

# 频谱稀疏OFD-LFM弹头自旋微动特征重构方法

朱 丰<sup>1,2</sup>, 张 群<sup>1</sup>, 梁必帅<sup>1</sup>, 罗 迎<sup>1</sup>, 李开明<sup>1</sup>, 毕 博<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院 西安 710077; 2. 中国人民解放军93508部队 北京 丰台区 100079;  
3. 中国人民解放军空军军训器材研究所 北京 海淀区 100195)

**【摘要】**针对基于高分辨雷达技术的弹头自旋微多普勒特征问题展开研究。首先通过理论推导详细分析了OFD-LFM信号体制弹头自旋微多普勒在谱图上的表现形式,并得出相关结论,再结合压缩感知理论提出一种频谱稀疏OFD-LFM微多普勒谱图合成方法,该方法可在大幅减少OFD-LFM子载波数的前提下,准确重构出弹头自旋微多普勒特征曲线;同时有效抑制了谱图中的旁瓣影响。仿真实验结果表明了理论推导的正确性,证明了该文重构方法的有效性。

**关键词** 压缩感知; 弹头; 频谱稀疏OFD-LFM信号; 谱图; 自旋微多普勒

中图分类号 TN957

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.010

## Reconstruction Method of Spinning Micro Motion Signature of Missile with Sparse Frequency OFD-LFM Signal

ZHU Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qun<sup>1</sup>, LIANG Bi-shuai<sup>1</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, LI Kai-ming<sup>1</sup>, and BI Bo<sup>3</sup>

(1. Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University Xi'an 710077;

2. No. 93508 Unit of People's Liberation Army Fengtai Beijing 100079;

3. Military Training Material Research Institute, People's Liberation Army Air Force Haidian Beijing 100195)

**Abstract** Some researches about spinning micro-Doppler signature of ballistic missile are carried out in this paper. Firstly, the format of spinning micro-Doppler signature of ballistic missile on the spectrogram with orthogonal frequency division linear frequency modulation (OFD-LFM) signal is analyzed in details via a strict theoretical deduction, and some related conclusions are obtained. Furthermore, a new micro-Doppler spectrogram synthesizing method with sparse frequency OFD-LFM signal is presented based on compressed sensing. By using the method, the spinning micro-Doppler signature curve can be reconstructed exactly and the side-lobe can be restrained on condition that the sub-frequency number in OFD-LFM signal is reduced apparently. Simulation results show the correctness of theoretical derivation and the effectiveness of the reconstructed method.

**Key words** compressed sensing; missile; sparse frequency OFD-LFM signal; spectrogram; spinning micro-doppler

近年来,通过高分辨雷达技术获得弹道导弹的微动及微多普勒特征来进行导弹目标的识别工作逐渐得到了国内外的广泛关注。文献[1-2]分析了弹头目标的锥旋和进动模型及其微多普勒特征,并指出了微多普勒与载频和带宽的关系:载频越高,微多普勒越大,越利于检测和提取;带宽越宽,越利于弹头识别。

弹头目标属于小尺寸目标,为了利用高分辨雷达技术准确识别出不同的弹头目标,对分辨率的要求比较高。由高分辨雷达原理可知,为获得足够高的距离分辨率,需要发射信号具有很大的带宽,这

就对数字信号处理机提出了一定的挑战。正交频分线性调频(OFD-LFM)信号是利用正交频分复用(OFDM)技术调制传统线性调频(LFM)信号而产生的新信号形式<sup>[3-4]</sup>,它利用LFM作为子载波,在同一时间收发所有的子载波,这样可克服雷达对目标径向运动速度敏感性问题,而且在利用OFD-LFM合成大带宽以获得距离高分辨率方面,与传统的步进频率体制雷达相比,明显缩短了相干积累时间<sup>[5]</sup>。因此,本文将OFD-LFM作为高分辨雷达的发射信号并研究该信号体制下的弹头目标微多普勒特征技术。然而,OFD-LFM中同时收发的各路子载波都需要相

应载频的低通滤波器来实现子载波分离,子载波数越多,所需的低通滤波器就越多。因此,如何在大幅减少发射OFD-LFM的子载波个数,即构成OFD-LFM频域稀疏的条件下,合成同样的高分辨,完成微多普勒信息的提取是有待研究的重要问题。

