

机载斜侧视 SAR 带状区域成象¹

代胜利 黄顺吉

(电子科技大学 成都 610054)

摘 要 常用的 SAR 大都采用正侧视带状区域成象, 而机载斜侧视 SAR 带状区域成象, 具有机动性强, 应用范围广的特点, 但它的处理, 理论上为完全的距离方位二维处理。本文从斜侧视 SAR 的成象工作原理出发, 比较了二维 FFT 算法、快速多项式变换 (FPT) 方法, 以及直接校正后两个独立一维处理方法, 讨论了斜侧视 SAR 成象处理的情况。

关键词 斜侧视, 合成孔径雷达, 距离迁移, 成象处理

中图分类号 TN958

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种先进的微波成象系统。高分辨力和全天候的优点, 使其在地球遥感、海洋研究、资源勘探、灾情预报和军事侦察等领域得到了广泛的应用。SAR 正侧视带状区域成象的体制应用最为广泛, 其成象技术已相当成熟^[1,2]。

有关 SAR 的文献中, 也曾提及 SAR 斜侧视带状区域成象, 从原理上来讲, 正侧视 SAR 是斜侧视 SAR 的一个特例。斜侧视 SAR 成象因大的距离迁移存在, 其成象处理是完全的二维现象, 且其方位多普勒信号因斜侧视工作方式而发生畸变, 它的理论方位分辨力在同样参数条件下比正侧视 SAR 稍低。但在实际应用上, 斜侧视 SAR 的应用领域更广、机动性更强。它的成象区域不再局限于 SAR 的正侧视方向, 具有对雷达的侧前方区域预先成象和对雷达的侧后方目标区域再次或多次成象的特长, 这一点对军事应用特别重要。

近年来有关 SAR 斜侧视成象工作模式的研究有一些论文发表, 如文献 [3], 它只适合小角度斜侧视情况。在文献 [4] 中提出的 "Chirp Scaling" 方法, 是针对斜侧视 SAR 的成象处理方法, 它可以较好地校正大的距离移动, 但它的处理需要完全的二维处理, 即将合成孔径内接收到的原始信号数据变换到距离-多普勒域中去, 在该变换域中对每一距离线相乘一个相对变化的二次相位函数, 用来校正距离的非线性移动。由此可见, 该方法需要的计算量很大, 不利于实现斜侧视 SAR 的实时成象。但斜侧视 SAR 的应用价值的最重要体现却是以其具有极强的实时成象为前提的。在本文中, 根据 SAR 斜侧视成象原理, 从二维 FFT 这个基本处理方法分析出发, 提出两种可行的 SAR 斜侧视实时成象处理的方法: 采用 FPT 的处理和直接校正后的两个一维处理。

2 斜侧视 SAR 成象的二维 FFT 处理

基本的斜侧视 SAR 带状成象工作几何关系示于图 1。SAR 的天线在高度 h 飞过成象区域。雷达回波信号的最一般表达形式, 应包含斜侧视角变量和斜距变量。雷达和地面成象区域内一点目标 P 之间的瞬时斜距可表示为

$$r(x) = (x^2 + r_F^2 + 2xr_F \cos \eta_s)^{1/2}, \quad (1)$$

¹ 1995-05-23 收到, 1995-12-30 定稿
863 项目资助课题

式中 x 是沿雷达飞行路线的距离变量, 设 P 点目标在 $x = 0$ 时, 对应于合成孔径 L_s 的中心. r_F 是 P 到 L_s 中心的斜距, η_s 为斜侧视角的余角, 定义为斜距与雷达飞行方向之间的夹角, 如图 1 所示.

为了便于分析, 用 Taylor 级数展开 (1) 式:

$$r(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots, \tag{2}$$

式中 $a_0 = r_F$, $a_1 = -\cos \eta_s$, $a_2 = \sin^2 \eta_s / (2r_F)$, $a_3 = \cos \eta_s \sin^2 \eta_s / (2r_F^2)$, $a_4 = \sin^2 \eta_s (5 \cos^2 \eta_s - 1) / r_F^3, \dots$. 实际应用中, $r_F \gg x$, (2) 式各项收敛很快, 常忽略三次以上的高次项的影响, 将其近似为

$$r(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \tag{3}$$

(3) 式三次项的影响很小, 在非精细成像情况下或在一定条件限制内, 也可忽略. 从 (3) 式可以看到, 斜侧视 SAR 距离移动很大, 因此它造成斜侧视 SAR 成象为完全的方位距离二维现象.

