

基于非等间隔校正的 SIFFT 星机 联合 SAR 成像算法

杨 悦, 张晓玲, 师 君

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘 要: 星机联合双基地合成孔径雷达(SA-BiSAR)系统是典型的移变双基地 SAR 系统, 系统的移变特性导致大多数传统成像算法已不再适用. 本文提出了一种适用于星机联合双基地 SAR 的成像算法. 针对系统的移变特性, 首先本文分析了变尺度 FFT(SIFFT)方法, 发现该方法在距离徙动校正后会出现非等间隔现象, 导致方位向散焦, 成像处理失败. 分析表明对于星机联合 SAR 这种成像场景较大的情况下, SIFFT 方法不再适用. 对此本文进行了分析, 提出了基于非等间隔校正的 SIFFT 算法, 实现了方位向的相干积累, 得到了较理想的成像效果. 针对更大的成像场景, 在所述算法的基础上, 又提出了沿距离向变参考点的距离分块算法, 完成了特大场景下的良好聚焦效果. 显示了本文所提方法的通用性和有效性.

关键词: 星机联合双基地 SAR; 变尺度傅里叶变换; 空域截断误差; 非等间隔校正

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2791-06

An Imaging Algorithm For Spaceborne-Airborne Hybrid Bistatic SAR Based on Nonuniformly-Spaced Correction of SIFFT

YANG Yue, ZHANG Xiao-ling, SHI Jun

(Department of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Spaceborne-airborne hybrid bistatic SAR is translational variant bistatic SAR. So the traditional algorithms are no longer suitable any more. An imaging algorithm is proposed in this paper, which suitable for Spaceborne-airborne hybrid bistatic SAR. The main idea of this method is that: decomposing the imaging space into several linearity regions, and expanding the range history in space domain in every region; find the differences of echo signals between reference point and other points in the regions, which can be used to reduce the computational cost. Then SIFFT is used to correcting the RM, after that the phenomenon of non-uniformly-spaced is analyzed and corrected. At last the final imaging is finished using range-dividing, and the validity of this algorithm is proved.

Key words: spaceborne-airborne bistatic SAR; scaled IFFT (SIFFT); truncation error; nonuniformly-spaced correction (NUSC)

1 引言

随着对移变双基地合成孔径雷达(SAR)研究的加深, 星机联合双基地 SAR 系统作为典型的移变双基地 SAR 系统越来越受到人们的关注. 星机联合双基地 SAR 是收发平台分别置于卫星和飞机上的双基地 SAR 系统. 该系统具有隐蔽性好、覆盖范围广、信噪比高、抗摧毁能力强等优点, 使其在地球物理、资源勘探以及军事侦察等方面有着广泛的应用前景^[1~4].

针对双基地 SAR 系统的处理, 目前大致分为频域

和时域算法两类. 频域算法的优势在于运算速度快, 但成像精度不高, 同时回波二维频谱的公式推导相对复杂, 目前以德国学者 Otmar Löffel 所提出的 LBF^[5~8]模型和由 Ian G Cumming 提出的多项式频谱计算为代表^[9]. 时域算法的成像精度高, 但运算速度相对较慢, 目前主要的时域算法有: 后向投影算法(BP), 距离-多普勒算法(RD)^[10, 11]和变尺度傅里叶变换(SIFFT)^[12, 13]算法.

具有空变特性的双基地 SAR 系统, 由于方位向和距离向都存在移变特性, 成像算法是一个难点, 尤其是像星机联合 SAR 系统成像区域大的情况, 要找到高

精度高效的成像方法,难度更大.传统 RD 成像算法不再适用,除了参考点以外,其他点的聚焦深度都会降低,甚至会出现散焦现象.对于 SIFFT 算法来说,在空域展开时只考虑线性项,忽略了空域截断误差.对于观测范围较大的星机联合 SAR 系统来说,非等间隔现象严重,使得方位向出现散焦,则 SIFFT 算法不再适用.

本文基于 SIFFT 算法的思路,首先,将成像空间沿方位向分解为若干线型区域,在每个线型区域内分析各成像点距离历史相对于参考点的线性特征;其次,采用 SIFFT 校正距离徙动现象;分析了距离徙动校正后出现的非等间隔现象,并利用空域截断误差校正了该现象;通过方位的相干积累实现对较大场景面目标的成像.最后采用变距离参考点的距离分块方法得到特大场景下的良好聚焦效果.