压缩感知(compressive sensing, CS)是文献[6]提出的一种新的数据压缩与重建理论。近年来,它作为一种新的信号获取与压缩重构方法被引入到雷达信号处理领域中,一经引入,基于CS理论的高分辨雷达信号处理技术便成为许多专家和学者所广泛关注的热点问题。目前CS理论在高分辨雷达信号处理领域中已经有了一定的初步应用,主要集中在以下几个方面:1)在传统的聚束、条带SAR、ISAR中,利用CS理论可在减少快时间采样数据量的前提下合成一维距离像,同时进一步提高雷达的距离分辨率<sup>[7]</sup>;2)稀疏子脉冲处理<sup>[8]</sup>:利用CS理论可在减少子脉冲个数的条件下,有效提高距离分辨率并合成高分辨距离像(high-resolution range profile, HRRP);3)稀疏孔径、稀疏阵列处理<sup>[9]</sup>:利用CS理论可在减少方位向数据量的条件下,提高方位向分辨率并完成方位向信号处理。本文将CS理论引入到频谱稀疏OFD-LFM的高分辨雷达弹头微多普勒信息提取中,通过理论推导分析OFD-LFM弹头自旋微多普勒在谱图上的特征曲线。进一步针对频谱稀疏OFD-LFM信号,提出一种基于CS理论的弹头自旋谱图重构方法,该方法能在大幅减少OFD-LFM子载波的前提下,完成微多普勒谱图的合成。此外,将CS理论引入到基于频谱稀疏OFD-LFM的微多普勒信息提取中还存在另一优点,即利用CS理论重构出的结果是由若干冲激函数组成的,这些冲激函数可有效地抑制谱图中的旁瓣影响,更有利于进一步的微多普勒特征提取。

## 1 基于OFD-LFM的弹道导弹自旋微多普勒分析

自旋弹头与雷达之间的几何关系如图1所示, $XOY$ 坐标系的 $X$ 轴平行于雷达视线方向, $Q$ 为一个散射点, $P$ 为参考点,弹头以角速度 $\omega_s$ 进行自旋。

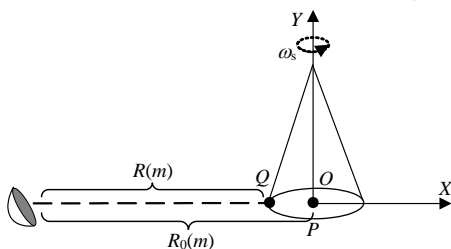


图1 弹头自旋与雷达之间的几何关系图

OFD-LFM信号是将传统的LFM信号调制到多路子载波上进行叠加后发射。设发射信号中共包含 $N$ 路子载波信号,假设雷达观测时间为 $T$ ,OFD-LFM重复周期为 $T_r$ ,在整个观测过程中雷达发射 $M_B = \lceil T/T_r \rceil$ 个OFD-LFM信号,用序列表示, $m=1,2,\dots,M_B$ ,其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向正无穷大取整。则第 $m$ 个OFD-LFM中第 $i$ 路子载波信号为:

$$g(t,i;m) = \text{rect}(t/T_p) \cdot \exp(j2\pi(f_c t + qit/T_p + \mu t^2/2)) \quad i=1,2,\dots,N, q \in \square \quad (1)$$

式中, $t$ 为快时间; $T_p$ 为脉冲宽度; $f_c$ 为起始载频, $\mu$ 为调频斜率; $q$ 为自然数,相邻两路子载波之间的频率间隔为 $\Delta f = q/T_p$ 。容易证明当 $m$ 取定时, $g(t,i)$ 间相互正交,即满足:

$$\int_{-T_p/2}^{T_p/2} g(t,i_1)g^*(t,i_2)dt = \begin{cases} G & i_1 = i_2 \\ 0 & i_1 \neq i_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $G$ 为常数。在实际工程应用中,应选择合适的 $q$ 值以保证各路信号之间的频率间隔。则雷达发射信号可以写为:

$$s(t;m) = \sum_{i=1}^N g(t,i) \quad (3)$$

散射点 $Q$ 的回波可写为:

$$s_{\text{return}}(t;m) = \sum_{i=1}^N \sigma g(t-2R(m)/c,i) \quad (4)$$

式中, $\sigma$ 为散射点 $Q$ 的散射系数; $R(m)$ 为散射点 $Q$ 在不同时刻与雷达之间的距离 $c$ 为光速。为了分离各路子载波信号,可以采取LFM信号特有的拉伸处理方法,即利用 $s(t;m)$ 分别与所发射的各路子载波信号进行“dechirp”处理后,再经过低通滤波器(LPF)分离出各路子载波信号。为了保证准确地分离出各路子载波信号,在每一个OFD-LFM中都需要 $N$ 个参考信号。

