

机载前视阵列 SAR 运动补偿研究

张英杰^{*①②} 王彦平^① 谭维贤^① 洪 文^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100190)

摘 要: 结合调频连续波(FMCW)技术的机载前视阵列合成孔径雷达(SAR)既能够获取飞机前下方区域图像,又具有 FMCW 体制雷达体积小、重量轻的优势,易于安装在直升机等轻小型平台。前视阵列 SAR 的运动补偿是获得前视图像信息的关键问题之一。该文根据前视阵列 SAR 的几何模型,分析了载机平台运动误差对回波的影响,研究了相应的运动补偿方法。在此基础上,将补偿方法嵌入到一种基于 FMCW 的前视阵列 SAR 的改进频率变标算法(FSA)中。最后通过仿真实验验证了该补偿方法的有效性。

关键词: 前视合成孔径雷达; 阵列; 调频连续波; 频率变标算法; 运动补偿

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)02-0168-12

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20067

Motion Compensation for Airborne Forward Looking Synthetic Aperture Radar with Linear Array Antennas

Zhang Ying-jie^{①②} Wang Yan-ping^① Tan Wei-xian^① Hong Wen^①

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Combined with Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) technology, airborne forward-looking Synthetic Aperture Radar (SAR) with linear array antennas can obtain the images in front of an aircraft, while having the advantages of FMCW radar such as small size and lightweight. Moreover, it is suitable for installation on platforms such as helicopters and small unmanned aerial vehicles. In practice, motion compensation for forward-looking SAR with linear array antennas is one of the key problems to obtaining the images in front of aircraft. This paper uses linear array antennas to analyses the influence of motion error in aircraft on an echo model based on the geometry of forward looking SAR, with linear array antennas, and proposes a motion compensation scheme. Moreover, the compensation scheme is applied to an improved Frequency Scaling Algorithm (FSA) for FMCW forward looking SAR with linear array antennas. Finally, the compensation scheme is verified using simulations.

Key words: Forward looking Synthetic Aperture Radar (SAR); Linear array antennas; Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW); Frequency scaling algorithm; Motion compensation

1 引言

机载前视合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[1]能够获得载机前下方区域图像,弥补了常规 SAR 在机底存在成像盲区的不足。利用前视 SAR 技术获得的载机平台前下方区域的图像信息,可以为精确制导、导航以及着陆或盲降等提供一种新方法。传统的侧视成像雷达技术用于前视成像时,

会遇到如下两个问题^[2]:一是在雷达平台运动方向两侧必然存在到雷达相位中心等距离的两个目标,这些等距点具有完全一样的距离历程,会造成左右模糊;二是前视成像邻近区域点目标沿航迹向的多普勒频率梯度相比其跨航向的多普勒梯度显得过小,这会造成多普勒分辨的困难,甚至难以成像。在垂直航向方向放置一个阵列天线作为接收天线^[3,4],则到一个天线对称的两个目标到另外一个天线一定是不对称的,利用这两个天线的回波信号就可以解决先前模糊问题;且此种模式下的多普勒频率梯度相比侧视 SAR 虽然很低,但依然可以得到长的合成孔径,因此可以获得高的跨航向分辨。

2012-09-13 收到, 2013-01-07 改回; 2013-01-16 网络优先出版
国家自然科学基金(61072112)和中科院创新基金(CXJJ-11-S94)资助课题

*通信作者: 张英杰 zyichenhui@126.com

针对前视阵列 SAR 的运动补偿是获得前视图信息的关键问题之一。针对侧视 SAR 的运动补偿研究^[5,6]已经较为深入,但针对前视阵列 SAR 的运动补偿研究目前国内外公开的报道很少。前视阵列 SAR 与传统侧视 SAR 相比有两点不同:一是其成像的几何模型与侧视 SAR 不一样,前视阵列 SAR 是对飞行方向前下方区域进行成像;二是其在方位向的分辨不是靠载机平台的移动来完成的,而是靠一个由多个阵元组成的阵列天线来完成的。所以传统侧视 SAR 的运动补偿方法不能直接用于补偿前视阵列 SAR 的运动误差。

相对于传统脉冲雷达,调频连续波(Frequency-Modulated Continuous-Wave, FMCW)体制雷达^[7]具有体积小、重量轻的优势,所以 FMCW 体制下的前视阵列 SAR 易于安装在直升机、无人机等小型平台上。文献[8,9]的研究都是 FMCW 体制下前视阵列 SAR 的成像算法问题,但都是基于理想飞行状态,此时载机平台沿一条直线飞行且不发生任何姿态的改变。在实际情况下,由于大气等因素的影响载机平台的飞行轨迹都不是一条直线且载机平台也会发生姿态的改变。文献[10]根据前视阵列 SAR 几何模型,考虑天线由于发动机振动等因素影响而发生的形变和颤振,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。

针对上述情况,本文研究了 FMCW 体制下前视阵列 SAR 载机平台运动误差对回波信号的影响,根据接收阵元同时接收的“一发多收”天线系统几何模型,对接收信号进行误差信号建模,给出了一种针对基于 FMCW 的前视阵列 SAR 的运动补偿方法。将此运动补偿方法嵌入到基于 FMCW 的前视阵列 SAR 的 FSA 中,通过仿真实验验证了补偿方案的有效性。

2 基于 FMCW 的前视阵列 SAR 成像处理

机载前视阵列 SAR 的几何模型如图 1 所示, O 为坐标原点,载机平台沿着 x 方向正方向以速度 V 运动,阵列天线阵元沿 y 方向间隔 d 均匀排列。定义 x 方向、 y 方向分别为距离向和跨航向。发射天线位于阵列天线中心正下方 h 处,载机的飞行高度记为 H 。发射天线以入射角 α 向前下方发射 FMCW 信号,位于阵列天线上的所有阵元同时接收回波信号。对于前视阵列 SAR,在距离向是通过发射大时宽带宽的 FMCW 信号实现距离向的高分辨;在跨航向上则是靠沿跨航向均匀排列的一个线性阵列来成

像的,每一个阵元充当一个跨航向采样点,通过对各个阵元接收的回波信号的正确相移以及相干积累,来获取跨航向很高的相干积累增益。

发射天线发射线性调频的 FMCW 信号,去调频(Dechirp)接收后的信号形式为(不考虑信号幅度的影响)^[11]

$$S_1(y_n, \Delta K_R) = \left\{ \exp[-jK_R(R - R_{\text{ref}})] \cdot \exp\left[j2\pi f_d \left(\frac{\Delta K_R c}{4\pi\gamma} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)\right] \right\} \otimes \exp\left[-j \frac{\Delta K_R^2}{2b}\right] \quad (1)$$

其中 $K_R = 4\pi/\lambda + (4\pi\gamma/c)(t' - 2R_{\text{ref}}/c) = K_{\text{RC}} + \Delta K_R$, $K_{\text{RC}} = 4\pi/\lambda$, $\Delta K_R = (4\pi\gamma/c)(t' - 2R_{\text{ref}}/c)$, $b = 8\pi\gamma/c^2$, t' 表示距离向时间, λ 为波长, c 表示光速, γ 为发射信号调频率, R_{ref} 为场景中心斜距。 $R = \sqrt{x_0^2 + H^2 + (y_n/2 - y_0)^2}$ 代表等效相位中心到点目标 $p(x_0, y_0)$ 的瞬时斜距,由于 h 远远小于 H ,故 R 中忽略了 h 的影响; y_n 表示阵列天线的第 n 个接收阵元的空间位置, y_n 的取值范围是

$$y_n = -\frac{N-1}{2}d, -\frac{N-3}{2}d, \dots, -d, 0, d, \dots, \frac{N-3}{2}d, \frac{N-1}{2}d, \\ n = 1, 2, \dots, N, \quad N \text{ 为阵元个数} \\ f_d = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{V \cdot x_0}{\sqrt{x_0^2 + H^2 + (y_n/2 - y_0)^2}} \approx -\frac{2V}{\lambda} \cdot \sin \alpha$$

