

双基地合成孔径雷达技术

杨建宇

(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

【摘要】双基地合成孔径雷达(SAR)系统的发射和接收装置承载于不同的平台,系统配置灵活多样,接收装置适装性强,电磁隐蔽性好,不仅能实现对地侧视成像,还能够实现前视成像,是SAR技术新的发展方向之一。由于双基SAR在几何构型、工作模式、分辨特性和应用领域等方面与传统单基SAR存在明显差异,在成像理论、系统组成、收发同步、参数估计、运动补偿、成像处理和试验验证等方面,双基地SAR也存在一系列新的理论、方法和技术问题。近年来,国际雷达界对这些问题开展了广泛深入的研究工作,获得了一些新的认识。该文拟从空间关系和物理概念角度,论述双基SAR成像原理、构型分类、应用特点、系统组成、性能参数、研究现状和发展趋势,简要分析双基SAR与单基SAR的异同,并对双基SAR未来的发展趋势做简要的展望。

关键词 双基; 成像试验; 成像原理; 合成孔径雷达

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.001

Bistatic Synthetic Aperture Radar Technology

YANG Jian-yu

(School of Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Bistatic synthetic aperture radar (SAR) is one of the recent developments of SAR technology. Its transmitting and receiving devices are mounted on different platforms, which brings flexibility for system configuration. In addition, the receiver is suitable for various platforms and electromagnetically concealing. Besides, it is capable of side-looking and forward-looking imaging. Due to the significant distinctions between bistatic SAR and monostatic SAR in observation configuration, working mode, resolution and application fields, new problems exist in the theory, methods and techniques of bistatic SAR, such as imaging theory, system configuration, bistatic synchronization, parameter estimation, motion compensation, imaging processing and experimental validation. In recent years, the radar communities have done extensive and profound researches toward these problems and new insights have been explored. In this review paper, the current research status and development perspective of the imaging theory, configuration classification, application characters, and performance parameters of bistatic SAR are analyzed. Then, the similarities and differences of bistatic SAR and monostatic SAR are briefly discussed and the future development perspective of bistatic SAR is envisioned.

Key words bistatic SAR; imaging experiment; imaging principle; SAR

自从1951年Carl Wiley提出“SAR成像”的概念后,SAR技术得到了很大的发展。该技术以其全天候、全天候、高分辨、多维度的对地观测成像能力,在民用和军用中已取得了广泛应用,是一种不可或缺的对地观测手段。目前已演化出多种不同的形态,而且这种演化仍在持续,以期获得新的能力,适应不同的应用需求。例如,从合成孔径的形态上看,由最初的直线状孔径演化出曲线状孔径和面状孔径,发展出了圆周SAR、曲线SAR以及层析SAR和阵列SAR等新的类别;从发射与接收的空间位置布局关系上看,由最初的收发同址同站的形态,演化

出了收发异址或分置的布局形态,发展出干涉SAR、分布式SAR和双(多)基SAR等新的类别。

双基SAR,即把传统单基SAR的收发站放置在两个不同的平台上。该类系统结合了双基雷达和SAR的优点,不但可以进行微波成像,还可以在发射站受到干扰的条件下成像,且可以完成干涉、地面动目标显示等功能。与单基SAR相比,双基SAR的优点主要包括:

1) 获取信息丰富

常规单基SAR图像所反应的是目标或地域的单向散射信息,双基SAR由于收发分置,可以通过对

目标区域的多角度观测, 获得同一目标不同方向的散射信息, 这些丰富的信息在地面目标双基散射特性研究、场景和目标特征提取、分类、识别、地面隐身目标探测等方面有着广泛的应用前景。

2) 隐蔽性、抗干扰性、抗截获性能好

双基SAR可以通过“远发近收”, 发射站在离目标区较远的区域工作, 而接收站由于工作在无源接收状态, 比较隐蔽, 有利于自身的保护。其次, 针对发射站的干扰, 并不能影响接收站工作, 因此, 这种体制具有良好的反侦察、抗干扰能力。“远发近收”模式工作的双基SAR可以有效减小发射机的发射功率, 提高自身的抗截获性能。

3) 成本低, 配置灵活

收发分置的特点使系统的研制成本可以分摊到若干个平台上来, 接收站不含高功率发射机, 体积和重量大幅度减小, 为使用体积较小、成本较低的小卫星、无人机作为搭载平台提供了可能。另外, 双基SAR可扩展到多基地, 利用不同平台的自由飞行, 获取目标区的SAR图像, 大大提高了平台的灵活性。

4) 使飞行器具备协同前视雷达成像能力

受机理限制, 传统单基SAR在前视成像区域上存在固有的盲区, 导致SAR技术在精确打击、自主着陆、物资空投等领域不能充分地发挥作用。双基SAR由于收发平台分离, 空间几何关系发生了不同于单基SAR的明显变化。采用适当飞行模式, 可以使地面等距离线和等多普勒线在接收站正前方地面形成近矩形分割。从而可以使飞机和导弹具备对地正前视高分辨成像能力, 对提高飞行器对海面精确目标的指示和打击能力具有重要的价值。

1 成像原理

双基SAR的发射与接收装置分别承载于不同的平台, 发射、接收与成像地域之间构成特定的三角关系, 不同于单基SAR中发射接收站与成像地域的简单连线关系。在双基SAR中, 影响空间分辨率的两个关键要素, 即地物回波的时间延迟和多普勒频移, 分别由发射站-地面和地面-接收站的两部分距离之和及两部分相对运动关系共同决定, 具有不同于单基SAR的特点。所以, 双基SAR在系统构型、系统组成、回波模型和成像处理上, 均存在不同于单基SAR的特殊问题, 而且也更加复杂。

1.1 基本原理

双基SAR发射和接收波束分别照射待成像地

域, 如图1所示。当成像地域与发射、接收平台的距离远大于发射与接收平台之间的距离时, 从成像地域观察到的发射、接收平台的视线夹角(即双基角)很小, 双基SAR成像几何关系与单基SAR十分接近, 系统等效相位中心(EPC)可粗略地确定为发射站和接收站的连线与双基角平分线的交点。这时, 双基SAR的成像原理可从等效相位中心、等效收发波束以及相应的斜距分辨和孔径合成来定性解释和理解。

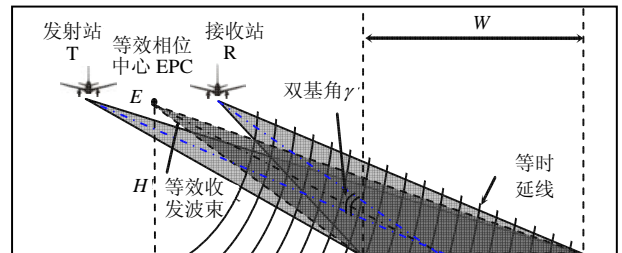


图1 双基SAR的几何构型

对于双基角较大的情况, 双基SAR的地物回波时间延迟和相位变化的形成过程, 虽然与单基SAR存在较大的差异, 但成像的基本原理仍是相似的。因此, 在物理概念上仍可从等效单基SAR的观点理解双基SAR, 即可利用宽带发射信号匹配滤波形成的窄脉冲解释收发距离和的分辨原理, 利用EPC相对于目标的观测视角变化合成孔径形成的窄波束解释方位向的分辨原理。

1.2 成像特点

SAR的几何构型、工作原理和工作频段, 使它获得的微波图像具有许多不同于光学图像的鲜明特征。这里从散射特性和明暗关系两个方面, 简要阐述双基SAR与单基SAR成像的异同。

1.2.1 散射特性

散射率分布函数本来是具有方向属性的, 即与入射方向和观测方向有关。单基SAR观测到的是后向散射率分布函数, 即观测方向位于入射方向; 而双基SAR观测到的是侧向散射率分布函数, 其观测方向一般不在入射方向, 如图2所示。

所以, 即使与单基SAR具有相同的发射站位置或接收站位置, 或等效相位中心位置, 双基SAR观测到的仍然是具有不同方向属性的散射率分布函数。这使得双基SAR可以获得不同于单基SAR的地物散射特征, 也有利于发现采用了后向散射隐身措施的地面隐身目标。基于同样的原因, 在单基SAR中会产生强烈回波的角反射器, 在双基SAR中并不构成强反射目标, 因为角反射器的绝大部分能量已

被反射到入射方向，即发射站方向，而在双基SAR接收站中，则几乎接收不到其散射能量。图3显示了单基SAR和双基SAR对同一地域的成像结果，可以看到它们之间的明显差异性。

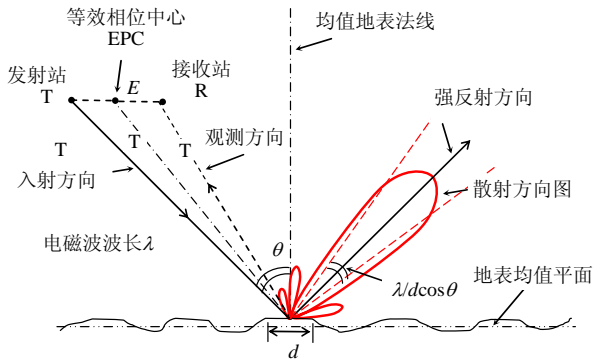


图2 粗糙地表及其双基散射特性

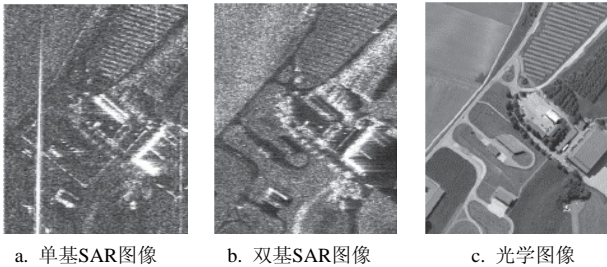


图3 单双基SAR图像明暗关系差异

1.2.2 明暗关系

SAR图像中的明暗关系与多种因素有关，除了入射和观测角度导致的散射特性差异外，还与地物电磁参数、地表粗糙度和地表坡度有关。地物的电磁参数会明显影响到地物对入射电磁波的吸收率和散射率，是影响SAR图像中景物明暗关系的重要因素。此外，地表粗糙度对SAR图像明暗关系有重要影响。从电磁散射理论角度看，尺度为 d 的光滑平

面，对于入射角为 θ 、波长为 λ 的电磁波，会产生不同方向、不同强度的散射，若 d 在 10λ 以上时，会形成具有明显方向性的散射方向图，其波束宽度为 $\lambda/d \cos\theta$ ，波束中心线位于该平面法向另侧对称的方向上，如图2所示。当观测方向偏离波束中心线的角度超过散射波束宽度时，接收站收到的是散射方向图的旁瓣散射能量，与波束中心线方向相比，已十分微弱。所以，只有那些法线指向雷达收发等效相位中心EPC的平面，能够在雷达接收站形成较强回波；一旦平面法线偏离EPC方向，被接收站捕获的散射能量将明显下降，而且平面尺度越大，下降就越快。

地表面无论光滑与否，在一定的观测尺度上均存在不同程度的起伏，具有不同的粗糙度。地表面可以看成是由许多不同坡度的小尺度(一般应在 10λ 以上)剖分平面连接形成，如图4所示。对于给定成像分辨单元，这些剖分面的法线指向各异，与起伏地表均值平面的法线方向存在不同程度的偏离。而接收站捕获的散射能量，主要来自那些法线指向收发等效相位中心的剖分面的贡献。从这个意义上讲，若双基SAR和单基SAR具有相同的等效相位中心位置和变化历程，就会得到明暗关系相近的成像结果。

从统计意义上讲，在同一成像分辨单元内，全体剖分面的法线指向呈概率分布形态，如4所示。其峰值位置通常出现在均值地表的法线方向，两侧呈下降趋势，下降的快慢与地表粗糙或光滑程度有关。水面、道路、跑道等相对平整光滑的地表，概率密度函数下降较快，方差较小；而农田、草地、树林等相对粗糙的地表，概率密度函数下降较慢，方差较大。

