借鉴短时傅里叶变换方法,基于目标的运动周期,选择时间窗长度保证微动引起的  $f_{m,d}(t_m)$  的变化量小于频率分辨率,此时可以将其近似看成常数,因此包含微多普勒的雷达回波信号可以

看到是正弦波信号的叠加,而正弦波信号在频域上是稀疏的,因此雷达回波信号在频域上也是稀疏的。雷达回波这种频域稀疏特性为压缩感知理论应用于雷达环境提供了必要条件。基于短时压缩感知的微多普勒解模糊算法流程图如图 1 所示。

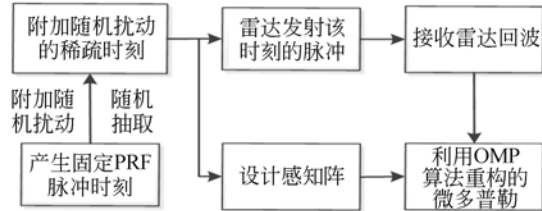


图 1 稀疏采样解微多普勒模糊流程图

Fig. 1 Flowchart of micro-doppler ambiguity-resolving base on sparse sampling

该方法与传统利用压缩感知重构目标微多普勒的方法的区别主要有以下几个方面:首先,该方法将降维采样放到雷达发射端,这样雷达发射的脉冲数就变少了。其次,该方法对雷达的发射时刻进行了微调——附加了随机扰动,该扰动相当于从更高维度的信号中随机采样的目标回波信号,符合压缩感知原理的有限等距性质,因而能够利用相关重构算法恢复出无模糊的微多普勒时频谱。

#### 4.2 设计脉冲发射时刻

脉冲发射时刻的设计主要分成两个步骤:从原固定重频中随机抽取部分脉冲以及对抽取的部分脉冲时刻加上随机扰动。前者是为了降低雷达发射的脉冲数,后者是为了求解微多普勒模糊。

假设雷达工作于固定重复频率  $f_s$  发射时刻为  $t_i = i/f_s, i = 1, \dots, n$  的脉冲信号(常见的脉冲重复频率范围是  $10 \sim 1000$  Hz),则脉冲发射时刻序列为

$$t_0, t_1, \dots, t_n \in \left[ \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{n}{f_s} \right]. \quad (13)$$

由第 2 章中压缩感知基本原理可知:如果感知矩阵满足 RIP 特性并且测量值个数满足  $M \geq C u^2(\mathbf{D}, \Psi) K \log N$ ,利用重构算法就可以从测量值  $y$  中以很大的概率重构出原始信号。因此,可以首先从原发射时刻中随机抽取  $M$  个发射时刻,构成新的脉冲发射时刻  $t_m, m = 1, 2, \dots, M, M < N$ ,这种设计保证了雷达可以比原来少的发射时刻获取目标回波信号。图 2 直观地展示了这个过程。图

中随机时刻  $t'$  是从固定脉冲重复频率方式下的均匀发射时刻中(脉冲 1、2、3、4、5...)随机抽取的部分脉冲(如脉冲 1、2、4、7...).

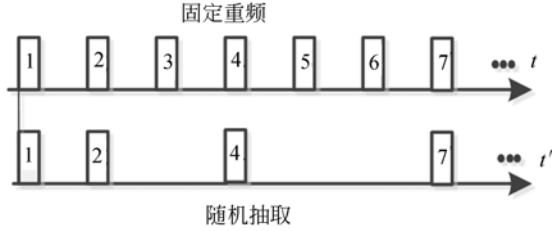


图 2 随机抽取

Fig. 2 Random sampling

由  $M \geq C u^2(\mathbf{D}, \boldsymbol{\psi}) \text{Klog } N$  分析可知,完整的目标信息所需要的测量值重构受到信号稀疏度的限制,因此在实际雷达应用中,雷达发射的稀疏脉冲数  $M$  将受到观测目标总数的影响。

