

基于压缩感知的脉间捷变频 SAR 成像研究

刘天鹏, 刘 振, 魏玺章

(国防科技大学空间电子信息技术研究所, 湖南长沙 410073)

摘 要: 捷变频技术应用到合成孔径雷达系统中会存在多普勒调频率捷变、方位向无法压缩等问题. 在分析捷变频 SAR 回波相位特性的基础上, 本文研究了传统的相关法在方位压缩中的应用; 针对相关法效率低、旁瓣高等固有缺陷, 考虑到回波信号的稀疏性, 提出了基于压缩感知的方位压缩算法, 并形成了一种距离压缩采用匹配滤波、方位压缩采用压缩感知的捷变频 SAR 二维成像方案. 仿真实验表明, 该方案能克服多普勒调频率捷变等问题, 实现捷变频 SAR 二维成像, 并具有低旁瓣、高分辨等优点.

关键词: SAR; 载频捷变; 方位压缩; 压缩感知

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1073-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.001

Research on Interpulse Frequency Agility SAR Imaging via Compressed Sensing

LIU Tian-peng, LIU Zhen, WEI Xi-zhang

(Research Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: When carrier frequency agility is applied to SAR system, there could be some problems, such as Doppler chirp rate agility, focus-out in azimuth, etc. After we analyzed the phase characteristic of radar echo, correlation algorithm was applied to pulse compression in azimuth firstly. Considering the connatural problems of low efficiency and high side lobe level that correlation algorithm had, pulse compression algorithm based on compressed sensing was presented, which made use of the sparsity of echo signals. Then, a strategy about frequency agility SAR imaging was proposed which involves pulse compression in range based on matching filter and pulse compression in azimuth based on compressed sensing. The results indicate that imaging strategy can both conquer Doppler chirp rate agility and achieve frequency agility SAR imaging, which has the merit of lower side lobe level and higher resolution.

Key words: SAR; carrier frequency agility; pulse compression in azimuth; compressed sensing

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为高分辨成像雷达, 由于不受气候和昼夜影响, 在军事侦察方面具有广泛应用. 但在现代复杂电磁环境下, SAR 在军事侦察过程中常会受到电子干扰, 使 SAR 无法成像或分不清真假目标. 目前, 针对 SAR 的假目标欺骗干扰方法已成为研究热点^[1]. 假目标欺骗干扰需要完全侦收到雷达信号的工作参数之后再实施干扰, 雷达采用捷变频技术可有效防止敌方对载频等参数进行正确侦收, 有利于提高雷达抗干扰能力.

捷变频雷达也是一种脉冲体制雷达, 仅其发射的相邻脉冲的载频在一定的范围内快速变化^[2]. 捷变频技术应用到对回波信号做相干处理的 SAR 成像系统中具有一定的难度, 国内外鲜有学者研究基于捷变频技术的 SAR 抗干扰方法. 文献[3,4]指出为了保证信号的相干性, 要求 SAR 在工作的全过程, 载频必须十分稳定. 文献[5]指出载频的随机偏移会带来多普勒的变化, 导致方位向无法聚焦. 因此, 捷变频技术应用到 SAR 系统中的主要障碍是如何解决方位向无法压缩的难题. 传统的 SAR 成像算法已趋于成熟, 如距离多普勒(RD)算法^[6]、线频调变标算法^[3]等等, 这些方法都是通过方位向的相干积

累得到高的多普勒分辨率. 载频捷变破坏了回波信号的相干性, 上述传统的成像算法已难以实现方位压缩.

