

基于 RD 域分块的改进距离徙动成像算法

徐海胜^{1,2†}, 宋红军¹, 华 斌¹, 袁志辉^{1,2}

(1 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 7 月 13 日收稿; 2010 年 10 月 15 日收修稿)

Xu H S, Song H J, Hua B, et al. Modified RMA based on range sub-blocks in range-Doppler domain[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(4): 498–504.

摘 要 研究了二维频域成像算法, 提出一种基于 RD 域分块的改进距离徙动成像算法, 并将该算法与近似算法和一般逆变标算法进行了点阵目标仿真和运算效率比较. 当测绘带较宽且距离徙动较大时, 该算法聚焦性能优于近似算法和一般逆变标算法. 通过比较还可看出该算法运算效率高于逆变标算法. 最后用实测数据仿真验证了该算法是可行的.

关键词 合成孔径雷达, 距离多普勒, 距离徙动, 分块, 成像算法

中图分类号 TN957

在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像算法中, 二维频域算法最初来自于地震波信号处理, 该类算法开始被称为波数域算法(wavenumber domain algorithm, WDA)^[1]. WDA 通过二维频域 Stolt 插值(或称 Stolt 映射)^[2]处理, 能有效校正距离方位耦合与距离时间和方位频率的依赖关系, 具有对宽孔径或大斜视角数据的处理能力, 且精度比距离多普勒算法(range Doppler algorithm, RDA)和调频变标算法(chirp scaling algorithm, CSA)高. 由于它能在大孔径范围内校正沿距离向的距离徙动变化, 又称其为距离徙动算法(range migration algorithm, RMA)^[3].

但是 RMA 使用了插值运算, 因而处理速度非常慢. 为了提高效率, 后来二维频域出现了一系列改进算法: 基于变标逆傅里叶变换(scaled inverse Fourier transformation)的频域算法(SI-RMA)^[4-5]、基于非均匀傅里叶变换(non-uniform Fourier transformation)频域算法^[6-8]、近似距离徙动算法(approximate RMA, A-RMA)^[9]等. 其中, 近似算法对经过一致压缩(bulk compression)^[9]后的距离多普勒数据, 只用了一个沿距离向变化的方位滤波器来消除残余相位调制. 该算法在处理距离向长度较小场景时可以满足精度要求, 当场景距离向长度较大时, 距离徙动校正误差会较大. 逆变标算法在经过一致压缩后, 忽略高次距离徙动量, 用变标逆傅里叶变换代替一般傅里叶逆变换来消除一阶距离徙动, 其精度虽然比近似算法高; 但该变换是建立在相位根式近似的基础上的, 因此相位误差很大. 当距离徙动较大时, 其算法精度改善不是很明显, 需要做进一步相位补偿^[5].

文献[10]在研究双基 SAR 成像算法中提到了一种距离向分块的方法来实现二次距离徙动校正. 本文针对该方法进行了单基 SAR 模式下的算法推导和部分改进, 提出了一种基于 RD 域分块的改进距离徙动成像算法, 并将该算法与近似算法和一般逆变标算法进行了点目标仿真比较和运算效率比较. 当测绘带较宽且距离徙动较大时, 分块算法性能优于近似算法和一般逆变标算法; 而且通过计算可知该算法的效率要高于逆变标算法, 最后用实测数据进行仿真, 验证了算法的可行性.

†E-mail: xuhaisheng08@mails.gucas.ac.cn

1 算法实现步骤

本节将详细介绍算法的处理步骤,其流程框图如图1所示.图1中左边部分可以看成是频域近似算法,虚线部分即为本文新增的处理方法,后面将对该框图算法进行具体推导.

1.1 回波信号二维傅里叶变换

考虑正侧视条带模式,经过解调的基带点目标回波信号为

$$g(t, \tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{(\tau - \tau_0) \cdot v}{L_{\text{sar}}}\right) \cdot s\left(t - \frac{2R(\tau, \tau_0, R_0)}{c}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi R(\tau, \tau_0, R_0)}{\lambda}}$$

其中, t 为距离向时间变量; τ 为方位向时间变量; $\sigma(\tau_0, R_0)$ 为点目标的后向散射系数; v 为载机飞行速度; (τ_0, R_0) 为点目标在斜距平面的位置坐标, L_{sar} 为点目标合成孔径长度;

