

ISAR 机动目标的平动补偿和瞬时成像研究

邢孟道, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 机动目标成像近年来受到广泛注意. 本文首先讨论平动补偿, 它通常可以分解为两步进行——包络对齐和自聚焦, 分析表明, 针对平稳目标的包络对齐方法仍然适用于机动目标, 而根据相干积累原理, 已有的自聚焦方法从理论上和实际上都不是最优的, 我们提出适用于机动目标和平稳目标的迭代相干积累自聚焦 (ICSA) 算法, PGA (相位梯度算法) 是 ICSA 算法的一个特例; 然后, 本文讨论机动目标的瞬时成像, 它实际上是一个瞬时谱估计问题, 已有的一些瞬时成像方法只适用于散射点子回波为线性调频信号 (多普勒分布为直线). 针对时频分布为非直线的情况, 我们提出用自适应窗短时 chirplet 分解方法估计信号的瞬时频率和瞬时幅度, 并结合“洁净”技术, 提出了快速自适应窗短时 chirplet 分解成像 (ACDI) 算法. 实测数据的处理表明本文提出 ICSA 算法和 ACDI 算法是有效的.

关键词: ISAR; 平动补偿; 包络对齐; 自聚焦; 机动目标成像

中图分类号: TN957. 51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 06-0733-05

Study of Translational Motion Compensation and Instantaneous Imaging of ISAR Maneuvering Target

XING Meng dao, BAO Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging of maneuvering target has received much attention in recent years. In the paper, we first discuss translational motion compensation (TMC), which is usually decomposed into two steps: envelope alignment and autofocus, and find that the existing envelope alignment algorithms are still effective for not too big maneuvering target whose migration through resolution cells (MTRC) does not take place, but the existing autofocus algorithms are not effective for maneuvering target in practice and in theory. According to coherent summation principle, we propose an iterative coherent summation autofocus (ICSA) algorithm, with PGA being a particular case of ICSA. Then we discuss maneuvering target imaging problem, in fact, which is an instantaneous spectrum estimation problem. Most existing algorithms are only effective when scatterers' echoes are linear frequency modulation (LFM) signals. For the situation when scatterers' time frequency distribution is not linear, we put forward an adaptive chirplet decomposition method to estimate instantaneous frequency and instantaneous complex amplitude of multi-component polynomial phase signals, and propose a fast adaptive chirplet decomposition imaging (ACDI) algorithm by utilizing "Clean" technique. Real data processing proves that the proposed ICSA algorithm and ACDI algorithm are effective.

Key words: ISAR; motion compensation; envelope alignment; autofocus; maneuvering target imaging

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 成像具有全天候、全天时和易于远距离工作的特点, 已广泛应用于许多领域. SAR 是基于雷达平台与目标之间的相对运动, 以目标为基准, 运动的雷达平台形成了合成的长孔径, 从而得到高的横向分辨率. SAR 技术可自然的推广到逆合成孔径雷达 (ISAR), ISAR 也是基于雷达平台与目标的相对运动, 只是固定不动的是雷达. 若以运动的目标作为基准, 也可视为雷达形成了空间分布的合成阵列.

应当指出, 通过阵列处理得到的高的横向分辨率, 阵列流

行必须精确已知. 因此, 在 SAR 里, 要求雷达平台的载体平稳地直线飞行, 以形成等距的线性阵列. 实际上, 对于机载 SAR, 由于气流等因素的影响, 航线不可能是理想的直线, 通常要依靠测量仪器如全球定位系统 (GPS)、捷联惯导 (IMU) 等测出其偏差加以校正, 对分辨率高的 SAR, 还要利用数据所具有的特性进一步补偿.

对非合作目标作 ISAR 成像, 由于目标的运动不受控制, 也无法用仪器作精确测量和校正, 其运动补偿要比 SAR 复杂. 因此, 虽然 ISAR 对合作目标 (如外空的人造卫星) 成像在

SAR 实用后不久就已经实现,但对非合作目标的成像直到二十世纪八十年代才获得成功^[1].在此后的二十年里 ISAR 不断发展,但基本上都是针对平稳目标的,即相对于目标形成的是长的等距线阵.若目标在观测其间作机动飞行,目标相对于雷达射线的姿态成三维运动(偏航、侧摆和俯仰),而且转速也是变化的,使得相对于目标形成的是非均匀的空间曲线阵列,且阵列流形不确定.传统的 SAR 技术和方法,难以直接应用.

