

高分辨率宽观测带星载 SAR 技术研究

盛磊, 刘小平

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要: 星载合成孔径雷达因其全天候、全天时的侦察性能, 倍受军事和民事应用关注, 目前高分辨率宽观测带 SAR 是星载合成孔径雷达研究的热点问题, 在需要进行全球大范围动态监视或高重访周期观测的局部热点地区的应用中都希望能够采用高分辨率宽观测带成像。在讨论多种用于实现宽观测带 SAR 的系统技术的基础上, 提出一种基于方位向多波束和距离向波束扫描方法的高分辨率宽观测带星载 SAR 系统设计方法, 并结合一个设计实例, 详细分析系统性能和设计时应注意的若干问题。

关键词: 星载合成孔径雷达; 高分辨率宽观测带; 方位向多波束; 距离向扫描

中图分类号: TN959 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2013)02-0130-06

Research on High-Resolution Wide-Swath Spaceborne SAR Technology

SHENG Lei, LIU Xiao-ping

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: Due to its all-weather, day and night imaging capability, spaceborne SAR is becoming a focus in military and civil applications. Currently, the research of high-resolution wide-swath(HRWS) SAR is a hot spot, which is required by global dynamic supervision or periodical observation of local area. In the paper, some HRWS technologies are discussed. Then, a new method for designing HRWS SAR system based on azimuth multi-beam and elevation beam scan is proposed. By an example, the system performance is analyzed, and some attentions in design are given.

Key words: spaceborne synthetic aperture radar(SAR); high-resolution wide-swath(HRWS); multiple azimuth beam; elevation beam scan

1 引言

星载合成孔径雷达(SAR)是一种能够适合于民事和军事应用的有效监视工具, 能够全天候、全天时地提供空间分辨率达到米级、甚至亚米级的全球地表信息^[1]。当星载 SAR 系统运行于接近极地的轨道时, 系统以重访周期为间隔, 具有潜在的近似全球覆盖的监视能力, 而重访周期长短受卫星平台的轨道特性和雷达波束在地球表面划过的观测带宽度决定。基于上述观点, 星载 SAR 的观测带宽越大, 完成全球覆盖所需的轨道圈数也就越小。在一般的应用中, 宽观测带星载 SAR 系统能够以更高的重访周期监视某个特定目标区域。

对于常规 SAR 系统, 例如 ERS-1, 其观测带宽是 100 km, 对特定区域的重访周期大约是 3 天, 可以满足对地质特性和农作物等一般性监视需求, 但是对于其他动态信息, 例如人造目标的监视, 需要更短的重访周期。通过增加星载 SAR 系统的观测带宽, 是缩短重访周期的一种有效途径。另外, 对目标实施监视时, 高分辨率也是星载 SAR 系统永恒的追求目标之一。但是分辨率与观测带宽是 SAR 系统的一对固有矛盾, 源于系统对脉冲重复频率(PRF)的不同要求。增加观测带宽和提高分辨率后带来的突出问题就是 SAR 原始数据率会相应增加。随着信息存储与传输技术的发展, 数据率问题终将被解决。那么, 剩下的核心问题就是如何实现高分辨率和宽观测带。在随后的讨论中, 先给出问题产生的原因, 再简要分析几

种增加观测带宽的常用方法,如 ScanSAR 技术、脉冲调制技术、双波段系统技术、多波束技术等方法,最后重点介绍一种新颖的高分辨率宽观测带星载 SAR 系统的技术方案——方位向偏置相位中心(DPC)多波束结合距离向波束扫描(ScanSAR),并分析其中的一些设计要点。

2 常规 SAR 系统分析

反映星载 SAR 系统性能并直接影响 SAR 系统规模和设计参数的主要指标有几何分辨率、观测带宽、模糊度、图像信噪比等,在 SAR 系统设计中这几项指标呈现相互关联和制约关系,特别是星载 SAR 系统,因为卫星平台体积、重量、功耗的限制,参数相互制约关系更为明显。

在星载 SAR 系统参数设计时,为了增加距离向不模糊的观测带宽度,需要降低 PRF,而 SAR 系统方位向的高分辨率要求系统具有较高的 PRF 以满足方位向的采样率,因此分辨率与观测带宽是一对固有矛盾。在星载 SAR 系统中每个观测带的 PRF 参数设计要受到雷达发射干扰和星下点回波干扰的影响,即观测带选取将受到“盲区”限制,解决“盲区”成像问题将给高分辨率宽观测带 SAR 系统设计增加难度。为避开发射干扰,满足距离向模糊度要求,目标回波必须在一个脉冲重复周期内接收和采集,因此 SAR 成像观测带斜距投影 W_s 必须满足下列限制:

$$W_s < \frac{c}{2f_p} < \frac{cL_a}{4V_{st}} \quad (1)$$

式中, c 为电磁波传播速度; f_p 为脉冲重复频率; L_a 为天线方位向尺寸。

$$W_s = \theta_r R \cdot \operatorname{tg} \theta = \frac{\lambda R}{L_r} \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (2)$$

