

阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究

侯海平* 曲长文 丁灿 杨俭
(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘要: 基于阵列技术的前视SAR能对载机前方区域高分辨成像,但阵列天线的微动会对成像产生影响。该文提出了基于时频分析提取微动特征参数的方法,研究了阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿问题:基于前视SAR阵列天线特点对阵列天线微动进行建模,并分析了阵列天线形变的补偿方法。然后基于时频分析方法讨论了阵列天线微动的时频特性并对参数进行了估计。最后在天线微动条件下对点目标进行了成像仿真,并结合成像特征对天线微动补偿前后的结果进行了分析比较。结果表明该文所建模型和所提算法是正确和有效的。

关键词: 阵列 SAR; 前视成像; 天线微动; 时频分析; 补偿

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0831-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00750

Influence of Array Antenna Micro-motion on Forward-looking SAR Imaging and Compensation Study

Hou Hai-ping Qu Chang-wen Ding Can Yang Jian
(Department of Electronic and Information Engineering,
Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Airborne forward-looking SAR based on array technology can supply high-resolution images of the area with respect to forward direction of the flight path. However, micro-motion of the array antenna may affect imaging. Extraction method of micro-motion characteristic parameters based on time-frequency analysis is proposed, and influence of array antenna micro-motion on forward-looking SAR imaging and the compensation method are investigated. Firstly, micro-motion model of array antenna is established based on antenna characteristic of forward-looking SAR, and compensation method of array antenna deformation is analyzed. Then, time-frequency characteristic of array antenna micro-motion is studied based on time-frequency analysis method. Finally, imaging simulation of point target in the condition of antenna micro-motion is done. Imaging results before and after compensation are compared combined with imaging characteristic. Results indicate that the established model and proposed method are correct and valid.

Key words: Array SAR; Forward-looking imaging; Antenna micro-motion; Time-frequency analysis; Compensation

1 引言

阵列 SAR 能够提供目标空域-时域-频域 3 维信息,有效提升了雷达的系统性能^[1]。作为阵列 SAR 重要的领域之一,前视 SAR 利用沿跨航向线性排列的一组天线阵元张成类似扫描 SAR 的部分孔径,即使在载机悬停状态也可以对波束覆盖的正前方区域成像^[2],有效解决了常规 SAR 侧视成像的盲区问题。典型的前视 SAR 是德国宇航局(DLR)研发的用于视景增强的新型区域成像雷达(SIREV)系统^[3]。近年来,基于 SIREV 对前视成像问题的研究取得了一系

列进展,文献[2-4]根据 SIREV 系统特点基于扩展 Chirp Scaling(ECS)算法研究了前视成像。由于在机载 SAR 中结合调频连续波(FMCW)技术的前视成像雷达系统具有高可靠、高紧凑和低功耗等优点^[5],文献[6]提出一种针对 FMCW 体制基于 2 维 Chirp-Z 变换变标的成像算法。文献[7]结合前视成像几何模型和回波信号特点提出了前视 3 维成像算法,并对 X 波段进行了仿真实验。这些研究为前视 SAR 成像技术的发展提供了新的思路。

自从微多普勒概念被引入雷达成像领域,对目标微动特性及微动目标成像的研究成为热点。文献[8]对目标颤振、转动和锥旋等状态的微多普勒效应进行了论证,文献[9,10]研究了 SAR 成像的微多普勒问题,文献[11]针对旋转微动目标的 SAR 成像特征作

2010-07-15 收到,2010-10-15 改回

“泰山学者”建设工程专项经费和中国博士后科学基金(2005037772)

资助课题

*通信作者:侯海平 hhp_happy@163.com

了深入分析。不同于对目标微动特性的研究,由于前视SAR采用了阵列天线,天线易受发动机振动等因素影响而发生形变和颤振,天线阵各阵元相位中心会发生偏移,即使在载机悬停状态该问题也不容忽视,因此阵列SAR对天线的稳定性要求很高,研究阵列SAR天线微动对成像的影响及补偿问题有重要意义。本文基于前视SAR成像原理及阵列天线特点,建立了前视SAR阵列天线微动模型,基于时频分析方法分析了前视阵列SAR天线的微动特性、对成像的影响以及微动补偿问题。

