

# 一种 ISAR 二维压缩感知成像的运动补偿方法

俞 翔, 朱岱寅

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 通过发射一组具有随机脉冲重复间隔(PRI)的线性调频信号,并对经过去斜率(Deramp)处理的回波信号随机下采样,可以得到目标的二维随机观测回波数据.本文通过分析该类回波信号的模型和信号的稀疏性,针对 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)二维压缩感知成像技术提出了一种运动补偿算法.实测数据处理结果表明,本文提出的算法可以有效地针对 ISAR 二维随机观测回波数据实现运动补偿.

**关键词:** ISAR; 二维压缩感知; 运动补偿; 距离对准; 相位补偿

**中图分类号:** TN957.52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2012)09-1783-07

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

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.013

## A Motion Compensation Algorithm for 2-Dimensional Compressed ISAR Imaging

YU Xiang, ZHU Dai-yin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Transmitting a group of chirp signal with random PRI(Pulse Repetition Interval) and down-sampling echoes after deramp processing, we get the 2-dimensional sparse echoes of the target and process the 2-dimensional sparse echoes with compressed sensing method. We utilize this method to improve the efficiency of the ISAR imaging system and also decrease the data rate of the system. A new motion compensation algorithm is put forward through the analysis on the signal model. The new algorithm includes range alignment and phase compensation procedures. The minimizing the entropy of the average range profile method is implemented in the range alignment procedure, while the eigenvector method is used to accomplish phase correction procedure. The presented results show that this algorithm can realize motion compensation according to the 2-dimensional sparse echoes effectively.

**Key words:** ISAR; 2-dimensional compressed sensing; motion compensation; range alignment; phase compensation

### 1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)能够利用回波对非合作目标进行高分辨成像.对于传统的距离多普勒成像算法来说,图像的距离向分辨率取决于发射信号的带宽,而方向向分辨率与孔径时间内目标沿雷达视线方向的转角有关.因此要想获得高分辨率的图像,传统的 ISAR 成像技术需要连续采样观测数据,这导致在一个时间段内只能对一个目标进行观测.

压缩感知(CS, Compressed Sensing)理论指出稀疏信号可以通过少量的观测样本高概率地重构.由于 ISAR 图像具有稀疏的特性,近年来基于 CS 理论的 ISAR 高分辨成像应用逐渐成为研究的热点<sup>[1~10]</sup>.文献[1]提出了一种基于 CS 的低信噪比下 ISAR 高分辨成像算法,有效

克服了强噪声与杂波;也有文献[2]提出基于 CS 稀疏探测频率的 ISAR 成像算法,该算法以发射稀疏频率信号取代了传统大带宽线性调频信号,使得进一步降低雷达发射信号带宽、数据率和存储容量成为可能;文献[3]提出了一种具有保相性的 CS 距离向压缩算法,使得二维 CS 成像算法具有了可行性.本文讨论的目标二维随机观测回波数据可以通过发射一组具有随机脉冲重复间隔(PRI)的线性调频信号,并对经过去斜率(deramp)处理的回波信号随机下采样获得.而现有文献鲜有讨论关于 ISAR 二维随机观测数据的运动补偿问题,运动补偿仍然依赖于对完整回波数据的处理,因此不能从根本上降低数据采样率.

而对目标回波二维随机观测获得的数据进行压缩感知成像更具实际意义,不但可以降低系统的数据率而

且可以同时多个目标观测<sup>[11]</sup>提高了探测效率,但如何对这种观测数据运动补偿是必须要解决的问题.与传统回波数据不同,由于回波数据是随机观测获得的,因此回波之间具有不同的 PRI.对于经典的距离对准算法<sup>[12~14]</sup>来说,回波之间的相关性较弱不利于回波的精确定距对准.对于相位补偿算法来说,随机 PRI 使得从杂波中分离信号变得困难,而低信杂比(SCR)将会影响相位误差估计的精度.

针对该问题本文提出一种运动补偿算法,该算法由全局最小熵距离对准算法<sup>[15]</sup>和特征向量相位补偿算法(EMMLE)<sup>[16]</sup>组成.实测数据的处理结果表明,对于二维随机观测回波数据,该算法是一种有效的运动补偿算法.