本文旨在解决捷变频 SAR 的方位压缩问题及其成像方法. 注意到文献[7]中 S. Axelsson 将相关算法应用到随机步进频雷达和随机调频连续波雷达中, 并用实验数据验证相关算法能够实现脉冲压缩, 本文尝试采用这种朴素的非参数化方法实现方位压缩. 然而相关算法成像具有高旁瓣、低效率的固有缺陷, 使其难以实用化. 由 Donoho, Candès, Romberg 和 Tao 等人提出的压缩感知理论^[8~11] (Compressed Sensing, CS) 是在稀疏表示^[12]基础上发展的一套理论完备的参数化方法, 突破了传统奈奎斯特采样定理的限制, 利用信号稀疏性实现信号的获取和重构. CS 理论已经在雷达成像^[13,14]、脉冲压缩^[15]、图像处理^[16]等领域得到了广泛研究. 文献[17]提出了一种基于 CS 的稀疏孔径雷达成像方法, 利用方位向稀疏孔径数据恢复目标信号, 实现方位向聚焦, 并将其应用到多舰船高分辨 SAR 成像中. 文献[18]提出了一种基于 CS 理论的距离压缩策略, 同样适用于距离压缩后的方位聚焦, 而且大大降低了旁瓣的幅度. 正是由于基于 CS 理论的成像或脉压方法具有高分辨、低旁瓣以及低采样率的优点, R. Baraniuk^[13]等人设计了基于 CS 理论的新型雷达系统, 采用 CS 方法替代传统的匹配滤波以实现脉冲压缩. 可见, CS 方法已逐渐成为一种全新的成像和脉压方法.

考虑到回波信号的稀疏性, 以及载频的脉间捷变恰好满足 CS 理论对观测矩阵受限等距特性的要求, 本文提出了基于压缩感知的方位压缩算法, 能够替代失效的匹配滤波法, 实现捷变频 SAR 的方位压缩.

2 捷变频 SAR 回波信号分析

2.1 载频捷变线性调频信号

SAR 发射脉间载频捷变线性调频 (FA-LFM) 信号, 设第 m 个脉冲时刻 mT 发射脉冲的载频为 f_m , 线性调频信号的调频斜率为 K_r , 脉冲宽度为 T_p , 脉冲重复周期为 T , 则第 m 个脉冲的信号形式为:

$$s(\hat{t}) = \text{rect}(\hat{t}/T_p) \exp[j2\pi f_m(\hat{t} + mT)] \exp(j\pi K_r \hat{t}^2) \quad (1)$$

其中 \hat{t} 是快时间, 用来计量电波传播的时间; $t_m = mT$ 为慢时间, 用来计量发射脉冲时刻.

不同时刻的脉冲载频是不同的, 且在一定的 Δf 范

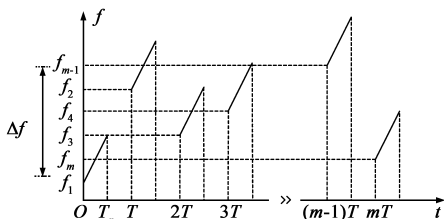


图1 FA-LFM信号时频域示意图

围内随机变化, 如图 1 所示. 与固定载频脉冲相比, FA-LFM 信号相当于对信号在频域上进行随机采样, 为应用压缩感知理论提供了有利条件.

假设 SAR 工作模式是机载条带正侧视, 观测场景有多个散射点. SAR 以“一步一停”的方式发射和接收 FA-LFM 脉冲信号, 散射点在 mT 时刻到雷达的距离为 R_m , 则第 m 个回波与信号 $\exp[j2\pi f_m(\hat{t} + mT)]$ 混频得到基带信号 $s_0(\hat{t})$:

$$s_0(\hat{t}) = \text{rect}[(\hat{t} - \tau)/T_p] \exp(-j2\pi f_m \tau) \cdot \exp[j\pi K_r (\hat{t} - \tau)^2] \quad (2)$$

其中 $\tau = 2R_m/c$, f_m 在发射第 m 个脉冲时存储下来用于混频和参考信号的生成.

由于 SAR 的一维距离像与相位 $\exp(-j2\pi f_m \tau)$ 无关, 可以采用解线频调处理或匹配滤波实现距离脉压, 本文采用后者. 取条带中心线为参考线, 对应的参考斜距为 R_0 , 则参考信号为:

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}) = \text{rect}[(\hat{t} - 2R_0/c)/T_p] \exp[j\pi K_r (\hat{t} - 2R_0/c)^2] \quad (3)$$

匹配滤波后的结果为:

$$G_r(\hat{t}, t_m) = T_p \text{sinc}\{B[\hat{t} - 2(R_m - R_0)/c]\} \cdot \exp(-j4\pi f_m R_m/c) \quad (4)$$

其中 $B = K_r T_p$ 为 FA-LFM 信号的带宽, $\text{sinc}(a) = \frac{\sin(\pi a)}{\pi a}$. 由于 $2(R_m - R_0)/c$ 的存在, 使得目标一维距离像发生越距离单元走动 (RCM), 其距离弯曲量为 $\frac{(vt_m)^2}{2R_0} = \frac{x^2}{2R_0}$. 当 $R_0 \gg x$ 时, RCM 可忽略. 在 RCM 不可忽略的情况下, 可采用 Keystone 变换实现 RCM 校正问题. 本文暂不考虑 RCM 校正问题, 认为距离向和方位向可分开处理.

