

改进的接收机固定双站 NLCS 成像方法

陈晓龙^{①②} 丁赤飏^① 梁兴东^① 吴一戎^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文针对机载双站 SAR 收、发系统分置的特点, 首先建立了接收机静止模式下双站 SAR 的回波信号模型, 然后分析该模式下几何特点、距离徙动及距离徙动差和方位向调频率的变化情况, 接着讨论距离多谱勒域距离向调频率的变化情况, 并提出了方位向调频率扰动函数的解析表达式, 在此基础上结合单站的 CS 算法实现接收机静止的双站 SAR 数据聚焦, 并对应用此成像算法所得扭曲聚焦图像进行几何校正处理。仿真实验验证了该文提出的方法的正确性和在接收机静止模式下应用此算法处理大测绘带成像的可行性。

关键词: 双站 SAR; NLCS; 信号相位; 聚焦质量

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1041-06

An Improved NLCS Imaging Algorithm of Bistatic SAR with a Stationary Receiver

Chen Xiao-long^{①②} Ding Chi-biao^① Liang Xing-dong^① Wu Yi-rong^①

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper starts from a signal model of a stationary receiver configuration in airborne bistatic SAR systems which are characterized by spatially separated transmitters and receivers. Through analyzing the system geometrical characteristic, the range cell migration, the influence of the difference on the range cell migration and the change of the linear FM rate both in range and azimuth direction in RD field are discussed. And then a nonlinear perturbation function is deduced to equalize the targets' FM rates in azimuth direction. After that, an imaging algorithm based on the CSA for bistatic SAR with a stationary receiver is get, and the distorted image is corrected. Finally the validity and the feasibility of dealing with big mapping zone of the algorithm proposed with this paper is supported with point target simulation experiments.

Key words: Bistatic SAR; NLCS; Signal phase; Focusing quality

1 引言

双站 SAR 由于收发系统互相分开, 分置于不同的平台上, 使其与单站 SAR 相比有以下优点: 接收机可以获得目标多方向的散射信息, 从而获得目标各个方向的像; 接收机由于是无源的, 不易被敌方发现, 因此双站 SAR 是一种有效的抗干扰手段。由于这些优势使得双站 SAR 在近年来受到越来越多的关注^[1, 2]。

双站 SAR 的成像算法, 目前主要有逆投影成像法(back projection imaging)^[3]和空间频域成像法(spatial frequency domain imaging)^[4, 5]等。逆投影算法是一种高精度的成像算法, 它较为简单, 主要是进行时域的相关计算。该算法的主要缺点是所需的计算量极大, 在某些应用中甚至是不可实现的, 目前其快速算法正在研究之中。空间频域成像法采用基

于 FFT 的傅里叶重构方法, 具有较高的效率。而在一静一动模式下的双站 SAR 成像算法中, 目前所发表的主要有时域的 BPA 算法和变换域的 Nonlinear CS 算法。接收机固定的双站 SAR 成像中由于接收机的静止导致在数据域中落入同一距离门的方位调频率不同, 此时不仅在距离向存在距离徙动空变的情况, 而当距离压缩和距离迁徙校正后, 还存在方位调频率随方位变化的特点。在文献[4]的 NLCS 算法中提到方位调频率的变化情况, 而给出的方位调频率扰动函数仅仅是对于方位向线性调频信号中心点的调频率进行变化, 因而其对成像效果的改善程度有限; 另外针对宽测绘带情况, 目前的文献中均没分析距离徙动和距离徙动差对成像的影响。因而针对一静一动模式下的双站 SAR 结构特点, 本文首先分析了该模式下的距离徙动差以及在方位向上同一距离门内的不同点目标的方位向调频率差, 进而提出在大测绘带条件下的距离徙动校正函数和改进的方位向调频率扰动函数以及对其带来的误差进行分析, 并在此基础上结合 CS 算法给出该种模式

