

# MEO 星弹双基 SAR 多普勒特性及分辨率分析

王新迪, 张云, 李宏博

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 中地球轨道 SAR 具有波束范围覆盖广、重访时间短等特点, 将其作为发射平台, 弹载 SAR 作为接收平台, 可以大范围面、高机动性地对重点区域高精度成像。根据空间系统模型建立 MEO 星弹双基 SAR 等效模型, 对收发平台斜距模型进行描述, 将其等效为多项式模型, 并分析了孔径时间内的斜距误差, 验证模型有效性; 根据平台特性重新分析多普勒特性, 得到多普勒中心频率和多普勒调频率的二维空变特性; 运用梯度法计算距离分辨率、方位分辨率, 并分析其随成像区域的变化情况。仿真实验表明, 成像区域内的分辨率受俯冲速度的影响是不均匀的, 应改变斜视角或改变双基构型, 使关注的目标处在受速度影响较小的区域。

**关键词** 合成孔径雷达; 双基 SAR; 星弹双基 SAR; 分辨率分析

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.007

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-0045-06

## Doppler Characteristics and Resolution Analysis of MEO Space-Missile Borne Bistatic SAR

WANG Xindi, ZHANG Yun, LI Hongbo

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** Being characterized by wide beam coverage and short revisit time, taking the MEO as a transmitting platform, and the missile borne Bistatic SAR as a receiver platform, the image can be made in the key areas with a wide range and high mobility. In this paper, the equivalent model of MEO space-missile borne BiSAR is established based on the space system model, and the slant range model of the transceiver platform is described, which is equivalent to a polynomial model. The slant range error in the aperture time is analyzed to verify the validity of the model. According to the characteristics of the platform, the Doppler characteristics are re-analyzed, and the two-dimensional space variation characteristics of the Doppler center frequency and Doppler modulation frequency are obtained. The gradient method is used to calculate the range resolution and azimuth resolution, and analyze their changes with the imaging area. The simulation experiment shows that the resolution in the imaging area is not uniformly affected by the subduction velocity, and the oblique angle of view or the double base configuration should be changed so that the target concerned is located in the area less affected by the velocity.

**Key words** synthetic aperture radar (SAR); Bistatic SAR (BiSAR); space-missile borne bistatic SAR; resolution analysis

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)  
通过发射宽带信号实现距离高分辨, 通过对雷达与

目标之间相对运动产生的多普勒相位进行积累获得  
方位维度的高分辨, 对外界环境的条件要求较低, 能

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61201308)

作者简介: 王新迪(1997-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。E-mail: wang\_xind@163.com

**引用格式:** 王新迪, 张云, 李宏博. MEO 星弹双基 SAR 多普勒特性及分辨率分析[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1): 45-50. WANG Xindi, ZHANG Yun, LI Hongbo. Doppler Characteristics and Resolution Analysis of MEO Space-Missile Borne Bistatic SAR[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 45-50.

全天时全天候的工作,并且具有较强的抗干扰能力,作用距离远,图像分辨率高<sup>[1]</sup>。SAR系统按照收发平台之间的几何位置关系可以分为单基SAR和双/多基SAR<sup>[2]</sup>。单基SAR系统为收发同置,整体构造简单,而双/多基地SAR是收发分置的,即发射器和接收器安装在不同的平台上,增大了系统构型的可变性和灵活度。双基相比单基SAR系统来说主要具备可以得到多角度的目标散射信息、安全性和可靠性更高、配置灵活等几个性能优势<sup>[3-5]</sup>。