若按原固定重频发射脉冲(脉冲 1、2、3、4、5...)所获得的目标微多普勒本身就因采样率过低而产生模糊,则随机从这些固定重频脉冲中抽取后再利用压缩感知重构出来的信号所包含的目标微多普勒也将会有模糊。为了解决这个问题,可以在抽取脉冲发射时刻叠加随机扰动  $\Delta_m$ ,从而得到新的脉冲发射时刻序列

$$t'_m = t_m + \Delta_m, \quad (14)$$

其中:  $\Delta_m$  是随机扰动项,满足高斯随机分布  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $\epsilon$  是一个与 PRI 相对应的因子

$$\Delta_m = \epsilon \cdot \text{PRI}, \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)则有

$$t'_m = t_m + \epsilon \cdot \text{PRI} = t_m + \frac{\epsilon}{f_s}, \quad (16)$$

叠加了随机扰动的稀疏脉冲序列等效于从一个高重复频率的脉冲发射时刻序列中随机抽取得到。如果  $\Delta_m$  的最小时间精度为  $\Delta t$ ,则相应的等效脉冲重复频率为  $f'_s$  ( $f'_s = 1/\Delta t$ )。由于  $f'_s > f_s$ ,因此,由  $t'_m$  得到的慢时间域雷达回波的微多普勒无模糊范围会比由  $t_m$  得到的更大。满足 RIP 特性的雷达脉冲发射时刻设计方法的示意图如图 3 所示。

在实际应用中,基于以下两个因素扰动项  $\Delta_m$  不能完全随机:(1)雷达必须按照雷控的时钟节拍工作,因此  $\Delta_m$  的精度不能高于雷控的时钟精度;(2)理论上  $\Delta_m$  的精度越高,通过细化基矩阵,微多普勒无模糊的范围越大。然而,由于基矩阵采



图 3 随机脉冲发射时刻示意图

Fig. 3 Transmission moment of random pulses

用的是 DFT 基,而随着 DFT 基细化倍数的增加,  $M$  值也要相应增大,二者之间存在折衷的关系。除此以外,细化倍数越大,重构算法的性能受测量噪声的影响越大。因此,实际应用中应适当选取  $\Delta_m$  的量化精度,保证微多普勒无模糊范围足够即可。

### 4.3 短时压缩感知

由于微多普勒的形式特殊——频率随时间变化,无法直接利用傅里叶变换基矩阵将原信号投影到傅里叶变换基上。但分析式(12)可知,在一个短时间  $t_{\text{window}}$  内,  $f_{m,d}(t_m)$  可近似为一个常数。因此,可采取类似短时傅里叶变换的加窗分析方法,对接收到的回波信号加滑动窗(滑动窗的大小取决于信号周期,因此  $f_{m,d}(t_m)$  近似为常数),则窗内信号变为

$$\tilde{r}(f_d, t_m) = \sum_{k=1}^L A'' \exp\{-j2\pi[f_{m,d}]t_m\}, \quad (17)$$

其中:  $\tilde{r}(f_d, t_m)$  为在时间  $t_{\text{window}}$  内的信号值,  $f_{m,d}$  为  $f_{m,d}(t_m)$  的近似值。此时,式(17)可用一组正弦波信号叠加近似表示,因此可将窗内信号投影到傅里叶变换基上。然后将矩形窗沿着时间轴不断滑动,每滑动一次利用压缩感知重构算法分析一次窗内信号的频率,直至分析整个回波信号。

由于是对滑动窗内的信号进行分析,因此傅里叶变换基矩阵  $\boldsymbol{\Psi}$  需要根据滑动窗内信号的时间  $t''_m$  不断调整,

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 t'_0} & e^{j2\pi f_1 t'_0} & \dots & e^{j2\pi f_{N-1} t'_0} \\ e^{j2\pi f_0 t'_1} & e^{j2\pi f_1 t'_1} & \dots & e^{j2\pi f_{N-1} t'_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 t'_{M-1}} & e^{j2\pi f_1 t'_{M-1}} & \dots & e^{j2\pi f_{N-1} t'_{M-1}} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中:  $t'_n, n=0, 1, \dots, M-1$  为滑动窗内信号所对应的时间序列,  $f_n, n=0, 1, \dots, N-1$  为细化的多普勒频率。通过设计上述的感知矩阵,用基于 OMP 的压缩感知的重构算法可以恢复出每个滑

