

# 基于运动补偿的机载 MIMO - SAR 高分辨成像算法

彭发祥, 李宏伟, 蔡 斌, 邓冬虎, 郑万泽

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

**摘要** 机载多发多收合成孔径雷达(MIMO - SAR)可以实现高分辨成像,但不可避免的存在运动误差补偿的问题。对多子带并发的机载 MIMO - SAR 系统进行研究,首先建立并分析了 MIMO - SAR 运动误差模型;然后提出了一种扩展的 MIMO - SAR 运动补偿距离徙动算法(RMA),通过改进的 Stolt 映射将距离徙动校正与方位向聚焦分开,并结合两步运动补偿技术对 MIMO - SAR 回波数据的运动误差进行校正,消除了运动误差带来的影响;最后在空频域对各子带信号进行带宽合成实现了距离向高分辨。用该算法对散射点目标和面目标进行了成像仿真,验证了其在处理带有运动误差的 MIMO - SAR 回波数据中的有效性。

**关键词** 合成孔径雷达;多发多收;高分辨;运动补偿;距离徙动算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.016

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0073-06

SAR 图像中目标的直观判读性会随着分辨率的提高显著改善,这对提高军事侦察的准确性和快速反应能力有着至关重要的作用,因此高分辨率仍然是当今 SAR 技术最重要的发展方向之一<sup>[1]</sup>。而多发多收合成孔径雷达(MIMO - SAR)由于其灵活多变的工作体制和潜在的巨大应用前景,一经提出便引起了人们的广泛关注<sup>[2-6]</sup>。MIMO - SAR 通过提供丰富的空间自由度解决了方位向高分辨与大测绘带之间的矛盾<sup>[3]</sup>;同时还可以通过带宽合成技术使距离向分辨率进一步提高,从而为高分辨 SAR 的发展开辟了一个新的方向<sup>[4-5]</sup>。

另一方面,在合成孔径时间内,雷达平台特别是机载平台的运动是十分复杂的,这会给回波带来严重的误差,如果无法精确地消除运动误差带来的影响,最终的成像质量将不能满足高分辨的目的,因此运动误差补偿是高分辨 MIMO - SAR 成像过程中不可或缺的一部分。

距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)在成像过程中没有考虑任何近似条件<sup>[6]</sup>,计算精度高,是高分辨机载 MIMO - SAR 回波信号的一种优选处理方式。但是传统 RMA 算法的处理流程决定了其较难以和精确的运动误差补偿技术相结合,因此必须对其进行改进。Reigber 等人在文献[7-8]中深入分析和讨论了 RMA 算法的流程结构,提出了一种新的 Stolt 变换方式,使 RMA 算法与运动补偿相结合成为可能。本文对多子带并发的机载 MIMO - SAR 系统进行研究,提出了一种扩展的 MIMO - SAR 运动补偿 RMA 算法,通过两步运动补偿技术以及空频域带宽合成方法实现了二维高分辨成像。

## 1 MIMO - SAR 几何模型及回波信号分析

见图 1,线型天线阵列沿雷达平台航线方向均匀排列,共有  $Q$  个天线阵元,分别为  $X_1, X_2, \dots, X_Q$ ,雷达平台距地面高度为  $H$ ,沿  $x$  轴速度为  $v$ 。假设地面上有  $N$  个散射点,每个散射点位置分别为  $(x_n, y_n, z_n), n = 1, 2, \dots, N$ 。

\* 收稿日期:2011-05-10

基金项目:航空科学基金资助项目(20112096016)

作者简介:彭发祥(1988-),男,山东临沂人,硕士生,主要从事雷达成像研究。E-mail:afpengfaxiang@163.com

为了利用 MIMO-SAR 多子带并发的特点实现高分辨成像,这里采用正交频分的线性调频信号(OFD-LFM)作为发射信号形式。对回波信号进行建模分析:假设  $\gamma$  为调频率,  $T_r$  为发射脉冲宽度,  $B_r = \gamma T_r$  为每个子带信号的带宽,  $t$  为全时间,  $\hat{t} = t - mT_p$  为快时间,  $T_p$  为脉冲重复时间,  $m$  表示发射第  $m$  次脉冲,慢时间为  $t_m = mT_p$ 。则第  $p$  个阵元发射的 LFM 信号为:

$$s_p(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_r}\right) \exp[j2\pi f_c(p)t + j\pi\gamma\hat{t}^2], p=1, 2, \dots, Q \quad (1)$$