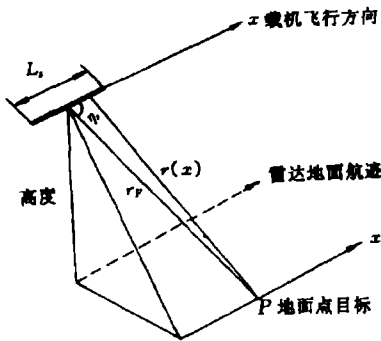


图 1 斜侧视 SAR 成象的几何关系图

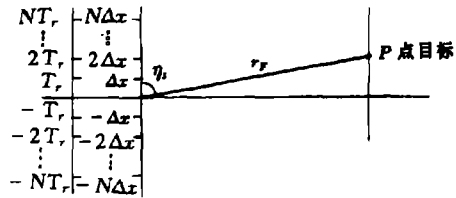


图 2 SAR 发射脉冲位置点阵

SAR 发射信号一般用窄带信号, 表示为

$$S_i(t) = a(t) \exp[-j(1/2)k_r t^2] \cdot \exp(j\omega_c t), \tag{4}$$

$a(t)$ 为信号的复包络, 一般为矩形窗, 长度为 τ . k_r 为线性调频常数, ω_c 为载频常数. 因为 SAR 发射信号形式为单脉冲式的, 雷达发射脉冲点的空间位置排成间隔为 $\Delta x = v_a T_r$ 的点阵, v_a 为载机速度, T_r 为脉冲重复周期, 如图 2 所示. 一点目标 P 从第 n 个脉冲返回的信号形式为

$$S(t - nT_r - 2r(nT_r)/c) = \sigma G(-nT_r v_a / r_F) a(t - nT_1 - 2r(nT_r)/c) \times \exp\{-j(1/2)k_r (t - nT_r - 2r(nT_r)/c)^2\} \cdot \exp\{j\omega_c (t - nT_r - 2r(nT_r)/c)\}, \tag{5}$$

式中 σ 是 P 点的雷达散射系数, $G(\cdot)$ 是 P 点的天线增益形式. 利用距离快变和方位慢变时间的概念, 定义方位时间 $t_1 = nT_r$ 和距离时间 $t_2 = (t - nT_r)$, 因此 $0 \leq t_2 \leq T_r$, (5) 式可写成 t_1 、 t_2 的二元函数:

$$S(t_2, t_1) = \sigma G(-v_a t_1 / r_F) a(t_2 - 2r(t_1)/c) \cdot \exp[-j(1/2)k_r (t_2 - 2r(t_1)/c)^2] \times \exp[j\omega_c (t_2 - 2r(t_1)/c)], \tag{6}$$

这里

$$a(t_2 - 2r(t_1)/c) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_2 - 2r(t_1)/c \leq \tau; \\ 0, & \text{其它}; \end{cases} \quad (7)$$

τ 为发射脉冲宽度。

考虑到雷达的照射区域被认为是分布点目标的集合, 回波信号形式为

$$p(t_1, t_2) = \sum_j \{ \sigma_j G[(x_j - v_a t_1)/r_F(j)] a(t_2 - 2r_j(t_1)/c) \exp[-j(1/2)k_r(t_2 - 2r_j(t_1)/c)^2] \\ \times \exp[j\omega_c(t_2 - 2r_j(t_1)/c)] \}, \quad (8)$$

式中 σ_j 为 j 点目标的雷达散射系数, $r_F(j)$ 为 j 点目标的参考斜距, x_j 为 j 点目标的方位坐标。为了分析简单起见, 只考虑点目标 P 在成象区域内, 且其散射系数 $\sigma = 1$, 不考虑 $G(\theta)$ 的影响。由此距离压缩可由 $S(t_1, t_2)$ 与发射信号的互相关来实现, 有

$$S(t_1, t_2) = S_t^*(t_1, t_2) * S_r(t_1, t_2) \\ = \psi_{S_t S_t}(t_2 - 2r(t_1)/c) \cdot \exp[-j\omega_c \cdot 2r(t_1)/c] \cdot \text{rect}[v_a t_1/L_s], \quad (9)$$