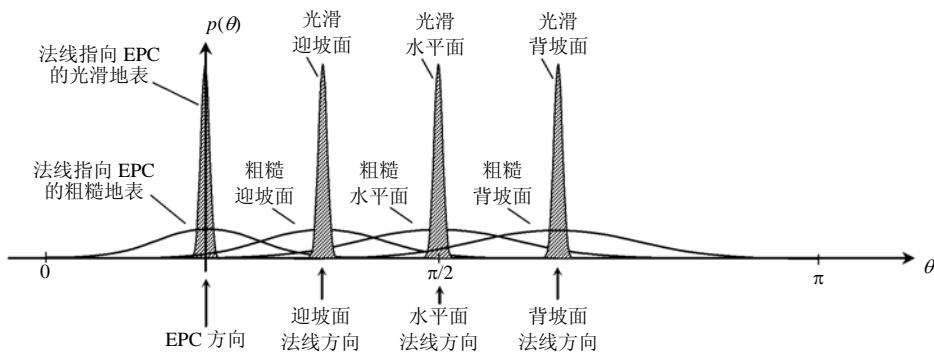


图4 不同坡度剖分面法线方向分布概率函数

1.3 分辨能力

在工程实践中，双基SAR的方位分辨和斜距分辨能力，均可以用大时带积线性调频信号的匹配滤

波产生的脉冲压缩效应进行准确解释。从直观的物理概念上，方位分辨能力也可以用收发天线在平台运动过程中形成的大天线阵列解释。但是，与单基

SAR不同, 双基SAR收发站具有各自独立的天线波束, 其合成孔径和方位分辨的定量表达式与单基SAR存在差异, 也更为复杂。为了简化分析, 可将双基SAR等效为位于等效相位中心的单基SAR系统构型。从而可用等效相位中心的运动形成的虚拟合成孔径, 来进行定性和直观地解释双基SAR的成像性能。这有利于对成像几何构型和不同地域的成像性能进行近似分析, 在工程应用中起宏观指导作用。

此外, 在双基SAR中, 等时延线与等多普勒线也是分析分辨能力的一个重要工具。

1.3.1 等时延线与地距分辨率

1) 等时延线

地面上散射点 P 产生的回波, 需要经过发射天线相位中心 T 到地面散射点 P , 再由散射点 P 到接收天线相位中心 R 的两段路径传播, 与信号发射时刻相比, 将产生时间延迟 τ , 其大小由光速 c 和两段距离之和 $r_{\Sigma} = r_T + r_R$ 决定, 即 $\tau = (r_T + r_R)/c$ 。

通常将地面上具有相同时延的点组成的集合称为等时延线。在双基SAR中, 等时延线是以基线端点 T 和 R 为焦点, 以基线方向为轴线的旋转椭球面与地平面的交线, 通常是一个椭圆, 如图5所示。

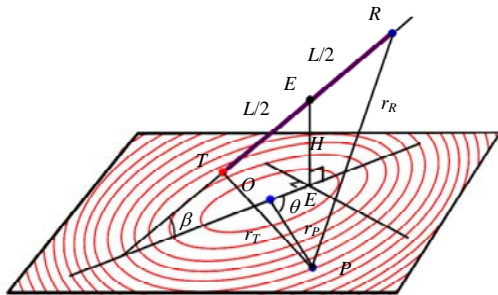


图5 收发基线与等时延环

等时延椭圆簇将沿基线投影线两侧对称分布, 而且, 在与 O 点渐远的方向上, 等时延线逐渐变得密集, 并由椭圆逐渐退化为圆形。在距离中心 O 点极远的地域, 等时延环间距达到最小值, 并由时延增量 $\Delta\tau$ 直接决定, 即 $c\Delta\tau/2$ 。

2) 地距分辨率

当增量 $\Delta\tau$ 取定为时延分辨率 ρ_{τ} 时, 地面等时延线间距将代表可分辨的最小地面间距, 即地距分辨率 ρ_g 。因此, 地面等时延线的疏密代表该地域的地距分辨能力大小, 等时延线越密集则地距分辨率越高。而地距最佳分辨方向位于等时延线法线方向, 所以, 地面等时延线的走向, 也决定了该地域的地距最佳分辨方向。

所以, 基线的高度、长度和倾角, 不仅决定了

地面上等时延线簇的分布(如特定地域的等值线的密度和走向), 而且在给定时延分辨率的条件下, 也会直接决定不同地域的地距分辨能力。从时延等值线分布规律可以看出, 不同地域的地距分辨率, 与该地域与等时延环中心的距离有关。远离环心的区域, 等时延线更加密集, 具有更好的地距分辨率。无限远处, 地距分辨率将逼近发射信号带宽决定的距离分辨率, 即 $\rho_g = c\rho_{\tau}/2 = c/2B_r$ 。由等时延环形成的地距分辨率, 对不同的地域并没有明显的方向性, 对于图5中的 θ 角呈现出各向同性的特点, 对于特定地域的成像分辨性能而言, 进行系统构型设计时, 基线投影的方向并不产生明显影响。

由于地面散射点回波沿等时延椭球面向成像面的投影, 时延分辨率 ρ_{τ} 和地距分辨率 ρ_g 之间存在与单基SAR类似的非线性效应。靠近环心的区域, 等时延线间隔非均匀性明显, 所获得的微波图像存在前述的“近距压缩”几何失真现象。而远离环心区域, 等时延线间隔则趋于均匀, 这种现象逐步减弱并逐渐消失。

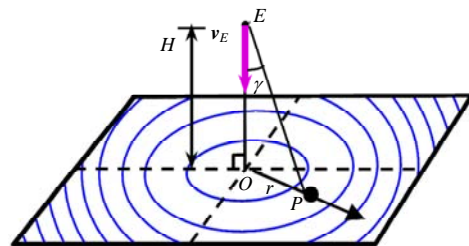
3) 成像模糊区

基线的高度、长度和倾角, 决定了 O 点的地面位置, 也会影响成像模糊区的位置。在同心环中心区, 若成像区包含有完整的等时延环, 环上不同位置的回波不能由时延差来分辨。而且无论怎样定义等效相位中心运动方向或合成孔径方向, 也会在环上出现多普勒频率相等的区域, 这两块区域回波也不能通过多普勒频率差异和多普勒历程差异来区分, 从而在图像域形成重影, 造成模糊现象。所以 O 点附近的区域是不可成像区。

1.3.2 等多普勒线与地距分辨率

1) 等多普勒线

如图6所示, 由于等效相位中心 E 点相对于地面运动, 会产生多普勒效应。地面上散射点 P 产生的多普勒频移 F_d , 由其相对径向速度 $v_r = v_E \cos \gamma$ 和工作波长 $\lambda = c/f_0$ 共同决定, 即 $f_d = 2v_E/\lambda \cos \gamma$, 其中 γ 是从 E 点观测 P 点偏离等效相位中心速度矢量 v_E 的方向角。



a. 垂直运动

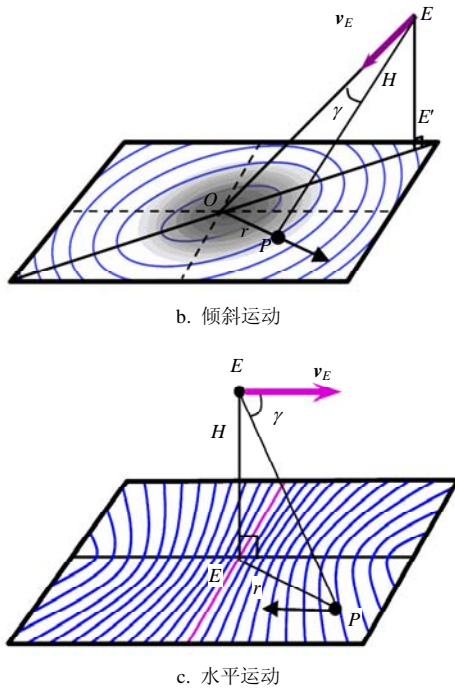


图6 等效相位中心的典型运动方式

在给定时刻，地面上具有相同多普勒频率的点组成的集合称为等多普勒线或多普勒等值线。在单基SAR中，等多普勒线是以 E 点为顶点，速度矢量方向为轴线的圆锥面与地平面的交线，有圆形、椭圆和双曲线3种不同形态，视速度矢量与地面的夹角关系而定，如图6所示。对双基SAR，由于多普勒频率由散射点 P 相对于发射站和接收站的两部分运动共同作用产生，等效相位中心是一个近似的概念，等多普勒线会在单基SAR基础上有所变形，但仍可作宏观分析之用。为简化分析过程，便于得到定性和宏观的结论，本文的讨论中将忽略这种变形的影响。

若以固定的多普勒增量 Δf_d 画出地面等多普勒线，就可以得到一个以速度矢量与地平面交点 O 为中心的等多普勒曲线簇。其中心 O 对应最大多普勒频率 $2v_E/\lambda$ 。当速度矢量与地平面平行时， O 点位于速度投影延伸方向无限远处。

等多普勒线簇沿速度矢量投影线两侧对称分布，而且在逐渐远离 O 点的方向， γ 增大，等多普勒线逐渐密集。当 $\gamma = \pi/2$ 时，等多普勒线间距达到最小值，并由归一化多普勒增量 $\overline{\Delta f_d}$ 和 E 点高度决定，即 $\overline{\Delta f_d}H$ ，其中 $\overline{\Delta f_d} = \Delta f_d / (2v_E/\lambda)$ 。

2) 地距分辨率

由于 E 点运动，地面等多普勒等值线簇相对于 O 点产生向心压缩的动态变化。地面上的散射点 P 将沿背离 O 点方向产生速度为 v 的穿越等多普勒线簇的相对运动，从而形成瞬时频率变化的多普勒信号，这

正是合成孔径或方位脉压的物理基础。

设多普勒等值线增量 Δf_d 对应的 P 点相对移动方向的等多普勒线地面间隔为 ΔL ，在合成孔径时间 T_a 内， P 点相对移动量为 $L = vT_a$ ，穿越多普勒等值线数目为 $N = L/\Delta L$ ，对应的多普勒带宽为 $B_a = N\Delta f_d$ ，相应的时延分辨率为 $\rho_\tau = 1/B$ 。容易证明，对应的地距分辨率 $\rho_g = v\rho_\tau = \Delta L/T_a\Delta f_d$ 。所以， P 点相对运动方向的地距分辨率 ρ_g 与等值线间距 ΔL 成正比关系。

当等值线增量 Δf_d 设定为 $1/T_a$ 时，等值线间距即代表可分辨的最小地面间距，即地距分辨率 ρ_g 。因此，地面等多普勒线的疏密代表该地域的地距分辨能力大小，等值线越密集则地距分辨率越高，而最佳地距分辨方向位于等多普勒线法线方向。

所以，等效相位中心的初始位置和速度矢量不仅影响地面上的等多普勒线簇的分布形态，决定特定地域的等值线密度和走向，从而对散射点多普勒信号调频斜率产生直接影响；而且在给定合成孔径时间的条件下，也会直接决定多普勒信号的带宽，从而决定多普勒信号的时延分辨率和地距分辨率。

3) 成像模糊区

等效相位中心 E 的位置和速度方向也会影响成像模糊区的位置。在 O 点位置附近，若成像区包含有完整的等值线环，环上不同位置的散射点具有相同的初始多普勒频率和相近的瞬时多普勒频率变化历程，不能用多普勒频率及多普勒信号时延差来进行分辨。而且，无论怎样选择基线方向及等时延线走向，均会因为等时延线穿越等多普勒环，在环上形成时延相等的两个不同区域，也不能用时延差来区分，从而在图像域上形成重影，造成模糊现象。所以， O 点附近的区域，是不可成像区。

4) 合成孔径方向

由合成孔径或多普勒信号形成的地距分辨能力具有明显的方向性。例如，对图6c的情况，当 $\gamma = \pi/2$ 时， P 点相对运动方向与最佳分辨方向吻合，而且具有最大的等值线密度；而在其他地域，等值线变得稀疏， P 点运动方向也与最佳分辨方向存在偏差，不能实现最佳地距分辨。所以，要获得最佳的地距分辨能力，在系统构型设计时，应合理设置 v_E 或合成孔径方向，使成像区尽可能位于 $\gamma = \pi/2$ 方向。

1.4 构型分类

双基SAR发射接收空间分置的双平台独立运动，在系统构型关系上，比单基SAR更加复杂多样。承载发射站和接收站的平台飞行组合方式，收波束

印迹及其与地面的相对运动关系,显著增加了双基SAR系统构型的灵活性,从而形成不同特点的应用模式和应用价值。在不同构型的双基SAR中,相对于接收平台的可成像地域,也由单基SAR的侧视、斜视扩展至前视、下视和后视。