2.2 距离压缩后信号相位分析

距离压缩后, 回波信号相位只有 $\exp(-j4\pi f_m R_m/c)$, 其中 mT 时刻散射点到雷达之间的距离 R_m 可近似表示为:

$$R_m = \sqrt{R_0^2 + (vt_m)^2} \approx R_0 + \frac{(vt_m)^2}{2R_0} \quad (5)$$

其中 v 是载机速度, 设为常数. 因此, 相位 $\exp(-j4\pi f_m R_m/c)$ 可变换成:

$$\exp\left(\frac{-j4\pi f_m R_m}{c}\right) = \exp\left(\frac{-4\pi f_m R_0}{c} - \frac{2\pi v^2 f_m}{cR_0} t_m^2\right) \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 载频的随机捷变使得相位已不再是慢时间 t_m 的二次函数, 进而改变了回波频率 $f(t_m)$ $= \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt_m} = -\frac{2v^2 f_m}{cR_0} t_m$ 与慢时间 t_m 线性关系, 如图 2 所示.

因此,方位向上调频斜率 $K_a = -\frac{2v^2 f_m}{cR_0}$ 随着载频 f_m

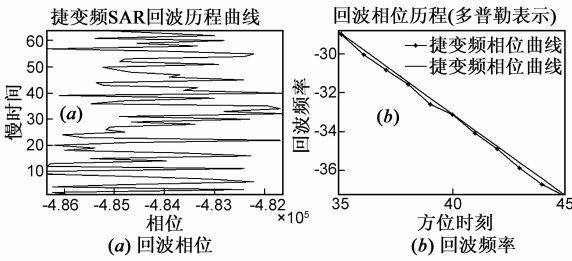


图2 捷变频SAR距离压缩后

3 方位压缩的信号模型

随机步进频雷达和随机调频连续波雷达中,传统的相关算法可以实现脉冲压缩^[7]. 同样,在慢时间域内,相关算法也适用于捷变频 SAR 方位压缩. 其原理是:当距离脉压后,回波信号在距离向上的位置已经确定,此时只需在每一距离单元进行方位向上的相关查找. 此时,若采用匹配滤波器代替相关器实现方位压缩,则需要数目与方位点数相当的匹配滤波器组来实现,这与传统 RD 算法中用一个匹配滤波器实现方位压缩有较大区别,因此相关法或匹配滤波器组无疑增加了系统的复杂度. 文中的匹配滤波法单指用一个匹配滤波器实现脉冲压缩的方法.

设散射点方位坐标为 X_0 , 将回波包络位移量忽略,则根据式(4)距离压缩后的信号 G_r 可重新表示为:

$$G_r(\hat{t}, t_m) = T_p \text{sinc}(B\hat{t}) \cdot \exp[-j4\pi f_m \sqrt{R_0^2 + (mTv - X_0)^2} / c] \quad (7)$$

其中 $x_m = mTv$ 为载机在方位向上的位移.

用不同方位时刻 mT , 不同参考位置 X_k 生成参考函数 $g_{\text{ref}}(k, m)$:

$$g_{\text{ref}}(k, m) = \exp[j4\pi f_m \sqrt{R_0^2 + (mTv - X_k)^2} / c] \quad (8)$$

则相关算法的方位压缩信号模型为:

$$G_a(\hat{t}, k) = \sum_{m=1}^M G_r(\hat{t}, m) \cdot g_{\text{ref}}(k, m) = T_p \text{sinc}(B\hat{t}) \sum_{m=1}^M \exp\left\{ \frac{j4\pi f_m}{c} [\sqrt{R_0^2 + (mTv - X_k)^2} - \sqrt{R_0^2 + (mTv - X_0)^2}] \right\} \quad (9)$$

其中 M 是方位点数. 此时,散射点位置的判定条件是:

$$k = \text{argmax} |G_a(\hat{t}, k)| \quad (10)$$

即判定 X_k 处存在散射点. 可见,这种朴素的相关算法能够实现捷变频条件下的方位压缩.