2 基于 SIFFT 星机联合 SAR 算法

2.1 星机联合 SAR 回波分析

对于移变双基地 SAR 来说,其方位向和距离向已经不再正交,因此为了能够无失真的成像,本文首先定义由相互正交的坐标基 $\bar{\zeta}_u$ 和 $\bar{\zeta}_v$ 张成的成像空间 M ,即:

$$M = \{ \bar{x} | \bar{x} = u \cdot \bar{\zeta}_u + v \cdot \bar{\zeta}_v, u, v \in \mathbb{R} \} \quad (1)$$

为了描述方便,令 $\bar{\zeta}_v$ 为卫星速度 \bar{V}_T 的方向, $\bar{\zeta}_u$ 是与 $\bar{\zeta}_v$ 垂直的单位向量. u, v 分别表示目标点在成像空间中距离和方位的坐标.

将成像空间 M 沿方位向 $\bar{\zeta}_v$ 分解为一系列线型区域 M_i ,即: $M = \bigcup_i M_i$

$$M_i = \{ \bar{P}_\omega | \bar{P}_\omega = u \cdot \bar{\zeta}_u + v_i \cdot \bar{\zeta}_v, u \in \mathbb{R} \} \quad (2)$$

其中, M_i 表示成像空间中平行于 $\bar{\zeta}_u$ 的线型区域,且区域的宽度由方位的分辨率决定, \bar{P}_ω 表示该区域中的点.为了分析线型区域中各点相对于参考点的回波特征,对线型区域 M_i 的回波分析得到距离压缩以后:

$$s_0(k, n; \bar{P}_\omega) = \sum_{p_\omega \in M_i} \sigma_\omega \cdot \exp(j(K_0 - k) \cdot R(n; \bar{P}_\omega)) \quad (3)$$

其中, σ_ω 表示目标点的散射系数, $k = \frac{2\pi f_l}{C}$ 表示波束.对距离历史空域展开,推导^[13]可以得到:

$$R(n; \bar{P}_\omega) \approx R(n; \bar{0}) + [\bar{\alpha} + \bar{\beta} \cdot n] \cdot (\bar{P}_\omega - \bar{0}) \quad (4)$$

其中, $\bar{0}$ 表示参考点坐标矢量;

$$\bar{\alpha} = - \frac{(u_0^T \quad v_0^T \quad z_0^T)}{R_T(0,0)} - \frac{(u_0^R \quad v_0^R \quad z_0^R)}{R_R(0,0)} \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &\approx - \frac{(V_u^T \quad V_v^T \quad V_z^T)}{R^T(n, \bar{0})} - \frac{(V_u^R \quad V_v^R \quad V_z^R)}{R^R(n, \bar{0})} \\ &= - [\bar{\omega}^T + \bar{\omega}^R] \end{aligned} \quad (5-2)$$

$\bar{\alpha}$ 表示 $n=0$ 收发平台的雷达视线方向单位矢量的和矢量. $\bar{\beta}$ 近似表示为收发平台角速度矢量的和矢量.

对于线型区域 M_i ,为了便于后续的非等间隔校正,一般选择观测带的近场点为参考点,即距离坐标为 0 的点, $\bar{0} = v_i \cdot \bar{\zeta}_v$. 将式(4)中的 \bar{P}_ω 带入,并补偿掉参考点的相位,可得回波为:

$$s_0(k, n; \bar{P}_\omega) \approx \sum_u \sigma_\omega \cdot \exp(jK_0 R(n, \bar{P}_\omega)) \cdot \exp(-j \cdot k \cdot u(\alpha + \beta \cdot n)) \quad (6)$$

$$\alpha = \bar{\alpha} \cdot \bar{\zeta}_u \approx - \frac{u_0^R}{R_R(0,0)} - \frac{u_0^T}{R_T(0,0)} \quad (7)$$

$$\beta = - [\bar{\omega}^T + \bar{\omega}^R] \cdot \bar{\zeta}_u \approx - \frac{V_u^R}{R_R(0,0)} \quad (8)$$

其中, α 和 β 表示变尺度系数,其物理意义分别表示 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ 在 $\bar{\zeta}_u$ 方向的投影.