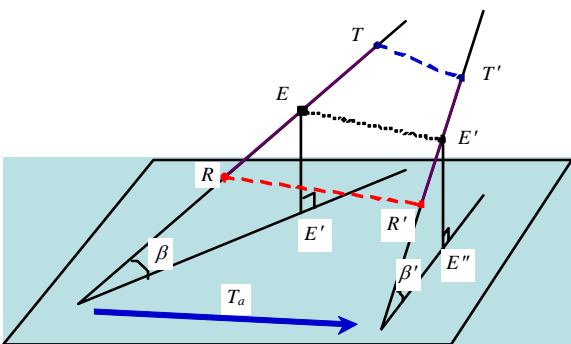
不同的系统构型也是双基SAR分类的重要依据。以下将从收发基线类型、基线孔径组合、收发飞行模式、收发扫描模式、承载平台组合,以及相对于接收站平台的成像地域等几个不同角度来描述双基SAR的系统构型与分类。

1.4.1 收发基线类型

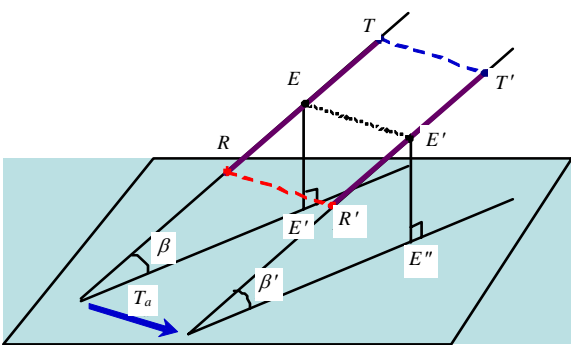
发射、接收和地面三者的相对位置关系及其时变性,是双基SAR系统构型的关键要素之一,对地距分辨性能和成像处理的复杂度有重要影响,也是双基SAR分类的重要依据。

根据收发基线随时间变化的不同情况,可以将双基SAR划分为移变和移不变两大类,如图7所示。这两种类别的成像处理过程存在重大差异,是双基SAR的重要分类方式。

基线的方向和长度在合成孔径时间内保持不变的情况,称为移不变成像模式;若基线的方向和长度中的一个或两个在合成孔径时间内发生变化,则称为移变模式。



a. 移不变



b. 移变

图7 收发基线的时变性

移变或移不变两类划分的实质,是匀速直线运动的两个平台的位置关系是否随时间变化。移不变模式对应于两个承载平台组成的整个成像系统,在几何上具有虚拟的刚性结构,而移变模式则对应于柔性结构。

移不变模式中,收发相对位置保持不变,发射平台、接收平台及等效相位中心具有相同的速度矢量和平行的航迹。地面上平行于航迹的不同直线上的点目标,具有不同的多普勒变化历程。而地面上的同一条平行于航迹直线上的点目标,则具有相同的多普勒变化历程,只是存在时间上的延迟。所以,在移不变模式中,地面上点目标的多普勒历程随目标位置的不同呈现出一维空变性,成像处理过程与单基SAR相似。但在移变模式中,由于收发相对位置随时间变化,造成地面上的点目标多普勒历程随目标位置的不同呈现出二维空变性,导致成像处理过程与单基SAR存在明显差异,复杂度显著增加。

1.4.2 基线与孔径组合

基线与孔径组合是指基线方向、孔径方向之间的几何关系,是双基SAR系统构型的第二个关键要素,对地面可成像区域位置分布及其成像性能具有重要影响,也是双基SAR分类的重要依据。

1) 二维成像条件

实现二维成像的基本条件是:成像系统必须在两个正交的空间方向上,具备足够高的一维空间分辨能力。在合成孔径雷达成像中,这两个一维空间分辨能力,从机理上来源于对回波脉冲信号的时延分辨和多普勒信号的时延分辨,而分辨能力的大小则来源于这两个信号的带宽。但是这两个一维空间分辨的方向与系统构型及地域位置密切相关,在地面上并不总是正交的。

由于回波脉冲信号产生的分辨方向与等时延线正交,而多普勒信号对应的分辨方向与等多普勒线正交。因此,两维空间分辨的正交性要求等效于等时延线与等多普勒线的正交,即要求等时延线簇和等多普勒线簇在待成像区呈正交关系。

如前所述,取定等时延线增量 $\Delta\tau$ 为发射信号带宽 B_r 的倒数,以及等多普勒线增量 Δf_d 为合成孔径时间 T_a 的倒数时,这两种地面等值线的间距均代表可分辨的最小地面间距,即地距分辨率。所以,要在图像域得到分布均衡和两维均衡的分辨能力,就要求两种等值线在待成像区形成尺度均衡的正方形网格分割。

在双基SAR中,基线与速度的组合模式决定了

两种等值线簇在不同地域的分布密度相交夹角和网格形状,影响可成像区域的分布形态,也会影响可成像区域的分辨性能。因此,可以将两种等值线在待成像区形成的高密度正方形均匀网格分割,作为基线与速度组合构型设计的基本原则。

2) 基线孔径组合

根据上述原则容易发现,有的组合模式虽然也会出现不可成像区域,但能够在大的地域范围形成可成像区域;而有的组合模式,在地面上基本不能形成可成像区域。

例如,如图8a的垂直运动模式,与图6的3种基线类型进行组合,都不是好的组合模式。因为在这些组合模式下,两种等值线的交越关系以及在地面形成的网格分割,在任何地域位置都不能很好地符合上述构型设计原则。因此,垂直运动方式以及大仰角倾斜运动方式在SAR成像的系统构型中是不被采用的。为简化讨论,本文只考虑水平运动方式与不同类别基线的组合。

按照速度矢量与基线投影方向的夹角关系,可将双基SAR分为沿基线、切基线和斜交基线3种主要类别,如图8所示。

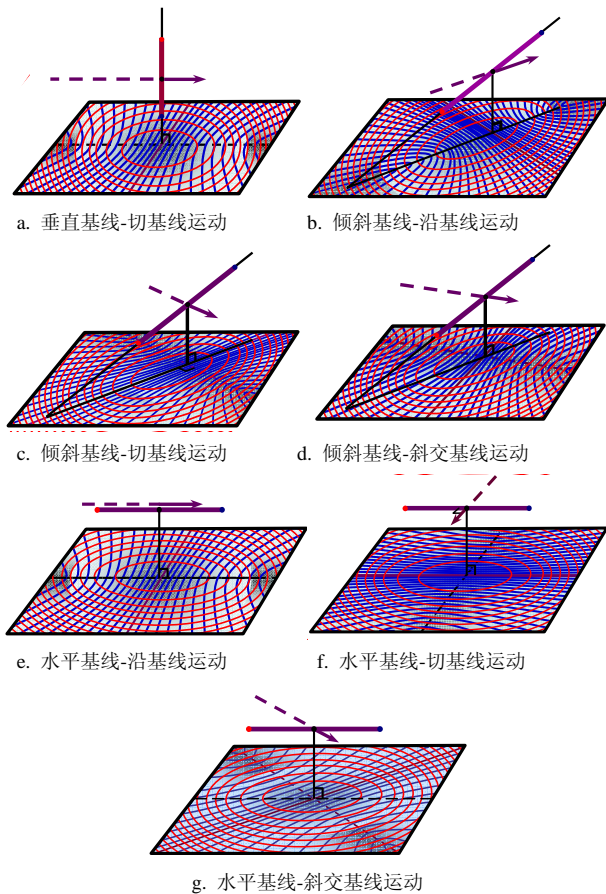


图8 基线与速度的组合模式

不同的基线构型在地面形成的等时延线簇均为同心椭圆簇形态,且其中心 O 均位于基线中心投影点 E' 附近,除 O 点附近区域因模糊性属于不可成像区外,其他区域的地距分辨性能大体呈以 O 点为中心的各向同性态势,其最佳分辨方向位于椭圆簇的法线方向。

而等效相位中心速度矢量 \mathbf{v}_E ,在地面形成的等多普勒线簇和对应的地距分辨性能,则呈各向异性态势。在过 E' 点且垂直于速度投影方向上,有更密集的等多普勒线分布和更好的地距分辨性能,在各种组合模式下,均能与等时延线形成接近正交的交越关系,因此,也能获得更好的二维分辨性能。

因此,可成像区域分布主要由等效相位中心位置及其速度矢量确定。以 E' 点为基准,等效相位中心速度矢量投影的正侧视方向为最佳成像区,斜侧是次佳成像区;而后视、前视区,在所有组合模式中均因两种等值线呈接近平行的态势,只能提供一维分辨能力,是不可成像区。若从等效相位中心合成孔径角度理解,这些区域位于合成孔径天线阵的两端,不能获得方位分辨能力。

1.4.3 可成像区域分布

成像区域分布是指能够实现高分辨二维成像的地域与接收站平台运动方向的关系。它是双基SAR系统构型的第三个关键要素,对系统参数设定和成像处理的复杂度有重要影响,所以也是双基SAR的重要分类依据。

双基SAR实现了收发相位中心位置与接收平台位置的分离,以及收发相位中心速度矢量与接收平台速度矢量的分离。这两个分离,显著增大了成像构型的自由度,形成了显著不同于单基SAR的可成像区域分布,获得了接收平台前所未有的前视、下视和后视成像能力,从而形成了前视SAR等具有重大应用价值的双基SAR分支。

1) 构型原则

如前所述,基线决定了地面等时延线簇的分布和走向;而等效相位中心的位置和速度矢量决定了地面等多普勒线簇的分布和走向空间。而它们的不同组合,将显著改变地面上可成像地域的分布,也会直接影响特定地域的分辨率。

图9显示了某时刻的基线状态,假定系统属于移不变构型,对于在水平基线-沿基线运动组合和水平基线-切基线运动组合两种典型情况,可成像区域分布存在明显差异。对于特定的区域A、C与B、D,在两种不同基线孔径组合模式下的成像性能出现了换

位情况。

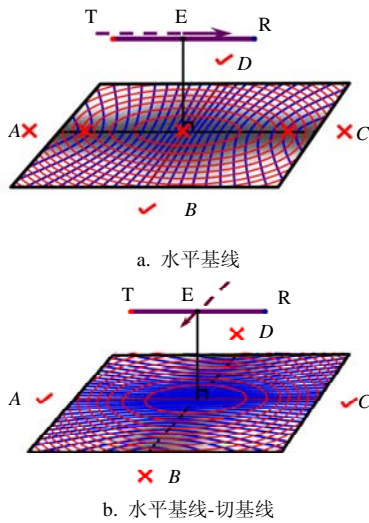


图9 基线与孔径的组合模式对可成像区域的影响

要在待成像区获得高分辨二维成像，需要遵循的直观构型设计原则是使等效相位中心运动方向(即等效合成孔径方向)与成像地域的等时延线呈平行或接近平行的状态，以便使多普勒等值线最密集的方向对准待成像地域，同时形成等多普勒线与等时延线的正交或准正交。粗略地说，这相当于将等效相位中心运动方向的侧面对准待成像地域。如图9所示的基线形态，切基线的B、D区的高分辨二维成像应沿基线投影方向合成孔径，而对沿基线的A、C两区的高分辨二维成像则需要沿切基线方向合成孔径。

2) 成像区域

如图10a所示，单基SAR由于等效相位中心与平台位置重合，不能成像的区域集中在平台航线地面投影沿线区域，只具备飞行器航线双侧(含斜侧和后侧)区域的成像能力。

在双基SAR中，由于收发分置，等效相位中心位于收发基线中点附近，已从承载平台上分离出来；同时，由于相同的等效相位中心速度矢量可以由不同的收、发速度矢量合成，也实现了与接收平台速度矢量的分离。这两个因素的共同作用，使双基SAR系统相对于接收平台的可成像区分布位置发生了明显不同于单基SAR系统的变化。

在图10b所示的水平基线-切基线运动组合模式中，双基SAR等效相位中心已从接收平台分离，使得接收站的航线投影方向与不可成像区实现了分离，从而使双基SAR除了可以在大部分区域实现侧视成像外，还获得了极为宝贵的后视、下视和前视成像能力。

图10c所示的垂直基线-切基线运动组合构型中，双基SAR等效相位中心速度矢量与接收站速度矢量的分离，解除了最佳成像区固定在接收站运动方向的侧面的限制，获得了极为宝贵的接收站后视和前视成像能力。