式中, θ_r , L_r 分别为天线距离向波束宽度和尺寸; θ 为天线波束入射角。将式(1)、(2)合并,可得天线口径面积应满足条件:

$$A > \frac{4V_{st}\lambda R}{c} \operatorname{tg} \theta \quad (3)$$

由式(3)看出,为满足距离和方位模糊度要求,天线口径面积有最小值限制,且随着天线波束入射角和目标斜距的增加,最小面积要求增大。考虑到发射和天底干扰、脉冲宽度、天线指向误差(含卫星姿态、变形误差)、地物高程差等因素的影响,满足模糊度限制的最小天线面积如式(4)所

示,式中 $k = 4 \sim 8$ (视误差情况取值)。

$$A_{\min} = \frac{kV_{st}\lambda R}{c} \operatorname{tg} \theta \quad (4)$$

对于条带 SAR 模式,图像方位向极限分辨率为 $\delta_x = L_a/2$,可见天线方位向尺寸限制了条带模式方位分辨率,若要获得高方位分辨率,需减小天线方位向尺寸。把 $\delta_x = L_a/2$ 代入式(1),在卫星速度 $V_{st} = 7500 \text{ m/s}$ 时,得到如下经验公式:

$$\frac{W_s}{\delta_x} < \frac{c}{2V_{st}} \approx 20000 \quad (5)$$

从式(5)可以看出,对于普通条带模式,在入射角一定的情况下,观测带宽与方位分辨率之比小于 20000,分辨率越高观测带宽越小。例如,在方位分辨率为 5 m 的情况下,观测带宽应小于 100 km。考虑到图像信噪比、模糊度等指标以及星下点回波干扰和发射干扰的限制,实际观测带宽将在 60 km 左右。

关于星下点回波干扰和发射干扰形成“盲区”对观测带宽设计的限制问题,通过一幅“斑马图”来说明。以卫星高度 790 km 为例,卫星速度 $V_{st} = 7500 \text{ m/s}$,实现 5 m 方位分辨率的天线方位尺寸为 $L_a = 9 \text{ m}$,方位向信号的多普勒带宽为 $B_{\text{fdc}} = 2 \times 0.886 \times V_{st}/L_a = 1477 \text{ Hz}$, $\text{PRF} = B_{\text{fdc}} \times 1.1 = 1624 \text{ Hz}$,斑马图如图 1 所示,图中的斜线区域为干扰区,即“盲区”,菱形空白区可取到的有效观测带宽都是 $< 200 \text{ km}$,观测带选择需要在不同的菱形空白区中挑选。如果要一次性观测 200 km 地距范围,需要解决“盲区”成像模糊问题。

因而,在观测带宽与分辨率制约关系和“盲区”限制双重影响下,如果要求观测带宽大于 200 km,并保持 5 m 分辨率,即突破了常规星载 SAR 的限制时,必须寻求新方法来解决。下面讨论几种常用的宽观测带 SAR 系统方案。

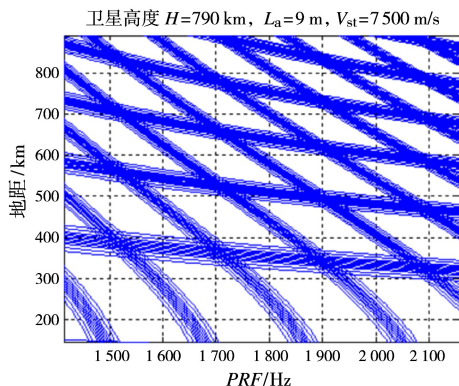


图1 卫星高度 790 km 的斑马图

3 宽观测带 SAR 技术对比

宽观测带和高分辨率是星载 SAR 的发展趋势之一,因此需要采取某些措施突破常规 SAR 系统设计中存在的矛盾,这也正是目前国内外星载 SAR 系统应用研究的热点之一。通过研究表明,现已有多种方法用于实现宽观测带微波成像,如 ScanSAR 技术、脉冲调制技术、双波段系统技术、多波束技术等方法。

3.1 ScanSAR 技术

ScanSAR 是一种最为传统地实现宽观测带的方法,原理示意图如图 2 所示。目前国内外已发射的星载 SAR 系统中大都具有此种工作模式,它采用距离向的分时多波束方法,以牺牲方位向分辨率来实现距离向的宽观测带指标。 N 次扫描后,成像算法做 n 视处理来抑制相干斑,此时系统可获得的分辨率表示为

$$\delta_{xscan} = \delta_x (nN + 1) \quad (6)$$

即分辨率 δ_{xscan} 下降为不扫描时分辨率 δ_x 的 $nN + 1$ 倍,观测带扩展 N 倍。此方案适合于低分辨率的应用场合。以上例参数说明,200 km 观测带宽,需 4 次扫描,单视处理 $n=1$ 时,方位分辨率的降低将 5 倍,即能够实现 25 m 分辨率,200 km 观测带宽,但是难以实现 5 m 分辨率情况下 200 km 宽观测带成像。