动窗内信号的无模糊微多普勒信息,将得到的无模糊多普勒频率沿时间轴排列,即可得到无模糊的微多普勒频谱。

短时压缩感知的过程类似于时频分析,与其不同之处在于时频分析是将加窗的信号通过傅里叶变换变换到频域,而短时压缩感知是对窗内信号利用压缩感知的重构算法恢复出更大范围的频域信号。

### 5 Matlab 调用 FEKO 产生电磁散射数据

利用 FEKO 模拟目标电磁散射特性可以分为以下 4 个主要步骤:

- (1) 目标几何建模:FEKO 支持建立或者导入模型。
- (2) 求解参数设置:①激励源用平面波来模拟雷达发射的电磁波,②求解变量:设置为求解雷达单站远场数据。
- (3) 网格划分:目标网格模型是求解的依据。
- (4) 选择求解算法:采用矩量法(MOM)求解。

对于存在微动的目标,慢时间域上的目标在不同时刻拥有不同的姿态角。通过 Matlab 改变目标姿态,并且循环调用 FEKO,计算对应的电磁散射数据。调用方式如下:首先,在 CADFEKO 中设置好参数,包括目标模型,求解参数以及网格等,注意需要设置目标姿态控制变量,用于 Matlab 调用;通过命令“RUN PREFEKO”对模型进行预处理,产生“.pre”文件;在“EDITFEKO”中,

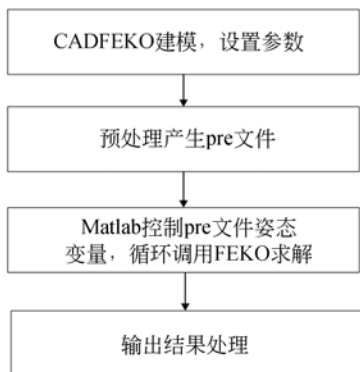


图 4 仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of simulation experiment

通过控制卡片的形式对“.pre”文件中的变量进行设置,Matlab 可以控制“.pre”中的某个或某几个变量,进而控制目标姿态角。本文中主要涉及的卡片为“TG”卡,用来控制模型的平移与旋转。

在 Matlab 中,编写调用命令:“dos(‘PREFEKO 工程名’);”和“dos(RUNFEKO 工程名);”同时定义一个变量,用于 Matlab 控制 FEKO 中的模型状态,求解不同姿态的散射场数据,综合所有姿态的结果对数据进行处理,可以用于验证理论或者模型的正确性,流程图如图 4 所示。

### 6 仿真实验

#### 6.1 基于固定重频的无模糊微动目标微多普勒仿真

在 CADFEKO 中建立单个散射点模型,设置散射点目标旋转半径为 10 cm,旋转角速度为  $2\pi$ , 旋转轴为 Z 轴,在 XY 平面上运动。采用平面波模拟雷达发射的电磁波作为激励源,设置载频为 20 GHz,带宽为  $B=500$  MHz,入射方位俯仰角为  $90^\circ$ ,方位角为  $0^\circ$ ,采用矩量法求解对应雷达单站的远场值。通过 matlab 控制脉冲发射时刻变量  $t$  来动态修改目标位置参数,再调用 FEKO 求解实现目标运动。雷达脉冲发射为固定重频形式,PRF 设置为 200 Hz。理论上最大的微多普勒频率为  $f_{\max} = 80\bar{n}/3$ ,由于  $PRF=200 > 2f_{\max}$ ,因此不会存在微多普勒模糊。