$s(t)$ 为雷达发射的线性调频信号; $R(\tau, \tau_0, R_0)$ 为雷达与点目标的瞬时斜距,表达式分别为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_r}\right) \cdot \exp(j\pi K_r t^2), \tag{2}$$

$$R(\tau, \tau_0, R_0) = \sqrt{R_0^2 + v^2(\tau - \tau_0)^2}. \tag{3}$$

根据(1)式,可得点目标参考谱(point target reference spectrum, PTRS)^[11]为

$$G(f, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot S(f) \cdot e^{-\frac{j4\pi R_0}{c} \sqrt{(f+f_0)^2 - \frac{f_\tau^2}{4v^2}} - j2\pi f_\tau \tau_0}, \tag{4}$$

其中,

$$S(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{K_r T_r}\right) \cdot \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{K_r}} \cdot e^{-j\pi \frac{f^2}{K_r}}, \tag{5}$$

$$B_{az} = 2vL_{\text{sar}} \sqrt{\left(\frac{f}{f_0} + 1\right)^2 - \frac{f_\tau^2 \lambda^2}{4v^2}} / (\lambda R_0) \approx \frac{2vL_{\text{sar}}}{\lambda R_0} = \frac{2v}{D_a}. \tag{6}$$

1.2 参考函数相乘

本过程主要完成脉冲压缩、一致聚焦,以及将回波接收时间中心移到斜距中心(场景斜距平面的中间线)对应的时间点,取参考函数为

$$H_{\text{RFM}}(f, f_\tau, R_c) = \sqrt{K_r} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \cdot e^{j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}} \cdot e^{\frac{j4\pi R_c}{c} \sqrt{(f+f_0)^2 - \frac{f_\tau^2}{4v^2}} - \frac{j4\pi R_c}{c} (f+f_0)}. \tag{7}$$

将(4)式和(7)式相乘:

$$G'(f, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f}{B_r}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot e^{-\frac{j4\pi(R_0 - R_c)}{c} \sqrt{(f+f_0)^2 - \frac{f_\tau^2}{4v^2}} - j2\pi f_\tau \tau_0 - \frac{j4\pi R_c}{c} (f+f_0)}, \tag{8}$$

对(8)式中指数项根式进行泰勒级数展开,并取前2项做近似:

$$\sqrt{(f+f_0)^2 - \frac{f_\tau^2 c^2}{4v^2}} \approx D(f_\tau) f_0 + \frac{f}{D(f_\tau)}, \tag{9}$$

其中, $D(f_\tau) = \sqrt{1 - \frac{f_\tau^2 \lambda^2}{4v^2}}$.

则(8)式变为

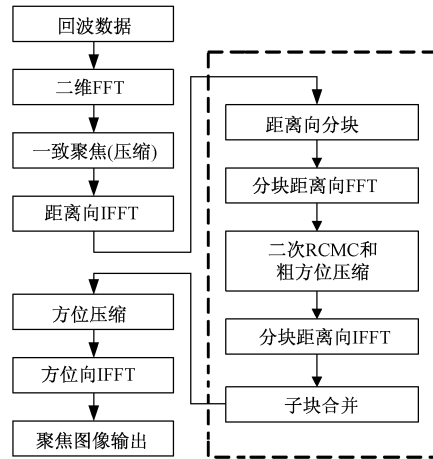


图1 基于距离分块 RMA 算法流程图

$$G'(f, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f}{B_r}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi(R_0-R_c)}{c}(D(f_\tau)f_0 + \frac{f}{D(f_\tau)}) - j2\pi f_\tau \tau_0 - \frac{j4\pi R_c}{c}(f+f_0)}. \quad (10)$$

对(10)式进行距离向傅里叶逆变换:

$$g'(t, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot p_r\left(t - \left(\frac{2(R_0 - R_c)}{cD(f_\tau)} + \frac{2R_c}{c}\right)\right) \cdot e^{-\frac{j4\pi(R_0-R_c)}{\lambda}D(f_\tau) - j2\pi f_\tau \tau_0 - j4\pi \frac{R_c}{c}f_0}, \quad (11)$$

其中, $p_r(t)$ 为调频信号经过脉压后的包络且 $p_r(t) = \text{sinc}(B_r \cdot t)$.

