

Chirp Scaling 算法中的相位补偿因子研究

王 亮 王 建 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 该文从 SAR 回波的二维频谱表达式入手, 研究了适合高波段 SAR 的 CS(Chirp Scaling)类算法和一种适合超宽带(Ultra Wideband, UWB)SAR 成像的非线性 CS 算法, 通过对算法推导中的近似性分析, 重新刻画了 SAR 成像, 即 SAR 成像是利用回波频谱特性构造频域或时域相位补偿因子的过程, 尤其是对 UWB SAR 回波, 相位补偿因子的精确性直接影响着目标聚焦性能。仿真实验表明, 补偿三阶以上二维相位耦合的非线性 CS 算法能够在一定的测绘带内满足 UWB SAR 点目标的理想聚焦; 同时, 该算法在 UWB SAR 实测数据处理中也已得到成功应用。

关键词: SAR 成像; 二维频谱; CS 算法; 相位补偿因子; UWB SAR 成像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0006-06

Research on Phase Compensating Factors in Chirp Scaling Algorithm

Wang Liang Wang Jian Huang Xiao-tao Zhou Zhi-min

(Dept. of Electronic Technology, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper the two-dimensional frequency expression of SAR echoes are first analyzed. Then, the standard chirp scaling algorithm and its several modified forms used both in high frequency narrow band SAR and low frequency Ultra WideBand (UWB) SAR are compared in a united frame of two-dimensional frequency expression. The approximations made by different algorithms are evaluated in detail. So a new depiction for SAR image formation is proposed, which is a process of constructing phase compensating factors in frequency or time domain according to the characteristics of echo spectrum. Especially, the accuracy of phase compensating factors for UWB SAR echoes has a direct impact on point targets focusing. Simulation results verify that the modified non-linear chirp scaling algorithm, which can compensate the more third orders phase coupling, can arrive an ideal focusing UWB SAR image in the certain of scope. Further more, the algorithm has been used successfully in raw UWB SAR data processing.

Key words: SAR imaging; 2D spectrum; CS algorithms; Phase compensating factor; UWB SAR imaging

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候的特点, 在国防和经济建设上发挥着巨大的作用。SAR成像技术是伴随着 SAR 系统理论的发展而不断完善起来的。早期 SAR 系统主要工作在高波段, 以机载正侧视模式为主, 利用距离-多普勒(RD)成像算法就可以获得高质量的 SAR 图像。斜视模式的提出是为了克服正侧视成像测绘带窄的缺陷, 在机载和星载 SAR 系统中获得了广泛的应用, 但斜视成像模式同时带来了较大的距离迁徙和距离空变性, 结合二次距离压缩(SRC)的 RD 算法^[1]即是为该问题而提出的。1992 年 Bamler 提出的 Chirp Scaling(CS)算法^[2]使得高波段 SAR 成像理论日趋成熟。CS 算法的优势不仅在于提高成像的计算效率, 更可贵的是算法对斜视模式的精确处理使得成像质量获得很大的提高。扩展 CS(ECS)^[3]和非线性 CS(NCS)^[4]算法能很好地

对更大斜视角 SAR 成像, 是对 CS 算法的有效改进。自上世纪 90 年代以来, 超宽带(UWB)SAR 技术获得迅速发展。UWB SAR 结合超宽带技术和合成孔径雷达技术, 能够实现对叶簇和地表覆盖目标的成像和识别, 在军事侦察领域应用十分广阔。UWB SAR 一般工作在正侧视, 发射波束较宽, 多普勒中心对天线指向并不敏感, 且具有低频、大处理角的特点, 距离迁徙更大、二维信号耦合更强。UWB SAR 成像常用 w-k 算法, 但需要作插值运算, 运动补偿困难, 实用性不强。相比之下, 适合 UWB SAR 成像的 NCS 算法^[5]优势明显, 算法良好的性能已经得到了实践检验。

CS 类算法变形较多, 数学推导复杂, 不便于系统性地认识。为此, 本文从 SAR 回波的二维频谱表达式出发, 通过研究适合高波段成像的 CS、ECS 和 NCS 算法以及一种适合 UWB SAR 成像的 NCS 算法, 将 CS 类算法统一到如何近似处理二维耦合信号、形成成像算法各步骤中频域或时域相位补偿因子的过程上来。文中着重强调了精确补偿相位的必要性, 由处理仿真和实测 UWB SAR 数据得到有力验证

证。

2 SAR 回波的二维频谱

设载机以速度 v 运动, 雷达发射线性调频信号调频斜率为 k , 点目标到雷达的斜距可表示为 $R(t; r_0) = \sqrt{r_0^2 + v^2(t - t_0)^2}$, 其中 t 为方位向时间, t_0 为波束轴线通过目标点的时刻(为简化推导, 不妨令 $t_0 = 0$), r_0 为发射波束轴线方向的斜距, 则雷达接收到的点目标回波基带信号为

$$ss(\tau, t; r_0) = \exp\left\{j\pi k\left[\tau - \frac{2}{c}R(t; r_0)\right]\right\} \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t; r_0)\right] \quad (1)$$