对式(6)沿距离向做固定点数 $N = N_r$ 点的逆傅里叶变换 (IFFT),得到距离压缩后(本文称为距离域)数据:

$$\begin{aligned} s_0(r, n) &= \frac{1}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \exp\left(-jk \frac{2\pi f_s}{N_r C} u \cdot (\alpha + \beta \cdot n) + jk \frac{2\pi}{N_r} r\right) \\ &\quad \cdot \exp(j \cdot K_0 \cdot R(n, \bar{P}_\omega)) \\ &= \delta\left(r - \frac{uf_s}{C} \cdot (\alpha + \beta \cdot n)\right) \exp(j \cdot K_0 \cdot R(n, \bar{P}_\omega)) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 N_r 表示距离采样点数.在理想情况下 δ 表示冲激函数,在实际中由于脉冲具有一定宽度,因此其表现为辛格函数.该式表明了距离为 u 的目标点距离压缩以后在距离域的位置为 $r = uf_s \cdot (\alpha + \beta \cdot n) / C$,为此本文进行了仿真,图 1 是对多点目标的仿真,并经距离压缩后的结果.可见,不同点距离压缩后的曲线互相不平行,而是沿方位向出现倾斜,离参考点越远,倾斜越大,这明显不同于非移变双基地 SAR 的情况.对于非移变双基地 SAR 来说,显然 $\beta=0$,此时所有散射点的距离走动相互平行.所以传统的 RD 成像算法仍然能够在方位向有良好的聚焦效果.

而对于复杂移变双基地 SAR 而言,一般情况下 $\beta \neq 0$,因此在同一线型区域内的不同散射点的距离走动曲线不平行.此时如果直接进行方位压缩,除了参考点以外,其他散射点均不能够取得

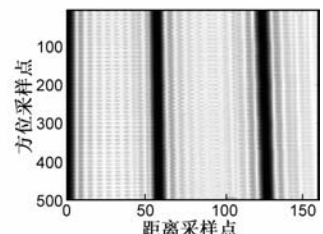


图1 参考点距离走动校正后的距离域数据

良好的聚焦效果.所以传统的 RD 算法是无法实现复杂移变模式下双基地 SAR 成像的.为了校正上述距离走动曲线的不平行特性,本文将采用变尺度傅里叶变换 (SIFFT).

2.2 SIFFT 算法

从式(9)可知,为了获得良好的聚焦效果,应设法

消除距离曲线间的不平行. 根据其变化规律, 采用非固定点数的 IFFT, 即在不同 n 时刻采用不同点数的 IFFT, 我们称这种方法为 SIFFT.

由式(9)不难推出, 为了消除 $(\alpha + \beta \cdot n)$ 对数据位置的影响, SIFFT 所需的点数 N 应随慢时间变化, 且满足:

$$N = N_n = \text{round}\left(\frac{N_r}{(\alpha + \beta \cdot n)}\right) \quad (10)$$

SIFFT 就是通过在不同慢时刻 n , 对式(6)做不同 N_n 点的 IFFT, 得到:

$$\begin{aligned} s_0(r, n) &\approx \frac{1}{N_n} \sum_{k=0}^{N_n-1} \exp\left(jk \frac{2\pi}{N_r} (\alpha + \beta \cdot n) \left(r - \frac{u}{C/f_s}\right)\right) \\ &\quad \cdot \exp(j \cdot K_0 \cdot R(n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)) \\ &= \delta\left(r - \frac{u}{C/f_s}\right) \exp(j \cdot K_0 \cdot R(n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)) \quad (11) \end{aligned}$$

从式(9)和(11)的对比中可发现, SIFFT 变换后, 距离位置为 u 的目标点, 距离压缩后在距离域的位置为 $r = uf_s/C$ 而不再是 $r = uf_s \cdot (\alpha + \beta \cdot n)/c$, 说明由于移变而引起的距离域数据与慢时间 n 存在耦合的现象已经消除了, 即不同散射点之间的距离域数据相互平行. 如图 2 所示. 此时做方位向的相干积累, 就可以得到线型区域 M_i 成像结果, 对所有线型区域做相似的处理可以得到整个场景的成像结果. 图 3(a)、(b)分别为原始场景和原始 SIFFT 算法成像结果.