## 2 一种基于二维压缩感知的 ISAR 成像方法

现有的 ISAR 成像算法都是基于转台成像原理,假设雷达发射的是线性调频(LFM)信号,对目标回波信号进行去斜率(deramp)处理可得:

$$s(\tau, t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \cdot \exp\{-j\Phi(\tau, t)\} \quad (1)$$

其中,

$$\Phi(\tau, t) = \frac{4\pi k}{c} \left(\frac{f_c}{k} + \tau\right) R(t) - \frac{4\pi k}{c^2} R(t)^2 \quad (2)$$

其中为  $A$  后向散射系数,  $c$  为光速,  $\tau$  和  $t$  分别表示距离向快时间和方位向慢时间,  $T_a$  为孔径时间,  $f_c$  为载频,  $k$  为调频斜率,  $R(t)$  为目标上某散射点到雷达的瞬时距离.去斜率处理后信号的相位即式(2)包括两部分:一次项分别为多普勒频率项(与  $f_c$  有关的项)和距离频率项(与  $\tau$  有关的项);二次项为残余视频相位(RVP).当目标场景不大时 RVP 可以忽略,对一次项分别做距离向和方位向傅氏变换即可实现目标横向和纵向的高分辨.一般来说,ISAR 目标图像在距离向和方位向频域都是稀疏的,回波信号的信息冗余量较大,因此可以考虑利用压缩感知技术获取目标的二维 ISAR 图像.

下面首先简述一下压缩感知基本理论,假设复信号  $s \in C^N$ , 存在一个基空间  $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$ , 使得  $s$  可以表示为  $s = \Phi\theta$ ,  $\theta$  为稀疏向量.设观测到的信号为  $r$ ,  $r = As$ , 其中  $A \in C^{M \times N}$  ( $M < N$ ) 为测量矩阵,字典(dictionary)  $\Psi = A\Phi$  必须满足 RIP(Restricted Isometry Property)准则.若采用高斯测量矩阵,当满足

$$M \approx 2K \ln N \quad (3)$$

条件<sup>[17]</sup>时,可以依 99% 的概率重构信号,其中  $K$  为稀疏度.通过求解凸优化问题可获得  $K$  个最大系数:

$$\min(\|\theta'\|_1), \text{ s.t. } \Psi\theta' = r \quad (4)$$

其中  $\theta'$  为稀疏向量估值.

为了采用压缩感知理论,必须建立合适的稀疏基.众所周知,ISAR 图像中目标部分仅在频域中占很小的一部分,因此傅里叶基是较为理想的基空间.本文提出的二维压缩感知 ISAR 成像算法将采用部分傅里叶基作为基矩阵.设回波采样数据为  $N \times M$  的复矩阵,其中距离向  $N$  点,方位向  $M$  点.首先分别构造距离向和方位向基矩阵:

设距离向基矩阵为  $\alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}_{N \times N}$ , 其中

$$a_n = \exp(-j2\pi \cdot (n' \cdot \Delta f_r - \frac{f_s}{2}) \cdot n \cdot \Delta t_r), \quad 0 \leq n' \leq N \quad (5)$$

为列向量,式(5)中  $f_s$  为距离向采样频率,距离向频率间隔  $\Delta f_r = \frac{f_s}{N}$ , 时域采样间隔  $\Delta t_r = \frac{1}{f_s}$ .

设方位向基矩阵为  $\beta = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}_{M \times M}$ , 其中

$$b_m = \exp(-j2\pi \cdot (m' \cdot \Delta f_a - \frac{\text{PRF}}{2}) \cdot m \cdot \Delta t_a), \quad 0 \leq m' \leq M \quad (6)$$

为列向量,式(6)中 PRF 为脉冲重复频率,方位向频率间隔  $\Delta f_a = \frac{\text{PRF}}{M}$ , 脉冲重复间隔  $\Delta t_a = \frac{1}{\text{PRF}}$ .距离向测量矩阵  $A_r$  是从  $N \times N$  维单位矩阵随机抽取  $I$  行构成的  $I \times N$  维矩阵,以同样方法构造的方位向测量矩阵  $A_a$  是  $J \times M$  维矩阵.因此距离向和方位向的观测向量可以表示为

$$r_r = A_r \alpha \theta_r \quad (7)$$

$$r_a = A_a \beta \theta_a \quad (8)$$

式中  $\theta_r$  和  $\theta_a$  分别为距离向和方位向的稀疏向量.

## 3 ISAR 随机 PRI 回波信号的运动补偿

与恒定 PRI 回波信号不同,随机 PRI 回波信号之间的相关性没有前者强而且回波的相位历程也不完整,给运动补偿带来了困难.针对这种信号特征本文提出了一种运动补偿算法,该算法分为距离对准和相位补偿两部分,分别在 3.1 和 3.2 节详细介绍.