星弹BiSAR是近年来出现的一种新体制SAR系统,它是卫星为发射机,导弹为接收机的系统<sup>[6]</sup>。其中,卫星选取MEO卫星,与低轨道(low earth orbit, LEO)卫星相比,MEO卫星处在更高的轨道上,相同波束角度的雷达天线在地面照射的范围会更大<sup>[7]</sup>,雷达天线只需转动很小的角度,就可以轻松完成地面监测场景的切换,因此有很快的响应速度。除此之外MEO SAR还具有更广阔的波束覆盖范围,与LEO SAR相比,MEO SAR的重访时间大大缩短<sup>[8]</sup>,可以实现对目标区域的不间断观测。弹载SAR技术就是将具有成像能力的SAR载荷安装在导弹导引头上,通过实时提供关注目标所在区域的局部清晰雷达地图,结合地形匹配制导,实现对地面以及海面上关注目标的精确有力打击<sup>[9]</sup>。因此,MEO星弹双基就可以结合中轨卫星广泛波束覆盖范围的特点以及导弹的灵活性,为解决前视成像存在的难题提供新的思路,同时,由于弹载SAR只接收信号无需发射信号,因此被发现的概率大幅降低,在复杂的作战环境中也有更高的安全性和可靠性。

MEO星弹双基SAR发射接收平台分置,发射斜距和接收斜距不同,两个平台相对于目标的位置与运动关系(即双基SAR的构型)直接决定了其分辨能力<sup>[10]</sup>。为保证成像结果的有效性,应充分分析BiSAR中分辨率计算方式的不同,并考虑二维分辨能力<sup>[11]</sup>。梯度法是一种广泛应用的计算双基SAR二维分辨率的方法,Cardillo给出了梯度法的定义<sup>[12]</sup>,Moccia基于梯度法分析了不同双基SAR组合(如低轨SAR+低轨SAR,低轨SAR+机载SAR等)的二维分辨率<sup>[13]</sup>,但没有针对MEO星弹双基的组合形式进行分析。本文针对MEO星弹BiSAR系统特殊的几何构型,构建斜距模型,重点分析多普勒特性及空

间分布单元的二维分布,并基于梯度法计算距离分辨率、方位分辨率,分析其随成像区域的变化情况。

## 1 MEO星弹双基SAR模型

在MEO星弹BiSAR系统中,发射机为中轨卫星,确定轨道六根数后其运动轨迹即可唯一确定。然而地球曲率及自转不能忽略,需要进行转换以求解雷达在地表的波束扫描参数。结合导弹的高速机动飞行状态以及卫星的轨道特点,首先在地固坐标系中建立空间几何模型,如图1(a)所示。与传统SAR不同的是,由于地球存在自转,目标场景也具有一定的速度。根据轨道六要素,可以确定卫星的位置和运动矢量,再根据坐标转换,将SAR几何模型建立在成像参考点的本地坐标系中,进而可以简化距离历程以及回波相位的求解与分析,如图1(b)所示。现假设参考波束中心点 $P$ 的经纬度分别为 $(\theta_{lo}, \theta_{la})$ ,首先将地固坐标系绕 $Z$ 轴逆时针旋转 $\theta_{lo}$ ,然后绕 $Y$ 轴旋 $\pi/2 - \theta_{la}$ ,最后沿 $Z$ 轴正向移动地球半径 $R_e$ ,此时 $P$ 成为坐标原点,新的坐标系即为本地坐标系。相应的可以将平台位置、速度、加速度矢量转换到本地坐标系中表示。

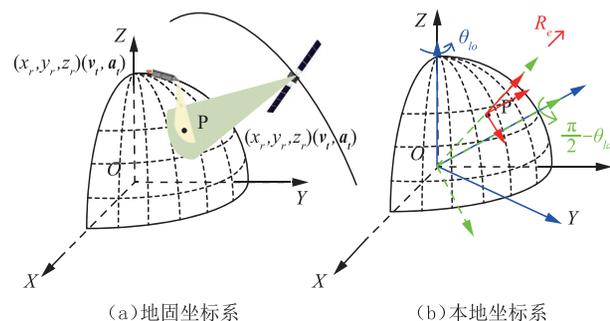


图1 MEO星弹双基SAR示意图

设卫星(发射机)位于目标区域的斜侧,位置为 $(x_t, y_t, z_t)$ ,速度、加速度矢量为 $(\mathbf{v}_t, \mathbf{a}_t)$ 。考虑到平飞是俯冲的一种特殊情况,因此选择更通用的情况设置,设导弹具有一定的俯冲速度,位置为 $(x_r, y_r, z_r)$ ,速度、加速度矢量为 $(\mathbf{v}_r, \mathbf{a}_r)$ 。 $P$ 为平坦地面上位于成像区域内的某点目标。

