

星机双基地 SAR 的两种波束同步方法

周 鹏^{1,2},皮亦鸣²

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院,山东东营 257061;2. 电子科技大学电子工程学院,四川成都 610054)

摘 要: 收发平台的波束同步是关系到星机双基地 SAR 能否具有实用价值的核心技术. 已有学者提出一种基于收发波束指向控制的同步方法,但原方法中所做的一些假设影响了其实用性. 本文给出了两种方法. 第一种方法去掉了原方法中所做的几条假设,给出了改进后的数学模型. 第二种方法充分利用系统“远发近收”的特点,采用宽波束照射,能在方位分辨率相等的前提下获得比第一种方法更长的场景长度. 分析了两种方法的优缺点及各自适用场合.

关键词: 星机双基地 SAR; 波束同步; 波束指向控制; 宽波束照射

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1192-06

Two Methods for Beam Synchronization in Spaceborne/ Airborne Hybrid Bistatic SAR

ZHOU Peng^{1,2},PI Yi-ming²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The biggest challenge in the development of spaceborne/airborne hybrid bistatic synthetic aperture radar, abbreviated as SA-BSAR in the text, is the beam synchronization of the antenna footprints. A method by performing beam steering on both sides has been reported in some published literature. There are, however, in the existing method, some assumptions that significantly limit its practicability. Two methods are given and validated. In the discussion of the first method, a modified mathematical model is presented to cancel those assumptions. The second method transmits a very wide beam in azimuth making use of the characteristic of the receiving distance in SA-BSAR is much shorter than the one in spaceborne SAR systems. The second approach provides, with the same azimuth resolution, a longer scene extension than the length achieved by the first approach. Advantages and disadvantages of each method are discussed and the applicable ranges for each method are also analyzed.

Key words: spaceborne/airborne hybrid bi-static SAR; beam synchronization; beam steering; wide-beam illumination

1 引言

双基地合成孔径雷达 (Bistatic Synthetic Aperture Radar, BSAR) 具有抗干扰、反隐身、隐蔽性强、目标信息获取能力强、可前视成像等诸多优点^[1],是目前微波成像领域的研究热点之一. 在 BSAR 中,照射源及接收平台的位置可以有多种选择. 其中,由卫星发射、飞机接收的配置形式 - 星机双基地 SAR 系统 (Spaceborne/ Airborne Hybrid Bi-static SAR, SA-BSAR), 具备独特的“远发近收”特点,具有较高的信噪比^[2,3]. 在未来雷达卫星星座的支持下,该系统有望将星载 SAR 的覆盖面大、安全性好和机载 SAR 的机动灵活、分辨率高等优点结合在一起.

由于卫星速度远快于飞机速度,收发平台的波束同

步是 SA-BSAR 的一大技术难点. U. Gebhardt 最早给出了一种方案(以下简称“U. Gebhardt 方法”),其核心思想是通过收发平台的波束指向控制增加成像区域的长度^[4]. 首先,发射平台工作于“滑动聚束式”^[5],目的是降低卫星波束足迹的速度. 然而,卫星天线的方位角通常只能在一个很小的范围内变化,使得发射平台保持滑动聚束式的时间只有几秒钟^[6,7]. 显然,如果飞机以条带式工作,则成像区域的长度将只有几百米. 为此,接收平台也必须实施波束指向控制,目的是加快飞机波束足迹的速度. 通过对发射波束的“追赶”,可使成像区域的长度达到 1 公里以上的量级^[6,7].

U. Gebhardt 方法存在着一些缺点. 第一,在文献[4, 6, 7]中均假设卫星沿直线匀速飞行、地球表面是平面、飞机与卫星平行飞行. 这些假设影响了该方法的实用

性.第二,为使方位分辨率不至过低,接收波束速度的提高倍数受到很大局限,造成场景长度相对较短.

为解决上述缺点,本文提出了两种方法.第一种方法(以下简称“方法1”)是 U. Gebhardt 方法的一种改进,通过考虑卫星运行在椭圆轨道、地球是椭球体、飞机与卫星可能不平飞等实际情况,使这种基于波束指向控制的方法更加实用化.第二种方法(以下简称“方法2”)的核心思想是通过卫星的宽波束照射,增加收发波束的重叠时间.由于波束重叠时间的提高,可使场景长度相比于 U. Gebhardt 方法有较大的提高.