2 前视阵列SAR成像原理

前视阵列SAR信号收发几何如图1所示。建立坐标系如下:载机飞行方向为航线向,沿机翼为跨航向,机底点到载机的方向为高度向,入射波平面内雷达到目标点为径向距离向。载机以速度 V 沿 X 轴运动,平行于 Y 轴的阵列天线由接收天线阵和一个单独的相参发射机天线组成,长度为 L 。点目标 P 坐标为 $P=(x_0, y_0)$, α 为波束投射角, H 为载机高度, h 为接收天线中心到正下方发射天线的距离。

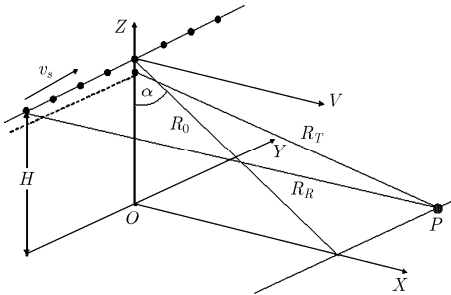


图1 SAR前视成像几何示意图

发射天线以高的脉冲重复频率(PRF)发射线性调频信号,彼此相邻且独立的接收天线阵元以速度 v_s 快速切换并依次接收回波,形成合成孔径的采样点。根据SAR原理,通过对各阵元回波信号的正确相移和相干积累获取相干积累增益,产生长的合成天线,从而获得跨航向高分辨率。在径向距离方向上,通过发射大时宽带宽积的线性调频信号,并对回波进行匹配滤波得到径向距离向分辨率。

机载SAR对平台稳定性要求很高,载机的运动误差会使天线相位中心偏离理想位置,导致图像散焦、失真甚至无法成像,为了有针对性地对阵列天线微动影响分析,假设载机为无运动误差的理想状态。对前视SAR“等效双站的单发多阵元顺序接收模式”分析,假设发射FMCW信号,点目标 P 的回波信号表示为

$$s_r(\hat{t}, t_m, t_s) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau}{T_r}\right) \cdot \exp[j\Phi(\hat{t}, t_m, t_s)] \quad (1)$$

其中 $\Phi(\hat{t}, t_m, t_s) = 2\pi(f_0(\hat{t} - \tau) + (1/2)K_r(\hat{t} - \tau)^2)$, $\tau = (R_T + R_R)/c$, $R_T = \sqrt{(x - x_0)^2 + y_0^2 + H^2}$, $R_R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + H^2}$, T_r 为扫频周期, t_m 为航线向的慢时间, \hat{t} 为发射信号的快时间, t_s 为跨航向阵元切换的慢时间, f_0 为载频, R_T 和 R_R 分别为发射天线和接收天线到点目标的距离, y_n 为第 n 个接收阵元的 Y 轴坐标,且有 $y_n(t_s) = v_s t_s(n)$ 。

接收天线各阵元对回波依次接收一遍后的时间 T_s 为等效的相干积累周期, N_s 为相干积累周期数,则

$$t_m = N_s T_s \quad (2)$$

载机运动的时间 t 可以表示为

$$t = t_m + t_s(n) + \hat{t} \quad (3)$$

3 理论建模

3.1 前视阵列SAR天线微动模型

阵列天线微动几何模型如图2所示。无微动时天线发射的电磁波经目标后的回波电场矢量为 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$,则存在微动时回波电场矢量 $\mathbf{E}_V(\mathbf{r}')$ 为

$$\mathbf{E}_V(\mathbf{r}') = \exp[jk\mathbf{r}_0 \cdot (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_r)] \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, \mathbf{u}_k 和 \mathbf{u}_r 分别为入射波和回波的单位矢量, $\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{r}_0$, \mathbf{r}_0 为位移矢量。

将阵列天线的微动表示为时间的函数

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(t) = r_0(t) \cdot \mathbf{u}_0 \quad (5)$$