式中 $\psi_{S_t S_t}(\cdot)$ 为自相关函数。方位压缩是二维处理, 用二维 FFT 来实现。对 (9) 式进行 FFT 变换得其频域表示

$$S(f_{t_1}, f_{t_2}) = \psi_{S_t S_t}(f_{t_2}) \cdot \int \text{rect}[v_a t_1/L_s] \cdot \exp[-j2\omega_c r(t_1) f_{t_2}/c] \cdot \exp[-j2\pi f_{t_1} t_1] dt_1 \\ = \psi_{S_t S_t}(f_{t_2}) \int \text{rect}[v_a t_1/L_s] \cdot \exp[-j\rho(t_1)] dt_1. \quad (10)$$

用驻定相位原理, 且对上式积分两次近似可得

$$S(f_{t_1}, f_{t_2}) = \psi_{S_t S_t}(f_{t_2}) \text{rect}[f_{t_1}/\Delta f_{t_1}] H(f_{t_1}, f_{t_2}). \quad (11)$$

传递函数 $H(f_{t_1}, f_{t_2})$ 定义为

$$H(f_{t_2}, f_{t_1}) = f_{t_2}/[f_{t_2}^2 - f_{t_1}^2 c^2/(4v_a^2)]^{3/4} \cdot \exp(-j\pi/4) \\ \times (c r_F)^{1/2}/(2v_a) \cdot \exp\{(-j4\pi r_F/c)[f_{t_2}^2 - f_{t_1}^2 c^2/(4v_a^2)]^{1/2}\} \quad (12)$$

因此二维 FFT 算法的实现包含下列独立的步骤: (1) 通常的距离压缩; (2) 距离压缩后数据的 2-DFFT; (3) 带通 $\text{rect}[f_{t_1}/\Delta f_{t_1}]$ 的实现; (4) 方位压缩二维匹配滤波处理: 相乘 $H^*(f_{t_1}, f_{t_2})$; (5) 二维逆 FFT。这个算法除了输出积分的分辨力作了近似外, 没有采用别的近似, 因此压缩处理相当精确, 处理只采用二维 FFT 技术, 对原始数据的聚焦只要求几个参数。二维处理方法还可参见文献 [5, 6]。

3 斜侧视 SAR 成象快速多项式变换处理

斜侧视 SAR 成象处理实质上是二维卷积。近年来, Nussbaumer 等^[7] 和 Truong 等^[8] 提出的快速多项式变换 (FPT) 用来计算二维卷积的方法, 它结合余数理论 (CRT) 能有效地计算 $d_1 \times d_2$ 复阵列的二维周期卷积, 其中 $d_2 = 2^m$ 和 $d_1 = 2^{m-r+1}, 1 \leq r \leq m$ 。FPT 二维卷积算法比直接的二维 FFT 要求明显少的乘法计算和大约相等的加法计算量。

上节斜侧视 SAR 的二维匹配滤波, 若先不考虑天线增益的影响可写为

$$h(t_1, t_2) = \begin{cases} \exp[-j4\pi r(t_1)/\lambda] \exp[j(1/2)k_r(t_2 - 2r(t_1)/c)^2], & (t_1, t_2) \in R; \\ 0, & \text{其它;} \end{cases} \quad (13)$$

其中 R 为成象区域的二维点分布, $\exp[-j4\pi r(t_1)/\lambda]$ 和 $\exp[j(1/2)k_r(t_2 - 2r(t_1)/c)^2]$ 是方位和距离匹配滤波器, 这个滤波器与原始数据的二维卷积能用 FPT 来计算. 基 2 FPT 算法在文献 [8] 中有详细介绍. 本文之所以采用 FPT, 是因为它在某些方面比 FFT 更有效.

两阵列的二维周期卷积定义为

$$c_{n_1, n_2} = \sum_{t_1=0}^{d-1} \sum_{t_2=0}^{d-1} a_{t_1, t_2} b_{(n_1-t_1), (n_2-t_2)}, \quad 0 \leq n_1, n_2 \leq d-1. \quad (14)$$

这里 $d = 2^m$, (x) 表示 x 对 d 的余数.