2 基于波束指向控制的同步方法

2.1 U. Gebhardt 方法的误差分析

为简化分析,U. Gebhardt 方法忽略了地球表面的曲面效应.由于卫星距离地球远,这种假设将带来较大的误差.如图 1 所示,在 $t = 0$ 时刻(t 表示方位向时间),卫星和飞机的波束中心点本应同时指向同一理想位置,但由于地球表面的曲面效应,二者之间的偏离为:

$$D = \bar{R}_s - \bar{R}_a - (h_s \tan e_s - h_a \tan e_a) \quad (1)$$

式中, \bar{R} 为地球平均半径, s 为卫星-地心-卫星波束中心点间的夹角, a 为飞机-地心-飞机波束中心点间的夹角.设卫星高度 $h_s = 800\text{km}$,飞机高度 $h_a = 3\text{km}$,卫星波束视角 $e_s = 40^\circ$,飞机波束视角 $e_a = 60^\circ$,可计算出偏差为 $D = 34\text{km}$,这么大的偏差将使飞机波束足迹跑到卫星波束足迹以外.即便是在低入射角的条件下,虽然还不至于出现波束不能重叠的情况,但由于卫星波束是一个椭圆,二者的偏离也将造成波束重叠时间大大降低.

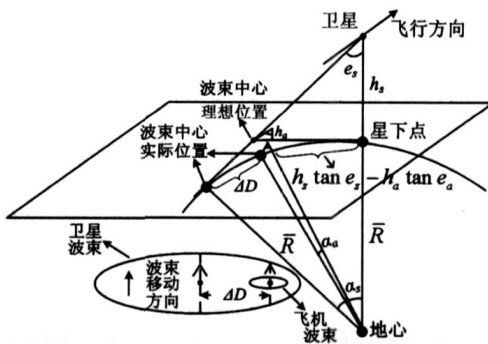


图1 U. Gebhardt方法的误差

2.2 改进后的数学模型

2.2.1 空间几何关系

由于要考虑卫星轨道的影响,宜在惯性地心坐标系下进行描述.但另一方面,还必须考虑地球自转的影响,为此,将卫星、目标和飞机三者统一到转动地心坐标系下最为方便.

为描述系统空间几何关系的方便,在转动地心坐标系中定义如下矢量:

因为要考虑地球曲率对系统的影响,地球模型采用椭圆地球模型.设 $[x_t, y_t, z_t]$ 是目标在转动地心坐标系中的位置,则有:

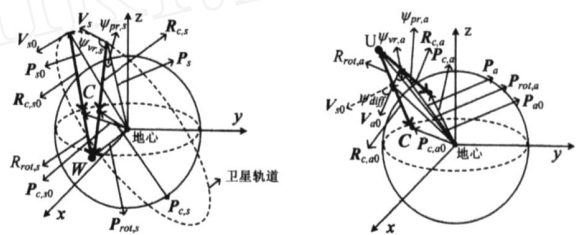
$$\frac{x_t^2 + y_t^2}{R_e^2} + \frac{z_t^2}{R_p^2} = 1 \quad (2)$$

式中, R_e 和 R_p 分别为地球的赤道半径和极半径.

2.2.2 收发波束指向的控制

对波束指向的控制是指对天线方位角和俯仰角的控制.对这两个角度的控制可转化为对图 2 中 $P_{s(a)}(\cdot)$ 与 $R_{c,s(a)}(\cdot)$ 间夹角 $\psi_{pr,s(a)}(\cdot)$ 、 $V_{s(a)}(\cdot)$ 与 $R_{c,s(a)}(\cdot)$ 间夹角 $\psi_{vr,s(a)}(\cdot)$ 的控制(注:为简化起见,上述符号的下标中, $s(a)$ 表示卫星或飞机,下文同).

对于 $P_s(\cdot)$ 及 $V_s(\cdot)$ 的计算,只要卫星轨道根数已知,就可以通过求解开普勒方程得到.对于 $P_a(\cdot)$ 及 $V_a(\cdot)$,则可通过飞机适宜的飞行路径得到.所以,接下来的关键是如何计算 $R_{c,s(a)}(\cdot)$.