其中 \mathbf{u}_0 为位移的单位矢量。

对于雷达后向散射, $\mathbf{u}_k = -\mathbf{u}_r$,则式(4)中的相位差可以表示为

$$\begin{aligned} \exp[j\tilde{\Phi}(t)] &= \exp[jk\mathbf{r}_0(t) \cdot \mathbf{u}_0 \cdot (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_r)] \\ &= \exp[j2kr_0(t) \cdot \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{u}_k] \end{aligned} \quad (6)$$

t 时刻,阵列天线的位置向量为

$$\mathbf{Q}(t) = \bar{\mathbf{Q}}(t) + \tilde{\mathbf{Q}}(t) \quad (7)$$

其中 $\mathbf{Q}(y, t) = \mathbf{Q}(\hat{t}, t_s, t_m)$, $\bar{\mathbf{Q}}(t)$ 为理想位置, $\tilde{\mathbf{Q}}(t)$ 为阵列天线微动引入的位置误差,且 $\tilde{\mathbf{Q}}(t) = [\tilde{x}(t), \tilde{y}(t), \tilde{z}(y, t)]^T$, $\tilde{x}(t)$, $\tilde{y}(t)$ 和 $\tilde{z}(y, t)$ 分别表示微动误差在 X 轴, Y 轴和 Z 轴的位移量。

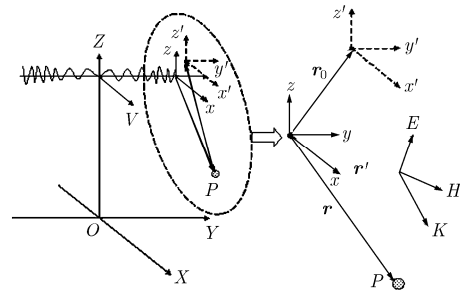


图2 阵列天线微动几何模型

设第 n 个阵元与目标的瞬时距离为 $\mathbf{r}(t)$, 阵列天线的微动使得天线接收到的目标回波相位中附加一多普勒相位。由天线微动产生的瞬时速度增量为

$$\tilde{v}_r(t) = \frac{d\tilde{\mathbf{Q}}(t)}{dt} \cdot \frac{\mathbf{r}(t)}{|\mathbf{r}(t)|} \quad (8)$$

则由接收阵元微动引入的相位差和多普勒频率分别表示为

$$\tilde{\Phi}(y, t) = (2\pi/\lambda)\tilde{\mathbf{Q}}(y, t) \quad (9)$$

$$f_{\text{vib}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\tilde{\Phi}(y, t)}{dt} \quad (10)$$

由于前视 SAR 的波束照射区域为载机前下方区域, 根据几何关系, 将阵列微动误差分解为沿径向距离分量 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\parallel}(t)$ 和垂直径向距离分量 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\perp}(t)$, 对于 y 处的接收阵元, 微动误差所在法平面如图 3 所示。微动误差对径向距离产生影响的主要是 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\parallel}(t)$ 分量, $\tilde{\mathbf{Q}}_{\perp}(t)$ 对回波相位的调制几乎没有影响, 可以忽略。

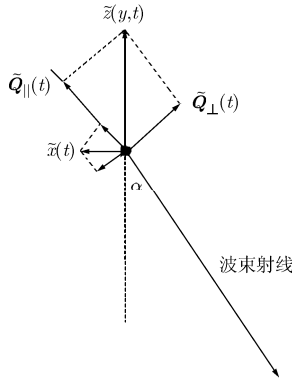


图3 阵列天线微动误差分解示意图

根据 SIREV^[2] 系统结构, 借鉴下视阵列 SAR^[12] 将阵列天线建模为 Bernoulli-Euler 梁^[13]。阵列天线的弯曲振动频率通常低于其作为杆的纵向振动或作为轴的扭转振动的频率, 因此前视 SAR 阵列天线的微动误差主要是由 $\tilde{z}(y, t)$ 引入。设阵列天线的横截面积为 $A(y)$, 材料弹性模量为 $E(y)$, 密度为 $\rho(y)$, 截面关于中性轴的惯性矩为 $I(y)$, $f(y, t)$ 和 $m(y, t)$ 分别表示单位长度梁上分布的横向外力和外力矩, 建立颤振微分方程

$$\begin{aligned} \rho(y)A(y) \frac{\partial^2 \tilde{z}(y, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[E(y)I(y) \frac{\partial^2 \tilde{z}(y, t)}{\partial y^2} \right] \\ = f(y, t) - \frac{\partial m(y, t)}{\partial y} \end{aligned} \quad (11)$$

