

基于二维稀疏采样的HRRP合成及ISAR成像方法

朱 丰^{1,2}, 张 群¹, 段艳丽¹, 顾福飞¹, 李开明¹, 毕 博³

(1. 空军工程大学电讯工程学院 西安 710077; 2. 中国人民解放军93508部队 北京 丰台区 100075;

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】在分析传统的线性调频(LFM)信号体制ISAR高分辨距离像(HRRP)合成及二维成像原理的基础上,结合压缩感知理论,提出了一种基于二维稀疏采样的高分辨距离像合成及ISAR成像方法。该方法对经过二维稀疏采样后的ISAR回波信号进行二维重构处理,在大幅降低LFM信号采样率、减少子脉冲个数的前提下,获得高质量的HRRP和二维ISAR像;为缓解数字信号处理机的采样负担、降低己方雷达信号的被截获概率奠定了基础。仿真实验证明了该方法的有效性和可行性,同时观察了其鲁棒性。

关键词 压缩感知; 高分辨距离像; 逆合成孔径雷达; 目标二维像; 二维稀疏采样

中图分类号 TN957

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.06.006

HRRP Synthesizing and ISAR Imaging Method Based on Two Dimension Sparse Sampling

ZHU Feng^{1,2}, ZHANG Qun¹, DUAN Yan-Li¹, GU Fu-fei¹, LI Kai-ming¹, and BI Bo³

(1. Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University Xi'an 710077;

2. No 93508 Unit of Peoples's Liberation Army Feng tai Beijing 100075;

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

Abstract Sparse microwave imaging technique is very important in the field of the microwave imaging. On the basis of analysis of conventional high resolution range profile (HRRP) synthesizing and ISAR imaging theory with linear frequency modulation (LFM) signal, a new method of sparse processing based on Compressed Sensing (CS) is proposed in the paper. In the method, the high quality HRRP and ISAR image can be achieved by using the two dimension reconstruction with ISAR data after two dimension sparse sampling, on the condition of apparently reducing the sampling rate and pulse number. The sampling burden of digital signal processor and the captured probability of radar signal would be diminished by using the method. The feasibility and effectiveness of the method are verified and robustness of the method is examined via simulation results.

Key words compressed sensing; high resolution range profile; ISAR; two dimension image of target; two dimension sparse sampling

稀疏微波成像技术由于可突破传统微波成像理论与方法,有效减少微波成像中的数据量和降低成像系统复杂度,以较少的观测信息获得高质量的目标像,因此,它是微波成像的一个重要发展方向。

近年来,压缩感知(compressed sensing, CS)作为一种新的信号获取与压缩重构理论^[1-4],被引入到高分辨雷达成像领域中。正是由于CS理论具有许多独特的优势,因此该理论的引入可为更好地实现稀疏微波成像提供新的思路 and 手段。基于压缩感知理论的稀疏微波成像技术也已逐步成为许多学者广泛关注和研究的热点问题。

目前压缩感知理论在微波成像领域中已有了一定的初步应用,文献[5]提出利用压缩感知技术合成雷达高分辨,进一步提高了雷达的分辨率。文献[6]研究了对回波信号稀疏采样后进行匹配滤波的方法,证实了利用CS理论可恢复并合成距离像。文献[7]应用随机噪声信号构造了随机噪声压缩感知成像雷达,并重构出了高质量的目标一维距离像。文献[8]研究了在任意冗长频带的条件下,利用CS理论对稀疏子孔径进行拼接处理并成像。而在条带SAR成像中,可以利用CS理论对原始回波信号进行快速编码^[9]。在ISAR成像中,运用压缩感知技术可在保证

收稿日期: 2011-03-16; 修回日期: 2011-06-30

基金项目: 国家973项目(2010CB731905)

作者简介: 朱丰(1983-),男,博士生,主要从事雷达成像与信号处理方面的研究。

图像相对清晰的基础上,显著减少采样数据量,缩短采样时间^[10]。文献[11]研究了基于压缩感知的稀疏频率步进雷达成像方法,可在更少的子脉冲条件下,重构出很好的目标像,达到传统频率步进成像雷达的分辨率。国内也逐步展开了一些基于压缩感知的雷达成像研究的初步工作,文献[12]利用压缩感知技术对稀疏孔径的ISAR成像进行处理并成像,提高了成像分辨率,获得了高质量的目标像。文献[13]将压缩感知理论应用于探地雷达三维成像中,在提高成像性能的同时缩短了数据采集时间、以较少方位向数据量实现了目标的高分辨率成像。文献[14]研究了基于压缩感知理论的SAR成像中旁瓣抑制技术。文献[15]研究了基于压缩感知的二维高分辨雷达成像中的保相性问题。

本文针对基于压缩感知理论的稀疏微波成像技术展开了一定的研究工作,将压缩感知理论引入到线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号ISAR成像稀疏化处理技术中,通过构造随机部分单位阵作为观测矩阵,构造离散傅里叶变换作为矩阵稀疏变换矩阵,提出了一种基于二维稀疏采样的高分辨距离像(high resolution range profile, HRRP)合成及ISAR成像方法。该方法利用压缩感知理论对经过二维稀疏采样后的ISAR回波信号进行二维重构处理,以合成目标的HRRP实现二维ISAR成像,这样可在大幅减少距离向和方位向采样的前提下,有效重构出高质量的HRRP和二维ISAR像,为大幅减少观测数据、降低己方雷达信号被敌方截获概率奠定了重要基础。

1 LFM信号体制ISAR高分辨距离成像及成像原理

假设雷达和目标之间的几何关系如图1所示,图中, Q 为目标的一个散射点, P 为参考点,其初始坐标为 $(R_0(0), 0)$,目标沿平行与 Y 轴方向运动,速度为 v ,成像时间为 T 。

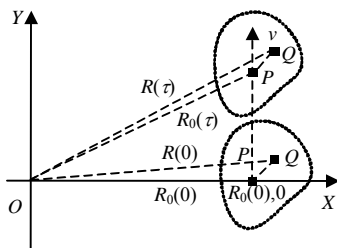


图1 雷达和目标之间的几何关系图

雷达发射的LFM信号可写为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

式中, f_c 为载频; T_p 为脉冲宽度; μ 为调频率。

当雷达收到散射点 Q 的回波信号后,首先应在数字信号处理器中按照奈奎斯特采样定律的要求完成数字化采样,然后才能进行后续的数字化处理。对于快时间采样,假设 t_n 在 $[0, T_{\text{ref}}]$ 区间内采样数为 N' , $n' = 1, 2, \dots, N'$;对于慢时间采样,假设 $\tau_{n'}$ 在 $[0, T]$ 区间内采样数为 N'' , $n'' = 1, 2, \dots, N''$ 。因此,回波信号和参考信号可以分别写为:

$$s_{\text{return}}(t_{n'}, \tau_{n'}) = \sigma \text{rect}\left(\frac{t_{n'} - 2R(\tau_{n'})/c}{T_p}\right) \times \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t_{n'} - \frac{2R(\tau_{n'})}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t_{n'} - \frac{2R(\tau_{n'})}{c}\right)^2\right)\right) \quad (2)$$

$$s_r(t_{n'}, \tau_{n'}) = \text{rect}\left(\frac{t_{n'} - 2R_0(\tau_{n'})/c}{T_{\text{ref}}}\right) \times \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t_{n'} - \frac{2R_0(\tau_{n'})}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t_{n'} - \frac{2R_0(\tau_{n'})}{c}\right)^2\right)\right) \quad (3)$$

通过拉伸处理及快时间离散傅里叶变换等处理,有^[16]:

$$S'_c(f_{n'}, \tau_{n'}) = \sigma T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f_{n'} + \frac{2\mu}{c}R_\Delta(\tau_{n'})\right)\right) \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c R_\Delta(\tau_{n'})\right) \quad (4)$$

对式(5)取模即可得到HRRP,再通过慢时间离散傅里叶变换,得:

$$S(f_{n'}, \xi_{n'}) = \sigma T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f_{n'} + \frac{2\mu}{c}R_\Delta(0)\right)\right) \times \text{sinc}\left(\xi_{n'} + \frac{2vf_c}{cR_0(0)}R_\Delta(0)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}R_\Delta(0)\right) \quad (5)$$

通过对 $|S(f_{n'}, \xi_{n'})|$ 的峰值位置进行简单换算,即可得到目标的ISAR像。

2 基于二维稀疏采样的HRRP合成及ISAR成像方法

2.1 压缩感知理论

对于一个有限长的一维信号 $x \in \mathbf{R}^N$,假设其在某规范正交基 $\Psi = \{\psi_l\}$ 上是 K 稀疏的($K \ll N$),或称稀疏度为 K ,即:

$$\mathbf{x} = \sum_{l=0}^{N-1} \theta_l \boldsymbol{\psi}_l = \sum_{l'=0}^{K-1} \theta_{l'} \boldsymbol{\psi}_{l'} \quad (6)$$

式中, θ_l 为投影系数。上式可以写为矩阵形式:

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

式中, $\boldsymbol{\theta}$ 为 $N \times 1$ 维的列向量, 有 K 个不为零的元素; $\boldsymbol{\Psi}$ 称为稀疏变换矩阵。

压缩感知理论指出^[1-4], 当信号 \mathbf{x} 稀疏或在某组正交基或紧框架 $\boldsymbol{\Psi}$ 上稀疏时, 可用一个与 $\boldsymbol{\Psi}$ 不相关的 $M \times N$ 维观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ ($K < M < N$) 对 \mathbf{x} 进行线性变换, 得到观测集合 \mathbf{y} , 即:

$$\mathbf{y}^{M \times 1} = \boldsymbol{\Phi}^{M \times N} \mathbf{x}^{N \times 1} = \boldsymbol{\Phi}^{M \times N} \boldsymbol{\Psi}^{N \times N} \boldsymbol{\theta}^{N \times 1} \quad (8)$$

显然, 观测集合 \mathbf{y} 的元素个数远小于 \mathbf{x} 的元素个数, 从而实现对信号的压缩采样。定义降采样率为 $\eta = M/N$ 。观测集合 \mathbf{y} 重构信号 \mathbf{x} , 可将其转化为 l_1 范数下的最优化问题:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \min \|\boldsymbol{\theta}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\theta} \quad (9)$$

为保证 \mathbf{x} 可被高概率重构, $\boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi}$ 必须满足有限等距性质(restricted isometry property, RIP)^[17]。

l_0 最小范数下最优化问题可用正交匹配追踪法(orthogonal matching pursuit, OMP)求解^[3]。

OMP算法能否精确重构原始信号与 $\boldsymbol{\Phi}$ 的维度 M 密切相关, M 越大, 重构精度越高。对于由部分傅里叶变换基构成的矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$, 文献[18]指出当满足如下公式时, OMP算法可以保证高概率重构原始信号:

$$M \geq zK \ln N \quad (10)$$

式中, z 为某大于1的常数, 仿真实验结果表明, 当 z 取值为1~10时, 可保证信号的精确重构。

2.2 基于稀疏采样的HRRP合成方法

由式(5)可知, 若目标上散射点在径向距离上 K 稀疏(通常ISAR目标均近似满足该条件^[11]), 则 $S_c(f_{n'}, \tau_{n'})$ 在频域上 K 稀疏, 利用该稀疏条件可进一步构造观测矩阵和稀疏矩阵, 并利用降维观测后的结果直接重构 $S_c(f_{n'}, \tau_{n'})$, 以大幅减少采样率。

首先, 对原始回波信号进行随机稀疏采样, 采样数为 M' , (M' 小于奈奎斯特采样数 N'), 有:

$$s'_{\text{return}}(t_{m'}) = \sigma \text{rect} \left(\frac{t_{m'} - 2R_{0r}/c}{T_p} \right) \times \exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t_{m'} - \frac{2R_{0r}}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(t_{m'} - \frac{2R_{0r}}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (11)$$

式中, $m' = 1, 2, \dots, M'$; $t_{m'}$ 为 $[0, T_p]$ 中随机升序采样; $t_1 = 0$, $t_{M'} = T_{\text{ref}}$ 。参考信号按同样方式采样, 有:

$$s'_{rr}(t_{m'}) = \text{rect} \left(\frac{t_{m'} - 2R_{0r}/c}{T_{\text{ref}}} \right) \times$$

$$\exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t_{m'} - \frac{2R_{0r}}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(t_{m'} - \frac{2R_{0r}}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (12)$$

经拉伸处理后, 并以参考点时间为基准, 得到:

$$s_{cr}(t'_{m'}) = \sigma \text{rect} \left(\frac{t'_{m'} - 2R_{\Delta r}/c}{T_p} \right) \times$$

$$\exp \left(j \left(-\frac{4\pi}{c} \mu R_{\Delta r} t'_{m'} - \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta r} + \frac{4\pi \mu}{c^2} R_{\Delta r}^2 \right) \right) \quad (13)$$

式中, $t'_{m'} = t_{m'} - 2R_{0r}/c$; $R_{\Delta r} = R_r - R_{0r}$ 。

对应于压缩感知理论, 令 $\mathbf{y}_\tau = s_{cr}(t'_{m'})$, \mathbf{x} 为原始的对 $s_c(t', \tau)$ 每列利用奈奎斯特采样定律采样后得到的结果, 即 $\mathbf{x}_\tau = s_{cr}(t'_{n'})$, 可得 $\mathbf{y}_\tau = \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{x}_\tau$, 构造一个随机部分单位阵为观测矩阵, 如图2所示。

$\boldsymbol{\Phi}_{M' \times N'}$ 为一个部分单位阵, 即:

$$\{\phi_{m', n'}\} = \begin{cases} 1 & \{\phi_{m', n'}, n' | t'_{m'} = t'_{n'}\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\phi_{1,1} = \phi_{M', N'} = 1$ 。

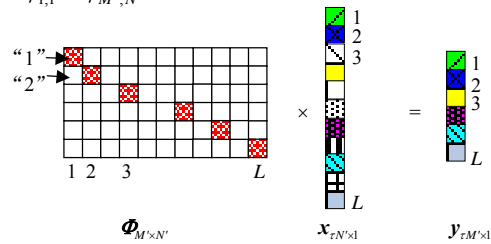


图2 观测过程示意图

从图2中可以看出, 通过利用本文构造的随机部分单位阵进行观测后, 观测结果的采样率比原始信号明显降低。

在此基础上, 由于对原始回波信号拉伸处理后的结果做快时间的离散傅里叶变换, 即可获得HRRP。因此, 本文构造稀疏变换矩阵为离散傅里叶变换阵, 该变换阵与文献[14]所构造的类似, 满足正交特性。

$$\boldsymbol{\Psi}_{N'} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_{N'} & W_{N'}^2 & \dots & W_{N'}^{N'-1} \\ 1 & W_{N'}^2 & W_{N'}^4 & \dots & W_{N'}^{2(N'-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_{N'}^{N'-1} & W_{N'}^{2(N'-1)} & \dots & W_{N'}^{(N'-1)^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$W_{N'} = \exp \left(-j \frac{2\pi}{N'} \right)$$

文献[19]指出对部分傅里叶变换矩阵进行随机抽取, 抽取获得的矩阵满足RIP性质。本文构造的观

测矩阵 Φ 为一个随机部分单位阵, 构造的稀疏变换矩阵 Ψ 为一个离散傅里叶变换矩阵, 它们的乘积 $\Phi\Psi$ 相当于对部分傅里叶变换矩阵进行随机抽取, 因此, 满足RIP性质。

依照式(10)构造如下最优化问题, 并利用OMP算法来求解:

$$\hat{\theta}_\tau = \arg \min \|\theta_\tau\|, \quad \text{s.t.} \quad y_\tau = \Phi\Psi\theta_\tau \quad (16)$$

其中, 目标函数 $\hat{\theta}_\tau$ 直接即为所求的HRRP, 即:

$$\hat{\theta}(f_n, \tau) = \sigma T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_n + \frac{2\mu}{c} R_\Delta \right) \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi f_c v R_\Delta(0)}{c R_0(0)} \tau \right) \exp \left(-j \frac{4\pi f_c}{c} R_\Delta(0) \right) \quad (17)$$

通过利用OMP算法求解式(17)所示的最优化问题即可实现基于稀疏采样的HRRP合成。

2.3 基于二维稀疏采样的ISAR成像方法

在获得目标的HRRP像的基础上, 进行慢时间 τ_n 离散傅里叶变换, 即可得到目标的二维ISAR像。

由式(6)可知, 若散射点分布在方位向上 K 稀疏 (通常ISAR目标均近似满足该条件^[11], 则 $S(f_n, \xi_n)$ 在多普勒域(方位向上进行傅立叶变换后所在的域)上 K 稀疏, 利用该稀疏性可进一步构造观测矩阵和稀疏矩阵, 并利用降维观测后的结果直接重构 $S(f_n, \xi_n)$, 以大幅减少慢时间采样率。

在对原始回波模拟信号快时间方向上的 $[0, T_{\text{ref}}]$ 区间内以采样数为 M' 进行随机稀疏采样的基础上, 对慢时间方向上的 $[0, T]$ 区间内同样进行随机稀疏采样, 采样数为 M'' , (M'' 应小于原始采样数 N'), 这样, 原始回波信号和参考信号又可以分别重写为:

$$s_{\text{return}}(t_{m'}, \tau_{m'}) = \sigma \text{rect} \left(\frac{t_{m'} - 2R(\tau_{m'})/c}{T_p} \right) \times \exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t_{m'} - \frac{2R(\tau_{m'})}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(t_{m'} - \frac{2R(\tau_{m'})}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (18)$$

$$s_r(t_{m'}, \tau_{m'}) = \text{rect} \left(\frac{t_{m'} - 2R_0(\tau_{m'})/c}{T_{\text{ref}}} \right) \times \exp \left(j2\pi \left(f_c \left(t_{m'} - \frac{2R_0(\tau_{m'})}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left(t_{m'} - \frac{2R_0(\tau_{m'})}{c} \right)^2 \right) \right) \quad (19)$$

式中, $t_{m'}$ 为 $[0, T_p]$ 中随机升序采样; $t_1 = 0$, $t_{M'} = T_{\text{ref}}$; $\tau_{m'}$ 为 $[0, T]$ 中随机升序采样; $\tau_1 = 0$; $\tau_{M'} = T$ 。利用2.2节中的基于压缩感知的HRRP合成方法, 可获得目标的HRRP, 有:

$$S_c''(f_n, \tau_{m'}) = \sigma T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_n + \frac{2\mu}{c} R_\Delta(\tau_{m'}) \right) \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi f_c v R_\Delta(0)}{c R_0(0)} \tau_{m'} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi f_c}{c} R_\Delta(0) \right) \quad (20)$$

对应于压缩感知理论, 令 $y_{f_n} = S_{f_n}''(\tau_{m'})$, \mathbf{x}_{f_n} 为 $S_c''(f_n, \tau_{m'})$ 每行的离散采样结果, 即 $\mathbf{x}_{f_n} = S_{f_n}'(\tau_{m'})$, 可以得到 $y_{f_n} = \Phi' \cdot \mathbf{x}_{f_n}$, 按照2.2节中的方法, 同样构造一个随机部分单位阵 $\Phi_{M'' \times N''} = \{\phi_{m'', n''}\}$, 即:

$$\{\phi_{m'', n''}\} = \begin{cases} 1 & \{\phi_{m'', n''}, n'' | \tau_{m''} = \tau_{n''}\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\phi_{1,1} = \phi_{M'', N''} = 1$ 。

在此基础上, 由于对各个HRRP所排列而成的矩阵做慢时间的离散傅里叶变换, 即可获得目标高分辨二维ISAR像, 因此, 本文仍然按照式(16)构造满足正交特性的离散傅立叶变换阵 Ψ' 为稀疏变换矩阵。同样, Φ' 与 Ψ' 的乘积 $\Phi'\Psi'$ 仍满足RIP性质。

依照式(10)构造如下最优化问题:

$$\hat{\theta}'_{f_n} = \arg \min \|\theta'_{f_n}\|_0 \quad \text{s.t.} \quad y_{f_n} = \Phi'\Psi'\theta'_{f_n} \quad (22)$$

其中目标函数 $\hat{\theta}'_{f_n}$ 为一个距离单元上的横向像。将所求的各个距离单元上横向像排列在一起, 即为目标的二维ISAR像, 为:

$$\hat{\theta}'(f_n, \xi_{n'}) = \sigma T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_n + \frac{2\mu}{c} R_\Delta(\tau_{n'}) \right) \right) \times \text{sinc} \left(\xi_{n'} + \frac{2v f_c}{c R_0(0)} R_\Delta(0) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi f_c}{c} R_\Delta(0) \right) \quad (23)$$

通过利用OMP算法求解式(23)所示的最优化问题即可实现基于二维稀疏采样的ISAR成像。

综合2.2和2.3节论述, 基于二维稀疏采样的HRRP合成及ISAR成像方法具体流程可如图3所示。

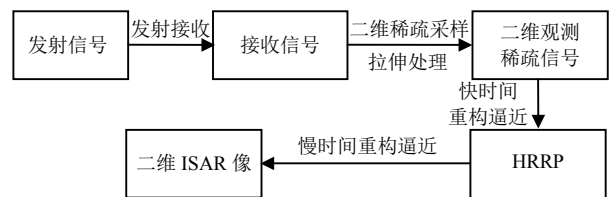


图3 基于二维稀疏采样的HRRP合成及ISAR成像流程图

3 计算机仿真实验

假设LFM信号体制雷达发射信号载频为10 GHz, LFM信号子脉冲宽度为 10^{-6} s, 调频斜率为 3×10^{14} , 带宽 $B = 300$ MHz, 获得距离分辨率为 $\Delta_R = 0.5$ m, 依照奈奎斯特定律, 雷达所收到的回波信号在快时间方向上需要采样336个点, 即 $N' = 336$ 。假设飞机目标模型如图4a所示。雷达发射LFM信号脉冲的重复

频率 $PRF = 1\ 000\ \text{Hz}$; 目标距雷达的距离为 $10\ \text{km}$, 目标运动速度为 $300\ \text{m/s}$, 成像时间为 $1\ \text{s}$, 横向分辨率 $\Delta_r = 0.5\ \text{m}$, 可计算出雷达所收到的回波信号在慢时间方向上需要采样 $1\ 000$ 个点, 即 $N'' = 1\ 000$ 。利用传统 LFM 信号体制 ISAR 成像处理方法对收到的全采样回波信号(如图 4b 所示)进行处理, 可获得目标的 HRRP 和二维 ISAR 像如图 4c 和图 4d 所示。

设快时间方向上的稀疏度 $K = 15$, 则 $zK \ln(N') = 104.71$, z 取值为 1.2 ; 设慢时间方向上的稀疏度 $K = 4$, $zK \ln(N'') = 138.155\ 0$, z 取值为 5 。当对雷达所收到的回波信号在快时间方向上随机采样 128 个点, $M' = 128$, 降采样率 $\eta' = M'/N' = 38.10\%$; 在慢时间方向上随机采样 256 个点, $M'' = 256$, 降采样率 $\eta'' = M''/N'' = 25.60\%$, 即满足式(11)时, 利用本文的稀疏成像方法所获得的结果如图 5 所示。当对雷达所收到的回波信号在快时间方向上随机采样 64 个点, $M' = 64$, 在慢时间方向上随机采样 64 个点, $M'' = 64$, 即不满足式(11)时, 利用本文的稀疏成像方法获得的结果如图 6 所示。通过图 5、图 6 与图 4 相比可以看出, 当非相关观测值满足式(11)时, 利用本文的稀疏成像方法获得的飞机目标 HRRP 和二维 ISAR 像与利用传统处理方法获得的结果虽然有一点偏差, 但其结果并不影响用来对飞机目标进行识别。当非相关观测值都不满足式(11)时, 利用本文的稀疏成像方法获得飞机目标的 HRRP 和二维 ISAR 像都与利用传统处理方法获得的结果偏差很大, 其结果无法用来对飞机目标进行识别。这些仿真结果不仅证明了式(11)的正确性, 而且也证明了本文方法的有效性, 综合快时间和慢时间两个方向上的降采样率, 利用本文的二维稀疏成像方法可将 ISAR 数据降为原始的约 10% 以上。

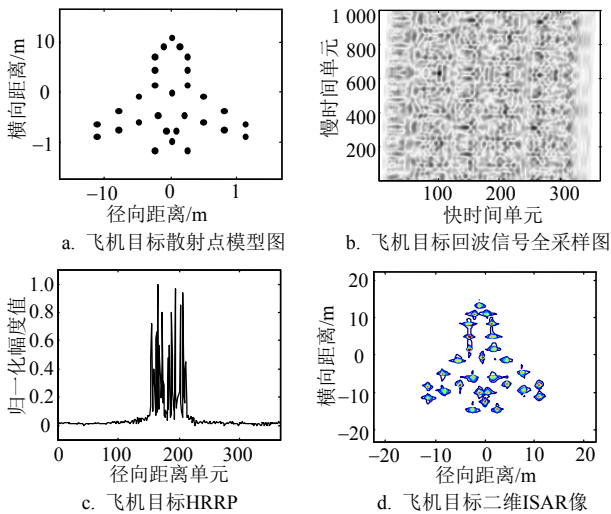


图4 全采样($N'=336, N''=1000$)时利用传统方法获得结果)

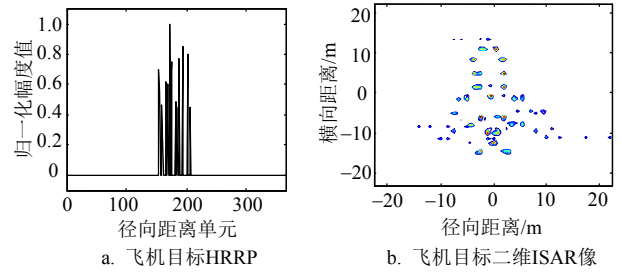


图5 二维稀疏采样($M'=128, M''=256$)时利用本文方法获得结果)

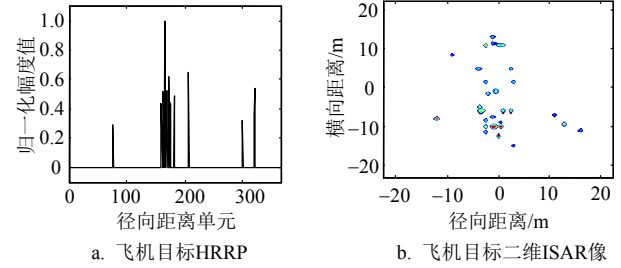


图6 二维稀疏采样($M'=64, M''=64$)时利用本文方法获得结果)

下面讨论雷达回波的不同信噪比对本文方法的影响。图 7a 和图 7b 分别是在雷达回波信噪比(SNR)为 $-3\ \text{dB}$ 和 $-5\ \text{dB}$ 时, 利用本文稀疏成像方法对雷达所收到的回波信号在快时间方向上随机采样 128 个点, 即 $M' = 128$, 在慢时间方向上随机采样 256 个点, 即 $M'' = 256$ (即满足式(11))的情况重构出的高分辨距离像和二维 ISAR 像。通过图 7 与图 5b 相比可以看出, 随着信噪比的不断降低, 利用本文方法重构出二维 ISAR 像的质量越来越差。当 $SNR = -3\ \text{dB}$ 时, 其结果还算满意, 可用来对飞机目标进行识别。当信噪比降到 $-5\ \text{dB}$ 时, 其结果中存在着更多的误差, 但也是很差。因此, 本文的稀疏成像方法具有一定的鲁棒性, 而且, 为了利用本文所提方法准确地重构出 HRRP 和二维 ISAR 像, 雷达回波信号的信噪比应保持在 $-3\ \text{dB}$ 到 $-5\ \text{dB}$ 以上。