由式(9)知,对于某一距离单元 $t = \hat{t}$, 方位压缩信

变化而变化,方位向上信号不能近似为 LFM 信号,难以用传统的匹配滤波等相干处理方法实现方位压缩.

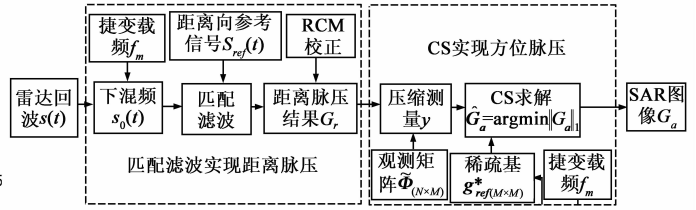


图3 捷变频SAR的二维成像方案的信号处理流程

号 $G_a(M \times 1)$ 的第 k 个元素是表征距离压缩信号 $G_r(M \times 1)$ 与参考位置为 X_k 的参考信号 $g_{\text{ref}}(M \times 1)$ 的相关性大小的值. 从另外一个角度考虑, $G_a(M \times 1)$ 的元素 $G_a(i)$ 可认为是 $G_r(M \times 1)$ 在基 $\{g_{\text{ref}}^*(M \times 1)(1), \dots, g_{\text{ref}}^*(M \times 1)(k), \dots, g_{\text{ref}}^*(M \times 1)(M)\}$ 下的坐标, 即

$$G_r = G_a(1)g_{\text{ref}}^*(1) + \dots + G_a(k)g_{\text{ref}}^*(k) + G_a(M)g_{\text{ref}}^*(M) \quad (11)$$

其中 \cdot^* 为取共轭运算. 用矩阵形式表示为:

$$G_r(M \times 1) = g_{\text{ref}}^*(M \times M) G_a(M \times 1) \quad (12)$$

式(12)可作为方位压缩的信号模型. 场景中散射点数目有限,使得距离脉压信号 $G_r(M \times 1)$ 是稀疏的,矩阵 $G_a(M \times 1)$ 中仅有有限个较大值,因此可根据上述方位压缩模型,利用压缩感知理论进行求解.

4 基于压缩感知的方位压缩算法

4.1 压缩感知理论

由 Donoho, Candès, Romberg 和 Tao 等人提出的压缩感知理论是一种充分利用信号稀疏性或可压缩性的全新信号获取和重构理论^[8-11]. 对于稀疏或可压缩信号,通过低于甚至远低于 Nyquist 标准对其采样,就可足够精确地恢复出原始信号.

设信号 $x \in C^M$ 在某组基 $\Psi_{M \times M}$ 上是稀疏的,即可表示为 $x = \Psi\alpha$, 其中 $\alpha \in C^M$ 为 x 在 Ψ 上的系数,仅有 $K \ll M$ 个非零值. 然后利用测量矩阵 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T$ 把 x 投影到低维空间上,得到 $N(N < M)$ 个测量值 $y_n = (x, \phi_n^T)$ ($n = 1, 2, \dots, N$), 写成矩阵形式为:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \alpha = A \alpha \quad (13)$$

式中 $A = \Phi \Psi$, Φ 是 $N \times M$ 的测量矩阵. 从数学角度看,每个测量值是传统理论下所有样本信号的组合函数,均包含了所有样本信号的少量信息.

CS 理论表明,当矩阵 A 满足受限等距特性 (Restricted Isometry Property, RIP) 准则或不相干条件^[19]时,可通过求解式(13)的逆问题得到系数 α , 进而恢复信号 x . 信号重构即是求解如下具有松弛约束的 1 范数最小化问题:

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin} \|\alpha\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\alpha\|_2 \leq \epsilon \quad (14)$$

其中 ϵ 限定了数据中的噪声量. 对于复数情形, 该问题等价于二阶锥规划 (SOCP) 问题. 目前此类问题的求解算法很多, 比如 OGA (Orthogonal Greedy Algorithm) 算法、BPDN (Basis Pursuit Denoising) 算法、OMP (Orthogonal Matching Pursuit) 算法以及 LASSO 方法^[20]等.

