

# 结合 MWD 算法的低频 UWB SAR 运动补偿

安道祥, 黄晓涛, 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 波数域(WD)算法具有精确的去耦合能力,适用于大波束角低频超宽带合成孔径雷达(UWB SAR).但传统 WD 算法不易和运动补偿相结合,限制了该算法的应用.尤其是在无传感器数据可利用的情况下,要获得高质量机载低频 UWB SAR 实测图像十分困难.本文提出了一种改进 WD(MWD)算法,MWD 算法通过采用修正 Stolt 映射,实现了基于回波数据的运动参数估计和精确运动补偿.此外,文中还根据 MWD 算法特点,对传统运动补偿方法进行改进,提高了 MWD 算法对实测低频 UWB SAR 数据的聚焦性能.仿真实验和实测数据成像实验验证了所提方法的有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达; 低频超宽带; MWD 算法; 运动补偿

**中图分类号:** TN957.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2039-07

## Motion Compensation for Low Frequency UWB SAR Based on the Modified Wavenumber Domain Algorithm

AN Dao-xiang, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** The wavenumber domain (WD) algorithm has the ability to handle the range-azimuth coupling correctly, which is suitable for processing the wide-beam low frequency ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB SAR) data. But the traditional WD algorithm is difficult to integrate with motion compensation method, which limits its application. Especially, in the case of no navigational instrument data available, it is difficult to achieve high quality low frequency UWB SAR image. In this paper, a modified WD (MWD) algorithm is proposed. Based on the MWD algorithm, the parameters estimation from the raw data and the accurately motion compensation could be implemented. Moreover, some modifications were made on the traditional motion compensation method according to the characteristics of MWD, and the focusing performance of MWD algorithm on low frequency UWB SAR raw data is improved. At last, some simulation experiments and the raw data processing results demonstrated the effectiveness of the proposed algorithms.

**Key words:** synthetic aperture radar; low frequency ultra-wideband; modified wavenumber domain algorithm; motion compensation

## 1 引言

低频超宽带合成孔径雷达(Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)具有合成孔径长,距离方位耦合严重的特点,因此低频 UWB SAR 实测数据的高精度成像和精确运动补偿相对困难<sup>[1,2]</sup>,一般窄带 SAR 成像中常采用的成像算法<sup>[3,4]</sup>(如 RD、CS 等)不再适用.近年来 NCS、ECS 等<sup>[5,6]</sup>算法被用来处理低频 UWB SAR 实测数据,得到了较好的结果.但是这两种算法在二维去耦合时也都存在不同程度的近似处理,其良好聚焦受到测绘带宽度和方位积累角大小的限制<sup>[1,7]</sup>,因此,也不适用大波束角低频 UWB SAR 成像<sup>[7]</sup>.波数域(Wavenumber

Domain Algorithm, WD)算法和后向投影(BackProjection Algorithm, BP)算法是两种不存在近似处理的精确成像算法,去耦合能力强,适用于合成孔径长、二维耦合严重的低频 UWB SAR<sup>[7]</sup>.但是这两种算法不易和运动补偿相结合,而且原始 BP 算法成像是回波数据逐点累加的过程,运算量相当可观.自身的不足限制了 WD 算法和 BP 算法的实际应用,但随着新兴 SAR 技术(如低频 UWB SAR、高分辨聚束 SAR 等)的出现,具有精确成像能力的 WD 算法和 BP 算法又重新受到重视<sup>[8,9]</sup>,并被用于低频 UWB SAR<sup>[8]</sup>和超高分辨 SAR<sup>[10]</sup>的实测数据处理中.

目前,WD算法和BP算法对实测数据的良好聚焦主要依赖于高精度传感器.在无传感器数据可利用或传感器精度不高时,这两种算法对实测数据的聚焦能力将大大降低.文献[11]曾提出和基于回波数据自聚焦相结合的WD算法,该方法首先利用原始WD算法进行子孔径成像,再对子孔径图像作方位反卷积变回到距离压缩后、方位压缩前的回波域,然后基于该回波域进行运动参数估计和相位误差补偿.该方法通过改变WD算法的成像流程,即在成像过程中增加一个对子孔径图像作方位反卷积、再二次方位压缩的步骤,这不但降低了成像效率,还使WD算法的成像过程变得更加复杂.此外,由于反卷积利用的是预先设定的参考函数,因此在反卷积过程中还可能会由于参考信号和实际信号的不一致而引入新的相位误差.

和文献[11]一样,本文研究了在无传感器数据的情况下,利用WD算法对低频UWB SAR实测数据进行精确成像的可行性,并提出一种改进WD(Modified WD, MWD)算法.但和文献[11]不同,本文采取了对传统WD算法中的Stolt映射进行泰勒展开,详细分析各项因子的作用,通过从Stolt映射中分离方位压缩因子,将MWD算法成像中的距离向聚焦和方位向聚焦分离开,使其存在可进行运动参数估计和相位误差补偿的距离多谱勒域.本文所提MWD算法并未改变传统WD算法的成像流程,也没有增加任何额外的处理步骤,并且较好地保持了传统WD算法的距离方位去耦合能力和高精度成像性能.此外,根据低频UWB SAR合成孔径长的特点,研究了和MWD算法相结合的基于回波数据的运动补偿方法,对传统运动补偿方法进行了适当改进,提高了MWD算法对低频UWB SAR实测数据的聚焦性能.最后,仿真实验和实测数据成像实验证明了所提方法的有效性.