其中 c 为光速, τ 为距离向时间, λ 表示发射信号的中心波长。这里省略了下文推导中不涉及的幅度信息。对式(1)两次利用驻定相位原理, 将二维时域信号变换到二维频域为^[6]

$$SS(f_r, f_a; r_0) = \exp\left[j\varphi(f_r, f_a; r_0) - j\frac{\pi}{k}f_r^2\right] \quad (2)$$

其中 f_r , f_a 分别表示距离向频率和方位向频率, 取值范围分别不超过发射信号带宽 B_r 和多普勒带宽 B_a , 即 $|f_r| \leq B_r/2$, $|f_a| \leq B_a/2$; 相位因子 $\varphi(f_r, f_a; r_0)$ 可表示为

$$\varphi(f_r, f_a; r_0) = -\frac{4\pi r_0}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \quad (3)$$

式中 f_c 表示发射信号的中心频率。这里列出的点目标回波二维频谱表达式除假定驻定相位原理的条件满足之外没有其他近似, 可以认为是精确的。

3 SAR 回波的相位补偿

SAR 成像的基本思路是将回波的二维频谱分为距离向和方位向独立的一维处理, 实质上是利用回波频谱特性构造频域或时域相位补偿因子的过程。高波段 SAR 具有窄带、小波束角的特点, 补偿因子的近似程度较高, 而低波段 SAR 相对带宽大、波束角宽, 需要更加精确的相位补偿因子。

3.1 高波段 SAR 成像中的相位补偿

不同的 SAR 成像算法就是基于回波信号的特性对式(2)做出不同近似得到。我们可将式(3)写为

$$\varphi(f_r, f_a; r_0) = -\frac{4\pi r_0}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \cdot \left[1 + \frac{\frac{2f_r}{f_c} + \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2}{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2}\right] \quad (4)$$

当要求方位向分辨率为米级时, 方位向多普勒频率一般在百赫兹量级, 若假定载机飞行速度小于 120m/s, 高波段 SAR 发射信号中心波长为厘米量级, 相对带宽小于 10%, $(\lambda f_a / 2v)^2$ 远小于 1, 则式(4)中中括号形如 $(1+x)^{1/2}$, x 远小于 1, 可利用泰勒展开, 所以式(4)为

$$\begin{aligned} \varphi(f_r, f_a; r_0) = & -\frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a) - \frac{2\pi r_0}{\lambda} \frac{1}{\gamma(f_a)} \frac{f_r}{f_c} \left(2 + \frac{f_r}{f_c}\right) \\ & + \frac{\pi r_0}{2\lambda} \frac{1}{\gamma^3(f_a)} \left[\frac{f_r}{f_c} \left(2 + \frac{f_r}{f_c}\right)\right]^2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

整理并省略 (f_r / f_c) 二次以上项得

$$\begin{aligned} \varphi(f_r, f_a; r_0) \doteq & \varphi_{SE}(f_r, f_a; r_0) \\ = & p_0(f_a; r_0) + p_1(f_a; r_0) \frac{f_r}{f_c} + p_2(f_a; r_0) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 \\ = & -\frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a) - \frac{4\pi r_0}{\lambda} \cdot \frac{1}{\gamma(f_a)} \cdot \frac{f_r}{f_c} \\ & + \frac{2\pi r_0}{\lambda} \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\gamma(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2}$, $p_0(f_a)$, $p_1(f_a)$, $p_2(f_a)$ 分别表示 (f_r / f_c) 的零次、一次、二次项的系数。在此基础上, 下面对 CS 类算法予以详细讨论。

(1) CS 算法 CS 算法是一种高效频率域 SAR 成像算法。它是利用雷达发射线性调频信号的特点, 在距离-多普勒域校正不同距离上的距离迁移轨迹, 使之和参考距离的迁移轨迹相同。这样, 就能在二维频域通过简单的相位相乘同时完成距离迁移校正, 距离压缩和二次距离压缩。若将式(6)代入式(2)可得

$$\begin{aligned} SS_{CS}(f_r, f_a; r_0) = & \exp\left\{-j\frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a) - j\frac{4\pi}{c} r_0 [1 + C_s(f_a)] f_r\right. \\ & \left. - j\pi \left[\frac{1}{k} - k_{src}(f_a; r_0)\right] f_r^2\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$C_s(f_a) = \frac{1}{\gamma(f_a)} - 1, \quad k_{src}(f_a; r_0) = \frac{2\lambda r_0}{c^2} \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)} \quad (8)$$