因此, 应用压缩感知理论对稀疏信号处理时, 需要提供三个要素: 稀疏基、测量矩阵和信号重构算法, 其中测量矩阵 Φ 的选取应使得 \mathbf{A} 满足 RIP 条件. Baraniuk^[21]指出对信号稀疏基的非相干域进行随机采样, 当满足条件 $N \geq O(K \log^4 M)$ 时, 可以在大概率上满足 RIP 性质.

4.2 基于压缩感知的方位压缩算法

通过分析, 方位压缩信号模型, 即公式(12), 恰为稀疏信号 $\mathbf{G}_r(M \times 1)$ 在基 $\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 上稀疏表示, 其中 $\mathbf{G}_a(M \times 1)$ 仅有 K 个较大值. 因此, 提供稀疏基、非相干测量矩阵以及重构算法, 即可实现基于压缩感知的方位压缩.

从式(12)看出, $M \times M$ 维矩阵 $\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 可作为稀疏基的一种实现, 其中元素为 $g_{\text{ref}}^*(k, m)$, 其中 $g_{\text{ref}}(k, m) = \exp[j4\pi f_m \sqrt{R_0^2 + (mTv - X_k)^2}/c]$ 为不同方位时刻 mT , 不同参考位置 X_k 生成参考函数. 令 $R_{m,k} = \sqrt{R_0^2 + (mTv - X_k)^2}$, 则稀疏基 $\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 表示为:

$$\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M) = \begin{bmatrix} e^{-j4\pi f_1 R_{1,1}/c} & e^{-j4\pi f_1 R_{1,2}/c} & \dots & e^{-j4\pi f_1 R_{1,M}/c} \\ e^{-j4\pi f_2 R_{2,1}/c} & e^{-j4\pi f_2 R_{2,2}/c} & \dots & e^{-j4\pi f_2 R_{2,M}/c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-j4\pi f_M R_{M,1}/c} & e^{-j4\pi f_M R_{M,2}/c} & \dots & e^{-j4\pi f_M R_{M,M}/c} \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (15)$$

另外, 需要构造非相干测量矩阵 $\tilde{\Phi}_{(N \times M)}$, 将 $\mathbf{G}_r(M \times 1)$ 降到低维空间上. 载频的捷变使稀疏基 $\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 的行向量是非相干的, 因此取 $\Phi = \mathbf{I}_{(M \times M)}$ 为 $M \times M$ 维的单位矩阵, 则 $\mathbf{A} = \Phi \mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M) = \mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 满足非相干性. 为实现降维处理, $\tilde{\Phi}_{(N \times M)}$ 为选取 $\Phi = \mathbf{I}_{(M \times M)}$ 中 N 个行向量组成的矩阵, 即 $\tilde{\Phi} = \mathbf{J}\Phi = \mathbf{J}_{(N \times M)}$, 其中 \mathbf{J} 是只包含元素 0 和 1 的 $N \times M$ 维的降维矩阵. 选取方法可以是连续选取或随机选取, 分别实现短相干处理间隔成像和随机少量观测视角成像.

因此, 当测量矩阵 $\tilde{\Phi}_{(N \times M)}$ 对行向量进行随机采样

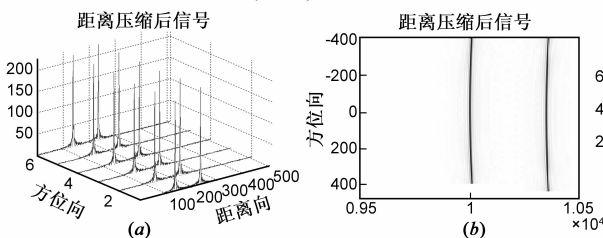


图4 匹配滤波法实现捷变频SAR距离脉压

时, 根据 Baraniuk 等人的结论^[21], 只要满足条件 $N \geq O(K \log^4 M)$, 矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}_{(N \times M)} = \tilde{\Phi}_{(N \times M)} \mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M)$ 可以在大概率上满足 RIP 性质.