### 3.1 距离对准

距离对准是相位补偿和成像的基础,现有的经典距离对准方法主要可以分为距离像互相关对准和全局对准两类.前者典型的算法有:相邻包络互相关法<sup>[12]</sup>、时域和频域积累互相关法<sup>[13]</sup>、包络最大修正峰度法<sup>[14]</sup>等.这类算法较依赖于距离像之间的相关性,而且容易受到积累误差的影响.而全局对准类算法一般是以某种全局准则作为对准依据,通过迭代的方法使某个性指标达到最优,例如全局最小熵算法<sup>[15]</sup>、全局对准算法<sup>[18]</sup>等.这类算法对距离像之间的相关度不敏感,而且可以较好地抑制突跳和漂移误差,尤其对随机 PRI 的

ISAR 回波信号该类方法具有更好的鲁棒性。

文献[15]是一种新近提出的全局类算法,该算法不依赖于信号模型而且算法迭代过程中使用了高效的搜索估值方法从而避免了局部极值问题.因此该算法适用于随机 PRI 的 ISAR 回波信号.下面简单回顾一下全局最小熵算法.

全局最小熵算法<sup>[15]</sup>以平均距离像(ARP, Average Range Profile)熵值作为距离对准的依据,ARP 定义为所有脉冲的和包络:

$$p_{\text{ave}}(r, \Delta_r) = \sum_{n=0}^{N-1} p(r + \Delta_r(n), n) \quad (9)$$

其中  $p(r, n)$  表示脉压后的脉冲包络,  $r$  表示沿雷达视线方向目标到雷达的距离,  $n$  为脉冲数,  $\Delta_r(n)$  是脉冲包络的偏移量.

那么 ARP 的熵值可以定义为:

$$E(\Delta_r) = - \int_r \frac{p_{\text{ave}}(r)}{S} \cdot \ln \frac{p_{\text{ave}}(r)}{S} dr \quad (10)$$

其中  $S = \int_r p_{\text{ave}}(r) dr$ .

为了获得  $E(\Delta_r)$  的极值对式(10)求导可得:

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta_r(n)} = 0, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

令  $\tilde{p}_{\text{ave}}(r) = \ln p_{\text{ave}}(r)$ , 则有

$$\int_{f_r} j2\pi f_r \mathbf{P}(f_r, n) \tilde{\mathbf{P}}_{\text{ave}}^*(f_r) \cdot e^{j2\pi f_r \Delta_r(n)} df_r = 0 \quad (12)$$

其中  $\mathbf{P}(f_r, n)$  和  $\tilde{\mathbf{P}}_{\text{ave}}(f_r)$  分别为对应于  $p(r, n)$  和  $\ln p_{\text{ave}}(r)$  的距离向傅氏变换.对式(12)进一步分析发现,  $\mathbf{P}(f_r, n)$  与  $\tilde{\mathbf{P}}_{\text{ave}}(f_r)$  频域乘积即为两者在时域的卷积,只有该卷积影响最终的估值:

$$\left. \frac{\partial [\mathbf{P}(f_r, n) \otimes \tilde{\mathbf{P}}_{\text{ave}}(-r)]}{\partial r} \right|_{r=\Delta_r(n)} = 0, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

由上式可知,通过迭代求解  $\tilde{p}_{\text{ave}}(r)$  与  $p(r, n)$  相关峰位置可获得相应的  $\Delta_r(n)$ , 所有脉冲相应移位后更新 ARP, 使得 ARP 的熵逐渐逼近全局最小值.式(13)中的

卷积操作可以利用 FFT 所以效率较高,而上述相关函数特性并非平滑曲线,原文通过搜索的方法获取最大相关峰值及其对应的位置以避免落入局部极值.下面给出该算法的流程图.

### 3.2 相位补偿

距离像对准之后需要相位补偿以消除相位误差,经典的相位补偿算法可分为参数和非参数两种方法.在处理 ISAR 数据时由于目标的非合作运动,前者较少运用,而后者中 PGA 和 ROPE 算法较为常用,具有较好的补偿效果.

在 PGA 算法中为了提高信号 SCR 运用了“移位”和“加窗”的方法.“移位”即在方位向频域将每个距离门的最强散射点移位到多普勒零点;“加窗”即以多普勒零点为中心对方位向加上一定宽度的窗以隔离其他较弱散射点的干扰.如果省略“加窗”操作,PGA 算法会损失一定的性能,不能准确地估计出相位误差.

ROPE 算法是一种依赖于信号模型的相位补偿算法.该模型假设一个距离门最多有一个强散射点,即要求该点的回波强度明显大于门内其他散射点.虽然算法本身不依赖“加窗”操作提高 SCR,但是对于实际信号的 SCR 要求是比较高的.如果实际信号 SCR 较低或与假定的模型相差较大时,采用 ROPE 算法将出现严重的估计误差.