ISAR 对飞机、导弹和舰船一类目标成像也有其简单的一面,即目标的场景很小,可近似认为电磁波为平面波.当前 ISAR 图像的分辨率的要求为亚米级,对常用的厘米波雷达(如 $\lambda = 3\text{cm}$),要求的相干积累角约为 $2^\circ - 3^\circ$,转动这样小的角度,若目标尺寸为几十米,则在观测期间散射点越距离单元走动(MTRC)的现象基本可以忽略不计,这更可使分析简化.

本文是在上述假设的基础上,对机动目标成像的运动补偿和成像算法作深入的研究,分析表明针对平稳目标的包络对齐方法仍然适用机动目标,但常规的自聚焦方法不再适用于机动目标,为此本文在相干积累原理的基础上,提出适用于机动目标的相干积累法,为提高聚焦精度,结合 PGA 方法的迭代思想,提出迭代相干积累自聚焦(ICSA)算法;经过平动补偿后,运动目标等效为转台目标,只是转动是三维的、非均匀的,为此,针对三维、非均匀转动的目标模型,得出机动目标成像实际上是多分量信号的瞬时谱估计问题,并提出基于自适应窗短时 chirplet 分解的瞬时谱估计方法,和基于 Clean 的快速自适应窗短时 chirplet 分解瞬时成像(ACDI)算法,外场实测数据的处理结果,说明本文的方法是可行的.

2 机动目标的平动补偿

设发射宽带信号为 $f(t)e^{j\omega_0 t}$,而接收到信号为 $s(t-\tau)e^{j\omega_0(t-\tau)}$,变换到基频为 $s(t-\tau)e^{-j\omega_0 t}$,其中 $s(t-\tau)$ 为受目标调制并延时的复包络,由于发射为与分辨率相适应的宽带信号, $s(\cdot)$ 呈现为目标的复一维距离像,其分辨率与发射信号相同,通常为亚米级.平动补偿即将接收到的基带信号作适当的延时,包括包络 $s(\cdot)$ 的延时和初相 $-\omega_0\tau$ 的校正.在小观测角范围内,若散射点的 MTRC 现象可以忽略不计,散射点反射系数也基本不变,则接收回波的散射点功率和沿着距离方向分布(简称一维距离功率像)与视角变化基本无关,即目标散射点沿距离的分布只是在距离单元内部有变化,其机动性仅仅表现在散射点位置变化趋势上.所以已有的包络对齐方法如相关法^[2]、最小熵方法^[3]仍然适用于机动目标.常规的自聚焦方法,如 PGA 方法^[4]、加权最小二乘法^[5]、最小熵法^[6]都是针对平稳目标(散射点回波为正弦信号)提出的,不在适用于机动目标.

2.1 相干积累法

对于平稳目标,平动补偿后,由于其相对于焦点是均匀转动的,所以各散射点子回波为正弦信号,对于机动目标,散射点子回波的运动就复杂一些,但在较短的时间为,可以近似为低次多项式相位信号(幅度可以有调制).我们思想是从中选出 P 个特显点单元进行处理,并假定此第 p ($p = 1, 2, \dots, P$) 个距离单元的强散射(特显点)的多项式相位为 $\varphi_{p,m} = \varphi_{p,0} +$

$\sum_{l=1}^L c_{l,p} m^l$,其它为杂波, $\varphi_{p,m}$ 在同一次回波里各个距离单元具有相同的相位误差,于是该距离单元第 m 次回波的复包络为:

$$s_{p,m} = a_{p,m} \exp(j(\varphi_{p,m} + \varphi_m)) + c_{p,m} \quad (1)$$

$m = 0, 1, \dots, M-1$,以第一次回波为准作初相校正,则 $\varphi_0 = 0$.