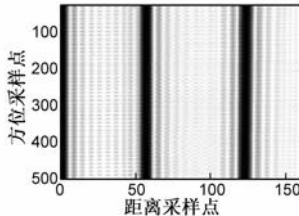


图2 变尺度傅里叶变换后的距离域数据

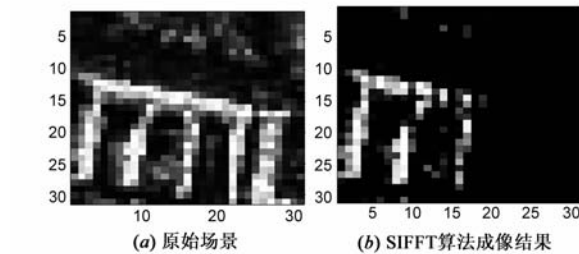


图3

从图 3 中可看出, 尽管该算法消除了距离域数据与方位时间的耦合, 但方位压缩的成像效果并不理想, 特别是远场点的聚焦深度不高. 通过分析发现, 实际等间隔的不同目标点相对于参考点位置, 出现了非等间隔 (NUS) 现象. 其原因是距离历史近似时忽略了空域截断误差引起的. 当被忽略的截断误差大于 1.5 个距离单元格, 就会对最后的成像结果产生较为明显的不利影响. 因此 SIFFT 算法无法满足星机联合 SAR 系统的观测范围大的要求. 对此, 本文分析了 NUS 现象, 提出了基于 NUSC-SIFFT 成像算法, 这是对 SIFFT 算法的进一步扩展, 适用范围更广.

3 基于 NUSC-SIFFT 星机联合 SAR 算法

3.1 空域截断误差影响分析

考虑空域截断误差并将式(6)写成:

$$\begin{aligned} s_0(k, n; \bar{\mathbf{P}}_\omega) &\approx \sum_u \sigma_\omega \cdot \exp(jK_0 \cdot R(n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)) \\ &\quad \cdot \exp(-jk(u \cdot (\alpha + \beta \cdot n) + e_{sp}(\bar{\mathbf{P}}_\omega))) \quad (12) \end{aligned}$$

距离压缩后:

$$\begin{aligned} s_0(r, n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(jk \frac{2\pi}{N} \left(r - \frac{f_s}{C} (u(\alpha + \beta \cdot n) + e_{sp}(\bar{\mathbf{P}}_\omega))\right)\right) \\ &\quad \cdot \exp(j \cdot K_0 \cdot R(n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)) \\ &= \delta\left(r - \frac{f_s}{C} (u(\alpha + \beta \cdot n) + e_{sp}(\bar{\mathbf{P}}_\omega))\right) \\ &\quad \cdot \exp(jK_0 R(n, \bar{\mathbf{P}}_\omega)) \quad (13) \end{aligned}$$

式(13)说明实际距离徙动曲线在距离域的位置为:

$$r = \frac{f_s}{C} (u \cdot (\alpha + \beta \cdot n) + e_{sp}(\bar{\mathbf{P}}_\omega)) \quad (14)$$

从上式可以看出, 由于 $e_{sp}(\bar{\mathbf{P}}_\omega)$ 的空变特性, 使得距离域的数据在随方位向变化的同时, 也随着距离向变化. 因此需要对空域截断误差进行分析. 利用多元泰勒的高阶展开, 将空域截断误差表示成:

$$e_{sp}(n; \bar{\mathbf{P}}_\omega) \approx f(u) + o(u^3) \quad (15)$$

其中, $f(u)$ 表示关于 u 的二阶项; $o(u^3)$ 表示关于 u 的三阶以上余项.

$$f(u) = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{P}}_\omega^T \mathbf{H}(\bar{\mathbf{0}}) \bar{\mathbf{P}}_\omega = \frac{u^2}{2} \left(\frac{v_T^2 + z_T^2}{R_T^3(\bar{\mathbf{0}})} + \frac{v_R^2 + z_R^2}{R_R^3(\bar{\mathbf{0}})} \right) \quad (16)$$

其中 $\mathbf{H}(\bar{\mathbf{0}})$, 为黑森矩阵 (Hessian matrix).