代表载机在扫频周期内运动引起的多普勒频率。卷积符号 $\otimes$ 后的相位项为残余视频相位(Residual

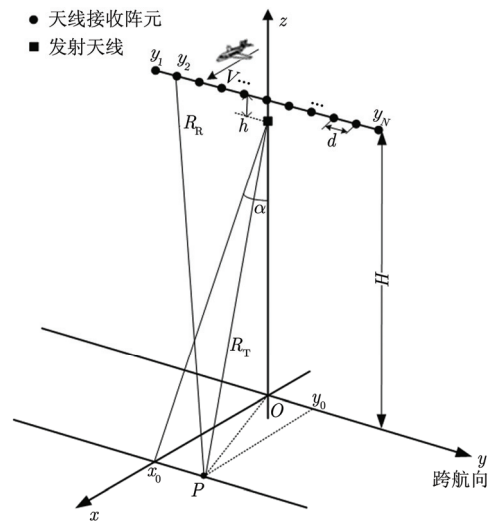


图 1 前视 SAR 成像几何

Fig. 1 Geometry of forward-looking array SAR

Video Phase, RVP), Dechirp 之后的数据在距离向时域没有对齐就是受此 RVP 项的影响。

针对 Dechirp 信号, 频率变标算法(Frequency Scaling Algorithm, FSA)^[11,12]是一种比较合适的算法。它直接利用 RVP 相位项进行频率尺度变换使所有目标的能量轨迹和参考距离处的能量轨迹一致, 然后再统一校正, 最后进行跨航向压缩。

应用 FSA 处理基于 FMCW 的前视阵列 SAR 数据时需要考虑两个问题。一个问题是在阵元接收

$$S_2(K_Y, \Delta K_R) = \left\{ \begin{aligned} &\exp \left[-j\sqrt{K_R^2 - K_Y^2} R_0 - jK_Y y_0 \right] \\ &\cdot \exp \left[j2\pi f_d \left(\frac{\Delta K_R c}{4\pi\gamma} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \cdot \exp [j\Delta K_R R_{\text{ref}}] \end{aligned} \right\} \otimes \exp \left[-j\frac{\Delta K_R^2}{2b} \right] \quad (2)$$

其中, R_0 表示跨航向到目标的最近斜距。将上式在 K_Y 维进行泰勒展开得

$$S_2(K_Y, \Delta K_R) = \left\{ \begin{aligned} &\exp \left[-j \left(\frac{R_0}{A_Y} - R_{\text{ref}} \right) \Delta K_R \right] \cdot \exp [-jA_Y K_{RC} R_0 - jK_Y y_0] \\ &\cdot \exp \left[j \frac{R_0 K_Y^2}{2K_{RC}^3 A_Y^3} \Delta K_R^2 \right] \cdot \exp \left[j \frac{R_0 K_Y^2}{2K_{RC}^4 A_Y^5} \Delta K_R^3 \right] \\ &\cdot \exp \left[j2\pi f_d \left(\frac{\Delta K_R c}{4\pi\gamma} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \end{aligned} \right\} \otimes \exp \left[-j\frac{\Delta K_R^2}{2b} \right] \quad (3)$$

其中, $A_Y = \sqrt{1 - (K_Y / K_{RC})^2}$ 。

将处于 2 维波数域的数据变换到距离域, 乘以斜置因子 H_{SK} 后再变回到 2 维波数域, 信号变为

$$S_2(K_Y, \Delta K_R) = \left\{ \begin{aligned} &\exp \left[-j \left(\frac{R_0}{A_Y} - R_{\text{ref}} \right) \Delta K_R \right] \cdot \exp [-jA_Y K_{RC} R_0 - jK_Y y_0] \\ &\cdot \exp \left[j \frac{R_0 K_Y^2}{2K_{RC}^3 A_Y^3} \Delta K_R^2 \right] \cdot \exp \left[j \frac{R_0 K_Y^2}{2K_{RC}^4 A_Y^5} \Delta K_R^3 \right] \\ &\cdot \exp \left[j2\pi f_d \left(\frac{\Delta K_R c}{4\pi\gamma} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \end{aligned} \right\} \otimes \exp \left[-j\frac{\mu \cdot \Delta K_R^2}{2b} \right] \quad (4)$$

其中, 斜置因子 $H_{SK} = \exp [j(b/(2\mu)) \cdot r^2]$, μ 为等效的抽取因子^[8], r 为成像区域斜距, r 在 $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 之间取值。卷积号之后的相位项代表上面补偿的斜置项在距离向波数域的表达式。观察可以知道式(4)与文献[11]中差别在最后一项, 本文中这样处理的目的是为了降低距离 Scaling 带来的带宽, 以解决 FSA 带来的距离向频谱混叠问题。

由于引入了因子 μ , 故变标函数、RVP 校正函数和逆变标函数都将作相应的变化。尺度变换函数为

$$H_{FS}(K_Y, \Delta K_R) = \exp \left[j \frac{\mu \cdot \Delta K_R^2}{2b} (1 - A_Y) \right] \cdot \exp \left[-j2\pi f_d \left(\frac{\Delta K_R c}{4\pi\gamma} + \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \quad (5)$$

上式中第 1 个相位项是频率尺度变换函数, 第 2 个相位项是用来校正多普勒频移。在尺度变换后, 可

信号时需考虑载机平台运动带来的多普勒频移问题, 对此在 2 维波数域补偿一个相位即可。由于在 2 维波数域补偿多普勒频移, 所以可将此补偿融合到频率尺度变换函数中, 如式(5)。另一个问题是 FSA 在变标操作时本身会引入一个距离向带宽, 采用文献[13]的斜置处理可以降低此引入的距离向带宽而不带来其它影响。

将 Dechirp 接收回波数据即式(1)跨航向两端补零后变换到 2 维波数域得

在 2 维频域消除 RVP 的影响, 因此, RVP 的校正函数为

$$H_{RVPC}(K_Y, r) = \exp \left[-j \frac{br^2}{2\mu A_Y} \right] \quad (6)$$

完成 RVP 校正后, 将信号重新变回到距离-多普勒域, 与如下因子相乘, 消除尺度变换带来的其他相位项

$$H_{IFS}(K_Y, \Delta K_R) = \exp \left[j \frac{\mu \cdot A_Y \Delta K_R^2}{2b} (A_Y - 1) \right] \quad (7)$$

到此, 针对基于 FMCW 的前视阵列 SAR FSA 中的变标操作已经完成, 算法中剩下的步骤与文献[11]中的完全一致, 在此不再赘述。

3 前视阵列 SAR 运动误差分析

本文第 2 节描述的 FMCW 体制下前视阵列 SAR 的 FSA 的前提是载机平台的飞行状态理想。

然而, 在实际的回波数据采集过程中这种前提是不可能的, 因为载机平台在飞行过程中会受到大气湍流和载机自身等因素的影响, 使得飞行轨迹偏离理想轨迹, 使其飞行速度不恒定, 并且还会发生姿态的变化。

载机平台受到气流等因素影响会使载机平台的位置和姿态发生改变。对于传统 SAR, 当平台姿态发生改变时, 主要包括偏航、俯仰和横滚, 雷达波束指向会发生改变, 但由于惯性导航系统的控制, 传统 SAR 波束指向可以控制在要求范围内。故对传统 SAR 的运动误差分析时, 只需考虑载机平台位置的变化, 不需要考虑载机平台发生转动带来的影响^[11]。