(a) 卫星波束指向控制模型 (b) 飞机波束指向控制模型
图2 收发波束指向控制模型的示意图

在 $t = 0$ 时刻,设定收发天线处于正侧视状态且波束视角已知,则 $R_{c,s(a)}(0)$ 可通过与地球模型求交点计算得到.此时,若 $R_{rot,s(a)}$ 再已知,则转动中心点的位置矢量 $P_{rot,s(a)}$ 可由如下关系式确定:

$$P_{rot,s} = P_s(0) + [R_{rot,s} + |R_{c,s}(0)|] \cdot e_{r,s}(0) \quad (3)$$

$$P_{rot,a} = P_a(0) - R_{rot,a} \cdot e_{r,a}(0) \quad (4)$$

式中, $e_{r,s(a)}(0)$ 是 $R_{c,s(a)}(0)$ 对应的单位矢量.根据 $P_s(a)(\cdot)$ 和 $P_{rot,s(a)}$,通过与地球模型求交点可求出 $P_{c,s(a)}(\cdot)$. 即有:

$$\begin{cases} \frac{P_{s,x}(\cdot) - P_{c,s,x}(\cdot)}{P_{c,s,x}(\cdot) - P_{rot,s,x}} = \frac{P_{s,y}(\cdot) - P_{c,s,y}(\cdot)}{P_{c,s,y}(\cdot) - P_{rot,s,y}} \\ = \frac{P_{s,z}(\cdot) - P_{c,s,z}(\cdot)}{P_{c,s,z}(\cdot) - P_{rot,s,z}} \quad (5) \\ \frac{P_{c,s,x}^2(\cdot) + P_{c,s,y}^2(\cdot)}{R_e^2} + \frac{P_{c,s,z}^2(\cdot)}{R_p^2} = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{P_{rot,a,x} - P_{a,x}(\cdot)}{P_{a,x}(\cdot) - P_{c,a,x}(\cdot)} = \frac{P_{rot,a,y} - P_{a,y}(\cdot)}{P_{a,y}(\cdot) - P_{c,a,y}(\cdot)} \\ = \frac{P_{rot,a,z} - P_{a,z}(\cdot)}{P_{a,z}(\cdot) - P_{c,a,z}(\cdot)} \quad (6) \\ \frac{P_{c,a,x}^2(\cdot) + P_{c,a,y}^2(\cdot)}{R_e^2} + \frac{P_{c,a,z}^2(\cdot)}{R_p^2} = 1 \end{cases}$$

通过以上方程组求解出 $P_{c,s(a)}(\cdot)$ 后,即可利用下

式得到 $R_{c,s(a)}(\)$:

$$R_{c,s(a)}(\) = P_{c,s(a)}(\) - P_{s(a)}(\) \quad (7)$$

求出 $R_{c,s(a)}(\)$ 后,即可方便地计算出 $pr,s(a)(\)$ 和 $vr,s(a)(\)$:

$$\cos[pr,s(a)(\)] = \frac{-P_{s(a)}(\) \cdot R_{c,s(a)}(\)}{|P_{s(a)}(\)| \cdot |R_{c,s(a)}(\)|} \quad (8)$$

$$\cos[vr,s(a)(\)] = \frac{V_{s(a)}(\) \cdot R_{c,s(a)}(\)}{|V_{s(a)}(\)| \cdot |R_{c,s(a)}(\)|} \quad (9)$$

2.2.3 极限成像时间

由于机载 SAR 通常具有较强的波束指向控制能力,因此,系统可用于成像的时间为:卫星能保持在滑动聚束式下的“模式保持时间”和“波束重叠时间”中的较小值。

根据上述原则,可推导出极限成像时间为:

$$image,max(N) = \frac{D_{\alpha,s,mono} - D_{\alpha,a,mono}}{V_{F,s}(N) - V_{F,a}(N)} \cdot \frac{D_{\alpha,s,mono}}{V_{F,s}(N) - V_{F,a}(N)} \quad (10)$$