其中,每个子带发射信号的中心频率为:

$$f_c(p) = f_c + (p - 1/2 - Q/2)B_s, p=1, 2, \dots, Q \quad (2)$$

$B_s$  为相邻 2 个子带中心频率的步进带宽。本文采用截取子带信号的有效频谱进行拼接的方法实现大带宽合成,因此有  $B_s < B_r$ 。

对  $N$  个点目标的回波进行分析,首先利用 OFD-LFM 信号的频率分集特性对回波信号进行分离,并进行等效相位中心的相位误差补偿<sup>[9]</sup>,最后做距离向和方位向傅里叶变换,得到第  $q$  个接收阵元接收到来自第  $p$  个发射阵元回波信号的二维频域表达式:

$$s_{pq}(f_r, f_a) = \sum_{n=1}^N \sigma_n \text{rect}\left(\frac{f_r}{\gamma T_r}\right) \text{rect}\left(-\frac{f_a R_{n,B} \lambda_p}{2v^2 L_{\text{syn}_a} \sqrt{(1 + f_r/f_c(p))^2 - (f_a/f_{am}(p))^2}}\right) \exp\left[-jR_{n,B} \sqrt{\left(\frac{4\pi f_c(p)}{c} + \frac{4\pi f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_a}{v}\right)^2} - j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi f_a}{v} x_n\right] \exp\left[j\frac{2\pi f_a}{v} X_{ip,rq}\right] \quad (3)$$

式中:  $\sigma_n$  表示目标的后向反射系数;  $c$  为光速,  $L_{\text{syn}_a}$  为合成孔径长度;  $X_{ip,rq} = (X_{ip} + X_{rq})/2$  为第  $p$  个阵元发射、第  $q$  个阵元接收时得到的等效相位中心的位置,  $\lambda_p = c/f_c(p)$ ,  $f_{am}(p) = 2vf_c(p)/c$ 。可以看出,式(3)最后一个指数项只与收发阵元所对应的等效相位中心位置  $X_{ip,rq}$  有关,而  $X_{ip,rq}$  是已知的,因此很容易对其进行补偿,在后续处理中我们认为其已补偿完毕。

为了便于在成像处理时进行运动补偿,将上式第 1 部分的相位分为不依赖距离和依赖距离两部分<sup>[10]</sup>:

$$\Phi_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s) = -R_s \sqrt{(4\pi f_c(p)/c + 4\pi f_r/c)^2 - (2\pi f_a/v)^2} - \pi f_r^2/\gamma \quad (4)$$

$$\Phi_{\text{dep}}(f_r, f_a, R_{n,B} - R_s) = -(R_{n,B} - R_s) \sqrt{(4\pi f_c(p)/c + 4\pi f_r/c)^2 - (2\pi f_a/v)^2} \quad (5)$$

## 2 正侧视条带模式下 MIMO-SAR 运动误差分析

对阵元  $X_p$  发射,  $X_q$  接收时的运动误差进行分析。图 2 给出了理想航迹和真实航迹 2 种情况下 MIMO-SAR 系统的空间几何关系,图 3 给出了斜距所在的斜平面上的空间几何关系。