但前视阵列 SAR 与传统 SAR 在成像方式上有着很大的不同, 前视阵列 SAR 在跨航向上是靠沿跨航向均匀排列的一个线性阵列获取回波数据成像的, 而不是靠载机平台的移动形成合成孔径来成像。当前视阵列 SAR 载机平台位置发生改变时, 即实际飞行轨迹偏离理想飞行轨迹, 因为阵列天线所有阵元同时接收回波信号, 可以认为前视阵列 SAR 是在很短的时间内就完成了数据的采集, 载机平台位置发生改变只会影响成像场景, 对成像没有影响, 而显然成像场景也不会变化很大, 可以认为基本不变, 故针对前视阵列 SAR 的运动误差分析可以不考虑载机平台位置的变化。例如, 载机平台在如图 2 中的 xyz 坐标系内发生了偏离理想航迹的运动误差, 设平台向 y 轴负方向偏离 1 m (其它方向的偏离结果一样), 由于成像过程中的数据采集可以认为是在瞬间完成的 (阵元同时接收时只需不到 1 ms, 分时接收也只需几十毫秒), 在如此短的时间内, 可以认为在成像时载机平台是静止的, 故对应的成像区域也会相对地向 y 轴负方向移动 1 m, 所以说载机平台位置的变化不会影响成像结果。

当前视阵列 SAR 载机平台姿态发生改变时, 如横滚、偏航, 不仅仅会影响雷达波束指向还会使阵列天线与跨航向有一定的角度, 阵元的空间位置发生改变进而使其等效相位中心发生改变。如图 3 所示, 载机平台姿态正常时阵列天线沿着跨航向 y 轴分布, 当载机平台发生横滚和偏航时, 如图 3(a)、图 3(b), 阵列天线各阵元的空间位置发生改变, 而传统 SAR 此种情况下的等效相位中心位置不会发生改变。所以, 前视阵列 SAR 的运动补偿不考虑载机平台偏离理想轨迹时阵元等效相位中心的改变, 只需要考虑载机平台姿态的变化给阵元位置带来的影响。载机平台发生横滚和偏航的情况如图 3(a)、

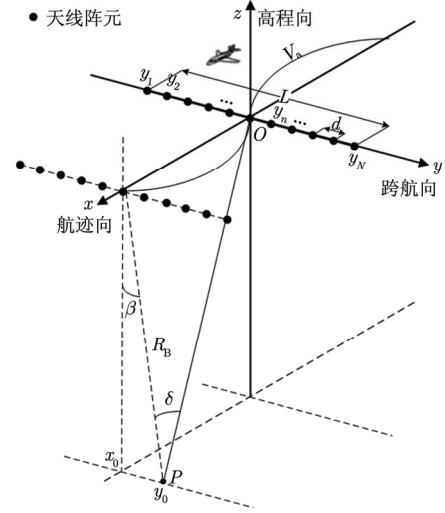


图 2 前视阵列 SAR 运动误差几何

Fig. 2 Geometry of motion error of forward-looking array SAR

图 3(b)所示, 当姿态改变时分别会在 yOz 平面和 xOy 平面与 y 轴形成一个 θ , ϕ 的夹角, 各个阵元的偏移量不一样。当载机平台发生俯仰时, 则不会让阵列天线各阵元位置发生改变, 只会让雷达波束指向发生改变, 这一点与传统 SAR 一致。除此之外, 载机平台飞行速度的不恒定可以通过插值^[9]等方法来调整, 故本文中前视阵列 SAR 的误差量主要考虑载机平台发生横滚和偏航两种姿态变化的情况。

为便于分析载机平台飞行轨迹偏离理想轨迹所带来的运动误差, 将图 1 中的几何关系作一些变化, 如图 2 所示, 载机平台的理想轨迹为 x 轴方向, 以图中的曲线代表载机平台的实际运动轨迹。阵列天线沿 y 轴均匀分布, 定义为跨航向, z 轴为高度向, 坐标原点 O 设在没有运动误差时阵列天线的中心位置。在没有运动误差的情况下, 某一个时刻利用等效相位中心原理^[14]以后阵元等效相位中心到点目标 $P(x_0, y_0, z_0)$ 的瞬时距离为 (多普勒频移校正已完成^[8,9])

$$\begin{aligned} R(y_n; x_0, y_0, z_0) &= \sqrt{x_0^2 + (y_n - y_0)^2 + z_0^2} \\ &= \sqrt{x_0^2 + R_B^2 + y_n^2 - 2y_n R_B \sin \beta} \quad (8) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{cases} y_0 = R_B \sin \beta \\ z_0 = R_B \cos \beta \end{cases}$$

β 为坐标原点 O 与点目标连线在 yOz 平面内的投影与 z 轴的夹角, 如图 2 中所示, 且有 $z_0 = H$ 。

当 x, y, z 方向分别引入误差量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 时, 等效相位中心到点目标的瞬时距离为

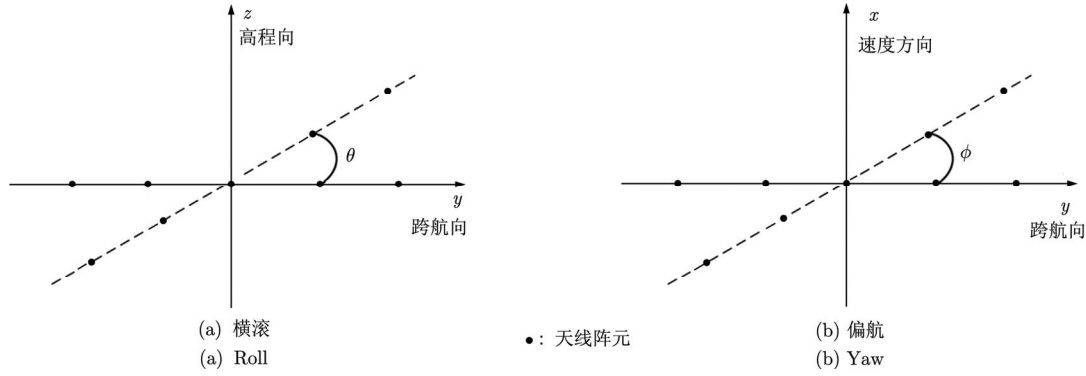


图3 载机平台横滚和偏航对阵元空间位置的影响

Fig. 3 Influence of position of array elements due to roll and yaw of airborne platform

$$\begin{aligned}
 R'(y_n) &= \sqrt{(\Delta x - x_0)^2 + (y_n + \Delta y - y_0)^2 + (\Delta z - z_0)^2} \\
 &= \sqrt{R^2(y_n) - 2R_B[\Delta y \sin \beta + \Delta z \cos \beta] + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + 2\Delta y y_n - 2\Delta x x_0} \\
 &\approx R(y_n) - [\Delta y \sin \beta + \Delta z \cos \beta] \frac{R_B}{R(y_n)} + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{2R(y_n)} + \frac{\Delta y y_n}{R(y_n)} - \frac{\Delta x x_0}{R(y_n)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

x, y, z 方向的误差量远远小于没有误差时的瞬时距离量, 故由运动误差引起的距离误差为

$$\begin{aligned}
 \Delta R(y_n) &= -[\Delta y \sin \beta + \Delta z \cos \beta] \frac{R_B}{R(y_n)} \\
 &\quad + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{2R(y_n)} + \frac{\Delta y y_n}{R(y_n)} - \frac{\Delta x x_0}{R(y_n)} \\
 &\approx -[\Delta y \sin \beta + \Delta z \cos \beta] \cdot \cos \delta - \Delta x \cdot \sin \delta \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \frac{R_B}{R(y_n)} &= \frac{\sqrt{y_0^2 + z_0^2}}{\sqrt{x_0^2 + (y_n - y_0)^2 + z_0^2}} = \cos \delta \\
 &\approx \frac{\sqrt{y_0^2 + H^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + H^2}}
 \end{aligned}$$

