

## 平流层飞艇合成孔径雷达成像优化策略\*

贾高伟, 杨希祥

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**平流层飞艇具有驻空高度高且时间久、覆盖范围广、使用效费比高等特点,在侦察监视等领域应用前景广阔。结合平流层飞艇平台特性,分析平流层飞艇合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)与机载SAR的异同;针对平流层飞艇SAR的脉冲重复频率冗余及大振幅低频率运动误差,提出优化方案,并开展仿真分析验证。仿真结果表明所提优化运动补偿方法能够有效消除平流层飞艇运动误差影响。

**关键词:**平流层飞艇;快速响应;SAR系统

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)05-065-07

## Imaging optimization strategy for stratospheric airship synthetic aperture radar

JIA Gaowei, YANG Xixiang

(College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The stratospheric airship has the potential as large observation area, long drift time, and better efficiency. It is expected in many different applications, such as reconnaissance and surveillance. The imaging difference between the stratospheric airship SAR (synthetic aperture radar) and the airplane SAR was compared. Aimed at the redundant pulse repetition frequency and the large-amplitude low-frequency trajectory deviation, an optimization scheme was proposed and verified by simulation. The simulation result shows that the proposed optimized motion compensation method can eliminate the influence of motion error for the stratospheric airship effectively.

**Key words:** stratospheric airship; fast response; synthetic aperture radar system

目前,我国合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统搭载平台主要有天基、空基和地基三种。近地轨道遥感卫星轨道高度在500~800 km之间,能够对固定目标或移动速度较慢目标实施高分辨侦察,但星载SAR系统开发成本高,代价大,轨道运行特性使其难以对突发关键区域进行快速观测响应。

相比于卫星,飞机的飞行高度低、机动灵活,但滞空时间短,机载SAR往往需要高额费用和高频率出勤率才能实现大范围 and 长时间的预警、侦察和监视。地基逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)对空侦察的范围受到观测点地域限制,监视范围小,不能适应在广阔海域中的应用需求。

临近空间浮空器(平流层飞艇或气球)技术的发展为实现大范围区域预警和侦察监视提供了一种新的装备平台<sup>[1]</sup>。平流层飞艇的飞行高度适中(约20 km)、飞行速度较慢、滞空时间长,将临近空间飞艇配置在国境线、海岸线、争议区域等

并配置有效SAR载荷,可以对海面、陆地上目标进行有效观测和侦察,填补临近空间观测活动利用的空白,其在军事、遥感、勘探、测绘、农业、水利等方面同样具有十分广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

影响平流层飞艇实际运行及执行任务能力的关键因素包括:临近空间低压低温环境、平流层飞艇蒙皮材料、平流层飞艇能源管理系统、平流层飞艇飞行控制等。这些因素将影响平流层飞艇SAR系统的温控设计、SAR体积重量功耗、SAR成像算法及运动补偿算法等<sup>[3-5]</sup>。本文将着重分析平流层飞艇SAR在成像几何、成像算法、运动补偿处理等方面的特性。

### 1 平流层飞艇SAR与机载SAR的差异

本文分析的平流层飞艇的运行高度约18~20 km,该环境条件下最低大气温度约-70℃,大型机载SAR平台飞行高度约8~10 km,对应的大气温度约-30℃,因此平流层飞艇SAR系统

\* 收稿日期:2017-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61801495)

作者简介:贾高伟(1989—),男,河南周口人,讲师,博士,E-mail:ji\_as@126.com

设计应当考虑器件的低温特性或载荷系统的温控系统。同时,为减小 SAR 系统对平流层飞艇能源系统的压力,应当在 SAR 系统发射功率与天线增益之间做出折中。此外,平流层飞艇体积庞大,适合安装轻质大面阵高增益天线系统。

在 SAR 工作环境特性、功耗尺寸限制之外,平流层飞艇 SAR 与机载 SAR 的最大差异体现在巡航速度上。一般机载平台(如运八)的巡航速度在 150 m/s,而平流层飞艇的巡航速度在 10 ~ 15 m/s 之间<sup>[1,6-7]</sup>。这里设定平流层飞艇的巡航速度为 10 m/s。低速运动特性对平流层飞艇的影响包括:合成时间延长、航向运动误差补偿的必要性及脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)冗余。