## 2 MWD算法推导

### 2.1 原始WD算法

根据Stolt插值位置的不同,WD算法有两种实现方式,这里借鉴文献[12]中的实现方式.设原始回波数据已经完成了L/Q检波和距离压缩处理,并将其表示成

$$ss(x, t; r) = g\left(t - \frac{2\sqrt{r^2 + (x - x_0)^2}}{c}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}\sqrt{r^2 + (x - x_0)^2}\right) \quad (1)$$

其中 $g(t)$ 为距离压缩后的脉冲包络, $f_c$ 为信号载频, $x$ 、 $x_0$ 分别为载机和目标点的方位位置, $r$ 为目标点对应的垂直斜距.对式(1)作距离向FFT,将回波信号变换到距离频域( $f_r$ )

$$Ss(x, f_r; r) = F_{t \rightarrow f_r}[ss(x, t; r)]$$

$$= G(f_r) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c}\sqrt{r^2 + (x - x_0)^2}\right) \quad (2)$$

其中 $F_{t \rightarrow f_r}[\cdot]$ 表示关于变量 $t$ 的FFT变换.再利用驻定相位原理(PSP)对式(2)作方位FFT变换.并设 $k_x$ 、 $k_r$ 分别表示方位波数和斜距波数, $k_c$ 为载频波数,利用PSP可得下述关系式,

$$x^* = -\frac{rk_x}{\sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2}} + x_0$$

$$k_r + k_c = \frac{4\pi f_r}{c} + \frac{4\pi f_c}{c} \quad (3)$$

$$k_x = \frac{2\pi f_a}{v_a}$$

其中 $f_a$ 表示多谱勒频率, $v_a$ 表示载机预设速度.将式(3)代入式(2),可得二维波数谱

$$SS(k_x, k_r; r) = G(k_r) \cdot \exp(-jr\sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2}) \cdot \exp(-jk_x x_0) \quad (4)$$

传统WD算法的成像处理就是基于式(4)进行的,实现步骤为:首先,利用式(5)所示的一致压缩函数,对回波信号作以场景中心斜距为参考距离的一致聚焦处理,

$$H_{ref}(k_x, k_r; r_c) = \exp(jr_c\sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2}) \quad (5)$$

其中 $r_c$ 为场景中心斜距.一致聚焦后,位于场景中心的目标实现完全聚焦,而偏离场景中心的目标实现部分聚焦,其散焦程度将随目标点距场景中心的斜距距离( $r - r_c$ )的增加而增加.偏离场景中心的点目标的完全聚焦通过Stolt映射来实现,Stolt映射中的变量替换式为

$$k'_r + k_c = \sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2} \quad (6)$$

Stolt映射后,回波信号的二维波数谱可表示成

$$SS(k_x, \sqrt{(k'_r + k_c)^2 + k_x^2}; r) = G(\sqrt{(k'_r + k_c)^2 + k_x^2}) \cdot \exp(-j(r - r_c) \cdot (k'_r + k_c) - jk_x x_0) \quad (7)$$

最后对式(7)作2D-IFFT变换,即可重构出目标的二维脉冲响应函数

$$ss(x, r) = F_{k_x, k'_r \rightarrow x, r}^{-1}[SS(k_x, \sqrt{(k'_r + k_c)^2 + k_x^2}; r)]$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint SS(k_x, \sqrt{(k'_r + k_c)^2 + k_x^2}) \cdot \exp(jk'_r r + jk_x x) dk'_r dk_x$$

$$= \text{sinc}\left(t - \frac{2(r - r_c)}{c}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{x - x_0}{v}\right) \quad (8)$$

### 2.2 MWD算法

由2.1节可知,原始WD算法中,Stolt映射同时完成了目标的二维聚焦处理,而对于机载SAR系统,基于回波数据的运动参数估计和二阶补偿需要在距离方位去耦合后的回波域中进行,因此需要对原始WD算法进行改进.这里将式(6)所示的Stolt映射关系式作关于 $k_r$ 的泰勒级数展开[12],展开级数可写成

$$k_r' + k_c = \sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2} \tag{9}$$

$$\cong \underbrace{(k_c D(k_x, k_c))}_{\text{azimuth modulation}} + \underbrace{D(k_x, k_c)}_{\text{range migration}} + \underbrace{2k_c^3 D^3(k_x, k_c)}_{\text{SRC}} + \dots$$