补偿特显点子回波的起始相位、一次项、二次项到 L 次项(如何估计多项式相位将在下一节详细讨论),即 $\varphi_{p,m} =$

$\varphi_{p,0} + \sum_{l=1}^L c_{l,p} m^l$ 后,则回波为

$$s_{p,m} \exp(-j\varphi_{p,m}) = a_{p,m} \exp(j\varphi_m) + c_{p,m} \exp(-j\varphi_{p,m}) \quad (2)$$

这时,通过多个特显点单元加权相加,以提高信噪比,可以得到 φ_m 的最佳估计

$$\hat{\varphi}_m = \angle \sum_{p=1}^P w_{p,m} s_{p,m} \exp(-j\varphi_{p,m}) \quad (3)$$

其中,权值由相干积累后信噪比最大准则求得,即

$$\max_{w_1, m', \dots, w_{p,m}} \left\{ \left(\sum_{p=1}^P w_{p,m} a_{p,m} \right)^2 \backslash \sum_{p=1}^P w_{p,m} \sigma_{p,m}^2 \right\} \quad (4)$$

其中 $\sigma_{p,m}^2$ 为 $c_{p,m}$ 的方差.得, $w_{p,m} = a_{p,m} / \sigma_{p,m}^2$.

由于初相误差 φ_m 的存在,起始相位 $\varphi_{0,p}$ 比较难估计精确.我们先补偿特显点相位一次项、二次项到 L 次项,即 $\delta_{p,m}$

$= \sum_{l=1}^L c_{l,p} m^l$,再采用差分形式相干积累.

$$s_{p,m} \exp(-j\delta_{p,m}) = a_{p,m} \exp(j\varphi_{p,0} + j\varphi_m) + c_{p,m} \exp(-j\delta_{p,m}) \quad (5)$$

初相误差 φ_m 差分的估计为

$$\Delta \hat{\varphi}_m = \angle \sum_{p=1}^P w_{p,m} s_{p,m} \exp(-j\delta_{p,m}) \cdot w_{p,m-1} s_{p,m-1} \exp(j\delta_{p,m-1}), \quad m \geq 1 \quad (6)$$

那么,估计的初相误差为 $\hat{\varphi}_m = \sum_{k=1}^m \Delta \hat{\varphi}_k$, $\varphi_0 = 0$ (7)

2.2 特显点的多项式相位估计

上一节提到要估计特显点的相位一次项、二次项到 L 次项,因为其信号为单分量信号,我们采用离散多项式相位变换(DPT)的方法^[7]估计多项式相位信号的参数(主要为一次项、二次项到 L 次项系数),算法简单.不妨设某特显点的信号为:

$$s_m = a_m \exp(j\varphi_m + \varphi_m) + c_m, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

其中 $|s_m|$ 是慢变化的, $\varphi_m = \varphi_0 + \sum_{l=1}^L c_{l,m} m^l$, φ_m 为比 L 次还要高的高次相位误差和随机相位误差.

采用 DPF 进行参数估计分两步,第一步在时域对信号施加算子操作 DP_L , L 为正实数.第二步对算子 DP_L 运算结果作离散时间傅立叶变换 DFTF.

算子操作 DP_L 定义如下

$$DP_1[s_m, \tau] = s_m \quad (9)$$

$$DP_2[s_m, \tau] = s_m s_{m-\tau}^* \quad (10)$$

$$DP_L[s_m, \tau] = DP_2[DP_{L-1}[s_m, \tau]] \quad (11)$$

定义 DP_L 的傅立叶变换为 DPT_L ,

$$DPT_L[s_m, \omega, \tau] = \text{DFTF}[DP_L[s_m, \tau]] \\ = \sum_{m=0}^{M-1} DP_L[s_m, \tau] \exp(-j\omega m) \quad (12)$$

参数估计过程如下:

- (1) $l = L$, L 为多项式相位的最高系数, $z_m^l = s_m$;
- (2) 选择合适的 τ_l , 计算 $DPT_l[z_m^l, \tau_l]$;
- (3) 通过 DFT 峰值点估计频率, 通过频率估计第 l 阶的

相位系数 $c_l = \frac{1}{l!} \tau_l^{-l} \arg \max_{\omega} |DPT_l[z_m^l, \omega, \tau_l]|$;

- (4) $z_m^{l-1} = z_m^l \exp(-j c_l m^l)$;
- (5) $l = l - 1$, 如果 $l \geq 1$, 返回(2); 否则, 估计起始相位 φ_0

$= \text{phase}(\sum_{m=0}^{M-1} z_m^0)$;

- (6) 估计的信号成分的多项式相位为 $\varphi_m = \varphi_0 + \sum_{l=0}^L \hat{c}_l m^l$;

- (7) 平均幅度 $a = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{M-1} a_m$ 的估计为 $\hat{a} = \frac{1}{N} |\sum_{m=0}^{M-1} z_m^0|$;