而对于随机 PRI 的 ISAR 回波信号,考虑其方位向频域,目标所在距离门内,信号旁瓣强度与主瓣相当,并且较强的旁瓣与主瓣混叠占据了整个方位向频域支撑区,如果在这种情况下对方位向频域做“加窗”操作,信号主瓣携带的相位误差信息会因为“加窗”被破坏;更重要的是,频域“加窗”操作会使得信号在方位向时域展宽,而展宽部分携带的错误相位信息会破坏原观测样本,使得算法迭代失去了意义.

综上所述,在相位补偿过程中不能通过频域“加窗”提高信号的 SCR.因此 ROPE 算法的估计性能会受到低 SCR 的严重影响;而由于不能做“加窗”操作,PGA 算法不能从杂波中有效地分离期望信号,在 SCR 较低的情况下估计相位误差比较困难.针对该问题,本文采用了 EMMLE 算法<sup>[16]</sup>估计相位误差,该方法利用了所有  $N$  个脉冲估计相位误差而 PGA 和 ROPE 算法只采用相邻脉冲估计相位误差,因此该方法在处理低 SCR 的信号时较 PGA 和 ROPE 算法具有更好的性能.下面对该方法做一个简述.

对于匀速旋转的目标,假设每一个距离门内的强散射点都移到多普勒零点,信号的相位历程可以表示为:

$$x_m = \mathbf{a}_m \mathbf{v} + \mathbf{w}_m \quad (14)$$

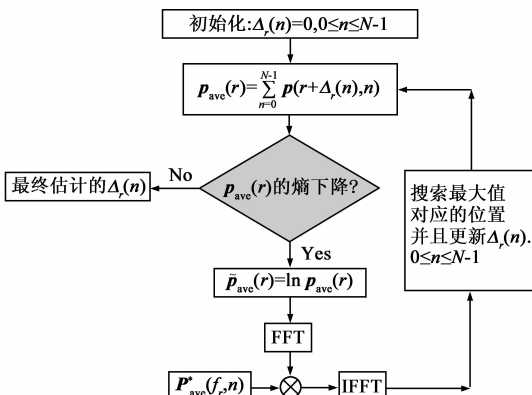


图1 全局最小熵算法流程图

其中  $\mathbf{a}_m$  是强散射点的复散射率, 相位误差可以表示为:  $\mathbf{v} = [e^{j\psi_0} e^{j\psi_1} \dots e^{j\psi_{N-1}}]^T$ , 其中  $N$  是脉冲数.  $\mathbf{w}_m$  为杂波项, 该项包含了其它散射点的干扰和噪声.  $\mathbf{w}_m$  可表示为零均值高斯白噪声, 其协方差矩阵的形式为:

$$\mathbf{C}_w = E(\mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H) = \sigma_w^2 \mathbf{I} \quad (15)$$

上式中  $\mathbf{I}$  是一个  $N \times N$  的单位矩阵.

这里假设杂波和目标回波是相互独立的, 因此  $\mathbf{x}_k$  的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_x = E(\mathbf{x}_m \mathbf{x}_m^H) = \sigma_a^2 \mathbf{v} \mathbf{v}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I} \quad (16)$$

式(16)中  $\sigma_a^2$  是  $\mathbf{a}_m$  的方差. 上式也可以化为

$$\mathbf{C}_x \mathbf{v} = (N\sigma_a^2 + \sigma_w^2) \mathbf{v} \quad (17)$$

因此相位误差向量恰好是  $\mathbf{C}_x$  的最大特征值  $N\sigma_a^2 + \sigma_w^2$  对应的特征向量. 实际上  $\mathbf{C}_x$  可以通过采样协方差矩阵估计出:

$$\hat{\mathbf{C}}_x = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{x}_m \mathbf{x}_m^H \quad (18)$$

文献[16]指出  $\hat{\mathbf{C}}_x$  的最大特征值对应的特征向量是相位误差向量  $\mathbf{v}$  的最大似然估计(ML).

令输入样本的 SCR 为

$$\beta = \sigma_a^2 / \sigma_w^2 \quad (19)$$

相位误差估计的克拉美劳界( CRLB) 由文献[16]给出:

$$\sigma_\psi^2 = \frac{1}{MN\beta^2} + \frac{1}{M\beta} \quad (20)$$

文献[16]同时指出当  $N=2$  时该方法就是 PGA 算法.

为能够准确估计随机 PRI 的 ISAR 回波信号的相位误差, 需要对原算法做些调整, 算法流程图如图 2.