各路参考信号可写为:

$$g_0(t,i;m) = g(t-2R_0(m)/c,i) \quad (5)$$

拉伸处理后得到:

$$s_c(t;m) = s_{\text{return}}(t;m)g_0^*(t,i;m) \quad (6)$$

$s_c(t;m)$ 通过低通滤波器后,只有 $i'=i$ 的分量得以输出,其表达式为:

$$s_{c1}(t,i;m) = \sigma \times \text{rect}\left(\frac{t-2R(m)/c}{T_p}\right) \times \exp(j4\pi(-(f_c + qi/T_p)R_\Delta(m)/c)) \times \exp(j2\pi(2\mu(R^2(m) - R_0^2(m))/c^2)) \times \exp(-j4\pi\mu R_\Delta(m)t/c) \quad (7)$$

其中,  $R_{\Delta}(m) = R(m) - R_0(m)$ 。对  $s_{c1}(t, i; m)$  关于  $t$  做傅里叶变换, 并去掉RVP项和包络斜置项, 得到各路子载波对应的粗分辨率距离像 (coarse-resolution range profile, CRRP):

$$S_{\text{CRRP}}(f, i; m) = \text{sinc}(T_p(f + 2\mu R_{\Delta}(m)/c)) \times \sigma T_p \exp(j4\pi(-(f_c + qi/T_p)R_{\Delta}(m)/c)) \quad (8)$$

可见  $|S_{\text{CRRP}}(f, i; m)|$  是一个sinc函数, 其峰值出现在  $f = -2\mu R_{\Delta}(m)/c$  处, 即由单路LFM信号获得的目标距离像。由于在OFD-LFM信号中, 单路LFM信号的带宽通常较小, 对应的距离分辨率较低, 对于通常的弹道导弹目标尺寸可认为小于单路LFM信号的距离分辨单元, 因此每个CRRP的峰值出现在同一个位置。取各路  $S_{\text{CRRP}}(f, i; m)$  信号模值的峰值点, 记为  $S_{\text{CRRP1}}(i; m)$ , 再做关于  $i$  的  $N$  点IDFT, 可获得HRRP, 记为  $S_{\text{HRRP}}(k_x; m)$ , 等效实现对  $N$  路LFM信号的频谱合成。对HRRP取模值并排列成矩阵形式, 即为谱图  $|S_{\text{HRRP}}(k_x; m)|$ 。HRRP中的峰值位置可由对  $S_{\text{CRRP1}}(i; m)$  相位项求关于  $i$  的导数确定:

$$k_x = \partial \Phi(i; m) / \partial i = -4\pi q R_{\Delta}(m) / c T_p \quad (9)$$

若不存在弹道导弹的任何微动影响, 如弹头锥顶端散射点, 则  $S_{\text{CRRP1}}(i; m)$  相位项中  $R_{\Delta}(m)$  可近似为一个常数  $R_{\Delta}$ , 即散射点对应于各个HRRP中峰值位置是固定的, 在谱图上表现为一条平整的直线:

$$k_x = -4\pi q R_{\Delta} / c T_p \quad (10)$$

对于弹道导弹的自旋情况, 由于弹头自旋带来的微多普勒现象使得  $R_{\Delta}(m)$  在各个HRRP中的取值均不一样, 因此HRRP的峰值位置成为关于  $m$  的一个函数。弹头自旋属于旋转形式圆周运动,  $R_{\Delta}(m)$  可表示为<sup>[10]</sup>:

$$R_{\Delta}(m) = \rho \cos(\omega_0 m + \theta_0) \quad (11)$$

式中,  $\rho$  为弹头上散射点对应的自旋半径;  $\omega_0$  为弹头自旋角速度;  $\theta_0$  为弹头自旋初始相位角。那么, HRRP中峰值位置可重写为<sup>[10]</sup>:

$$k_x = -\rho \cos(\omega_0 m + \theta_0) 4\pi q / c T_p \quad (12)$$

可见, 弹头自旋微多普勒在谱图上的表现形式仍为正弦曲线, 且正弦曲线周期为弹头的自旋周期, 正弦曲线幅度为弹头上散射点对应的自旋半径, 正弦曲线初始相位角为弹头自旋初始相位角。