### 1.1 成像几何的差异

类似于机载 SAR,平流层飞艇 SAR 的成像几何如图 1 所示。

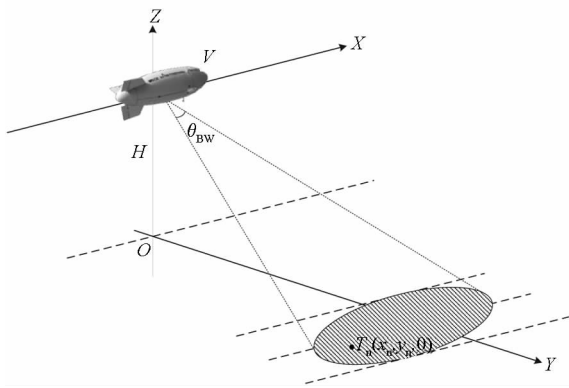


图 1 平流层飞艇 SAR 成像几何

Fig. 1 Geometry of stratospheric airship SAR

设  $H$  为平流层飞艇高度,  $\theta_{BW}$  为合成孔径积累角,  $R_0$  为零多普勒斜距,  $R$  为天线相位中心(Array Phase Center, APC)同目标  $T_n(x_n, y_n, 0)$  之间的瞬时斜距,平流层飞艇巡航速度为  $V$ 。结合 SAR 成像知识,中心斜距处平流层飞艇 SAR 的合成孔径长度为:

$$L_{SAR} = 2R_0 \tan\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) \quad (1)$$

设平流层飞艇 SAR 与机载 SAR 的典型参数如表 1 所示。

结合表 1 可以计算得到中心斜距处机载 SAR 的合成孔径长度为 567 m,对应合成孔径时间为 3.78 s;而中心斜距处平流层飞艇 SAR 的合成孔径长度为 1417 m,对应的合成孔径时间约为 94.5 s。

以观测静止场景或目标为例,理论上合成孔

径时间的延长对成像质量并无影响,但无论是机载 SAR 还是平流层飞艇 SAR,都无法避免气流扰动及控制偏差带来的轨迹偏离,这对实际成像处理带来了挑战。

表 1 参数对比

Tab. 1 Parameters comparison

参数	机载 SAR	平流层飞艇 SAR
运行高度/m	8000	20 000
运行速度/(m/s)	150	10
雷达载频/GHz	10	10
信号带宽/MHz	400	400
方位向波束宽度/(°)	2.3	2.3
雷达下视角/(°)	45 ~ 75	45 ~ 75

### 1.2 运动误差的影响

平流层飞艇的总体布局、飞行机理和工作模式不同于导弹、飞机等飞行器<sup>[1,8]</sup>。平流层飞艇主要依靠浮力气体提供静升力,具有体积/质量比很大、惯性大等特点,附加质量和附加惯性作用明显。同时,平流层飞艇为充气柔性体,存在一定程度的弹性变形,外界大气环境对飞艇有着复杂的多物理场耦合作用,因此其运动误差特性不同于常规飞机。针对 SAR 成像关注的航迹和姿态,其特点概括为:

1) 体积/质量比大,飞行速度缓慢,惯性特征显著,运动误差的频率响应主要是低频;

2) 平流层飞艇体积大,在临近空间环境中(低动压)气动控制效率低,控制响应迟缓,导致其偏离预设航迹的幅度大。

由此得知,平流层飞艇将带来大振幅低频率运动误差。一般地,方位向多普勒调频率可以定义为  $-2v^2/(\lambda R_0)$  ( $v$  为航向理想速度,  $\lambda$  为载波波长)。对于航向速度误差  $\Delta v$ ,引入的多普勒调频率相对比值为  $(\Delta v + v)^2/v^2$ 。由于平流层飞艇巡航速度慢,因而相同的航向速度偏差对应的多普勒调频率相对变化量很大,对方位向成像影响显著,需要进行 PRF 实时调整予以克服。

### 1.3 PRF 冗余的影响

以正侧视条带 SAR 为例,SAR 的多普勒带宽为:

$$B_a = \frac{4V}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) \quad (2)$$

SAR 系统设计时要求  $PRF > B_a$ ,由表 1 可知,在同等方位分辨率条件下,机载 SAR 和平流层飞艇 SAR 对应的多普勒带宽分别为 300 Hz 和

20 Hz,后者具有 15 倍冗余。PRF 冗余将增加方位向处理数据量,但通过方位滤波或抽样等处理带来的效益并不高。

## 2 优化策略

前文分析表明,平流层飞艇 SAR 相比于机载 SAR,具有合成时间长、孔径长、PRF 冗余大、运动误差幅度较大等特点。从成像机理上讲,这些因素并不会直接影响 SAR 成像质量。但为提高成像效率,更为高效地利用平流层飞艇平台开展对地高分辨率成像,有必要对平流层飞艇 SAR 成像过程进行优化,具体包括冗余 PRF 的利用以及改进适用于频域成像算法的运动补偿流程。