定义

$$A_{t_1}(Z) = \sum_{t_2=0}^{d-1} a_{t_1, t_2} Z^{t_2}. \quad (15)$$

同样定义 $B_{t_1}(Z)$ 和 $C_{n_1}(Z)$ 分别对应于 b_{t_1, t_2} 和 c_{n_1, n_2} . 这样 (14) 式可表示为一维多项式卷积, 即

$$\begin{aligned} C_{n_1}(Z) &= \sum_{t_1=0}^{d-1} A_{t_1}(Z) B_{(n_1-t_1)}(Z) \bmod Z^d - 1 \\ &= \sum_{t_1=0}^{d-1} A_{t_1}(Z) B_{(n_1-t_1)}(Z) \bmod (Z^{d/2} - 1)(Z^{d/2} + 1), \quad 0 \leq n_1 \leq d-1. \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $(Z^{d/2} - 1)$ 和 $(Z^{d/2} + 1)$ 相对互质, 对多项式用余数理论可使 (16) 式等同于

$$C_{n_1}^+(Z) = C_{n_1}(Z) \bmod (Z^{d/2} + 1), \quad (17a)$$

$$C_{n_1}^-(Z) = C_{n_1}(Z) \bmod (Z^{d/2} - 1). \quad (17b)$$

有一特解 $C_{n_1}(Z)$ 为

$$C_{n_1}(Z) = (1/2)[C_{n_1}^-(Z)(Z^{d/2} + 1) - C_{n_1}^+(Z)(Z^{d/2} - 1)] \cdot \bmod Z^d - 1. \quad (18)$$

(17a) 式中 $C_{n_1}^+(Z)$ 的推导过程如下: 定义 $A^+_{t_1}(Z) = \sum_{t_2=0}^{d/2-1} a^+_{t_1, t_2} Z^{t_2}$, 这里 $a^+_{t_1, t_2} = a_{t_1, t_2} - a_{t_1, t_2-d}$, 那么 (17a) 变为 $C_{n_1}^+(Z) = \sum_{t_1=0}^{d-1} A^+_{t_1}(Z) B^+_{(n_1-t_1)}(Z) \bmod Z^{d/2} + 1$. 同样 $B^+_{t_1}(Z)$ 可用 $b_{i,j}$ 代替 $A^+_{t_1}(Z)$ 中的 $a_{i,j}$ 获得. 定义 $A^+_{t_1}(Z)$ 的 d 点多项式变换为

$$\tilde{A}^+_k(Z) = \sum_{t_1=0}^{d-1} A^+_{t_1}(Z) Z^{t_1 k} = \sum_{l=0}^{d/2-1} a^+_{k,l} Z^l \bmod Z^{d/2} + 1. \quad (19)$$

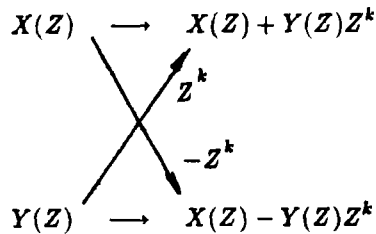
$B_{t_1}^+(Z)$ 的 d 点多项式变换 $\tilde{B}_k^+(Z)$, 可将 (19) 式中 $a_{k,l}^+$ 由 $b_{k,l}^+$ 代替而得到。由此得

$$\tilde{C}_k^+(Z) = \tilde{A}_k^+(Z) \cdot \tilde{B}_k^+(Z) = \sum_{l=0}^{d/2-1} \tilde{c}_{k,l}^+ Z^l \text{mod} Z^{d/2} + 1. \quad (20)$$

对 $\tilde{C}_k^+(Z)$ 进行逆变换得

$$C_{n_1}^+(Z) = \frac{1}{d} \sum_{k=0}^{d-1} \tilde{C}_k^+(Z) Z^{-kn_1} = \sum_{t_1=0}^{d-1} A_{t_1}^+(Z) \times B_{(n_1-t_1)}^+(Z) \text{mod}(Z^{d/2} + 1), \quad 0 \leq n_1 \leq d-1. \quad (21)$$

由于 $d = 2^m$, 再运用余数理论, (19) 和 (20) 式都可用 FFT 结构的算法来实现, 其频域抽样的蝶形运算为



将运算 $Y(Z)Z^k \text{mod} Z^d - 1$ 作为 Z 变换, 可以证明这个蝶形可用简单的周期移动来计算。为了计算 (20) 式给出的 $\tilde{C}_k^+(Z)$, $0 \leq k \leq d-1$, (20) 式可以变换为

$$\tilde{C}_k^+(\alpha u) = \tilde{A}_k^+(\alpha u) \tilde{B}_k^+(\alpha u) \text{mod}(u^{d/2} - 1). \quad (22)$$