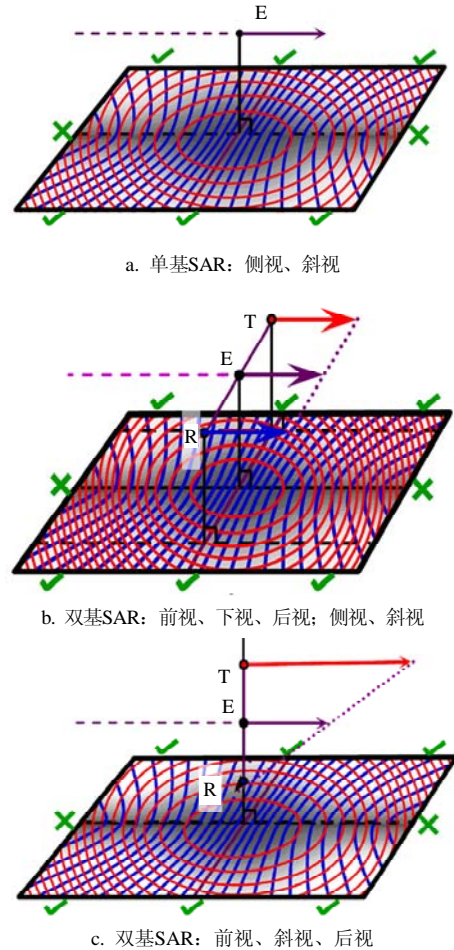


图10 单、双基SAR的成像区域差异

值得注意的是，在不同位置的成像区域，两种等值线的交越关系及其与地面的相对运动关系存在明显的差异。这种差异对地面点目标回波规律和成像处理复杂度有重要影响。因此，成像区域相对于接收平台的位置关系，也是双基SAR的分类依据，例如侧视、斜前视、前视、后视等。

1.4.4 收发扫描模式

收发扫描模式是指收发波束地面印迹之间的相对运动关系及其与地面的相对运动关系，它是双基SAR构型的第四个关键要素。扫描模式对成像区域的选择和能够接收、记录的多普勒信号起止时间有影响，从而对回波模型和成像处理等的构建产生重要影响，所以，它也是双基SAR分类的重要方式。

根据收发波束印迹的相对关系，可以将双基

SAR分为随动模式和滑动模式,如图11a、图11b所示。而根据收发重叠波束与地面的相对运动关系,可将双基SAR分为随动条带模式、滑动聚束和随动聚束模式,如图11c、图11d、图11e所示。

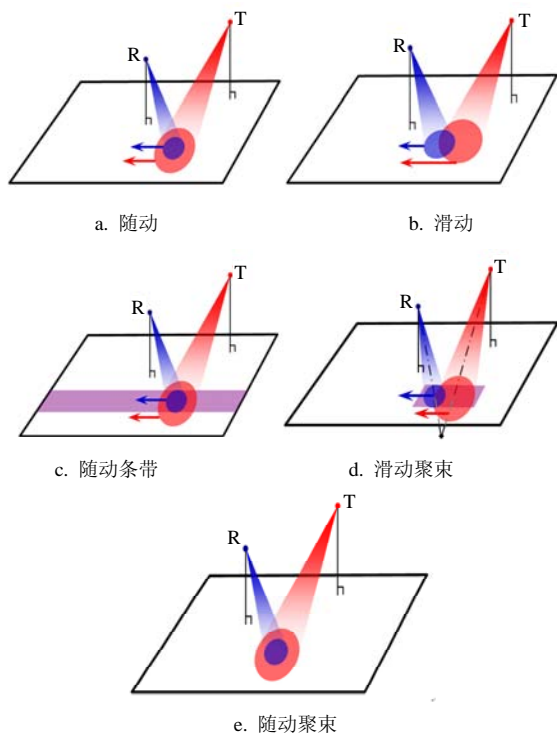


图11 双基SAR扫描方式

图11a所示的随动模式中,收发波束印迹在地面上相互重叠,以相同的速度相对于地面移动,可在移动方向上形成条带状成像区域;若移动速度为0,则形成固定成像区域。

图11b所示的滑动模式中,收发波束印迹在地面上有不同的移动速度,仅在部分时间重叠,可在移动方向上形成矩形状成像区。

图11c所示的随动条带模式中,收发波束重叠印迹在地面上以一定的速度移动,从而形成条带状成像区域。

图11d所示的滑动聚束模式中,收发波束中心线相交于地面下方一定深度的 O 点。合成孔径时间内,交点 O 位置保持不变。这种模式的收发波束地面印迹能够在较长的时间内重叠在一起,波束印迹移动速度远低于平台速度,所以能够获得矩形状的成像区域。该模式常用于获得比条带模式更高的空间分辨率,因为这种模式具有更长的观测时间、更大的多普勒信号带宽和更高的多普勒信号时延分辨率。

而图11e所示的聚束模式,收发波束印迹完全重合,相对于地面固定不动。这种模式多用于特定区域的超高分辨率成像,因为这种模式下合成孔径时

间最长,可以获得最大的多普勒信号带宽和最高的多普勒信号时延分辨率。

不同的扫描模式中,预定成像区不同位置的散射点被收发重叠波束照射的起止时刻不同,造成散射点的多次回波在数据平面内的轨迹可见延伸情况不同,多普勒信号的可见起止时刻和信号带宽不同。因此,不同的收发扫描模式会引起回波信号模型的显著改变,从而导致成像处理过程或成像算法上的差异。

1.4.5 承载平台组合

双基SAR中的两个平台可以是同类型的平台,也可以是不同类型的平台。两个平台都可以是运动的,也可以是一个运动,一个静止。平台组合的不同类型,不仅对应于不同的应用背景,也会显著影响到两个平台对等效相位中心速度矢量的贡献差异,从而对回波模型和成像算法带来大的差异。

1) 承载平台

距离地面一定高度的运动和静止平台,均可以作为双基SAR的承载平台。一般来说,飞行器是双基SAR的承载主要平台类型,包括高轨和低轨卫星、临近空间飞行器、飞艇、飞机、导弹和炮弹等多种类别。山顶、建筑物顶、浮空平台等静止平台也可作为双基SAR的发射站或接收站承载平台。根据承载平台的工作高度,大致可将其分为天基、临近空间、空基和地基4个层次,如图12所示。

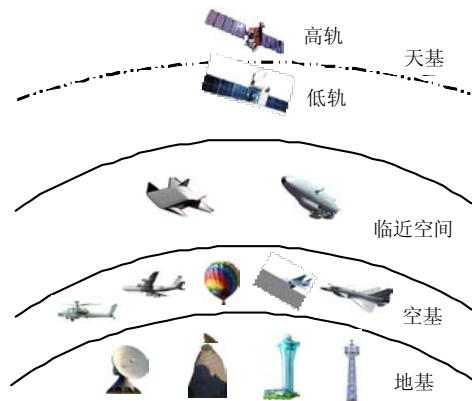


图12 双基SAR的收、发承载平台

承载双基SAR发射站的平台,需要较大的有效载荷重量和空间以及较强的供电能力,以提供大功率发射机所需要的体积、载重和功耗等资源,适合采用较大型的飞行平台或静止平台,例如:卫星、飞机、飞艇、浮空平台、高塔等。此外,合作和非合作的单基SAR承载平台,在一定的条件下,也可以作为双基SAR的发射站。甚至通信和导航等其他用途的辐射源,在具有较高信号带宽等条件下,也

可以作为双基SAR系统的发射站平台。

因为接收站不需发射大功率信号,只需要被动接收和记录地面回波,并进行传输或处理,双基SAR系统对接收平台的载荷容积、载重和供电需求要比单基SAR系统大幅度降低,平台适装性显著改善,不仅适用较大的飞行平台,还可以用于微小型卫星、小型无人机、巡航导弹、空地导弹和制导炮弹等微小型平台,所以,双基SAR可以显著地拓宽SAR成像技术的应用领域,形成新的SAR成像技术产品和装备。

2) 组合模式

双基SAR收发平台分置,配置灵活,具有不同于单基SAR的应用特点,可根据不同的应用条件和应用目的选择不同的组合模式。除选择“远发近收”“侧发前收”等同类或近类平台组合模式外,也可采用“一静一动”“一慢一快”等不同类型平台组合,还可以采用“一发多收”的组合模式。这些不同类型的组合模式可以满足实际应用对平台安全性、成像性能和探测距离等方面的不同要求。

典型的组合模式有星-星、机-机、星-机、星-弹、机-弹、星-地、机-地等组合模式。这些不同的组合模式,由于平台高度和速度差异性、平台运动稳定性和运动几何关系差异性等因素影响,在回波模型、成像处理、参数估计、运动补偿、时频同步、扫描方式等方面,均存在较大的差异。

同类或近类平台组合,通常具有相近的飞行高度和飞行速度,一般属于接近水平的收发基线类型,既可以是移变的,也可以是非移变的基线类型。这类组合在多平台组合编队协同应用中可以实现较好地收发平台的空时配合,对预定成像区形成较长时间的收发波束共视,从而获得长的合成孔径时间和高的成像分辨率。

低轨卫星作为发射平台,与飞机、导弹、地面等异类接收平台的组合,属于典型的“一快一慢”组合“一高一低”的垂直基线类型和大移变基线类型。此时,卫星平台速度快,对双基回波多普勒的贡献居于主导地位,使得等效相位中心速度矢量和合成孔径方向主要由卫星速度矢量决定,从而使接收平台可以灵活地选择飞行方向,以无线电静默的方式形成相对于接收平台的侧视、下视、后视和前视等隐蔽成像能力。

但低轨卫星运动速度快,波束地面驻留时间短,重访周期较长,不易与速度较慢的飞机等平台形成良好的空时配合,在应用中局限性较大。

高轨卫星作为发射站,低轨卫星星座作为接收站的组合模式,属于“一发多收”“一高一低”“一快一慢”的异类平台组合,也属于倾斜基线和大移变模式,可实现高重访率、大范围(甚至全球)对地成像监视,是一种具有良好应用前景的承载平台组合模式。相比低轨星座组成的多个单基SAR系统体系,这种组合的多个低轨卫星平台可以共享一个或数个高轨卫星的发射信号资源,节省了低轨卫星的发射子系统,可以显著降低低轨卫星平台的载荷容量和供电要求,利于选用轻小型卫星平台组成星座,实现大范围高重访率的对地监视,从而显著降低整个系统的研制和发射成本。同时,这种组合比单基SAR星座具有更好的隐蔽性和抗干扰能力。

高轨卫星作为发射平台,与飞机、导弹等接收平台的组合,虽然也属于“一高一低”、垂直基线和移变模式的异类平台组合,但由于高轨卫星的星下点移动速度与飞机等平台的机下点移动速度差异相对较小,它们之间能够形成良好的空时配合,具有同类平台组合的一些特征。高轨卫星特别是地球同步轨道(GEO)卫星承载的单基SAR,能够对地面进行大范围、长时间和高重访率的稳定照,因此,基于GEO卫星平台作为发射站,飞机等空基平台作为接收站的双基SAR,是具有十分重要应用前景的双基SAR承载平台组合模式。在GEO卫星SAR投入实际运行后,这种组合会对SAR技术的产品装备产生重要的影响。首先,会出现多种只配备接收站的低成本双基SAR产品和装备;其次,能够使不具备单基SAR安装条件的微小型空气动力学平台具备SAR成像能力;第三,接收站平台不仅可具备传统的侧视成像能力,而还可具备单基SAR不具备的前视、下视、后视成像能力。

平流层飞艇等平台的地面投影运动速度相对较慢,也可对预定成像区形成较长时间的大范围照射,适合双基SAR的发射站承载平台,配合各种飞行器作为接收站,就能够以小的有效载荷和系统资源开销,获得接收平台的隐蔽对地成像能力。

2 发展动态

根据收发站几何拓扑结构,按照收发平台的类型划分,双基SAR可以分为4种类型:机载、星载、星机、一站固定双基SAR。顾名思义,机载双基SAR收发站均以飞机为平台;星载双基SAR收发站则均以卫星为平台;星机双基SAR发射站装载在卫星平台上,接收站安装在飞机上;一站固定双基SAR的

发射站或接收站当中的一个放置在固定的地点(如地面或山顶)、另一个装载在运动平台上,根据运动平台的不同,其又可分为星地双基SAR和机地双基SAR。此外,按照成像区域与平台的相对位置关系,双基SAR又可分为双基侧视SAR和双基前视SAR。按照辐射源是否为与接收站相合作的雷达系统,双基SAR还可为雷达辐射源双基SAR和外辐射源双基SAR。由于双基前视SAR和外辐射源双基SAR具备其他双基SAR所不具备的重要特性,近年来获得了国际上主要研究机构的广泛关注。