### 2.1 冗余 PRF 的利用

结合平流层飞艇运动速度慢的特点,利用阵列数字波束形成技术,可以分时收发数据,拓展平流层飞艇成像(观测)范围。具有来讲,包括方位向多波束切换和距离向多波束切换两类,结合具体雷达参数,也可以将两者有效结合起来。

#### 2.1.1 方位向多波束切换

在不同的脉冲重复间隔 (Pulse Repetition Interval, PRI),通过数字波束生成不同斜视角的波束,以三种波束角为例,在三个时刻,分别以后斜视角  $\theta_s$ 、正侧视、前斜视角  $\theta_s$  辐射电磁波,前后斜视角大小一致,如图 3 所示。随后对接收到的回波区分,分别生成后斜视回波矩阵、正侧视回波矩阵、前斜视回波矩阵。同样的合成孔径长度内,可以得到三幅雷达图像,通过拼接、裁剪重叠区域,能够获取更长的方位向测绘宽度。如图 2 所示,  $PRI_1, PRI_2, PRI_3$  三个时刻对应的飞艇空间位置近乎相同,图中显示是为区分示意三个不同时刻。若按照正侧视录取回波,对应的方位向测绘宽度为  $L_0$ ;采用方位向波束切换后,对应的测绘宽度为  $L_{sum}$ 。通过参数设计,该处理模式能够允许 SAR 在成像过程中间歇性关机,节约电量。

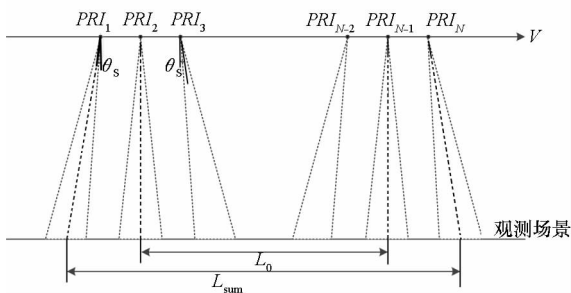


图 2 方位向多波束切换示意图

Fig. 2 Multi-beam switch in azimuth direction

#### 2.1.2 距离向多波束切换

另一种利用冗余 PRF 的方式是距离向多波束形成,同样以三个波束为例,在  $PRI_1, PRI_2, PRI_3$  三个时刻生成下视角为  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  的三个波束并辐射电磁波,如图 3 所示。随后对接收的回波区分,成像得到对应于不同测绘带的雷达图像。各测绘带之间的重叠区域用于图像拼接。在这一成像模式下,需考虑距离模糊问题,并选取合理的雷达回波接收增益。距离向多波束切换能够很大程度地增大测绘带宽。

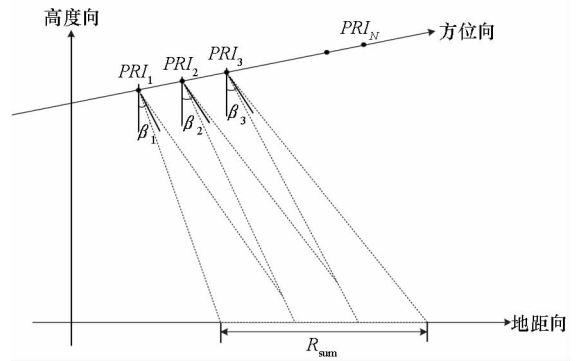


图 3 距离向多波束切换示意图

Fig. 3 Multi-beam switch in range direction

需要说明的是,无论是方位向还是距离向多波束切换,机械扫描因重量大、响应时间较长等原因都不适合于平流层飞艇,可以通过多通道多天线设置或者相扫来实现多波束切换。

## 2.2 大空变运动误差的影响与消除

### 2.2.1 大幅度运动误差的影响

图 4 为非理想情况下正侧视平流层飞艇 SAR 的成像几何示意图。在笛卡尔直角坐标系  $XYZ$  中,  $O$  为坐标原点,预定航迹高度为  $H$ ,预定沿  $X$  向飞行,图中沿  $X$  向虚线代表实际飞行轨迹,  $P$  为实际飞行轨迹上的雷达 APC 位置。相对于理想飞行,设雷达 APC 沿  $X, Y, Z$  向误差分别为