δ 为目标与接收阵元距离和该距离在 yOz 平面投影的夹角, 式(10)中近似表示用中心阵元处的 δ 值代替所有阵元的 δ 值, 上述近似处理对 $\cos \delta$ 的影响很小, 可以忽略不计。由式(10)可知, 由于载机平台偏离理想轨迹而引起的距离误差与接收阵元空间位置、载机高度、阵列各阵元到目标的距离以及 x, y, z 方向的偏移量均有关。由于本文中所有阵元同时接收回波信号, 一次成像时可以认为误差量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 是常数。

结合式(1)可知由距离误差带来的相位误差是

$$\Delta S(y_n, K_R) = \exp[-j K_R \cdot \Delta R/2] \quad (11)$$

由式(11)可知, 由距离误差带来的相位误差是一个2维量, 在两个方向均会产生一个调制。当运动误差

较大时, 此误差相位会严重影响成像质量, 甚至导致无法成像, 故必须对此运动误差进行补偿。

4 前视阵列 SAR 运动补偿

根据第3节的分析, 针对 FMCW 体制下前视阵列 SAR 回波信号, 其运动补偿可以直接根据式(11), 得到相应的运动误差补偿因子

$$H_{\text{como}}(y_n, K_R) = \exp[j K_R \cdot \Delta R/2] \quad (12)$$

针对 FMCW 体制下的前视阵列 SAR 的运动补偿只需在第2节所述改进的 FS 成像算法之前对 Dechirp 接收后回波信号直接按照式(12)进行补偿即可。由式(10)和式(12)可知补偿因子包含点目标的位置信息, 每一点处补偿因子都不一样, 也就是说补偿因子既是距离空变又跨航向空变的。按照此方法来补偿运动误差的计算量是巨大的, 为此必须考虑简化的方法。

4.1 距离向简化处理

由于 ΔR 是随距离空变的, 而成像场景宽度一般比场景中心线到阵列的距离小得多, 因而可将其分解为1阶距离误差分量 ΔR_1 , 即对场景中心线的距离误差分量和剩余的2阶距离误差分量 ΔR_2 。故式(10)可以重新表示如下:

$$\begin{aligned}
 \Delta R(y_n) &= -\Delta R_1(y_n) \cdot \cos \delta \\
 &\quad - \Delta R_2(y_n) \cdot \cos \delta - \Delta x \cdot \sin \delta \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\Delta R_1(y_n) = \left[\Delta y \left(1 - \frac{H^2}{2R_s^2 \cos^2 \delta} \right) + \Delta z \left(\frac{H}{R_s \cdot \cos \delta} \right) \right],$$

$$\begin{aligned}\Delta R_2(y_n) &= \left[\Delta y \left(\frac{H^2}{2R_s^2 \cos^2 \delta} - \frac{H^2}{2R^2(y_n) \cos^2 \delta} \right) \right. \\ &\quad \left. + \Delta z \left(\frac{H}{R(y_n) \cdot \cos \delta} - \frac{H}{R_s \cdot \cos \delta} \right) \right] \\ &\approx \left[\Delta y \frac{H^2}{R_s^2 \cos^2 \delta} - \Delta z \frac{H}{R_s \cdot \cos \delta} \right] \cdot \frac{\Delta R'}{R_s} \quad (14)\end{aligned}$$

其中, $R(y_n) = R_s + \Delta R'$, R_s 为场景中心距离, 在第 2 个相位中利用了

$$\frac{1}{R(y_n)} = \frac{1}{R_s} \left(1 - \frac{\Delta R'}{R_s} \right), \quad \frac{1}{R^2(y_n)} = \frac{1}{R_s^2} \left(1 - \frac{2\Delta R'}{R_s} \right)$$

图 4 为 1 阶斜距误差与 2 阶斜距误差的对比, 其中相关参数见第 5 节仿真试验中表 1, 取点目标 (800, 50, 0) 代入式 (14) 计算, 场景中心斜距取为到点目标 (800, 0, 0) 的斜距。图 4 中的横坐标为跨航向阵元, 0 处为阵列天线中心阵元处, 纵坐标为斜距误差。图 4(a) 为式 (13) 对应的斜距误差, 图 4(b) 为 1 阶斜距误差, 图 4(c) 为 2 阶斜距误差。从图中可知, 斜距误差主要由 1 阶斜距误差组成, 2 阶斜距误差可以忽略不计。同样参数下, 1 阶斜距误差高出 2 阶斜距误差两个数量级。由于 1 阶斜距误差较大, 有可能影响 RCMC, 因此在 RCMC 前先进行相位的校正。2 阶斜距误差一般较小, 对 RCMC 影响较小, RCMC 可在忽略此部分误差的情况下进行, 可以在 RCMC 之后再行相位校正。在 RCMC 和距离压缩之前, 1 阶补偿因子为

$$\begin{aligned}H_comol(y_n, K_R) \\ = \exp \left[j K_R \cdot (\Delta R_1 \cdot \cos \alpha + \Delta x \cdot \sin \alpha) / 2 \right] \quad (15)\end{aligned}$$

1 阶运动补偿时, 考虑到补偿因子与 $\cos \delta$ 有关, 此时用跨航向位置为 0 处的 $\cos \delta$ 值代替所有的 $\cos \delta$ 值, 而跨航向位置为 0 处的 $\cos \delta$ 值为 $\cos \alpha$, α 为雷达波束入射角。

4.2 跨航向简化处理

经过 1 阶运动补偿之后, 残余斜距误差变为

$$\begin{aligned}\Delta R_3 &= \Delta R_1 \cdot (\cos \alpha - \cos \delta) \\ &\quad - \Delta R_2 \cdot \cos \delta + \Delta x \cdot (\sin \alpha - \sin \delta) \quad (16)\end{aligned}$$

从数量级上说, 残余斜距误差一般在波长级, 因而距离徙动校正和距离压缩可以在忽略这部分误差的情况下进行。完成距离徙动校正和距离压缩之后即可对式 (16) 造成的相位误差进行补偿 (2 阶空变补偿)。前视阵列 SAR 的跨航向波束较宽, 一般有几度, 宽波束角将导致必须考虑目标的运动误差的跨航向空变性^[15,16], 此时的补偿不能对回波作统一处理。具体做法如下: 首先在时域沿跨航向将数据划分为许多小块, 再分别对各小块逐距离单元进行跨航向空变运动误差补偿, 最后进行跨航向压缩, 得到最终的 SAR 图像。其中小块空变补偿的具体步骤为:

(1) 进行子块跨航向 FFT, 将数据变化到多普勒域。因为跨航向角和多普勒的对应关系为

$$\delta(m) = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot K_Y(m)}{4\pi} \right) \quad (17)$$

其中, m 为跨航向波数序号。在较短的一段跨航向距离内目标相对于雷达的视角可看作不变, 另外载机的运动误差在此小块内也可看作不变, 因此可用 $\Delta R_1(y_{n_i})$ 和 $\Delta R_2(y_{n_i})$ 代替 $\Delta R_1(y_n)$ 和 $\Delta R_2(y_n)$, 其中 n_i 为第 i 个小块的中间时刻。此时式 (16) 可近似为

$$\begin{aligned}\Delta R_3 &= \Delta R_1 \cdot (\cos \alpha - \cos \delta) \\ &\quad - \Delta R_2 \cdot \cos \delta + \Delta x \cdot (\sin \alpha - \sin \delta) \quad (18)\end{aligned}$$

(2) 对不同跨航向位置的目标乘以不同的相位补偿函数与补偿运动误差的跨航向空变性, 相位补偿函数为

$$H_comol2(K_Y, K_R) = \exp \left[j K_R \cdot \Delta R'_3 / 2 \right] \quad (19)$$