在中心时刻点目标 $P$ 到收发平台的瞬时无近似双基斜距为:

$$R_p(t_a) = R_{p,t}(t_a) + R_{p,r}(t_a) = \sqrt{(x_t - x_p + v_{tx}t_a + \frac{1}{2}a_{tx}t_a^2)^2 + (y_t - y_p + v_{ty}t_a + \frac{1}{2}a_{ty}t_a^2)^2 + (z_t + v_{tz}t_a + \frac{1}{2}a_{tz}t_a^2)^2} + \sqrt{(x_r - x_p + v_{rx}t_a + \frac{1}{2}a_{rx}t_a^2)^2 + (y_r - y_p + v_{ry}t_a + \frac{1}{2}a_{ry}t_a^2)^2 + (z_r + v_{rz}t_a + \frac{1}{2}a_{rz}t_a^2)^2} \quad (1)$$

对其进行高阶泰勒展开至四阶,近似双基斜距为:

$$R_P(t_a) \approx R_0 + k_1 t_a + k_2 t_a^2 + k_3 t_a^3 + k_4 t_a^4 \quad (2)$$

其中各系数为:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\mu_{t1}}{2R_{t0}} + \frac{\mu_{r1}}{2R_{r0}} \\ k_2 = \frac{\mu_{t2}}{2R_{t0}} - \frac{\mu_{t1}^2}{8R_{t0}^3} + \frac{\mu_{r2}}{2R_{r0}} - \frac{\mu_{r1}^2}{8R_{r0}^3} \\ k_3 = \frac{\mu_{t3}}{2R_{t0}} - \frac{\mu_{t1}\mu_{t2}}{4R_{t0}^3} + \frac{\mu_{t1}^3}{16R_{t0}^5} + \frac{\mu_{r3}}{2R_{r0}} - \frac{\mu_{r1}\mu_{r2}}{4R_{r0}^3} + \frac{\mu_{r1}^3}{16R_{r0}^5} \\ k_4 = \left[ \begin{aligned} &\frac{\mu_{t4}}{2R_{t0}} - \frac{2\mu_{t1}\mu_{t3} + \mu_{t2}^2}{8R_{t0}^3} + \frac{3\mu_{t1}^2\mu_{t2}}{16R_{t0}^5} - \frac{5\mu_{t1}^4}{128R_{t0}^7} + \\ &\frac{\mu_{r4}}{2R_{r0}} - \frac{2\mu_{r1}\mu_{r3} + \mu_{r2}^2}{8R_{r0}^3} + \frac{3\mu_{r1}^2\mu_{r2}}{16R_{r0}^5} - \frac{5\mu_{r1}^4}{128R_{r0}^7} \end{aligned} \right] \\ \begin{cases} \mu_{t1} = 2(v_{tx}x_t + v_{ty}y_t + v_{tz}z_t) \\ \mu_{t2} = v_{tx}^2 + v_{tz}^2 + v_{ty}^2 + a_{tx}x_t + a_{ty}y_t + a_{tz}z_t \\ \mu_{t3} = v_{tx}a_{tx} + v_{ty}a_{ty} + v_{tz}a_{tz} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

下面用表 1 和表 2 中的仿真参数对上述斜距模型进行误差分析。

表 1 信号参数

| 参数            | 数值      |
|---------------|---------|
| 信号载频/GHz      | 35      |
| 脉冲宽度/ $\mu$ s | 2       |
| 带宽/MHz        | 100/300 |
| 采样率/MHz       | 120/320 |
| 脉冲重复频率/Hz     | 3 000   |