用映射 $Z = \alpha u$ 将变量 Z 变换到 u , 其中 α 是 -1 的第 $d/2$ 次原根, 即 $\alpha^{d/2} = -1$ 。可以证明上述多项式与 $\text{mod} u^{d/2} - 1$ 的积能用两个 $d/2$ 点的多项式 $\tilde{A}_k^+(\alpha u)$ 和 $\tilde{B}_k^+(\alpha u)$ 的循环相关来求得。这个循环卷积能用 FFT 算法来计算。最后代换 $\tilde{C}_k^+(u)$ 中的 $u = \alpha^{-1}Z$ 而得到 $\tilde{C}_k^+(Z)$ 。

同样对 (17b) 式, 用映射 $Z = \alpha u$, $\alpha^{d/2} = 1$, 将 $C_{n_1}^-(Z)$ 转换为 $C_{n_1}^-(\alpha u) \text{mod} u^{d/2} + 1$, 用 FPT 计算出 $C_{n_1}^-(\alpha u)$, 最后代换 $C_{n_1}^-(\alpha u)$ 中的 $u = \alpha^{-1}Z$ 而得到 $C_{n_1}^-(Z)$ 。

文献 [9] 中讨论了 FPT 对 Seasat SAR 的成像处理并给出了处理结果。斜侧视 SAR 成像可以用 FPT 来作为处理技术, FPT 在计算量上要比二维 FFT 少近四分之一。

4 斜侧视 SAR 成像处理的直接校正方法

前两节分析是依据斜侧视 SAR 成像原理, 针对距离迁移造成斜侧视 SAR 成像为二维现象的实质, 对其采用二维 FFT 和二维卷积的 FPT 方法处理。我们都知道二维处理方法不易于实现成像的实时性, 因此本节从校正处理的角度出发, 拟采用易于实时成像的混合相关算法来对斜侧视 SAR 原始数据进行处理。

由 (4) 式的发射信号, 以距离上时间 t 和方位上平台飞行距离 x 为变量, 将 P 点目标的回波信号表达为简便的连续信号形式

$$s_r(t, x) = a(t - 2r(x)/c) \cdot \exp[-j(1/2)k_r(t - 2r(x)/c)^2] \cdot \exp[j\omega_c(t - 2r(x)/c)]. \quad (23)$$

将 (3) 式的瞬时斜距 $r(x)$ 代入上式, 分析其相位函数 $\varphi_s(t, x)$:

$$\begin{aligned} \varphi_s(t, x) = & \omega_c(t - 2r_F/c) - (2\omega_c/c)(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) \\ & - (1/2)k_r(t - 2r_F/c)^2 + k_r(t - 2r_F/c)(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) \\ & - (1/2)k_r(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)^2. \end{aligned} \quad (24)$$

从上式可清楚地看到, 斜侧视 SAR 成象之所以是二维的, 是因为距离迁移造成严重的方位距离耦合。图 2 所示 SAR 发射信号是脉冲形式的, 可在距离压缩之前, 对接收的原始数据在每一合成孔径组成点 x 进行消除耦合的校正处理, 即

$$\begin{aligned} s_r(t, x) = & a(t - 2r(x)/c) \cdot \exp[j\omega_c(t - 2r(x)/c)] \cdot \exp[-j(1/2)k_r(t - 2r(x)/c)^2] \cdot p(x) \\ = & a(t - 2r(x)/c) \cdot \exp[j\omega_c(t - 2r(x)/c)] \cdot \exp[-j(1/2)k_r(t - 2r_F/c)^2]. \end{aligned} \quad (25)$$

$p(x)$ 为校正函数, 定义为

$$p(x) = \exp[-jk_r(t - 2r_F/c)(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)] \cdot \exp[j(1/2)k_r(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)^2]. \quad (26)$$

这样 P 点的耦合被完全消除。由于成象区域为点分布, P 点以外的点目标的耦合没有被完全消除, 但在处理时适当选取区域的大小, 剩余耦合的影响也可以忽略不计, 后面将对剩余耦合的影响进行分析。