为了分析空域截断误差对方位向和距离向的影响. 图 4(a) 和图 4(b) 分别表示空域截断误差在方位向和距离向的变化特性. 图 4(a) 可以看出, 空域截断误差的大小几乎不随慢时间变化; 图 4(b) 表示空域截断误差随着目标点相对于参考点距离的增大而增大. 其中实线表示的是实际空域截断误差值, 而虚线表示的是二阶近似值.

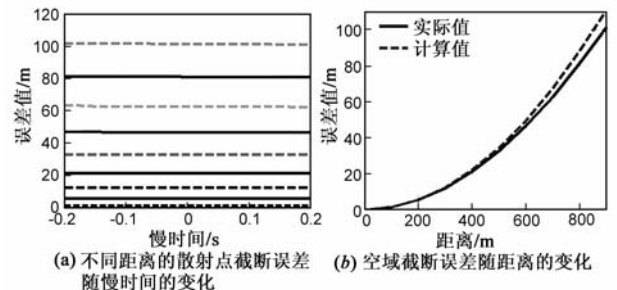


图4

当高阶项 $o(u^3)$ 小于 1.5 个距离单元格时, 我们可以用 $f(u)$ 代替 $e_{sp}(n; \bar{\mathbf{P}}_\omega)$. 从图 4(b) 可以发现 $f(u)$ 和 $e_{sp}(n; \bar{\mathbf{P}}_\omega)$ 在 700m 左右范围内吻合良好, 此时可以近似

认为 $e_{sp}(n; \bar{P}_\omega) \approx f(u)$. 此时式(15)可以写成:

$$r = \frac{f_s}{C} (u \cdot (\alpha + \beta \cdot n) + f(u)) \quad (17)$$

对于移变 SAR 系统而言,正是由于 β 和 $f(u)$ 的存在,使得距离徙动曲线不仅随方位向变化,同时也具有距离向的空变特性. 为了显示式(17)的有效性,图 5(a)、(b)分别对应目标位置为 $u = 400\text{m}, 800\text{m}$ 时其真实的距离徙动曲线. 图 5(c)、(d)是利用式(17)得到的距离域位置.

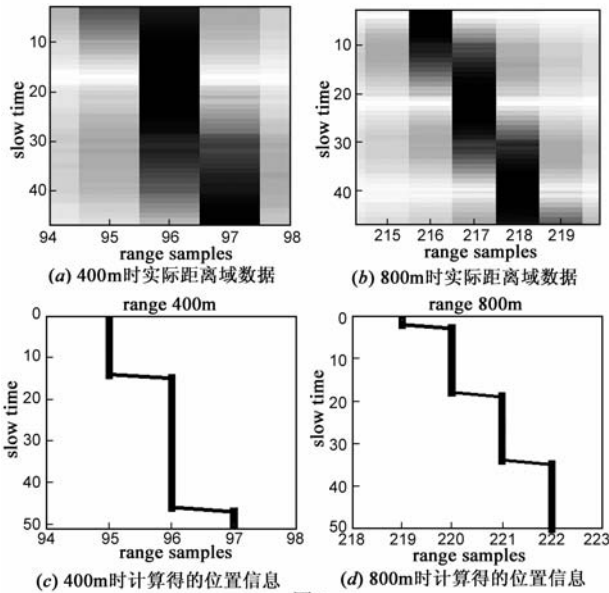


图5

图 5 说明在一定范围内,仅考虑空域截断误差的二阶近似,仿真得到的距离域数据与实际值吻合良好,因此可较理想的满足星机联合 SAR 成像精度要求. 基于上述分析,下面提出一种 NUSC 算法.

3.2 非等间隔校正算法(NUSC)

在一定距离范围内将式(12)写成:

$$s_0(k, n; \bar{P}_\omega) \approx \sum_u \sigma_u \cdot \exp(jK_0 \cdot R(n, \bar{P}_\omega)) \cdot \exp(-jk(u(\alpha + \beta \cdot n) + f(u))) \quad (18)$$

采用变尺度的思路,通过对 SIFFT 的点数 N_n 进行修正,就能完成 NUSC. 即:

$$N'_n = \text{round} \left(\frac{N_r}{(\alpha + \beta \cdot n + \frac{f(u)}{u})} \right) \quad (19)$$

但问题在于,距离位置 u 实际上是未知量,不能从式(19)得到 N'_n ,即基于 N'_n 点的 SIFFT 是不可实现的. 于是本文提出了一种具体的校正方法

首先本文先采用式(10),对式(12)作点 SIFFT. 得到变换后的距离域数据:

$$s_0(r, n) = \delta \left(r - \frac{u(\alpha + \beta \cdot n) + f(u)}{C/f_s} \cdot \frac{N_n}{N_r} \right)$$

$$\cdot \exp(jK_0 R(n, \bar{P}_\omega)) \quad (20)$$

上式说明 SIFFT 后目标在距离域的位置为:

$$r = \frac{u(\alpha + \beta \cdot n) + f(u)}{(C/f_s)(\alpha + \beta n)} \quad (21)$$

在星机联合 SAR 模式下,可以认为 $\alpha \gg \beta \cdot n$,则式(21)可以简化为:

$$r = \frac{u(\alpha + \beta + f(u))}{(C/f_s) \cdot \alpha} \quad (22)$$

式(22)反映了目标点真实距离位置 u 和距离徙动校正后其在距离域中的位置 r 之间的关系. 由于 $f(u)$ 的存在, r 与 u 是非线性关系,该式也给出了非等间隔现象的数学解释. 利用式(22)可以将距离域中位置为 r 的数据对应到图像空间中距离位置 u 处,从而解决非等间隔现象. 图 6(a)和 6(b)分别表示间隔为 250m 的 3 个目标点非等间隔校正前后的仿真结果.

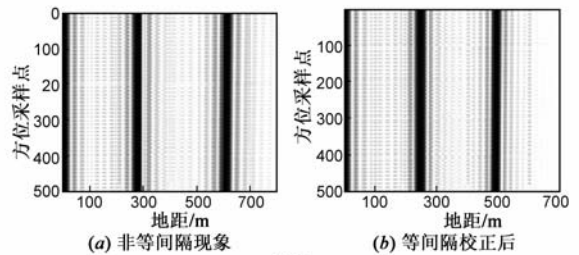


图6

图 6(a)中距离域数据之间的间隔分别为:290m 和 310m,显然他们是非等间隔的. 图 6(b)所示,通过式(22)校正后,非等间隔的数据被校正到了等间隔的位置上. 此时再通过方位向的相干积累,就能够得到线型区域中各点的成像结果. 对所有线型区域采用相同的处理方法就可以得到整个场景的成像结果.

基于 NUSC-SIFFT 星机联合 SAR 成像算法的流程如图 7 所示.

在移变大测绘区域下,该算法能够获得较好的成像效果. 但是随着场景进一步增大,空域截断误差的高阶余项会对成像产生负面影响,不能再被忽略,此时只考虑空域截断误差为二阶形式则不行. 为此本文提出了变距离参考点的距离分块算法.

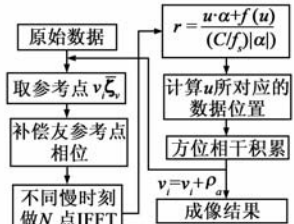


图7 基于非等间隔校正的 SIFFT 算法流程图

4 变距离参考点的距离分块算法

随着目标点相对于参考点距离的进一步增大,空域截断误差的高阶余项 $o(u^3)$ 的影响不能再忽略. 因此式(22)已无法精确反映目标点真实距离位置 u 和距离压缩后在距离域中的位置 r 之间的关系,从而影响非等

间隔校正精度和最终的成像结果.理论上说利用 $f(u) + o(u^3)$ 代替前述的 $f(u)$,可以解决特大场景成像问题.但是要得到 $o(u^3)$ 的过程是十分困难和复杂的,而且由于 $o(u^3)$ 毕竟也是一种近似,并没有在根本上解决问题.因此本文在非等间隔校正算法的基础上,又提出了变距离参考点的距离分块算法.该算法的思路是:将成像空间 M 沿距离向划分为不同的子区间,每个子区间取不同距离的参考点,使得在子区间内考虑空域截断误差的二阶形式就能够满足成像要求;然后,对每一个距离子区间利用 NUSC-SIFFT 算法成像,最终得到整个场景的成像结果.该方法优势是不需要计算的复杂表达形式,而且理论上,通过合理分块可以解决任意大场景的成像问题.

5 仿真结果

为了验证本文所提算法的有效性,分别对点目标和面目标做了仿真.表 1 是仿真所需系统参数.其中采用德国 TerraSAR-X 卫星的相关参数作为发射机,飞行高度为 514km,速度大小为 7km/s,接收机飞行高度 3km,速度大小 100m/s.假设两者的波束中心在观测时间内是精确同步的.

表 1 星机联合 SAR 仿真参数

仿真参数	
几何参数	系统参数
卫星初始位置: $P_T = (100 \ 1 \ 514)$ km	脉冲宽度 $\tau = 40\mu s$
接收机初始位置: $P_R = (-1 \ -1 \ 3)$ km	信号带宽 $B = 30$ MHz
发射机速度: $V_T = (0 \ 7 \ 0)$ km/s	采样频率 $f_s = 60$ MHz
接收机速度: $V_R = (-100\sin\theta \ 100\cos\theta \ 0)$ m/s	PRF = 2000Hz
双基地速度夹角: $\theta = 50^\circ$	载频 $f_0 = 5.3$ GHz

首先,利用传统 SIFFT 算法和本文提出的基于 NUSC-SIFFT 算法,分别对距离、方位间隔均为 100m 的九个点进行仿真,成像结果如图 8 和图 9 所示.

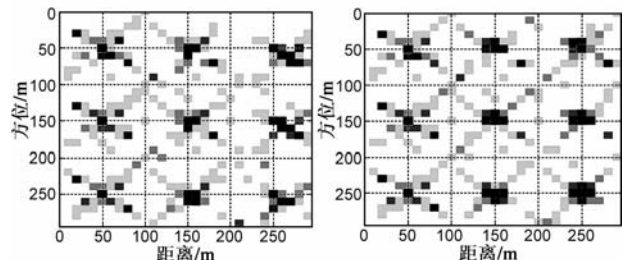


图 8 SIFFT 算法成像结果 图 9 NUSC-SIFFT 算法成像结果

通过对比显示,本文提出的基于 NUSC-SIFFT 算法可以得到良好的聚焦效果.而且从对远场点的处理效果来看,相比于原始 SIFFT 算法,本文方法在聚焦深度,主瓣宽度和副瓣抑制效果上有明显的改善.值得说明的是,对于移变双基地 SAR,由于其移变特性,导致各点的幅度,主瓣宽度,分辨率等各不相同.

表 2 SIFFT 与 NUSC-SIFFT 对坐标 (250,250)m 目标成像质量比较

方法	成像质量		距离向		方位向	
	距离向	方位向	PRSL	IRW	PRSL	IRW
传统 SIFFT	-8.311dB	-10.84dB	6	5.4		
NUSC-SIFFT	-12.87dB	-14.11dB	4.5	4.6		

其次,为了更形象说明算法优势,本文对图 3(a)的面目标进行仿真,得到的成像结果如图 10 所示.



图 10 NUSC-SIFFT 算法面目标成像结果

图 10 的成像结果显示,与原始 SIFFT 算法相比,本文所提出的基于 NUSC-SIFFT 算法,能够更好的适应较大场景星机联合 SAR 成像要求.在本文的设置星机联合 SAR 参数下,NUSC-SIFFT 的适用场景距离向宽度范围约为 800m,方位向宽度在收发平台波束始终同步的情况下,最大能够达到载机波束合成孔径大小.

最后,随着场景距离向宽度进一步加大,仅采用基于非等间隔校正的 SIFFT 算法也无法满足成像要求.因此利用距离分块算法大场景面目标进行成像,得到的成像结果如图 11 所示.

