

二阶运动补偿对低频超宽带 SAR 视线误差补偿的影响

李建阳* 常文革 黎向阳

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 视线误差补偿是低频超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)成像处理的关键, 该文主要研究基于测量数据的距离空变视线误差补偿, 即二阶补偿。标准的二阶补偿在推导的过程中, 对回波进行了一定的近似, 认为距离空变视线误差对回波距离迁徙校正(RCMC)没有影响, 而这个近似条件, 在低频超宽带 SAR 中是不满足的。针对这个问题, 该文对二阶补偿在低频超宽带 SAR 中的应用进行了分析, 研究了3种二阶补偿方法, 即: 二阶补偿位于 RCMC 之后完成; 二阶补偿位于 RCMC 之前完成; 沿距离向划分子带进行二阶补偿。文中对3种二阶补偿方法进行了对比分析, 并对每种补偿方法中存在的误差进行了分析。最后采用仿真以及实测低频超宽带 SAR 数据验证了文中分析的正确性。

关键词: 低频超宽带 SAR; 距离空变; 二阶运动补偿; 距离迁徙校正

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0792-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00812

Second-order Motion Compensation Effects on Light of Sight Error Compensation in Low-frequency Ultra Wide-band SAR

Li Jian-yang Chang Wen-ge Li Xiang-yang

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

Abstract: The MOtion COmpensation (MOCO) of Light Of Sight (LOS) error is very important in low-frequency Ultra Wide-Band Synthetic Aperture Radar (UWB SAR). In this paper, the second-order MOCO is studied which compensate the range-variant component of LOS error. In second-order MOCO, the assumption that there is no effect of range-variant LOS error on the Range Cell Migration Correction (RCMC) is supposed, which is not satisfied in UWB SAR. This paper analyzes the application of the second-order MOCO in low-frequency UWB SAR. Three methods which can be applied to compensate the range-variant LOS error are presented. First method implements the second-order MOCO after RCMC, second method implements it before RCMC, and the last method implements it in sub-band which is split along range direction. The three methods are compared and analyzed in this paper. Finally, the effectiveness of theoretical analysis is validated with simulation and real low-frequency UWB SAR data.

Key words: Low-frequency ultra wide-band SAR; Range-variant; Second-order motion compensation; Range Cell Migration Correction (RCMC)

1 引言

视线误差补偿是低频 UWB SAR 成像处理的关键, 如何有效地消除视线误差的影响, 直接关系到成像处理的效果。视线误差补偿一般基于 GPS/INS 测量数据完成, 文献[1]提出了将视线误差补偿分为两个步骤完成的方法, 距离空不变视线误差补偿, 即一阶补偿, 距离空变视线误差补偿, 即二阶补偿, 并将视线误差补偿与成像算法结合起来。文献[2]对一阶补偿和二阶补偿的合理性进行了理论推导, 推导的假设条件有两个: 一个是视线误差

补偿与目标方位角无关, 另一个是距离空变相位误差对距离迁徙校正(RCMC)没有影响。在 UWB SAR 中, 这两个条件均不满足。由视线误差所引入的方位空变相位误差补偿是 UWB SAR 相位误差补偿的难点。针对相位误差沿方位向的空变性, 文献[3-6]采用子孔径以及子孔径变形算法补偿该相位误差, 这些研究有效地解决了 UWB SAR 成像处理中的视线误差沿方位空变的问题。在低频 UWB SAR 中, 距离空变视线误差的补偿, 对目标的 RCMC 精度有一定的影响, 影响最终的补偿效果。

本文针对低频 UWB SAR 二阶补偿所存在的问题, 主要研究了3部分的内容: 一是研究二阶补

2010-08-05 收到, 2011-01-25 改回

*通信作者: 李建阳 jianyang_li@126.com

偿在 RCMC 之后完成对视线误差补偿的影响。从回波 2 维频域入手分析距离空变视线误差对 RCMC 的影响。二是研究了二阶补偿在 RCMC 之前完成的距离空变视线误差补偿方法。将二阶补偿位于 RCMC 之前完成,可以有效地减小距离空变视线误差补偿对 RCMC 的影响,但也导致了距离空变视线误差不能完全补偿,文中对该残留误差进行了分析。三是研究了沿距离向划分子带进行二阶补偿的方法。划分距离子带进行距离空变视线误差补偿相当于对前面两种二阶补偿方法的折中处理,文中对二阶补偿精度以及子带长度划分等问题进行了分析,最后采用仿真以及实测 UWB SAR 数据对本文分析进行验证。