2.1 机载双基SAR

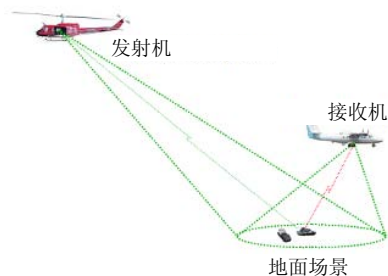
在该模式中,发射机与接收机分置在不同的飞机平台上,机载双基SAR被视为双基SAR研究工作的起点。下面将对世界各主要国家的研究进展进行分析和讨论。

1) 美国

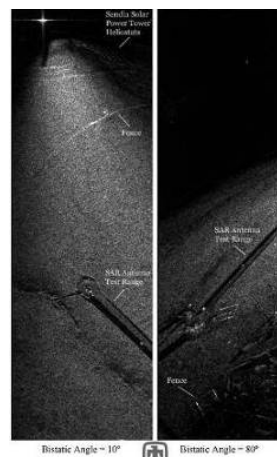
20世纪70年代末80年代初美国国防研究计划局(DRPA)和空军航空实验室(AFAL)主持了战术双基雷达验证试验(TBIRD)^[1],该项目也是最早见于公开文献的双基SAR系统。1983年5月进行的试验得到了非常清晰的SAR图像,成功地发现了隐藏在树林中以0.6 m/s速度运动的坦克。上述文献主要是文字报道,没有登载战术双基雷达验证试验获得的SAR图像。

随后是文献[2]中提到的一次双基SAR试验,并公布了三幅双基SAR图像,该图像是最早见于公开文献的双基SAR图像,设计分辨率4 m(距离)×2 m(方位)。该试验由加拿大遥感中心(CCRS)和美国密歇根ERIM SAR实验室于1983年6月18日在美国密西根州合作进行,获得了Willow Run机场附近区域的SAR图像。两架Convair CV-580飞机作为收发平台。系统工作在平行等速飞行模式时,双机垂直间距300 m,双基角约2°;系统工作在跟随飞行模式时,双基角为40°或80°。

1994年7月,美国Sandia国家实验室开展了一次机载双基SAR实验,发射站由直升机装载,接收站由固定翼飞机装载,实验结果如图13所示。



a. 几何构型



b. 成像结果

图13 美国Sandia国家实验室机载双基SAR实验

2) 英国

2002年9月,英国QinetiQ公司在国防研究局的资助下使用BAC1-11装载ESR雷达作为发射站,使用直升机装载Thales与QinetiQ共同开发的机载数据采集系统ADAS作为接收站,首次完成平飞机载聚束式的双基SAR实验^[3],如图14所示,双基角大约为50°。该系统工作在X波段,通过天线聚束固定照射方式解决了波束同步问题,同时通过机载高精度的铯原子钟解决了时间同步问题,还通过地面测试校准发射机和接收机的振荡器频率和相位噪声的方式使其满足双基SAR系统的频率同步要求。成像处理采用极坐标格式算法和距离徙动算法,同时还通过相位梯度自聚处理提升了最终的图像质量。成像结果如图14所示。

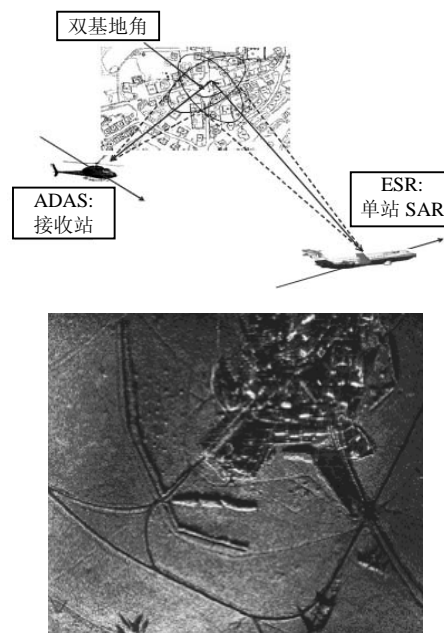


图14 英国QinetiQ聚束式双基SAR试验

3) 法国

2002年10月~2003年2月期间,法国航空航天研究所(ONERA)和德国宇航局(DLR)使用E-SAR和RAMSES进行了两次机载双基SAR飞行试验^[4-6]。发射站E-SAR由Dornier 228装载,接收站RAMSES由Transall C-160装载。该系统为X波段,带宽100 MHz,采用跟随式飞行和平行飞行两种几何布局。跟随飞行时,收发站间距约30 m,小飞机Do-228在前,其飞行高度比C-160高2~3 m;平行飞行时,收发站航线距离2~3 km。同时获得了图像和干涉图像^[5,7],成像结果如图15所示。



图15 法国ONERA与德国DLR双基SAR成像结果

2009年,法国航空航天研究所与瑞典国防研究院合作开展双机SAR实验,雷达工作在VHF/UHF波段,成功发现了隐藏在茂密树林中的汽车目标,实验结果如图16所示。



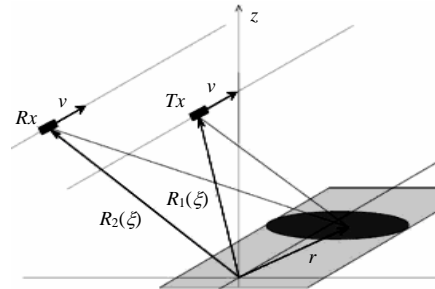
图16 法国ONERA与瑞典国防研究院双机SAR成像结果

4) 德国

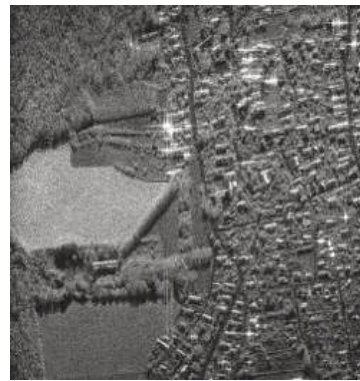
2003年11月,德国应用自然科学研究学会的微波与雷达技术研究组(FGAN-FHR)使用Dornier 228装载AER-II, Transall C-160装载PAMIR,系统带宽为300 MHz,进行了一次X波段的机载双基SAR平行飞行试验。该实验中波束空间同步通过事先精确的飞行模式设计和飞行员驾驶技术实现^[8]。发射信号带宽为300 MHz,实验中分别采集了双基角为13°、29°、51°和76°的多组回波信号,同时通过差分GPS接收机对发射和接收平台的轨迹历史进行了比较精确的记录。通过距离多普勒算法和后向投影算法结合运动补偿处理^[9-12]获得了较高质量的双基SAR图像。实验目标区域光学图像和成像结果如图17所示。

5) 中国

国内开展该方向研究的研究机构主要有:电子科技大学、中国科学院电子学研究所、北京理工大学、西安电子科技大学、中国电子科技集团38研究所,其他还有北京航空航天大学、国防科技大学、南京航空航天大学等。而大部分的研究都集中在理论研究上,包括双基SAR分辨率理论^[13]、成像算法^[14-15]、同步技术^[16]等。电子科技大学于2004年开展了机载双基SAR试验系统的研究工作,突破了同步、成像处理、运动补偿等若干关键技术,并于2006年进行了机载双基SAR平移不变模式飞行成像试验,验证了自行研制的同步技术^[17]、成像算法^[18-20]等关键技术,获得了国内第一幅双基SAR成像结果,如图18所示。使我国在该领域走在国际研究的前列,成为继美英法德之后国际上掌握双基SAR成像技术的第五个国家。相关结果引起了国内外研究机构的高度关注和浓厚兴趣。

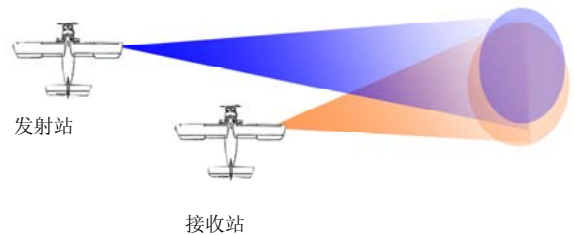


a. 几何构型

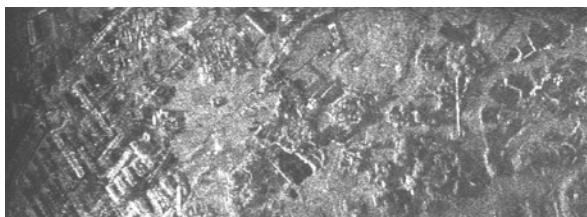


b. 成像结果

图17 德国FGAN机载双基斜视SAR飞行试验



a. 几何构型



b. 成像结果

图18 国内首幅机载双基SAR实验图像

2.2 星载双基SAR

与机载双基SAR相比,星载双基SAR的发射站和接收站分别放在不同的卫星平台上的。与机载SAR相比,星载SAR由于明显的高空优势,具备很大的覆盖范围,通过联合数颗星就能实现全球范围24小时的覆盖能力,并且星载SAR的活动范围没有国界、战场等的限制,这些均有利于雷达预警,在战争中也不易受到攻击。另外,卫星平台稳定性好,收发平台间的相对位置、速度关系大致确定,成像过程中运动补偿问题不是特别突出。并且星载双基SAR可以克服单基SAR干涉中存在的基线长度和时间相关性限制。因此,国外雷达研究机构在突破了双基SAR成像的关键技术之后,都在积极开展星载双基(多基地、分布式)SAR的研究工作。

1) 德国TanDEM-X

德国DLR于2007年6月15日成功发射了其新一代雷达遥感卫星TerraSAR-X。TerraSAR-X是首颗由DLR与欧洲航空防务和航天公司(EADS)共同建造的德国卫星。2010年7月德国发射第2颗X波段星载雷达卫星,与之前发射的TerraSAR-X组成TanDEM-X系统,有效扩展了系统的应用前景。TanDEM-X的主要目的是系统地获取全球的高精度数字高程模型以及成像场景的三维地表信息,空间分辨率达到12 m,高程分辨率10 m。该系统主要工作模式为单极化条带模式,并可以灵活的实现多种新型SAR体制成像,包括星机双基SAR和双极化聚束模式等。

DLR于2010年8月开展了基于TanDEM-X系统的星载双基SAR实验^[21],两颗雷达卫星采用小跨轨基线前后跟随伴飞模式,处于前方的TerraSAR-X发射和接收信号,天线照射模式为后斜视 0.8° ,跟随其后的TanDEM-X则只接收信号,天线的照射模式为前斜视 0.8° 。通过TanDEM-X上搭载的直达链路获取时钟偏差等信息用于同步处理。成像场景位于南美洲巴西首府巴西利亚,实验构型示意和成像结果如图19所示。

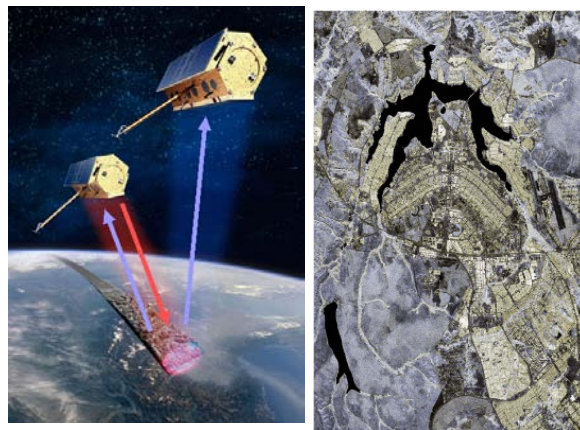


图19 TanDEM-X双基SAR构型示意图和成像结果

2) 加拿大Radarsat-2/3 tandem^[22-23]

加拿大Radarsat-2卫星于2007年12月14日在哈萨克斯坦的拜科努尔航天发射基地成功发射。在Radarsat-2的基础上,加拿大计划再发射一颗Radarsat-3,两颗卫星编队伴随飞行,相距几公里,以一颗发射、两颗同时接收的方式工作,在聚束模式下可以实现1 m的空间分辨率和100 m的定位精度。在宽波束扫描模式下,SAR的成像幅宽可以达到500 km和100 m的空间分辨率。Radarsat-2/3 tandem是一个全自主式双基SAR系统,但在同一时刻只有一颗卫星的雷达发射电磁波。该计划的一个目的是要提供南北纬 60° 之间地球表面的高分辨率的地形测绘图像。

3) 意大利BISSAT^[24]