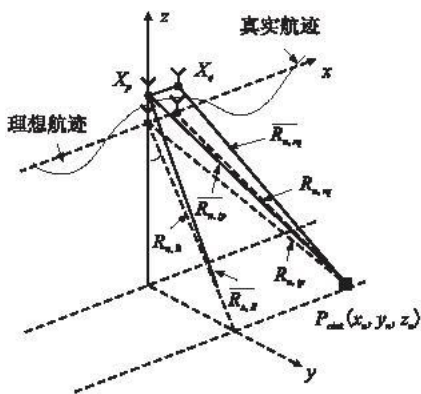


图 2 MIMO-SAR 空间几何关系

Fig. 2 The geometric relation of MIMO-SAR system

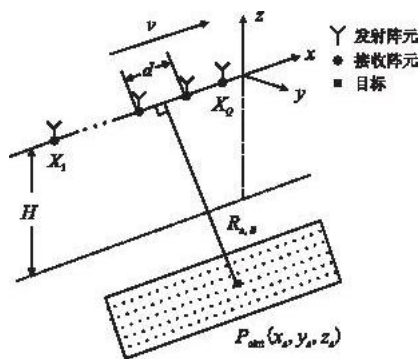


图 1 MIMO-SAR 几何模型

Fig. 1 The model of MIMO-SAR system

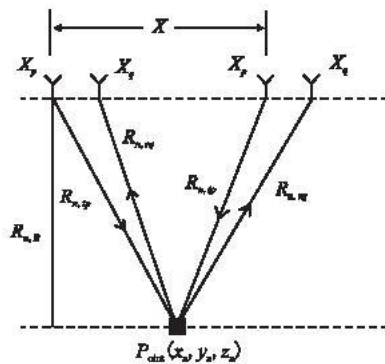


图 3 斜平面几何关系

Fig. 3 The geometric relation on the slant plane

在图2和图3中,  $R_{n,B}$ 是点目标到理想航迹的垂直距离,  $\overline{R_{n,B}}$ 是点目标到真实航迹的垂直距离, 阵元  $X_p$  和  $X_q$  的方位向坐标分别为  $x_p, x_q$ , 目标的方位向坐标为  $x_n$ 。

在理想航迹的情况下, 发射阵元  $X_p$  和接收阵元  $X_q$  与目标的斜距分别为:

$$R_{n,tp}(x, x_n, R_{n,B}) = \sqrt{(x + x_p - x_n)^2 + R_{n,B}^2} \quad ; \quad R_{n,rq}(x, x_n, R_{n,B}) = \sqrt{(x + x_q - x_n)^2 + R_{n,B}^2} \quad (6)$$

在真实航迹的情况下, 发射阵元  $X_p$  和接收阵元  $X_q$  与目标的斜距分别为:

$$\overline{R_{n,tp}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) = \sqrt{(x + x_p - x_n)^2 + \overline{R_{n,B}}^2} \quad ; \quad \overline{R_{n,rq}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) = \sqrt{(x + x_q - x_n)^2 + \overline{R_{n,B}}^2} \quad (7)$$

式中  $\overline{R_{n,B}} = R_{n,B} + \delta R_{n,B}$ 。因此运动误差可以表示为:

$$\delta R(x, x_n, R_{n,B}) = \overline{R_{n,tp}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) + \overline{R_{n,rq}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) - R_{n,tp}(x, x_n, R_{n,B}) - R_{n,rq}(x, x_n, R_{n,B}) \quad (8)$$

对  $\overline{R_{n,tp}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}})$  有:

$$\overline{R_{n,tp}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) = \sqrt{(x + x_p - x_n)^2 + \overline{R_{n,B}}^2} \approx R_{n,tp}(x, x_n, R_{n,B}) + \frac{((\delta R_{n,B})^2 + 2R_{n,B}(\delta R_{n,B}))}{2R_{n,tp}(x, x_n, R_{n,B})} \quad (9)$$

当  $x + x_q - x_n \ll R_{n,B}$  时,

$$\overline{R_{n,tp}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) - R_{n,tp}(x, x_n, R_{n,B}) \approx \delta R_{n,B} \quad (10)$$

同理,

$$\overline{R_{n,rq}}(x, x_n, \overline{R_{n,B}}) - R_{n,rq}(x, x_n, R_{n,B}) \approx \delta R_{n,B} \quad (11)$$