## 2 基于CS理论的频谱稀疏OFD-LFM微多普勒谱图合成方法

构造发射信号为频谱稀疏的OFD-LFM信号, 该频域稀疏信号与传统OFD-LFM信号不同, 每个

OFD-LFM中仅包括  $M$  ( $M < N$ ) 个子载波, 相邻两路子载波的频率间隔为  $L_{i'} \Delta f$ ,  $i' = 1, 2, \dots, M$ ,  $L_{i'}$  为一个随机整数, 且  $0 < L_{i'} < N$ ,  $L_1 = 0$ ,  $L_M = N - 1$ , 起始载频仍为  $f_c$ , 脉冲宽度仍为  $T_p$ , 有:

$$g'(t, i'; m) = \text{rect}(t/T_p) \times \exp(j2\pi(f_c t + L_{i'} \times qt/T_p + \mu t^2/2)) \quad i' = 1, 2, \dots, M', \quad q \in \square \quad (13)$$

同样, 容易证明当  $m$  取定时, 各个  $g'(t, i')$  之间仍然相互正交, 即满足:

$$\int_{-T_p/2}^{T_p/2} g'(t, i'_1) g'^*(t, i'_2) dt = \begin{cases} G' & i'_1 = i'_2 \\ 0 & i'_1 \neq i'_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $G'$  为常数。

雷达发射信号可以写为:

$$s'(t; m) = \sum_{i'=1}^{M'} g'(t, i') \quad (15)$$

则散射点  $Q$  的回波可重写为:

$$s'_{\text{return}}(t; m) = \sum_{i'=1}^M \sigma g'(t - 2R(i'; m)/c, i') \quad (16)$$

此时, 再对频谱稀疏的OFD-LFM信号进行各路子载波信号分离, 可大幅减少所需的参考信号个数, 仅需  $M$  ( $M < N$ ) 个参考信号, 如图2所示。

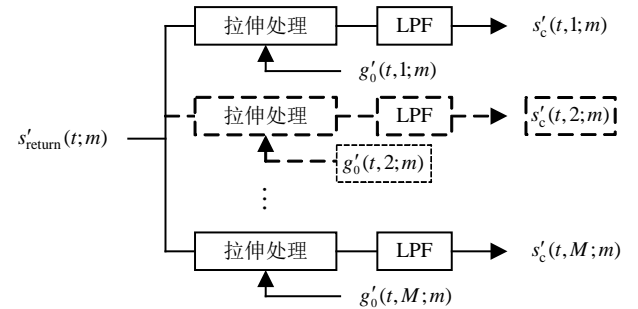


图2 频谱稀疏OFD-LFM各路回波信号分离流程框图

通过拉伸处理, 做关于  $t$  傅里叶变换、去除RVP项和包络斜置项以及CRRP峰值采样后, 可得到:

$$S'_{\text{CRRP1}}(i'; m) = \sigma T_p \exp(-j4\pi q R_{\Delta}(m) i' / c T_p) \times \exp(-j4\pi f_c R_{\Delta}(m) / c) \quad (17)$$

其中  $R_{\Delta}(m) = R(m) - R_0(m)$ 。

依据CS理论<sup>[11]</sup>, 构造降维观测矩阵:

$$S'_{\text{CRRP1}}(i') / S_{\text{CRRP1}}(i) = \Phi \quad (18)$$

其中  $\Phi_{M \times N} = \{\phi_{i', i}\}$  为一个  $M \times N$  维随机部分单位阵:

$$\{\phi_{i', i}\} = \begin{cases} 1 & \{(i', i) | S'_{\text{CRRP1}}(i') = S_{\text{CRRP1}}(i)\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\phi_{i', i} = \phi_{M, N} = 1$ 。由于HRRP可以通过做关于  $i$  的IDFT获得, 因此, 可构造稀疏变换矩阵  $\Psi$  为满足正交特性的IDFT矩阵:

$$\Psi = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W_N^{-1} & \cdots & W_N^{-(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{-(N-1)} & \cdots & W_N^{-(N-1)^2} \end{bmatrix}$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N) \quad (20)$$