补偿式(7)中第一项即为方位向压缩; f_r 的一次项系数随目标距离变化, 可以变换到距离向时域予以补偿。令 $k_s(f_a; r_0) = (1/k - k_{src})^{-1}$, 利用驻定相位原理得到回波信号的距离-多普勒域表达式为

$$\begin{aligned} sS_{CS}(\tau, f_a; r_0) = & A_1 \exp\left[-j\frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a)\right] \cdot \exp\left\{j\pi k_s(f_a; r_0)\right. \\ & \left.\cdot \left[\tau - \frac{2}{c} r_0 [1 + C_s(f_a)]\right]^2\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 A_1 为复常数。假定调频斜率 $k_s(f_a; r_0)$ 随 r_0 变化很小, 可用参考距离 r_{ref} 处的调频斜率来近似, 即 $k_s(f_a; r_0) \doteq k_s(f_a; r_{ref})$, 所以对式(9)乘以 CS 因子:

$$\begin{aligned} H_{CS}(\tau, f_a; r_{ref}) = & \exp\left\{j\pi k_s(f_a; r_{ref}) C_s(f_a)\right. \\ & \left.\cdot \left[\tau - \frac{2}{c} r_{ref} [1 + C_s(f_a)]\right]^2\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

使得不同距离上的距离迁移轨迹和参考距离的迁移轨迹相同, 进而将距离向时间变换到距离频率域得到信号的二维频域表达式为

$$SS_{CS}(f_r, f_a; r_0) = A_2 \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}[r_0 + r_{\text{ref}}C_s(f_a)]f_r\right\} \\ \cdot \exp\left\{-j\pi\frac{\gamma(f_a)}{k_s(f_a; r_{\text{ref}})}f_r^2\right\} \\ \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi r_0}{\lambda}\gamma(f_a)\right\} \cdot \exp[j\phi(f_a; r_0)] \quad (11)$$

其中 A_2 为复常数, $\phi(f_a; r_0)$ 为乘以 CS 因子后的相位剩余, 表达式为

$$\phi(f_a; r_0) = \frac{4\pi}{c^2}k_s(f_a; r_{\text{ref}})[1 + C_s(f_a)]C_s(f_a)(r_0 - r_{\text{ref}})^2 \quad (12)$$

式(11)中 f_r 一阶系数的第 1 项表示目标距离项位置, 补偿式中 f_r 一阶系数的第 2 项完成距离迁徙校正, 补偿 f_r 的二阶系数完成距离压缩和二次距离压缩, 在距离-多普勒域补偿其余两项完成方位压缩和方位向剩余相位补偿, 最后对多普勒频率逆变换得到图像。

(2) ECS 算法 随着 SAR 测绘带的增大, 调频斜率 $k_s(f_a; r_0)$ 用参考距离 r_{ref} 处的调频斜率来近似不再合适, 扩展 CS 算法(ECS)即是对这一近似做出修正。整理 $k_{\text{src}}(f_a; r_0)$ 可写为

$$k_{\text{src}}(f_a; r_0) = \frac{\lambda r_0}{2v^2} \left(\frac{f_a}{f_c}\right)^2 \doteq \Delta k_{\text{src}}(f_a) r_0 \quad (13)$$

对于一般的机载正侧视 SAR, 雷达作用距离在十几千米以内, 雷达发射线性调频信号时长为微秒级, 要求成像二维分辨率达到米级, 则高波段 SAR, $k \cdot k_{\text{src}}(f_a; r_0)$ 总是远小于 1。所以调频斜率 $k_s(f_a; r_0)$ 可以近似表示为

$$k_s(f_a; r_0) \doteq k[1 + k \cdot k_{\text{src}}(f_a; r_0)] = k[1 + k \cdot \Delta k_{\text{src}}(f_a) r_0] \quad (14)$$

所以, 由于 $k_s(f_a; r) \doteq k_s(f_a; r_{\text{ref}})$ 而使式(9)形成的相位误差为

$$\Delta\phi_{\text{err}} = \pi k^2 \Delta k_{\text{src}}(f_a)(r_{\text{ref}} - r_0) \cdot \left\{\tau - \frac{2r_0}{c}[1 + C_s(f_a)]\right\}^2 \quad (15)$$

若直接利用该式在距离-多普勒域补偿相位误差, 必将引起距离频域新的相位误差。所以为减小调频斜率的近似带来的相位误差同时避免引入新的距离频率域相位误差, ECS 算法在距离-多普勒域加入一个立方相位修正 CS 因子^[3], 表达式为

$$H_{\text{ECS}}(\tau, f_a; r_{\text{ref}}) = \exp\left\{j\pi k_s(f_a; r_{\text{ref}})C_s(f_a)\left[\tau - \frac{2}{c}r_{\text{ref}}\right]\right. \\ \cdot [1 + C_s(f_a)]^2 \left.\right\} \exp\left\{j\pi k^2 \frac{\lambda}{3c} \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)}\right. \\ \cdot \left.\left[\tau - \frac{2}{c}r_{\text{ref}}[1 + C_s(f_a)]\right]^3\right\} \quad (16)$$

