doi:10.11887/j.cn.201702011　　http://journal.nudt.edu.cn

星机双基地合成孔径雷达方位向成像性能分析*

闫飞飞,常文革,黎向阳,张启雷
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙　410073)

摘　要:星机双基地合成孔径雷达系统中,由于收发平台运动速度差异较大,因此需要对收发波足(波足是指波束在地面的投影)的运动速度进行合理的设置,减小收发波足速度差,尽可能地提高收发波足覆盖范围和时间,进而实现高分辨率、大方位场景成像。根据收发波足覆盖时间的相互关系,分析收发波足共同覆盖范围内的方位向成像性能。分析收发波足方位向位置偏移对方位向成像性能的影响,从而对星机双基地合成孔径雷达系统的波束同步精度提出要求。仿真结果表明,所提出的方法能够很好地分析收发波足同步误差对成像性能的影响,能够为星机双基地合成孔径雷达系统设计提供重要参考。

关键词:星机双基地合成孔径雷达;波足覆盖时间;成像性能;波足偏移
中图分类号:TN957　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2017)02-078-06

Analysis of coverage and integration time in spaceborne/airborne bistatic synthetic aperture radar configurations

YAN Feifei, *CHANG Wenge*, *LI Xiangyang*, *ZHANG Qilei*
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Due to the big difference between the velocities of the transmitter and the receiver, the working mode should be reasonably designed to realize high resolution and extended scene in SA-BiSAR (spaceborne/airborne bistatic synthetic aperture radar system). Based on the ratio of the beam width to the velocity, a scheme for the computation of integration time and azimuth coverage of SA-BiSAR was described. A classification of bistatic SAR(synthetic aperture radar) configurations was introduced in terms of the antenna footprints′ size and the velocities. At the same time, accurate effect of the initial footprints offset on the image performance in azimuth direction was obtained. Simulation results validate that the proposed method can be well used for footprint synchronization error analysis and SA-BiSAR system design.

Key words: SA-BiSAR; footprints′ integration time; image performance; initial footprints offset

星机双基地合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是近年来快速发展的一种新体制空间对地观测技术,它以星载 SAR 系统为照射源,通过搭载于机载平台上的接收机接收星载 SAR 地面散射信号,进而获取观测场景的成像结果。该系统具有安全性好、成本低、机动灵活等优点,具有广阔的应用前景。

在星机双基地 SAR 中,收发波足相对运动主要影响双站 SAR 的方位向成像性能,因此本文主要分析收发波足相对运动对星机双基地 SAR 方位向成像性能的影响。由于收发平台速度差异较大,假设收发平台均工作在传统的条带模式,经过计算,收发平台波束重叠时间一般小于 1 s。在这么短的时间内,方位向有效成像宽度只有几十米。因此,提高收发波足的有效重叠时间,进而提高系统方位向成像宽度是星机双基地 SAR 波束同步技术需要解决的关键问题[1]。

为了改善方位向成像性能,已有不少学者提出了多种方案。文献[2-4]提出了一种基于双向滑动聚束式的波束同步方案。该方法通过控制收发平台波束指向,使卫星工作在滑动聚束模式,接收波束工作在反向滑动聚束模式,从而减小收发波足之间的波束差,提高收发波足的重叠时间,进而增加方位向成像宽度。但该方法对于收发波足方位向位置的假设较为理想,未考虑收发波足方位向位置偏移对成像性能的影响。文献[5-7]介绍了德国航空航天中心(Deutsches zentrum fr Luft-und Raumfahrt, DLR)开展了一系列星机双站 SAR 实验,通过使卫星工作在滑动聚束模式,接收机工作在条带或反向滑动聚束模式,提高了

* **收稿日期**:2015-08-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501477,61201329)
作者简介:闫飞飞(1986—),男,河南新蔡人,博士研究生,E-mail:ddx_yff@163.com;
常文革(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:changwenge@nudt.edu.cn