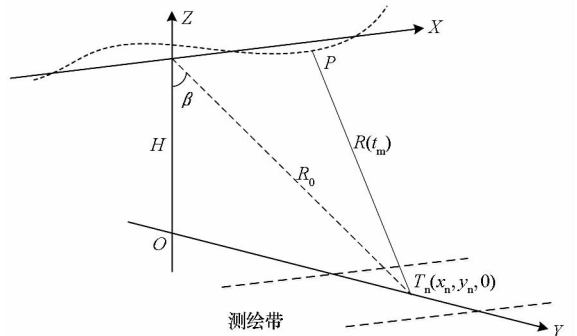


图 4 实际运行轨迹下平流层飞艇 SAR 成像几何

Fig. 4 Geometry of stratospheric airship SAR in the presence of motion errors

$\Delta X(t_m)$ 、 $\Delta Y(t_m)$  和  $\Delta Z(t_m)$  ( $t_m$  是方位慢时间), 可以得到  $P$  点的坐标为  $(X(t_m), \Delta Y(t_m), \Delta Z(t_m))$ ,  $X(t_m)$  表示 APC 沿  $X$  向的实际位置。对于测绘带中任意一点  $T_n(x_n, y_n, 0)$ , 其与雷达 APC 的瞬时斜距为:

$$R(t_m) = \sqrt{[X(t_m) - x_n]^2 + [\Delta Y(t_m) - y_n]^2 + [\Delta Z(t_m) + H]^2} \quad (3)$$

定义目标  $T_n$  到理想航迹的零多普勒斜距为:

$$R_0 = \sqrt{H^2 + y_n^2} \quad (4)$$

理想情况下, 目标  $T_n$  到雷达 APC 之间的瞬时斜距为:

$$R_r(t_m) = \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + y_n^2 + H^2} \quad (5)$$

则非理想运动轨迹引入的瞬时斜距误差为:

$$\begin{aligned} \Delta R(t_m) &= R(t_m) - R_r(t_m) \\ &= \sqrt{[X(t_m) - x_n]^2 + [\Delta Y(t_m) - y_n]^2 + [\Delta Z(t_m) + H]^2} - \\ &\quad \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + y_n^2 + H^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$\Delta R(t_m)$  是运动补偿的核心要素, 在运动补偿处理中,  $\Delta R(t_m)$  的表达形式及方位空变性是重点需要考虑的。结合成像知识, SAR 平台运动误差可以分为沿视线 (Line Of Sight, LOS) 方向和沿方位向。如前文所述, 这里假设方位向速度误差已由实时调整 PRF 克服。为此, 这里忽略沿方位向 ( $X$  向) 速度误差, 仅考虑 LOS 向运动误差。

经方位向 PRF 调整后, 可以等效认为 SAR 平台匀速运动, 进而得到瞬时运动误差的表达形式为:

$$\Delta R_r(t_m) = \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + [\Delta Y(t_m) - y_n]^2 + [\Delta Z(t_m) + H]^2} - \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + y_n^2 + H^2} \quad (7)$$

针对常规机载 SAR 成像几何,  $\Delta R_r(t_m)$  的近似表达式<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{R}_r(t_m) &\approx \frac{R_0}{R_r(t_m)} [\Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta] \\ &= \cos\theta [\Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta] \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\theta$  对应瞬时斜视角, 取  $\theta = 0$  得到视线平面内运动误差为:

$$\Delta \bar{R}_{\text{Los}}(t_m) = \Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta \quad (9)$$

针对常规机载 SAR 成像几何, 利用式 (9) 表示雷达 APC 在视线平面内运动误差是满足要求的。式 (9) 的成立前提是  $\Delta Y(t_m)$ 、 $\Delta Z(t_m)$  远小于  $R_r(t_m)$ , 而这样的假设对于平流层飞艇 SAR 而言不再适合。相应地, 对瞬时斜距误差进行如下处理:

$$\begin{aligned} \Delta R_r(t_m) &= \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + [\Delta Y(t_m) - y_n]^2 + [\Delta Z(t_m) + H]^2} - \\ &\quad \sqrt{(Vt_m - x_n)^2 + y_n^2 + H^2} \\ &= \frac{R_0}{R_r(t_m)} [\Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta] + \frac{\Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)}{2R_r(t_m)} - \\ &\quad \frac{[2R_0 \sin\beta \Delta Y(t_m) + 2R_0 \cos\beta \Delta Z(t_m) + \Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)]^2}{8R_r^3(t_m)} \\ &= \cos\theta [\Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta + \frac{\Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)}{2R_0}] - \\ &\quad \frac{|2R_0 [\sin\beta \Delta Y(t_m) + \cos\beta \Delta Z(t_m)] + \Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)|^2}{8R_0^3} \cos^3(\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