式(9)经过 ECS 因子相乘后变换到二维频率域可得

$$SS_{\text{ECS}}(f_r, f_a; r_0) = A_3 \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}[r_0 + r_{\text{ref}}C_s(f_a)]f_r\right\} \\ \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi r_0}{\lambda}\gamma(f_a)\right\} \exp\left\{-j\pi\frac{\gamma(f_a)}{k_s(f_a; r_{\text{ref}})}f_r^2\right\} \\ \cdot \exp[j\phi'(f_a; r_0)] \quad (17)$$

式中 A_3 为复常数, $\phi'(f_a; r_0)$ 为乘以 ECS 因子后的相位剩余, 表达式为

$$\phi'(f_a; r_0) = \frac{4\pi}{c^2}k_s(f_a; r_{\text{ref}})[1 + C_s(f_a)]C_s(f_a)(r_0 - r_{\text{ref}}) \\ + \frac{8\pi\lambda}{3c^4}k^2 \frac{[1 - \gamma^2(f_a)] \cdot [6\gamma(f_a) - 2\gamma^2(f_a) - 3]}{\gamma^5(f_a)} \\ \cdot (r_0 - r_{\text{ref}})^3 \quad (18)$$

由此可见, ECS 算法与 CS 算法相比, 经过 CS 操作之后的目标回波二维频谱中引入了 $(r_0 - r_{\text{ref}})$ 的三次项。与 CS 类似, 补偿式(17)中 f_r 各阶系数完成距离迁徙校正、距离压缩和二次距离压缩, 在距离-多普勒域补偿其余两项完成方位压缩和方位向剩余相位补偿, 最后对多普勒频率逆变换得到图像。

(3) NCS 算法 非线性 CS(Nonlinear FM Chirp Scaling)

是针对大斜视角 SAR 提出的, 实现了对 SAR 回波二维频谱的更精确补偿。斜视 SAR 模式造成点目标回波多普勒中心偏离相位对称中心, 形成距离走动甚至距离弯曲, 所以式(6)必须考虑 (f_r/f_c) 的二次以上项。这里, 仅是数学推导, 仅考虑二维频域出现三次相位, 而不追究其斜视工作模式造成的多普勒中心频偏。若将相位因子展开到 (f_r/f_c) 的三次项, 可有

$$\varphi(f_r, f_a; r_0) \doteq \varphi_{\text{TH}}(f_r, f_a; r_0) \\ = p_0(f_a; r_0) + p_1(f_a; r_0) \frac{f_r}{f_c} + p_2(f_a; r_0) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 \\ + p_3(f_a; r_0) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 \\ = -\frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a) - \frac{4\pi r_0}{\lambda} \cdot \frac{1}{\gamma(f_a)} \cdot \frac{f_r}{f_c} + \frac{2\pi r_0}{\lambda} \\ \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \frac{\pi r_0}{2\lambda} \cdot \frac{4 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^5(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 \quad (19)$$

为消除三次项的影响, NCS 算法在 CS 操作之前进行了二维频域滤波^[4], 即

$$SS_{\text{NCS}}(f_r, f_a; r_0) = \exp\left[j\varphi_{\text{TH}}(f_r, f_a; r_0) - j\frac{\pi}{k}f_r^2\right] \\ \cdot \exp\left[j\frac{2\pi}{3}Y(f_a)f_r^3\right] \quad (20)$$

式中 $Y(f_a)$ 是随多普勒频率变化的三次相位滤波系数, 后文中确定其表达式。式(19)中 $p_3(f_a; r_0)/f_c^3$ 仍然很小, 且与目标距离 r_0 呈线性关系, 可以忽略它随距离的变化, 所以

$SS_{\text{NCS}}(f_r, f_a; r_0)$ 中 f_r 的三次项系数可写为

$$Y_m(f_a) = Y(f_a) + \frac{3}{2\pi} \frac{p_3(f_a; r_{\text{ref}})}{f_c^3} \quad (21)$$

NCS 算法的另一个近似是在利用驻定相位原理求 $SS_{\text{ECS}}(f_r, f_a; r_0)$ 的距离向频率逆变换时, 认为驻定相位点与三次相位无关, 则有回波的距离-多普勒域表达式为

$$\begin{aligned} sS_{\text{NCS}}(\tau, f_a; r_0) &= A_4 \exp\left[-j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a)\right] \\ &\cdot \exp\left\{j\pi k_s(f_a; r_0) \left[\tau - \frac{2}{c} r_0 [1 + C_s(f_a)]\right]^2\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j\pi \frac{2\pi}{3} Y_m(f_a) k_s^3(f_a; r_0) \left[\tau - \frac{2}{c} r_0 [1 + C_s(f_a)]\right]^3\right\} \end{aligned} \quad (22)$$