因此, 运动误差可以表示成:

$$\delta R(x, x_n, R_{n,B}) \approx 2\delta R_{n,B} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 在正侧视条带模式下, MIMO-SAR 系统的运动误差只与发射和接收阵元的距离向和高度向位置以及目标到航线的垂直距离有关, 而与目标点的方位向位置无关, 因此可以方便地对同一距离上的所有目标进行运动补偿。

为便于补偿, 将式(12)的运动误差分为不依赖距离和依赖距离两部分:

$$\delta R(x, x_n, R_{n,B}) = \delta R_{\text{indep}}(x, x_n, R_{n,B}) + \delta R_{\text{dep}}(x, x_n, R_{n,B}) \quad (13)$$

### 3 基于扩展 RMA 的 MIMO-SAR 成像处理

在二维频率域, 式(4)所对应的相位补偿函数为:

$$H_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s) = \exp[-j\phi_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s)] \quad (14)$$

在传统的 RMA 成像算法中, 首先进行一致压缩处理, 即式(3)直接与式(14)补偿函数  $H_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s)$  相乘, 此时参考距离  $R_s$  处的相位得到全部补偿, 数据完全聚焦, 而其它距离处的目标在二维频域会有未完全补偿的相位残余。接着进行 Stolt 映射:

$$\sqrt{\left(\frac{4\pi f_c(p)}{c} + \frac{4\pi f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_a}{v}\right)^2} \rightarrow \frac{4\pi f_c(p)}{c} + \frac{4\pi f_b}{c} \quad (15)$$

实现剩余距离徙动校正和残余相位补偿, 最后经过二维逆傅里叶变换得到最终的 SAR 图像。

我们知道, 在两步运动补偿技术中, 不依赖距离的一次运动补偿在距离压缩前或距离压缩后进行均可, 而依赖距离的二次运动补偿则必须在距离压缩以及距离徙动校正完成, 且方位向还未聚焦时进行<sup>[11]</sup>。传统的 RMA 算法在二维频率域通过 Stolt 映射同时完成了距离徙动校正和方位向聚焦, 因此不能和依赖距离的运动补偿结合<sup>[8]</sup>。

为了克服传统 RMA 算法难以与运动补偿相结合的缺点, 对式(15)做以下扩展:

$$\sqrt{\left(\frac{4\pi f_c(p)}{c} + \frac{4\pi f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_a}{v}\right)^2} - D \rightarrow \frac{4\pi f_b'}{c} \quad (16)$$

式中  $D = \sqrt{\left(\frac{4\pi f_c(p)}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_a}{v}\right)^2}$ 。相应的, 式(4)也会产生变化:

$$\phi_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s) = -R_s \left( \sqrt{\left(\frac{4\pi f_c(p)}{c} + \frac{4\pi f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_a}{v}\right)^2} - D \right) - \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \quad (17)$$

利用改进的式(17)所对应的补偿函数  $H_{\text{indep}}(f_r, f_a, R_s)$  与式(3)相乘, 实现了距离压缩和以参考距离  $R_s$

为固定斜距的距离徙动校正,方位-距离的高次耦合项也得到补偿,但是方位向没有聚焦。再通过式(18)改进的 Stolt 映射,对剩余的距离徙动相位进行校正,并作二维 IFFT 变换到时域。至此距离压缩和距离徙动校正已经完成,而方位向尚未聚焦,因此接下来即可对依赖距离的运动误差进行补偿。

运动误差补偿完成后,对回波数据作方位向 FFT 变换到  $(t_m, f_a)$  域,乘以下列相位函数进行方位向压缩:

$$H_a = \exp(jR_s D) \quad (19)$$

将方位压缩后的数据作方位 IFFT 变换回二维时间域,即完成了该子带的成像处理操作。

下面利用空频域带宽合成的方法对子带数据的距离向频谱截取平移叠加,合成大带宽以获得高的距离向分辨率。对二维时域的复图像数据作距离向 FFT 变换到  $(f_r, t_m)$  域:

$$s_{pq}(f_r, t_m) = \sum_{n=1}^N \sigma_n \operatorname{sinc}(B_a(vt_m - x_n)) \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{\gamma T_r}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi R_{n,R} f_r}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi R_{n,R} f_c(\rho)}{c}\right) \quad (20)$$