下的双站SAR成像算法流程。

2 接收机固定双站SAR的几何模型

机载双站SAR的成像算法与单站SAR的成像算法类似,需要对回波信号作空间变化的二维相关处理。应用机载SAR做为发射机,而在山顶等一固定高处的SAR做为接收机,从而构成接收机静止的双站模式。在该种接收机固定的模式下,目标到接收站的距离不随时间变化,因此该种模式下回波信号相位的变化仅与发射机的运动有关。即方位向线性调频率仅是由发射机的运动贡献、回波信号的多普勒频率仅由发射机平台的运动贡献。该模式下双站SAR孔径合成的过程关系如图1所示:

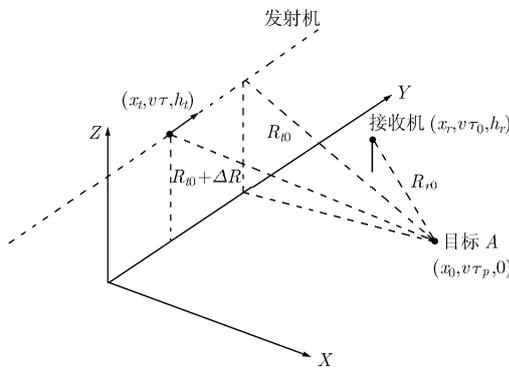


图1 固定接收机的双站SAR系统模型

图中发射机的坐标为 $(x_t, v\tau, h_t)$, $\tau \in [-T_s/2, T_s/2]$, τ 为方位向慢变化时间,接收机的坐标为 $(x_r, v\tau_0, h_r)$, T_s 表示整个合成孔径时间,则合成孔径长度为 $L = vT_s$ 。对任一信号发射时刻 τ ,接收机接收经测绘带中 P 点目标 $(x, v\tau_d, 0)$ 反射而来的信号。发射机到 A 点的垂直斜距为 R_t ,接收机到 A 点的垂直斜距为 R_r 。则发射天线和接收天线相位中心到 A 点的距离和为

$$R(\tau) = \sqrt{R_t^2 + v^2(\tau - \tau_p)^2} + \sqrt{R_r^2 + v^2(\tau_0 - \tau_d)^2} \quad (1)$$

由式(1)可得到 A 点目标回波信号的方位调频率为

$$K_a(\tau_d) = \left. \frac{-R''(\tau)}{\lambda} \right|_{\tau=\tau_d} = -\frac{v^2}{\lambda R_t} \quad (2)$$

由(2)式可知其方位分辨率相当于单站SAR模式的两倍,而在任一时刻 τ 回波信号的瞬时多普勒频率 f_a 为

$$f_a = \frac{1}{\lambda} \frac{dR(\tau)}{d\tau} = \frac{v}{\lambda} \sin \theta_t \quad (3)$$

式中 θ_t 为发射机到目标的入射角。因而距离和 $R(\tau)$ 也可表示为

$$R(\tau) = \frac{R_t}{\cos \theta_t} + R_{rs} \quad (4)$$

其中 $R_{rs} = \sqrt{R_r^2 + v^2(\tau_0 - \tau_d)^2}$, 将式(3)代入可得距离和在距离多普勒域的表示式:

$$R(f_a; R_t) = R_t / \sqrt{1 - (\lambda f_a / v)^2} + R_{rs} \approx R_{rs} + R_t \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2 f_a^2}{v^2} \right) \quad (5)$$

3 方位调频率和距离徙动分析

在接收机固定模式下的双站SAR有不同于一般双站和单站SAR的一些特点,目前发表的一静一动模式成像处理中没有关于方位调频率和距离徙动变化情况的分析,而要进行大测绘带的聚焦处理,则必须对方位调频率和距离徙动变化情况进行分析。