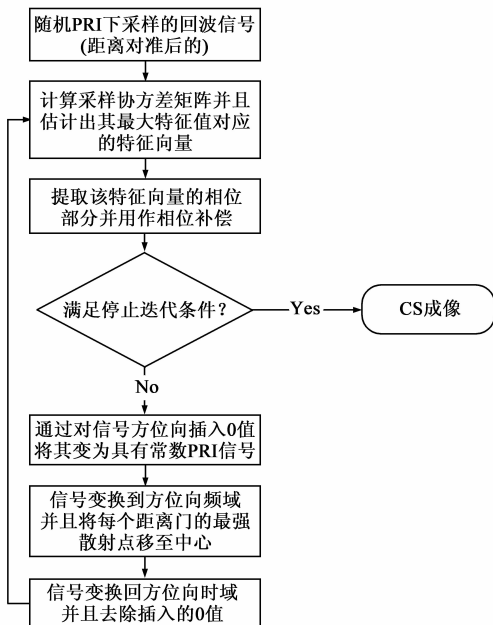


图2 EMMLE算法流程图

(1) 在随机采样的脉冲中插入零值, 如图 4(a) 所示, 以恢复出具有常数 PRI 的回波. 再将补零后的回波变换到方位向频域, 由于回波数据的相位历程不完整,

所以散射点的旁瓣被严重抬高, 但主瓣位置相对常数 PRI 的回波数据没有改变. 因此“移位”操作仍然可以依据此前方法.

(2) 加窗操作不再适用. 因为旁瓣抬高较为严重, 而相位误差信息包含在了旁瓣内, 所以不能采用加窗方法提高信号的 SCR. 而较低的 SCR 会导致相位误差估计子性能的损失, 本文采用 EMMLE 算法可以同时利用多个脉冲估计相位误差, 以补偿低 SCR 造成的性能损失. 在较低的 SCR 情况下, 该算法仍然具有较好的估计性能.

(3) 该算法的收敛速度较快, 一般两次迭代后就可以得到比较理想的结果.

在经过运动补偿处理后, ISAR 的回波信号在多普勒频域是稀疏的, 因此可以根据 CS 理论重构 ISAR 二维图像.

## 4 实验结果与分析

二维压缩感知成像算法总体流程如图 3, 下面将用实测数据验证算法的有效性. 经过 dechirp 处理后的原回波数据有 256 个距离单元和 512 个脉冲. 首先对回波数据的方位向和距离向二维随机采样, 分别随机抽取 170 个距离单元和 256 个脉冲作为观测样本, 如图 4(d) 所示, 设距离向和方位向的稀疏度为 40 和 20. 通过对回波脉冲压缩获得一维距离像, 传统的脉压方法需要加窗以压低旁瓣, 同时也导致主瓣展宽, 损失部分分辨率, 图 4(c) 是回波采用传统脉压方法得到的距离像(峰值旁瓣比). 而采用压缩感知技术脉压则无需加窗, 因此获得的距离像不会损失分辨率而且可以较好地抑制旁瓣, 如图 4(f) 所示. 由于距离向的随机采样损失了部分能量, 所以得到的距离像会损失部分信噪比.



图3 ISAR二维压缩感知成像算法总体流程图

脉压之后需要对距离像做运动补偿, 先考虑距离对准. 利用全局最小熵算法做距离对准结果如图 5, ARP 的第一次、第二次和最后一次迭代的结果如图 5(a) ~ (c). 由图 5(d) 可知 ARP 的熵值随着迭代次数的增加快速地收敛到全局最小值. 距离对准前后的结果分别如图 5(e)、(f) 所示.