BISSAT(BIstatic SAR satellite)计划是以小卫星为平台的双基SAR系统,该计划将作为COSMO-SkyMed的组成部分,以实现GMTI和干涉测量。高分辨率雷达卫星COSMO-SkyMed是意大利航天局和意大利国防部共同研发的高分辨率雷达卫星星座,该卫星星座由4颗X波段SAR(SAR2000)卫星组成。COSMO-SkyMed雷达卫星的分辨率为1 m,扫描带宽为10 km,具有雷达干涉测量地形的能力。COSMO-SkyMed系统是一个可服务于民间、公共机构、军事和商业的两用对地观测系统,其目的是提供民防(环境风险管理)、战略用途(防务与国家安全)、科学与商业用途。

2.3 星机双基SAR

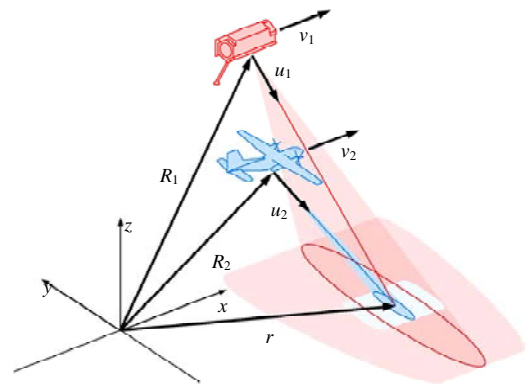
星机双基SAR将发射站置于卫星平台上,而采用飞机(或无人机)作为接收机平台^[25-26],或反之。在继承了双基SAR优点的同时,星机双基SAR还有其独特的优点^[25,27]: 1)独特的“远发近收”模式,既充分发挥了卫星站得高、看得远、覆盖面广等优势,

又保持了很高的图像信噪比; 2)降低对卫星功率、数据传输容量、处理能力及成本等方面需求; 3)根据客户需求制定观测方案, 实施比分布式星载SAR系统更灵活的数据采集方式, 降低数据获取成本; 4)发挥飞机机动灵活的特点, 构建不同于传统条带、聚束及扫描模式的新型工作模式, 便于高分辨率和大测绘带SAR系统设计实现。

文献[28]提出用地球同步卫星作为发射源, 用低轨道卫星或高空无人飞机作接收设备的设想, 同时指出使用高空无人飞机的方案造价更便宜。

文献[29]首次报道了由美国AFRL和喷气推进实验室(JPL)合作进行的星机双基SAR飞行试验的情况。试验采用C波段欧洲一号卫星ERS-1和美国航天飞机的C波段SIR-C星载雷达作为发射信号源, 接收机安置在美国国家航空航天局(NASA)的一部DC-8飞机上, 获得了几幅分辨率为12 m的SAR图像。飞行试验的成功表明了星机双基SAR的可行性。

2007年12月, 德国DLR采用F-SAR作为机载接收站, TerraSAR-X卫星作为发射平台, 完成了星机侧视SAR成像试验^[30-31]。其中, 为保证高分辨成像所需的合成孔径时间, TerraSAR-X卫星工作于聚束成像模式, F-SAR工作于反向滑动聚束式。采用BP成像算法进行处理, 得到结果图20所示。



a. 几何构型



b. 成像结果

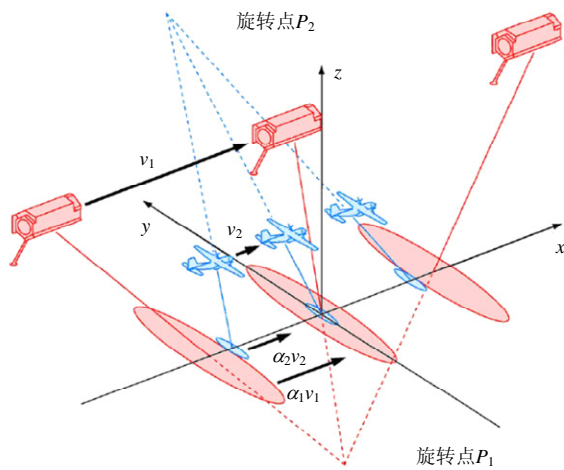
图21 TerraSAR-X/PAMIR星机双基SAR实验1 构型示意图和成像结果

2008年至2009年, 德国FHR和锡根大学(University of Siegen)联合传感器系统中心(ZESS)合作开展了两次星机双基SAR实验^[32-33], 实验中收发平台以近平行轨迹同向飞行, 发射站TerraSAR-X工作在滑动聚束模式, 接收站PAMIR机载雷达系统由Transall C-160装载, 在两次实验中分别采用具有子阵照射的条带模式和逆滑动聚束模式, 得到了方位向宽幅场景成像结果。2008年的第1次实验中, 发射带宽为150 MHz。2009年初的第2次实验中, 发射带宽增加到300 MHz。其中第1次实验成像结果如图21所示。

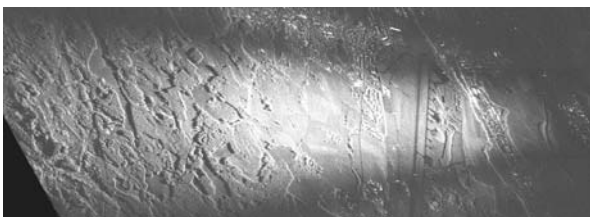
2.4 一站固定双基SAR

一站固定双基SAR主要包括机地双基SAR和星地双基SAR两种模式。其中机地双基SAR发射机放置在陆基平台上, 接收机则放置在飞机平台上, 或者相反。这种模式由于方位向的回波多普勒频率全靠单一的运动平台运动产生, 方位分辨率较低。星地双基SAR发射机装载在卫星上, 接收机则放置在陆地上。与星机双基SAR类似, 星地双基SAR中存在的最主要问题也是空间同步问题(雷达对某一接收地面每绕地球一圈照射时间只有1 s)。另外, 由于在该模式中, 运动平台只有发射站-卫星, 接收平台是固定在地面上的, 导致信号的多普勒效应没有同样条件下的星载双基SAR显著。

机地双基SAR研究方面, 2004年5月, 德国FGAN-FHR进行了接收机固定的双基SAR试验^[34], 发射站采用安装在C-160飞机上的MEMPHIS雷达;



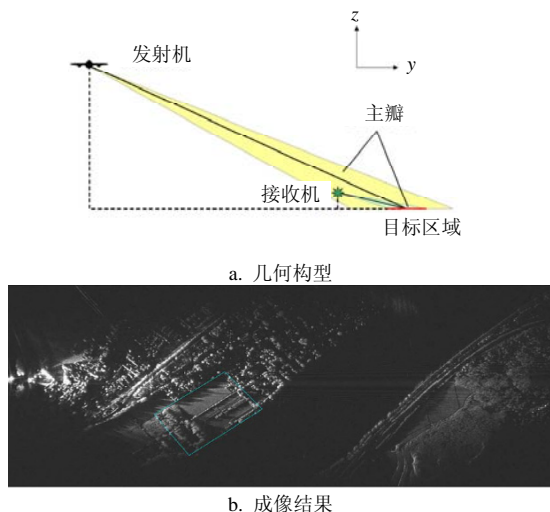
a. 几何构型



b. 成像结果

图20 德国DLR星机双基侧视SAR试验(BP算法成像结果)

2007年12月,又利用安装在C-160上的PAMIR雷达作为接收机,发射站固定在地面上,采用时域反投影(BP)算法进行了成像^[35],结果如图22所示。

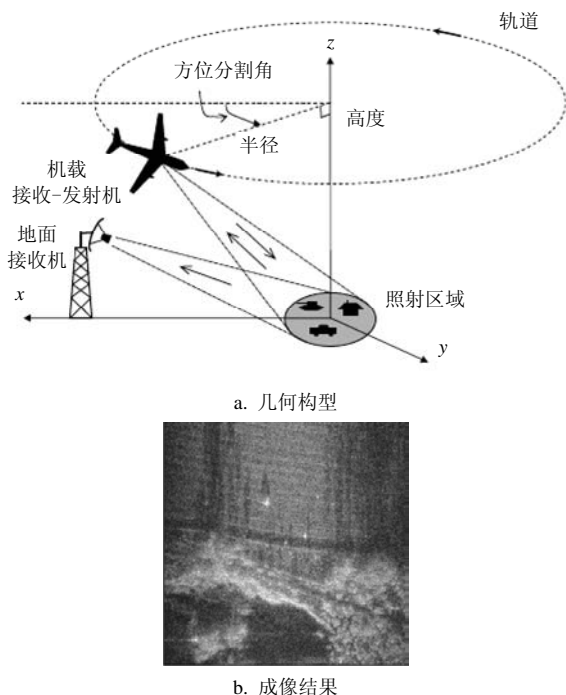


a. 几何构型

b. 成像结果

图22 德国FGAN-FHR地机双基侧视SAR试验的(BP算法成像结果)

2007年12月,澳大利亚国防科学与技术组织(DSTO)在全极化SAR Ingara的基础上,新增一个地面接收站,构成一个双基SAR系统,完成了飞行试验。相关成果发表在2008年的IEEE国际雷达会议上^[36]。该系统用收发站上的GPS接收机输出的1PPS脉冲信号作为时间基准,实现时间同步。然后再用1PPS信号去锁定各自的铷钟,实现频率相位同步。发射站工作在圆迹聚束模式,采用PFA算法进行成像处理,结果如图23所示。



a. 几何构型

b. 成像结果

图23 澳大利亚DSTO星地双基SAR试验示意图及成像结果

星地双基SAR研究方面,目前有报道的为英国伦敦大学和QinetiQ在2002年进行的试验^[37]。该试验采用低轨道卫星的合成孔径雷达,即2002年3月发射上天的ENVISAT卫星上的ASAR(advanced SAR)雷达,它能给地面较强的功率密度: $3 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ 。此外,美国空军实验室(AFRL)于2002年也进行了星地双基SAR试验,发射站采用加拿大遥感SAR卫星RADARSAT-1,接收站为一多通道C波段雷达,位于AFRL的一栋楼顶,采用直达波来进行同步。

西班牙加泰罗尼亚理工大学的研究者于2006年提出了SABRINA系统的概念^[38],并采用ENVISAT等雷达卫星作为发射机,设计了干涉双基SAR实验,将星地双基SAR系统应用于形变检测。实验结果如图24所示。



图24 SABRINA系统的实验结果

受到SABRINA双基SAR项目的鼓舞,德国锡根大学传感器系统中心于2009年开始开发一套用于与TerraSAR-X进行星地双基SAR实验的接收系统,并命名为HITCHHIKER,它配备4个雷达接收通道,每个通道能够相参记录500 MHz带宽回波信号,均工作于X波段,其中一个通道用于记录直达波,另外3个记录目标场景回波。时间和频率同步通过一个GPS控制振荡器实现,其相位在信号处理的过程中通过分析直达波参考信号进行同步。2011年的一次实验中,接收站被放置在锡根大学一栋建筑的楼顶上,发射站TerraSAR-X被配置为高分辨滑动聚束模式,发射信号带宽300 MHz。实验结果如图25所示。

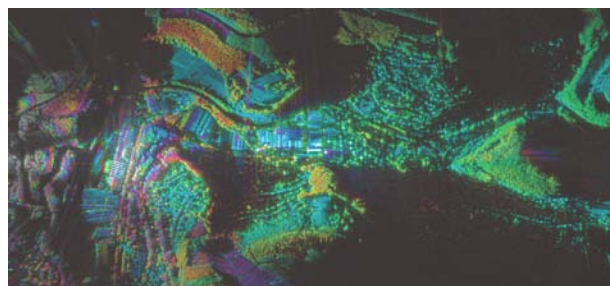
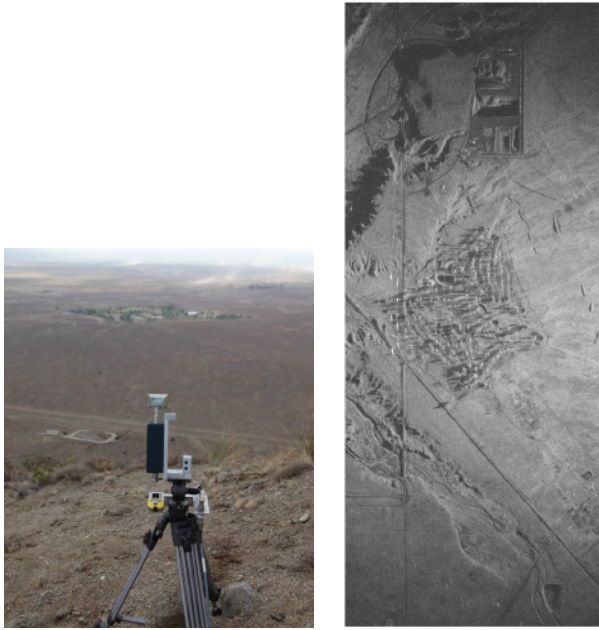