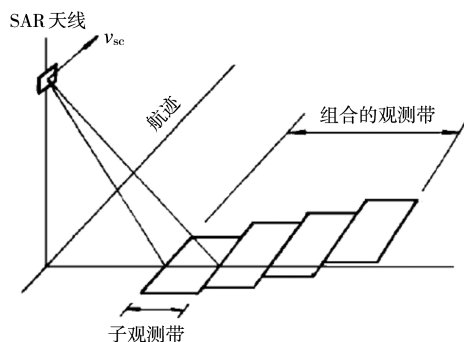


图 2 ScanSAR 原理示意图

3.2 脉冲调制技术

脉冲调制技术是一种基于多调制技术的宽观测带 SAR 实现方法^[2],可以在保持 SAR 分辨率的情况下扩展观测带,并利用“变脉冲周期技术”来避免盲区问题。它的基本思想是采用单孔径天线

收发信号,波束照射宽度覆盖整个观测带宽,将观测带分成 K 个子观测带,通过轮流发射 (PRF 保证方位不模糊) 对应各子带调制方式的脉冲来扩展观测带,如图 3 所示。

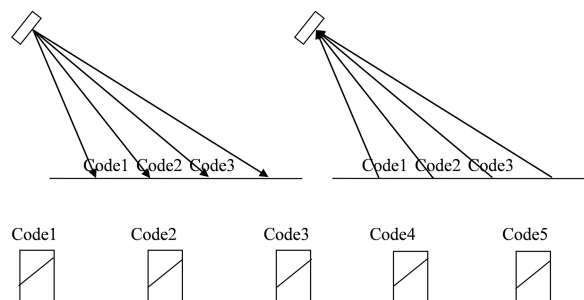


图 3 脉冲编码调制法的波束覆盖与收发关系

该方案的理论基础是发射波形采用正交编码调制波形,不同编码波形在频域里是完全可以分离的、不混叠的,可以采用扩展频谱多址技术,用 K 种码长相同的伪随机序列将观测带扩展。当轮流地发射不同编码波形时,如果能够利用算法从回波信号中解决距离模糊问题,使得不同编码脉冲在距离向对应不同子观测带的回波,从而实现高分辨率宽观测带成像。

但是由于编码的问题和前后接收多个回波相关性,造成子带隔离度不高,当对“面目标”回波信号进行匹配滤波时,信号的旁瓣电平抬升,使得距离模糊问题难以解决,使图像质量下降。另外,由于采用宽波束发射覆盖整个观测带,引起天线收发双程增益都下降,转而对卫星平台电源功率提出很高要求。“变脉冲周期技术”在解决“盲区”成像问题时,也会产生图像模糊和信噪比下降问题。

3.3 双波段系统技术

双频段系统是指把两套不同波段的 SAR 系统组合在一起,从原理上来分析,是另一类型脉冲调制技术的应用,即把脉冲调制到波长差别较大的两个双波段上,例如 L/C,或 C/X 波段,在距离向形成两个子波束照射相邻的子观测带,利用载频的不同,在接收机中使用具有高截止特性的带通滤波器把不同子观测带内的回波区分出来,但是一个载频内“盲区”问题同样存在。

双频段系统技术相对于脉冲编码调制技术,具有子带间隔高度高的优点;相对 ScanSAR 技术,可以在方位向分辨率不下降的情况下,扩展距离

向的观测带宽;还有一个更具吸引力之处是,双波段系统可以利用双波段 SAR 成像不同特征的融合,服务于一些特殊的军事和民事应用。但是双频段系统技术要想在卫星平台上实用,必须解决两方面问题:

(1) 双波段 SAR 成像基理问题

为了使双波段 SAR 成像真正发挥实用价值,必须解决好两个波段对于不同监视目标和场景的成像基理问题,说明双波段 SAR 成像的不同之处究竟如何使用在不同目的的军事和民事应用中。比如在双波段 SAR 图像融合应用中,需要利用对同一场景两个波段 SAR 图像的不同之处,发现目标场景在单波段系统中不能获得的新信息;而在双波段宽观测带 SAR 系统中,两个波段的子观测带需要进行拼接后才能合成宽观测带,在处理拼接问题时,通常都是希望两个子带内重叠图像的特征是相当的一致,而双波段系统必然导致图像特征的明显不同。因而,如何处理好双波段 SAR 图像不同之处在“一正一反”两种不同应用中所遇到的成像基理,是研究人员必须回答的问题。