同样处理, 可消除 (24) 式中方位多普勒信号的畸变。产生一补偿信号 $q(x)$, 定义为

$$q(x) = \exp[-j\omega_c(a_1x + a_3x^3)].$$

与原始数据相乘可以消除 P 点目标的方位多普勒信号的畸变, 得到校正后的回波信号为

$$\begin{aligned} s_r(t, x) = & a(t - 2r(x)/c) \cdot \exp[j\omega_c t] \cdot \exp(j\omega_c a_0) \cdot \exp(-j\omega_c a_2 x^2) \\ & \times \exp[-j(1/2)k_r(t - 2r_F/c)^2]. \end{aligned} \quad (27)$$

这样从 (27) 式出发, 推导出斜侧视 SAR 的匹配滤波冲激响应函数 $h_s(t, x)$:

$$\begin{aligned} h_s(t, x) = & [\tau \cdot \exp(-j(1/2)k_r t^2) \cdot \sin(\pi t/\tau_r)/(\pi t/\tau_r)] \\ & \times \{L_s \cdot \exp[-j2\pi x^2/(\lambda r_F)] \cdot \sin(\pi x/\rho_a)/(\pi x/\rho_a)\}, \end{aligned} \quad (28)$$

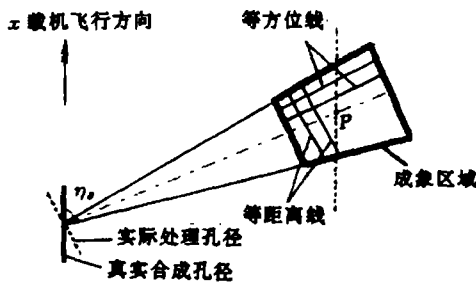


图 3 斜侧视 SAR 成象区域与合成孔径的几何关系

式中 τ 为信号脉宽, $\tau_r = 2\pi/(k_r\tau)$ 为线性调频压缩后主瓣宽度, 它决定雷达距离分辨率。 (28) 式中 $\rho_a = \lambda r_F/(2L_s \sin \eta_0)$ 为斜视 SAR 处理后方位主瓣宽度, 决定方位分辨率。到此斜侧视 SAR 成象可用近似精确的两个独立的一维处理来实现。且现有的各种正侧视 SAR 成象方法也大都可用于斜侧视 SAR。这种直接校正方法, 可反映到图 3 中。

下面分析这种校正的精确度。同一成象区域内点目标 E , 它与 P 点在斜距上相差 Δr , 方位上相差 Δx 对应方位角 $\Delta\varphi$, 其三次项系数 a_3^E 为 $a_3^E = \cos(\eta_0 + \Delta\varphi) \sin^2(\eta_0 + \Delta\varphi)/[2(r_F + \Delta r)^2]$ 。

如果 $r_F = 200\text{km}$, $\eta_s = 45^\circ$, $\Delta r = 1\text{km}$, $\Delta x = 1\text{km}$, 由上式可得 $|(a_3^1 - a_3)/a_3| \approx 0.5 \times 10^{-2}$. 这个比值极小, 因此消除 P 点三次相位信号的方法, 也能很好地适用于成象区域内的其它目标. 同样可以分析一次相位信号的消除也同样精确. 这个方法的实质是保证目标点的三次相位与一次相位相对不变, 从而达到校正目的.

5 结 论

针对本文斜侧视 SAR 成象方法, 进行了机载 SAR 对两点目标区域成象的计算机模拟. 图 4 为二维 FFT 方法和 FPT 方法所得到的成象响应结果, 斜视角为 45° . 这两种方法所得结果一样, 完全校正了大的距离移动. 图 5 为直接校正方法处理结果, 斜视角仍为 45° . 比较两图, 图 5 中偏离中心参考点的点目标响应稍稍有些展宽. 三种方法的基本计算量比较如表 1 所示. 另外, 因斜侧视角可变, 如果斜侧视角为 -45° 或其它, 则是对后方区域斜侧视成象.