所构造的降维观测矩阵与稀疏变换矩阵的乘积相当于对一个部分DFT矩阵进行随机抽取, 故满足RIP性质<sup>[11]</sup>, 可以有效地应用于CS理论与算法中。

依照CS理论, 构造 $l_1$ 范数下的最优化问题:

$$\min \|\Psi^H \Phi^H S_{\text{CRRP1}}(i')\|_1$$

s.t.  $S_{\text{CRRP1}}(i') = \Phi S_{\text{CRRP1}}(i) = \Phi \Psi S_{\text{HRRP}}(k_X)$  (21)

这样, 目标函数 $\Psi^H \Phi^H S_{\text{CRRP1}}(i')$ 即为所求的HRRP, 可记为 $\hat{S}_{\text{HRRP}}(k_X)$ 。为有效求解上述 $l_1$ 范数下的最优化问题, 可利用OMP算法完成<sup>[12]</sup>, 在此, 对传统OMP算法稍作改进, 可以在重构 $\hat{S}_{\text{HRRP}}(k_X)$ 时进一步提高运算效率, 具体步骤如下:

1) 给出稀疏度 $K$ , 初始零向量 $r_{N \times 1}$ , 计数值 $r=0$ , 终止门限 $g$ , 令 $A = \|S_{\text{CRRP1}}(i')\|_2$ ,  $T = \Phi \Psi$ ;

2) 令 $P(i) = TS_{\text{CRRP1}}(i')$ ,  $q = \max P(i)$ , 此时 $i$ 记为 $i_{\max}$ ;

3)  $T$ 中第 $i_{\max}$ 列记为 $T_{\max}$ , 令 $q_{\max} = (T_{\max}^H T_{\max})^{-1} q$ ;

4) 令 $r(i_{\max}) = q_{\max}$ ;

5)  $S_{\text{CRRP1}}(i') = S_{\text{CRRP1}}(i') - T_{\max} q_{\max}$ , 并令 $T_{\max} = 0$ ,  $r = r + 1$ ;

6) 如果 $r < K$ , 则转到步骤7); 如果 $r \geq K$ , 则停止。此时,  $r_{N \times 1}$ 为重构结果, 记为 $\hat{S}_{\text{HRRP}}(k_X) = r_{N \times 1}$ ;

7) 如果 $\|S_{\text{CRRP1}}(i')\|_2 \geq g$ , 则转步骤2); 如果 $\|S_{\text{CRRP1}}(i')\|_2 < g$ , 则停止。此时,  $r_{N \times 1}$ 为重构结果, 记为 $\hat{S}_{\text{HRRP}}(k_X) = r_{N \times 1}$ 。

$g$ 的取值一般与 $A$ 有关, 即:

$$g = \alpha^* A \quad (22)$$

其中,  $\alpha^*$ 的取值通常在0~0.5之间。

对所有 $m$ 分别重构出其对应的HRRP, 并将重构结果排列成矩阵形式, 即可获得重构的谱图 $|\hat{S}_{\text{HRRP}}(k_X; m)|$ 。

### 3 仿真实验与相关讨论

假设雷达发射OFD-LFM信号初始载频为10 GHz, 子载波脉冲宽度为 $1.67 \times 10^{-7}$  s, 在脉冲持续时间内共发射了100路子载波, 即 $N=100$ , 相邻

两路子载波的频率间隔为6 MB, 取 $q=1$ , 每路子载波的调频斜率为 $3.6 \times 10^{13}$ , 将各路子载波综合起来处理, 可获得的合成带宽 $B=600$  MHz, 对应的距离高分辨率为 $\Delta_R=0.25$  m。假设有翼弹道导弹弹头散射点模型如图3所示, 其中“1”号散射点为弹头顶端散射点, 在弹头自旋时它不产生微多普勒信息, “2”和“3”号散射点代表弹头底端的两个翼, 它们与弹头自旋中心轴的距离均为0.9 m, 对称而置, 且初始相位角分别为 $\pi/4$ 和 $5\pi/4$ , 弹头自旋角速度为 $8\pi$  rad/s。图4为利用传统OFD-LFM信号处理方法获得的微多普勒谱图; 图5~图7分别为利用本文CS方法在每个OFD-LFM信号中仅含有50、25路和13路, 即降维率50%、25%、13%时重构出的微多普勒谱图, 其中设置稀疏度 $K=5$ ,  $\alpha^*=0.4$ 。