表 2 收发平台参数

| 参数                    | 数值                |
|-----------------------|-------------------|
| 发射机位置/km              | (-2 000,0,10 000) |
| 发射机速度/(m/s)           | (40,4 000,-10)    |
| 发射机加速度/( $m/s^2$ )    | (2,1,1)           |
| 接收机 1 位置/km           | (-40,-10,150)     |
| 接收机 1 速度/(m/s)        | (0,2 000,0)       |
| 接收机 1 加速度/( $m/s^2$ ) | (0,0,0)           |
| 接收机 2 位置/km           | (-10,-80,40)      |
| 接收机 2 速度/(m/s)        | (0,2 000,-300)    |
| 接收机 2 加速度/( $m/s^2$ ) | (0,0,-50)         |
| 接收机 3 位置/km           | (-80,-10,40)      |
| 接收机 3 速度/(m/s)        | (0,2 000,-500)    |
| 接收机 3 加速度/( $m/s^2$ ) | (0,0,-50)         |
| 接收机 4 位置/km           | (-10,-80,40)      |
| 接收机 4 速度/(m/s)        | (0,2 000,-500)    |
| 接收机 4 加速度/( $m/s^2$ ) | (0,0,-50)         |

接收平台分为平飞和俯冲两种状态,需要分别考虑。导弹平飞处在搜索阶段,为条带式成像,而导弹俯冲处在跟踪阶段,为聚束式成像,二者分辨率需求不同,因此选用的信号带宽有所差别。除此之外,由于双基地 SAR 系统较单基地多了“双基地角”这

个参数,也要考虑该角度对成像的影响。而关于无俯冲速度的双基 SAR 研究较多,下面仅分析仿真有较大俯冲速度情况下,不同双基地角以及斜视角带来的影响。接收机 1 处在平飞阶段,接收机 2、3、4 处在俯冲阶段。接收机 3、4 的速度相同但位置不同,可以对比观察双基角的变换情况以及斜视角的影响;接收机 2、4 的位置相同但速度不同,可以对比观察不同俯冲速度带来的影响。

不同接收机参数下,上述斜距模型与实际之间的误差如图 2 所示,表明将模型展开至四阶,理论值与实际值相差远小于  $\lambda/4$ ,可以满足精度要求。

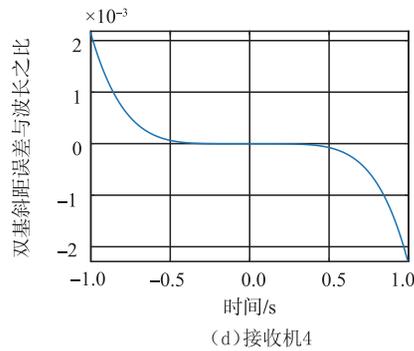
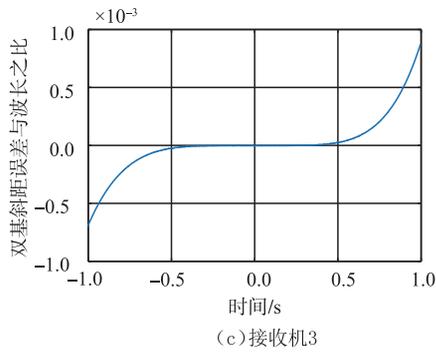
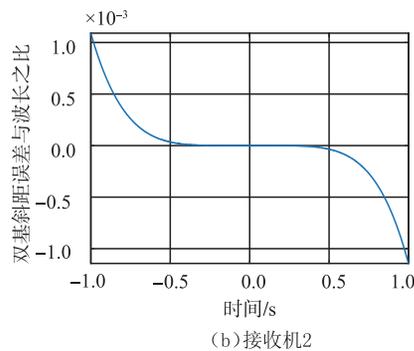
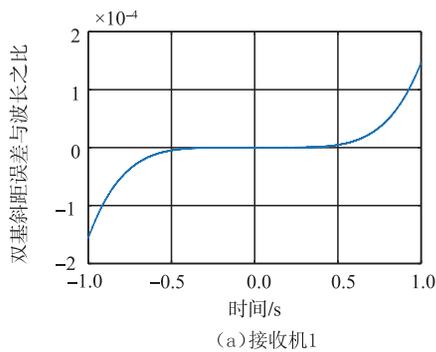