其中  $D(k_x, k_c)$  为引入的徙动参数,其值为

$$D(k_x, k_c) = \sqrt{1 - k_x^2/k_c^2} \tag{10}$$

文献[12]指出,对于小斜视 SAR,式(9)中的泰勒展开保留到二次项即可满足成像精度要求;对于大斜视 SAR,保留到三次项可满足成像精度.这里我们保留了所有项,没有忽略高次项,因此很好地保持了 WD 算法的成像精度.式(9)中的第一项为斜距  $r$  处相对于中心斜距  $r_c$  处的残余方位调制函数(azimuth modulation),第二项为残余距离徙动函数(range migration),该项是相对于  $r_c$  的距离偏移的线性函数,第三项为二次距离压缩函数(Second Range Compression, SRC).由此可见,Stolt 映射相当于同时完成了残余距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)、残余二次距离压缩和残余方位压缩三项处理.因此原始 WD 算法成像中不存在距离方位去耦合后、方位压缩前的回波域.

为了将原始 WD 算法中的二维聚焦分离开,本文提出了一种修正 Stolt 映射法.所谓修正 Stolt 映射即将式(9)中的残余方位调制函数提取出来,改变原始 Stolt 映射的变量替换形式,

$$k_r' + k_c = \sqrt{(k_r + k_c)^2 - k_x^2} - \sqrt{k_c^2 - k_x^2} \tag{11}$$

$$= \underbrace{k_c D(k_x, k_c)}_{\text{azimuth modulation}} + \underbrace{D(k_x, k_c)}_{\text{range migration}} + \underbrace{2k_c^3 D^3(k_x, k_c)}_{\text{SRC}} + \dots - \underbrace{k_c D(k_x, k_c)}_{\text{azimuth modulation}}$$

$$= \underbrace{\left(\frac{k_r}{D(k_x, k_c)}\right)}_{\text{range migration}} + \underbrace{\left(\frac{k_x^2 k_r^2}{2k_c^3 D^3(k_x, k_c)}\right)}_{\text{SRC}} + \dots$$

方位调制函数被分离后,对剩余变量作 Stolt 映射变换,这样修正 Stolt 映射相当于只完成了残余 RCMC 和残余 SRC 两项处理,而未作方位压缩.而分离出来的方位调制函数只和方位波数  $k_x$  有关,和距离波数  $k_r$  无关.将式(11)代入式(4)中,可得修正 Stolt 映射后的二

维波数谱为

$$SS(k_x, \sqrt{(k_r' + k_c + \sqrt{k_c^2 - k_x^2})^2 + k_x^2}; r) \tag{12}$$

$$= G(\sqrt{(k_r' + k_c + \sqrt{k_c^2 - k_x^2})^2 + k_x^2}) \cdot \exp(-jk_x x_0) \times \exp(-j(r - r_c) \cdot (k_r' + k_c)) \cdot \exp(j(r - r_c) \cdot \sqrt{k_c^2 - k_x^2})$$

对式(12)作距离向 IFFT 变换,即可得 RCMC 校正后、方位压缩前的回波信号

$$S_s(k_x, r) = F_{k_r' \rightarrow r}^{-1} [SS(k_x, \sqrt{(k_r' + k_c + \sqrt{k_c^2 - k_x^2})^2 + k_x^2}; r)] \tag{13}$$

$$= \text{sinc}\left(t - \frac{2(r - r_c)}{c}\right) \cdot \exp(j(r - r_c) \cdot \sqrt{k_c^2 - k_x^2}) \cdot \exp(-jk_x x_0)$$

式(13)中的第二个指数项即为分离出来的方位调制项,可在修正 Stolt 映射后的距离时域、方位频域内进行补偿,即乘以式(12)所示的方位补偿函数(相当于方位压缩处理)

$$H_{AC}(k_x, r) = \exp(j(r - r_c) \cdot \sqrt{k_c^2 - k_x^2}) \tag{14}$$

最后,对方位补偿后的回波数据作方位向 IFFT 变换,得到聚焦 SAR 图像.

$$ss(x_0, r) = F_{k_x \rightarrow x}^{-1} [S_s(k_x, r) \times H_{AC}(k_x, r)] \tag{15}$$

$$= \text{sinc}\left(t - \frac{2(r - r_c)}{c}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{x - x_0}{v}\right)$$

综上所述,MWD 算法的成像流程可概括为:

- (1) 距离压缩(距离压缩后即可做去脉宽处理,减少后续成像处理的运算量.由于 UWB SAR 距离弯曲严重,因此在去做去脉宽处理时,需将距离弯曲所导致的越距离单元走动问题考虑在内,否则会导致位于测绘带远端的目标点无法良好聚焦);
  - (2) 二维 FFT 变换,作基于二维频域的一致聚焦处理(即乘以式(5));
  - (3) 作基于二维频域的修正 Stolt 映射处理(即式(11)所示的变量替换式);
  - (4) 距离向 IFFT 变换,作方位压缩处理(即乘以式(14));
  - (5) 方位向 IFFT 变换,得到 SAR 图像(即式(15)).
- 由上述分析可知,MWD 算法实现了距离向聚焦和方位向聚焦的分离,且本文 4.1 节的仿真实验将证明