其中, $\Delta R'_3$ 为 ΔR_3 在跨航向波数域的表达式

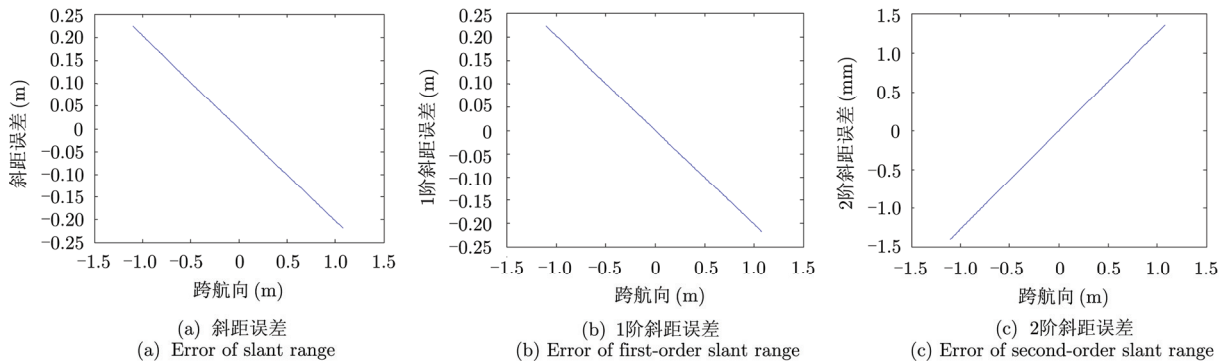


图 4 1 阶斜距误差、2 阶斜距误差对比

Fig. 4 Comparison between error of first-order slant range and second-order slant range

$$\Delta R'_3 = \left[\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \cdot K_Y^2}{16\pi^2}} - \cos \alpha \right] \cdot \Delta R_1(y_{n_i}) + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \cdot K_Y^2}{16\pi^2}} \cdot \Delta R_2(y_{n_i}) + \left(\frac{\lambda K_Y}{4\pi} - \sin \alpha \right) \cdot \Delta x$$

(3) 对完成补偿后的数据进行子块跨航向 IFFT, 将数据变回时间域。

综上所述, 基于 FMCW 的前视阵列 SAR 回波数据的处理流程如图 5 所示。

5 仿真实验

为了验证以上分析的准确性和所提出算法的有效性, 进行了多个点目标仿真分析, 仿真参数如表 1 所示。载机平台的阵元相位中心位置的改变根据第 3 节的分析由两部分组成, 一是由于载机平台姿态的变化使阵列天线在 yOz 平面有一个翻滚角, 设为 θ , 如图 3(a)所示, 所以 $\Delta y_1 = n(d - d \cdot \cos \theta)$, $\Delta z = n \cdot d \cdot \sin \theta$; 二是由于载机平台姿态的变化使阵列天线在 xOy 平面有一个翻滚角, 设为 ϕ , 如图 3(b)所示, 所以 $\Delta x = n \cdot d \cdot \sin \phi$, $\Delta y_2 = n(d - d \cdot \cos \phi)$ 。在仿真时取 $\theta = 30^\circ$, $\phi = 15^\circ$ 。图 6 表示了载机平台在 yOz 和 xOy 平面各有一个翻滚角时在各自平面内的误差量。图 6(a)、图 6(b)表示了在 yOz 平面误差在 y 轴和 z 轴的误差分量, 图 6(c)、图 6(d)表示了 xOy 平面误差在 y 轴和 x 轴的误差分量, 图中横轴均表示沿跨航向分布的阵列, 图中横线均表示不存在误差时在各轴没有偏移的情况。根据图 6 中可以得到每个阵元此时的误差量, 即误差量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, 计算可得式(10)中的近似带来的误差最大只有 10^{-5} 量级, 对处理结果没有影响。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

参数	数值	参数	数值
载波频率	35 GHz	脉冲重复频率	1 kHz
扫频带宽	500 MHz	接收阵元数	128
波束入射角	60°	阵元间距	0.0086 m
波束距离向宽度	33°	载机高度	1000 m
波束跨航向宽度	24°	载机速度	50 m/s

以位于坐标为(800,0,1000)处的点目标为中心, 向 x 轴正负方向间隔 75 m, y 轴正负方向间隔 50 m, 各取点两次, 得到 25 个点的矩形仿真场景。利用前面讨论的算法得到的 25 个点目标的仿真结果如图 7。其中图 7(a)为没有进行运动补偿的仿真结果图, 从图中可以看到点目标的位置与目标实际位置没有一一对应, 且出现了散焦。从图 7(b)可以看到所得到的成像结果在距离向和跨航向均已对齐, 25 个点在场景内呈矩形分布, 没有几何失真。

图 8 为场景中心点目标放大后的结果图。图 8 两图中结果均为图 7 中成像结果中心点目标所在临近区域做完 8 倍升采样结果, 且其横轴、纵轴分别表示距离向和跨航向采样点。其中图 8(a)为没有进行运动补偿的成像结果图, 图 8(b)为运动补偿之后的成像结果图。比较图 8(a)和图 8(b)可以很明显地观察到运动补偿对成像结果的影响。运动误差使得点目标的扩展函数沿距离向和跨航向均呈不对称分

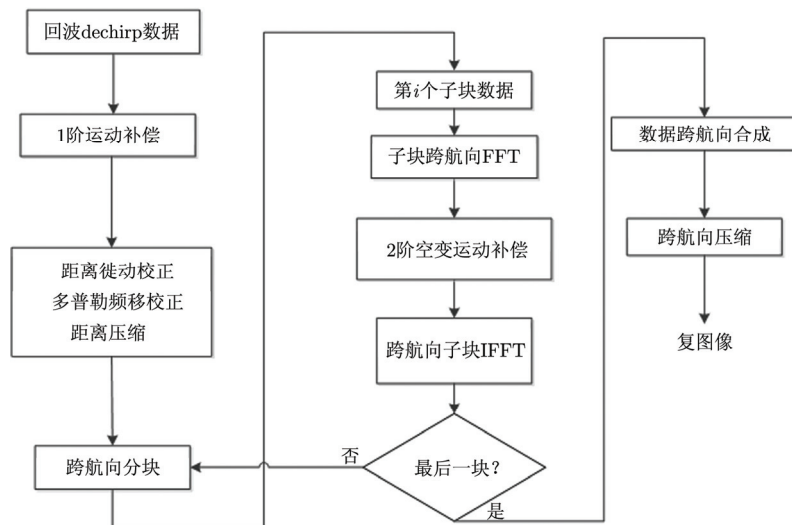


图 5 成像处理流程图

Fig. 5 Flow chart of imaging processing

布, 并使其主瓣能量向左产生了一个偏移量, 如图 8(a)。运动补偿之后的点扩展函数沿距离向和跨航向均呈对称分布, 如图 8(b)。

图 9 为场景中心点目标距离向和跨航向的脉压

剖面图, 其中图 9(a), 图 9(b)为没有运动补偿的距离向和跨航向的脉压剖面图, 从图中可以看到运动误差使点目标沿距离向左有一个能量泄露, 沿跨航向呈不对称分布。图 9(c), 图 9(d)为运动补偿后的