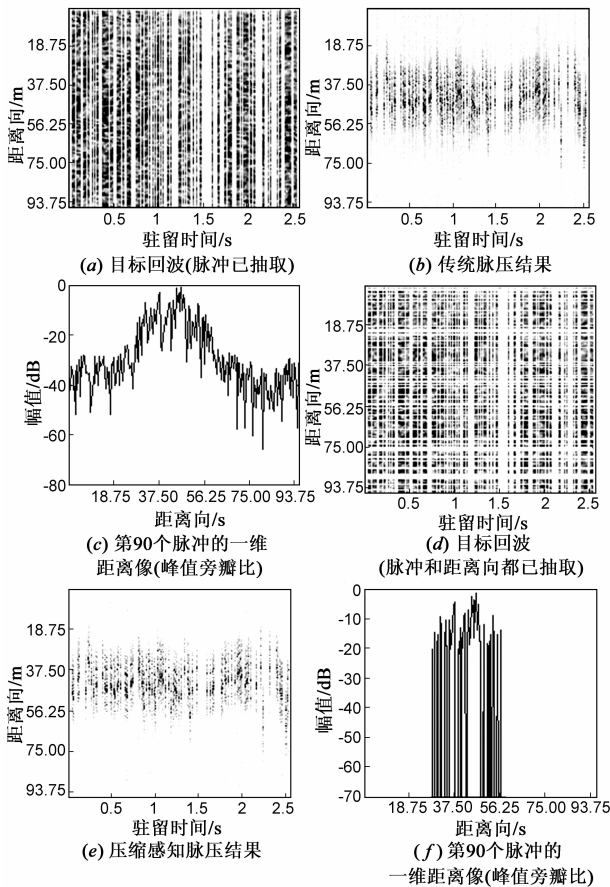


图4 脉冲压缩

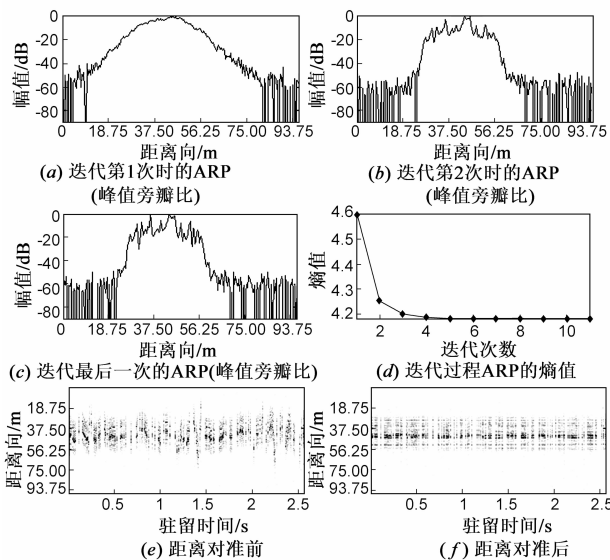


图5 距离对准

接下来需要对距离对准后的距离像做相位补偿. 如果不能有效地补偿掉高次相位, 图像就无法在多普勒域聚焦, 如图 6 和图 8(a). 本文 3.2 节提到了 3 种相位补偿算法, 这 3 种算法不做“加窗”操作情况下对距离对准后的数据处理结果如图 7 所示. 其中图 7(a)~(c)

分别是 ROPE 算法迭代 1 次、2 次和 10 次后方位向变换到频域的结果, 由于实测信号不能满足该算法的假定条件, 算法无法准确估计出相位误差, 因此迭代多次后图像仍无法聚焦. 图 7(d) 是 PGA 算法迭代一次后方位向变换到频域的结果, 与图 6 比较发现图像无明显改善. 强散射点中心移位操作如图 7(e), 发现信号的主瓣、旁瓣不能区分. 继续利用该算法迭代 10 次后方位向变换到频域的结果如图 7(f), 仍然不能分辨出目标的轮廓. 本文采用了 EMMLE 算法估计相位误差, 算法迭代一次后方位向变换到频域的结果如图 7(g), 图中基本可以辨别出飞机的轮廓, 但由于脉冲的随机采样方位向仍然具有较强的旁瓣. 强散射点中心移位操作如图 7(h), 再次迭代该算法的结果如图 7(i), 可以看出图 7(h) 与图 7(i) 的差别不大, 说明该相位补偿算法收敛速度较快.

对于随机 PRI 的回波信号来说, 传统的方位向傅氏变换成像结果显然不够理想, 如图 6(d), 但压缩感知技术却可以较好地利用该回波信号重构出目标图像. 本文采用 MP

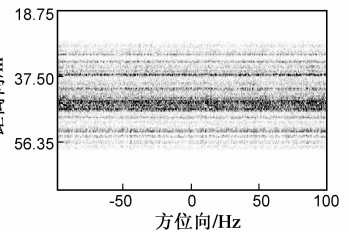


图6 未作相位补偿的成像结果

(Matched Pursuit) 算法重构上述 3 种相位补偿算法处理的结果, 重构出的目标二维图像如图 8(b)~(d).

为了进一步说明该运动补偿算法的有效性, 下面进一步降低方位向脉冲数到 128 个, 距离向采样数仍然是 170 个. 距离对准前后的结果如图 8(a) 和 (b), 图 8(c) 和 (d) 分别为相位补偿后方位向傅氏变换成像的结果和压缩感知成像的结果.

图 10 为另一组相同参数的 yake-42 实测数据的处理结果, 这里方位向和距离向的采样数仍然是 128 和 170.

## 5 结论

本文针对方位向和距离向二维随机采样的回波数据, 提出了一种有效的运动补偿算法. 全局最小熵距离对准算法可以直接用于解决方位向随机 PRI 回波的距离对准问题. 相位补偿利用了 EMMLE 算法, 该算法原先应用于 SAR 相位补偿中, 本文根据 ISAR 回波数据的特性, 去除了原算法中的加窗步骤, 使之更适用于随机 PRI 回波的情况.

实验结果表明, 本文提出的算法可以有效地针对 ISAR 二维随机采样回波数据实现运动补偿, 使得压缩感知技术在 ISAR 成像领域具有更实际的应用前景.