式中 A_4 为复常数。接下来乘以 CS 因子以达到不同距离位置点目标回波的距离迁徙曲率一致

$$\begin{aligned} H_{\text{NCS}}(\tau, f_a; r_{\text{ref}}) &= \exp\left\{j\pi q_2(f_a) \left[\tau - \frac{2}{c} r_{\text{ref}} [1 + C_s(f_a)]\right]^2\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j\pi q_3(f_a) \left[\tau - \frac{2}{c} r_{\text{ref}} [1 + C_s(f_a)]\right]^3\right\} \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $q_2(f_a)$ 、 $q_3(f_a)$ 是待定系数。

NCS 算法引入非线性滤波的目的就是要消除大斜视角带来的空变距离迁徙, 确定待定系数 $Y(f_a)$ 、 $q_2(f_a)$ 、 $q_3(f_a)$ 即体现了这一思想。仍然利用驻定相位原理, 将 CS 操作后的距离-多普勒信号再次变换到二维频域, 并将二维频谱表示成距离向频率 f_r 的级数形式。与上文推导类似, f_r 的一次项系数对应目标的距离向位置和距离迁徙, 由于距离-多普勒表达式中引入了三次项, 则可将该系数写成 $[r_0 + r_{\text{ref}} C_s(f_a)]$ 的级数形式, 令二次项系数为 0, 即可使距离迁徙曲线非空变; f_r 的二次项系数对应距离向调频率, 也可表示成 $[r_0 + r_{\text{ref}} C_s(f_a)]$ 的级数形式, 令其一次项系数为 0, 可消除 SRC 对距离的依赖。由此可得到待定系数的表达式为

$$\left. \begin{aligned} q_2(f_a) &= k_s(f_a; r_{\text{ref}}) C_s(f_a) \\ q_3(f_a) &= k_s^2(f_a; r_{\text{ref}}) [1 - \gamma(f_a)] \cdot \frac{\lambda}{3c} \cdot \frac{1 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^3(f_a)} \\ Y(f_a) &= \frac{1}{K_s(f_a; r_{\text{ref}})} \cdot \frac{\lambda}{2c} \cdot \frac{[1 + \gamma(f_a)] \cdot [2 - \gamma(f_a)]}{\gamma^2(f_a)} \\ &\quad - \frac{3}{2\pi} \frac{p_3(f_a; r_{\text{ref}})}{f_c^3} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

比较式(16)和式(23)可知, NCS 算法中 CS 因子的二次项系数与 ECS 算法中 CS 因子的二次项系数一致, 而在三次项系数上 NCS 补偿了参考点处目标的三次相位, 从而更加精确。至此, 我们可以写出经过非线性 CS 操作后的目标回波二维频谱:

$$\begin{aligned} SS_{\text{NCS}}(f_r, f_a; r_0) &= A_5 \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [r_0 + r_{\text{ref}} C_s(f_a)] f_r\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{\gamma(f_a)}{k_s(f_a; r_{\text{ref}})} f_r^2\right\} \exp\left\{-j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \gamma(f_a)\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j\phi''(f_a; r_0)\right\} \end{aligned} \quad (25)$$

式中 A_5 为复常数, $\phi''(f_a; r_0)$ 为

$$\phi''(f_a; r_0) = \psi_1(f_a; r_0) + \psi_2(f_a; r_0) + \psi_3(f_a, f_r) \quad (26)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(f_a; r_0) &= \frac{4\pi}{c^2} k_s(f_a; r_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_a)] C_s(f_a) (r_0 - r_{\text{ref}})^2 \\ \psi_2(f_a; r_0) &= \frac{8\pi\lambda}{c^4} k_s^2(f_a; r_{\text{ref}}) \frac{[1 - \gamma(f_a)] \cdot [1 - \gamma^2(f_a)]}{\gamma^5(f_a)} \\ &\quad \cdot (r_0 - r_{\text{ref}})^3 \\ \psi_3(f_a, f_r) &= \frac{\pi\lambda}{3c} \cdot \frac{1}{k_s(f_a; r_{\text{ref}})} \left\{ [1 - \gamma(f_a)] [1 - \gamma^2(f_a)] \right. \\ &\quad \left. + [1 + \gamma(f_a)] [2 - \gamma(f_a)] \gamma(f_a) \right\} f_r^3 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