1.3 粗方位向压缩以及二次距离压缩

当斜视角增大或距离向测绘带变宽时,离中心参考距离较远点的相对二次距离徙动较大,距离压缩时会造成距离向主瓣宽度展宽,分辨率下降,此时的距离徙动可近似表示为

$$\Delta R_{\text{RCM}}(f_\tau, R_0) = (R_0 - R_c) \cdot \left(\frac{1}{D(f_\tau)} - 1\right). \quad (12)$$

基于上述原因,可考虑沿距离向进行分块处理.本过程包含 2 个步骤:粗略方位压缩和二次距离单元徙动校正.具体实现方法是:将(11)式表示的距离多普勒域信号进行距离向分块,然后对每块数据进行距离向傅里叶变换从而使数据变换到二维频域,再将二维频域数据与参考函数相乘,参考函数为

$$H_{\text{RFM}}(f, f_\tau, R_n, R_c) = e^{\frac{j4\pi(R_n-R_c)}{c}(f_0 \cdot D(f_\tau) + \frac{f}{D(f_\tau)}) - \frac{j4\pi(R_n-R_c)}{c}(f+f_0)}, \quad (13)$$

其中, R_n 表示第 n 块数据所对应的测绘带中间线上斜距,这样将第 n 块数据上的点的 RCM 看成是 R_n 处的距离徙动量.

当然这样做仍然会有残余距离徙动量,此时的残余量大小可近似表示为

$$\Delta R_{\text{RCM}}(f_\tau, R_0) = (R_0 - R_n) \cdot \left(\frac{1}{D(f_\tau)} - 1\right). \quad (14)$$

要使 RCMC 误差所造成的方位向展宽不超过 2%,只要未校正距离徙动量不超过二分之一一个分辨单元即可^[10]:

$$|R_0 - R_n| \cdot \left(\frac{1}{D(f_\tau)} - 1\right) \leq \frac{\delta_r}{2}, \quad (15)$$

其中, δ_r 为距离向分辨率.

当计算距离向分块个数时,只要保证以下不等式成立即可:

$$\max(|R_0 - R_c|) \cdot \left(\frac{1}{D(|f_{\text{dc}}| + \frac{\text{PRF}}{2})} - 1\right) \leq \frac{c}{4f_s}. \quad (16)$$

将分块后的二维频域数据与各自对应的参考函数相乘后变换到距离多普勒域:

$$G'_n(t, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot p_r\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot e^{-\frac{j4\pi(R_0-R_n)}{\lambda}D(f_\tau) - j2\pi f_\tau \tau_0 - j4\pi \frac{R_n}{c}f_0}. \quad (17)$$

1.4 对分块和二次距离压缩进行改进

文献[10]虽然提出了分块,但没有要求相邻子块之间有重叠,然而实际上相邻数据块之间是有一定相关度的,直接分块会影响子块边缘处点目标的聚焦性能.考虑到子孔径方法中在进行方位向子孔径平滑重构时,每个子孔径之间进行重叠且重叠比率一般取 3% ~ 5%^[12].因此本文在进行距离向分块时,相邻 2 块之间做重叠处理,且重叠比率取 3% 左右.

又考虑到虽然在分块处理时对回波信号做了(9)式近似,但实际上高次距离徙动量仍然存在,因此在做补偿时将(3)式修正为

$$H_{\text{RFM}}(f, f_\tau, R_n, R_c) = e^{\frac{j4\pi(R_n-R_c)}{c} \sqrt{(f+f_0)^2 - \frac{f_\tau^2 c^2}{4r^2}} - \frac{j4\pi(R_n-R_c)}{c}(f+f_0)}. \quad (18)$$

仔细比较(13)式和(18)式可以看出,(18)式需要进行矩阵加、减、乘和开方运算,而(13)式除了上述运算外,还需要做除法运算,因此仿真时采用(18)式补偿不仅能提高精度,而且也不会增加运算量.又由

于数据之间重叠的比率很小,数据重叠所引起的额外计算是可以忽略的,因此整个算法改进前后运算开销和复杂度变化不大.而通过后面的仿真证明,经过这2项修正后,虽然对于子块数据中间处点目标的性能改善不是很明显,但却能改善数据块边缘处点目标的扩展比(如表1和图3所示).

1.5 方位向残余相位补偿

对方位向残余相位进行补偿:

$$H(f_\tau, R_n, R_0) = e^{\frac{j4\pi(R_0 - R_n)}{\lambda} D(f_\tau)}, \quad (19)$$

补偿后(17)式变为

$$G'_n(t, f_\tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{B_{az}}\right) \cdot p\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot e^{-j2\pi f_\tau \tau_0 - j4\pi \frac{R_n}{\lambda}}. \quad (20)$$

将分块后的数据分别处理后合并在一起,进行方位向逆变换:

$$g'(t, \tau, \tau_0, R_0) = \sigma(\tau_0, R_0) \cdot p_a(\tau - \tau_0) \cdot p_r\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot e^{-j4\pi \frac{R_n}{\lambda}}, \quad (21)$$

其中, $p_a(\tau)$ 为方位向脉压后的包络且 $p_a(\tau) = \text{sinc}(B_{az} \cdot \tau)$.