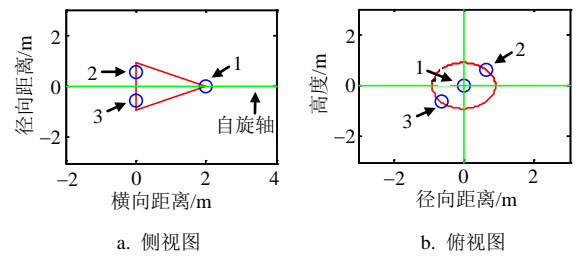


图3 有翼弹头散射点模型

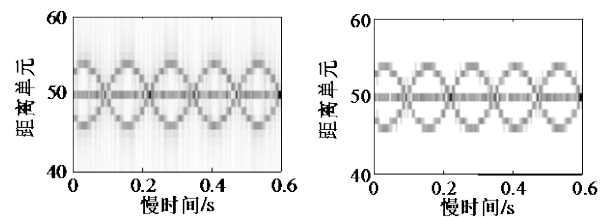


图4 传统OFD-LFM处理方法获得谱图

图5 降维率50%CS方法重构出的谱图

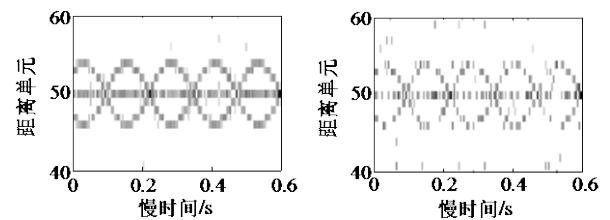


图6 降维率25%CS方法重构出的谱图

图7 降维率13%CS方法重构出的谱图

通过比较可看出, 利用CS方法可在大幅减少OFD-LFM子载波数的条件下重构出高质量的弹头微多普勒谱图, 同时有效抑制了谱图中旁瓣的影响。进一步通过利用图像处理方法可以发现谱图中微多普勒特征曲线仍为正弦曲线, 且周期为0.25 s, 即角速度为 $8\pi$  rad/s, 最大幅度与正弦曲线中心间隔3个距离单元,  $0.9 - 3 \times 0.25 = 0.15 < 0.25$  m, 初始相位

角为  $\pi/4$  和  $5\pi/4$ , 这些结果与原始设置都是一致的, 仿真结果充分证明了本文理论推导的正确性。

再讨论稀疏度  $K$  的设置问题及其对重构结果的影响。稀疏度  $K$  表示微多普勒谱图上某慢时间单元内所出现的较大峰值个数, 由于在整个微多普勒谱图的重构过程中假设稀疏度  $K$  取值保持不变, 因此, 可以取稀疏度  $K$  为微多普勒谱图上所有慢时间单元内所出现的较大峰值个数的最大值, 对应于本文的仿真实验, 即取稀疏度  $K = 5$ 。当稀疏度  $K$  取值较小时, 在重构结果中不免会丢失一些有用的微多普勒特征信息, 当稀疏度  $K$  取值较大时, 也会增加一些不必要的重构运算负担和多余的虚假信息。