2 低频 UWB SAR 视线误差补偿

在高频窄带 SAR 中,由于不需要考虑视线误差沿方位向的空变性,因此只需采用一阶补偿和二阶补偿即可较好地完成对视线误差的补偿。而低频 UWB SAR 需要考虑视线误差所引入的方位空变相位误差,这就要在标准的一阶补偿和二阶补偿之后,对方位空变的相位误差进行补偿。图 1 给出了结合 Nonlinear Chirp Scaling(NCS)成像算法的低频 UWB SAR 视线位移误差补偿流程^[7,8],视线位移误差补偿同样可以与其它成像算法相结合^[9]。

视线误差补偿中,将视线误差补偿分解为距离空不变视线误差补偿和距离空变视线误差补偿,为此,将视线误差也分解为随距离空变部分和空不变部分,即

$$\begin{aligned} \Delta r(t_m, R_B) &= [\Delta r(t_m, R_B) - \Delta r(t_m, R_s)] + \Delta r(t_m, R_s) \\ &= \Delta r_v(t_m, R_B) + \Delta r_0(t_m, R_s) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 R_s 为参考斜距, R_B 为雷达到目标的垂直斜距, t_m 为方位时间, $\Delta r_0(t_m, R_s)$ 为距离空不变视线误差, $\Delta r_v(t_m, R_B)$ 为距离空变视线误差。

距离空不变视线误差的补偿由于与斜距无关,

因此可以选择在距离压缩之前或之后完成,在方位时域的补偿参考函数,相位误差补偿函数可以表示为

$$H_{\text{MOCO Ia}}(t_m) = \exp\{j4\pi\Delta r_0(t_m, R_s)/\lambda\} \quad (2)$$

其中 λ 为波长。

当回波包络误差超过一个距离分辨单元时,需要对包络误差进行补偿,包络误差补偿在距离频域完成。以参考斜距位置的视线误差为准进行补偿,参考函数可以表示为

$$H_{\text{MOCO Is}}(t_m, f_r) = \exp\{j4\pi\Delta r_0(t_m, R_s)f_r/c\} \quad (3)$$

其中 c 为光速, f_r 为距离频率。

然后进行距离压缩和 RCMC,将目标信号校正到同一距离单元上,接着完成对距离空变视线误差进行补偿,即二阶补偿,二阶补偿参考函数可以表示为

$$H_{\text{MOCO II}}(t_m, R_B) = \exp\{j4\pi\Delta r_v(t_m, R_B)/\lambda\} \quad (4)$$

方位空变相位误差的补偿一般采用子孔径的思想完成,具体补偿过程可以参考文献^[3-6],在这里不进行详细介绍。

上面所描述的低频 UWB SAR 视线误差补偿是针对 UWB SAR 大方位积累角而设计的。按照图 1 所示的视线误差补偿流程可以有效地去除视线误差沿方位向的空变性,但是这种补偿方法还存在一定的问题,主要是二阶补偿对 RCMC 的影响。在接下来的部分将对 3 种二阶补偿方法进行研究。

3 二阶补偿位于 RCMC 之后对运动补偿效果的影响

低频 UWB SAR 距离迁徙比较大,当二阶补偿位于 RCMC 之后完成,残留的距离空变视线误差对距离迁徙校正有一定的影响,本节主要对二阶补偿位于 RCMC 之后的条件进行分析。

SAR 回波数据完成一阶补偿后,将回波变换到距离频域,忽略包络项的影响,这时目标回波可以

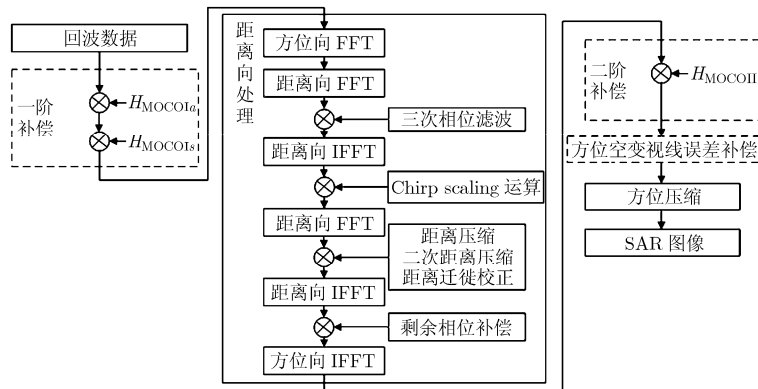


图 1 结合 NCS 算法的低频 UWB SAR 方位空变的视线误差补偿

表示为

$$S_s(f_r, t_m, R_B) = \exp\{-j\pi(f_r^2/\gamma)\} \cdot \exp\{-j(4\pi/c)[R(t_m, R_B) + \Delta r_v(t_m, R_B)](f_r + f_c)\} \quad (5)$$