如果, $L = 1$ 也可直接采用 FFT 方法估计参数, $L = 2$ 也可采用解调频 (dechirping) 方法估计, 但运算量相对大一些。

2.3 预聚焦

ISAR 与 SAR 不同, 不能用仪器较准确的测出雷达和目标的相对运动, 但采用包络对齐和初相校正两步进行运动补偿时, 包络对齐后的初相误差通常较大, 而且在序列上非平滑。不对初相校正作预聚焦处理, 常无法估计特显点子回波的多项式相位。所谓预聚焦是先选择一个归一化幅度方差最小的单元, 其序列的相位误差均为零进行聚焦。应当指出, 预聚焦完成了粗略的自聚焦, 同时也在各个距离单元引入其信号相位参数以及杂波和噪声引起的相位误差, 须作进一步的补偿和综合处理。

假设所选预聚焦单元为第 q 个距离单元, 该距离单元的回波信号为

$$s_{q,m} = a_{q,m} \exp(j(\Phi_{q,0} + \sum_{l=1}^L c_{l,q} m^l + \gamma_m)) + c_{q,m} \quad (13)$$

其中 $m = 0, 1, \dots, M-1$, $\gamma_0 = 0$ 。当杂波很小时, 可近似写成

$$s_{q,m} = a_{q,m} \exp(j(\Phi_{q,0} + \sum_{l=1}^L c_{l,q} m^l + \gamma_m - \Phi_{q,m})) \quad (14)$$

其中 $\Phi_{q,m}$ 就是由杂波引起的相位起伏。

用此特显点的相位 $\Phi_{q,m} = \Phi_{q,0} + \sum_{l=1}^L c_{l,q} m^l + \gamma_m - \Phi_{q,m}$ 进行补偿后, 其它特显点单元的回波信号可以写成,

$$s_{p,m} \exp(-j\Phi_{q,m}) = a_{p,m} \exp(j(\Phi_{p,0} - \Phi_{q,0} + \sum_{l=1}^L (c_{l,p} - c_{l,q}) m^l + \Phi_{q,m})) + c_{p,m} \exp(-j\Phi_{q,m}) \quad (15)$$

这样原来的相位误差 γ_m 的估计转化为对杂波引起的相位起伏 $\Phi_{q,m}$ 的估计。同时引入特显点信号参数, 但这不影响将来估计的瞬时像形状, 只影响图像平移。

2.4 迭代相干积累自聚焦 (ICSA) 算法

为了提高聚焦精度, 我们结合 PGA 加窗迭代的思想, 提出 ICSA 算法, 步骤如下:

(1) 选出归一化幅度方差最小的单元, 对图像进行预聚焦, 并可发现特显点明显分开的一些单元。

(2) 选出归一化幅度方差较小的多个距离单元, 和滤出一些特显点明显分开的单元中的特显点, 估计特显点信号相位的一次、二次项到次项 (由目标的机动性确定), 并作补偿, 然

后用 FFT 成像。

(3) 各距离单元零频左右 (特显点信号在零频) 加一个矩形窗, 滤除窗外的杂波和噪声, 然后将加窗后的横向像用 IFFT 变换回数据域。

(4) 用相干积累法, 估计上一步聚焦剩余的相位误差, 并对图像聚焦。

(5) 返回第(2)步, 并在加窗时将宽度适当减小 (可取 4、5 个像素点), 继续作迭代处理, 直到窗足够小 (5~7 个像素点)。

当 L 取 1 时, 此算法就是 PGA, 本算法是考虑目标机动的情况下, 根据相干积累原理, 对 PGA 算法的推广。

2.5 聚焦结果比较

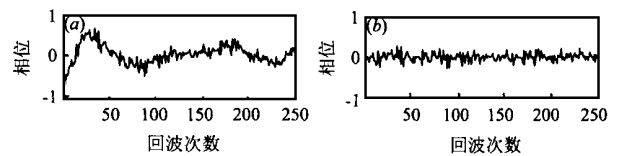


图 1 PGA 方法和 ICSA 方法聚焦结果比较。

(a) PGA 方差 0.249; (b) ICSA 方差 0.098

为了比较迭代相干积累方法和 PGA 方法的自聚焦效果, 这里采用仿真数据, 假设有 40 个特显点距离单元, 噪声方差为 1, 信号幅度为 3, 其归一化中心频率在 -0.2 和 0.2 之间随机分布, 归一化调频率在 -0.01 和 0.01 之间随机分布, 相位误差在 $[-\pi, \pi]$ 随机分布。图 1(a) 为 PGA 方法聚焦估计的相位误差和实际的相位误差的差, 其方差为 0.249, 图 1(b) 为 ICSA 方法聚焦估计的相位误差和实际的相位误差的差, 其方差为 0.098。仿真结果也表明对于机动目标 (这里假设散射点回波为线性调频信号), PGA 方法就失效了, 而 ICSA 方法的聚焦精度比较高。