令  $R_r(t_m)$  取  $R_0$  (即  $\theta = 0$ ), 得到零多普勒位置对应的运动误差, 亦即 LOS 向运动误差为:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{Los}}(t_m) &= \Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta + \frac{\Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)}{2R_0} - \\ &\quad \frac{[2R_0 \sin\beta \Delta Y(t_m) + 2R_0 \cos\beta \Delta Z(t_m) + \Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)]^2}{8R_0^3} \end{aligned} \quad (11)$$

图 5 给出了  $\Delta R_{\text{Los}}(t_m)$ 、 $R_0$ 、 $\beta$  等参数的几何示意。

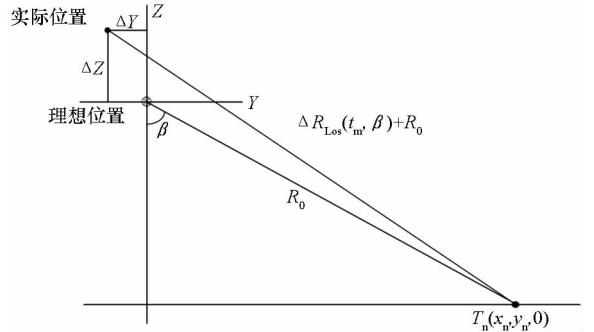


图 5 视线平面运动误差示意图

Fig. 5 Motion errors in the LOS plane

结合式 (10), 对于某一时刻  $t_m$  对应的运动误差  $\Delta Y(t_m)$  和  $\Delta Z(t_m)$ , 波束边缘处对应的误差为:

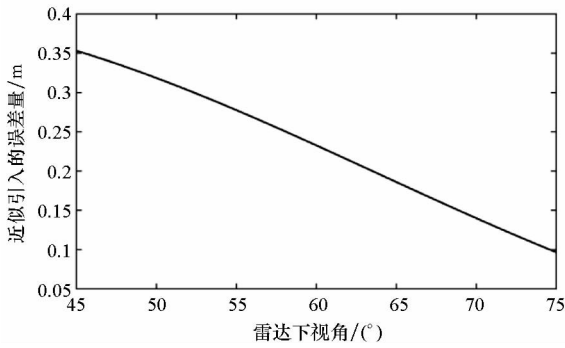
$$\begin{aligned} \Delta R_a(t_m) &= \cos\left(\frac{\theta_{\text{BW}}}{2}\right) \left[ \Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta + \frac{\Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)}{2R_0} \right] - \\ &\quad \frac{|2R_0 [\sin\beta \Delta Y(t_m) + \cos\beta \Delta Z(t_m)] + \Delta Y^2(t_m) + \Delta Z^2(t_m)|^2}{8R_0^3} \cos^3\left(\frac{\theta_{\text{BW}}}{2}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

则对应的运动误差最大方位空变量为:

$$\Delta r_a = \Delta R_{\text{Los}}(t_m) - \Delta R_a(t_m) \quad (13)$$

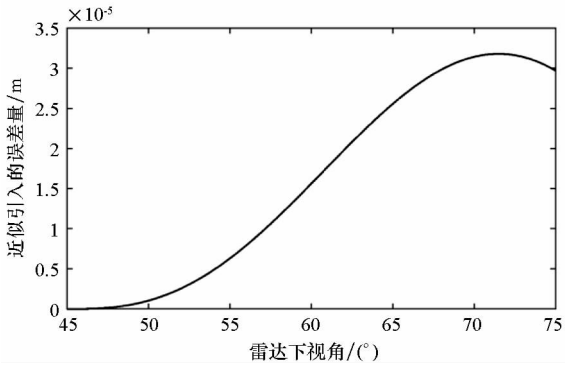
量化地, 对于平流层飞艇 SAR, 设  $\Delta Y(t_m)$  和  $\Delta Z(t_m)$  满足余弦曲线, 振幅均为 100 m。结合

表1中雷达参数及成像几何,随着下视角的增大,计算得到如图6(a)所示曲线。观察发现,式(9)引入的近似误差在距离分辨单元的量级会严重降低成像质量。图6(b)表示利用式(11)计算对应的近似误差,可以看到在零多普勒位置,近似引入的误差小于波长,满足成像要求。此时的运动误差对于波束边缘点将引入空变误差,如图6(c)所示,可以看到由于运动误差幅度较大,对于波束边缘点仍存在不容忽略的空变误差,但量值小于一个距离分辨单元,表明可以在一阶补偿中忽略式(11)引入的方位空变量,但在二阶补偿中必须考虑方位空变性。