对于等截面直梁, $\rho(y)A(y)$ 和 $E(y)I(y)$ 均为常数, 令 $f(y, t) \equiv 0$ 和 $m(y, t) \equiv 0$, 并用分离变量法求解式(11)得

$$\tilde{z}(y, t) = \tilde{Z}(y) \cdot q(t) \quad (12)$$

其中 $\tilde{Z}(y)$ 为固有振型函数, $q(t)$ 是描述运动规律的时间函数。根据初始条件, 分别求得为

$$\tilde{Z}_i(y) = U(\lambda_i y) - \frac{S(\lambda_i y)}{T(\lambda_i y)} V(\lambda_i y) \quad (13)$$

$$q_i(t) = a_i \cdot \sin(2\pi f_i t) \quad (14)$$

其中 $i = 0, 1, 2, \dots$ 表示颤振模式 (Mode) 的阶数, λ_i 为特征值, $S(\cdot)$ 、 $U(\cdot)$ 、 $T(\cdot)$ 和 $V(\cdot)$ 为 Krylov 函数, f_i 为固有频率, 可由边界条件求得, a_i 为 Mode i 的振幅, 且有 $a_i = a_0 \cdot 2^{-i}$ 。

根据前视特点可知阵列天线微动在视线方向的分量为

$$\tilde{z}_{\parallel}(y, t) = \tilde{z}(y, t) \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

由上述分析可知 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\parallel}(y, t) = \tilde{z}_{\parallel}(y, t)$, 忽略信号幅度, 相干积累周期内考虑微多普勒效应后的信号形式为

$$s_r(\hat{t}, t_s) = \exp \left[j \left(\Phi(y, t) + \tilde{\Phi}(y, t) \right) \right] \quad (16)$$

3.2 微动补偿方法

阵列天线的形变导致阵元产生位置误差, 波束主瓣会展宽且指向发生偏移, 同时旁瓣发生畸变甚至漂移。对阵列天线形变误差的测量有以下两种途径^[14]。一是采用传感器实时记录天线微动的误差, 通过幅度和相位的补偿进行校正, 第二种是利用“机会目标”(精确位置已知, 且根据几何关系经计算能够得到传感器位置信息的有利目标)确定传感器位置以实现阵列误差的自动校正。

确定了天线形变引起的阵元位置变化后, 需要对其补偿。文献[14]比较了 3 种阵列天线形变误差的补偿方法: (1)基于相位校准的补偿; (2)基于最小平方拟合的补偿; (3)基于谱分析的补偿。几种方法对阵列微动幅度有不同的适用条件和补偿精度。根据前视 SAR 天线结构特点, 要获得较高跨航向分辨率, 阵元数非常庞大, 不仅对处理的实时性有很高要求, 硬件实现也受到制约。本文将结合阵列天线微动的时频特性分析提取微动的特征参数, 通过振幅和频率的估计实现补偿。此外, 前视时天线波束有一定的宽度, 波束覆盖范围内各散射点回波相位误差是不同的。当场景较大时可以对不同的垂直距离分段, 分别补偿, 即按距离远近进行“动态”补偿。

4 阵列天线微动的时频特性分析

由于阵列天线的微动随时间变化, 对其多普勒特性的分析适合采用时频分析方法。与文献[8-11]对目标微动的分析不同, 阵列 SAR 的微动反映在阵列天线, 即传感器的颤振幅度和频率, 由于 Wigner-Ville 分布 (WVD) 比其它时频分布有更好的时频聚

集性,且用于微多普勒特性分析表现出良好性能^[10],本文采用基于修正的平滑伪WVD(MSPWVD)^[15]对阵列天线微动的时频特性分析,仿真参数列于表1中。

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
载波频率	10 GHz	阵元数	101
扫频带宽	100 MHz	阵元间距	0.03 m
脉冲重复频率	1 kHz	载机高度	920 m
波束投射角	48°	载机速度	50 m/s

假设点目标坐标 $P = (1021, 0)$ m, 对振幅 $a_0 = 0.02$ m, $a_0 = 0.01$ m 和 $a_0 = 0.005$ m 3种条件下跨航向压缩后的多普勒谱进行时频仿真分析,比较主要振动模式下频率和振幅的影响,仿真结果如图4所示。其中,图4(a),4(b),4(c)为 $a_0 = 0.02$ m 的仿真结果。图4(d),4(e),4(f)为 $a_0 = 0.01$ m 的仿真结果。图4(g),4(h),4(i)为 $a_0 = 0.005$ m 的仿真