式中  $B_a$  为方位向多普勒带宽。

设  $G_{B,p}(f_r)$  为第  $p$  个子带的频谱窗函数,对式(20)作频谱截取、平移、叠加处理得到频谱合成后的回波数据为:

$$s_{\text{syn}}(f_r, t_m) = \sum_{p=1}^Q \sum_{n=1}^N \sigma_n \operatorname{sinc}(B_a(vt_m - x_n)) G_{B,\text{syn}}(f_r) \exp\left(-j \frac{4\pi R_{n,R} f_r}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi R_{n,R} f_c}{c}\right) \quad (21)$$

式中  $G_{B,\text{syn}}(f_r)$  为合成后的频谱窗。对合成频谱后的数据作距离 IFFT,即可以重建点目标  $P_{\text{oint}}(x_n, y_n, z_n)$  的位置,得到高分辨的 SAR 图像。

## 4 成像处理流程

总结上述处理过程,利用扩展 RMA 算法、两步运动补偿技术以及空频域带宽合成方法处理带有运动误差的 MIMO-SAR 回波数据的流程如图 4 所示:

处理流程中的有关补偿函数分别为:

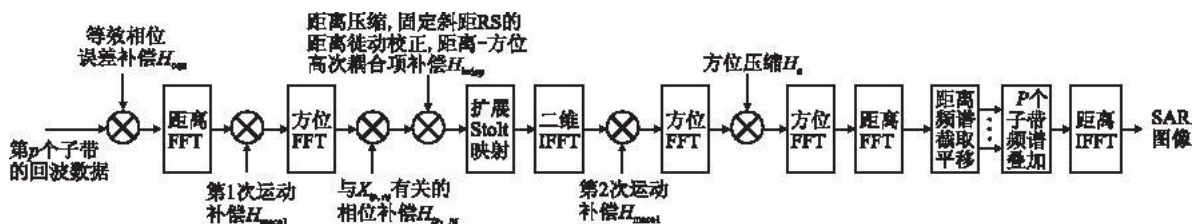


图 4 MIMO-SAR 回波数据成像处理流程图

Fig. 4 Flow chart of the modified RMA processing scheme for MIMO-SAR

$$H_{\text{moc2}} = (j(4\pi/\lambda_p + 4\pi f_r/c) \delta R_{\text{indp}}) \quad (22)$$

$$H_{\text{tp,rq}} = \exp\left(-j \frac{2\pi f_a X_{\text{tp,rq}}}{v}\right) \quad (23)$$

$$H_{\text{moc3}} = \left(j \frac{4\pi \delta R_{\text{dep}}}{\lambda_p}\right) \quad (24)$$

## 5 仿真实验

以 5 发 5 收为例,用点目标模型对机载 MIMO-SAR 的成像过程进行仿真。雷达以正侧视条带模式工作,载机高度为 5 km,沿  $x$  轴方向匀速飞行,速度 120 m/s。5 个天线阵元的  $x$  轴坐标分别为 0 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 阵元的方位向孔径  $D = 1$  m。雷达发射波形中心载频  $f_c = 10$  GHz,子带带宽  $B_s = 360$  MHz,子带载频间隔  $B_i = 330$  MHz,通过子带频谱截取拼接后的总带宽为  $B_{\text{syn}} = 1560$  MHz,脉冲重复频率为  $\text{PRF} = 296$  Hz。频谱合成前子带图像的距离向分辨率为  $D_r = 0.417$  m,频谱合成后最终图像的距离向分辨率为  $D_r' = 0.096$  m,方位向分辨率不变为  $D_a = 0.5$  m。

首先对单散射点模型进行仿真。在坐标原点  $(x_0, y_0, z_0) = (0, 10000, 0)$  (单位 m) 处设置 1 个散射点,

后向反射系数为 1。运动误差设为  $\Delta r = 0.1 \cos(\pi t_m / 2)$ 。图 5 为利用传统 RMA 算法和本文算法对回波数据处理后的成像结果。