3 基于自适应窗短时 chirplet 分解的瞬时成像

对于飞机一类情性较大的目标, 各距离单元的散射点子回波信号的多普勒虽然是时变的, 但比较平缓, 在成像所需的短时间里, 一般可以用较低次的多项式来描述各子回波的相位变化, 而在许多段落里可以近似采用二次多项式相位, 即各子回波近似为线性调频 (LFM) 信号。可以采用广义边缘积分的方法^[9], Rador Wigner 方法^[10, 11], 联合时频分布方法^[12], 基于自适应短时傅立叶变换 (STFT) 的方法^[15] 和解调频 RELAX 方法^[16, 17] 等, 若目标的机动性比较强, 散射点回波时频变化比较复杂, 各距离单元回波可以看作多分量多项式相位信号, 一种方法是采用离散多相位变换 (DPF) 方法估计信号参数^[9], 但由于交叉项的影响, 估计性能比较差, 另一种方法是 chirplet 分解的方法^[14], 但它是对整个信号进行的分解的, 而我们瞬时成像的目的是要估计某时刻的瞬时频率和幅度, chirplet 分解的方法对某个时刻的瞬时频率和幅度估计并不好。我们采用自适应窗短时 chirplet 分解的方法, 在估计时刻左右两边自适应的选择窗长, 在此窗内信号的线性度比较好, 而且能量也相干积累起来, 这类似如函数在某点的导数求法, 它也是在该点取切线, 窗长越来越小, 而取极限, 但这里为了

有一定的分辨率,需要相干积累起来,所以窗长不能很小.

3.1 单个调幅多项式相位信号的瞬时频率估计和平均功率估计

自然信号和人工信号一般都可以用多个调幅(幅度是慢变的)的多项式相位信号加噪声来描述.我们从单个调幅多项式相位信号开始讨论,设为

$$s_m = a_m e^{j\Phi_m} + c_m \quad (16)$$

其中 $\Phi_m = \phi_0 + 2\pi \sum_{l=1}^L \frac{1}{l!} c_l m^l$. 可知,此信号的瞬时频率为 f_m

$$= \sum_{l=2}^L \frac{1}{(l-1)!} c_l m^{l-1}, \text{ 瞬时调频率为 } \mu_m = \sum_{l=2}^L \frac{1}{(l-2)!} c_l m^{l-2},$$

我们的目的是要估计信号瞬时频率和瞬时幅度.由于信号存在噪声,我们不可能通过信号的导数,来求得瞬时频率,对多分量信号就更不可能了.一般我们通过相干积累估计,正如对正弦信号,我们通过傅氏变换来估计信号频率.

为了使成像算法有更广泛的适用性,不求整个期间都满足 LFM 的近似条件,只是在成像时刻 m_e 附近,各子回波时频分布或长或短有一段近似直线,如图 2 所示.我们可以用自适应窗截取其直线段实现相干积累.在 m_e 附近可能存在个别时频弯曲大