3.1 方位向调频率的变化分析

在接收机固定模式中,由于在方位向落入同一距离门的各目标与发射机斜距不同,因而这些目标的方位向调频率也不同。

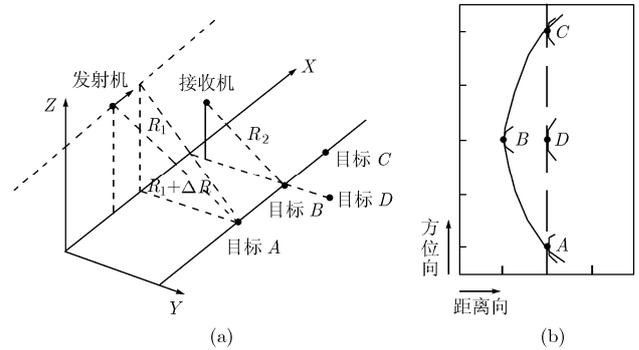


图2 不同发射机斜距的目标落入同一距离门内

如图2所示,在图2(a)的几何模型中目标 A, B, C 点的发射机垂直斜距相同, B 点与 D 点位于方位向中心位置即与接收机相垂直,但其发射机垂直斜距不同。但在回波信号数据域中, A, D, C 点落入同一距离门内,其方位调频率不同;然而具有同一方位向调频率的 A, B, C 等点目标形成一双曲线形状。

设 D 点的发射机垂直斜距为 R_{tD} ,接收机斜距为 R_{rD} ,研究数据域中与 D 点落入同一距离门的各点目标的方位向调频率变化情况。此时 D 点方位向调频率 $K_{aD} = -v^2 / \lambda R_{tD}$,同一距离门的边缘点 A 或 C (与方位中心点相距为 y) 的方位向调频率为 $K_{aA} = -v^2 / \lambda R_{tA}$, R_{tA} 为发射机与 A 点垂直斜距,其满足关系式:

$$R_{tA} + \sqrt{\left(\sqrt{R_{tA}^2 - h_t^2} - D_{tr} \right)^2 + h_r^2 + y^2} = R \quad (6)$$

其中 $R = R_{tD} + R_{rD}$, D_{tr} 为发射机与接收机水平距离, A 点与方位向中心点 D 点的方位向距离为 $y = v\tau_d$ 。解式(6)可得:

$$R_{tA} = \frac{R(\eta - y^2) + \sqrt{D_{tr}^2 y^4 - 2\alpha D_{tr}^2 y^2 + \beta}}{\alpha} \quad (7)$$

式(7)中

$$\eta = R^2 + h_t^2 - h_r^2 - D_{tr}^2 \quad (8)$$

$$\alpha = 2(R^2 - D_{tr}^2) \quad (9)$$

$$\beta = (\eta^2 + 4D_{tr}^2 h_t^2 - 4R^2 h_t^2) D_{tr}^2 \quad (10)$$

将式(7)代入到方位向调频率式(2)中,并对其按泰勒公

式展开可以得到 A 点的方位向调频率随方位向时间 τ_d 变化的拟合曲线:

$$K_{as}(\tau_d) \approx \frac{v^2}{\lambda}(1/R_t + \sigma_1\tau_d^2 + \sigma_2\tau_d^4 + \sigma_3\tau_d^6) \quad (11)$$

其中

$$\sigma_1 = \frac{\alpha v^2(R + \eta D_{tr}^2/\sqrt{\beta})}{(R\eta + \sqrt{\beta})^2} \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \alpha v^4 \left[\frac{(R + \eta D_{tr}^2/\sqrt{\beta})^2}{(R\eta + \sqrt{\beta})^3} + \frac{\eta^2 D_{tr}^4 - D_{tr}^2\beta}{2(R\eta + \sqrt{\beta})^2 \beta^{3/2}} \right] \quad (13)$$

$$\sigma_3 = \alpha v^6 \left[\frac{(R + \eta D_{tr}^2/\sqrt{\beta})^3}{(R\eta + \sqrt{\beta})^4} - \frac{(R + \eta D_{tr}^2/\sqrt{\beta})(D_{tr}^2\beta - \eta^2 D_{tr}^4)}{(R\eta + \sqrt{\beta})^3 \beta^{3/2}} - \frac{(\eta D_{tr}^2\beta - \eta^3 D_{tr}^6)}{2(R\eta + \sqrt{\beta})^2 \beta^{5/2}} \right] \quad (14)$$