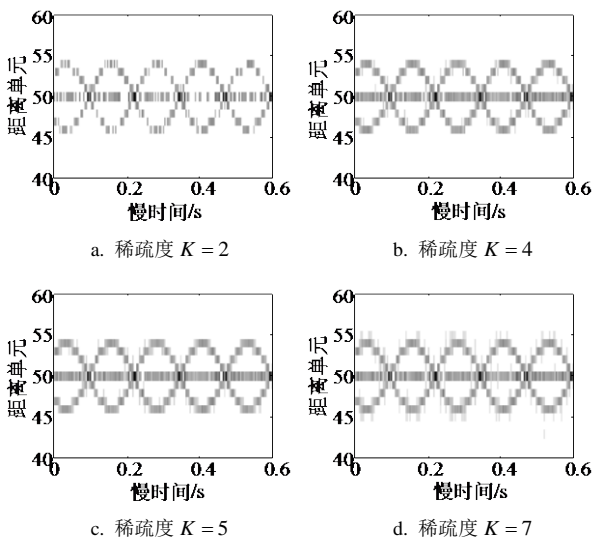


图8 降维率50%, 不同稀疏度取值时, CS方法重构出的谱图

下面给出仿真实验结果, 其中雷达和弹头参数均设置不变。图8a~图8d、图9a~图9d分别为降维率50%、25%时, 在稀疏度  $K = 2, 4, 5, 7$  条件下的重构结果。比较图8与图9可以看出, 当稀疏度  $K = 2$  时, 存在较为明显的微多普勒特征信息丢失, 这说明稀疏度  $K$  取值偏小; 当稀疏度  $K = 7$  时, 存在较多的虚假信息, 说明稀疏度  $K$  取值偏大。当稀疏度  $K = 4, 5$  时稀疏度  $K$  取值适中, 重构结果差别不大, 说明在微多普勒特征重构时, 并不要求稀疏度  $K$  很准确, 同时, 本文设计的稀疏度  $K = 5$  也是合理的。

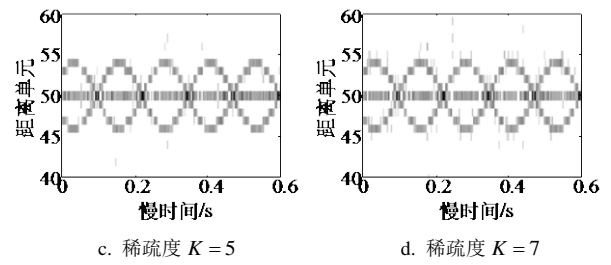
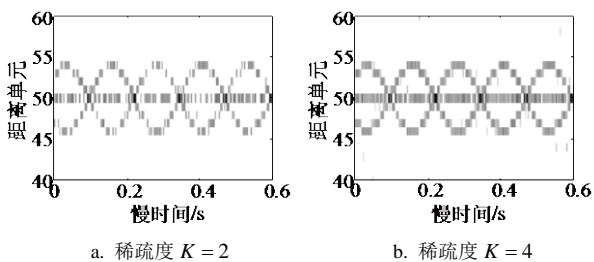


图9 降维率25%, 不同稀疏度取值时, CS方法重构出的谱图

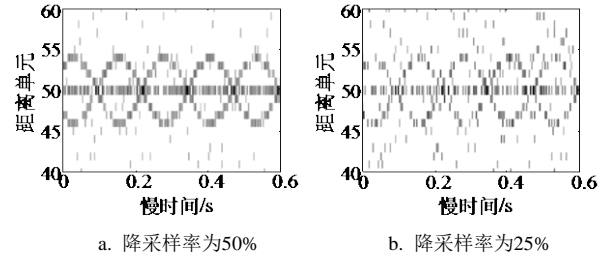


图10 信噪比为-5dB时, 利用本文方法获得的重构结果

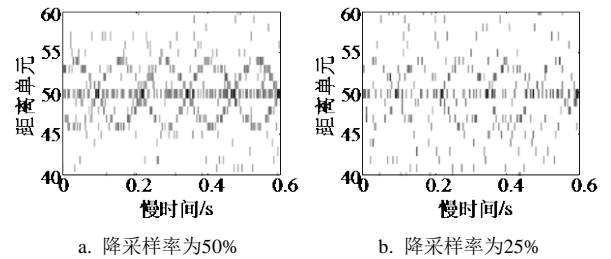


图11 信噪比为-8dB时, 利用本文方法获得的重构结果

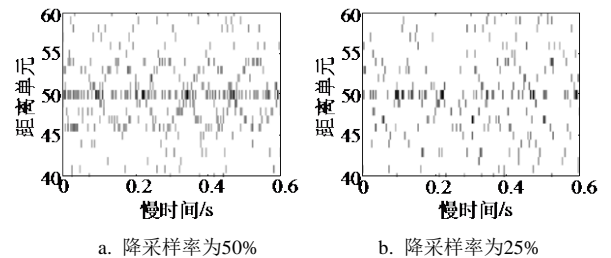


图12 信噪比为-10dB时, 利用本文方法获得的重构结果

再给出雷达回波信号在不同信噪比条件下的仿真结果。图10~图12分别是当信噪比为-5 dB、-8 dB和-10 dB时, 利用本文方法获得的重构结果。仿真实验中设置噪声背景为高斯白噪声背景, 稀疏度  $K = 5$ , 此外, 雷达和弹头参数均设置不变。