其中 γ 为调频率, f_c 为载频, $R(t_m, R_B) = \sqrt{R_B^2 + (Vt_m)^2}$ 为雷达到目标的瞬时斜距, V 为载机速度。

采用驻定相位原理将式(5)变换到 2 维频域的过程中, 需要求取方位向的驻定相位点, 式(5)求取驻定相位点的方位相位项可以表示为

$$\varphi(t_m) = -\frac{4\pi}{c}(f_c + f_r) \left[\sqrt{R_B^2 + (Vt_m)^2} + \Delta r_v(t_m, R_B) \right] - 2\pi f_a t_m \quad (6)$$

其中 f_a 为方位频率。

对式(6)求导, 可以得到

$$\varphi'(t_m) = \frac{4\pi}{c}(f_c + f_r) \left[\frac{(Vt_m)V}{\sqrt{R_B^2 + (Vt_m)^2}} + \frac{d}{dt_m} \Delta r_v(t_m, R_B) \right] - 2\pi f_a \quad (7)$$

令 $\varphi'(t_m) = 0$, 求取驻定相位点, 式(7)中包含了随距离空变的视线误差部分, 在未知其具体形式的情况下, 很难从式(7)中直接求取驻定相位点。

这里采用近似处理, 认为距离空变相位误差很小, 在求取驻定相位点时, 将其影响忽略, 这时可以解出驻定相位点为

$$t_m^* = -\frac{1}{2V^2} f_a R_B / \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2V}\right)^2} \quad (8)$$

进而可以得到回波 2 维频域表达式为

$$SS(f_r, f_a, R_0) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right\} \cdot \exp\left\{-j4\pi R_B \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2V}\right)^2}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \Delta r(t_m^*, R_B)\right\} \quad (9)$$

从式(9)中可以看出, 视线误差的影响被分离出来了, 该误差对回波 RCMC 没有影响, 可以采用正常的成像处理流程进行处理, 并且, 在 RCMC 之后将距离空变相位误差补偿掉。

在上面的分析中, 讨论了二阶补偿合理性的推导, 在求取驻定相位点时, 将距离空变视线误差的影响忽略掉, 这时如式(9)所示, 视线误差项分离出来, 对 RCMC 等操作没有影响。对于高频窄带 SAR 距离弯曲量比较小, 距离空变视线误差对 RCMC 的影响很小, 而对于低频 UWB SAR, 距离弯曲量很大, 距离空变视线误差对 RCMC 的影响比较大,

在后面采用仿真数据进行验证; 距离空变视线误差对 RCMC 的影响可以忽略的条件将在距离向划分子带的二阶补偿部分进行分析。

4 二阶补偿位于 RCMC 之前对运动补偿效果的影响

在低频 UWB SAR 中, 将二阶补偿位于 RCMC 之后完成, 距离空变视线误差对 RCMC 有一定的影响。这里考虑将二阶补偿位于 RCMC 之前完成, 这样可以消除距离空变视线误差对 RCMC 的影响, 但是这种补偿方法同样存在一定的误差, 在这里对该误差进行分析。

距离空变视线误差补偿由于需要对每个距离单元的回波进行补偿, 需要在距离时域进行补偿, 将式(5)所示的一阶补偿后的回波信号变换到 2 维时域, 这时信号可以表示为

$$ss(\hat{t}, t_m, R_B) = \exp\left\{j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, R_B) - j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)\right\} \quad (10)$$

式(10)中, 由于目标距离向信号为线性调频信号, 分布在一定的时宽范围内, 而残留的距离空变视线误差为需要针对每个目标的距离位置进行补偿, 因此需要将回波进行距离压缩, 然后再进行二阶补偿。对式(10)进行距离压缩, 这时信号可以表示为

$$ss(\hat{t}, t_m, R_B) = \text{sinc}\left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, R_B) - j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)\right\} \quad (11)$$