结果。根据天线微动模型的分析可知,随着颤振模式阶数的增大,振幅呈指数趋势减小, $i = 3$ 时,振幅衰减趋近于一个数量级,因此,前三阶(Mode $i, i = 0, 1, 2$)是产生阵列阵元位置误差的主要模式,由图中可见,在几种模式下,振幅越大,对SAR回波信号的调制越显著,多普勒频率与跨航向时间呈现非线性的调制关系,调制的频率与模式的固有频率有关。

根据上述仿真和理论分析结果,对 $a_0 = 0.01$ m 条件下的微多普勒特征进行参数估计。由图4得到 Mode i 的颤振周期估计值 T_{ie} , 其对应的颤振频率为 $f_{ie} = 1/T_{ie}$ 。根据式(9)和式(10),由阵元微动产生的多普勒频率可以得到微动引入的位置误差 $\tilde{Q}(t)$, 进而根据 $\tilde{Q}(t)$ 和 $\tilde{z}_{||}(y, t)$ 的对应关系得到 Mode i ($i = 0, 1, 2$) 的颤振振幅值。依次求得各阶次的结果,并将估算值与理论计算值列于表2中(频率精度至 0.0001 Hz, 幅度精度至 0.00001 m), 其中 f_{ie} 和 a_{ie} 分别为模式 i 的频率和幅度估计值, f_i 和 a_i 分别为模式 i 的理论计算值, $|f_{ie} - f_i|/f_i$ 和 $|a_{ie} - a_i|/a_i$ 描述估计精度。可以看出,采用时频分析的方法可以精确地估算出颤振频率和幅度。