各项物理意义为: $\psi_1(f_a; r_0)$ 是距离压缩剩余相位, 与 CS 算法中的 $\phi(f_a; r_0)$, ECS 算法中 $\phi'(f_a; r_0)$ 的第 1 项是完全一致的; $\psi_2(f_a; r_0)$ 是由于引入三次相位滤波带来的距离压缩剩余相位; $\psi_3(f_a, f_r)$ 也是三次相位滤波的产物, 用于修正距离压缩因子。同样, 可以补偿式(25)中 f_r 的各阶项和 $\psi_3(f_a, f_r)$ 完成距离压缩、二次距离压缩及距离迁徙校正, 然后在距离-多普勒域补偿 $\psi_1(f_a; r_0)$ 、 $\psi_2(f_a; r_0)$ 及方位压缩因子, 最后对多普勒频率逆变换得到图像。

比较式(11), 式(17)和式(25)可见, 除过剩余相位项, CS 类算法其余各项表达式完全相同。这说明, 各种修正 CS 算法中的滤波、补偿都是为了达到更好的消除二维耦合, 实现两维信号独立处理的目的。

3.2 低波段 UWB SAR 成像中的相位补偿

上文式(4)的近似是推导各种成像算法的前提, 然而对于长波长、大相对带宽的低频 UWB SAR, 以上算法对式(4)的近似性变差。虽然 NCS 算法补偿相位更加精确, 但仍然只能适合于 L 波段 10°斜视和 C 波段 20°斜视的情形^[4], 而对于中心波长为 0.75m 的 P 波段正侧视 SAR, 要求方位向分辨率为 1m, 处理波束角将达到 30°(考虑到方位向加权, 主瓣展宽), 波束边缘的回波信号等效于 SAR 斜视角 15°, 显然, NCS 算法也将无能为力。

式(24)中 $Y(f_a)$ 表明, NCS 算法在二维频域补偿参考点处高阶相位, 这为研究 UWB SAR 成像提供了新的思路。文献[5]中提出了一种适合 UWB SAR 成像的 NCS 算法, 在一定的测绘带内可以补偿回波高阶相位, 实现目标聚焦。若假设 UWB SAR 点目标的高阶相位与参考点处的高阶相位近似相等, 则可以在回波的二维频域乘以相位补偿因子

$H_{\text{ref}}(f_r, f_a; r_{\text{ref}})$ 消除高阶相位的影响。我们知道, CS 类算法的思想就是通过 CS 操作使得原本沿不同距离空变的目标距离迁徙修正为和参考点处的目标距离迁徙一致, 然后在二维频域统一完成距离迁徙校正。上文 CS, ECS 算法推导中近似二维频谱到距离向频率的二次项, 经过 CS 操作后的目标迁徙曲线在距离-多普勒域的表达式为

$$\tau_{\text{CS}}(f_a; r_0) = \tau_{\text{CS}}(f_a; r_{\text{ref}}) + \frac{2}{c}(r_0 - r_{\text{ref}}) \quad (28)$$

其中参考点处的距离迁徙为

$$\tau_{\text{CS}}(f_a; r_{\text{ref}}) = \frac{2}{c} \cdot r_{\text{ref}} C_s(f_a) \quad (29)$$

NCS 算法虽然考虑到距离向频率的三次项, 但在利用驻定相位原理求解时忽略了驻定相位点与三次相位的关系, 仍然可以推出该式。对于 UWB SAR, 目标二维频谱必须考虑距离向频率的二次以上项。若将相位因子展开到 (f_r/f_c) 的三次项, 如式(19), 根据驻定相位原理, 距离向时间 τ 和频率 f_r 存在如下关系:

$$f_r = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(C + \tau)}}{4\pi A} \quad (30)$$

式中 A, B, C 分别为距离向频率的二次、一次和常数项系数。由此可见, τ 与 f_r 存在非线性关系, 从而式(29)不再成立。若在此基础上进行 CS 操作, 则其他非参考点处的目标迁徙曲线同样不会满足式(29)。

为消除上述影响, 我们构造相位补偿因子 $H_{\text{ref}}(f_r, f_a; r_{\text{ref}})$, 使得参考点处目标的二维频谱消除高阶项, 只保留到二阶项。该补偿函数为

$$H_{\text{ref}}(f_r, f_a; r_{\text{ref}}) = -\varphi(f_r, f_a; r_{\text{ref}}) + \varphi_{\text{SE}}(f_r, f_a; r_{\text{ref}}) \quad (31)$$

对于非参考点位置的目标二维频域相位 $\varphi(f_r, f_a; r_0)$, 可认为多项式展开的常数、一次、二次及三次项随距离空变, 其余各项可以由参考点相应各阶补偿, 所以补偿以后的相位为

$$\varphi_{\text{CR}}(f_r, f_a; r_0) \doteq \varphi_{\text{SE}}(f_r, f_a; r_0) + (r_{\text{ref}} - r_0) \cdot \frac{\pi}{2\lambda} \cdot \frac{4 - \gamma^2(f_a)}{\gamma^5(f_a)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 \quad (32)$$