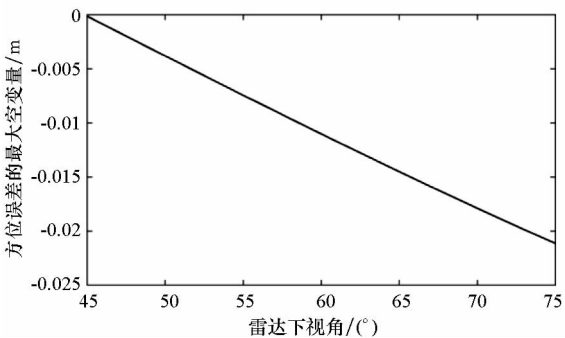
(a) 传统公式近似引入的误差

(a) Errors derived from the traditional formula



(b) 式(11)对应的近似误差

(b) Errors derived from equation (11)



(c) 式(11)对应的误差最大空变量

(c) The maximum of space variable by equation (11)

图6 运动误差量化分析

Fig. 6 Numerical analysis of motion error

运动误差的补偿,涉及三个方面:一是运动误差的精确表达形式,二是运动误差的方位空变性,三是运动误差的距离空变性。对于距离空变性,可以通过距离向分子带成像处理,并以距离向子测绘带中心斜距对应的误差完成一阶运动补偿,本文对此不再展开阐述。后续的运动误差补偿着重考虑前两因素的影响。

### 2.2.2 基于频域成像处理的运动误差消除

事实上,无论是讨论运动误差的解析表达式还是考虑运动误差的空变性,都是为了配合频域成像算法,如非线性尺度变标(Nonlinear Chirp Scaling, NCS)算法、距离徙动算法,因为频域成像算法计算量小,对数据存储空间要求也小,利于实时成像处理。在频域成像处理中,“两步运动补偿(MOTION COMPENSATION, MOCO)法”是可行且高效的运动补偿方法。以NCS算法为例,基于式(11),在距离频域方位时域,进行一阶运动补偿,此时的补偿因子为:

$$H_{moco1} = \exp[-j2k\Delta R_{Los}(t_m, \beta_{ref})] \quad (14)$$

式中,  $k$  表示距离向波数,  $\beta_{ref}$  表示场景中心对应的雷达入射角。随后进行变标处理、距离徙动校正,将回波数据变换至距离压缩-方位时域。由于运动误差的方位空变性,需要利用子孔径处理的方式克服空变性。在每一段子孔径内,近似认为运动误差是不变的。利用方位频率同雷达成像角  $\theta$  之间的对应关系  $f_a = 2V\sin\theta/\lambda$ , 将子块回波变换到方位频域,则不同方位频率对应于不同的雷达成像角。利用这种关系可以进行与斜视角相关的方位空变相位误差补偿,具体补偿因子为:

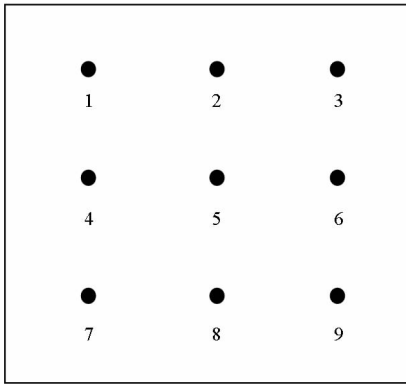
$$H_{moco2} = \exp\{-j2k_c[\Delta R_r(t_{mid}^i, \beta) - \Delta R_{Los}(t_{mid}^i, \beta_{ref})]\} \quad (15)$$

式中:  $t_{mid}^i$  表示第  $i$  ( $0 \leq i \leq I$ ) 个子孔径的方位中心时刻,  $I$  为总的子孔径数量;  $\Delta R_r(t_{mid}^i, \beta)$  为第  $i$  个子孔径对应的沿不同下视角的平均运动误差;  $\Delta R_{Los}(t_{mid}^i, \beta_{ref})$  为第  $i$  个子孔径对应的沿中心斜距处 LOS 向运动误差;  $k_c$  为中心波数。完成二阶补偿后,将子孔径数据变换至方位时域,重新合并,再进行方位脉冲压缩处理。如此即完成了空变运动误差补偿。