星机双基地 SAR 方位向成像性能。但对于收发波足运动参数的设计及收发波足方位向位置偏移对成像性能的影响没有进行相应的分析。文献[8 -9]提出了卫星宽波束/飞机反向滑动聚束式、双宽波束式以及宽波束接收模式。这几种工作模式有些假设条件太理想难以实现,如卫星宽波束。同时未考虑波足方位向位置偏移对成像性能的影响。总的来说,上述研究结果没有定量地分析收发波足参数对成像性能的影响,且未考虑收发波足方位向位置偏移对成像性能的影响。

由于卫星波足距离向宽度一般远大于接收波足距离向宽度,因此,本文假设收发波足距离向不存在偏移,下文中的波足位置偏移均指收发波足方位向位置偏移。首先分析了收发波足在位置偏移为零的情况下,收发波足覆盖时间对方位向成像性能的影响。随后分析了收发波足位置偏移对成像性能的影响。最后通过仿真,对上述研究内容进行了验证。

1　星机双基地 SAR 系统模型

星机双基地 SAR 系统如图 1 所示。

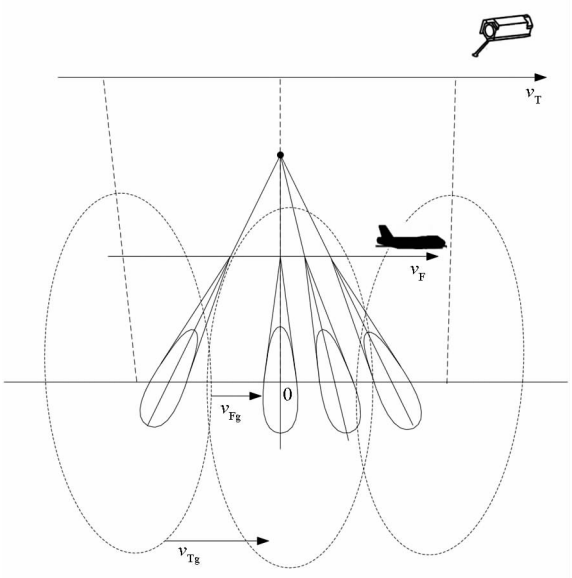


图 1　星机双基地 SAR 波足示意图

Fig. 1　Footprints in SA-BiSAR

设星载雷达方位向波足宽度为 D_s,速度为 v_{Tg};机载接收波足方位向宽度为 D_f,波足速度为 v_{Fg},收发平台及收发波束运动方向均相同。为了分析方便,下文假设星载雷达方位向波足宽度大于机载接收波足宽度,即 $D_s > D_f$,接收波足速度小于卫星波足速度,即 $v_{Fg} < v_{Tg}$。收发波足运动方向与收发平台运动方向相同。

2　性能分析

2.1　信噪比分析

与星载单站 SAR 相比,星机双基地 SAR 散射波接收机距离目标区较近,因此接收机的信噪比较大。假设对于相同 RCS 的地面目标,星机双基地 SAR 接收到的信噪比 SNR_{bi} 与星载单站 SAR 接收到的信噪比 SNR_{mo} 的比值可以表示为:

$$\mu = \frac{SNR_{\mathrm{bi}}}{SNR_{\mathrm{mo}}} = \frac{G_r R_t^2}{G_t R_r^2} \tag{1}$$

实际上,目标雷达横截面(Radar Cross Section, RCS)与电磁波入射角和后向散射角紧密相关。由雷达手册[10]可知,对于低掠射角情况,如果单基地散射系数模型为 $\sigma_M^0 = \gamma\cos\theta_i$(其中,$\sigma_M^0$ 为单基地面目标散射系数;θ_i 为单基入射角;γ 为归一化反射系数,一般对于农田,γ 约为 -15 dB,对于树林,γ 约为 -10 dB),那么,双基地 SAR 系统面散射模型表达式(吻合程度 3 dB 以内)为:

$$\sigma_B^0 = \gamma\,(\cos\theta_i\cos\theta_s)^{1/2} \tag{2}$$

其中:σ_B^0 为双基地面目标散射系数;θ_i 为入射角,即入射波束与地面法线之间的夹角;θ_s 为接收角,即接收波束与地面法线的夹角。

因此,双基地 SAR 接收到的散射信号能量与星载单站 SAR 接收到散射能量的比值可以近似表示为:

$$\sigma_{\mathrm{cs}} = \sqrt{\cos\theta_s / \cos\theta_i} \tag{3}$$

综上,星机双基地 SAR 较单站 SAR 信噪比优势为:

$$SNR_{\mathrm{sup}} = 10\lg(\mu) + 10\lg(\sigma_{\mathrm{cs}}) \tag{4}$$

对于表 1 中的仿真参数,接收机中心斜距为 60 km。经过计算,在该系统配置下,双基地 SAR 较单站 SAR 信噪比优势约为 12 dB,从而有利于场景回波的接收。