接下来的处理与 NCS 算法一致, 可写出目标的二维频谱为

$$SS_{\text{CR-NCS}}(f_r, f_a; r_0) = \exp\left[j\varphi_{\text{CR}}(f_r, f_a; r_0) - j\frac{\pi}{k}f_r^2\right] \cdot \exp\left[j\frac{2\pi}{3}Y'(f_a)f_r^3\right] \quad (33)$$

由于 $\varphi_{\text{CR}}(f_r, f_a; r_0)$ 的三次项系数是目标与参考点距离差的正比关系, 在一定的测绘带条件下该系数很小, 所以 $SS_{\text{CR-NCS}}(f_r, f_a; r_0)$ 中 f_r 的三次项系数为

$$Y'_m(f_a) = Y'(f_a) \quad (34)$$

并且, 当利用驻定相位原理求距离向频率的逆变换时, 假定驻定相位点与三次相位无关的近似性更好。与 NCS 步骤相

同, 可求出三次相位滤波系数为

$$Y'(f_a) = Y_m(f_a) = \frac{1}{K_s(f_a; r_{\text{ref}})} \cdot \frac{\lambda}{2c} \cdot \frac{[1 + \gamma(f_a)] \cdot [2 - \gamma(f_a)]}{\gamma^2(f_a)} \quad (35)$$

而 CS 因子系数 $q_2(f_a)$, $q_3(f_a)$ 及剩余相位补偿因子与 NCS 算法中的表达式一致。

4 算法性能仿真及成像结果

正侧视或大斜视高波段 SAR 成像算法性能分析已有大量文献论述^[1-4], 本节我们重点利用仿真及实测数据分析正侧视 UWB SAR 成像算法性能。

首先我们用仿真数据成像。具体仿真参数为: UWB SAR 以正侧视方式工作, 雷达发射线性调频信号时宽 t_p 为 $2\mu\text{s}$, 中心波长 λ 为 0.75m , 带宽 B 为 200MHz , 即距离向理论分辨率 ρ_r 为 0.75m , 采用正交解调接收回波, 采样率 f_s 为 250MHz ; 载机运动速度 v 为 110m/s , PRF 为 200Hz , 测绘带近端 2.5km , 测绘带宽 1km , 点目标分别布置在测绘带的近端、中心和远端, 参考点选在测绘带中心位置, 成像方位向处理角 α 为 30° , 则参考点处孔径长 L_{ap} 为 1.6km , 根据公式:

$$\rho_a = \lambda \cdot \kappa_a \sqrt{4 \sin(\alpha/2)} \quad (36)$$

(式中 κ_a 为方位向加窗扩展系数, 不作加权时令为 1) 参考点处方位向理论分辨率 ρ_a 为 0.58m 。其余目标点回波孔径长固定为参考点处孔径长。利用补偿参考点高阶相位的 NCS 算法得到各点成像结果, 见图 1。由于超宽带 SAR 回波二维频域的非矩形支撑, 点目标响应的非正交旁瓣十分显著^[7]。图 1 中为客观评价算法性能, 没有采取旁瓣抑制措施。表 1 列出了各点 3dB 宽(表征分辨率)、峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)(根据文献[8]定义)。由于二维信号的采样间距为 $0.60\text{m} \times 0.55\text{m}$ (距离向 \times 方位向), 指标测量时需要做插值, 因而表 1 中各点 3dB 宽受限于插值精度, 存在一定误差。由表 1 可见, 参考点处点目标可以精确聚焦, 两个方向的 PSLR 均达到 13dB; 非参考距离处点目标也能聚焦, 3dB 宽及方位向 PSLR 指标与参考点处基本相当, 但距离向旁瓣水平和 ISLR 指标稍差。我们仿真回波时限定孔径为参考点处孔径长, 所以近端目标距离向弯曲程度要比远端更大些, 校正更困难, 近端目标的距离向 PSLR 和 ISLR 指标比远端的差。相比之下, CS, ECS 和 NCS 算法对参考点目标成像结果分别如图 2 所示, 由于高阶相位没有补偿, 距离迁徙校正不完全, 点目标响应能量延距离弯曲扩散。ISLR 分别为 0.73dB , 0.80dB , 0.82dB , 指标恶化十分严重。参考点处目标不能聚焦, 非参考点处目标聚焦性能将更差。由此

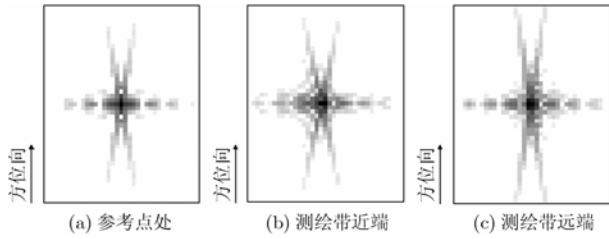


图 1 仿真数据利用适合 UWB SAR 的 NCS 算法成像结果 (图像动态范围: 0~−40dB)