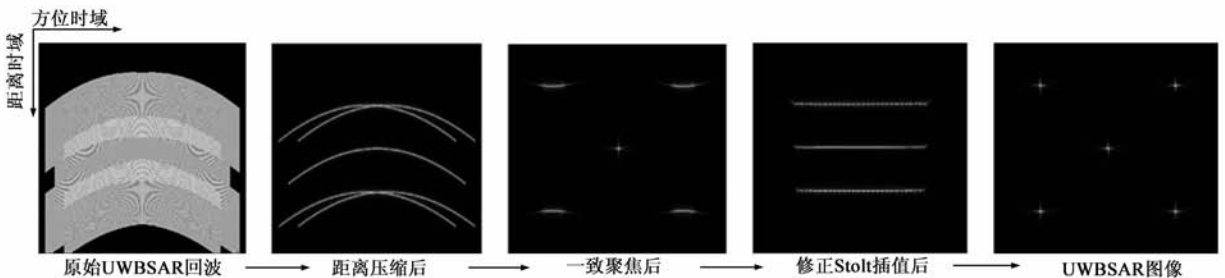


图1 MWD算法成像流程及每一步结果

MWD 算法具备和原始 WD 算法一样的去耦合能力,并保持了原始 WD 算法的高精度成像性能.图 1 给出了点目标的 MWD 算法成像过程,点目标仿真参数设置同 5.1 节仿真实验中的参数设置.由图 1 可清楚地了解 MWD 算法的成像过程及各步对应的中间结果.

### 3 基于回波数据的运动补偿方法

#### 3.1 运动误差分析

文献[13]中分析了视线方向偏航误差对 Stolt 插值精度的影响,得出高频误差的影响最大,严重影响 RCMC 的校正精度,而低频、中频运动误差的影响不大.本文所要处理的 UWB SAR 实测数据是基于 Y7 平台录取的,Y7 是一种体形较大的运输机,飞行中受空气气流的影响较小,平台稳定性控制较好,不存在剧烈的偏航摆动.此外,我们在 UWB SAR 实测数据处理中发现单纯依靠回波数据难以精确分离出载机三维运动参数信息,因此无法采用“两步运动补偿”法.在实测数据处理中,没有实施三维补偿,而是通过调频率估计构造相位误差进行统一补偿.为了降低相位误差距离空变的影响,采取了距离分块估计和补偿的方法.实测数据处理结果表明,在无法精确提取三维运动参数信息的情况下,这种运动补偿措施是有效的.MWD 算法的最大近似在于假定在合成孔径时间内,载机的飞行速度是恒定的,这样才能保证二维频谱的 Stolt 插值精度,由式(9)的展开式可知,Stolt 插值精度将影响残余 RCMC、残余 SRC 和方位调制函数的补偿精度.尽管在 MWD 算法中,由于对方位调制函数进行了分离,由载机速度变化所引起的方位调频率误差可在距离多谱勒域中进行补偿,但是载机速度变化对残余 RCMC 和残余 SRC 校正精度的影响仍然无法消除.本文所处理 UWB SAR 系统,其合成孔径时间约为 30s~40s,在整个合成孔径时间内载机的飞行速度变化较大,对 Stolt 插值精度产生了严重影响.本文对这种影响作简要分析,由文献[12]可知,若要保证图像聚焦质量,则由速度误差所导致的距离徙动差不能超过一个距离单元,而交叉耦合相位误差不能大于  $\pi/2$ .可以用式(16)和式(17)来近似表示  $r$  处目标点的距离徙动差和交叉耦合相位误差(即式(11)中的二次项,用  $\varphi_{cc}$  表示):

$$\begin{aligned} \Delta r_{\max} &= \sqrt{r^2 + (v_a t_a + \Delta v_a t_a)^2} - \sqrt{r^2 + (v_a t_a)^2} \Big|_{t_a = T_a} \\ &\cong \frac{1}{2} \frac{2\Delta v_a T_a + (\Delta v_a T_a)^2}{r} \leq \Delta r \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \varphi_{cc} = \frac{2\pi r k_x^2 k_r^2}{c k_c^3 D^3(k_x, k_c)} \\ \Delta \varphi_{cc} = \frac{d\varphi_{cc}}{dv_a} \cdot \Delta v_a \Big|_{k_r = \frac{2\pi\gamma T_r}{c}, k_x = \frac{\pi B_d}{v_a}} \\ = -\frac{4\pi r (\pi B_d)^2}{c v_a^3 k_c^2} \frac{(\frac{2\pi\gamma T_r}{c})^2}{D^3(k_x = \frac{\pi B_d}{v_a}, k_c)} \cdot \Delta v_a \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (17)$$

其中  $\Delta r$  为距离单元采样间距,  $T_a$  为波束照射时间,  $\gamma T_r$  为距离向带宽,  $B_d$  为多谱勒带宽.依照式(16)、(17)的定义,即可由系统参数估算出照射时间  $T_a$  内可容忍的载机速度波动范围.当载机速度波动范围超出容忍范围时,就会对 Stolt 插值精度产生严重影响,进而影响图像聚焦质量.我们对所录取的回波数据进行了航向速度的粗估计,在一个完整的孔径积累时间内,载机速度变化幅度达到 4%,根据系统参数算得  $\Delta r_{\max}$  的最大误差达到  $10\Delta r$ ;而  $\Delta \varphi_{cc}$  的最大值也达到了  $1.8\pi$ ,都超出了可容忍的范围,因此在成像中必须采取必要的补偿措施.这里先简要介绍一下基于回波数据的载机瞬时航向速度粗估计方法:

首先,按照 MWD 算法的处理流程对原始回波进行成像处理(暂不考虑载机运动误差对图像聚焦的影响),得到距离压缩和距离弯曲校正后、方位压缩前的二维时域数据.

其次,对回波数据进行方位向的重叠分块(重叠比为 1/2),按照能量最大准则从每个子块中选取若干条距离单元,再利用对比度最优算法从每条距离单元中估计出该子块所对应的载机飞行速度(默认子块内的载机飞行速度是恒定的).根据载机运动状况,事先设定载机速度变化的浮动范围,超出范围的估计值将被视为“坏值”,并将其去掉,然后将剩余的估计值取平均,作为该子块所对应载机飞行速度的最终估计结果.

最后,利用三次样条法拟合出整个回波数据对应的载机飞行速度值  $v_a(t_a)$ ,  $t_a \in [0, T_{\text{end}}]$ ,其中 0 表示载机飞行起始时刻,  $T_{\text{end}}$  表示载机飞行的结束时刻.

事实上,对于实测 UWB SAR 来说,此时估计出的载机飞行速度的精度并不高,只能算是一种粗估计.但是利用该粗估计结果,可将载机的飞行速度误差控制在 Stolt 插值可容忍的范围内,以提高二次多谱勒参数估计的精度和最终的图像聚焦质量.

#### 3.2 子孔径 MWD 成像处理

由式(16)、(17)可知,减小波束照射时间  $T_a$  或降低载机速度误差  $\Delta v_a$  可减小距离徙动差和交叉耦合相位误差.为此可根据载机速度粗估计结果作子孔径 MWD

成像,以提高在载机飞行速度不稳情况下的 MWD 成像精度,具体实施方法为:

**Step1** 根据载机速度估计粗值  $v_a(t_a)$ ,  $t_a \in [0, T_{\text{end}}]$ 、成像质量要求,以及式(16)、(17)在时域内对距离压缩后的回波作子孔径划分,设回波沿方位向被分成  $N$  个子孔径(子孔径之间可有一定比例的重叠),用  $v_a(t_i)$ ,  $t_i \in [T_{i-1}, T_i]$  ( $T_0 = 0, T_N = T_{\text{end}}$ )表示第  $i$  个子孔径对应载机速度值。

**Step2** 根据第  $i$  个子孔径内的载机速度值  $v_a(t_i)$  计算载机平均速度  $\overline{v_a(t_i)}$ ,利用  $\overline{v_a(t_i)}$  计算该子孔径对应的方位波数  $k_x^i$ ,然后对子孔径回波作 2-D FFT 变换,在二维频域内对子孔径回波作一致聚焦处理和修正 Stolt 插值处理,并将插值后的回波数据变换到二维时域。

**Step3** 待所有子孔径回波都完成一致聚焦和修正 Stolt 插值后,将子孔径回波合并,并基于合并后的回波数据作多谱勒参数估计和相位误差补偿。

**Step4** 最后,对相位误差补偿后的回波数据作方位压缩即得到 SAR 图像.为进一步提高图像质量,还可基于图像数据作 PGA/PACE 等<sup>[14]</sup>自聚焦处理,补偿图像中的残余相位误差。

子孔径 MWD 成像的优点有:(1)通过方位分子孔径,波束照射时间由  $T_a$  变成  $T_i$  ( $T_i < T_a$ ),缩短波束照射时间就降低了载机速度的波动幅度,进而减小距离徙动差和交叉耦合相位误差值;(2)在作子孔径回波一致聚焦和修正 Stolt 插值时,通过利用子孔径内的平均速度  $\overline{v_a(t_i)}$  代替载机预设速度或全孔径平均速度  $\overline{v_a(t_a)}$ ,提高了该子孔径内的方位波数精度,从而提高一致聚焦精度和插值处理精度。

综上所述,图 2 给出了结合运动补偿的 MWD 算法对低频 UWB SAR 实测数据成像的信号处理流程。

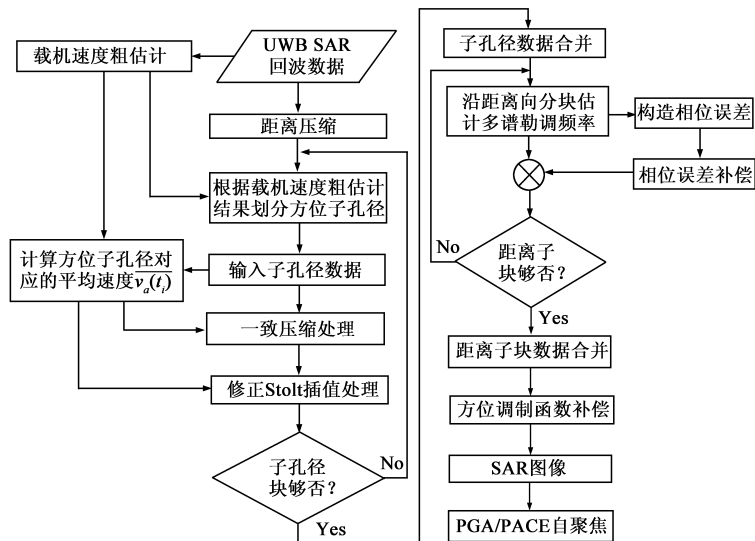


图2 结合运动补偿的MWD算法成像处理流程

## 4 实验结果

### 4.1 仿真实验

#### 4.1.1 理想情况下 MWD 成像结果

为了验证了本文所提 MWD 算法的成像精度,我们利用分别用传统 WD 算法和本文所提 MWD 算法对理想情况下的低频 UWB SAR 进行成像处理.仿真中设发射信号中心频率为 450MHz,带宽为 200MHz,采样频率为 250MHz,脉冲重复频率为 200Hz,图像二维分辨率为  $0.75\text{m} \times 1.0\text{m}$ (距离向  $\times$  方位向),波束积累角为  $20.15^\circ$ ,测绘带中心斜距为 3100m,成像场景大小为  $200\text{m} \times 200\text{m}$ ,在场景中心及四角各设置了一个点目标.图 3(a)、(b)是两种成像算法的成像结果,图 3(c)、(d)是场景中心点目标的二维剖面图对比.从仿真成像结果看出,本文所提 MWD 算法的成像精度和传统 WD 算法的成像精度基本一致.而从中心点目标的二维剖面图也可发现,两种成像算法所得点目标的主瓣波形几乎完全一致,只是旁瓣波形有一定程度的起伏差别,但是旁瓣的起伏差别对图像聚焦质量没有影响.仿真实验结果证明 MWD 算法在将距离向聚焦、方位向聚焦分离开的同时,保持了原始 WD 算法对低频 UWB SAR 的精确成像能力。

#### 4.1.2 结合运动补偿的 MWD 成像仿真

本文还对结合运动补偿的 MWD 成像进行了仿真,在仿真中设定载机在垂直航向的二维平面内的偏航误差分别为  $\Delta y = -3\sin(2\pi \cdot 0.08t_a)$ ,  $\Delta z = 2\sin(2\pi \cdot 0.08t_a)$  其中  $\Delta y, \Delta z$  分别为水平方向和垂直方向的偏航误差;同时设载机飞行速度误差为  $\Delta v = 1.0 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.08t_a)$ .图 4 为不同条件下的点目标仿真成像结果,由图示结果可以看出,原始 WD 算法由于不能进行距离空变的二阶

补偿,而单纯依靠基于图像域的 PGA 自聚焦无法消除运动误差,点目标仍然散焦严重.而采用本文提出的结合运动补偿 MWD 算法成像后,点目标聚焦质量改善明显.虽然旁瓣形状和理想情况下不同,但主瓣聚焦质量已经比较理想,由此证明本文所提算法的有效性。

### 4.2 实测数据处理结果

我们选取了某次飞行实验所录取的 P 波段(200MHz ~ 800MHz)UWB SAR 实测数据作成像处理,该 UWB SAR 系统的成像模式为正侧条带式,系统相对带宽约为 40% ~ 50%.载机飞行高度 5km,载机预设飞行速度为 105m/s,脉冲重复频率为 250Hz,方位积累角为  $17.2^\circ$ (系统实际波束角宽度大于该积累角,成像中去除波束边缘区域).原始回波数据点数为  $4608 \times 10240$ (距离向  $\times$  方位向).该回波数据没

有相应的传感器数据可利用,需通过参数估计的方式从回波中提取载机运动参数.在进行载机速度粗估计时,采用重叠子块的方法,每个子块大小为 512 点,重叠比为 1/2,载机飞行速度粗估计结果如图 5 所示.根据所估计出的载机飞行速度,我们以子孔径内载机速度变化幅度不超过子孔径所对应平均速度的 2% 为标准来划分子孔径长度,进行子孔径 MWD 成像处理,并依据图 2 所示成像流程对该实测回波数据进行成像处理.图 6 为实测数据成像结果,其中图 6(a)是由“原始 WD 算法 + PGA 自聚焦”所得,图 6(b)为文中所提“结合运动补偿的 MWD 算法”所得.图 7 为从两幅实测图像中提取出的三个局部区域(分别记为 A 区、B 区、C 区)放大图.

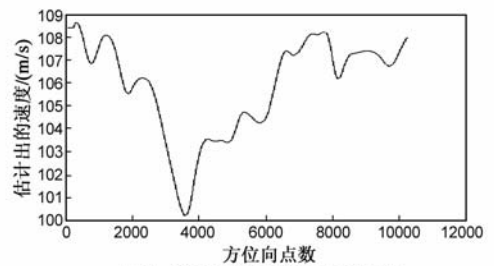


图5 载机飞行速度粗估计结果

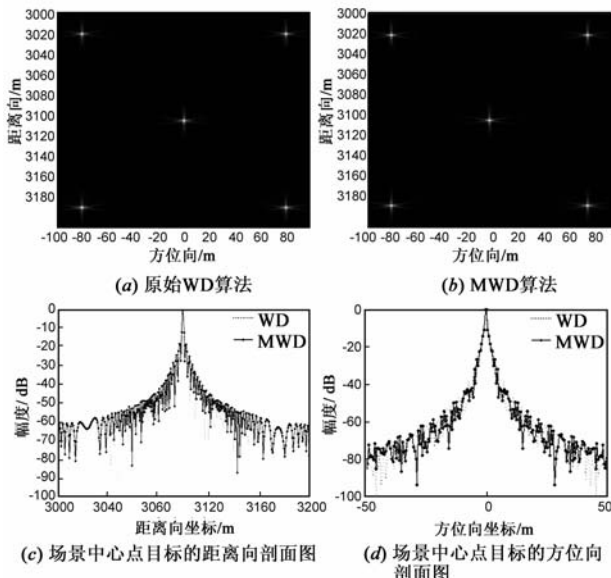


图3 MWD算法与原始WD算法的仿真成像结果对比

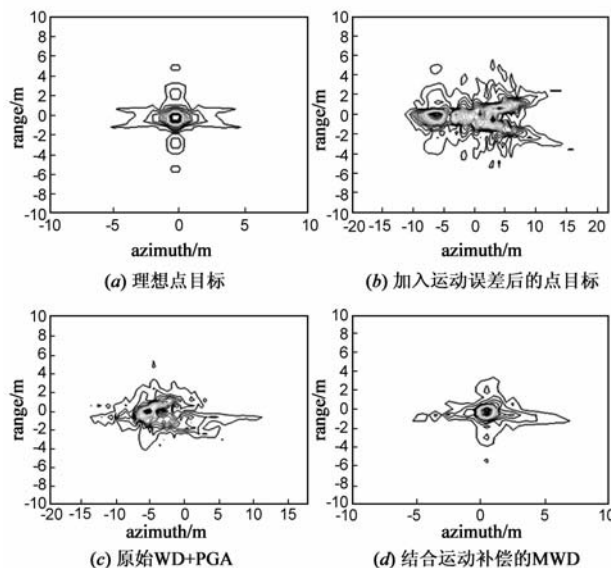


图4 不同条件下的点目标成像仿真

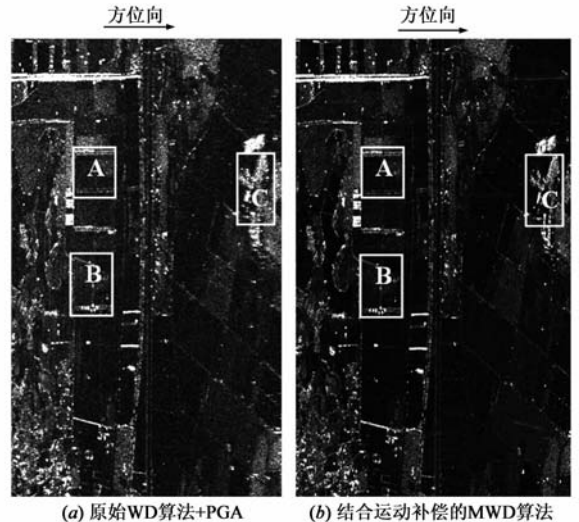


图6 P波段UWB SAR实测图像

由于场景较大,由图 6 的全景图不易分辨出两种成像方法的聚焦差别.但从图 7 所示的局部区域放大图可明显看出两者的差别,图 7 中标记出了场景中的部分道路、树木和隐藏在树林中的车辆信息.从对比中可以看出,原始方法成像后,图像中的道路、树木等信息模糊不清,强散射点散焦严重;而采用文中所提方法成像后,得到了清晰的道路、树木,以及比较清晰的农田纹理等信息(如 A 区、C 区所示),图中强散射点也得到了