图 2 模型斜距误差

## 2 多普勒特性及二维空变分析

由于平台并非匀速运动,传统的利用速度和波长计算多普勒的公式不成立,需要从定义出发分析。对于场景中的某一点  $P$  来说,其多普勒历程可由斜距历史的一阶导数求得:

$$f_{d,P}(t_m) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dR_P(t_m)}{dt_m} = f_{dc,P} + \gamma_P t_m + \dots \quad (5)$$

多普勒中心频率可以表示为:

$$f_{dc,P} = -\frac{1}{\lambda} \left. \frac{dR_P(t_m)}{dt_m} \right|_{t_m=0} = -\frac{1}{\lambda} \left[ \frac{(x_t - x_p)v_{tx} + (y_t - y_p)v_{ty} + z_t v_{tz}}{\sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + z_t^2}} + \frac{(x_r - x_p)v_{rx} + (y_r - y_p)v_{ry} + z_r v_{rz}}{\sqrt{(x_r - x_p)^2 + (y_r - y_p)^2 + z_r^2}} \right] \quad (6)$$

多普勒调频率是多普勒函数的一阶导数,这里只考虑其线性部分,调频率为:

$$\gamma_P = -\left. \frac{d^2 R_P(t_m)}{\lambda dt_m^2} \right|_{t_m=0} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \frac{(x_t - x_p)a_{tx} + (y_t - y_p)a_{ty} + z_t a_{tz} + v_{tx}^2 + v_{ty}^2 + v_{tz}^2}{((x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + z_t^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{((x_t - x_p)v_{tx} + (y_t - y_p)v_{ty} + z_t v_{tz})^2}{((x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + z_t^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{(x_r - x_p)a_{rx} + (y_r - y_p)a_{ry} + z_r a_{rz} + v_{rx}^2 + v_{ry}^2 + v_{rz}^2}{((x_r - x_p)^2 + (y_r - y_p)^2 + z_r^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{((x_r - x_p)v_{rx} + (y_r - y_p)v_{ry} + z_r v_{rz})^2}{((x_r - x_p)^2 + (y_r - y_p)^2 + z_r^2)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (7)$$

下面结合仿真分析多普勒中心频率、多普勒调频率在不同情况下的空间分布情况。由图 3 可知,在导弹的平飞阶段,多普勒中心频率沿着雷达视线方向变化缓慢,而在沿航线方向变化明显,这表明沿视线方向斜距的变化对斜视角的影响很小,而航向斜距的变化对斜视角影响很大。同时调频率由于受到速度和加速度同时影响,与二者在视线方向的投影有很大关系,因此同样在航向表现出了明显空变。

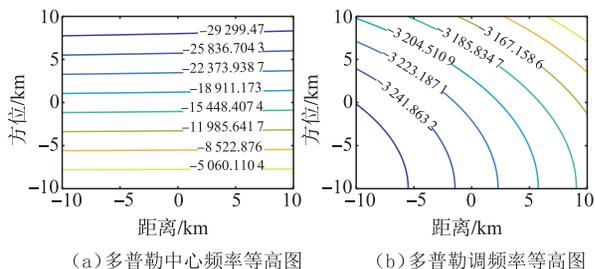


图 3 接收机 1 的多普勒特性

图 4~6 为俯冲阶段的多普勒中心频率、多普勒

调频率分布情况。在导弹俯冲前视阶段,由于距离向和方位向耦合严重,多普勒中心和调频率在二维空间的变化明显并且都不均匀。当斜视角比较小,如接收机 3,多普勒中心频率的变化较明显,而多普勒调频率变化相对较小;当斜视角比较大,如接收机 2 和接收机 4,多普勒中心频率的变化较小,而多普勒调频率变化明显。对比接收机 2 和接收机 4,俯冲速度越大,多普勒调频率在二维空间的变化越明显。