每个“.out”文件对应某个姿态下的目标电磁散射数据,可以通过插值得到全姿态角的电磁散射特性,对数据做时频分析即可得到目标微多普

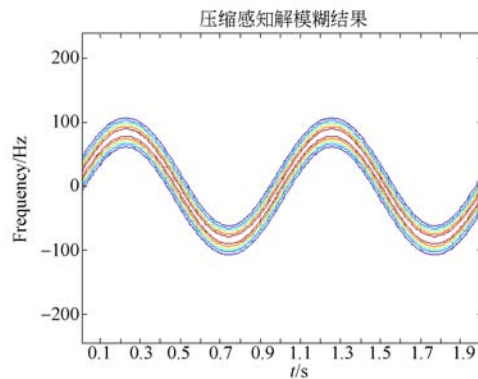


图 5 自旋无模糊微多普勒仿真结果

Fig. 5 Unambiguous micro-doppler simulation result of spin model

勒结果。实验结果如图 5 所示。

图 5 结果表明该电磁仿真模型与自旋微动模型相符合。

### 6.2 散射点自旋微多普勒解模糊仿真

与上述仿真过程的参数设置方法类似。目标旋转半径:  $R=30\text{ cm}$ , 角速度  $\omega=2\bar{n}$ , 载频  $f_c=10\text{ GHz}$ , 带宽  $B=500\text{ MHz}$ , 其余设置与 6.1 节一致。雷达脉冲发射时刻采用固定重频以及在固定重频上附加随机扰动两种方式, 通过 Matlab 读取预先生成的具有随机扰动的数据作为脉冲发射时刻, 循环改变目标姿态。计算得到最大的微多普勒频率为  $f_{\max}=40\bar{n}$ , 因此  $PRF=200\text{ Hz}<2f_{\max}$ , 存在模糊。图 6 是解模糊前后微多普勒结果对比。

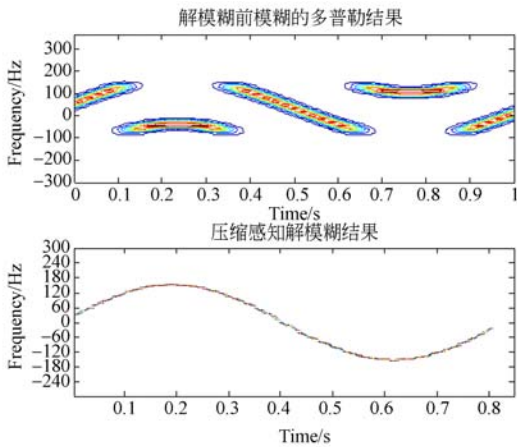


图 6 自旋微多普勒解模糊仿真结果

Fig. 6 Micro-doppler ambiguity-resolving result of spin model

### 6.3 散射点进动微多普勒解模糊仿真

目标旋转半径及角速度:  $R_1=30\text{ cm}$ ,  $\omega_1=2\pi$ ,  $R_2=15\text{ cm}$ ,  $\omega_2=4\pi$ 。载频  $f_c=10\text{ GHz}$ , 带宽  $B=500\text{ MHz}$ , 雷达  $PRF=300$ 。计算得到最大的微多普勒频率为  $f_{\max}=221.2\text{ Hz}$ , 因此  $PRF<2f_{\max}$ , 存在模糊。图 7 是进动微多普勒解模糊的结果。

图 7 计算所得的最大微多普勒频率为  $223.6\text{ Hz}$ , 与理论结果近似相等, 这表明模型产生的电磁散射数据能够正确求解进动模型的微多普勒模糊, 验证了模型的有效性。鉴于散射点模型的局限性, 下面以圆锥弹头为例进行微动仿真以及模糊求解。