## 3 仿真分析

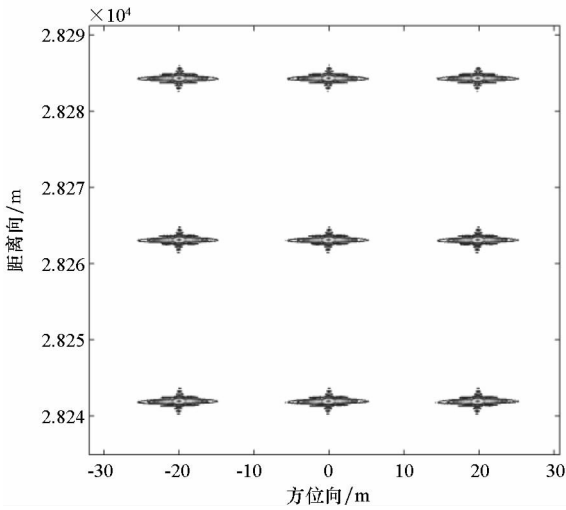
对第2.2小节介绍的改进运动补偿方法进行仿真验证,采用表1所示平流层飞艇 SAR 参数,并设运动误差  $\Delta Y$  和  $\Delta Z$  为振幅 100 m 的余弦曲线,距离向测绘子带宽度设为 150 m。在场景中设置 9 个点目标,方位向间隔 20 m,地距向