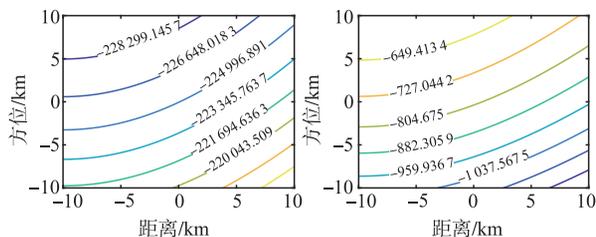


图 4 接收机 2 的多普勒特性

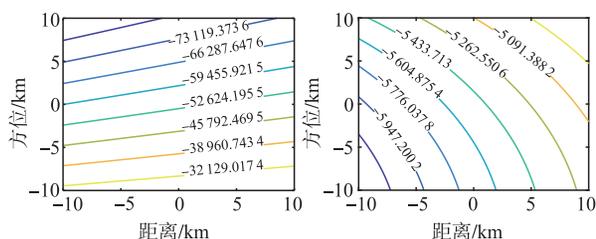


图 5 接收机 3 的多普勒特性

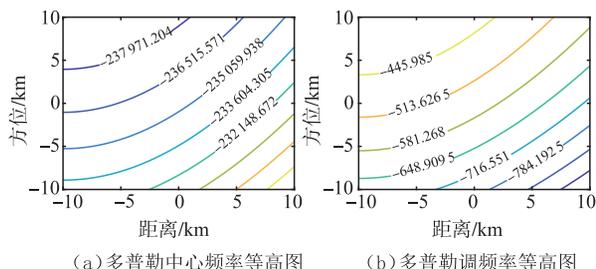


图 6 接收机 4 的多普勒特性

多普勒特性的改变将直接影响后续成像算法处理的效果,例如距离多普勒算法的二次距离压缩项对方位频率的依赖性强,在接收机处在 3,4 的状态下补偿效果会比较差。因此在导弹的不同飞行阶段应当选择最符合其特性的算法进行成像,否则相位误差补偿函数的偏差会比较大,残余相位会降低图像的分辨率。

## 3 空间分辨率分析

### 3.1 距离分辨率分析

在 SAR 系统中,雷达回波信号在距离向的分辨率一般指的是斜距分辨率,即脉冲压缩后的分辨率。然而双基地雷达收发斜距处在不同的方向,地距分辨率不能通过斜距分辨率简单的投影获得,因此需要重新分析。对于平坦地面上的点目标  $P$

$(x_p, y_p, 0)$ , 方位零时刻的瞬时斜距可以表示为:

$$R_p = \sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + z_t^2} + \sqrt{(x_r - x_p)^2 + (y_r - y_p)^2 + z_r^2} \quad (8)$$

等距离线在该点的梯度为:

$$\nabla R_p = \left[ \frac{\partial R_p}{\partial x_p}, \frac{\partial R_p}{\partial y_p}, 0 \right] \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{\partial R_p}{\partial x_p} = \frac{x_p - x_t}{\sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2 + z_t^2}} + \frac{x_p - x_r}{\sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2 + z_r^2}} \\ \frac{\partial R_p}{\partial y_p} = \frac{y_p - y_t}{\sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2 + z_t^2}} + \frac{y_p - y_r}{\sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2 + z_r^2}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_{d,p}}{\partial x_p} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \frac{v_{iy}(x_t - x_p)(y_t - y_p) + v_{iz}(x_t - x_p)z_t - v_{ix}(y_t - y_p)^2 - v_{ix}z_t^2}{(\sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2 + z_t^2})^3} + \frac{v_{ry}(x_r - x_p)(y_r - y_p) + v_{rz}(x_r - x_p)z_r - v_{rx}(y_r - y_p)^2 - v_{rx}z_r^2}{(\sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2 + z_r^2})^3} \right] \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_{d,p}}{\partial y_p} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \frac{v_{ix}(x_t - x_p)(y_t - y_p) + v_{iz}(y_t - y_p)z_t - v_{iy}(x_t - x_p)^2 - v_{iy}z_t^2}{(\sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2 + z_t^2})^3} + \frac{v_{rx}(x_r - x_p)(y_r - y_p) + v_{rz}(y_r - y_p)z_r - v_{ry}(x_r - x_p)^2 - v_{ry}z_r^2}{(\sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2 + z_r^2})^3} \right] \quad (15)$$