在式(11)的基础上进行距离空变视线误差补偿。

为了分析二阶补偿位于 RCMC 之前完成所存在的相位误差, 对位于 (X_n, R_B) 的目标进行分析, 对于该目标进行距离空变视线误差补偿, 不同的 t_m 位置, 只需补偿 $\Delta r_v(t_m, R_B)$ 项即可, 但是由于存在距离弯曲, 补偿项变为 $\Delta r_v(t_m, R(t_m, R_B))$, 这时, 该目标所补偿的距离空变视线误差可以表示为

$$H_{\text{MOCOM}}(t_m, R_B) = \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R(t_m, R_B))\right\} \quad (12)$$

对式(11)进行二阶补偿后, 回波信号可以表示为

$$ss(\hat{t}, t_m, R_B) = \text{sinc}\left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, R_B)\right\} \cdot \exp\left\{-j(4\pi/\lambda)[\Delta r_v(t_m, R_B) - \Delta r_v(t_m, R(t_m, R_B))]\right\} \quad (13)$$

式(13)中最后一个指数项为二阶补偿后残余的相位误差,该误差项与目标距离弯曲量有关,若以 $\pi/4$ 为判断相位误差是否有影响的临界值,则当残余的相位误差满足式(14)所示的条件时,可以将二阶补偿位于 RCMC 之前完成。

$$|\Delta r_v(t_m, R_B) - \Delta r_v(t_m, R(t_m, R_B))| < \lambda/16 \quad (14)$$

测绘带范围内,不同斜距位置目标距离迁徙基本相同,因此,距离空变视线误差的差值在测绘带边缘部分和测绘带中心部分差别不大。由于残留的距离空变误差本来就比较小,在距离弯曲量范围内的视线误差的差异也较小,因此在 RCMC 之前对回波进行二阶补偿对运动补偿效果有影响,但是影响不太大。

5 距离向划分子带的二阶补偿

前面分析了二阶补偿位于 RCMC 之前和 RCMC 之后对运动补偿效果的影响,两种二阶补偿方法对运动补偿效果均产生一定的影响。为了减小二阶补偿对目标 RCMC 的影响,一种思路是将二阶补偿放在 RCMC 之前完成;另一种思路是沿距离向划分子带,每个子带内分别进行一阶补偿,减小剩余的距离空变视线误差。

划分距离子带进行视线误差补偿的流程如图 2 所示,图中的距离向处理与图 1 中的距离向处理相同。图 2 中的运动补偿相当于在子带回波中进行一阶补偿和二阶补偿,来消除二阶补偿对成像质量的影响。认为子带内距离空变视线误差对 RCMC 的影响可以忽略,这样就可以在 RCMC 之后完成二阶补偿。为了分析距离向子带中距离空变视线误差对回波 RCMC 的影响,从另外的角度进行分析,距离迁徙校正之前,雷达到目标的斜距可以表示为

$$R(t_m, R_B) = \sqrt{R_B^2 + (Vt_m)^2} = R_B / \cos \theta \quad (15)$$

式中 θ 为天线相位中心在天线波束宽度内与天目标的连线和航线垂直距离之间的夹角,回波的多普勒

f_a 为斜视角 θ 的函数,即 $f_a = 2V \sin \theta / \lambda$,因此,将斜距表示为多普勒频率的形式

$$R(f_a, R_B) = R_B / \sqrt{1 - (f_a \lambda / 2V)^2} \quad (16)$$

式(16)为不存在视线误差情况下的目标斜距,当存在视线误差时,相当于斜距存在误差,一阶补偿后,距离空不变的视线误差得到了补偿,存在距离空变视线误差情况下,式(19)可以表示为

$$R(f_a, R_B) = [R_B + \Delta r_v(t'_m, R_B)] / \sqrt{1 - (f_a \lambda / 2V)^2} \quad (17)$$

式中 t'_m 为某一方位时刻,在低频 UWB SAR 中,波长比较长,相对于高波段窄带 SAR 而言,式(17)中距离空变视线误差的影响比较大,特别是测绘带边缘部分。

在子带范围内,当距离弯曲量满足

$$\Delta r_v(t'_m, R_B) \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda f_a / 2V)^2}} - 1 \right] < \rho_a / 2 \quad (18)$$

式中 ρ_a 为方位分辨单元,这时可以近似认为距离空变视线误差对目标距离迁徙校正没有影响,这个条件同样也可以说明,当距离空变视线误差满足式(18)的条件时,二阶补偿可以放在 RCMC 之后完成。

假设沿距离向划分了 M 个子带,子带所对应的测绘带宽度为 ΔR_s ,每个子带回波所对应的中心斜距为 R_s ,当子带回波中的距离空变视线误差满足式(19)所示的条件时,距离空变视线误差对距离迁徙校正的影响可以忽略。

$$\max_{1 \leq m \leq M} \left\{ \Delta r_v \left(t'_m, R_m + \frac{\Delta R_s}{2} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda f_a / 2V)^2}} - 1 \right] \right\} < \rho_a / 2 \quad (19)$$

式(19)给出了距离向划分子带时,子带长度的选择条件,通过划分子带可以提高图像的聚焦效果,减小距离空变视线误差对 RCMC 的影响。

上面对比分析了 3 种二阶补偿方法的补偿效果,这里对 3 种方法的运算量进行一些说明。二阶补偿完成距离空变视线误差的补偿,补偿函数如式(4)所示,需要对每一条方位线进行补偿,因此,3 种二阶补偿方法所需的运算量基本相同。但是,二阶补偿位于 RCMC 之前完成时,可以将二阶补偿和一阶补偿合并起来,补偿流程实现相对简单;沿距离划分子带进行二阶补偿,涉及到回波数据的分割等操作,补偿流程实现相对较复杂;二阶补偿位于 RCMC 之后完成的实现流程的复杂度介于另外两种方法之间。

6 仿真以及实测数据处理结果

为了验证前面分析的二阶补偿对低频 UWB

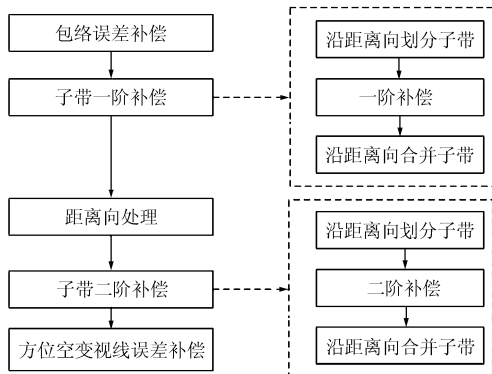


图 2 子孔径子带视线误差补偿流程图

SAR 成像质量的影响, 在这里采用仿真数据和实测数据进行处理, 仿真数据的参数设置为: 载频 600 MHz, 带宽 200 MHz, 脉冲重复频率 200 Hz, 参考斜距 10 km, 载机速度 67 m/s, 方位分辨率 1 m。成像算法为 NCS 算法。在仿真中放置两个目标, 一个位于测绘带中心位置, 一个位于测绘带边缘 500 m 位置。

在仿真中不添加前向速度误差, 只在视线方向加入误差, 设载机水平面 y 方向加入运动误差 $\Delta y = 5 \cos(2\pi t \times 1.2/T_s)$, 在垂直面 z 方向加入运动误差 $\Delta z = 8 \cos(2\pi t \times 1.9/T_s)$, 水平和垂直方向运动误差变化频率比较快。运动补偿采用一阶补偿、二阶补偿、方位空变视线误差补偿的方法, 其中二阶补偿位置分别位于 RCMC 之前、RCMC 之后和距离向划分子带完成。

图 3 给出了运动补偿后的目标剖面图, 图 3(a) 为参考斜距位置目标的方位剖面图, 在 RCMC 之前或距离子带校正距离空变视线误差对补偿效果有一定的影响, 补偿效果不如在 RCMC 之后进行, 这主要是由于参考斜距位置的距离空变视线误差为零, 对 RCMC 没有影响, 而距离空变视线误差放在 RCMC 之前完成会引入一定的误差, 这种误差对方位聚焦效果的影响很小。图 3(b) 为测绘带边缘 500 m 位置目标的方位剖面图, 从图中可以发现, 二阶补偿位于 RCMC 之后完成, 对聚焦性能有较大影响, 目标沿方位向分辨率变差较多, 并且旁瓣的影响也增大; 二阶补偿位于 RCMC 之前的成像效果要好很多, 距离向划分子带的二阶补偿性能与

二阶补偿位于 RCMC 之前相当。二阶补偿位于 RCMC 之后完成时, 越靠近测绘带边缘的位置, 距离空变视线误差越大, 对成像质量的影响也越大, 二阶补偿位于 RCMC 之前和距离向划分子带则没有测绘带的限制。