2 实验结果与分析

本文选择机载 SAR 系统进行仿真,仿真时为了增加距离徙动量,选择低频工作波段,波长为 0.24m (L 波段);取方位向天线长度 $D_a = 2\text{m}$;选择地面场景的大小为 $6000\text{m} \times 400\text{m}$ ($R_a \times A_z$),15 个点目标位置如图 2(a) 所示,图 2(b) 为仿真后的点目标三维示意图,其中点目标的理论分辨率为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ($R_a \times A_z$),信号时宽 $10\mu\text{s}$,测绘带中心斜距为 10000m ,飞机飞行速度为 100m/s ,发射信号带宽为 150MHz .

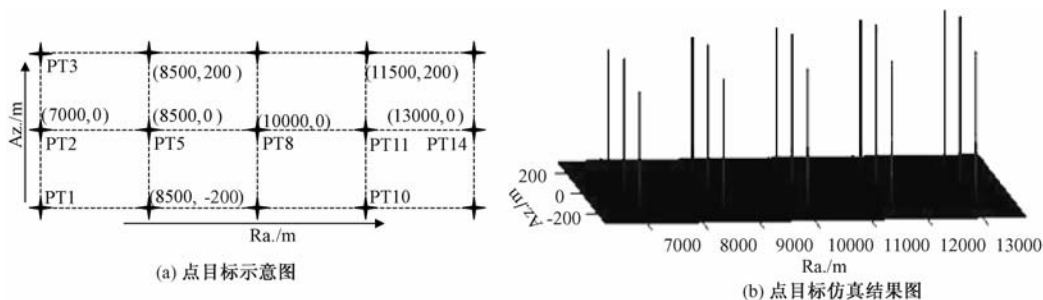


图2 点目标坐标位置图

在对仿真后点目标进行分析时,考虑到场景对称性和算法的特点,只对左边边缘处的2个点目标 (PT1 和 PT2) 进行分析.使用的算法有:本文算法、使用(13)式补偿的无重叠分块算法(表1中无重叠法)、基于逆变标的 RMA 算法(表1中逆变标法)、近似 RMA 算法(表1中近似法).通过计算在分块算法中整个数据被分成了10块,数据之间的重叠比率约为3.2%.为了更好地比较算法改进前后的性能,分块时使 PT1、PT2、PT3 的距离向中心位置刚好在数据块边缘处.仿真后的具体指标如表1所示(点目标等位线显示如图3所示),从表1和图3可以看出,本文提出的改进算法优于其他算法.由于距离徙动量很大,近似算法忽略了距离徙动,因而聚焦能力非常差,距离向扩展比达到146%.逆变标算法通过变标逆傅里叶变换消除了近似距离徙动量,因此该算法与近似算法相比,在一定程度上改善了点目标的聚焦性能.但该算法是在根式近似的基础上做变换,当距离徙动量较大时,可能会引入较大误差.因此对于大距离徙动数据,该算法聚焦性能仍很差.总体来说,表1中的仿真结果与理论分析是一致的.

进行了仿真比较后,现对上述几种算法的运算效率进行评估,由于逆变标算法和本文算法都是在近似算法的基础上发展起来的,因此这2种算法的运算速度肯定没有近似算法快,因此在这里只比较本文算法和逆变标算法.计算机中长度为 N 的序列 FFT (或 IFFT) 需要的浮点运算 (FLOP) 量为 $5N \log_2(N)$

次;一次复数相位相乘需要 $6N$ 次 FLOP^[1]. 分块算法与逆变标算法相比,除去近似算法需要的运算步骤外,需要分块后 FFT、IFFT、相位相乘各 k 次,因此对于一块 $N_a \times N_r$ 数据,该算法额外的运算量(与近似算法相比)为 $10N_a N_r \log_2(N_r/k) + 6N_a N_r$;而逆变标算法需要 FFT、IFFT 各 1 次以及相位相乘 3 次,因此其额外运算量为 $10N_a N_r \log_2(N_r) + 18N_a N_r$. 由此可见,本文提出的算法在没有明显增加运算量的基础上,其效率比逆变标算法高.

表 1 仿真后的成像质量指标

| PT | 算法 | 距离向 | | | 方位向 | | |
|-----|------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | | PSLR/dB | ISLR/dB | 扩展比 | PSLR/dB | ISLR/dB | 扩展比 |
| PT1 | 近似法 | -16.7153 | -14.1212 | 1.4594 | -9.4328 | -8.0261 | 1.3761 |
| | 逆变标法 | -13.9931 | -10.2239 | 1.1902 | -18.4245 | -12.3865 | 1.0978 |
| | 无重叠法 | -13.0203 | -10.5267 | 1.1050 | -12.6604 | -10.0123 | 1.0479 |
| | 本文算法 | -13.2868 | -9.9282 | 1.0026 | -13.1041 | -10.0403 | 1.0050 |
| PT2 | 近似法 | -16.7473 | -14.1552 | 1.4594 | -9.4267 | -8.0221 | 1.3761 |
| | 逆变标法 | -14.0247 | -10.2498 | 1.1902 | -18.4307 | -12.4051 | 1.0978 |
| | 无重叠法 | -13.0203 | -10.5271 | 1.1050 | -13.0203 | -10.5271 | 1.0277 |
| | 本文算法 | -13.2868 | -9.9282 | 1.0026 | -13.1047 | -10.0066 | 1.0004 |

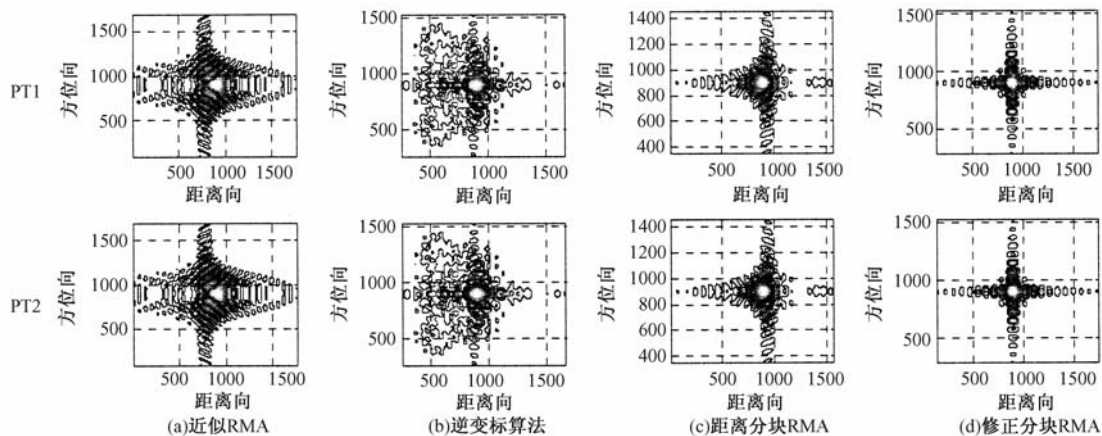


图 3 点目标等位线显示图

用上面提到的算法对文献[1]提供的 Radarsat-1 部分实测数据进行仿真,仿真过程中忽略了斜视角,取多普勒中心频率 $f_{dc} = -6900$. 其中在进行距离分块 RMA 算法时,将距离向分成 4 块处理. 由于该数据的距离徙动量比较小,分块算法对成像质量改善不是很明显. 图 4 中给出了 3 种成像算法处理的结果,其中(a)图是提供的参考图;(b)图使用距离分块算法,(c)图使用近似 RMA 算法,(d)图使用逆变标算法. 虽然不能根据图像说明本文提出的成像算法的优越性,但可以看出,本文提出的基于 RD 域分块的 RMA 算法是可行的.

3 结论

本文在文献[10]的基础上,提出了一种基于距离多普勒域分块的距离徙动成像算法,并对该算法进行了理论推导和仿真比较,证明该算法能很好地用于距离向较宽场景或低频段 SAR 成像处理,而且该算法的运算效率高于逆变标算法,最后用实测数据证明了该算法的可行性. 总的来看,该算法可以看作是 RMA 的一种补充.

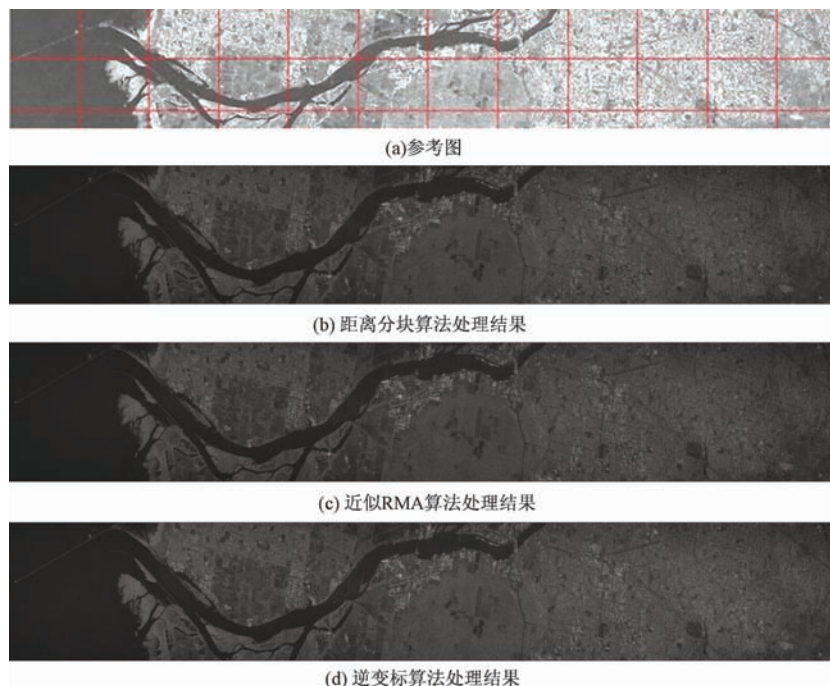


图4 实测数据处理结果

参考文献

- [1] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data algorithms and implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 323-362.
- [2] Stolt R H. Migration by fourier transform[J]. Geophysics, 1978, 43(1): 23-48.
- [3] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995: 340-360.
- [4] Loffeld O, Hein A, Schneider F. SAR focusing: scaled inverse Fourier transformation and chirp scaling[C]//1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings(IGARSS'98). Seattle, WA, 1998, 2: 630-632.
- [5] Yu W, Loffeld, Knedlik S. Spotlight-mode SAR data focusing using a modified wavenumber domain algorithm[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS 2007). Barcelona, 2007: 567-570.
- [6] Subiza B, Gimeno-Nieves E, Lopez-Sanchez J M, et al. An approach to SAR imaging by means of non-uniform FFT's[C]//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS 03). 2003, 6: 4089-4091.
- [7] Subiza B, Gimeno-Nieves, Lopez-Sanchez J M, et al. Non-uniform FFT's (NUFFT) algorithms applied to SAR imaging[C]//Proceedings of SPIE. Bellingham, WA, 2004, 5236: 72-79.
- [8] Yong W, Hongjun S, Xiuqin X, et al. Improved RMA based on nonuniform fast fourier transforms(NUFFT's)[C]//9th International Conference on Signal Processing(ICSP 2008). Beijing, 2008: 2489-2492.
- [9] Cumming I G, Neo Y L, Wong F H. Interpretations of the omega-K algorithm and comparisons with other algorithms[C]//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS '03). 2003, 3: 1455-1458.
- [10] Wang R, Loffeld O, Neo Y L, et al. Focusing bistatic SAR data in airborne/stationary configuration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 452-465.
- [11] Loffeld O, Nies H, Peters V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [12] Mittermayer J, Moreira A, Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2198-2214.

Modified RMA based on range sub-blocks in range-Doppler domain

XU Hai-Sheng^{1,2}, SONG Hong-Jun¹, HUA Bin¹, YUAN Zhi-Hui^{1,2}

(1 *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2 *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract On the basis of our study on SAR imaging algorithm in 2D frequency domain, we propose a modified range migration algorithm (RMA) using range sub-blocks in range-Doppler domain (RDB-RMA), and make a comparison between our proposed algorithm and other two algorithms, approximate RMA and scaled inverse Fourier transformation algorithm (SIFTA). The simulation data show that RDB-RMA is better in focusing capability than the other two algorithms, when the swath is very wide and the range migration is very large. By comparing these algorithms, we conclude that RDB-RMA is better in computing efficiency than SIFTA. Finally, an experiment carried out on measured data confirms feasibility of the proposed algorithm.

Key words synthetic aperture radar (SAR), range Doppler (RD), range migration, block, imaging algorithm