表 1 仿真数据利用适合 UWB SAR 的 NCS 算法成像指标

目标位置	3dB 宽(m) (距离向×方位向)	PSLR(dB) (距离向×方位向)	ISLR(dB)
参考点处	0.6×0.6	13.4×14.3	6.9
测绘带近端	0.7×0.7	11.8×16.5	5.1
测绘带远端	0.7×0.8	12.2×15.3	6.2

可见, UWB SAR 成像必须补偿在二维频率域三次以上高阶相位, 才能实现点目标聚焦。

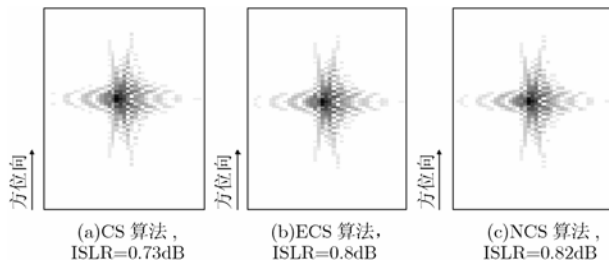


图 2 参考点处点目标分别利用 CS, ECS, NCS 算法成像结果 (图像动态范围: 0~−40dB)

处理真实的 UWB SAR 数据不仅仅要考虑补偿二维频谱相位, 更多的是解决工作在低频段、大处理角情况下的非正交旁瓣、射频干扰(RFI)和运动补偿问题。能够针对这些问题提出解决途径必将有力的支持 UWB SAR 成像算法性能的提高。如图 3 所示为一 P 波段 UWB SAR 回波成像结果, 成像区域为城区, 幅面 1.8km×2.0km(距离向×方位向)。成像步骤以本文提出的二维频谱补偿相位算法为基础, 结合实用化的消除非正交旁瓣、RFI 抑制和运动补偿办法, 得到的图像质量优良。

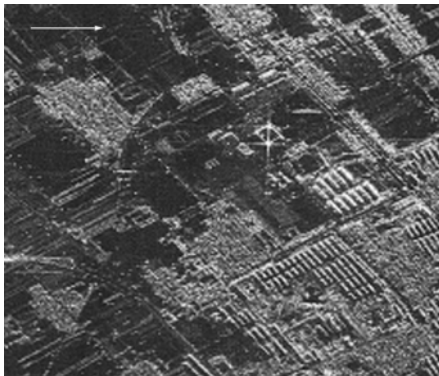


图 3 一段实测 UWB SAR 数据成像结果(图中箭头所指为方位向)

5 结束语

频域类 SAR 成像技术的根本目的就是将二维耦合信号分为两个独立的一维信号来处理, 消除二维耦合的好坏是能否获取聚焦优良图像的关键。对于高波段 SAR, 回波信号的二维频谱可以有不同程度的近似解耦合, 从而推导出 CS 类成像算法; 而低频 UWB SAR 回波需要处理更高阶的二维频谱, 一般的 CS 类算法不再合适。在二维频域补偿参考

点处高阶相位的 NCS 算法能够适合 UWB SAR 成像, 其有效性经仿真和实测数据均得以验证。我们发现, 高阶相位补偿仍然存在近似, 随着测绘带的增大, 非参考点处目标的相位误差将增大, 聚焦性能变差, 解决这一问题需要做进一步的研究。

参考文献

- [1] Jin M Y and Wu C. A SAR correction algorithm which accommodates large-range migration [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, GE-22(6): 592–597.
- [2] Namler R and Runge H. A novel processing SAR focussing algorithm based on chirp scaling. Proc. of IGARSS'92, Clear Lake, TX, May. 1992: 372–375.
- [3] Moreira A and Huang Yonghong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029–1040.
- [4] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 1996, 32(1): 121–133.
- [5] 刘光平. 超宽带 SAR 高效成像算法研究[D]. [博士学位]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [6] Raney R K. A new and fundamental Fourier transform pair. Proc. of IGARSS'92, Clear Lake, TX, May 1992: 106–107.
- [7] Huang Xiaotao and Wang Liang. Non-orthogonal sidelobe suppression in image formation of ultra wide bandwidth SAR. Proc. of EUSAR'04. Ulm, Germany, May 2004: 199–202.
- [8] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 169–170.

- 王 亮: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为超宽带 SAR 成像及运动补偿.
- 王 建: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为超宽带 SAR 实时成像.
- 黄晓涛: 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、现代谱分析理论.
- 周智敏: 男, 1957 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代雷达系统设计、实时信号处理.