式中, N 表示飞机波束足迹速度相对于飞机平台速度的提高倍数, $D_{\alpha,s(a),mono}$ 表示星载(机载) SAR 方位向的波束足迹宽度, $V_{F,s(a)}$ 表示卫星(飞机)的波束速度. 其中, $V_{F,s(a)}$ 按如下关系式进行计算:

$$V_{F,s}(N) = \frac{V_s}{1 + \frac{R_{c,s}}{R_{rot,s}(N)}} \quad (11)$$

$$V_{F,a} = \frac{D_{\alpha,a,mono}}{\sqrt{\left(\frac{V_s}{R_{c,s}}\right)^2 + \left(\frac{V_a}{R_{c,a}}\right)^2 + 2 \cdot \frac{V_s}{R_{c,s}} \cdot \frac{V_a}{R_{c,a}} \cdot \cos \alpha_{diff}}} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (12)$$

式中, λ 为信号波长, α_{diff} 为收、发平台飞行航向间的夹角, α_c 为要求的方位分辨率, $R_{rot,s}$ 按下式计算:

$$R_{rot,s}(N) = \frac{V_s \cdot D_{diff,\alpha} + 2 \cdot N \cdot V_a \cdot \cos \alpha_{diff} \cdot R_{c,s} \cdot \tan \alpha_{max,s}}{2 \tan \alpha_{max,s} \cdot \sqrt{V_s^2 - N \cdot V_a \cdot \cos \alpha_{diff}}} \quad (13)$$

其中, $\alpha_{max,s}$ 为星载 SAR 方位向的最大波控角, $D_{diff,\alpha}$ 为飞机波束足迹在卫星速度方向的投影长度与卫星方位向波束足迹宽度之差。

3 基于宽波束照射的同步方法

3.1 信噪比分析

由于星机双基地 SAR 具有“远发近收”的特点,相比于星载 SAR 而言信噪比很高,因此卫星可采用宽波束照射提高波束重叠时间. 接下来推导在方位分辨率相等的前提下,为取得比方法 1 更长的场景长度,卫星波束所需展宽的最低倍数。

当卫星采用宽波束照射时,成像时间可按式进行计算:

$$image(N) = \frac{D_{\alpha,s}(N) - D_{\alpha,a,mono}}{V_s - V_{F,a}(N)} \cdot \frac{D_{\alpha,s}(N)}{V_s} \quad (14)$$

式中, $D_{\alpha,s}$ 表示展宽后的卫星波束足迹宽度. 要使式(14)对应的成像时间大于式(10)对应的时间,卫星波束的最低展宽倍数必须满足:

$$K_{min,s}(N) = \frac{D_{\alpha,s}(N)}{D_{\alpha,s,mono}} = \frac{V_s}{V_{F,s}(N) - V_{F,a}(N)} \quad (15)$$

接下来,我们从信噪比方面推导卫星波束的极限展宽倍数. 根据雷达方程,系统的信噪比可表示为:

$$SNR = \left(\frac{P_s}{4} \right)^3 \frac{G_s G_a}{R_{st}^2 R_{at}^2 k T_a F_a L_b} \cdot \frac{1}{R_{st} + R_{at}} \cdot \frac{c}{2 B \cos(\theta/2) \sin \theta} \quad (16)$$

式中, P_s 为发射信号的峰值功率, $G_{s(a)}$ 为卫星(飞机)天线增益, σ_b 为双基地归一化散射系数, ρ 为发射信号占空比, $R_{s(a),t}$ 为卫星(飞机)与目标间的距离, k 为玻尔兹曼常数, T_a 和 F_a 分别为机载接收机的噪声温度和噪声系数, L_b 为双基地系统损耗, c 为光速, B 为发射信号带宽, θ 为双基地角, θ_b 为双基地角角平分线对应的入射角. 设机载接收机允许的最低信噪比为 SNR_{min} , 则卫星波束的极限展宽倍数等于:

$$K_{max,s} = \sqrt{\frac{SNR}{SNR_{min}}} \quad (17)$$

上式取根号的原因主要是:星载 SAR 多采用分布式发射机,阵元数的减少将造成输出功率和天线增益的同时下降,因此波束展宽与信噪比下降呈平方关系. 此外,由于星载 SAR 的相控阵天线经常采用子阵结构,波束极限展宽倍数还受星载 SAR 方位向子阵数 $N_{subarray,s,\alpha}$ 的限制,显然有:

$$K_{max,s} \leq N_{subarray,s,\alpha} \quad (18)$$

式(17)和式(18)即为最终得到的用于确定卫星波束极限展宽倍数的计算公式。

得到最低及极限展宽倍数的计算公式以后,我们通过一些典型参数估算一下 $K_{min,s}$ 和 $K_{max,s}$ 的量级. 以 TerraSAR-X 卫星和 PAMIR 机载雷达的参数为例,卫星高度 $h_s = 515\text{km}$, 速度 $V_s = 7.6\text{km/s}$, 波束入射角 $\theta_s = 40^\circ$, 信号带宽 $B = 150\text{MHz}$, 信号波长 $\lambda = 3.1\text{cm}$, 天线增益 $G_s = 45\text{dB}$, 峰值功率 $P_s = 2.26\text{kW}$, 信号占空比 $\rho = 0.18$, 方位向天线尺寸 4.8m , 方位向最大操控角 $\alpha_{max,s} = 0.75^\circ$; 飞机高度 $h_a = 3\text{km}$, 速度 $V_a = 100\text{m/s}$, 波束入射角 $\theta_a = 60^\circ$, 天线增益 $G_a = 28\text{dB}$, 方位向波束宽度 3.3° , 方位向子阵数 $N_{subarray,s,\alpha} = 12$, 噪声温度 $T_a = 260\text{K}$, 噪声系数 $F_a = 5\text{dB}$, 最低信噪比 $SNR_{b,min} = 10\text{dB}$, 与卫星同向飞行(即: $\alpha_{diff} = 0^\circ$; 归一化散射系数 $\sigma_b =$

- 20dB, 系统损耗 $L_b = 4\text{dB}$. 将以上参数代入式(11) ~ (13), 式(15) ~ (18)可计算出:当方位分辨率分别设定为 1, 2, 3, 4, 5m 时, $K_{\min, s} = 6.3, 6.6, 6.9, 7.2, 7.6$, 而 $K_{\max, s} = 12$. 因此, 在方位分辨率相等的前提下, 有望使场景长度比方法 1 得到较大提高.

3.2 对系统其它指标的影响

在星载 SAR 中, 方位向天线尺寸与俯仰向天线尺寸、信噪比、测绘带、脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)等都有着密切联系. 例如:通过减小方位向天线尺寸使波束展宽后, 若要求信噪比不变, 则俯仰向天线尺寸必须增加, 从而导致测绘带减小;若波束展宽后, 允许信噪比降低, 测绘带可保持不变, 但由于多普勒带宽的增加可能会引起 PRF 选择的困难. 对于星机双基地 SAR, 情况会如何呢? 对于俯仰向天线, 由于允许信噪比降低到星载 SAR 的量级, 其尺寸可保持不变, 测绘带也相应不变, 这点与星载 SAR 的情况相同. 然而对于 PRF 的选择, 则有较大区别, 星机双基地 SAR 的 PRF 应满足^[8]:

$$B_{\alpha_c} \perp \cdot \left(\frac{V_s^2}{R_{st}} + \frac{V_a^2}{R_{at}} \right) \cdot \text{int} < \text{PRF} < \frac{1}{T_{dur} + p} \quad (19)$$

式中, B_{α_c} 为多普勒带宽, int 为合成孔径时间, T_{dur} 为整个测绘带对应的回波持续时间, p 为发射信号的脉冲宽度. 上式中的合成孔径时间 int 应取收、发波束扫过时间中更短的那一个. 在采用宽波束照射的情况下, 飞机波束的扫过时间要短一些(卫星速度 V_s 与飞机波束速度 $V_{F, a}$ 之比的典型量级在 10 倍左右, 而展宽后的卫星波束足迹宽度 D_{α_s} 与飞机波束足迹宽度 $D_{\alpha_a, mono}$ 之比的量级通常至少在 30 倍以上), 即有以下关系成立:

$$\text{int} = \min\left(\frac{D_{\alpha_s}}{V_s}, \frac{D_{\alpha_a, mono}}{V_{F, a}}\right) = \frac{D_{\alpha_a, mono}}{V_{F, a}} \quad (20)$$

根据上式, 卫星波束的展宽不会造成目标合成孔径时间的增加, 多普勒带宽将保持不变, 也就不会给 PRF 的选择造成困难.

4 仿真及结果

当系统采用不同波束同步方法时, 衡量系统性能高低的技术指标主要是在方位分辨率相等的前提下, 成像时间(t_{image})和场景长度(L_{scene})所分别能达到的量级.