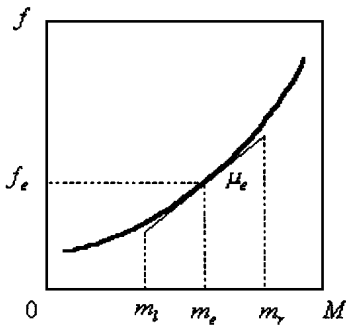


图 2 某散射点的时频曲线

的散射点,对它截取的直线段很短.要估计 m_e 时刻的瞬时频率 f_e ,通过 m_e 左右一段时间里的信号相干积累,我们采用频率一阶近似(自适应窗短时傅立叶变换采用的是零阶近似,很明显一阶近似的分辨率要高).在区间 $[m_l, m_r]$ 内,信号可以近似为线性调频, m_l 到 m_r 长度称为局域一阶平稳长度.现在的问题是如何自适应的确定 m_l, m_r ? 这类类似于自适应窗短时傅立叶变换中自适应的确定窗长,在 SAR 成像里常用实际相位对模型的偏离来界定合用的区间.这里可以采用类似的准则,当频率作直线变化时,可以用一定的调频率解线调并作 FFT 处理,实现相干积累,其积累值与时间长度成正比.当调频率偏离原数值时,使积累的增长减慢,而当频偏较大使相位误差大于 $\pi/2$ 时,会出现负增长.实际上,对混乱的频率变化(如白噪声),FFT 运算为非相干积累,其积累的统计值与时间长度的平方根成正比.为此我们采用以下的准则函数,来确定 $f_e, \mu_e, \hat{m}_l, \hat{m}_r$.

$$\{f_e, \mu_e, \hat{m}_l, \hat{m}_r\} = \arg \max_{f, \mu, m_l, m_r}$$

$$\cdot \left\{ \left| \left(\sum_{m=m_l}^{m_r} s_m e^{-j2\pi(fm + \frac{1}{2}\mu m^2)} \right)^2 \sqrt{(m_r - m_l + 1)} \right| \right\} \quad (17)$$

其中, $m_l < m_e < m_r$. 这是一个四维搜索问题,该时间里平均功率 \bar{a} 的估计为

$$\bar{a} = \left| \frac{1}{\hat{m}_r - \hat{m}_l + 1} \sum_{m=\hat{m}_l}^{\hat{m}_r} s_m e^{-j2\pi(f_e m + \frac{1}{2}\mu_e m^2)} \right| \quad (18)$$

$$\phi_0 = \text{Angle} \left[\frac{1}{\hat{m}_r - \hat{m}_l + 1} \sum_{m=\hat{m}_l}^{\hat{m}_r} s_m e^{-j2\pi(f_e m + \frac{1}{2}\mu_e m^2)} \right] \quad (19)$$

可以用两种方法简化运算量,一种方法是把 m_l, m_r 分开确定,从而转化为三维搜索问题,这里限于篇幅不详细讨论了,另一种方法是定义 $m_l = m_e - m_{len}$, $m_r = m_e + m_{len}$, 则对 m_l 和 m_r 的二维搜索,转化为对 m_{len} 的一维搜索,先求

$$P(f, \mu) = \max_{m_{len}} \left\{ \left| \left(\sum_{m=m_e - m_{len}}^{m_e + m_{len}} s_m e^{-j2\pi(fm + \frac{1}{2}\mu m^2)} \right)^2 \sqrt{(2m_{len} + 1)} \right| \right\} \quad (20)$$

$$m_{len}(f, \mu) = \arg P(f, \mu) \quad (21)$$

它们的求法为:先固定调频率 μ , 假设为 μ_1 , 加不同的窗长 $2m_{len}$ (要对信号补零,使傅立叶谱长度相同)作傅立叶变换,求每个频率点对于窗长函数的最大值点 $P(f, \mu_1)$, 和峰值点对应的自变量 $m_{len}(f, \mu_1)$, 再不断变化 μ , 求得 $P(f, \mu)$, $m_{len}(f, \mu)$. 然后,信号参数 $f_e, \mu_e, \hat{m}_l, \hat{m}_r, \hat{a}, \phi_0$ 由下面六式求得,

$$\{f_e, \mu_e\} = \arg \max_{f, \mu} P(f, \mu) \quad (22) \quad \hat{m}_{len} = m_{len}(f_e, \mu_e) \quad (23)$$

$$\hat{m}_l = m_e - \hat{m}_{len} \quad (24) \quad \hat{m}_r = m_e + \hat{m}_{len} \quad (25)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{2m_{len} + 1} \left| \sum_{m=m_e - \hat{m}_{len}}^{m_e + \hat{m}_{len}} s_m e^{-j2\pi(f_e m + \frac{1}{2}\mu_e m^2)} \right| \quad (26)$$

$$\phi_0 = \text{Angle} \left[\sum_{m=m_e - \hat{m}_{len}}^{m_e + \hat{m}_{len}} s_m e^{-j2\pi(f_e m + \frac{1}{2}\mu_e m^2)} \right] \quad (27)$$