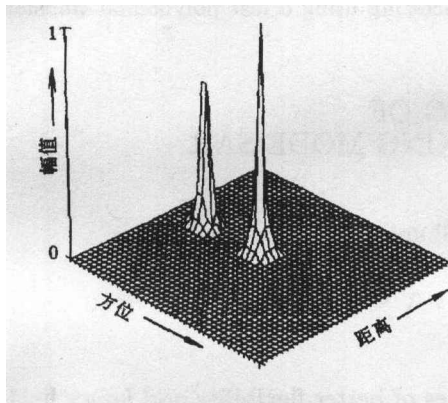


图 4 二维处理两点目标斜侧视 SAR($\eta_s = 45^\circ$) 成象响应

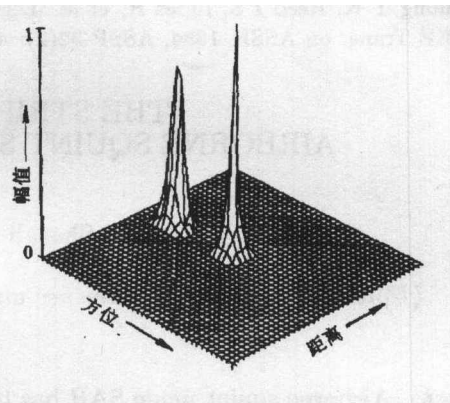


图 5 一维处理两点目标斜侧视 SAR($\eta_s = 45^\circ$) 成象响应

表 1 斜侧视 SAR 成象处理三种方法基本计算量比较

$d_1 \times d_2$	FPT 2-D 卷积			FFT 2-D 卷积		2 个一维 FFT 实现	
	乘法	加法	移位	乘法	加法	乘法	加法
32×32	23552	48640	384	45056	63488	12544	26752
64×64	110592	233472	896	212992	303104	66048	131328
128×128	507904	1089536	2048	983040	1409024	328704	623104
256×256	2293760	4980736	4608	4456448	6422528	1674912	918528

本文三种斜侧视 SAR 成象的方法中, 二维 FFT 是精确的但最难于实现实时的成象方法; FPT 方法具有同样的绝对精确性, 且其实时性较好; 直接校正方法具有最好的实时性, 但是近似的匹配滤波处理, 可胜任非精细但要求实时性高的应用领域. 本文从高分辨力和高实时性出发提出了斜侧视 SAR 带状区域成象的 FPT 方法和直接校正处理方法, 并对比了二维 FFT 的成象方法和结果, 验证了 FPT 方法和直接校正处理方法在斜侧视 SAR 带状区域成象中的应用价值和优势.

参 考 文 献

- [1] Wu C, Liu K Y, Jin M. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals. IEEE Trans. on AES, 1982, AES-18(5): 562-574.
- [2] Wu C, Jin M. A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1992, GRS-30(6): 592-597.

- [3] Chang C Y, Jin M, Curlande J C. Squint mode SAR processing algorithm. in Proc. IGARSS'89, Vancouver: 1989, 1702-1706.
- [4] Moreira A, Yonghong H. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1994, GRS-32(5): 1029-1040.
- [5] Aining Li, Loffeld Otmar. Two dimensional SAR processing in the frequency domain, In Proc. IGARSS'91, Espoo, Finland: 1991, 1056-1068.
- [6] Franceschetti G, Schirizzi G. A SAR processor based on two dimensional FFT codes. IEEE Trans. on AES, 1990, AES-26(2): 356-365.
- [7] Nussbarmer H J, Quandalle P. Computation of convolutions and discrete Fourier transforms by polynomial transforms. IBM J. Res. Develop., 1978, 22(2): 134-144.
- [8] Truong T K, Reed I S, Lipes R, *et al.* On the application of a fast polynomial transform and the Chinese remainder theorem to compute a two-dimensional convolution. IEEE Trans. on ASSP, 1981, ASSP-29(2): 91-97.
- [9] Truong T K, Reed I S, Lipes R, *et al.* Digital SAR processing using a fast polynomial transform. IEEE Trans. on ASSP, 1984, ASSP-32(2): 419-425.

THE STRIP IMAGING OF AIRBORNE SQUINT SIDELOOKING MODE SAR

Dai Shengli Huang Shunji

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

Abstract Airborne squint mode SAR has the advantages of better flexibility and larger field in applications than the classic sidelooking mode SAR. But the imaging processing of squint mode SAR is a strict two-dimensional phenomenon. This paper compares the 2-D FFT method, fast polynomial transform(FPT) method and two 1-D FFT method for the imaging processing of squint mode SAR.

Key words Squint sidelooking, SAR, Range migration, Imaging processing

代胜利: 男, 1971年生, 博士生, 主要研究 SAR 信号处理.

黄顺吉: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、SAR、ISAR 和导航方面的研究.

$Z^k \quad -Z^k \quad Z^k \quad -Z^k$