### 6.4 圆锥弹头锥旋微多普勒仿真

圆锥弹头仿真模型如图 8 所示, X 轴为圆锥

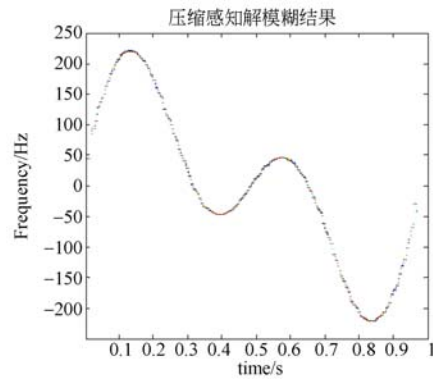


图 7 进动微多普勒解模糊结果

Fig. 7 Micro-doppler ambiguity-resolving result of precession model

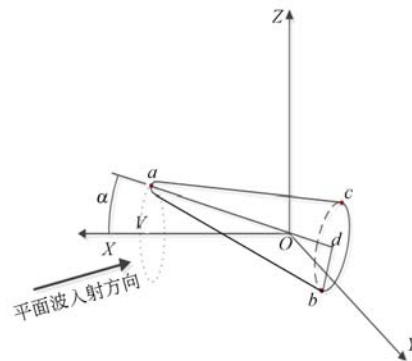


图 8 圆锥弹头锥旋模型

Fig. 8 Tapered warhead coning model

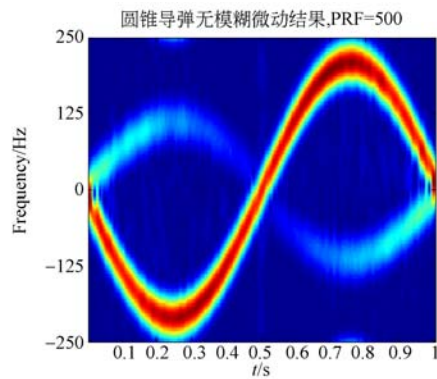


图 9 圆锥弹头锥旋无模糊微多普勒结果

Fig. 9 Unambiguous micro-doppler simulation result of coning model

导弹锥旋的旋转轴, 锥旋角为  $\alpha=30^\circ$ , 锥旋角速度为  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ 。圆锥模型: 高  $ad=3\text{ m}$ , 底边半径  $bd=0.08\text{ m}$ , 顶端半径为  $r=0.02\text{ m}$ , 仿真时长  $t=1\text{ s}$ ; 雷达发射载频  $f_c=10\text{ GHz}$  带宽为  $B=$

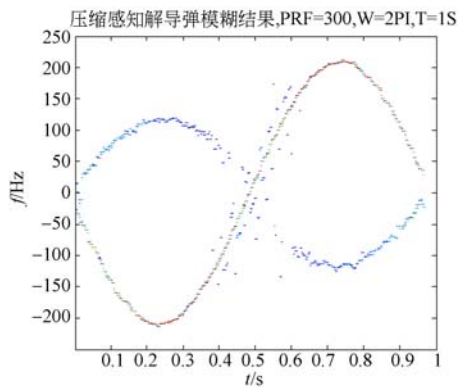


图 10 圆锥弹头锥旋微多普勒解模糊结果

Fig. 10 Micro-doppler ambiguity-resolving result of coning model

5 MHz 的窄带信号;雷达入射波的方向为水平角  $0^\circ$ , 俯仰角  $120^\circ$ 。理论计算结果得到的最大微多普勒频率为  $f_{\max} = 209.44$  Hz, 雷达脉冲发射的重复频率分别为:  $PRF_1 = 500$  Hz 和  $PRF_2 = 300$  Hz。