表 1 描述空间几何关系的相关矢量

卫星相关矢量	含义	飞机相关矢量	含义
$P_s(\cdot)$	卫星位置	$P_a(\cdot)$	飞机位置
$R_{c, s}(\cdot)$	卫星波束指向	$R_{c, a}(\cdot)$	飞机波束指向
$P_{c, s}(\cdot)$	波束中心点位置	$P_{c, a}(\cdot)$	波束中心点位置
$V_s(\cdot)$	卫星速度	$V_a(\cdot)$	飞机速度
$P_{\alpha, s}$	波束转动中心点	$P_{\alpha, a}$	波束转动中心点

为使比较更有说服力, 选用了 SAR 系统中最常用

的 X、C、L 三个波段分别进行了仿真. 仿真过程中的参数如表 1 所示.

设定系统的方位分辨率分别为 1, 2, 3, 4, 5m, 收、发平台平行飞行, 代入式(12)可计算出对应的飞机波束速度 $V_{F, a}$. 三个波段的归一化散射系数分别设定为 -20dB, -20dB, -30dB, 接收机所允许的最低信噪比设定为 10dB. 将上述参数以及表 1 中的相关参数分别代入式(10)、式(11)、式(13)中, 可计算出利用方法 1 所获得的成像时间; 分别代入式(14)、式(16) ~ (18)中, 可计算出利用方法 2 所获得的成像时间. 得到成像时间以后, 可按式(21)计算场景长度:

$$L_{\text{scene}} = V_{F, a} \cdot t_{\text{image}} - D_{\alpha_a, mono} \quad (21)$$

最终的计算结果列于表 2 和表 3 中.

表 2 仿真过程中所采用的参数

参数	X 波段		C 波段		L 波段	
	Terra SAR-X	PAMIR	Envisat	PHARUS	Terra SAR-L	EMISAR
平台高度 (km)	515	3	800	3	645	3
平台速度 (km/s)	7.6	0.1	7.45	0.1	7.53	0.1
波束中心入射角 (°)	20-45	40-75	15-45	45-70	20-45	50-60
载波频率 (GHz)	9.65	9.65	5.331	5.331	1.2575	1.2575
发射功率 (kW)	2.26	1.28	2.3	0.96	4	6
系统损耗 (dB)	4	4	4	4	4	4
脉冲宽度 (μs)	45	45	25	25	35	35
脉冲重复频率 (kHz)	4	1.6	2	1	2	1
接收机噪声系数 (dB)	5	5	5	5	5	5
接收机噪声温度 (K)	260	260	260	260	260	260
信号带宽 (MHz)	150	1820	16	45	85	100
方位向波束宽度 (°)	0.33	3.3	0.29	2.3	1.1	10
方位向子阵数	12		10		10	
俯仰向波束宽度 (°)	2.3	10	2.2	24	4.2	42
方位向最大操控角 (°)	0.75	45	0.55	45	2	45

表 3 方法 1 所能获得的成像时间与场景长度的量级

方位分辨率	X 波段		C 波段		L 波段	
	成像时间 (s)	场景长度 (km)	成像时间 (s)	场景长度 (km)	成像时间 (s)	场景长度 (km)
$\alpha_c = 1\text{m}$	2.3 ~ 3	0.4 ~ 0.6	0 ~ 3.5	0 ~ 0.2	8 ~ 10.4	0 ~ 0.2
$\alpha_c = 2\text{m}$	2.4 ~ 3.2	1.2 ~ 2	2.7 ~ 3.5	0.3 ~ 0.5	8.2 ~ 10.5	0.95 ~ 1.3
$\alpha_c = 3\text{m}$	2.5 ~ 3.4	2 ~ 3.6	2.8 ~ 3.6	0.6 ~ 0.9	8.3 ~ 10.7	2 ~ 2.5
$\alpha_c = 4\text{m}$	2.7 ~ 3.7	2.8 ~ 5.5	2.8 ~ 3.7	1 ~ 1.3	8.5 ~ 10.8	2.9 ~ 3.8
$\alpha_c = 5\text{m}$	2.8 ~ 3.9	3.8 ~ 7.6	2.9 ~ 3.7	1.3 ~ 1.8	8.6 ~ 11	3.9 ~ 5

为使结果的比较更加直观, 选定方位分辨率分别为 2m(X 波段), 4m(C 波段), 2m(L 波段)的数据, 计算方法 2 相对于方法 1 在成像时间与场景长度上的提升倍数. 图 3 和图 4 给出了最终的计算结果. 从图中可看出:方法 2 相比于方法 1, 成像时间与场景长度均有较大提高. 以图 4 为例, 最理想处场景长度提高到约 3.5 倍(参见图 4(c)), 最差处也提高到了约 1.3 倍(参见图 4(a)).