3.2 基于 Clean 的瞬时成像算法

假设某距离单元的多分量多项式相位信号为

$$s_m = \sum_{k=1}^K a_{k,m} e^{j\Phi_{k,m}}, \quad \Phi_{k,m} = \phi_{k,0} + 2\pi \sum_{l=1}^L c_{l,m} m^l \quad (28)$$

此距离单元散射线在某 t_0 时刻的横向像,就是此多分量多项式相位信号在 t_0 时刻的瞬时谱,用瞬时频率和平均幅度表示.我们结合“Clean”技术,采用自适应窗短时 chirplet 分解方法逐个估计各分量的瞬时频率和平均幅度等参数,而获得目标的瞬时像,称为快速自适应窗短时 chirplet 分解的瞬时成像 (ACDI) 算法,其步骤如下:

第一步:先根据上一节单分量自适应窗短时 chirplet 分解方法估计最大 chirplet 分量的信号参数 $f_{e,1}, \mu_{e,1}, \hat{m}_{l,1}, \hat{m}_{r,1}, \hat{a}_1$ 和 $\phi_{0,1}$.

第二步:在原始信号 s_m 谱域中滤除已估计的最大 chirplet 分量的谱,剩余信号 s_{rm} 由下式求得

$$s_{rm} = \text{IFFT} \left[(1 - F\text{Win}_1(f)) \cdot \text{FFT} (T\text{Win}_1(m)) \cdot s_m \right. \\ \left. \cdot e^{-j\pi \mu_{e,1} t^2} \right] e^{-j\pi \mu_{e,1} t^2} \quad (29)$$

其中 $F\text{Win}_1(f) = \begin{cases} 1, & f_{L,1} < f < f_{R,1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 为此分量的频域窗函数,其中 $f_{R,1} > f_{e,1} > f_{L,1}$, 其数值根据其谱的宽度确定. $T\text{Win}_1(m) = \begin{cases} 1, & \hat{m}_{l,1} < m < \hat{m}_{r,1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 为 3.1 节方法搜索到的最大 chirplet 分量的时间区间.

第三步:在剩余信号 s_{rm} 中估计次大 chirplet 分量的信号参数 $f_{e,2}, \mu_{e,2}, \hat{m}_{l,2}, \hat{m}_{r,2}, \hat{a}_2$ 和 $\phi_{0,2}$.

第四步:类似于第二步,在剩余信号 s_{rm} 谱域中滤除已估

计的次大 chirplet 分量的谱, 得到更新后的剩余信号 s_{rm} .

剩余步骤: 在剩余信号 s_{rm} 中估计第三个 chirplet 分量的信号参数 $f_{e,3}$ 、 $\beta_{e,3}$ 、 $\hat{m}_{l,3}$ 、 $\hat{m}_{r,3}$ 、 $\hat{\alpha}_3$ 和 $\phi_{0,3}$, 并滤除此分量后, 再估计第四个分量, 这样一直估计下去, 直到剩余信号的能量比较小, 或者达到所需要的估计分量个数.