此时, 方位压缩可等效为压缩感知模型:

$$\mathbf{y} = \mathbf{J}_{(N \times M)} \mathbf{G}_r(M \times 1) = \mathbf{J}_{(N \times M)} \mathbf{g}_{\text{ref}}^*(M \times M) \mathbf{G}_a(M \times 1) = \tilde{\mathbf{A}}_{(N \times M)} \mathbf{G}_a(M \times 1) \quad (16)$$

对于某一距离单元 $t = \hat{t}$, 根据压缩感知模型, 通过求解下述 1 范数最小化问题得到该距离单元方位压缩结果 $\mathbf{G}_a(M \times 1)$:

$$\hat{\mathbf{G}}_a = \operatorname{argmin} \|\mathbf{G}_a\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{y} - \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{G}_a\|_2 \leq \epsilon \quad (17)$$

求解该问题可选用 OGA、LASSO 等算法. 遍历所有距离单元 L , 即可得到全场景的方位压缩结果 $\mathbf{G}_a(M \times L)$.

至此, 本文已针对捷变频 SAR 提出一种成像方案: 距离向采用匹配滤波法实现脉压, 方位向采用 CS 法实现脉压的二维成像方案. 其信号处理流程如图 3 所示.

值得提醒的是, 由于信号形式为复信号, 因此在求解(17)中 1 范数最小化问题之前, 需要作如下处理^[15]:

$$\tilde{\mathbf{A}}' = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\tilde{\mathbf{A}}) & -\operatorname{Im}(\tilde{\mathbf{A}}) \\ \operatorname{Im}(\tilde{\mathbf{A}}) & \operatorname{Re}(\tilde{\mathbf{A}}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}'_a = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\mathbf{G}_a) \\ \operatorname{Im}(\mathbf{G}_a) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}' = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\mathbf{y}) \\ \operatorname{Im}(\mathbf{y}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

5 仿真实验

为验证本文提出的捷变频 SAR 二维成像方案, 设计如下仿真实验. 其参数设置如下: 设发射信号脉冲宽度为 $T_r = 5\mu\text{s}$, 中心频率为 1GHz, 信号带宽为 30MHz. 捷变载频的变化范围一般不会超过中心频率的 10% ~ 20%, 相邻脉冲的子载频的临界频差要远大于脉宽的倒数 0.2MHz, 取到带宽的 10%, 设相邻载频差在 1MHz ~ 10MHz 内随机变化; 目标区域在 $[0, 50; 9500, 10500]$ 范围内, 设两个点目标位置为 $[0, 10000; 40, 10350]$. 雷达平台速度为 $v = 100\text{m/s}$, 高度 $H = 5000\text{m}$, 雷达天线孔径为 4m.

5.1 距离压缩

由于距离压缩不受载频捷变的影响, 用匹配滤波法得到一维距离像, 如图 4 所示.

从图 4(a)中可以清晰看出两个点一维距离像, 符合 sinc 函数形状; 图 4(b)中距离像略有弯曲, 会对散射时域相关法方位压缩结果

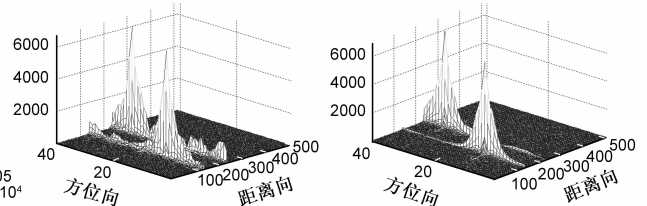


图5 相关法实现方位压缩

基于RD算法的SAR成像

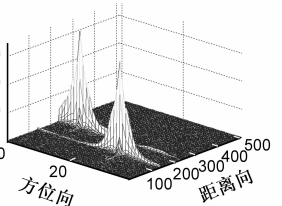


图6 RD算法的二维像

点位置造成误差,但本文不考虑 RCM 校正。

5.2 方位压缩

5.2.1 相关算法

相关法可以实现脉冲压缩,如图 5 所示。作为比较,图 6 给出了常规 SAR 的传统 RD 算法成像结果。

可见,相关算法同样适用于捷变频 SAR 的方位压缩问题。但从成像质量,相关法的旁瓣较高,二维积分旁瓣比为 -8.81dB ,弱目标会被临近的强目标掩盖。从时间效率上看,相关算法大约需要 2.7s ,而 RD 算法仅用 0.06s 。