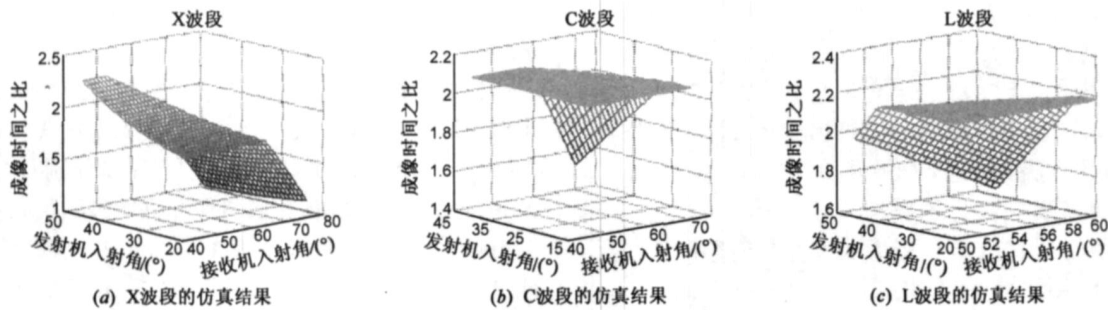


图3 两种方法成像时间的比较

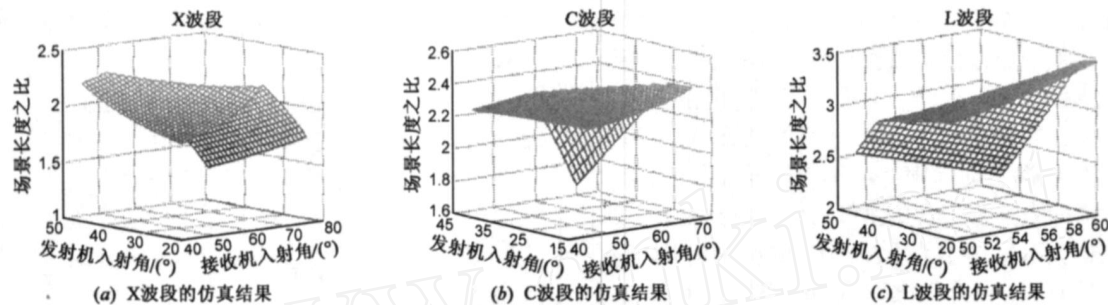


图4 两种方法场景长度的比较

从仿真结果可看出,方法2确实能在方位分辨率相等的前提下,获得比方法1更长的场景长度.但需指出的是,该方法也带来一个缺点,就是在星机成像过程中返回卫星的回波无法利用,因此在需要同时采集星载 SAR 图像和双基地图像的场景不能使用.

设定方位分辨率分别等于 1, 3, 5m, 将前面的参数代入式(19)、式(20)中,可计算出所允许的 PRF 选择范围.图5给出了最终的计算结果.从中可看出,PRF 确实有很大的可供选择范围.因此,卫星波束展宽后,不会

对系统 PRF 的选择造成困难.

表4 方法2所能获得的成像时间与场景长度的量级

方位分辨率	X波段		C波段		L波段	
	成像时间(s)	场景长度(km)	成像时间(s)	场景长度(km)	成像时间(s)	场景长度(km)
$\sigma = 1m$	3~6.5	0.6~1.5	5.3~7.3	0.3~0.5	16.9~20.9	0.8~1.4
$\sigma = 2m$	3.2~6.8	2~3.5	5.4~7.4	0.9~1.2	17.1~21.2	2.8~3.6
$\sigma = 3m$	3.4~7.1	3.6~5.7	5.5~7.5	1.5~2	17.4~21.5	4.7~5.9
$\sigma = 4m$	3.7~7.4	5.5~8.2	5.6~7.6	2.1~2.8	17.7~21.8	6.8~8.3
$\sigma = 5m$	4~7.7	7.5~10.9	5.7~7.7	2.7~3.6	18~22.1	8.9~10.8