为了以后分析的方便,可应用一个二次项来拟合调频率变化曲线,如式(15)所示。

$$K_{as}(\tau_d) \approx K_m + \sigma\tau_d^2 = \frac{v^2}{\lambda} \frac{1}{R_t} + \frac{\Delta K_a(T_d)}{T_d^2} \tau_d^2 \quad (15)$$

其中 T_d , $\Delta K_a(T_d)$ 为方位向最边缘点与中间点所对应的慢时间差和调频率差。

随着测绘带斜距的增大,方位向调频率的变化曲线越缓慢。当发射机速为100m/s,发射机垂直斜距为14km,接收机垂直斜距为2km,载频波长为0.03m时,图3给出了方位向调频率的实际变化曲线(图中实线)、用式(11)来拟合的方位向调频率变化曲线(图中点划线)和由式(15)给出的拟合方位向调频率曲线(图中虚线)。由图3可以看出,由式(15)给出的方位向调频率拟合曲线在方位距中心点2500m处存在误差,而式(11)给出的拟合曲线与实际方位向调频率变化曲线在近方位中心点几乎重合,在远方位向中心点时则略有误差。

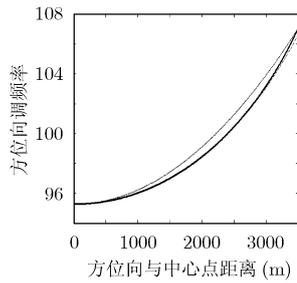


图3 实际与拟合的方位向调频率变化情况

3.2 距离徙动曲线的分析

由以上的分析可以得知接收机固定的双站SAR二次距离徙动最大值为

$$R_q = [v^2/(2R_t)] \cdot (T_s^2/4) = \lambda^2 R_t / (8\rho_a^2) \quad (16)$$

因而可得在距离向上测绘带场景内近、远距的距离徙动差为

$$\Delta R_{qr} = \lambda^2 W / (8\rho_a^2) \quad (17)$$

式(17)中, W 为测绘带宽度。观察图2可知落入同一距离门内的A, D, C点由于发射机斜距不同,导致同一距离门内的距离徙动曲线也不同,即在方位向也存在距离徙动差。由式(10)可知方位向边缘点A与方位向中心点D的距离徙动差为

$$\Delta R_{qa} = [\lambda^2 / (8\rho_a^2)] (R_{tD} - R_{tA}) \quad (18)$$

由于接收静止,因而距离向距离徙动差只有单程,仅是单站SAR的一半;而方位向上的距离徙动差则随目标与发射机的垂直斜距变大而变小,即在近距点方位向距离徙动差最大。由式(18)可以看出方位向距离徙动差相对于距离向距离徙动差小的多,而在短波长时方位向距离徙动差对于成像的影响很小。

图4给出了在X波段($\lambda = 0.03\text{m}$)时距离向距离徙动差随测绘带宽度和方位向分辨率的变化情况(图4(a))和方位向距离徙动差随方位向宽度和方位向分辨率的变化情况(图4(b),其仿真参数与图3相同)。由图4可以看出,在距离向分辨率与方位向分辨率相当时,而方位向分辨率在1m时,在测绘带宽度为10km的情况下距离向的距离徙动差必须考虑,而距方位向中心点3500m处的方位向距离徙动差可以忽略;当要求高分辨率时,方位向分辨率达到0.5m时距方位向中心点3500m处的方位向距离徙动差必须考虑。