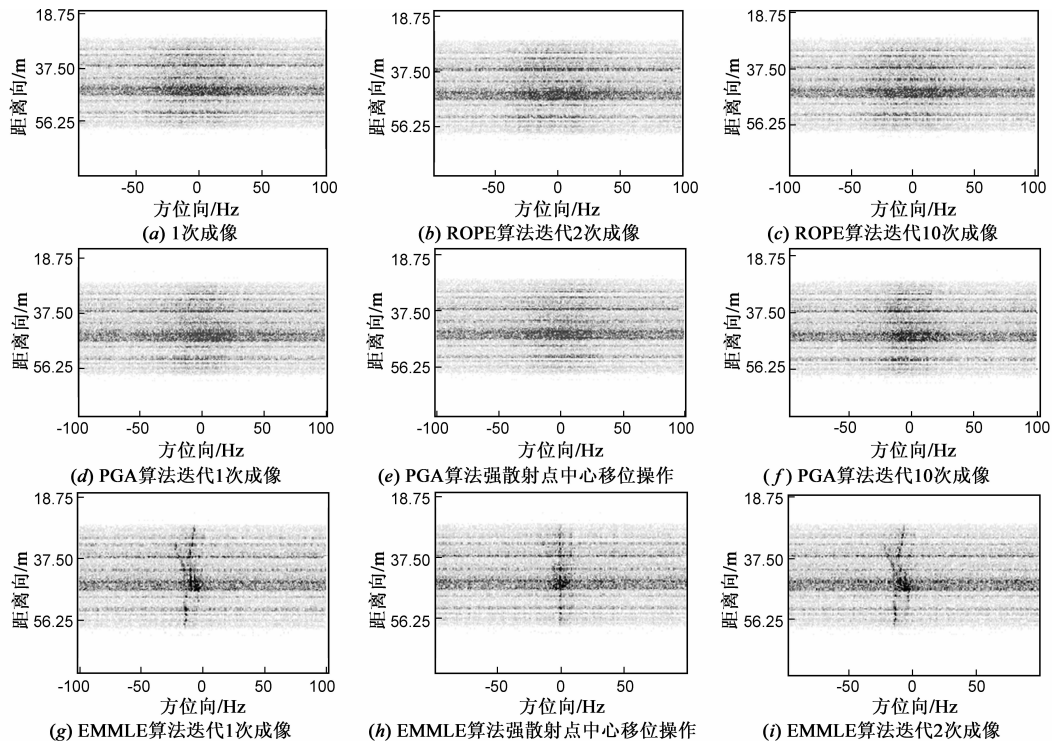


图7 相位补偿

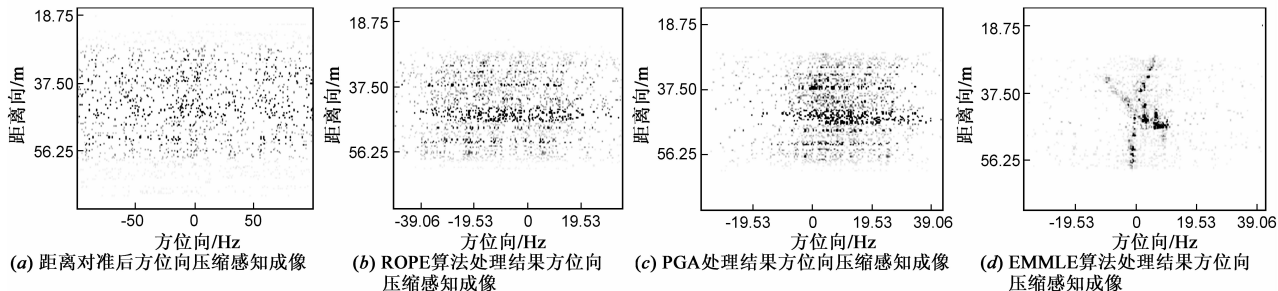


图8 方位向压缩感知成像

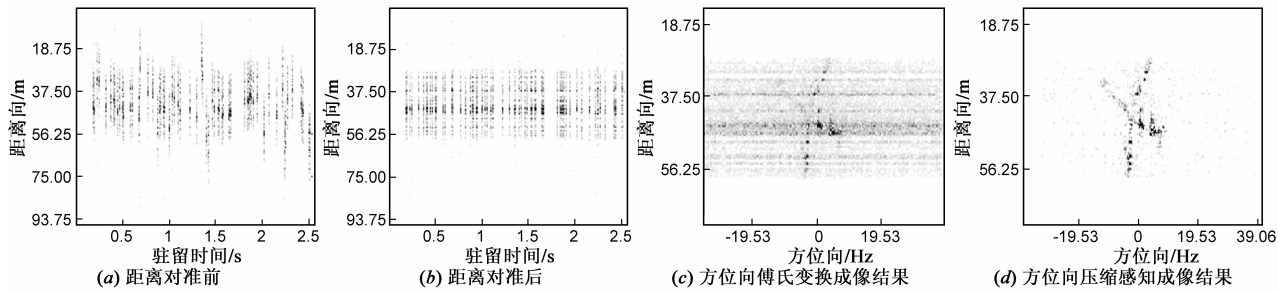


图9 yake-42二维压缩感知成像的运动补偿结果

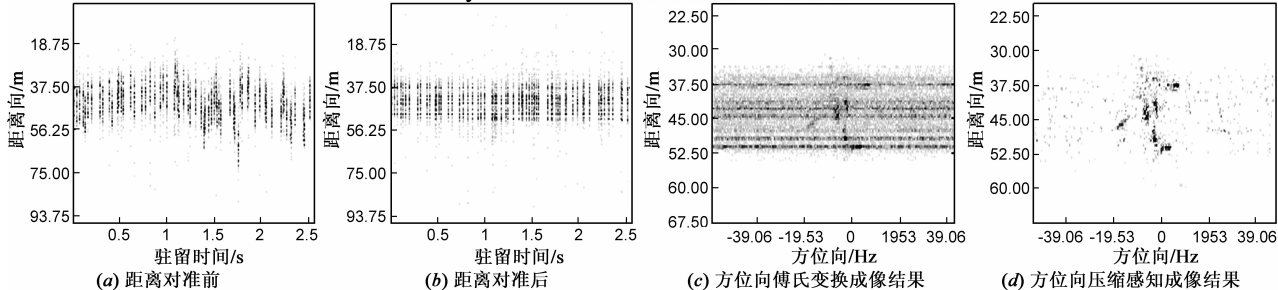


图10 yake-42二维压缩感知成像的运动补偿结果

## 参考文献

- [1] ZHANG L, XING M D. Resolution Enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3824 – 3838.
- [2] WANG H X, QUAN Y H, XING M D, ZHANG S H. ISAR imaging via sparse probing frequencies[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 451 – 455.
- [3] 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 and Information Technology, 2010, 32(5): 1234 – 1238.
- [4] XIE X C, ZHANG Y H. High-resolution imaging of moving train by ground-based radar with compressive sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 46(7): 529 – 531.
- [5] F Ye, D Liang. ISAR enhancement technology based on compressed sensing[J]. IEEE Electronic Letters, 2011, 47(10): 620 – 621.
- [6] ZHANG L, QIAO Z J, XING M D, LI Y C, BAO Z. High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4630 – 4651.
- [7] ZHANG L, XING M D. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 567 – 571.
- [8] ZHANG L, QIAO Z J, XING M D. High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 997 – 1008.
- [9] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 侯彪. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651 – 1662.  
JIAO Li-cheng, YANG Shu-yuan, LIU Fang, HOU Biao. Development and prospect of compressive sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1651 – 1662.