5.2.2 压缩感知算法

设方位向上采样点数为 64,则稀疏信号 $\mathbf{G}_{r(M \times 1)}$ 为

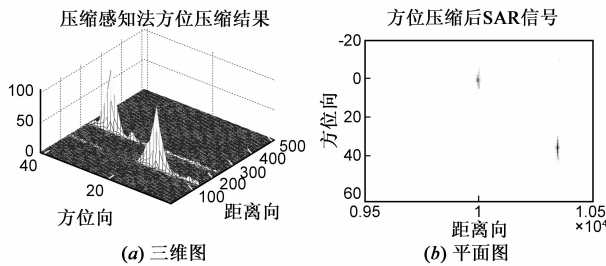


图7 采用64个连续脉冲的CS成像

可见,对降维的观测数据仍可以实现方位压缩,但 32 个随机脉冲的成像效果比连续脉冲的效果差。经分析,认为是由于稀疏基中已包含随机成分,再在此基础上随机选取脉冲,在一定程度上会影响成像质量。为比较相关算法、CS 法在方位压缩上的成像效果,用峰值旁瓣比、积分旁瓣比来定量比较,如表 1 所示。

表 1 不同算法的方位压缩效果比较

算法	相关算法	CS 算法(64 连续脉冲)	CS 算法(32 连续脉冲)	CS 算法(32 随机脉冲)
峰值旁瓣比(dB)	-10.44	-13.72	-12.81	-11.45
积分旁瓣比(dB)	-8.81	-27.83	-22.89	-12.70

可见,CS 算法的二维像旁瓣电平比相关法低,其中 64 个连续脉冲 CS 算法的成像质量最好。因此,当脉冲个数 N 满足 RIP 条件时,压缩感知能够稳健地实现稀疏孔径下的捷变频 SAR 的方位压缩,且具有低旁瓣、高分辨的优点。

6 结束语

基于压缩感知的方位压缩算法能够解决捷变频 SAR 方位压缩问题,因此可考虑将捷变频技术应用到 SAR 系统中,达到最初抗有源欺骗干扰的目的。本文针对脉间捷变频 SAR 存在多普勒调频率捷变、方位向无法压缩等问题,考虑到回波信号的稀疏性,提出了一种距离压缩采用匹配滤波法、方位压缩采用 CS 方法的捷变频 SAR 二维成像方案,并用仿真实验证明了 CS 方法

64×1 维的矩阵。根据公式(15)构造 64×64 维的稀疏基 $\mathbf{g}_{\text{ref}}^*(64 \times 64)$ 。当测量矩阵取为 $\Phi = \mathbf{I}_{(64 \times 64)}$ 时,即在全孔径条件下使用 LASSO 方法解决 1 范数最小化问题,得到的是 64 个连续脉冲的 CS 二维像,如图 7 所示。

设置降维矩阵 $\mathbf{J}_{N \times 64}$,其中 N 应满足 $N \geq O(K \log^4 M)$ 条件。经分析, $M = 64$ 时, N 应至少大于 $3K$,此处 $K = 2$ 。本文降维处理时取 $N = 32$,此时为稀疏孔径条件下的 CS 成像。设置 $\mathbf{J}_{32 \times 64} = \mathbf{I}_{32 \times 64}$,则矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}_{(32 \times 64)} = \mathbf{g}_{\text{ref}}^*(32 \times 64)$,此时成像结果为 32 个连续脉冲的 CS 成像结果,如图 8(a)所示。当随机选取矩阵 $\mathbf{I}_{(64 \times 64)}$ 中的 32 行向量组成 $\mathbf{J}_{32 \times 64}$,此时成像结果为 32 个随机脉冲的 CS 成像结果,如图 8(b)所示。