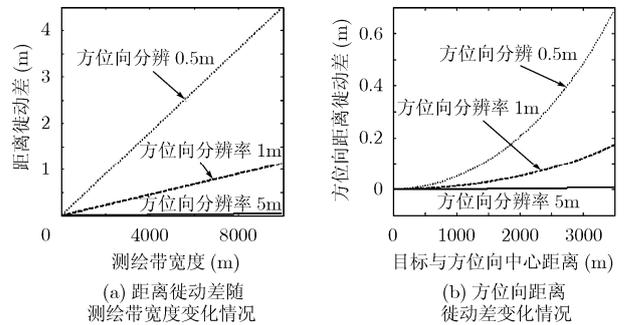


图4 距离向与方位向距离徙动差的变化情况

4 改进的双站 NLCS 算法

经典CS算法是一种高精度的成像算法,它利用CS原理,即线性调频信号与一个具有相关调频斜率的调频信号(即CS因子)相乘,结果仍是一个调频信号,只是相位中心和调频斜率发生了变化。传统的CS算法只是在距离向应用一次CS操作,不用进行方位向调频率处理。针对接收机固定模式的双站SAR成像将两次利用该原理,首先在距离向应用CS原理校正距离徙动的空变性,其次在方位向利用NLCS的原理,进行4次相位滤波和非线性CS操作从而达到方位向聚焦目的。

设发射机发射线性调频信号,经过目标点反射,并通过接收机的正交解调后,在不考虑天线调制和信号幅度情况下接收信号为

$$s_R(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t - R(\tau)}{T_p}\right) \exp\left[-j\pi k \left(t - \frac{R(\tau)}{C}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R(\tau)}{C}\right] \quad (19)$$

其中 f_0 表示载波频率, k 为调频率, 脉冲宽度为 T_p 。

4.1 RD 域距离向调频率的校正

将式(19)沿方位向作傅里叶变化, 在忽略幅度等系数的情况下得:

$$S_R(t, f_a) = \exp(-j\pi k_{re}(f_a; R_t) \left[t - \left(\frac{R(f_a; R_t)}{C}\right)^2\right]) \cdot \exp\left[-j\pi \frac{\lambda R_t f_a^2}{v^2}\right] \exp(-j2\pi f_a \tau_p) \quad (20)$$

其中 $k_{re}(f_a; R_t)$ 为发射的线性调频信号在距离多谱勒域畸变的距离向调频率。由于发射的是线性调频信号, 在 RD 域里, 除 $f_a = 0$ 外, 一定 f_a 对应的回波沿快时间变化的数据, 并不来自一次回波, 但它们仍呈现为沿快时间变化的线性调频信号。

如图 5 所示, 对信号频率 f_c , 当雷达位于图中 A 点时, 发射机的斜视角为 θ_t , 则其多谱勒频率 $f_a = v f_c \sin \theta_t / C$ 。当频率变换到 $f_c + \Delta f$ 时, 多谱勒频率变为 $v(f_c + \Delta f) \cdot \sin \theta_t / C$ 。于是对于一定 f_a , 频率为 $f_c + \Delta f$ 的信号不是发自 A 点, 而是 A' 点, 即斜视角为 $\theta_t - \Delta \theta_t$ 。通过对图 2 的平面几何进行求解从而可得多谱勒域里沿快时间的调频率, 其满足如下关系:

$$\frac{1}{k_{re}(f_a; R_t)} = \frac{1}{k} - R_t \cdot \frac{\lambda}{C^2} \cdot \frac{\sin^2 \theta_t}{\cos^3 \theta_t} \quad (21)$$

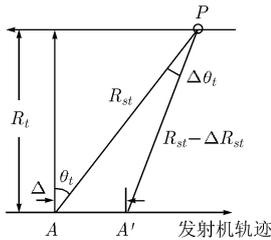


图 5 计算同一 f_a 而 f 不同时的时延

4.2 距离徙动差的校正

由 3.2 节分析可知, 对于接收机固定的双站 SAR 在方位向和距离向分辨率为 1m 时, 方位向的距离徙动差可以忽略而距离向的距离徙动差必须考虑。由图 4(a) 及 3.2 节分析可以得出, 将距离向的距离徙动曲线校正为与测绘带中心点一致的 CS 函数为

$$H_1(t, f_a; R_{t0}) = \exp\left[-j\pi k_{re} \alpha_1(f_a) \left(t - \frac{R(f_a; R_{t0})}{C}\right)^2\right] \quad (22)$$