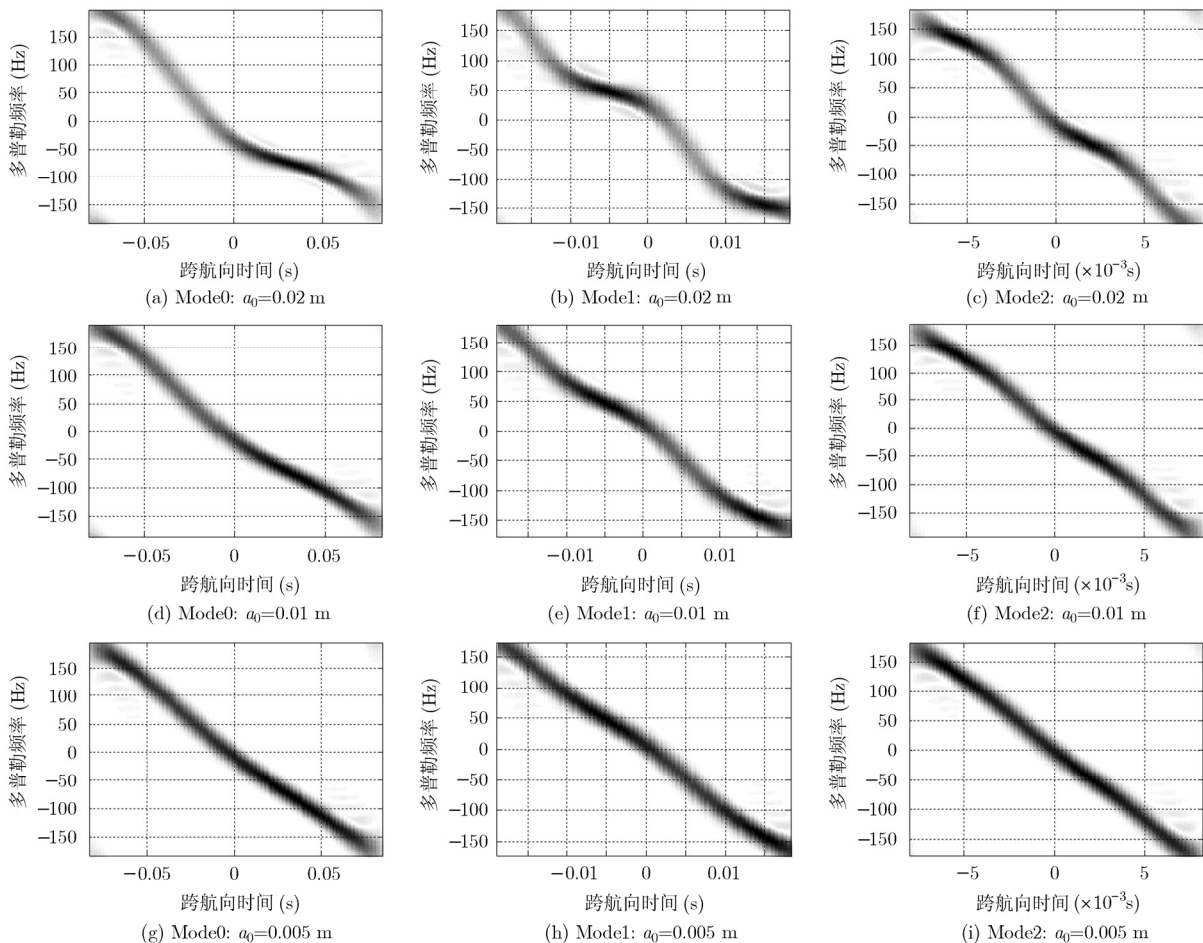


图4 不同振幅、不同模式下多普勒效应的WVD

表 2 微多普勒参数

Mode i	0	1	2
$f_{ie}(\text{Hz})$	7.9943	51.2067	127.8214
$f_i(\text{Hz})$	7.7539	48.5932	136.0633
$ f_{ie}-f_i /f_i$	0.0310	0.0538	0.0606
$a_{ie}(\text{m})$	0.00922	0.00548	0.00281
$a_i(\text{m})$	0.01000	0.00500	0.00250
$ a_{ie}-a_i /a_i$	0.07800	0.09600	0.12400

5 阵列天线微动对成像的影响及补偿

5.1 对成像的影响

根据 FMCW 信号特点, 对式(1)的回波作解线频调处理得到差频信号, 由于 Frequency Scaling(FS)算法^[5]适用于处理去斜率混频方式的 SAR 数据, 采用 FS 算法对点目标通过跨航向和径向距离方向处理后得到成像结果。点目标坐标列于表 3 中, 为了具有更好的对比性, 选择时频分析中的 P 点作为 P_2 点。