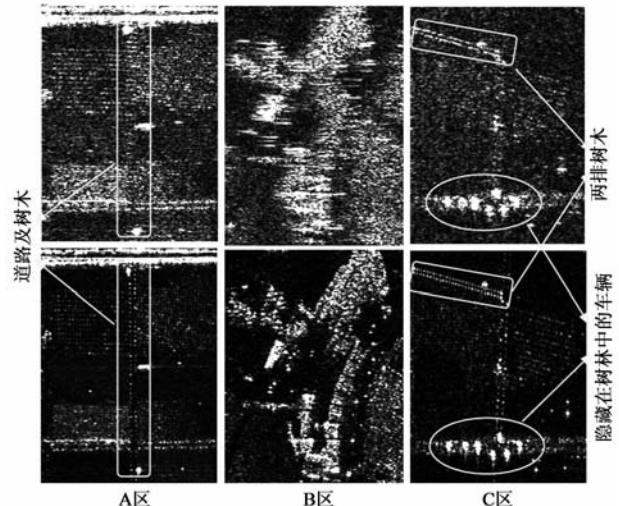


图7 局部区域放大图,上方:原始WD算法+PGA;下方:结合运动补偿的MWD算法

良好聚焦(如 B 区所示). 实测数据成像结果表明文中所提结合基于回波数据自聚焦的 MWD 算法可在无传感器数据可利用的情况下, 实现低频 UWB SAR 实测数据的良好聚焦处理.

## 5 结论

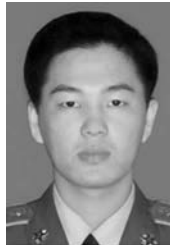
为了能够利用 WD 算法的精确成像性能实现低频 UWB SAR 实测数据良好聚焦, 本文提出了一种改进波数域(MWD)算法. 通过采取从 Stolt 映射中提取方位调制项的方法, 将原始 WD 算法成像中的距离向聚焦和方位向聚焦分离开, 使 MWD 算法可和基于回波数据的精确运动补偿方法结合. 同时, 为提高 MWD 算法对大合成孔径 UWB SAR 实测数据的成像质量, 在分析了低频 UWB SAR 和 MWD 算法的特点后, 采用子孔径 MWD 成像的方法来提高 UWB SAR 全孔径成像质量, 进而提高了 MWD 算法对非理想情况下低频 UWB SAR 的成像精度. 结合基于回波数据运动补偿的 MWD 算法可在无传感器数据可利用的情况, 实现低频 UWB SAR 实测数据的良好聚焦. 最后, 仿真实验和某 P 波段 UWB SAR 实测数据成像处理证明了文中所提方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] 王亮, 练有品, 黄晓涛, 等. 大斜视角与大波束角 SAR 成像比较[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1672 - 1675.  
WANG Liang, LIAN You-pin, HUANG Xiao-tao, et al. Comparison of large-squint and large-beam SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1672 - 1675. (in Chinese)
- [2] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 结合非线性 CS 算法的 UWB SAR 运动补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 514 - 519.  
LI Yan-ping, XING Meng-dao, BAO Zheng. Motion compensation for ultra wide-band SAR based on nonlinear chirp scaling algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 514 - 519. (in Chinese)
- [3] R Bamler. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 30(1): 706 - 713.
- [4] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1824 - 1828.  
XING Meng-dao, BAO Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1824 - 1828. (in Chinese)
- [5] G W Davidson, I G Cumming, M R Ito. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 121 - 133.
- [6] A Moreira, J Mittermayer, R Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for sir-and spcaeborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1123 - 1136.

- [7] V T Vu, T K Sjögren, M I Pettersson. A comparison between fast factorized backprojection and frequency domain algorithms in UWB low frequency SAR [A]. Proceeding of IGARSS'08 [C]. Boston, massachusetts USA: IEEE, 2008. 1284 - 1287.
- [8] L M H Ulander, H Hellsten, G Stenstrom. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. , 2003, 39(3): 760 - 776.
- [9] A Reigber, E Alivizatos, A Potsis, et al. Extended wavenumber domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2006, 153(2): 301 - 310.
- [10] H Cantalloube, P Dubois-Fernandez. Airborne X-band SAR imaging with 10cm resolution: Technical challenge and preliminary results [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2006, 153(2): 163 - 176.
- [11] 潘凤艳, 邢孟道, 廖桂生. 结合运动补偿的波数域算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(3): 454 - 457.  
PAN Feng-yan, XING Meng-dao, LIAO Gui-sheng. A wavenumber domain algorithm integrated with the motion compensation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(3): 454 - 457. (in Chinese)
- [12] I G Cumming, F H Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithm and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [13] 薛国义. 机载高分辨超宽带合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
XUE Guo-yi. Research of motion compensation in airborne UWB SAR with high resolution [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] J Kolman. PACE: an autofocus algorithm for SAR [A]. Proceeding of International Radar Conference [C]. Virginia, USA: IEEE, 2005. 310 - 314.

## 作者简介:



安道祥 男, 1982 年出生于吉林东丰县, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院信息与通信工程专业博士研究生. 从事低频超宽带 SAR 成像与超高分辨聚束式 SAR 成像技术研究. E-mail: daoxiangn@yahoo.com.cn

黄晓涛 男, 1972 年出生于湖北武汉, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 从事阵列信号处理、现代谱估计等领域的研究.

周智敏 男, 1957 年出生于河北, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 从事超宽带 SAR 信号处理、高速信号实时处理等领域的研究.