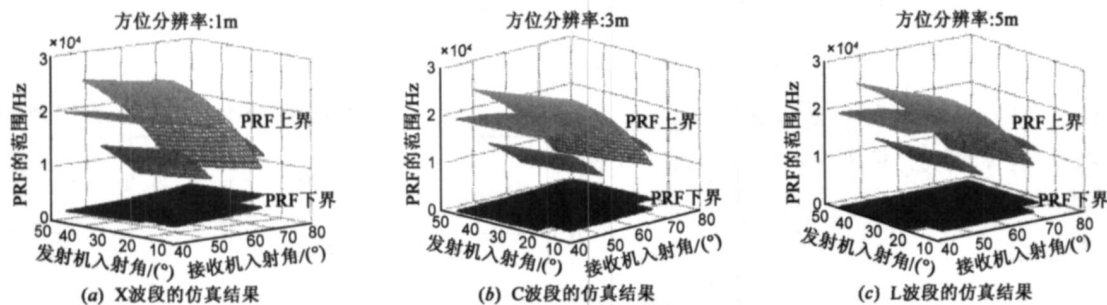


图5 PRF的适宜选择范围

5 结论

方法1去掉了U. Gebhardt方法中卫星沿直线匀速飞行、地球表面是平面、飞机与卫星平行飞行的三个假设条件,使这种基于波束指向控制的波束同步方法更加实用化.

方法2利用SA-BSAR“远发近收”的特点,通过宽波束照射,能在方位分辨率相等的前提下取得比方法1更长的场景长度.但由于降低了星载SAR的信噪比,该方法不能用在需同时采集星载SAR图像和双基地图像的场景.

在这种场合下,只能采用方法1.

参考文献:

[1] G Krieger, H Fiedler, A Moreira. Bi- and multi-static SAR: potentials and challenges [A]. EUSAR 2004 [C]. Ulm: VDE VERLAG GMBH, 2004. 365 - 370.
 [2] I Walterscheid, J Klare, A R Brenner, et al. Challenges of a bistatic spaceborne/airborne SAR experiment [A]. EUSAR 2006 [C]. Dresden: VDE VERLAG GMBH, 2006.
 [3] M Cherniakov, M Antoniou, R Saini, et al. Space-surface

- BSAR-analytical and experimental study [A]. EUSAR 2006 [C]. Dresden:VDE VERLAG GMBH,2006.
- [4] U Gebhardt ,O Loffeld ,H Nies ,et al. Bistatic airborne/ space-borne hybrid experiment :basic consideration [A]. SPIE International Symposium on Remote Sensing 2005 [C]. Brugge : SPIE Press ,2005. 479 - 488.
- [5] D P Belcher ,C J Baker. Hybrid strip-map /spotlight SAR [A]. IEE Colloquium on Radar and Microwave Imaging 1994 [C]. London :IEE Press ,1994. 2/ 1 - 2/ 7.
- [6] U Gebhardt ,O Loffeld ,H Nies ,et al. Bistatic airborne/ space-borne hybrid experiment :simulation and analysis [A]. EUSAR 2006 [C]. Dresden :VDE VERLAG GMBH ,2006.
- [7] U Gebhardt ,O Loffeld ,H Nies ,et al. Bistatic space borne/ airborne experiment :geometrical modeling and simulation [A]. I-GARSS 2006 [C]. Colorado :IEEE Press ,2006. 1832 - 1835.
- [8] O Loffeld ,H Nies ,U Gebhardt ,et al. Bistatic SAR-some reflections on Rocca 's smile [A]. EUSAR 2004 [C]. Ulm :VDE VERLAG GMBH ,2004. 379 - 383.

作者简介:



周 鹏 男,1976 年出生于甘肃,现工作于中国石油大学(华东)信息与控制工程学院,博士,研究方向为雷达信号处理。
Email :hdpuzp @sina. com



皮亦鸣 男,1968 年出生于贵州,现为电子科技大学教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,2005 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划。研究领域包括雷达信号处理、图像的传输与处理、导航定位技术等。

www.cnki.net