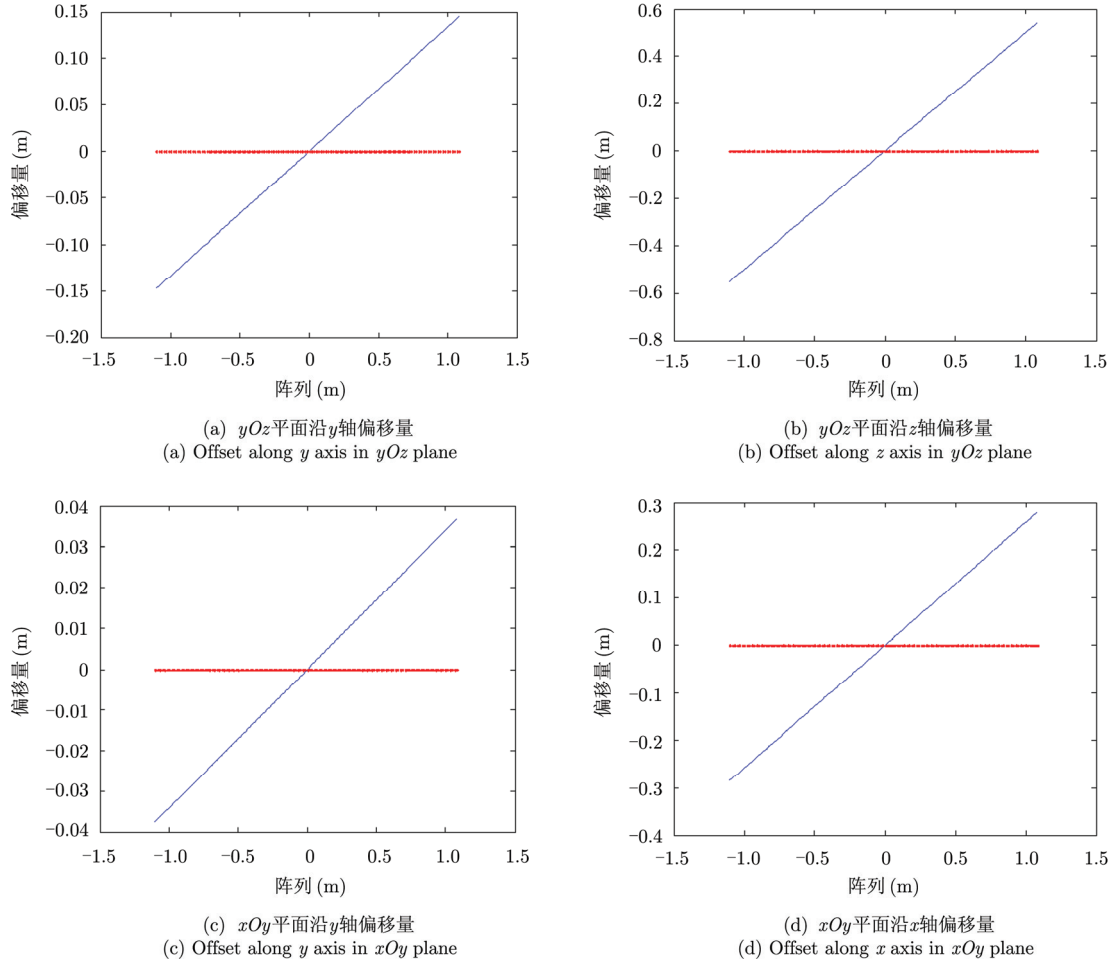


图 6 yOz 平面、 xOy 平面误差在各轴分量

Fig. 6 Error along y, z axis in yOz plane and along x, y axis in xOy plane

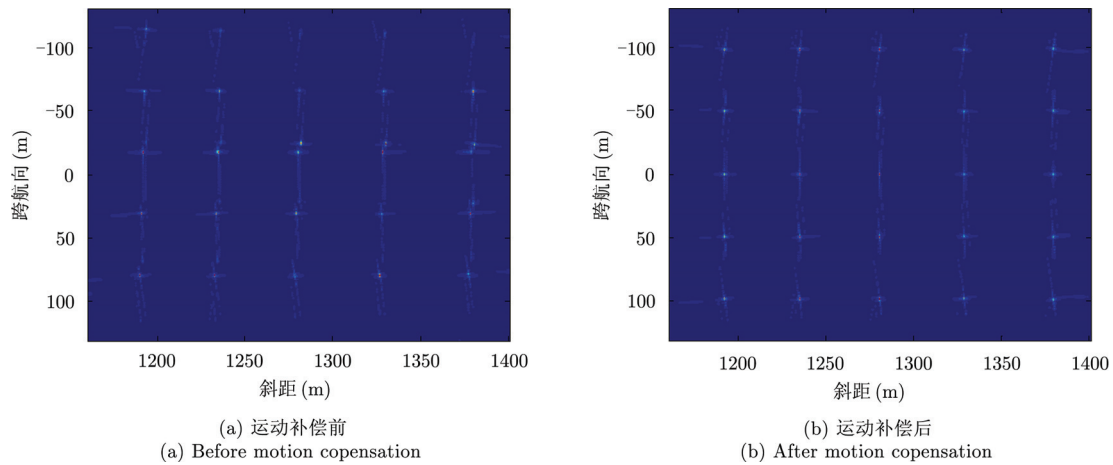


图 7 25 个点目标仿真结果

Fig. 7 Simulation result of twenty five point targets

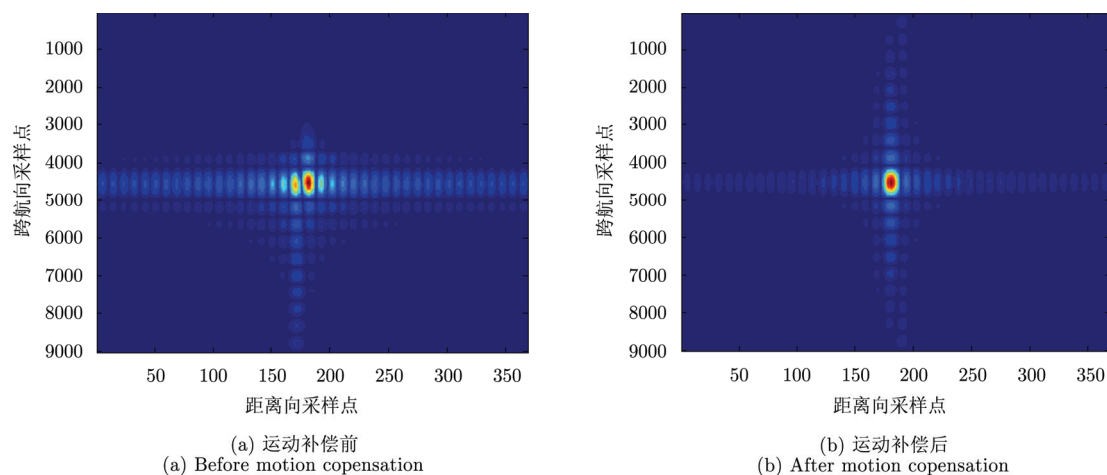


图8 场景中心点目标放大后结果运动补偿之前与运动补偿之后的结果对比

Fig. 8 Comparison between imaging result after amplified of the center point target before and after motion compensation