表 1　星机双基地 SAR 仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters in SA-BiSAR

参数	数值	参数	数值
卫星 中心斜距	726 km	接收机 中心斜距	60 km
发射机增益	41 dB	接收机增益	40 dB
卫星 波束宽度	0.33°	接收机 波束宽度	2.5°
卫星 波足速度	7.6 km/s	接收天线 扫描范围	±15°

2.2 方位向分辨率分析

星机双基地 SAR 方位向分辨率 $\rho_{\mathrm{az,bi}}$ 满足如下关系[7,11]：

$$\rho_{\mathrm{az,bi}}=\frac{\lambda}{\zeta_{\mathrm{int}}}\frac{1}{\dfrac{v_{\mathrm{T}}\cos^2\theta_{\mathrm{Ts}}}{R_{\mathrm{T0}}}+\dfrac{v_{\mathrm{F}}\cos^2\theta_{\mathrm{Rs}}}{R_{\mathrm{R0}}}} \tag{5}$$

其中，λ 为波长，θ_{Rs} 为收发波足中心照射时刻目标点对应的接收天线斜视角，R_{R0} 为目标与接收天线的中心斜距，θ_{Ts} 为收发波足中心照射时刻卫星天线斜视角，R_{T0} 为目标与卫星的中心斜距，ζ_{int} 为收发波足共同覆盖时间。在收发站几何配置确定的情况下，方位向分辨率由合成孔径时间决定。而方位向合成孔径时间随着收发波足共同覆盖时间的大小而变化。

2.3 方位向成像宽度分析

收发波足相对运动如图 2 所示。以接收波足左边沿为方位向零点，波足运动方向为正方向。根据收发波足覆盖时间的相互关系[12-13]，收发波足共同覆盖范围内的点目标合成孔径时间可以分为如下两种情况：

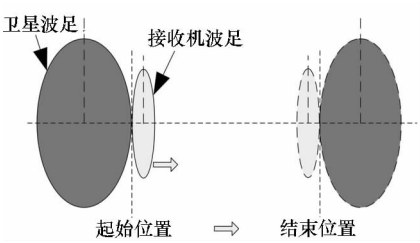


图 2 收发波足示意图

Fig. 2 Transmitter and receiver footprints

1）$D_s/v_{\mathrm{Tg}}\leqslant D_f/v_{\mathrm{Fg}}$。当卫星波足覆盖时间小于接收波足覆盖时间时，对于经历收发波足共同覆盖的场景区域中的点目标 P 来说，由于卫星波足通过目标 P 的时间小于接收波足通过目标 P 的时间，目标 P 的合成孔径时间由卫星波足覆盖目标的时间长度决定。设某目标点的坐标为 y，则卫星波足覆盖该目标的起止时刻分别为 y/v_{Tg}，$(y+D_s)/v_{\mathrm{Tg}}$。在该时间段内，接收波足也必须始终覆盖该点目标，才能使目标点经历完整的卫星波足覆盖时间。此时需要满足下列条件：

$$\begin{cases}\left|\left(\dfrac{D_f}{2}+v_{\mathrm{Fg}}\cdot\dfrac{y}{v_{\mathrm{Tg}}}\right)-y\right|<\dfrac{D_f}{2}\\ \left|\left(\dfrac{D_f}{2}+v_{\mathrm{Fg}}\cdot\dfrac{y+D_s}{v_{\mathrm{Tg}}}\right)-y\right|<\dfrac{D_f}{2}\end{cases} \tag{6}$$

对式(6)中的不等式进行求解，可以得到经历完整卫星波足覆盖时间的方位向目标范围 $[y_{\min},y_{\max}]$，进而得到经历完整卫星波足覆盖时间的方位向场景宽度为：

$$L_A=y_{\max}-y_{\min}=\frac{D_f v_{\mathrm{Tg}}-D_s v_{\mathrm{Fg}}}{v_{\mathrm{Tg}}-v_{\mathrm{Fg}}} \tag{7}$$

2）$D_s/v_{\mathrm{Tg}}>D_f/v_{\mathrm{Fg}}$。在这种情况下，目标点的合成孔径时间由接收波足覆盖目标的时间长度决定。设某点目标的坐标为 y，则接收波足覆盖该目标的起止时刻分别为 y/v_{Fg}，$(y+D_f)/v_{\mathrm{Fg}}$。在该时间段内，卫星波足也必须始终覆盖该点目标，才能使目标点经历完整的接收波足覆盖时间。此时需要满足下列条件：

$$\begin{cases}\left|\left(\dfrac{D_s}{2}+v_{\mathrm{Tg}}\cdot\dfrac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right)-y\right|<\dfrac{D_s}{2}\\ \left|\left(\dfrac{D_s}{2}+v_{\mathrm{Tg}}\cdot\dfrac{y+D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}\right)-y\right|<\dfrac{D_s}{2}\end{cases} \tag{8}$$

同理，对式(8)中的不等式进行求解，可以得到经历完整接收波足覆盖时间的方位向目标范围 $[y_{\min},y_{\max}]$，从而可得经历完整接收波足覆盖的方位向场景宽度为：

$$L_A=y_{\max}-y_{\min}=\frac{D_s v_{\mathrm{Fg}}-D_f v_{\mathrm{Tg}}}{v_{\mathrm{Tg}}-v_{\mathrm{Fg}}} \tag{9}$$

2.4 收发波足位置偏移对成像性能的影响

对于星机双基地 SAR 系统，理想情况下，收发波足相对运动过程如图 2 所示。实际情况下，由于星历数据以及测量设备的误差，卫星波足的位置测量会存在误差[1,14]。以接收波足左边沿为方位向零点，定义收发波足位置偏移为发射波足右边缘的位置 ΔD。下面分析收发波足位置偏移对方位向成像性能的影响，如图 3 所示。

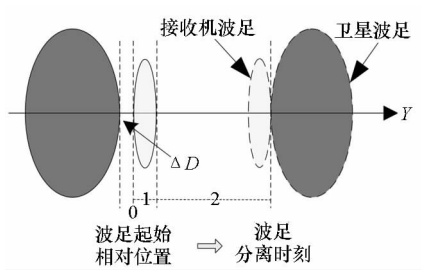


图 3 收发波足相对运动过程示意图

Fig. 3 Relative motion of footprints

设收发波足分离时刻接收波足右边缘为波足运动的最大距离 $y_{\max}$。根据收发波足位置偏移 ΔD 的大小，可以分为如下四种情况：

1）$\Delta D<0$。此时，对于接收波束扫描角范围内的点目标，根据点目标位置的不同，收发波足的照射起始时刻和结束时刻也不相同，根据收发波足相对运动过程，点目标的收发波足共同覆盖时间可以分为如下两种情况：

① $0 \leqslant y < D_f$。点目标的接收波足覆盖时间起始时刻均为零时刻,随着 y 的增加,覆盖时间逐渐增加。从而可以得到接收波足覆盖时间范围为 $[0, y/v_{\mathrm{Fg}}]$。卫星波足的覆盖时间范围为卫星波足前沿到达时刻和卫星波足后沿离开时刻,即 $\left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$。两者交集即为点目标的收发波足共同覆盖时间:

$$\left[0, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right] \tag{10}$$

② $D_f \leqslant y < y_{\max}$。点目标的接收波足覆盖时间范围为波足前沿到达时刻和波足后沿离开时刻,即 $\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right]$。卫星波足的覆盖时间范围为卫星波足前沿到达时刻和后沿离开时刻,即 $\left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$。两者交集即为点目标的收发波足共同覆盖时间:

$$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right] \tag{11}$$

综上,$\Delta D < 0$ 时,不同点目标位置对应的收发波足共同覆盖时间如表 2 所示。

表 2　$\Delta D < 0$ 时,点目标收发波足共同覆盖时间

Tab. 2　Integration time when $\Delta D < 0$

目标点位置	收发波足覆盖时间
$0 \leqslant y < D_f$	$\left[0, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$
$D_f \leqslant y < y_{\max}$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s+|\Delta D|}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$

2) $0 \leqslant \Delta D < D_f$。当收发波足位置偏移满足 $0 \leqslant \Delta D < D_f$ 时,同理,对于接收波束扫描角范围内的点目标,根据点目标位置的不同可以分三种情况,如表 3 所示。

表 3　$0 \leqslant \Delta D < D_f$ 时,点目标收发波足共同覆盖时间

Tab. 3　Integration time when $0 \leqslant \Delta D < D_f$

目标点位置	收发波足覆盖时间
$0 \leqslant y < \Delta D$	$\left[0, \min\left(\frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right)\right]$
$\Delta D \leqslant y < D_f$	$\left[0, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$
$D_f \leqslant y < y_{\max}$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$

3) $D_f \leqslant \Delta D < D_s$。同理,对于接收波束扫描角范围内的点目标,根据点目标位置的不同可以分为如表 4 所示三种情况。

表 4　$D_f \leqslant \Delta D < D_s$ 时,点目标收发波足共同覆盖时间

Tab. 4　Integration time when $D_f \leqslant \Delta D < D_s$

目标点位置	收发波足覆盖时间
$0 \leqslant y < D_f$	$\left[0, \min\left(\frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right)\right]$
$D_f \leqslant y < \Delta D$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[0, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$
$\Delta D \leqslant y < y_{\max}$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y+D_s-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$

4) $\Delta D \geqslant D_s$。同理,根据接收波束扫描角范围内的目标点位置以及点目标位置的不同可以分为如表 5 所示四种情况。

表 5　$\Delta D \geqslant D_s$ 时,点目标收发波足共同覆盖时间

Tab. 5　Integration time when $\Delta D \geqslant D_s$

目标点位置	收发波足覆盖时间
$0 \leqslant y < \Delta D - D_s$	0
$\Delta D - D_s \leqslant y < D_f$	$\left[0, \min\left(\frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y-(\Delta D-D_s)}{v_{\mathrm{Tg}}}\right)\right]$
$D_f \leqslant y < \Delta D$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[0, \frac{y-\Delta D+D_s}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$
$\Delta D \leqslant y < y_{\max}$	$\left[\frac{y-D_f}{v_{\mathrm{Fg}}}, \frac{y}{v_{\mathrm{Fg}}}\right] \cap \left[\frac{y-\Delta D}{v_{\mathrm{Tg}}}, \frac{y-\Delta D+D_s}{v_{\mathrm{Tg}}}\right]$

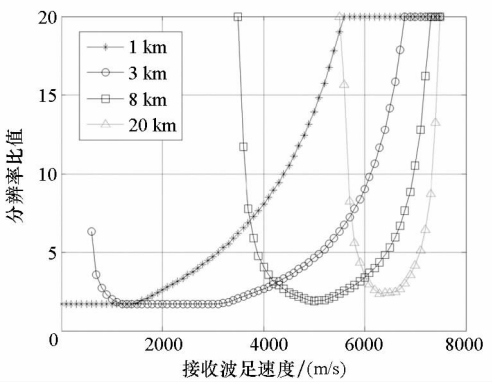
3　仿真分析

通过仿真对星机双基地方位向成像性能进行分析,仿真参数见表 1。为了定量分析双基地 SAR 系统的方位向成像性能,本文定义星机双基地 SAR 方位向分辨率与星载单站 SAR 方位向分辨率的比值为 ρ_{ratio},满足系统要求的某一 ρ_{ratio} 值的成像范围为方位向成像宽度 L_A。

3.1　方位向成像性能分析

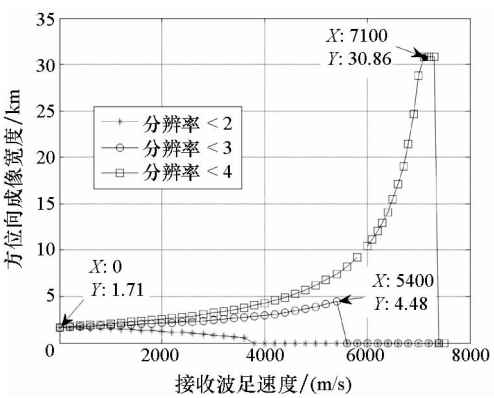
图 4 对不同位置点目标的分辨率比值 ρ_{ratio} 随着接收波足速度变化的分布进行分析。

图 4(a)为四个不同方位位置点目标的 ρ_{ratio} 分布曲线。从图 4(a)可以看出,对于不同方位位置的点目标,随着接收波足速度的增加,ρ_{ratio} 值的分布曲线也不相同。分别约束 ρ_{ratio} 的值不大于 2、



(a) ρ_{ratio}二维分布

(a) Two-dimensional distribution of ρ_{ratio}



(b) 成像宽度随波足速度变化曲线

(b) Image width varies with footprints velocity

图 4　方位向成像性能分析

Fig. 4　Image qualities in azimuth dimensional

3 和 4，图 4(b)为三种分辨率约束条件下，L_A 随着接收波足速度的变化趋势。当约束 ρ_{ratio} 的值不大于 2 时，从图 4(b)可以看出，此时随着接收波足速度的增加，方位向成像宽度逐渐减小；当接收波足速度为 0 时，L_A 值最大，约为 1.71 km。当约束 ρ_{ratio} 的值不大于 3 或 4 时，在一定的接收波足速度范围内，随着接收波足速度的增加，L_A 逐渐增加。当接收波足速度达到该范围最大值时，L_A 也达到最大值。当超过上述速度范围时，由于收发波足覆盖时间相对大小发生变化，导致方位向分辨率发生变化，不再满足系统对分辨率的约束条件，从而使得 L_A 急剧下降。例如当约束 ρ_{ratio} 的值不大于 4 时，接收波足速度变化范围约为[0,7200] m/s。当接收波足速度为 7200 m/s 时，L_A 达到最大值 30.86 km。当接收波足速度超过 7200 m/s 时，方位向成像分辨率不再满足系统要求，从而导致 L_A 急剧下降变为零。

综上，在不同 ρ_{ratio} 约束条件下，成像宽度随着接收波足速度的变化趋势而不同。因此，星机双基地 SAR 系统需要根据方位向成像分辨率的要求，合理设置接收波足的运动速度，从而尽可能地增加方位向成像宽度。

3.2　收发波足位置偏移对方位向成像性能分析

约束 ρ_{ratio} 的值不大于 4，通过仿真分析不同接收波足速度的情况下，收发波足位置偏移对方位向成像宽度的影响。

图 5 为接收波足速度分别为 100 m/s，5000 m/s及 7000 m/s 时，随着收发波足位置偏移的变化，方位向成像宽度的变化曲线。横坐标对应 ΔD，纵坐标为方位向成像宽度。从图 5 可以看出，在不同的接收波足速度下，收发波足位置偏移对成像宽度的影响不同。例如，当 v_{Fg} = 5000 m/s，收发波足位置偏移满足 − 10 km < ΔD < 0 m 时，成像宽度均可达到 3.1 节所述的方位向最大成像宽度，约为 6.2 km。

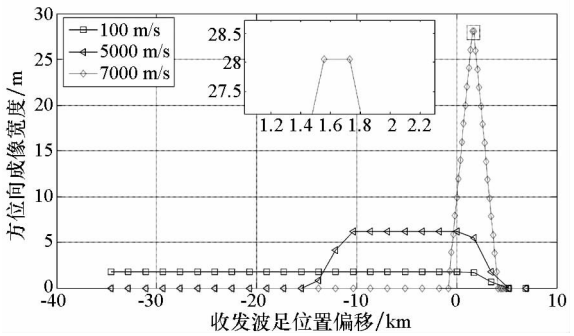


图 5　收发波足位置偏移对成像宽度的影响

Fig. 5　Influence of footprints offset on image width

因此，在系统方位向成像性能的约束条件下，星机双基地 SAR 系统需要根据接收波足速度的不同，采取相应的同步措施，使得收发波足位置偏移控制在同步误差容限范围之内，从而尽可能消除收发波足位置偏移对方位向成像宽度的影响。

同时，从图 5 可以看出，当 v_{Fg} = 7000 m/s，ΔD = 0 m 时的方位向最大成像宽度(10 km)远小于 ΔD = 1.6 km 时的方位向最大成像宽度(28.83 km)。也就是说，当收发波足速度较为接近时，为了尽可能提高方位向成像宽度，收发波足方位向位置必须要有一定的偏移。

4　结论

本文对星机双基地 SAR 系统方位向成像性能进行了分析。当收发波足宽度及速度比值不同时，方位向最优分辨率及成像宽度也不同。本文对收发波足宽度及速度比值不同情况下的成像性能进行了分析。同时分析了收发波足位置偏移对方位向成像性能的影响。星机双基地 SAR 系统需要根据不同的收发波足运动参数，采取相应的

同步措施,使得收发波足方位向位置偏移控制在相应的距离容限范围内,从而尽可能降低收发波足位置偏移对方位向成像宽度的影响。本文仅对收发波足方位向位置偏移对成像性能的影响以及双基地 SAR 系统对收发波足方位向位置偏移的容限进行了分析,但如何实现收发波足位置的实时检测及同步,是星机双基地 SAR 系统,尤其是非合作星机双基地 SAR 系统需要解决的关键问题。

参考文献(References)

[1] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506 – 520.

[2] Gebhardt U, Loffeld O, Nies H, et al. Bistatic spaceborne/airborne experiment: geometrical modeling and simulation[C]// Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, America, 2006: 1832 – 1835.

[3] Gebhardt U, Loffeld O, Nies H, et al. Bistatic spaceborne/airborne hybrid experiment: basic consideration [C]// Proceedings of SPIE International Symposium on Remote Sensing, Brugge, Belgium, 2005: 479 – 488.

[4] Ender J H G. The double sliding spotlight mode for bistatic SAR[C]//Proceedings of International Radar Symposium, Cologne, Germany, 2006.

[5] Walterscheid I, Espeter T, Brenner A R, et al. Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR – X: setup, processing, and image results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(8): 3268 – 3279.

[6] Rodriguez-Cassola M, Baumgartner S V, Krieger G, et al. Bistatic TerraSAR-X/F-SAR spaceborne-airborne SAR experiment: description, data processing, and results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 781 – 794.

[7] Walterscheid I, Espeter T, Ender J H G. Performance analysis of a hybrid bistatic SAR system operating in the double sliding spotlight mode [C]//Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 2144 – 2147.

[8] 周鹏, 皮亦鸣. 一种实用化的星机双站 SAR 空间同步方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1312 – 1315.
ZHOU Peng, PI Yiming. A practical method for spatial synchronization spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(6): 1312 – 1315. (in Chinese)

[9] 周鹏, 皮亦鸣. 星机双站 SAR 的两种波束同步方法[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1192 – 1197.
ZHOU Peng, PI Yiming. Two methods for beam synchronization in spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1192 – 1197. (in Chinese)

[10] 周万幸, 马林, 胡明春, 等. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
ZHOU Wanxing, MA Lin, HU Mingchun, et al. Radar handbook [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)

[11] Zeng T, Cherniakov M, Long T. Generalized approach to resolution analysis in BiSAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2005, 41(2): 461 – 474.

[12] Moccia A, Salzillo G, Errico M D, et al. Performance of spaceborne bistatic synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2005, 41(4): 1383 – 1395.

[13] Nico G, Tesauro M. On the existence of coverage and integration time regimes in bistatic SAR configurations [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(3): 426 – 430.

[14] Liu F F, Ding Z G, Zeng T, et al. Performance analysis of two-step algorithm in sliding spotlight space-borne SAR[C]// Proceedings of IEEE Radar Conference, 2010: 965 – 968.