其中 $\alpha_1(f_a) = 1/\sqrt{1 - (\lambda f_a / v)^2} - 1$, R_{t0} 为测绘带中心点与发射机的垂直斜距。

4.3 距离徙动校正及距离压缩

以测绘带中心为参考, 校正完距离向距离徙动的空变性之后, 进行距离徙动校正函数和距离向压缩函数为

$$H_2(f_r, f_a; R_{t0}) = \exp\left[j \frac{\pi R_{t0} \lambda^2 f_a^2}{C v^2} f_r\right] \exp\left[j \frac{\pi}{k_{re}(f_a; R_{t0})} f_r^2\right] \quad (23)$$

4.4 方位向压缩

在距离徙动校正和距离向压缩之后, 在方位向由于落入同一距离门的各目标与发射机斜距不同, 因而这些目标的方向向调频率也不同, 其调频率变化关系满足式(15)。应用 NLCS 原理, 首先在方位多谱勒域进行 4 次相位滤波, 以确定 NLCS 相位函数的相关系数。

$$H_3(f_a, R_t) = \exp\{j\pi Y_m(R_t) f_a^4\} \quad (24)$$

在多谱勒域进行 4 次相位滤波后, 利用驻相点法积分将其转换到方位时间域。由于考虑到调频率随方位向时间二次变化的特性, 如式(15)所示, 可设非线性 CS 操作的函数为

$$H_4(\tau, R_t) = \exp\{-j\pi q_1(R_t) \tau^2 - j\pi q_2(R_t) \tau^4\} \quad (25)$$

其中 $Y_m(R_t)$, $q_1(R_t)$, $q_2(R_t)$ 为待求参数。CS 操作后利用驻相点法积分将信号变换到方位多谱勒域, 其中通过将方位向有关相位函数的各次相进行分析处理和求解为, 可在方位多谱勒域中求得以上参数的值为

$$Y_m(R_t) = \sigma \alpha_2(R_t) / [6K_m^4(\alpha_2(R_t) - 1)] \quad (26)$$

$$q_1(R_t) = K_m(\alpha_2(R_t) - 1) \quad (27)$$

$$q_2(R_t) = -\sigma \alpha_2(R_t) / 6 \quad (28)$$

其中 $\alpha_2(R_t) = (K_m + \sigma T_d^2) / K_m$ 。

在方位向进行非线性 CS 操作以后, 就可以做方位向的脉冲压缩处理, 其脉冲压缩函数为

$$H_5(f_a; R_t) = \exp\left\{j\pi \frac{f_a^2}{K_m \alpha_2(R_t)}\right\} \exp\{j\phi(f_a, R_t)\} \quad (29)$$

其中 $\phi(f_a, R_t)$ 为由于距离向 CS 函数操作引起的剩余相位。与单站 CS 算法一样, 在对信号进行非线性尺度变换的处理过程中, 方位频谱产生了漂移, 它随着 α_2 增大, 在 τ_d 较大时, 会使方位向的处理产生失配。因此希望 α_2 接近于 1, 但当它接近于 1 时, Y_m 会变大从而引起方位多谱勒域的四次项变大, 后面处理结果的前提条件不再成立。因而方位向的宽度 τ_d 受到限制, 其需能使 Y_m 满足以下条件:

$$|Y_m| \ll \frac{1}{|2K_m K_{as} T_s|} \quad (30)$$

图 6 给出了应用 NLCS 算法来聚焦接收机固定双站 SAR 目标的流程图。

4.5 几何校正

由于在方位向脉压时将每一个点压到其零多谱勒位置, 而在之前方位向进行了 CS 操作, 因而导致目标的方向向时间由 τ_d 变化到 τ'_d ; 在距离方向上, 由于接收机的固定导致在实际中处于同一垂直斜距的点目标在聚焦的图像上位于不同的距离门。因而在图像聚焦后必须进行几何校正, 可以采取一一映射的方式, 即对于校正后的图像中的每一个像素