- [10] 张宗念, 黄仁泰, 闫敬文. 压缩感知信号盲稀疏度重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 18 – 22.  
ZHANG Zong-nian, HUANG Ren-tai, YAN Jing-wen. A blind sparsity reconstruction algorithm for compressed sensing signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 18 – 22.
- [11] J H G, Ender. On compressive sensing applied to radar[J]. Signal Processing, 2010, 90(3): 1402 – 1414.
- [12] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 2 – 14.
- [13] 王根源, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 5 – 8.  
WANG Gen-yuan, BAO Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 5 – 8.
- [14] 汪玲, 朱兆达. 一种基于最大修正峰度的 ISAR 距离对准算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(6): 722 – 726.  
WANG Ling, ZHU Zhao-da. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(6): 722 – 726.
- [15] ZHU D Y, WANG L. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204 – 208.
- [16] C V Jakowatz, D E Wahl. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic aperture radar imagery[J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, 10(12): 2539 – 2546.
- [17] Joel A Tropp and Anna C Gilbert. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655 – 4666.
- [18] WANG J F, LIU X Z. Improved global range alignment for ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1070 – 1075.

## 作者简介



俞翔 男, 1982 年 10 月出生于江苏省南京市. 现就读于南京航空航天大学通信与信息系统专业, 博士研究生. 主要研究方向: 逆合成孔径雷达成像技术.

E-mail: cwal20@163.com



朱岱寅 男, 1974 年 7 月出生于江苏省无锡市. 1996 年本科毕业于东南大学无线电工程系, 分别于 1998 年和 2002 年在南京航空航天大学电子工程系获硕士和博士学位. 现为南航电子工程系教授、博士生导师, IEEE 会员, 主要从事雷达成像和信号处理方面的研究.

E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn