

机载高分辨率大场景 MIMO-SAR 成像算法研究

谢超, 王党卫, 马晓岩, 王力宝, 李定山
(空军预警学院, 武汉 430010)

摘要: 机载 MIMO-SAR 在增大可照射场景范围的同时, 也会带来距离空变性, 使得现有算法在大场景模型下会出现各种误差。基于正侧视大场景模型, 对上述问题进行详细的推导分析, 指出成像场景测绘带宽变大而导致的失配现象是产生误差的主要因素, 并提出了一种机载高分辨率大场景成像算法。理论分析和实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多输入多输出; 大测绘带成像; 聚焦深度

中图分类号: V243.2; TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)08-0042-06

An Algorithm for High-Precision Large-Region Imaging of Airborne MIMO-SAR

XIE Chao, WANG Dangwei, MA Xiaoyan, WANG Libao, LI Dingshan
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The airborne multi-input multi-output synthetic aperture radar (MIMO-SAR) may have space-variant range error while enlarging the illuminated area, thus result in various imaging error for the existing algorithms applied to the large scale model. This paper presents a theoretical analysis based on the side-looking model, and the analysis shows that under the widen swath, the mismatch between the echo signal and the reference function is the main factor of the imaging error. So an algorithm of high-precision, large region imaging was proposed, which was verified by the results of simulation.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); MIMO; wide swath imaging; focus depth

0 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时、远距离等特点,是目前对地/海面机动目标成像的重要技术手段,在民用或军事多个领域中得到了广泛应用,但随着应用背景的发展,要求 SAR 在提供高分辨率图像的同时,也须具备大场景不模糊测绘的能力,比如在军事应用中,远距离高分辨率大场景图像对指挥官进行战场信息管理、引导攻击可提供十分重要的帮助,但在保证高空间分辨率的同时完成宽测绘带成像,对于传统单通道 SAR 来说十分困难^[1]。这是因为实现高的空间分辨率,需要系统采用高脉冲重复频率(PRF)来抑制多普勒模

糊,但高 PRF 又会限制可观测场景的有效宽度。为此,人们通过引入多观测通道来降低系统对 PRF 的需求,以解决宽测绘带导致的距离模糊问题^[2-3]。

新体制多输入多输出(MIMO)雷达采用雷达发射端波形分集的思想,比传统多通道 SAR 可提供更多的空间自由度,因此迅速成为众多学者关注的焦点。德国 Ender 首先明确提出 MIMO-SAR 的概念,并讨论了静态场景成像以及运动目标显示问题^[4-5],由于 MIMO 雷达可通过优化发射信号的方式,形成更灵活的发射方向图^[6],从而解决传统 SAR 大测绘带存在的具体问题,这使得 MIMO-SAR 及其技术问题成为众多学者关注的焦点。2007年,宋岳鹏探讨了 MIMO-SAR 在遥感方面的应用,指出在诸如宽测绘带、高分辨率指标和抗目标起伏等方面较传统 SAR 都会存在优势^[7]。武其松等人通过利用 MIMO 系统提供的高空间自由度,改善了由于 PRF 的降低而导致的多普勒模糊问题^[8]。随后,武其松将脉内扫描技术应用到面阵 MIMO-SAR

收稿日期:2012-06-20

修回日期:2012-09-14

基金项目:国家自然科学基金(61179015,61201451);军内科研资助项目(KJ2010192)

作者简介:谢超(1983—),男,湖北武汉人,博士生,研究方向为机载 MIMO 雷达运动目标检测、成像。

中,利用二维空域联合处理方法解决多普勒模糊问题,并采用 MIMO 雷达获得多个空间自由度进行频带合成实现高距离分辨^[9]。可以看出,当前研究已经在 MIMO-SAR 宽测绘带成像方面取得了一定成就,但主要是关于 MIMO-SAR 对宽测绘带模式下传统 SAR 问题的改善。实际上,原有成像算法在宽测绘带模式下的应用同样会对成像效果造成影响。

传统 SAR 在处理小范围成像过程中,对聚焦成像经常采用的方法是选用场景中心作为匹配滤波函数,但这会使得大场景边缘散射点发生严重的距离弯曲以及相应的距离空变性问题;而如果选用散射点所在距离单元作为匹配滤波函数,虽然会改善成像效果,但大场景模式下对系统带来的运算量是十分巨大的。针对这些难题,本文重点研究了正侧视大场景下机载 MIMO-SAR 成像算法,指出宽测绘带带来的空变成问题是成像误差的主要来源,进而分析了空变对相位聚焦成像的影响,提出了针对性的补偿方法,仿真实验证明本文方法不仅可以很好地解决空变性问题,而且可以在保证一定方位分辨率的情况下进行大测绘带成像。

1 MIMO-SAR 信号模型与系统特性分析

1.1 MIMO-SAR 信号模型

图 1 给出了正侧视大场景成像的观测模型。载机以速度 V 沿 x 轴匀速直线飞行,天线为长 $2L_T$ 的收发复用均匀线阵,彼此间距为 d 的 M 个阵元沿航向排列,第 i 个阵元相对阵列中心的距离用 x_i 表示, $x_i \in [-L_T, L_T]$ 。合成孔径的长度为 $2L_{SAR}$, 具体的阵列合成方式如文献[10]所述。雷达与测绘带场景中心线的下视角为 β , α 为波束的俯仰宽度,场景的瞬时照射区域为 $[2L_x, 2L_y]$ 。根据波束照射角以及俯仰角,可以确定慢时间 t_m 时刻波束中心 P 点坐标 (X_c, Y_c) 。假设被照射场景的第 n 个散射点坐标为 (x_n, y_n) , 那么满足 $x_n \in [X_c - L_x, X_c + L_x]$, $y_n \in [Y_c - L_y, Y_c + L_y]$ 。

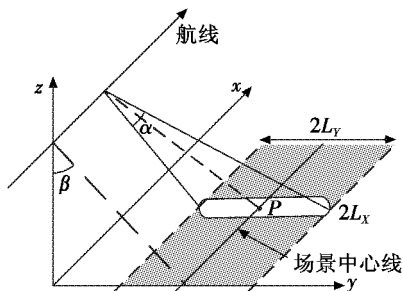


图1 MIMO-SAR 雷达系统的场景模型

Fig.1 The model of MIMO SAR system

同时,令各阵元发射波形为同频带正交相位编

码信号,且满足时延不变特性^[11],则在 t_m 时刻第 i 个接收阵元的回波信号经基带变换和匹配滤波后可表示为

$$d(\hat{t}, t_m, x_i) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left[\hat{t} - \frac{2}{c} R(t_m, x_i, n) \right] \times \exp \left[-j\omega_c \frac{2}{c} R(t_m, x_i, n) \right] \quad (1)$$

式中: $r_i(\cdot)$ 表示第 i 个发射波形基带调制波形的自相关函数; c 为光速; \hat{t} 为快时间; $R(t_m, x_i, n)$ 表示 t_m 时刻接收阵元 i 到目标散射点 n 的距离,表示为

$$R(t_m, x_i, n) = \sqrt{(x_i + Vt_m - x_n)^2 + (y_n)^2 + H^2} \quad (2)$$

式中: H 为载机飞行高度; Vt_m 为阵列中心在慢时间的坐标。

若散射点处于静止状态,当载机沿 x 轴匀速直线运动,脉冲重复周期满足阵列运动 $2L_T$ 所用的时间,即 $T_s = 2L_T/v_x$ 时, MIMO-SAR 形成的合成阵列为沿 x 轴放置的均匀收发复用线阵,则式(2)可改写为

$$R(x_q, n) = \sqrt{(x_q - x_n)^2 + (y_n)^2 + H^2} = \sqrt{(x_q)^2 - 2x_n x_q + (R_n)^2} \quad (3)$$

式中: x_q 为合成阵列的阵元在 x 维的坐标,满足 $x_q \in [-L_{SAR}, L_{SAR}]$; $R_n = \sqrt{(x_n)^2 + (y_n)^2 + H^2}$ 表示第 n 个散射点与合成阵列中心的距离。

由以上设定可以看出, MIMO-SAR 的脉冲重复周期主要取决于所采用阵列长度和载机速度的比值,其理论最大不模糊探测距离为

$$R_{\max}^{(\text{MIMO-SAR})} = \frac{c}{2} T_s = \frac{cL_T}{v_x} \quad (4)$$

而与此不同,为了获得相同合成孔径阵列阵元间隔,传统单天线 SAR 的脉冲重复周期则必须取为 d/v_x , 其对应的理论最大不模糊探测距离为

$$R_{\max}^{(\text{SAR})} = \frac{cd}{2v_x} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可得,上述 MIMO-SAR 最大不模糊距离较传统 SAR 增加了 $c(2L_T - d)/2v_x$, 这就意味着 MIMO-SAR 可有效增加测绘带距离向宽度。然而,测绘带宽度的增加是否会对成像结果带来影响,下面将对此具体展开分析。

1.2 系统特性分析

事实上,对于远场目标而言,合成阵列的阵元间距远小于阵元与目标间的斜距,因此,可用泰勒公式将式(3)展开,若仅保留前三项,则可得

$$R(x_q, n) \approx R_n - \frac{x_n}{R_n} x_q + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_n} - \frac{x_n^2}{R_n^3} \right) x_q^2 \quad (6)$$

其中,第二项为距离走动,第三项为距离弯曲。由于在

正侧视模式下,距离走动可忽略不计,主要考虑二次项的影响。

为了方便下文的分析,首先设回波经包络对齐后的表达式为^[10]

$$d(\hat{t}, x_q) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left[\hat{t} - \frac{2}{c} R_n \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2}{c} R(x_q, n) \right] \quad (7)$$

则若设 k_x 表示与参数 x_q 对应的空域频率,利用驻相位法可得式(7)的空间谱为

$$D(\hat{t}, k_x) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n \right) \times \exp \left(-jH_1 \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2} - jk_x x_n \right) \quad (8)$$

式中: $H_1 = \sqrt{y_n^2 + H^2}$; $k_c = \omega_c/c$ 为与载频相关的波数域; $k_x \in [2k_c \sin \theta_{\min}, 2k_c \sin \theta_{\max}]$; θ 表示合成阵列的阵元与场景散射点的斜视角。

对小场景来说,由于 $\sqrt{y_n^2 + H^2} \approx \sqrt{Y_c^2 + H^2}$, 因此,可利用波束中心位置参数来构造方位向匹配滤波函数,即

$$\Phi(k_x) = \exp \left(-j\sqrt{Y_c^2 + H^2} \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2} - jk_x X_c \right) \quad (9)$$

进而实现整个观测条带的方位向成像。

然而,随着测绘带宽的增加,上述近似不再成立,用 ΔH 表示 $\sqrt{y_n^2 + H^2}$ 与 $\sqrt{Y_c^2 + H^2}$ 的距离差,考虑到可用目标中心位置参数来代替散射体参数^[1],例如 $x_n = X_c + \bar{x}_n, y_n = Y_c + \bar{y}_n$, 其中 $\bar{x}_n \in [-L_x, L_x], \bar{y}_n \in [-L_y, L_y]$ 。如果仍采用式(9)进行方位匹配滤波,可得

$$D(\hat{t}, k_x) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n \right) \times \exp \left(-j\Delta H \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2} - jk_x x_n \right) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n \right) \times \exp \left(-jk_x \bar{x}_n \right) \times \exp \left(-j\Delta H \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2} \right) \quad (10)$$

式(10)右边的第一项相位函数对应散射点在方位向偏离场景中心的程度,该项不影响图像聚焦效果;而第二项则表征了匹配滤波失配(即空变)的程度。为了具体说明空变现象的严重性,设场景中载机的飞行高度为 10000 m,合成阵列的长度为 1000 m,场景中心线距载机 y 轴的距离为 100 km。

从图 2 可以看出,当空变性不存在时,即 $\Delta y = 0$ 处的失配函数对图像不产生影响,但随着偏移量的不断增加,失配函数不仅会降低图像的峰值幅度,使得图像沿方位向散焦,并且当空变性严重时,如 $\Delta y = 500$ 处还会消除图像的中心峰值,使其出现假峰。上述分析说明,随着场景测绘带宽的增加,原有 MIMO-SAR 成像方法在进行方位向聚焦成像时,空变性对相位的影响不仅会造成图像散焦,严重时甚至会出现假峰。

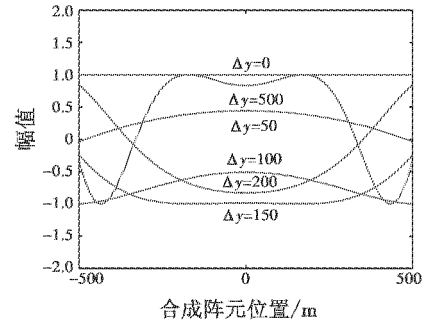


图 2 Δy 取不同值时失配函数的空间谱

Fig. 2 The relation between Δy and the space spectrum of mismatch function

2 提出的大场景成像算法

2.1 子块划分

从上节的分析可知,这种因空变性残留的高次项是产生误差的主要原因,而高次项的产生与散射点的坐标有关。为了提高图像精度,传统方法选用散射点所在的距离单元作为参考函数,但这种方法在小场景成像模式下是可行的,对大范围场景成像来说,会带来极大的计算量。一种实用的方法就是将整个大照射场景分割成子块,在每个子块中消除空变性对相位的影响,最后将子块图像通过合成算法拼成原图,但在子块划分的过程中,需要考虑如何平衡计算量与成像效果之间的矛盾。

将式(10)的相位项进行傅里叶逆变换得到^[12]:

$$\varphi(x_u, y_n) = -2k_c \sqrt{((\sqrt{y_n^2 + H^2} - \sqrt{Y_c^2 + H^2}))^2 + (\bar{x}_n - x_u)^2} \quad (11)$$

其中 x_u 满足 $x_u \in [L_{u\min}, L_{u\max}]$, $L_{u\min} = \bar{x}_n + \Delta H \tan \theta_{\min}$, $L_{u\max} = \bar{x}_n + \Delta H \tan \theta_{\max}$ 。式(11)实际上可视为一个阵列中心位于 $(0, \sqrt{Y_c^2 + H^2})$, 阵元满足 $[L_{u\min}, L_{u\max}]$ 的阵列,对位于 $(\bar{x}_n, \sqrt{y_n^2 + H^2})$ 处的散射点进行照射。

为了降低运算量,一方面希望所划分的子块尽量大,但另一方面,还要确保图像的成像效果。考虑到在阵列边缘处的相位误差最大,并且在较高精度条件下,聚焦算法要求双程相位误差不超过 $\pi/2$, 那么有

$$\frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(\Delta H)^2 + (\bar{x}_n - x_u)^2} - \Delta H \right] \leq \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

由于 ΔH 位于二维成像平面,需要将其转换到三维直角坐标系中

$$\sqrt{(Y_c + \bar{y}_n)^2 + H^2} - \sqrt{Y_c^2 + H^2} \leq \frac{\lambda}{8(\sec \theta_{\max} - 1)} \quad (13)$$

将上式进行泰勒展开

$$\sqrt{Y_c^2 + H^2} + \frac{Y_c \bar{y}_n}{\sqrt{Y_c^2 + H^2}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{Y_c^2 + H^2}} - \frac{Y_c^2}{\sqrt{(Y_c^2 + H^2)^3}} \right) \bar{y}_n^2 -$$

$$\sqrt{Y_c^2 + H^2} \leq \frac{\lambda}{8(\sec \theta_{\max} - 1)} \quad (14)$$

考虑到在正侧视模式下, $\sin \beta = \frac{Y_c}{\sqrt{Y_c^2 + H^2}}$, $\sqrt{Y_c^2 + H^2} =$

$\frac{H}{\cos \beta}$, 那么式(14)可转换为

$$\frac{\cos^3 \beta}{2H} \bar{y}_n^2 + \bar{y}_n \sin \beta - \frac{\lambda}{8(\sec \theta_{\max} - 1)} \leq 0 \quad (15)$$

解上式得到

$$\bar{y}_n = \frac{-\sin \beta + \sqrt{\sin^2 \beta + \frac{\lambda \cos^3 \beta}{4H(\sec \theta_{\max} - 1)}}}{\frac{\cos^3 \beta}{H}} \quad (16)$$

从结果可见, 测绘带宽受载机发生信号波长、下视角、飞行高度以及合成阵列长度等因素的影响, 为了使整个照射场景的成像效果不会因为空变性而下降, 可以将整个场景在 y 轴上按照 \bar{y}_n 分割成多个子块, 并以各子块中心为参考距离单元, 从而匹配滤波器函数可在不同子块上进行更新, 在每个子块上分别进行成像处理, 最后, 再将所得子图像进行距离维的拼接就可得到最终的完整图像。

2.2 距离包络对齐

对机载平台而言, 由于在远场情况下, 场景深度相对斜距较小, 通常可忽略空变性对包络的影响。从斜距的表达式可以得知, 为了使回波的响应曲线包络对齐, 需要消除二次项的影响。

令距离补偿函数

$$D_c(\omega, x_q) = \exp\left[-j \frac{2\omega}{c} \left(\frac{x_q^2}{2R_c}\right)\right] \quad (17)$$

式中, ω 表示基频域。

将式(6)进行距离向傅里叶变换后与式(17)共轭相乘, 即可消除二次项, 随后进行逆傅里叶变换后得到

$$d(\hat{t}, t_m, x_i) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n\right) \times \exp\left[-j\omega_c \frac{2}{c} R(t_m, x_i, n)\right] \quad (18)$$

2.3 方位向聚焦成像

将完成了包络对齐处理的信号利用驻相点法变换到空域, 可得

$$D(\hat{t}, k_x) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n\right) \times \exp(-jH_1 \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2} - jk_x x_n) \quad (19)$$

需要按照前文分析的子块划分法, 通过选用所属子块的中心作为匹配滤波函数

$$D_c(k_x) = \exp(-j\sqrt{y_c^2 + H^2} \sqrt{(2k_c)^2 - (k_x)^2}) \quad (20)$$

其中, y_c 为子块中心的 y 轴坐标。

将式(19)与式(20)共轭相乘, 即可消除信号的高次项, 得到

$$D(\hat{t}, k_x) = \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n\right) \times \exp(-jk_x x_n) \quad (21)$$

随后进行傅里叶逆变换, 得到目标的二维图像为

$$d(\hat{t}, x_q) \approx \sum_n \sigma^{(n)} r_i \left(t - \frac{2}{c} R_n\right) \times i_x(x_q - \bar{x}_n) \quad (22)$$

其中, $i_x(x_q) = |\Omega_x| \text{sinc}\left(\frac{|\Omega_x| x_q}{2\pi}\right)$, $|\Omega_x|$ 为频谱宽度。

那么散射点的方位向分辨率为^[13]

$$\rho_a \approx \frac{2\pi}{|\Omega_x|} = \frac{\pi}{|k_c \sin \theta_{\max} - k_c \sin \theta_{\min}|} \quad (23)$$

显然, 在相同的合成阵列长度下, 本文系统方位成像分辨率与传统 SAR 一样, 都由谱宽决定。

2.4 系统参数约束关系

由于系统的方位向分辨率满足

$$\rho_a \approx \frac{R_s \lambda}{4L_{\text{SAR}}} \quad (24)$$

说明系统的方位向分辨率与合成阵列长度是一一对应的, 因此, 一旦确定了系统所需的方位向分辨率, 就要通过灵活的波束控制, 使正侧视模式下的场景长度满足一定条件: $2L_x = V \cdot T_s$, T_s 为合成阵列时间。

图3为本文系统的工作示意图, 在不考虑过采样率的情况下, 为了满足采样定理的要求, 阵元的间距 d 应满足: $d_{\max} \leq \rho_a$ 。那么对 $2L_T$ 的载机阵列而言, 其最大脉冲重复周期应为: $V t_s^{\max} = 2L_T$, 从而推出系统的脉冲重复频率 PRF 应满足

$$f_r \geq V/2L_T \quad (25)$$

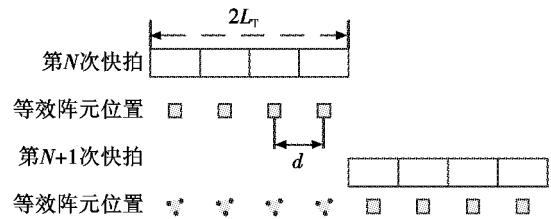


图3 机载 MIMO-SAR 收发同置系统示意图

Fig. 3 MIMO-SAR array scheme

由于载机阵列的阵元数为 M , 那么该系统等效于传统单通道 SAR 以脉冲重复频率 $M \cdot f_r$ 工作。因为机载 MIMO-SAR 的脉冲重复频率主要取决于载机速度和所采用阵列长度的比值, 所以当系统的 PRF 一定时, 如果增加载机的阵列长度, 同时也要相应增加载机的飞行速度。因此, 对传统机载 SAR 系统来说, 可通过引入 MIMO-SAR 技术, 以增加阵列长度为代价, 即可在原有的飞行速度下达到降低系统 PRF 的目的, 进而提高最大不模糊距离。

3 仿真结果

为了验证本文方法的有效性,进行如下的参数设置:假设载机的阵列长度为 9 m,阵元彼此间距为 1 m;飞机以速度 150 m/s 在 10000 m 的高度飞行,照射场景的中心线距离载机 y 轴坐标为 100 km;发射信号的载频为 11.8 GHz,带宽为 150 MHz;当载机飞行 1000 m 时,合成阵列的长度应为 1009 m,那么此时系统的距离向分辨率为 1 m,场景中心线处的方位向分辨率为 1.3 m。按照本文此前的推导,此时系统的最大脉冲重复周期为 0.06 s,并且满足采样定理的要求。

首先对点目标进行仿真,从图 4a 中可以看出,对位于波束中心位置的散射点,图像效果良好;图 4b 为偏离中心位置 400 m 处的散射点,由于产生了距离空变性问题,使得该图像散焦比较严重,根据式(16),可得 \bar{r}_0 为 300 m;图 4c 为采用本文子块划分的方法产生的图像,其聚焦效果良好,基本消除了空变性的影响。

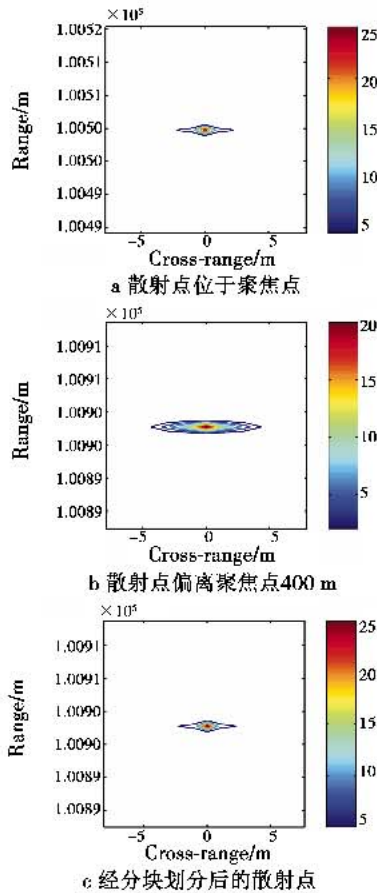


图 4 场景中心与目标中心失配对成像造成的影响
Fig. 4 Imaging affected by the mismatch between the center of the scene and the target

图 5 则对存在多个散射点的大测绘带进行了验

证,其中散射点相互的间隔较远:图 5a 为这些散射点的原始位置,其中 100.5 km 处的散射点位于场景中心线;图 5b 为系统采用单一匹配滤波器的示意图,空变性问题使得远离中心线的散射点出现了明显的散焦,图像展宽严重;但根据本文提出的大场景成像算法,通过对匹配滤波器在各子块上进行更新,可以看出,图 5c 的图像效果有了很大改善。

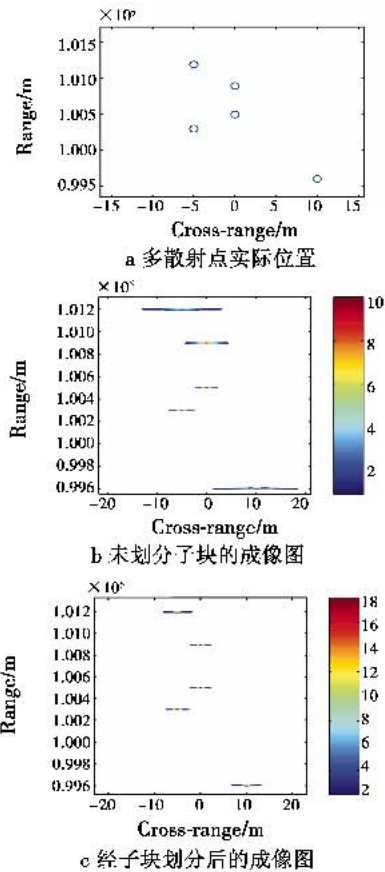


图 5 大场景对多个散射点的成像

Fig. 5 Result of multi-scatter in the large scale scene

从上述分析可以看出,本文采用的子块划分方法,可以有效改善基于中心散射点为匹配函数的成像算法的空变性问题。实际上,为了确保成像效果,在小场景成像算法中,匹配函数还可以选用散射点所在距离单元,但该方法在大场景模式下所需的计算量是巨大的。图 6 为本文方法与该传统算法的计算量对比,可以看出,对于一个测绘带宽度为 40 km 的场景,如果采用传统方法,需要对 40000 个距离单元的数据分别进行计算,而采用本文方法,只需计算 100 个子块的数据。并且由图中每个子块包含的距离单元数可以看出,随着测绘带宽度的增加,每个子块包含的距离单元数也随之增加,这说明本文方法在大场景模式下,对于计算量的降低是十分有效的。

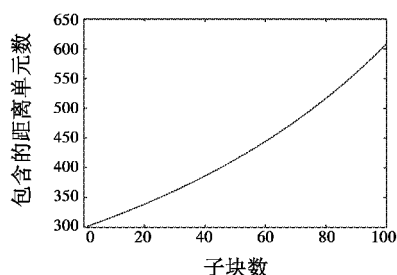


图6 子块数与包含的距离单元数

Fig.6 The number of distance elements and the sub-blocks divided

4 结论

本文基于机载 MIMO-SAR 系统的探测模型,分析了测绘带宽度的增加对成像算法带来的影响,进而提出了一种子块划分的方法,既解决了传统算法中出现的空变性问题,又能有效降低系统的计算量。根据对系统参数的选取进行的讨论,可为后续的系统设计提供参考。

参考文献

- [1] CURRIE A, BROWN M A. Wide-swath SAR [C]//Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, IET. 1992, 139(2):122-135.
- [2] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1):31-46.
- [3] GEBERT N, DE ALMEIDA F Q, KRIEGER G. Airborne demonstration of multichannel SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 963-967.
- [4] ENDER J H G. Along-track array processing for MIMO-

SAR/MTI [C]//European conference on synthetic aperture radar (EUSAR), Germany: Friedrichshafen, 2008: 4032-4036.

- [5] ENDER J H G, KLARE J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR [C]//Radar Conference, 2009:1-6.
- [6] FUHRMANN D R, ANTONIO G S. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation [C]//IEEE Signals, Systems and Computers, Conference Record of the 38th Asilomar Conference, California, 2004: 295-299.
- [7] 宋岳鹏,杨汝良. 应用多收发孔径实现高分辨率宽测绘带的合成孔径雷达研究 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9):2110-2113.
- [8] 武其松,井伟,邢孟道,等. MIMO-SAR 大测绘带成像 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4):772-775.
- [9] 武其松,邢孟道,刘保昌,等. 面阵 MIMO-SAR 大测绘带成像 [J]. 电子学报, 2010, 38(4):817-824.
- [10] XIE Chao, WANG Dangwei, MA Xiaoyan, et al. The imaging method of airborne radar on hybrid sampling [C]//IEEE CIE International Conference on Radar, China: Chengdu, 2011:8-12.
- [11] WANG Dangwei, MA Xiaoyan, CHEN A L, et al. High-resolution imaging using a wideband MIMO radar system with two distributed arrays [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5):1280-1289.
- [12] SOUMEKH M. Depth-focused interior echo imaging [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(11): 1608-1618.
- [13] SOUMEKH M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms [M]. New York: Wiley, 1999.

(上接第 17 页)

- European Journal of Operational Research, 2004, 156:445-455.
- [7] 孙红霞,张强. 区间数型模糊 VIKOR 方法 [J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(5):122-128.
- [8] 吴云燕,华中生,查勇. AHP 中群决策权重的确定与判

断矩阵的合并 [J]. 运筹与管理, 2003, 12(4):16-21.

- [9] 张杰,唐宏,苏凯,等. 效能评估方法研究 [M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [10] 罗均平,于伟,李冬岩,等. 语言判断矩阵在确定多属性决策问题权重中的应用 [J]. 电光与控制, 2006, 13(1):102-104.