通过对图10~图12与图5、图6比较可以看出, 当存在一定的噪声时, 利用本文方法重构出的微多普勒谱图中会丢失一定的有用特征信息, 而且会增加一定的虚假信息, 随着信噪比的不断降低, 利用本文方法重构出的微多普勒谱图质量越来越差, 丢失的有用特征信息越来越多, 增加的虚假信息也越来越多。进一步可以看出, 在降采样率为50%条件下, 当信噪比降低为-8 dB时, 利用本文方法重构出的微多普勒谱图仍可用于进行微多普勒特征提取,

而当信噪比降低为-10 dB时, 重构出的微多普勒谱图才基本无法用于进行微多普勒特征提取; 在降采样率为25%条件下, 当信噪比降低为-5 dB时, 利用本文方法重构出的微多普勒谱图还可用于进行微多普勒特征提取, 而当信噪比降低为-8 dB时, 重构出的微多普勒谱图才难以用来进行微多普勒特征提取。因此, 本文方法具有一定的鲁棒性, 如果要利用本文方法获得有效的微多普勒谱图, 那么, 当降采样率为50%时, 雷达回波信号中的信噪比应当不低于-8 dB左右; 当降采样率为25%时, 雷达回波信号中的信噪比应该在-5 dB以上。

## 4 结论

本文首先通过严格的理论推导详细分析了OFD-LFM信号体制高分辨雷达谱图上的弹头自旋微多普勒特征曲线表现形式, 并得到相关结论: 弹头自旋微多普勒在谱图上的表现形式仍为正弦曲线, 且正弦曲线周期、幅度和初始相位角与弹头的自旋周期、自旋半径和自旋初始相位角相一致。进一步针对频谱稀疏OFD-LFM, 提出了一种基于CS理论的微多普勒谱图重构方法, 并具体给出了降维观测矩阵和稀疏变换矩阵的构造方法以及重构算法步骤。通过有翼弹头模型展开仿真实验验证了理论推导的正确性, 同时证明了本文方法的有效性。仿真结果还表明本文提出的弹头自旋微多普勒特征重构方法在不同稀疏度和不同信噪比下均具有一定的鲁棒性。

本文将CS理论与高分辨雷达微多普勒特征提取结合起来, 为解决稀疏信号条件下的微多普勒特征提取提供新的思路和方法, 同时为更有效的微多普勒特征参数提取奠定了重要基础。

## 参 考 文 献

- [1] CHEN V C, LI F Y, HOL S S. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Trans on AES*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 弹道导弹目标微动特性的微多普勒分析与仿真研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(3): 538-561.  
GAO Hong-wei, XIE Liang-gui, WEN Shu-liang, et al. Research on precession of ballistic missile warhead based on micro-Doppler analysis[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(3): 538-561.
- [3] 刘波, 韩春林, 苗江宏. MIMO雷达正交频分LFM信号设计及性能分析[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(1): 28-31.  
LIU Bo, HAN Chun-lin, MIAO Jiang-hong. OFD-LFM signal design and performance analysis for MIMO radar[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(1): 28-31.
- [4] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于OFDM的多载波调制雷达系统信号处理及检测[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(6): 1298-1300.  
GU Chen, ZHANG Jin-dong, ZHU Xiao-hua. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on OFDM[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1298-1300.
- [5] 杨明磊, 张守宏, 陈伯孝, 等. 多载频MIMO雷达的一种新的信号处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 147-151.  
YANG Ming-lei, ZHANG Shou-hong, CHEN Bai-xiao, et al. A novel signal processing approach for the multi-carrier MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 147-151.
- [6] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [7] HERMAN M A, STROHMER T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [8] GURBUZ A C, MCCLELLAN J H, SCOTT W R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7): 2640-2650.
- [9] 李军, 邢孟道, 张磊, 等. 一种高分辨的稀疏孔径ISAR成像方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(3): 441-446.  
LI Jun, XING Meng-dao, ZHANG Lei, et al. High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR [J]. *Journal of XIDIAN University*, 2010, 37(3): 441-446.
- [10] LUO Y, ZHANG Q, QIU C, et al. Micro-Doppler effect analysis and feature extraction in ISAR imaging with stepped-frequency chirp signals[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48(4): 2087-2098.
- [11] CANDÈS E, TAO T. Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [12] KUNIS S, RAUHUH T. Random sampling of sparse trigonometric polynomials II: Orthogonal matching pursuit versus basis pursuit[J]. *Foundations of Computational Mathematics*, 2007, 8(6): 737-763.

编辑 税红