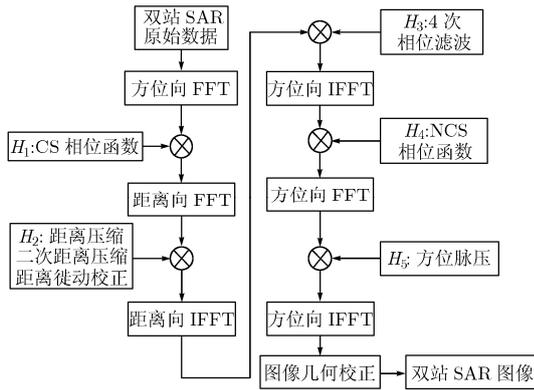


图 6 接收机静止的双站 NLCS 成像算法流程

均在插值后的聚焦图像中寻找其具体的值。

目标在方位向上的偏移由其多谱勒频谱的偏移决定:

$$\Delta\tau = \Delta f / (K_m \alpha_2) \quad (31)$$

$$\Delta f = K_m (\alpha_2 - 1) \tau_d \quad (32)$$

在距离向上的偏移由目标在实际测绘带中的具体位置决定:

$$\Delta t = (\sqrt{R_r^2 + y^2} - R_r) / v \quad (33)$$

5 改进的双站 NLCS 算法实验与仿真

为了验证本算法的正确性,通过计算机仿真了接收机固定模式下双站 SAR 对多点目标的成像。其中选择系统参数如下:发射机、接收机距测绘带中心的水平距离分别为 $x_t - x_0 = 10.55\text{km}$, $x_r - x_0 = 3\text{km}$, $h_t = 9.2\text{km}$, $h_r = 500\text{m}$, $v_t = 200\text{m/s}$, $\lambda = 0.03$,线性调频信号脉宽 $T_p = 3\mu\text{s}$, $\text{PRF} = 128\text{Hz}$,距离向带宽 $B_r = 75\text{MHz}$,采样频率 $f_s = 93.75\text{MHz}$,合成孔径时间 $T_s = 1.05\text{s}$ 。则距离向分辨率为 $\rho_r = C/2B = 2\text{m}$,方位向分辨率为 $\rho_a = v/B_d = 2\text{m}$ 。

假设在测绘带中共有 15 个点目标,中心点为 H 点,其余 14 个点目标在方位向上的偏移分别为 875m 和 1328.125m,距离上的偏移分别为 -509.1307m 和 499.6166m,如图 7 所示。

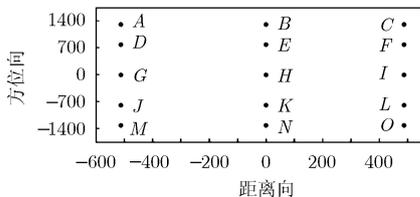


图 7 测绘带点目标分布几何图

应用本文所述的双站 NLCS 算法,从而得到上述 15 个点目标的聚焦结果(未进行几何校正前),如下图 8 所示。由图 8 可以看出,各聚焦目标点的幅度不一致,这是由于点目

标的位置没有正好落入图像域中各像素点的中心位置造成的;位于同一距离的各点目标在图像域中并不处于同一距离门内。在做了几何校正后,如图 9 所示,这些点目标的幅值是相同的,而且位于同一距离处的各点目标在图像域中也落入同一距离门内。