因此,在合成孔径时间为  $T_s$  的情况下,方位分辨率可以表述为:

$$\rho_p = \frac{c}{T_s |\nabla f_d|} \quad (16)$$

### 3.3 仿真分析

下面通过仿真对不同运动情况下的距离分辨率和方位分辨率展开更具体的分析。图 7~10 分别为不同接收机参数下的分辨率分布情况。

通过仿真结果可以看出各种飞行情况下的距离分辨率随空间的变化量都比较小,而方位分辨率却不同。在斜视角比较小的情况下例如接收机 1、3,方位分辨率变化比较小,但如果斜视角比较大例如接收机 2、4,可以看到方位分辨率变化了 2 倍到 3 倍之多。而对比接收 2、4 可以发现俯冲速度从 300 m/s 变为 500 m/s 时,左上区域的方位分辨率从 5.6 m 变为 6.9 m,而右下区域的分辨率只是从 2.4 m 变为 2.7 m,变化很小。因此整个地面成像区域受俯冲速度的影响是不均匀的,应改变斜视角或通过改变所用卫星

可以看出地距分辨率与速度及加速度无关,可以表述为:

$$\rho_p = \frac{c}{B_r |\nabla R_p|} \quad (11)$$

式中:  $B_r$  为信号带宽。

### 3.2 方位分辨率分析

SAR 的方位分辨率指的是方位向上可被分辨出的 2 个最近的点目标之间的距离,它的表达式可以参考距离分辨率的分析方法,等多普勒线可以描述为:

$$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{|\mathbf{R}_t|} \langle \mathbf{v}_t, \mathbf{R}_t \rangle + \frac{1}{|\mathbf{R}_r|} \langle \mathbf{v}_r, \mathbf{R}_r \rangle \right) = f_d \quad (12)$$

等多普勒线在该点的梯度为:

$$\nabla f_{d,p} = \left[ \frac{\partial f_{d,p}}{\partial x_p}, \frac{\partial f_{d,p}}{\partial y_p}, 0 \right] \quad (13)$$

其中:

改变双基构型的方法尽量使关注的目标处在受速度影响较小的区域里。

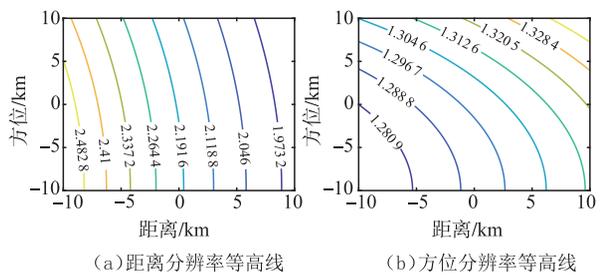


图 7 接收机 1 的空间分辨率

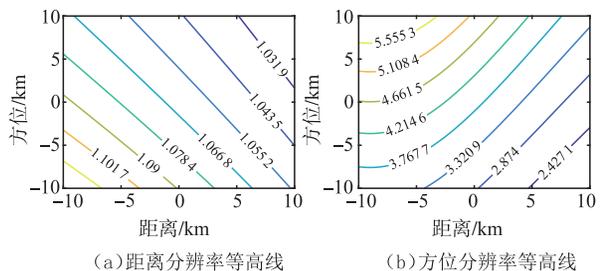
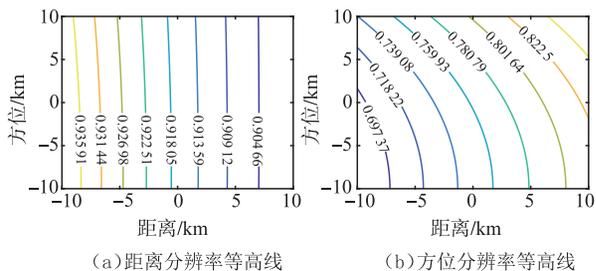
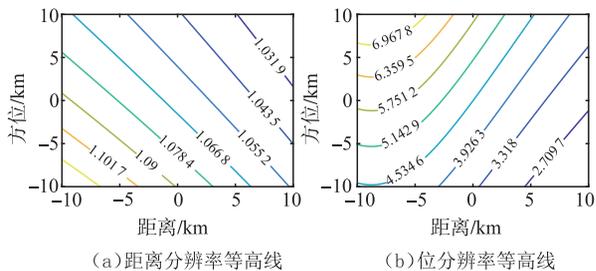