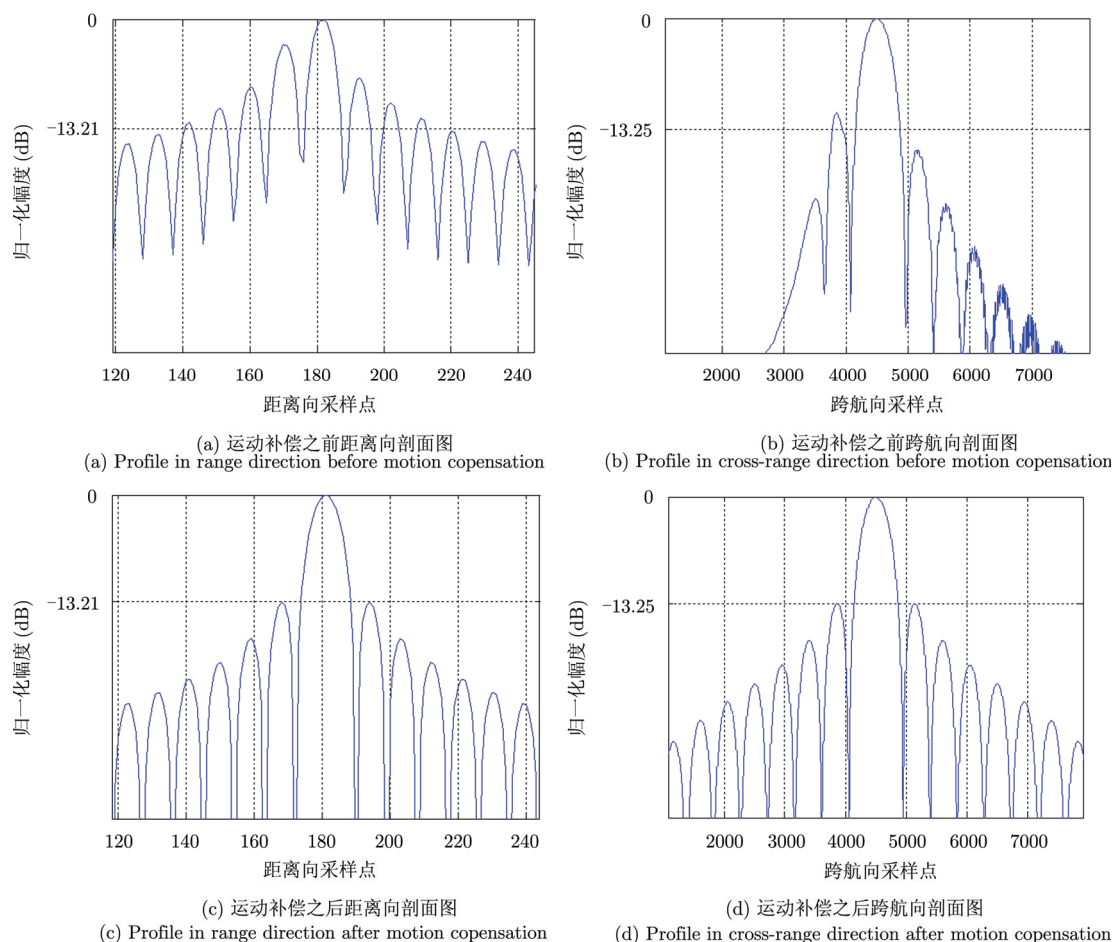


图9 场景中心点目标运动补偿之前和运动补偿之后剖面图对比

Fig. 9 Comparison between profile of imaging result of the center point target before and after motion compensation

距离向和跨航向的脉压剖面图, 可以看到运动补偿之后距离向和跨航向的脉压结果呈现一个理想的 sinc 函数, 且补偿之后场景中心点的距离向和跨航向峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)分别是

-13.31 dB 和 -13.25 dB。

由文中第4节的分析可知, 补偿运动误差时需要考虑跨航向的空变问题, 应该在跨航向进行分块处理。取两个越来越接近成像场景边缘区域的点目

标(875,50,1000)和(950,150,1000), 首先将其在跨航向不做分块处理, 所得结果如图 10 所示, 从图中可以看到, 越是接近边缘其成像结果越差, 尤其是在跨航向, 其跨航向剖面图不仅不对称, 而且其 PSLR 也是大大偏离正常值。图 11 显示了这两个点目标在跨航向经过分块处理后的结果, 可以看到处理结果较不做分块处理时有了较大改进, 距离向和跨航向的脉压结果呈现一个理想的 sinc 函数, 且其距离向和跨航向 PSLR 分别是 -13.16 dB, -13.18 dB 和 -13.08 dB, -13.13 dB。

6 结论

本文研究了 FMCW 体制下前视阵列 SAR 载机平台运动误差对回波信号的影响, 根据接收阵元同时接收的“一发多收”天线系统几何模型, 主要考虑阵列天线在载机平台发生姿态变化的情况下的运动误差模型, 针对运动误差提出了一种运动补偿方法。将此运动补偿方法嵌入到基于 FMCW 的前视阵列 SAR 的 FSA 中, 通过仿真实验验证了补偿方案的有效性。本文的研究成果可以为利用阵列天线实现 2 维或 3 维成像考虑实际的运动误差时提供一定的参考。

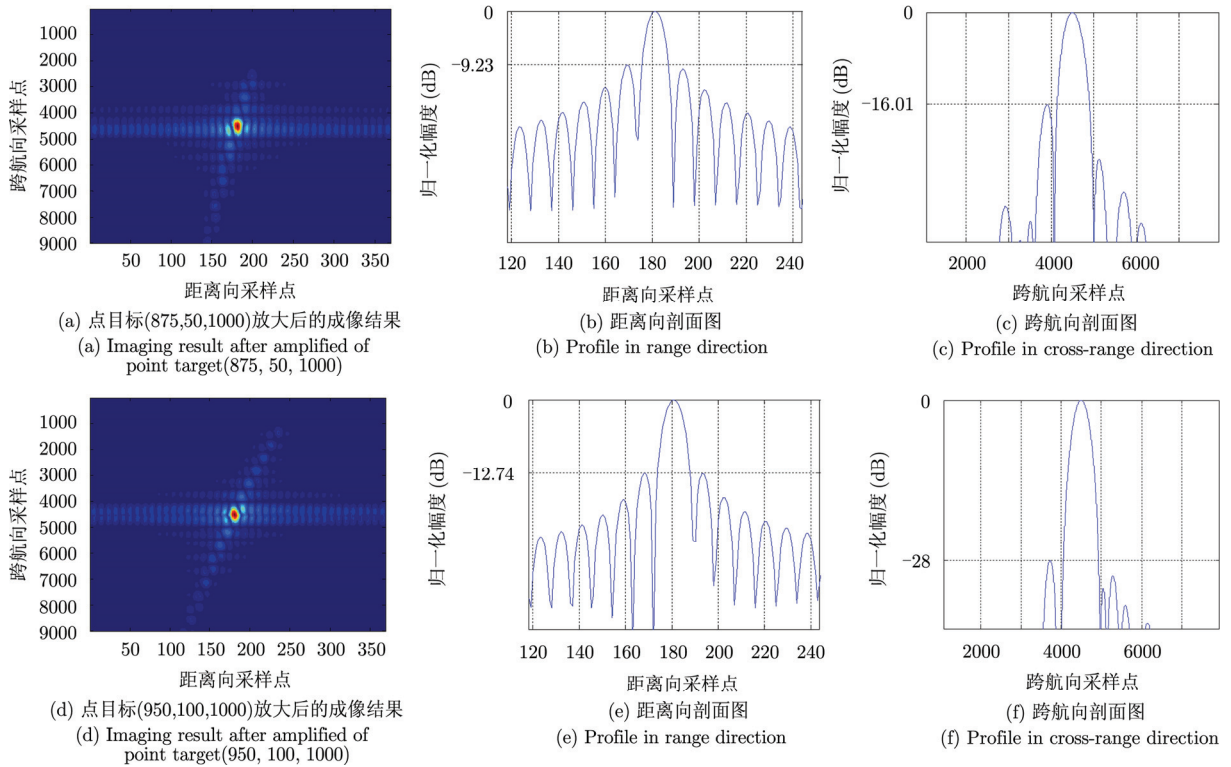
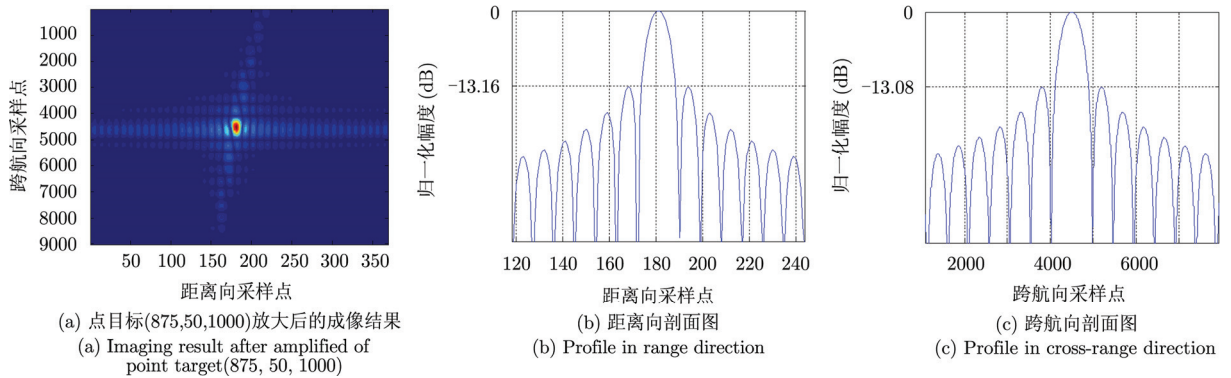