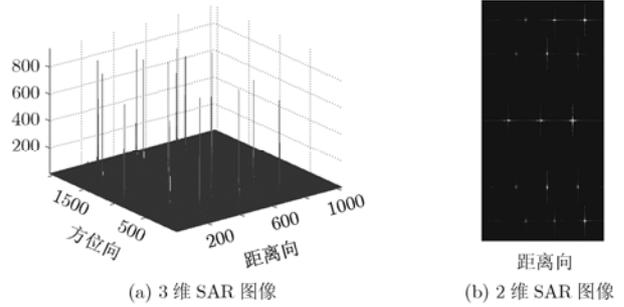


图 8 未做几何校正前聚焦的 15 个点目标

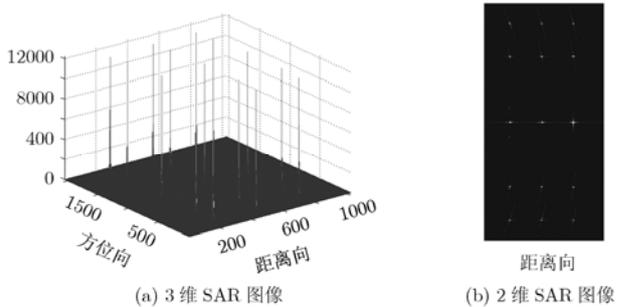


图 9 几何校正后聚焦的 15 个点目标

图 10(a)、图 10(b)分别为 C 点在做方位向处理时和经过非线性 CS 操作后方位向成像结果。表 1 给出了未加窗情况下的 C 点一些聚焦结果质量,第 1 行是未经过方位向 NLCS 和文献[4]的调频率扰动处理时,第 2 行是应用文献[4]所述的调频率扰动方法处理时,第 3 行是应用本文的非线性 CS 操作进行处理。可以看出 3 种方法对于方位向中心点 I 的聚焦质量影响不大。而对于非方位向中心 C 点,未做任何处理时方位向散焦和旁瓣升高;应用文献[4]方法时 PSLR 和 ISLR 得到改善,而方位分辨率未得到改善;应用本文 NLCS 操作,三者都得到了提高。

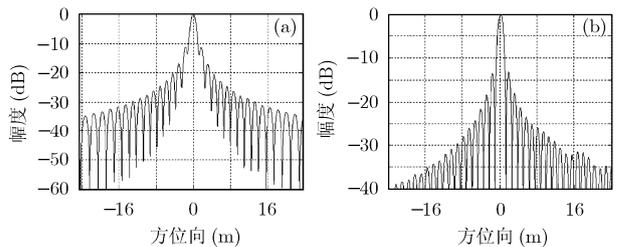


图 10 C 点未经过和经过调频率扰动后方位向成像结果

表1 I和C点的图像质量参数表

	I点方位向			C点方位向		
	PSLR (dB)	ISLR (dB)	实际 分辨率 (m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	实际 分辨率 (m)
(1)	13.253	-10.117	1.7839	11.328	-8.3318	1.8333
(2)	13.230	-10.105	1.7821	13.219	-10.096	1.8213
(3)	13.229	-10.078	1.7396	13.234	-10.378	1.7552

6 结束语

针对机载双站 SAR 收、发系统分置的特点,通过分析推导接收机固定模式下的距离徙动的近似表达式、方位向调频率的拟合曲线,研究了接收机固定模式下的 NLCS 成像算法的各个关键环节。最后通过对不同斜距处和方位处的点目标仿真验证了上述推导的正确性,因此具有运算量小特点的 NLCS 算法解决了接收机固定模式下大测绘带成像问题,得到理想的接收机固定模式下双站 SAR 的数据处理效果,并进一步将所得扭曲聚焦图像进行几何校正,下一步需要研究的重点是在更高分辨率情况下如何校正方位向距离徙动差以及将该算法推广到更普遍的配置模式上。

参考文献

- [1] Ender J. A step to bistatic SAR processing. Proceedings of EUSAR'04, Berlin 2004: 359-364.
- [2] Loffeld O, Nies H, and Peters V. Models and useful relations for bistatic SAR processing. Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, 2003: 1442-1445.
- [3] Ding Y and Munson D C. Fast back projection algorithm for bistatic SAR imaging. IEEE ICIP, New York, 2002: 449-452.
- [4] Wong Frank H. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 946-953.
- [5] Wehner D R. High-Resolution Radar(Second Edition). Boston London, Artech House, 1995, Chapter 5.
- [6] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989年11月, 第3,4章.
- [7] 保铮等. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005年4月, 第5章.

陈晓龙: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理.
 丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达.
 梁兴东: 男, 1973年生, 副研究员, 研究方向为合成孔径雷达.
 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 研究方向为现代信息技术与应用.