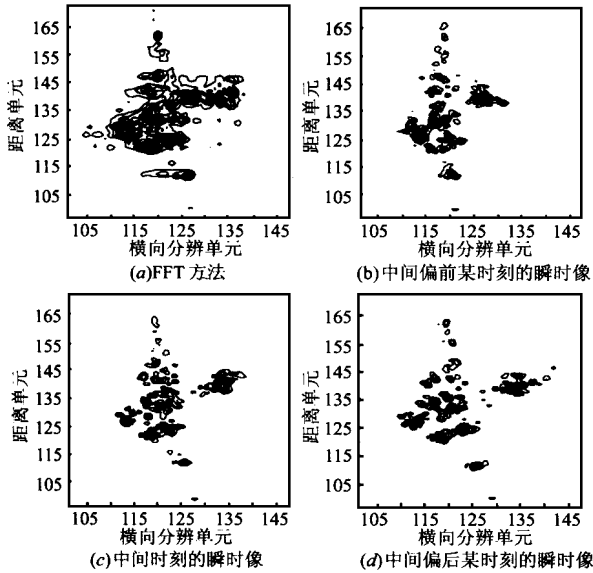


图 3 机动目标平动补偿后动态成像结果

4 机动目标成像结果

对一段安-26 飞机的实测数据进行处理, 目标回波信号是以极坐标格式录取的, 但参考信号是根据目标的低分辨回波确定, 并不对应于目标的中心, 且参考信号未知. 对原始 256 次回波(重复周期为 400Hz, 作 6:1 抽取), 先采用快速相关法作包络对齐, 预聚焦后, 再采用 2.4 节提出的 ICSA 算法作自聚焦, 从各距离单元回波的时频分布(图略)可见散射点回波既有比较平稳的也有非平稳的, 但一般都可以用低次多项式来描述. 图 3(a) 用传统的横向 FFT 方法获得的成像结果, 这时已无法辨识目标. 图 3(b)、(c) 和 (d) 为用 3.2 节提出的快速 ACDD 算法方法获得的三个时刻的瞬时像, 图像质量较好, 且三个不同时刻除横向尺度有明显差异外(由转速不同引起), 在姿态上也有些差别(由转轴变化引起).

5 结论

本文讨论了机动目标的平动补偿和瞬时成像问题, 并提出了适用于机动目标的迭代相干积累自聚焦(ICSA)算法, 和利用“Clean”技术的快速自适应窗短时 chirplet 分解的瞬时成像(ACDD)算法. 实测数据的成像结果表明算法有效, 但它们和已有的方法一样, 要求散射点回波谱分布不能是连片的, 只能对飞机、舰船等, 其散射点分布是分散的目标有效.

参考文献:

[1] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, Jones H M, and Poggio E C. Developments in radar imaging. IEEE Trans. on AES, 1984, 20(4): 363

[2] C C Chen and H C Andrews. Target motion induced radar imaging. IEEE Trans. on AES, 1980, 16(1): 2- 14.

[3] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法. 电子学报, 1998, 26(6): 5- 8.

[4] Wahl D E, P H Eichel, D C Ghiglia, and C V Jakowatz, Jr. Phase gradient autofocus A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans. on AES, 1994, 30(3): 827- 83.

[5] Wei Ye, Tat Soon Yeo, Zheng Bao. Weighted least squares estimation of phase errors for SAR/ ISAR autofocus [J]. IEEE Trans. on GRS, 1999, 37(5): 2487- 2494.

[6] Li Xi, Liu Guosui, Ni Jinlin. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization [J]. IEEE Trans. on AES, 1999, 35(4): 1240- 1251.

[7] Barbarossa S, Scaglione A, and Giannakis G B. Product high order ambiguity function for multicomponent polynomial phase signal modeling [J]. IEEE Trans. on SP, 1998, 46(3): 691- 708.

[8] S Peleg and B Friedlander. Multicomponent signal analysis using the polynomial phase transform [J]. IEEE Trans. on AES, 1996, 32(1): 378- 386.

[9] Genyuan Wang, Zheng Bao and Xiaobing Sun. Inverse synthetic aperture radar imaging of non uniformly rotating targets [J]. Optical Engineering, 1996, 35(10): 3007- 3011.

[10] 保铮, 王根原, 罗林. 逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法 [J]. 电子学报, 1998, 26(12): 79- 83.

[11] Bao Zheng, Wang Genyuan, Luo Lin. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets [J]. Optical Engineering, 1998, 37(5): 1582- 1588.

[12] V C Chen, S Qian. Joint time frequency analysis for radar range-Doppler imaging [J]. IEEE Trans. on AES, 1998, 34(2): 486- 499.

[13] 王根原, 保铮. 一种基于自适应 Chirplet 分解的逆合成孔径雷达成像方法 [J]. 电子学报, 1999, 27(3): 29- 31.

[14] Genyuan Wang, Zheng Bao. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets based on chirplet decomposition [J]. Optical Engineering, 1999, 38(9): 1534- 1541.

[15] Lu Guangyao, Bao Zheng. Compensation of scatterers migration through resolution cell in inverse synthetic aperture radar imaging [J]. IEEE Proceeding - Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(2): 80- 85.

[16] 孙长印, 保铮. 雷达成像的近似二维模型及其超分辨算法 [J]. 电子学报, 1999, 27(12): 84- 87.

[17] 保铮, 孙长印, 邢孟道. 机动目标的逆合成孔径雷达成像原理与算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 24- 39.

作者简介:



邢孟道 男, 1975 年 11 月出生于浙江绍兴, 1997 年本科毕业于西安电子科技大学. 同年免试推荐为本校雷达信号处理重点实验室硕博连读生. 主要研究方向: 雷达成像和目标识别. E-mail: xmd@isp.xidian.edu.cn

保铮 (见本期第 725 页)