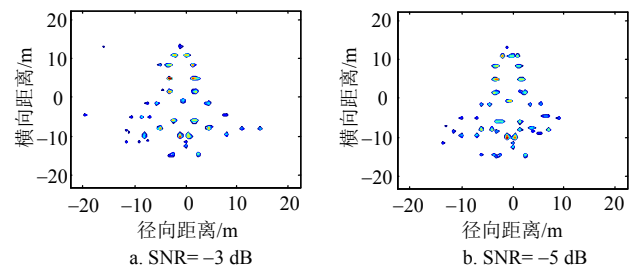


图7 不同SNR($M'=128, M''=256$)时, 本文方法获得结果

5 结论

本文针对稀疏微波成像技术展开研究, 结合信号的稀疏化与压缩感知理论, 提出了一种基于二维稀疏采样的 LFM 信号体制雷达 HRRP 合成和 ISAR 成像方法。文中构造了随机部分单位阵为观测矩阵,

建立了离散傅里叶变换矩阵为稀疏变换矩阵, 并利用OMP算法求解基于 l_0 范数的最优化问题, 在大幅减少快时间采样数和LFM子脉冲个数、有效缓解数字信号处理机的采样负担、降低己方雷达信号被敌方截获概率的前提下, 完成了HRRP的有效合成和实现了准确的ISAR成像。仿真实验表明利用本文的二维稀疏成像方法可将ISAR数据降为原始的约10%以上, 且具有一定的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] CANDÈS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [3] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
SHI Guang-ming, LIU Dan-hua, GAO Da-hua, et al. Advances in theory and application of compressed sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [4] VARSHNEY K R, CETIN M, FISHER J W, et al. Sparse representation in structured dictionaries with application to synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2008, 56(8): 3548-3561.
- [5] HERMAN M A, STROHMER T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [6] TELLO A M, LOPEZ-DEKKER P, MALLORQUI J J. A novel strategy for radar imaging based on Compressive Sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4285-4295
- [7] BARANIUK R, STEEGHS P. Compressive radar imaging[C] //IEEE Radar Conference. Waltham, Massachusetts: IEEE, 2007.
- [8] CETIN M, MOSES R L. SAR imaging from partial-aperture data with frequency-band omissions[J]. Proceedings of SPIE, 2005(5808): 32-43.
- [9] BHATTACHARYA S, BLUMENSATH T, MULGREW B, et al. Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing [C]//IEEE Workshop on Statistical Signal Processing. Madison, USA: IEEE, 2007: 448-452.
- [10] YOON Y S, AMIN M G. Compressed sensing technique for high-resolution radar imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6968(1A): 1-10.
- [11] 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.
- [12] ZHANG L, XING M D, QIU C W, et al. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3824-3838.
- [13] 余慧敏, 方广有. 压缩感知理论在探地雷达三维成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 12-16.
YU Hui-min, FANG Guang-you. Research on compressive sensing based 3D imaging method applied to ground penetrating radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 12-16.
- [14] 寇波, 江海, 刘磊, 等. 基于压缩感知的SAR抑制旁瓣技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3022-3026.
KOU Bo, JIANG Hai, LIU Lei, et al. Study of SAR side-lobe suppression based on Compressed Sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 3022-3026.
- [15] 谢晓春, 张云华. 基于压缩感知的二维雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1234-1238.
XIE Xiao-chun, ZHANG Yun-hua. 2D radar imaging scheme based on compressive sensing technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1234-1238.
- [16] ZHANG Qun, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [17] BARANIUK R. A lecture on compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [18] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Inform. Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [19] TAO E C T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies?[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.

编辑 税红