理想条件下的成像结果如图 5(a)所示, $a_0 =$

表 3 点目标坐标

点目标	航线向 $X(\text{m})$	跨航向 $Y(\text{m})$
P_1	1000	0
P_2	1021	0
P_3	1021	-180

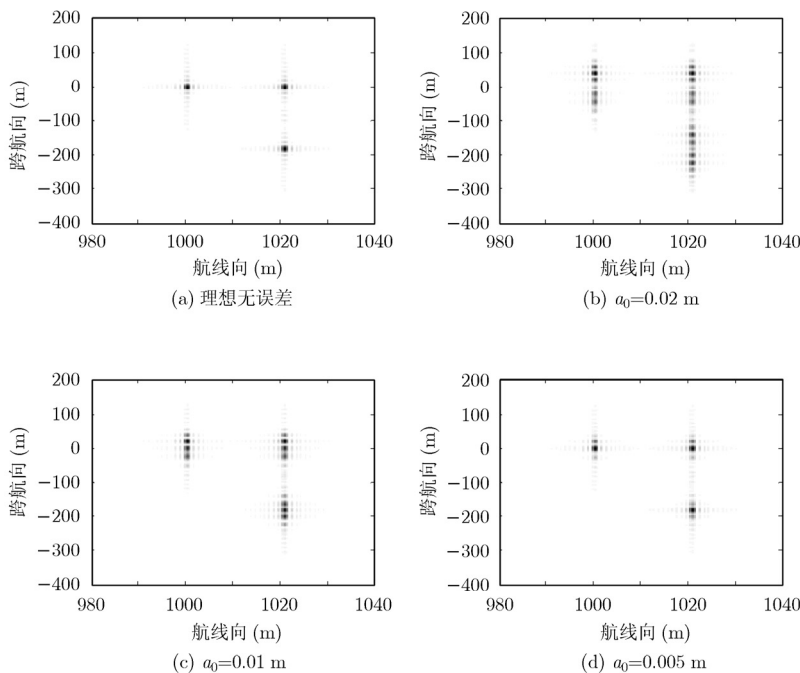


图 5 点目标成像结果

0.02 m、 $a_0 = 0.01$ m 以及 $a_0 = 0.005$ m 时的仿真结果分别如图 5(b)、5(c)和 5(d)所示。从仿真结果可以看出在航线向均可以分辨出 P_1 和 P_2 。前视 SAR 阵列天线的微动对跨航向的成像结果影响显著, 振幅越大, 点目标的跨航向像扩展越严重, 图 5(b)中 P_2 和 P_3 已无法分辨。这是因为前视阵列 SAR 跨航向分辨率通过相干积累实现聚焦, 时间积累效应导致误差积累而影响成像。为了进一步说明问题, 图 6 给出了上述 4 种条件下 P_2 点成像的剖面图。目标在跨航向的聚焦成像受天线微动影响严重, 主瓣指向变化且旁瓣发生了漂移, 随着振幅的增大, 主瓣展宽, 能量降低, 旁瓣电平升高。但这种颤振效应对航线向的聚焦影响很小, 从图 5 和图 6(b)中可知航线向分辨率几乎不受影响。

5.2 补偿对比

在对信号的幅度和频率精确估计的基础上对天线微动误差进行补偿。以 $a_0 = 0.01$ m 为例, 补偿前后的结果如图 7 所示。图 7(a)为理想条件下点目标 P_2 的 2 维等高线图, 图 7(b)为存在天线微动误差的 2 维等高线图, 可见天线的微动误差使跨航向像发生扩展, 图 7(c)为补偿后的结果。对比图 7(a)和 7(c)可知, 补偿后成像结果得到很大改善, 等高线图形状较为规则, 且主瓣和旁瓣能够明显分开。由于目标跨航向像受天线微动影响严重, 因此在图 7(d)给出补偿前后跨航向点目标成像剖面的对比结果, 可以看出, 补偿后只是旁瓣值发生很小的变化, 不影响主瓣, 几乎可以消除阵列天线微动对成像的影响。