图25 锡根大学HITCHHIKER星地实验成像结果

2013年,美国Sandia国家实验室开展了多次星地双基SAR实验。发射站为TerraSAR-X、COSMO-SkyMED等SAR卫星,Sandia国家实验室自主研发的地面接收站被放置在美国新墨西哥州Kirtland空军

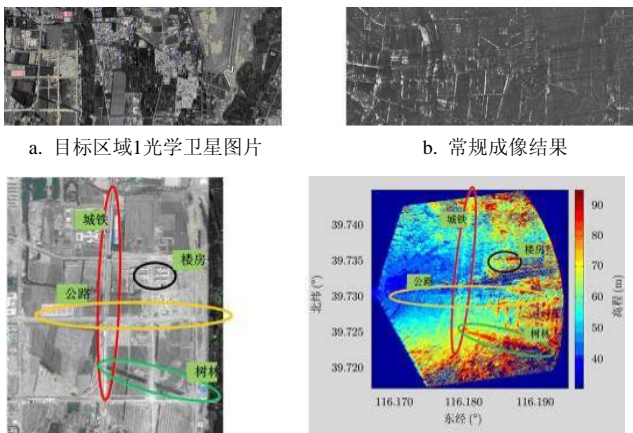
基地附近的Manzano山上, 实验结果如图26所示。



a. 场景光学照片 b. 双基SAR成像结果

图26 Sandia国家实验室星地双基SAR实验结果

国内方面, 2006年以来, 北京理工大学针对低轨SAR卫星作为发射机、静止接收的双基SAR系统的成像处理、干涉处理和极化合成等方向展开了研究^[39-42], 并于2010年开展了星地双基SAR实验, 其采用我国遥感1号SAR雷达卫星作为发射机, 地面静止接收站接收回波信号, 目标场景位于北京市良乡, 通过记录发射机直达波信号实现同步, 成功实现了星地双基SAR双极化和干涉实验。通过修正NCS算法进行成像处理, 同时利用自聚焦处理提高了最终的成像质量, 实验结果如图27所示。



a. 目标区域1光学卫星图片

b. 常规成像结果

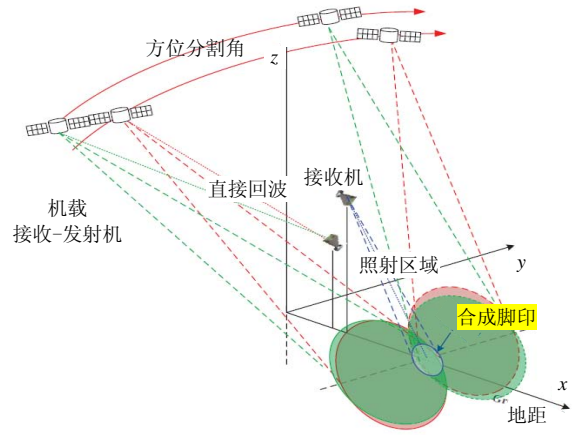
c. 目标区域2光学卫星图片

d. 干涉成像结果

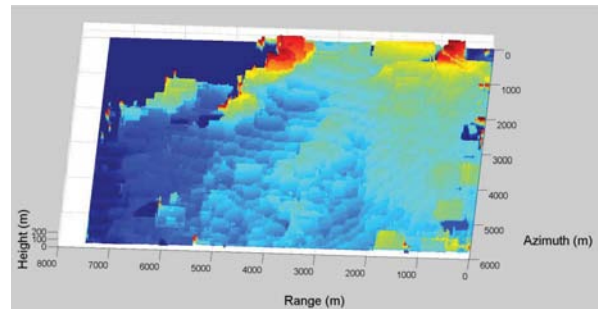
图27 北京理工大学星地双基SAR实验结果

2012年至2014年, 中国科学院电子学研究所开展了若干次星地双基地SAR实验。2012年的一次实验中^[43], 发射站为星载L波段雷达卫星, 接收站固

定在地面上, 配备了两个通道, 一个用于接收直达波, 另一个用于接收目标反射回波。实验中录取了发射卫星两次航过波束入射角分别为 47.6° 和 36.6° 的两组数据, 通过处理获得了雷达测绘DEM和双基地SAR图像, 实验构型和成像结果如图28所示。



a. 几何构型



b. DEM



c. 双基地SAR图像

图28 实验构型和实验结果

2014年, 中国科学院电子所又利用TerraSAR-X为发射站, 开展了星地干涉SAR成像实验^[44]。实验中单航过发射站工作在高分辨聚束模式, 带宽300 MHz, 接收站固定在地面上, 配备3个通道采集目标回波, 目的是使用多通道及相应算法解决了相位不连续的问题, 提高了高度估计的准确性, 获得了数栋建筑的数字高程地图。实验构型示意图和干涉成像结果如图29所示。

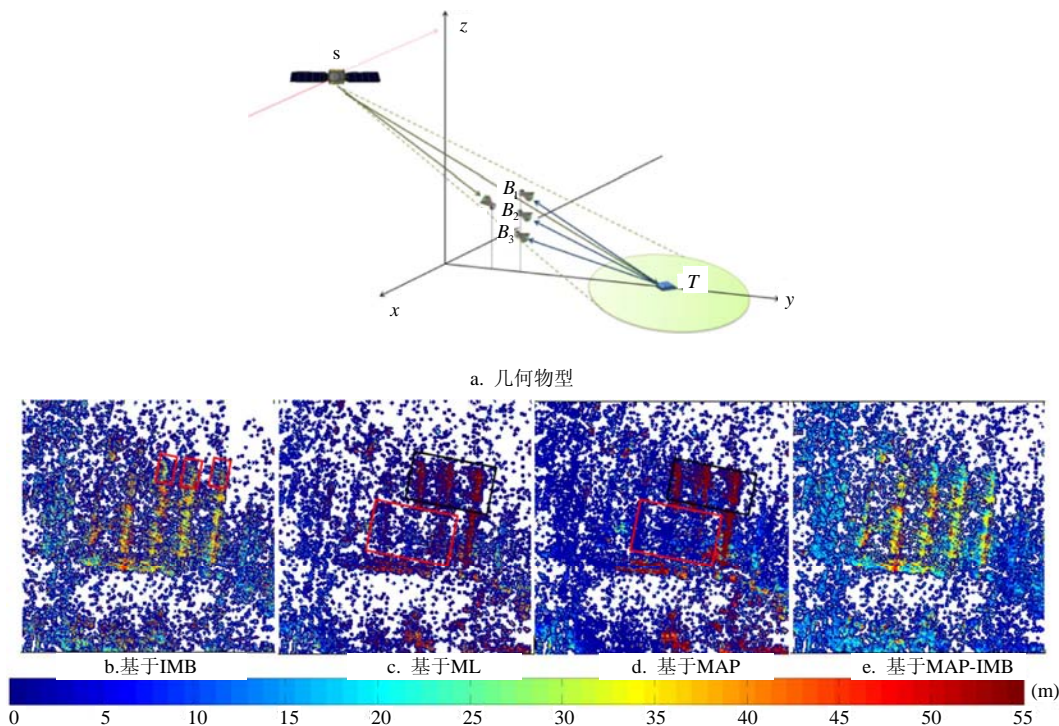


图29 实验构型和干涉成像结果

2.5 双基前视SAR

作为能够解决飞行器前视高分辨雷达成像技术难题的手段之一，并且是双基SAR的一个新的发展方向，双基SAR实现前视高分辨成像已经逐步被国内外相关研究机构认可并正在引起重视。文献[39]认为，双基SAR一个重要的应用就是实现航空平台的前视雷达成像。FGAN公布的研究报告也认为双基SAR可以获得的一个明显的好处就是实现前视成像^[45-48]。文献[49-50]也把双基前视SAR作为未来的一个主要研究方向。

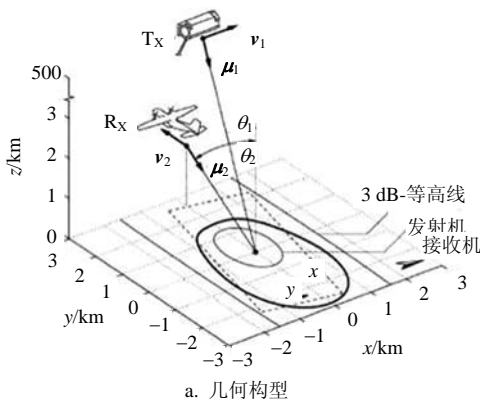
2009年，德国FGAN-FHR开展了星/机双基后视SAR试验^[33]，该试验采用TerraSAR-X卫星平台作为发射站，安装在C-160飞机上的PAMIR雷达为接收站，成像结果如图30所示。



b. 成像结果

图30 德国FGAN-FHR星机后视SAR成像试验结果

2011年至2012年，德国FGAN-FHR又利用地面汽车平台进行发射，飞机平台前视接收，还进行了若干次双基前视SAR成像实验^[51]，成像结果如图31所示。



a. 几何构型

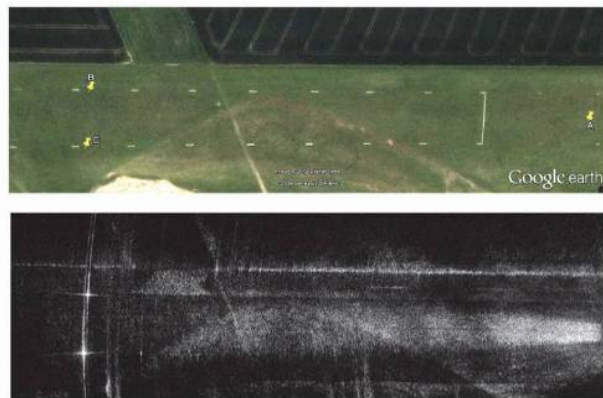


图31 FGAN地机前视SAR成像实验光学和SAR图像

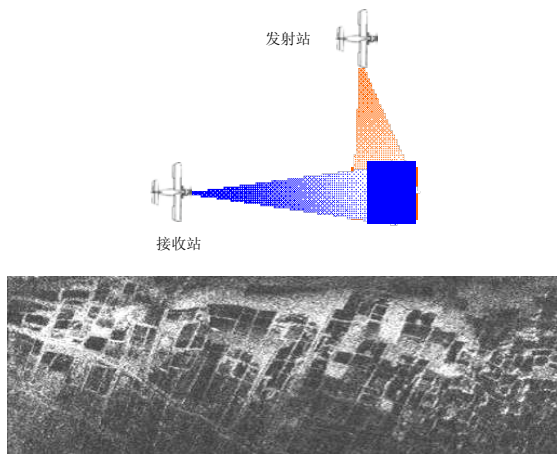


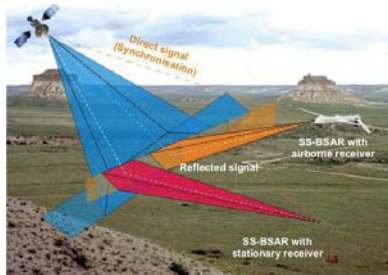
图32 电子科技大学机载国际首次机载双基前视SAR成像结果

在国内, 电子科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学和中科院电子所也有学者在这个领域做了若干探索性的研究工作^[52-57]。2012年12月, 电子科技大学在陕西进行了国际上首次机载双基前视SAR成像实验, 成像结果如图32所示^[58]。

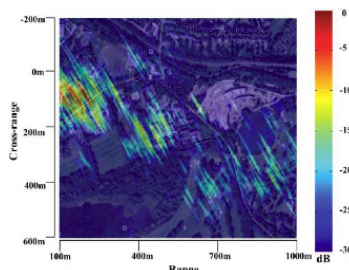
2.6 外辐射源双基SAR

外辐射源双基SAR系统主要是指当发射机为非雷达系统时的双基SAR, 如基于导航卫星, 通信卫星等外辐射源的双基SAR。

2014年, 文献[59]利用数字视频广播信号作为机会照射源, 将被动接收站安装于飞机平台上, 对地面城镇目标进行了粗略成像; 2012年, 瑞典国防研究机构利用数字视频广播信号作为机会照射源, 飞行平台作为接收站在1.5 km和3 km的高度分别对湖面及附近区域进行了成像试验^[60]。



a. 几何结构示意图



b. 实验图像

图33 GNSS外辐射源双基SAR几何机构示意图及实验图像

2012-2013年, 英国伯明翰大学GNSS卫星作为机会照射源, 分别利用固定接收站、地面运动小车接收站和直升飞机接收站, 对地面不同场景的强散射目标进行了成像试验^[61], 成像几何结构示意图及成像结果如图33所示, 从而证实了利用GNSS卫星作为机会照射源进行SAR成像的可行性。