#### 参考文献:

- [1] 张伟, 谷山强, 向念文, 等. 利用 FEKO 对雷电辐射磁场进行仿真计算研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(S1):139-141.  
ZHANG W, GU SH Q, XIANG N W, et al.. Simulation of lightning radiated magnetic field based on FEKO[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2011, 32(S1):139-141. (in Chinese)
- [2] 袁菲. 线性调频雷达回波建模与仿真[D]. 成都:电子科技大学, 2012.  
YUAN F. *LFM radar echo modeling and simulation*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [3] 郭鹏, 白亮, 武梦洁, 等. 基于 FEKO 的雷达散射截面实时计算[J]. 航空科学技术, 2013(6):72-76.  
GUO P, BAI L, WU M J, et al.. Real-time RCS caculation based on FEKO[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2013(6):72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5453.2013.06.021. (in Chinese)
- [4] 方重华, 宋东安, 王志雄. 利用 hypermesh 和 FEKO 软件来仿真舰艇 RCS[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5):61-64.  
FANG CH H, SONG D A, WANG ZH X. Simulation of RCS of ship by using FEKO and hypermesh [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(5):61-64. (in Chinese)
- [5] 陈德喜, 颜俐, 王海婴. FEKO 软件的 RCS 仿真应用[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(9):125-128, 203.  
CHEN D X, YAN L, WANG H Y. Emulational application by the software FEKO in the radar cross section[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(9):125-128, 203. (in Chinese)
- [6] 赵雷鸣, 李德银, 刘昊. 基于 FEKO 软件仿真计算战斗机的 RCS[J]. 计算技术与自动化, 2010, 29(4):93-96.  
ZHAO L M, LI D Y, LIU H. Simulation of RCS of battleplan by the software FEKO[J]. *Computing Technology and Automation*, 2010, 29(4):93-96. (in Chinese)
- [7] 张智, 莫翠琼, 祝强. 基于 FEKO 的二维散射中心建模[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(2):55-57.  
ZHANG ZH, MO C Q, ZHU Q. Modeling of 2-D scattering centers based on FEKO[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2011, 27(2):55-57. (in Chinese)
- [8] 吕杰, 莫锦军, 袁乃昌. 基于 FEKO 的微波成像研究[J]. 微波学报, 2010, (S1):598-600.  
LV J, MO J J, YUAN N C. Disquisition micro-

因此对于  $PRF_1$  不存在微多普勒模糊,  $PRF_2$  存在微多普勒模糊。通过时频分析可得到图 9 的结果, 图 10 则是利用基于 CS 的微多普勒解模糊方法得到的无模糊时频图。

## 7 结 论

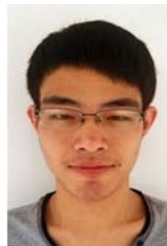
仿真产生的电磁散射数据能够正确应用于短时压缩感知解模糊技术中, 验证了结合 Matlab 的 FEKO 电磁仿真模型的有效性。通过 Matlab 动态改变目标相对于雷达的姿态, 循环调用 FEKO 计算得到雷达观测时间段内, 具有微动形式的目标电磁散射数据, 用于理论分析。对于复杂的大尺寸目标微动仿真, 在硬件条件允许的情况下, 采用相同的仿真方式可得到目标微多普勒序列。本方法可以应用于基于微多普勒的目标识别技术研究, 具有良好的应用前景。

- wave imaging based on FEKO[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, (S1):598-600. (in Chinese)
- [9] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 自旋尾翼弹头的双基地微多普勒研究[J]. *电子与信息学报*, 2012(9): 2122-2127.  
ZOU X H, AI X F, LI Y ZH, *et al.*. Bistatic micro-doppler of the spinning warhead with fins[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012(9):2122-2127. (in Chinese)
- [10] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(10):2413-2419.  
ZOU X H, AI X F, LI Y ZH, *et al.*. Precession and structural parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-doppler[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10):2413-2419. (in Chinese)
- [11] DONOHO D L, ELAD M. Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via minimization [J]. *PNAS*, March, 2003, 100(5): 2197-2202.
- [12] WANG J H, HUANG ZH T, ZHOU Y Y, *et al.*. Generalized incoherence principle in compressed sensing[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(5): 675-679.
- [13] CHEN V. *The Micro-Doppler Effect in Radar* [M]. Artech House, 2011.

#### 作者简介:



郝云胜(1968—),男,山西平遥人,研究员,主要从事雷达系统仿真。E-mail: hys68@163.com



叶艺山(1991—),男,福建泉州人,硕士研究生,2014年于厦门大学获得学士学位,主要从事参数估计与信号处理的研究。E-mail:450274388@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)