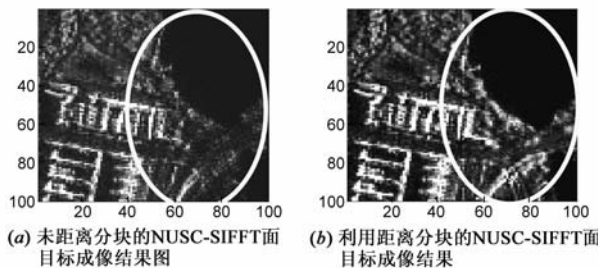


图 11

从图 11(a)和(b)的对比看出,与未采用距离分块算法相比,距离分块的成像方法的成像质量有了显著提高.特别是远场目标的聚焦深度有了明显提高(如圆圈部分所示),仿真结果充分证明了大场景下,利用变距离参考点的距离分块算法对大测绘区域星机联合 SAR 成像的有效性.

6 结论

由于星机联合双基地 SAR 系统的观测范围大,且几何关系、回波延时规律随时间变化而变化,已有的很多双基地 SAR 算法已经不再适用.本文基于原始 SIFFT 的思路,提出了适用于星机联合双基地 SAR 的 NUSC-SIFFT 算法.该算法采用 SIFFT 校正了因系统移变产生的距离徙动现象.其次,针对距离徙动校正后出现的非的间隔现象进行了分析,并提出了切实可行的校正方法,从而将成像场景扩大.仿真结果显示了该方法的明显优势.为了进一步增大成像范围,在此基础上还提出

了变距离参考点的距离分块方法,并得到了特大场景下的良好聚焦效果.该方法的明显优势是成像范围大,成像效果好.仿真结果充分证明了算法的有效性及其优势.

参考文献:

- [1] 汤子跃,张守融.双站合成孔径雷达系统原理[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 袁孝康.星载合成孔径雷达导论[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [3] 魏钟铨.合成孔径雷达卫星[M].北京:科学出版社,2001.
- [4] Walterscheid I, Ender J H G, Loffeld O. Bistatic image processing for a hybrid SAR experiment between TerraSAR-X and PAMIR [A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006(IGARSS 2006) [C]. Denver, USA: IEEE, 2006. 1934 – 1937.
- [5] Koba Matroshvili, Otmar Loffeld. Focusing of general bistatic SAR configuration data with 2-D inverse scaled FFT [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2006, 44(10): 2718 – 2726.
- [6] Nies H, Loffeld O, Natroshvili K. Analysis and focusing of bistatic airborne SAR data [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2007, 45(11): 3342 – 3349.
- [7] Otmar Loffeld, Holger Nies, Valerij Peters, Stefan Knedlik. Models and useful relations for bistatic SAR processing [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2004, 42(10): 2031 – 2038.
- [8] Wang R, Loffeld O, Nies H, Ul-Ann Q, Medrano Ortiz A, Knedlik S. A two-step method to process bistatic SAR data in the general configuration [A]. Radar Conference, 2008. RADAR'08 [C]. Rome, Italy: IEEE, 2008. 1 – 5.
- [9] Y Neo, F Wong, I G Cumming. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. IEEE

Geosci Remote Sens Lett, 2007, 4(1): 93 – 96.

- [10] 龚镇强.双基地 SAR 成像处理算法研究[D].成都:电子科技大学,2007.
- [11] Y L Neo, F H Wong, I G Cumming. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(1): 14 – 21.
- [12] Shi Jun, Xiaoling Zhang, Jianyu Yang. Principle and methods on bistatic SAR signal processing via time correlation [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2008, 46(10): 3163 – 3178.
- [13] Shi jun, Zhang Xiaoling, Yang Jianyu. Translational variant bistatic SAR signal space-time feature and processing method [A]. Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2007 (IGARSS 2007) [C]. Barcelona, Spain: IEEE International, 2007. 2140 – 2143.

作者简介:



杨悦男,1984年9月生,2007年7月毕业于电子科技大学中山学院电子信息工程专业,获工学学士学位,2007年9月考入电子科技大学电子工程学院攻读工学硕士学位至今,在读期间的主要研究方向星机联合 SAR 成像算法及运动补偿算法.

E-mail: yangyue84918@yahoo.com.cn



张晓玲女,教授,博士生导师,IEEE 会员.1985年、1988年和2000年在电子科技大学分别获得获工学学士、工学硕士和工学博士学位.现为电子科技大学电子工程学院教授,主要从事雷达信号处理,模式识别等方面的工作.

E-mail: zhangxiaoll@263.net