从图 5 中可以看出,运动误差会使散射点的方位向主瓣展宽,分辨率下降。传统 RMA 算法由于难以与运动补偿相结合,不能消除运动误差带来的影响,最终成像结果会出现方位向散焦现象,见图 5(a)、(c)。而本文的扩展 RMA 算法,可以很容易地与运动补偿相结合,从而消除运动误差带来的影响,使最终的 SAR 图像聚焦效果良好,见图 5(b)、(d)。

对面目标模型进行仿真,结果如图 6 所示。利用传统的 RMA 算法直接进行成像处理时,由于无法消除

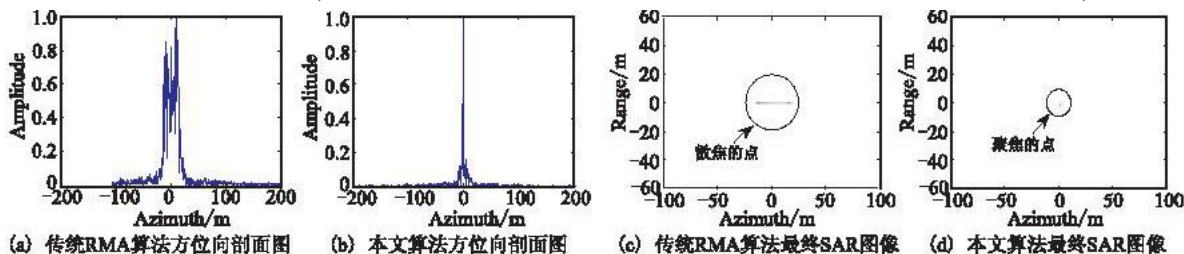


图 5 传统 RMA 算法和本文算法点目标成像结果比较

Fig. 5 The comparison of imaging between conventional and modified RMA

运动误差的影响,导致最终的成像结果方位向聚焦效果较差,不能得到理想的分辨率图像,如图 6(c) 所示。而利用本文扩展的 RMA 算法对回波数据处理时,由于结合了两步运动补偿技术,消除了运动误差的影响,使图 6(d) 最终的成像效果较为理想。图 6(b) 为利用扩展 RMA 算法处理得到的子带图像,消除了运动误差的影响,但是分辨率较低;最后通过在空频域带宽合成后,分辨率得到提高,如图 6(d) 所示,成像效果与原始面目标 SAR 图像基本一致。

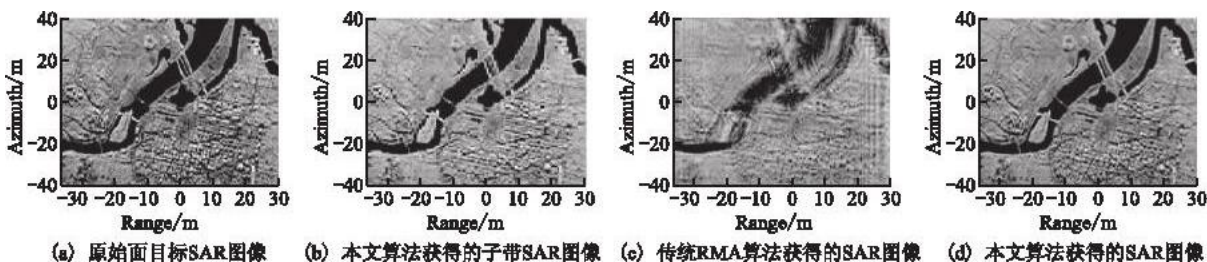


图 6 传统 RMA 算法和本文算法面目标成像结果比较

Fig. 6 The comparison of imaging with plane scene

### 6 结束语

RMA 算法是机载高分辨 MIMO - SAR 系统优先选择的一种成像处理方式,但是它独特的频域处理流程使其较难与运动补偿相结合,因此在实际应用中具有很大的局限性。通过对 Stolt 映射进行改进得到扩展的 RMA 算法,可以很容易地与运动补偿相结合,在高分辨 SAR 系统中具有良好的应用前景。本文首先详细分析了机载 MIMO - SAR 系统的运动误差,然后利用结合运动补偿的扩展 RMA 算法对 MIMO - SAR 回波信号进行处理,并通过空频域带宽合成方法实现距离向高分辨,给出了详细的成像处理流程并利用仿真实验对本文方法进行了验证。