采用本文所分析的视线误差补偿方法, 对实测低频 UWB SAR 数据进行处理, 雷达工作在 P 波段, 分辨率为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。采用实测 GPS/INS 测量数据对视线误差进行补偿, 二阶补偿位于 RCMC 之前, 同时补偿视线误差沿方位向的空变性。由于 GPS/INS 测量参数存在一定的误差, 因此, 在视线误差补偿后, 再采用基于回波数据的自聚焦处理^[10,11]。对测绘带 3.6 km 的范围进行成像处理, 截取测绘带边缘 1.2 km 处的成像结果, 如图 4 所示, 水平方向为距离向, 图中包含了一条高速公路, 聚焦效果良好。

7 结论

视线误差补偿是 SAR 成像处理中的关键, 补偿效果的好坏直接影响到最后的成像结果。本文研究了视线误差补偿中的二阶补偿对低频 UWB SAR 运动补偿的影响, 对比分析了 3 种二阶补偿方法, 一是将二阶补偿位于 RCMC 之后完成, 二是将二阶补偿位于 RCMC 之前完成, 三是沿距离向划分子带进行二阶补偿。通过仿真数据验证了在低频 UWB SAR 中, 二阶补偿位于 RCMC 之后完成, 对运动补偿的影响最大; 而二阶补偿位于 RCMC 之前与距离向划分子带的二阶补偿补偿性能相当。

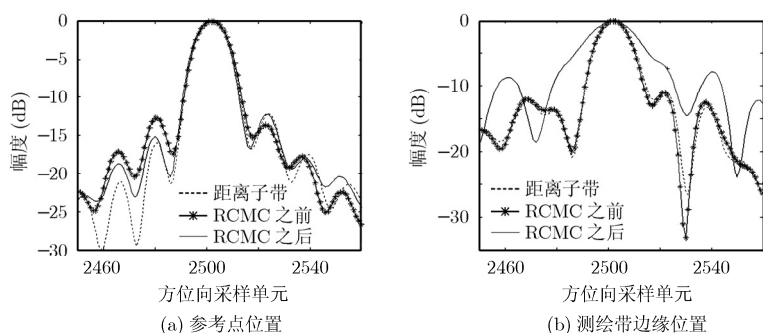


图 3 高频视线误差时点目标冲击响应比较 (5 倍插值)

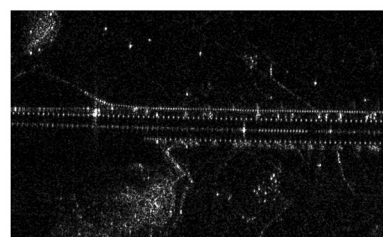


图 4 UWB SAR 实时成像处理结果

参考文献

- [1] Moreira A and Huang Y H. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029-1040.
- [2] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis

- and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [3] Potsis A, Reigber A, Mittermayer J, Moreira A, and Uzunoglou N. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing[J]. *IEEE Electronic Letters*, 2001, 37(23): 1405-1406.

- [4] Macedo K A C and Scheiber R. Precise topography and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172-176.
- [5] 薛国义, 周智敏, 赖涛. 宽波束角大测绘带 UWB SAR 的子孔径子带运动补偿算法[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 1008-1014.
Xue Guo-yi, Zhou Zhi-min, and Lai Tao. An improved sub-aperture sub-patch motion compensation algorithm for UWB SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(3): 1008-1014.
- [6] 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, and 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.
- [7] 李建阳, 常文革, 王亮, 李悦丽. 机载 UWB SAR 实时信号处理算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 57-62.
Li Jian-yang, Chang Wen-ge, Wang Liang, and Li Yue-li. Real-time processing of airborne ultra-wide band SAR[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(1): 57-62.
- [8] 王亮. 基于实测数据的机载超宽带合成孔径雷达信号处理技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
Wang Liang. Research of real data processing technology on airborne UWB SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [9] Reigber A, Potsis A, and Alivizatos E, *et al.* Wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS), Toulouse, France, 2003: 1465-1467.
- [10] Samczynski P and Kulpa K S. Coherent MapDrift technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1505-1517.
- [11] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, Wu Ren-biao, Zhou Feng, and Bao Zheng. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870-2883.
- 李建阳: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达实时处理技术.
- 常文革: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 长期从事超宽带雷达的系统设计和成像处理等方面的研究.