图 8 接收机 2 的空间分辨率



(a)距离分辨率等高线 (b)方位分辨率等高线

图9 接收机3的空间分辨率



(a)距离分辨率等高线 (b)方位分辨率等高线

图10 接收机4的空间分辨率

### 4 结语

对于 MEO 星弹双基 SAR, 本文基于卫星轨迹、接收平台机动性等影响, 考虑到 MEO 星弹 BiSAR 系统是异构且移变的, 导弹在飞行过程还存在不同状态的变化, 因此重新分析了这种任意构型下的双基参数, 构建了更为合理的斜距模型, 分析了一定孔径时间内的斜距误差, 并通过仿真验证了模型的有效性。分析多普勒特性的二维分布, 进一步重点描述了不同情况下的分辨率随成像区域的变化情况, 并分析了其与斜视角、俯冲速度之间的关系。

### 参考文献

[1] CUMMING I G, WONG F H. Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. London: Artech House, 2004.

[2] 朱桐, 周珊珊. SAR 成像模式发展综述[J]. 电子科技, 2016, 29(5): 187-189, 186.

[3] 杨建宇. 双基地合成孔径雷达技术[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 482-501.

[4] SUN G C, XING M, YONG W, et al. A 2-D Space-Variant Chirp Scaling Algorithm Based on the RCM Equalization and Subband Synthesis to Process Geosynchronous SAR Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8):

4868-4880.

[5] LI T, CHEN K S, JIN M. Analysis and Simulation on Imaging Performance of Backward and Forward Bi-static Synthetic Aperture Radar[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1676.

[6] GUO P, JIAO X, WANG A, et al. Space-Missile Borne Bistatic SAR Geometry and Imaging Properties Analysis[C]// 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE Press, 2019: 2917-2920.

[7] QIU T, HONG J, WANG Y, et al. MEO-SAR In-orbit Elevation Antenna Pattern Determination Using Nano Calibration Satellite[C]// 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 278-282.

[8] MATAR J, LOPEZ-DEKKER P, KRIEGER G. Potentials and Limitations of MEO SAR[C]// Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Hamburg, Germany: VDE, 2016: 1-5.

[9] SAEEDI J. Feasibility Study and Conceptual Design of Missile-Borne Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Systems, 2017, 50(3): 1122-1133.

[10] XU F, HUANG Y, ZHANG Y, et al. Two Dimensional Resolution Equalization Method in Image Domain for Airborne Multi-static SAR[C]// 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Xiamen, China: CIE, 2019: 1-4.

[11] WAHAB A, HUSSAIN K, AHMED H, et al. CIE, A Novel Bistatic-SAR Simulation-Based on Fixed Receiver[C]// 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC). Bahawalpur, Pakistan: IEEE, 2020: 1-5.

[12] CARDILLO G P. On the Use of the Gradient to Determine Bistatic SAR Resolution[C]// Antennas & Propagation Society International Symposium. Dallas, USA: IEEE, 1990: 1032-1035.

[13] MOCCIA A, RENGA A. Spatial Resolution of Bistatic Synthetic Aperture Radar: Impact of Acquisition Geometry on Imaging Performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(10): 3487-3503.

(编辑: 徐敏)