### 参考文献 (References):

[1] 王腾,徐向东,董云龙,等. 合成孔径雷达的发展现状和趋势[J]. 舰船电子工程,2009,29(5):5-9.  
WANG Teng, XU Xiangdong, DONG Yunlong, et al. Present state and development trends of synthetic aperture radar[J]. Ship electronic engineering. 2009, 29(5):5-9. (in Chinese)

[2] Ender J H G. MIMO - SAR [C]//International radar symposium 2007. Cologne, Germany: German institute of navigation, 2007: 580-588.

[3] 武其松,井伟,邢孟道,等. MIMO - SAR 大测绘带成像[J]. 电子与信息学报,2009,31(4):771-775.



- WU Qisong , JING Wei,XING Mengdao,et al. Wide swath imaging with MIMO – SAR[J]. Journal of electronics & information technology,2009,31(4):771 – 775. (in Chinese)
- [4] ZHU Qi, YUAN Yunneng. A method of MIMO system for synthetic aperture radar imaging[C]//9th international conference on signal processing. Beijing:[s. n. ],2008:2404 – 2408.
- [5] WU Qisong,XING Mengdao,BAO Zheng, et al. Wide swath, high range resolution imaging with MIMO – SAR [C]//Radar conference. Guilin;2009 IET international, 2009:1 – 6.
- [6] 白霞,袁运能,孙进平,等. 0.1 米分辨率机载 SAR 系统的带宽实现和成像算法研究[J]. 电子学报,2007,35(9):1622 – 1629.
- BAI Xia,YUAN Yunneng,SUN Jinping, et al. Airborne SAR imaging with 0.1 m resolution: bandwidth management and image formation[J]. Acta electronica & sinica,2007, 35(9):1622 – 1629. (in Chinese)
- [7] Reigber A, Potsis A, Alivizatos E, et al. Wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation [C]//IGARSS 03 proceedings. Toulouse, France: Geoscience and remote sensing symposium, 2003: 1465 – 1467.
- [8] Reigber A. Alivizatos E, Potsis A, et al. Extended wavenumber – domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. Radar, sonar and navigation, IEE proceedings, 2006,153(3):301 – 310.
- [9] 王力宝,许稼,皇甫堪,等. MIMO – SAR 等效相位中心误差分析与补偿[J]. 电子学报,2009,37(12):2688 – 2693.
- WANG Libao,XU Jia,HUANGFU Kan, et al. Analysis and compensation of equivalent phase center error in MIMO – SAR[J]. Acta electronica & sinica, 2009, 37(12): 2688 – 2693. (in Chinese)
- [10] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Imaging of the radar [M]. Beijing:Publishing company of electronic industries, 2005. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## An Imaging Algorithm of High Resolution Airborne MIMO – SAR Based on Motion Compensation

PENG Fa – xiang, LI Hong – wei, CAI Bin, DENG Dong – hu, ZHENG Wan – ze

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Airborne Multiple – Input Multiple – out (MIMO) SAR system can be used for achieving the image with high resolution, but the inevitable problem of motion compensation must be solved. The MIMO – SAR system with several sub – bands is studied here. Firstly, a model of motion error for MIMO – SAR system is established and a detailed analysis of it is presented. Then an extended MIMO – SAR Range Migration Algorithm (RMA) integrating with motion compensation is proposed. Range Cell Migration Correction (RCMC) and azimuth focus are separated by improved Stolt – mapping, and the motion error is corrected through two steps of compensation. Finally, sub – bands are combined into a whole band in spatial – frequency domain to obtain a high range resolution. Imaging simulations for point – targets and plane – targets with this algorithm are performed to verify the validity of such algorithm.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); multiple – input multiple – output (MIMO); high resolution; motion compensation; range migration algorithm (RMA)