间隔 30 m。结合成像处理,可以得到如图 7 所示仿真结果。直观地,利用本文方法处理能够有效消除运动误差的影响,得到良好的成像结果。



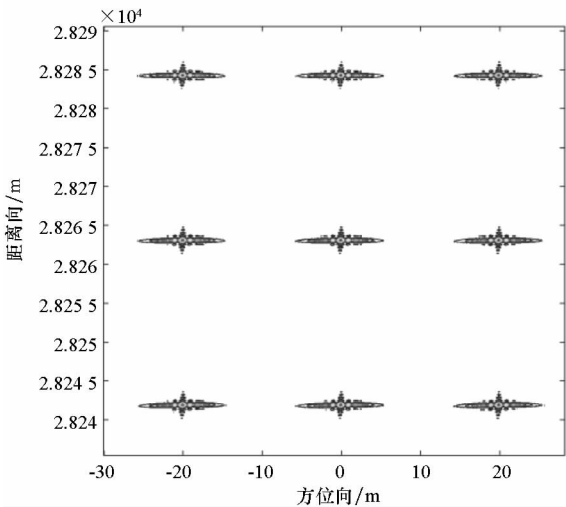
(a) 目标布置示意图

(a) Displacement of multi targets



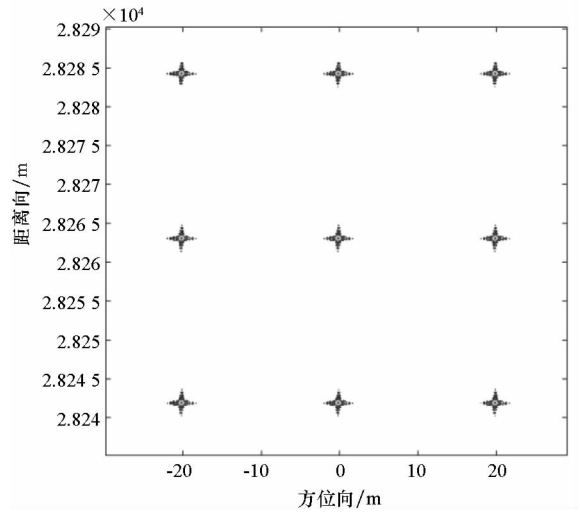
(b) 采用经典运动补偿方法对应的成像结果

(b) Results processed with traditional MOCO method



(c) 未考虑方位空变性的成像结果

(c) Results processed without considering the azimuth space variance



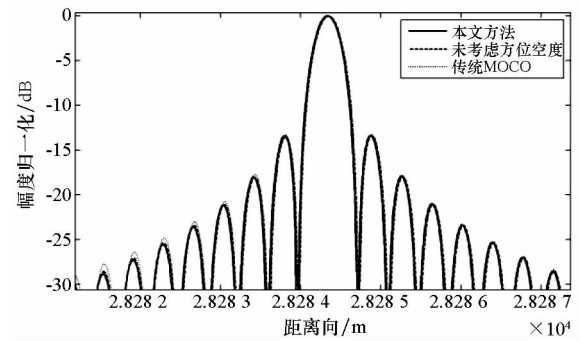
(d) 完整的运动补偿成像结果

(d) Results processed with the proposed MOCO method

图 7 仿真结果对比

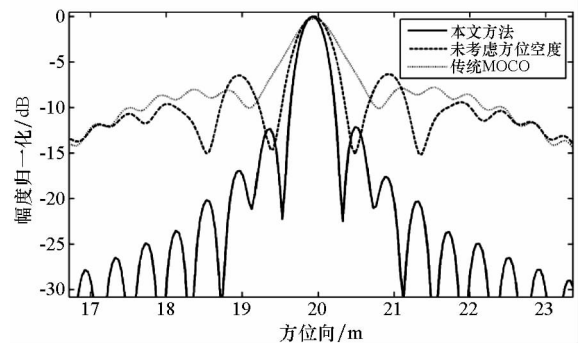
Fig. 7 Results comparison

以边缘处点目标 3 为例,三种不同的运动补偿处理对应的距离向和方位向成像结果剖面图如图 8 所示。对比发现,针对平流层飞艇 SAR 运动误差幅值大、周期长的特点,传统的运动误差近似处理已经不能满足应用需要,同时,运动误差的方



(a) 距离向成像结果剖面图

(a) Profiles in range



(b) 方位向成像结果剖面图

(b) Profiles in azimuth

图 8 成像结果对比

Fig. 8 Comparison of imaging results

位空变性必须予以考虑。本文提出的运动误差近似处理及方位空变性处理方法,能够克服运动误差的影响,得到聚焦良好的 SAR 图像。

量化地,图 8(b)中本文方法对应的方位向点散布函数的分辨率为 0.33 m,同理论值一致;峰值旁瓣比约为 -12.6 dB,积分旁瓣比约为 -9.1 dB,尽管两者同精确成像的理论值相比有所降低,但满足实际应用,表明了第 2.2 小节运动补偿流程的可行性。

## 4 结论

本文建立了平流层飞艇 SAR 成像几何,结合平流层飞艇典型运行环境,对比分析了平流层飞艇 SAR 与机载 SAR 系统的异同,分析得到:相比于机载 SAR,平流层飞艇 SAR 并没有颠覆性的区别,适用于机载 SAR 的成像算法依旧适用于平流层飞艇 SAR,但对应的成像效率较低。低速条件下航向运动误差对成像影响更为显著,需予以补偿;针对 PRF 冗余,提出了方位向多波束切换和距离向多波束切换策略提高平流层飞艇 SAR 成像效率;分析得出平流层飞艇存在大振幅低频率的轨迹偏移,并提出了改进的运动补偿策略,使之能够配合频域成像算法。仿真分析表明了所提改进方法的有效性。

## 参考文献 (References)

[1] 杨跃能. 平流层飞艇动力学建模与控制方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2013.  
YANG Yueneng. Dynamics modeling and flight control for a stratospheric airship [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)

[2] Wang W Q. Near-space vehicle: supply a gap between satellites and airplanes for remote sensing [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2011, 26(4): 4-9.

[3] 杨海光. 临近空间 SAR 成像理论与成像方法研究[D]. 成

都:电子科技大学,2014.

YANG Haiguang. Imaging theories and methods for near-space synthetic aperture radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)

- [4] 王晓峰,董臻,梁甸农. 临近空间慢速平台 SAR 结合运动补偿的 SCFT 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1869-1873.  
WANG Xiaofeng, DONG Zhen, LIANG Diannong. SCFT processing algorithm based on motion compensation for near space slow platform SAR [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(10): 1869-1873. (in Chinese)
- [5] 左伟华,皮亦鸣,闵锐. 临近空间平台高分辨率宽测绘带重复访问合成孔径雷达成像模式及算法研究[J]. 信号处理, 2014, 30(10): 1119-1127.  
ZUO Weihua, PI Yiming, MIN Rui. High resolution wide swath repeat acquisition SAR imaging mode and algorithm with near space platform [J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(10): 1119-1127. (in Chinese)
- [6] 杨海光,易青颖,李中余,等. 临近空间慢速平台 SAR 地面目标检测与成像[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(6): 838-844.  
YANG Haiguang, YI Qingying, LI Zhongyu, et al. Near-space slow SAR ground moving target detection and imaging [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6): 838-844. (in Chinese)
- [7] Wang W Q. Near-space vehicle borne SAR with reflector antenna for high resolution and wide swath remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(2): 338-348.
- [8] Wang W Q, Cai J, Peng Q. Near-space SAR: a revolutionary microwave remote sensing mission [C]//Proceedings of 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007: 127-131.
- [9] 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. Technology of radar imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [10] 李燕平,邢孟道,保铮. 沿航向运动补偿的几何形变校正[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6): 881-886.  
LI Yanping, XING Mengdao, BAO Zheng. The correction of geometric distortion for along-track motion compensation [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(6): 881-886. (in Chinese)