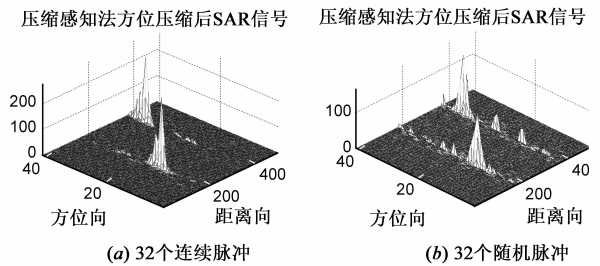


图8 采用32个脉冲的CS成像

可实现捷变频 SAR 的方位压缩。下一步考虑能否确定方位分辨率,以及设置一定信噪比的条件下,CS 方法成像效果如何还需进一步研究。

参考文献

- [1] 王盛利,于立,倪晋麟,张光义.合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[J].电子学报,2003,31(12):1900-1902. Wang Sheng-li, Yu Li, Ni Jin-lin, Zhang Guang-yi. A study on the active deception jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1900-1902. (in Chinese)
- [2] 茅于海.频率捷变雷达[M].北京:国防工业出版社,1981. 1-6.
- [3] 保铮,刑孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.75-120.
- [4] Richard G Wiley.电子情报(ELINT)—雷达信号截获与分析[M].吕跃广,译.北京:电子工业出版社,2008.14-15.
- [5] 赵宗峰.基于信号波形设计的 SAR 抗干扰技术研究[D].长沙:国防科技大学研究生院,2007.12-15.
- [6] 皮亦鸣,杨建宇.合成孔径雷达成像原理[M].成都:电子科技大学出版社,2007.22-30,54-57.
- [7] S Axelsson. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments comparison with experiments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(4): 890-904.
- [8] E Candès, J Romberg, T Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency in-

- formation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2):489 – 509.
- [9] E Candès, T Tao. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12):5406 – 5425.
- [10] D Donoho. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289 – 1306.
- [11] E Candès, M Wakin. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):21 – 30.
- [12] A Bruckstein, D Donoho, M Elad. From sparse solutions of systems of equations to sparse modeling of signals and images [J]. SIAM REVIEW, 2009, 51(1):34 – 81.
- [13] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging[A]. Proc 2007 IEEE Radar Conf[C]. Boston, MA, 2007. 128 – 133.
- [14] Herman M, Strohmer T. High-resolution radar via compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6):2275 – 2284.
- [15] Ender J H G. On compressive sensing applied to radar[J]. Signal Processing, 2010, 90(5):1402 – 1414.
- [16] Valiollahzadeh S, Firouzi H, Babaie-Zadeh M, et al. Image denoising using sparse representations[A]. Proc of 8th International Conference, ICA2009[C]. Paraty, Brazil, 2009. 557 – 564.
- [17] Li J, Xing M D, Wu S J. Application of compressed sensing in sparse aperture imaging of radar[A]. Proc of 2nd Asian-Pacific Conf on Synthetic Aperture Radar, APSAR'09[C]. Xian, China, 2009. 1119 – 1122.
- [18] M Tello, P Lopez-Dekker, J Mallorqui. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12):4285 – 4295.
- [19] E Candès. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2008, 346(9-10):589 – 592.
- [20] D Donoho, M Elad, V Temlyakov. Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(1):6 – 18.
- [21] R Baraniuk, M Davenport, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. Constructive Approximation, 2008, 28(3):253 – 263.

作者简介



刘天鹏(通讯作者) 男, 1985年2月出生
于吉林梅河口. 2010年12月毕业于国防科技大学
信息与通信工程专业获硕士学位. 现为国防科
技大学信息与通信工程专业博士研究生. 主要研
究方向为雷达信号处理、压缩感知、雷达对抗.

E-mail: everliutianpeng@yahoo.com.cn



刘 振 男, 1983年7月出生于江苏泰兴.
2008年12月毕业于国防科技大学信息与通信工
程专业获硕士学位. 现为国防科技大学信息与
通信工程专业博士研究生. 主要研究方向为雷达波
形设计、雷达信号处理、压缩感知.

E-mail: zhen_liu@nudt.edu.cn