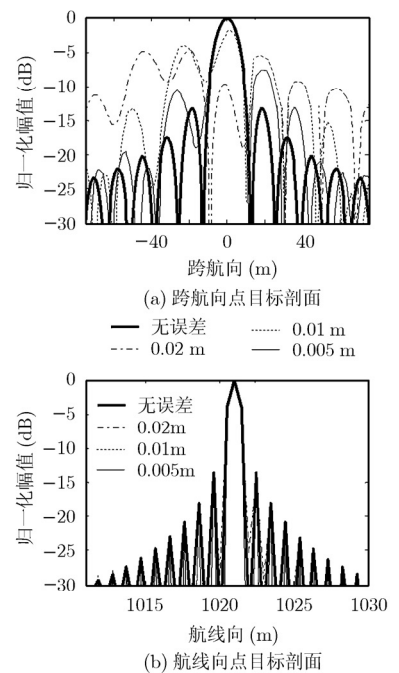


图 6 点目标成像剖面图

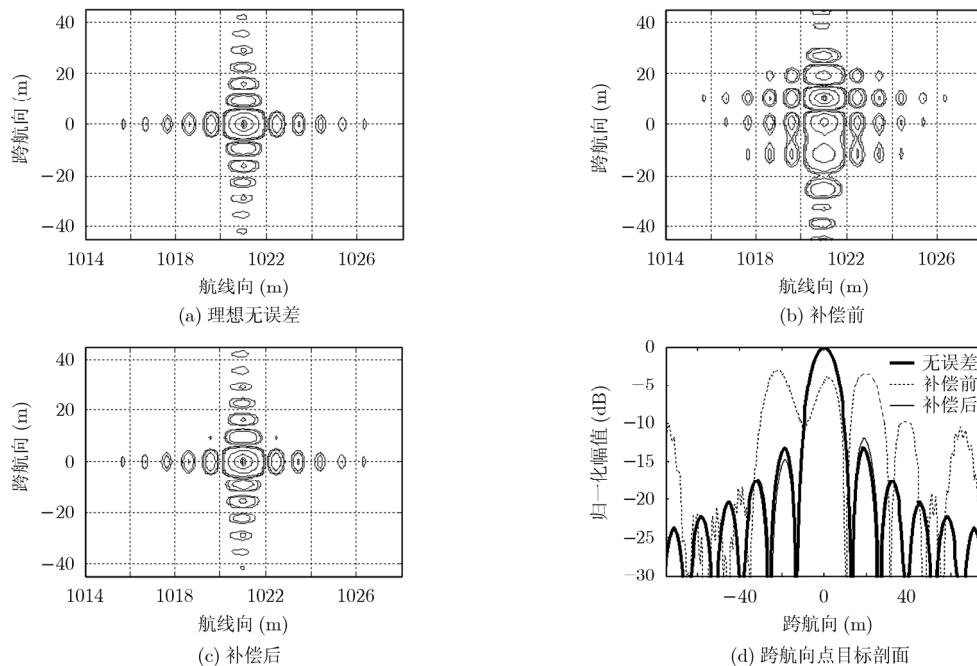


图7 天线微动补偿前后的点目标成像

6 结束语

阵列 SAR 在跨航向采用阵列天线实现前视成像, 但天线的微动也给前视成像带来一定影响。本文基于前视 SAR 2 维成像的信号模型和微动模型, 采用时频分析方法对阵列天线的微动特征及其对成像的影响进行了深入分析, 对阵列天线微动补偿的结果表明本文所提方法是有效的。同时, 本文方法也适用于前视 3 维成像的阵列天线微动补偿, 可为机载阵列 SAR 的微动误差补偿和精确成像提供有益的参考。

参考文献

- [1] 吴曼青, 葛家龙. 数字阵列合成孔径雷达[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(1): 1-9.
Wu Man-qing and Ge Jia-long. Digital array synthetic aperture radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(1): 1-9.
- [2] 陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 228-232.
Chen Qi and Yang Ru-liang. Research of chirp scaling imaging algorithm for air-borne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(1): 228-232.
- [3] Krieger G, Mittermayer J, and Buckreuss S, et al. Sector imaging radar for enhanced vision[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(2): 147-158.
- [4] Krieger G, Mittermayer J, and Wendler M, et al. SIREV-sector imaging radar for enhanced vision[C]. International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Pula, Croatia, 2001: 377-382.
- [5] Jiang Zhi-hong, Huangfu Kan, and Wan Jian-wei. Modified frequency scaling algorithm for FMCW SAR data processing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(4): 339-345.
- [6] 梁毅, 王虹现, 张龙, 等. 基于二维 Chirp-Z 变换的前视 FMCW 雷达成像新方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(5): 719-731.
Liang Yi, Wang Hong-xian, and Zhang Long, et al. A new method for forward-looking FMCW radar imaging based on 2-D Chirp-Z transform[J]. *SCIENCE CHINA: Information Sciences*, 2010, 40(5): 719-731.
- [7] 任笑真, 杨汝良. 机载前视 SAR 三维成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1361-1365.
Ren Xiao-zhen and Yang Ru-liang. Study on three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1361-1365.
- [8] Chen V C, Li F, and Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [9] Sparr T and Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(4): 277-283.
- [10] Rüttgen M, Meier E, and Nüesch D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience*

- and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 293-304.
- [11] 吴晓芳, 刘阳, 王雪松, 等. 旋转微动目标的 SAR 成像特性分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1181-1189.
Wu Xiao-fang, Liu Yang, and Wang Xue-song, *et al.*. Analysis of SAR imaging characteristics of targets with rotational micro-motion[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1181-1189.
- [12] Klare J, Cerutti-Maori D, and Brenner A, *et al.*. Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array of the airborne 3D imaging radar ARTINO[C]. IGARSS, Barcelona, Spain 2007: 5310-5314.
- [13] 胡海岩. 机械振动与冲击[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998: 154-160.
Hu Hai-yan. Mechanical Vibrations and Shock[M]. Beijing: Aeronautical Engineering Publishing House, 1998: 154-160.
- [14] Lesueur G, Caer D, and Merlet T, *et al.*. Active compensation techniques for deformable phased array antenna[C]. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009: 1578-1581.
- [15] 苏峰, 何友, 曲长文, 等. 基于修正的平滑伪 WVD 和 Hough 变换的二值积累的信号检测方法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(12): 1915-1917.
Su Feng, He You, and Qu Chang-wen, *et al.*. A signal detection method based on the modified smoothing pseudo WVD and the binary integration of Hough transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(12): 1915-1917.
- 侯海平: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为高分辨率雷达信息处理和微波遥感等.
- 曲长文: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理、电子对抗、数据融合等.
- 丁 灿: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为雷达图像处理和信息处理.
- 杨 俭: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为高分辨率雷达信息处理.