3 结束语

双基SAR的收发分置, 为其带来了诸多的技术优势。由于相关技术的进步和新的应用需求, 近年来获得了长足的发展。本文介绍了双基SAR的工作原理, 分析了与单基SAR的成像异同、分辨能力、构型分类等, 总结了若干典型的双基SAR成像实验与系统。篇幅有限, 未能对双基SAR涉及的收发同步、成像处理、运动补偿等若干核心技术展开讨论。感兴趣的读者可查阅相关文献进行了解。未来, 适应二维空变、弯曲轨迹的双基SAR高效高精度成像算法, 与成像算法相结合的双基SAR运动补偿方法, 面向大幅宽高分辨及干涉测量、动目标指示的双基多通道SAR成像, 与双基SAR有关的目标检测、图像解译、辐射定标等将成为研究的重点。随着SAR技术的进步, 将会有更多的双基SAR系统走向应用, 产生重大的社会和军事效益。

参 考 文 献

- [1] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
YANG Zhen-qi, ZHANG Yong-shun, LUO Yong-jun. Bistatic (Multistatic) radar systems[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [2] AUTERMAN J L. Phase stability requirements for bistatic SAR[C]//IEEE Nat Radar Conf. Atlanta: IEEE, 1984.
- [3] GRISHAM. Method of satellite operation using synthetic aperture radar addition holography for imaging: U.S. Patent 4,602,257[P]. 1986-07-22.
- [4] CANTALLOUBE H, WENDLER M, GIROUX V, et al. A first bistatic airborne SAR interferometry experiment-preliminary results[C]//Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, 2004. [S.l.]: IEEE, 2004: 667-671.
- [5] DUBOIS-FERNANDEZ P, RUAULT O, WENDLER M, et al. The ONERA-DLR bistatic experiment: Design of the experiment and preliminary results[C]//Advanced SAR Workshop. Quebec: [s.n.], 2003.
- [6] DUBOIS-FERNANDEZ P, CANTALLOUBE H, RUAULT D P O, et al. Analysis of bistatic scattering behavior of natural surfaces[C]//Proceedings EUSAR 2004. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [7] DUBOIS-FERNANDEZ P, CANTALLOUBE H, VAIZAN B, et al. ONERA-DLR bistatic SAR campaign: Planning,

- data acquisition, and first analysis of bistatic scattering behavior of natural and urban targets[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153: 214-223.
- [8] WALTERSCHEID I, ENDER J H G, BRENNER A R, et al. Bistatic SAR processing using an Omega-K type algorithm[C]//IGARSS. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [9] ENDER J H G. A step to bistatic SAR processing[C]//Proc of EUSAR. [S.l.]: [s.n.], 2004: 356-359.
- [10] WALTERSCHEID I, BRENNER A R, ENDER J H G. Geometry and system aspects for a bistatic airborne SAR-experiment[C]//Proc EUSAR. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [11] ENDER J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [12] WALTERSCHEID I, ENDER J H G, BRENNER A R, et al. Bistatic SAR processing and experiments[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2006, 44: 2710-2717.
- [13] ZENG T, CHERNIAKOV M, LONG T. Generalized approach to resolution analysis in BSAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41: 461-474.
- [14] ZHANG Z H, XING M D, DING J S, et al. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [15] SHI J, ZHANG X, YANG J. Principle and methods on bistatic SAR signal processing via time correlation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3163-3178.
- [16] WANG W Q, DING C B, LIANG X D. Time and phase synchronisation via direct-path signal for bistatic synthetic aperture radar systems[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2008, 2: 1-11.
- [17] YULIN H, JIANYU Y, JUNJIE W, et al. Precise time frequency synchronization technology for bistatic radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(5): 929-933.
- [18] XIAN L, XIONG J, HUANG Y, et al. Research on airborne bistatic SAR squint imaging mode algorithm and experiment data processing[C]//1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007. [S.l.]: IEEE, 2007: 618-621.
- [19] CHEN J, XIONG J, HUANG Y, et al. Research on a novel fast backprojection algorithm for stripmap bistatic SAR imaging[C]//1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007. [S.l.]: IEEE, 2007: 622-625.
- [20] WU J, LI Z, HUANG Y, et al. A generalized Omega-K algorithm to process translationally variant bistatic-SAR data based on two-dimensional Stolt mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6597-6614.
- [21] RODRIGUEZ-CASSOLA M, PRATS P, SCHULZE D, et al. First bistatic spaceborne SAR experiments with tanDEM-X[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 33-37.
- [22] LEE P F, JAMES K. The RADARSAT-2/3 topographic mission[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01. IEEE 2001 International. [S.l.]: IEEE, 2001, 1: 499-501.
- [23] GIRARD R, LEE P F, JAMES K. The RADARSAT-2&3 topographic mission: an overview[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. [S.l.]: IEEE, 2002, 3: 1477-1479.
- [24] MOCCIA A, RUFINO G, D'ERRICO M, et al. BISSAT: a bistatic SAR for earth observation[J]. *Phase A Study-Final Report*, ASI Research contract I, 2002, 5(5): 2628-2630.
- [25] CHERNIAKOV M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar-prospective and problems[C]//RADAR 2002. [S.l.]: IET, 2002: 22-25.
- [26] KEYDEL W. Perspectives and visions for future SAR systems[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 97-103.
- [27] AMIOT T, DOUCHIN F, THOUVENOT E, et al. The interferometric cartwheel: a multi-purpose formation of passive radar microsatellites[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'02. 2002 IEEE International. [S.l.]: IEEE, 2002.
- [28] GUTTRICH G L, SIEVERS W E, TOMLJANOVICH N M. Wide area surveillance concepts based on geosynchronous illumination and bistatic unmanned airborne vehicles or satellite reception[C]//Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 1997.
- [29] DENISE M, RICHARD G. Bistatic radar experiment [C]//EUSAR'98 European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen, Germany: [s.n.], 1998: 31-34.
- [30] RODRIGUEZ-CASSOLA M, BAUMGARTNER S, KRIEGER G, et al. Bistatic spaceborne-airborne experiment TerraSAR-X/F-SAR: data processing and results[C]//IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2008.
- [31] BAUMGARTNER S V, RODRIGUEZ-CASSOLA M, NOTTENSTEINER A, et al. Bistatic experiment using TerraSAR-X and DLR's new F-SAR system[C]//2008 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). [S.l.]: VDE, 2008: 1-4.
- [32] 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 Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3268-3279.
- [33] ESPETER T, WALTERSCHEID I, KLARE J, et al. Bistatic forward-looking SAR: Results of a spaceborne-airborne experiment[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 765-768.
- [34] BALKE J. Field test of bistatic forward-looking synthetic aperture radar[C]//IEEE International Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 424-429.
- [35] WANG R, LOFFELD O, NEO Y L, et al. Focusing bistatic SAR data in airborne/stationary configuration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 452-465.

- [36] GOH A S, PREISS M, STACY N J S, et al. Bistatic SAR experiment with the Ingara imaging radar: Preliminary results[C]//2008 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). [S.l.]: VDE, 2008: 1-4.
- [37] CAZZANI L, COLESANTI C, LEVA D. A ground-based parasitic SAR experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2132-2141.
- [38] SANZ-MARCOS J, LOPEZ-DEKKER P, MALLORQUI J J, et al. SABRINA: a SAR bistatic receiver for interferometric applications[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 307-311.
- [39] ENDER J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [40] WALTERSCHEID I, ENDER J H G, BRENNER A R, et al. Bistatic SAR Processing and Experiments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44: 2710-2717.
- [41] GIRARD R, LEE P F, JAMES K. The RADARSAT-2&3 topographic mission: an overview[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'02. [S.l.]: IEEE, 2002.
- [42] MARTIN M, KLUPAR P, KILBERG S, et al. TechSat 21 and revolutionizing space missions using microsatellites [C]//Proc Aiaa/usu Conference on Small Satellites. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [43] WANG R, DENG Y, ZHANG Z, et al. Double-channel bistatic SAR system with spaceborne illuminator for 2-D and 3-D SAR remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8): 4496-4507.
- [44] SHAO Y F, WANG R, DENG Y K, et al. Digital elevation model reconstruction in multichannel spaceborne/stationary SAR interferometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2080-2084.
- [45] BALKE J. Bistatic forward-looking synthetic aperture radar[C]//IEEE International Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2005.
- [46] BALKE F. Field test of bistatic forward-looking synthetic aperture radar[C]//IEEE International Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 424-429.
- [47] BALKE J, MATTHES D, MATHY T. Illumination constraints for forward-looking radar receivers in bistatic SAR geometries[C]//Radar Conference, EuRAD 2008. European: IEEE, 2008: 25-28.
- [48] BALKE J. SAR image formation for forward-looking radar receivers in bistatic geometry by airborne illumination [C]//2008 IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-5.
- [49] GIERULL C H. Bistatic synthetic aperture radar: TIF report (phase I)[C]//Technical Report. Canada, Ottawa: Defence R&D, 2004.
- [50] MURRAY M. Taking reconnaissance to another level[R]. [S.l.]: Sandia National Laboratories, 2004.
- [51] WALTERSCHEID I, PAPKE B. Bistatic forward-looking SAR imaging of a runway using a compact receiver on board an ultralight aircraft[C]//2013 14th International Radar Symposium (IRS). [S.l.]: IEEE, 2013.
- [52] HU C, ZENG T, LONG T, et al. Forward-Looking Bistatic SAR Range Migration Alogrithm[C]//2006 CIE International Conference on Radar. [S.l.]: IEEE, 2006: 1-4.
- [53] SUN J, LV Y, WEN H, et al. The Polar Format Imaging Algorithm for Forward-looking Bistatic SAR[C]//2008 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). [S.l.]: VDE, 2008: 1-4.
- [54] QIU X, HU D, DING C. Some reflections on bistatic sar of forward-looking configuration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 735-739.
- [55] WU J, YANG J, HUANG Y, et al. Bistatic forward-looking SAR: Theory and challenges[C]//2009 IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-4.
- [56] WU J, LI Z, HUANG Y, et al. Focusing bistatic forward-looking SAR with stationary transmitter based on keystone transform and nonlinear chirp scaling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 148-152.
- [57] LI Z, YAO D, LONG T. SPECAN algorithm for forward-looking bistatic SAR[C]//2008 9th International Conference on Signal Processing. [S.l.]: IEEE, 2008: 2517-2520.
- [58] YANG Jian-yu, HUANG Yu-lin, YANG Hai-guang, et al. A first experiment of airborne bistatic forward-looking sar preliminary results[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2013.
- [59] GROMEK D, KULPA K, SAMCZYŃSKI P. Experimental results of passive sar imaging using DVB-T illuminators of opportunity[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, (99): 1-5.
- [60] ULANDER L M H, FRÖLIND P O, GUSTAVSSON A. VHF/UHF bistatic and passive SAR ground imaging [C]//2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). [S.l.]: IEEE, 2015.
- [61] ANTONIOU M, CHERNIAKOV M. Experimental demonstration of passive GNSS-based SAR imaging modes[C]//Radar Conference 2013. [S.l.]: IET International. 2013.

编辑 税红

杨建宇(1963—), 教授, 博士生导师, 电子科技大学科技委主任, 国务院学位委员会第七届学科评议组成员, 中国电子学会无线电定位技术分会信号与信息处理专委会主任委员, 教育部科技委信息学部委员, 四川省学术与技术带头人, 四川省有突出贡献的优秀专家。



主要研究领域为新体制雷达探测与成像技术, 在包括IEEE TGRS、TSP、TAES、JSTARS、Radarcon、IGARSS等期刊和会议上发表学术论文300余篇, 授权发明专利40余项, 获得国家发明二等奖1项, 国防科技进步二等奖1项, 部技术发明一等奖1项, 部省科技进步一等奖3项, 军队科技进步二等奖1项。