图 10 点目标(875, 50, 1000)和点目标(950, 100, 1000)跨航向没有分块处理结果及剖面图, 分别如图 10(a), 10(b), 10(c), 和图 10(d), 10(e), 10(f)

Fig. 10 Imaging result and profile of point target (875, 50, 1000) and point target (950, 100, 1000) without block processing in cross-range direction, are shown in Figs. 10(a), 10(b), 10(c), and Figs. 10(d), 10(e), 10(f)



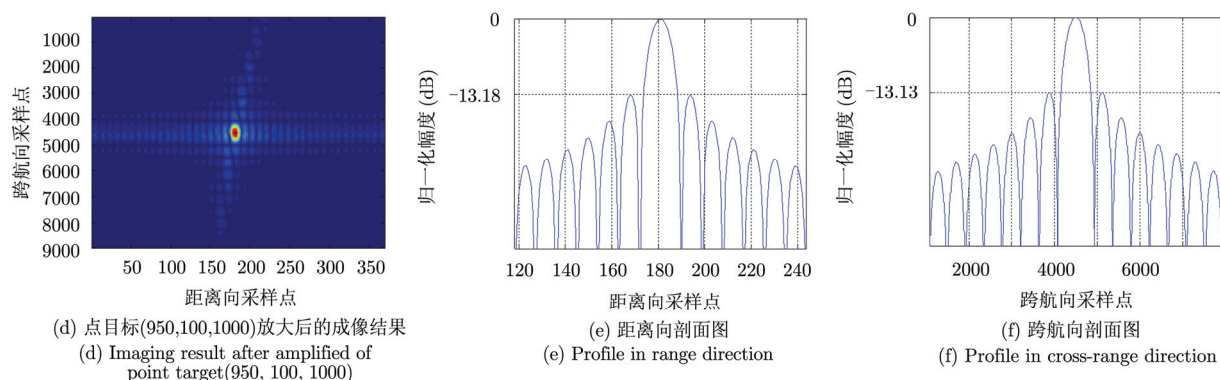


图 11 点目标(875, 50, 1000)和点目标(950, 100, 1000)跨航向分块处理结果及剖面图, 分别如图 11(a), 11(b), 11(c), 和图 11(d), 11(e), 11(f)

Fig. 11 Imaging result and profile of point target (875, 50, 1000) and point target (950, 100, 1000) with block processing in cross-range direction, are shown in Figs. 11(a), 11(b), 11(c), and Figs. 11(d), 11(e), 11(f)

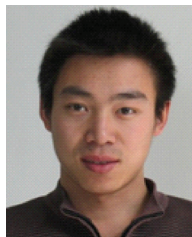
参 考 文 献

- [1] Hou Hai-ping, Qu Chang-wen, Zhou Qiang, *et al.* Signal analysis of downward-looking and forward-looking array FMCW SAR[C]. International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China, 2010, 9: 4267-4270.
- [2] Loehner A K. Improved azimuthal resolution of forward looking SAR by sophisticated antenna illumination function design[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(2): 128-134.
- [3] Tan Wei-xian, Hong Wen, Wang Yan-ping, *et al.* 3-D range stacking algorithm for forward-looking SAR 3-D imaging[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, 2008, 3: 1212-1215.
- [4] Tan Wei-xian, Hong Wen, Wang Yan-ping, *et al.* Synthetic aperture radar tomography sampling criteria and three dimensional range migration algorithm with elevation digital spotlighting[J]. *Science in China F*, 2009, 52(1): 100-114.
- [5] Moreira A and Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029-1040.
- [6] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [7] Edrich M. Ultra-lightweight synthetic aperture radar based on a 35 GHz FMCW Sensor concept and online raw data transmission[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 129-134.
- [8] Liang Yi, Wang Hong-xian, Zhang Long, *et al.* New method for forward-looking FMCW radar imaging based on 2-D Chirp-Z transform[J]. *SCIENCE CHINA: Information Science*, 2010, 53(8): 1653-1665.
- [9] 侯海平, 曲长文, 杨俭, 等. 改进的机载阵列调频连续波合成孔径雷达前视成像方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 944-950.
- [10] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [11] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [12] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [13] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [14] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [15] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.
- [16] 侯海平, 曲长文, 丁灿, 等. 阵列天线微动对前视SAR成像影响及补偿研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 831-837.

作者简介



张英杰(1987-), 男, 湖北鄂州人, 中国科学院电子学研究所硕士研究生, 主要研究方向: 前视阵列合成孔径雷达成像算法与数据处理。



谭维贤(1981-), 男, 博士, 中国科学院电子学研究所副研究员, 主要研究方向: 微波3维成像、合成孔径雷达3维成像体制与算法等。



王彦平(1976-), 男, 博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向: 极化干涉SAR数据处理、合成孔径雷达3维成像体制等。



洪文(1968-), 女, 博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向: 极化/极化干涉合成孔径雷达数据处理及应用、3维微波成像新概念新体制新方法等。

“2013 年世界雷达博览会” 通知

“2013 年世界雷达博览会”将于 2013 年 10 月 16 日-18 日在北京展览馆举行, 本届博览会由中国雷达行业协会、中国保利集团公司、中国电子信息产业集团有限公司和中国电子科技集团公司为主办单位; 总装备部国际合作部、总装备部电子信息基础部为支持单位; 国家国防科技工业局、中国气象局、中国民用航空局空中交通管理局、交通运输部海事局为指导单位; 中国航天科工集团公司、中国航空工业集团公司、中国兵器工业集团公司、中国船舶重工集团公司、中国船舶工业集团公司、中国电子仪器行业协会、中国造船工程学会、北京航空航天大学为协办单位。

博览会将重点展出军用、警用、军民两用的雷达系统、装备、技术和上下游产业链的产品, 主要包括:

1. 独立的和海、陆、空、天基平台载的雷达系统及系统组网;
2. 雷达系统、子系统及设备的各类数据库、建模和设计开发/验证软件等管理、方法、工具和环境, 模拟仿真技术和系统;
3. 雷达天线、馈线、伺服、发射、接收、信号处理、数据处理及显示等雷达分系统、设备和技术;
4. 雷达的微波、射频组件和模块等关键组件, 转动绞链和汇流环、高频电源等关键部件;
5. 与雷达系统、设备配套的微波电真空功率器件, 微波半导体功率器件、专用集成电路等关键微电子器件、光电子器件、各类传感器、微电机、特种接插件和电缆等;
6. 与雷达配套的网络系统、各类数据链和通信系统及终端设备;
7. 雷达电子对抗系统、设备和技术, 各类电子侦察系统、设备和技术;
8. 各类新体制无源雷达系统、设备及技术, 应答识别系统、设备及技术;
9. 公安、消防、反恐、抢险、救灾、缉私、维护海权益等行动的指挥控制、探测、通讯、导航等系统、设备及技术;
10. 空中、水上及陆上等交通管制有关的探测、通讯、导航等系统、设备及技术;
11. 气象雷达、系统组网以及设备与技术;
12. 网络安全和信息防护、卫星导航与地理信息系统、智能安防与图像分析、无线传感网等系统、设备及技术;
13. 天线系统远/近场性能、雷达系统电磁兼容、环境试验、防电磁信息泄漏等试验、测试的系统、设备及技术;
14. 与雷达系统、设备相关的新技术、新材料、新工艺、综合和专用测试仪器和系统;
15. 配套的电源、电站、方舱等设备及技术。

中国雷达行业协会秘书处

电话: 010-68689035, 68633643

邮箱: chinaradar@sina.cn