(2) 工程实现问题

双频段系统即采用两套雷达系统,两套天线阵面和相关中央电子,利用体积和重量来换取性能提升。尽管开展双波段天线共面设计技术的研究有助于减小天线面积和体积,但是重量仍然是问题,而且天线背后的馈电网络更为繁杂,给天线展开机构和展开过程控制增加了复杂性。由于双波段总是采用高低波段搭配,在汲取载频不同带来的子带隔离度高的优点后,也要为低波段系统天线增益较低,付出相应的电源功耗或降低系统灵敏度的代价。在工程实现上双波段系统参数设计(两个波段子系统性能平衡设计)、生产(双波段天线共面制造技术)、地面测试与在轨测试(天线方向图、内定标、外定标)都增加了相当的复杂性,造成两个频段 SAR 图像目标检测和定量分析的实用性较差。

3.4 多波束技术

多波束技术是采用同时多波束方法实现宽观测带 SAR 指标,分为两类:(1)距离向同时多波束(Multiple Elevation Beam, MEB);(2)方位向同时多波束(Multiple Azimuth Beam, MAB)。它们

都包括单相位中心(Single Phase Center, SPC)和多/偏置相位中心(Multiple/Displace Phase Center Multibeam, MPC/DPC)两个子类。

3.4.1 距离向多波束技术

距离向单相位中心多波束(SPC MEB)技术^[3](如图 4(a)所示)发射时使用一个在距离向主瓣很宽的波束,然后用几个在距离向相邻并且较窄的波束接收,天线在接收时形成 K 个波束分别对应 K 个子观测带,如果能够区分这 K 个脉冲回波,就可将观测带扩展到 K 倍。这样可以扩展观测带同时避免距离向模糊,这种方法的缺点是会产生相邻波束之间的旁瓣干扰和“盲区”。而双波段技术就是为了解决距离向相邻波束之间的旁瓣干扰而引入两个隔离度高的载频。

距离向多相位中心多波束(MPC MEB)技术^[4](如图 4(b)所示)发射和接收时都是使用宽波束, K 个波束接收相同的观测带宽内的目标回波信号,在避免了相邻波束旁瓣干扰,保持分辨率不变的情况下,实现宽观测带。将回波信号脉冲压缩之后,再利用叠加在一起的 K 个分辨单元(脉冲之后的分辨率单元)的信号之间的相移规律来从混叠的信号中提取出 K 个分辨率单元的信号。此方法的缺点是总体信噪比为常规 SAR 的 $1/K$ 。

另外,“盲区”问题是距离向同时多波束技术的通病,在采取措施解决“盲区”成像问题时,都会引入新的图像模糊和信噪比下降。

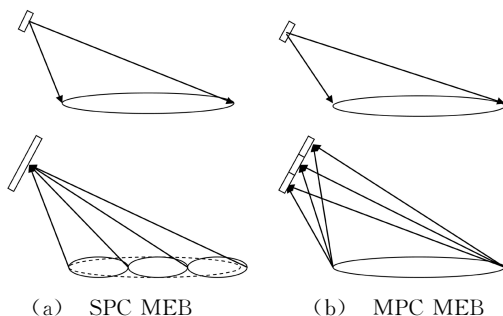


图 4 距离向多波束示意图

3.4.2 方位向多波束技术

方位向单相位中心多波束(SPC MAB)技术^[5](如图 5(a)所示),类似于距离向单相位多波束接收方法,采用低 PRF 避免距离模糊,方位向宽波束发射信号,方位向形成几个相邻并且较窄的接收

波束,此时方位向数据按照方位角(或多普勒中心频率)分成几块。尽管对每块数据欠采样导致频谱混叠,但在各自多普勒中心频率已知的情况下,通过信号处理的方法获得所需要的多普勒带宽,达到所需的方位向分辨率。该方法的缺点也是会产生相邻波束之间的旁瓣干扰,引起方位向模糊,仿真表明 3 个接收波束的情况下,旁瓣电平引入 10 dB 的方位向模糊,严重影响成像质量。因而,低副瓣单相位中心多波束接收天线设计难度加大。

方位向多相位中心多波束,又称方位向偏置相位中心多波束(DPC MAB)技术(如图 5(b)所示),它是多波束技术中最具技术优势的方案。为了突破 PRF 对观测带宽和方位向分辨率的限制,Currie 等人提出 DPC 多波束接收条带成像模式^[6],它降低了系统实际工作的 PRF,可以避免距离模糊,增加观测带宽,而在方位向宽波束发射和接收,可以提高分辨率。在该模式下,整个天线在方位向是由多个子孔径天线组成的,每个子孔径天线都有一个相位中心用于接收信号。方位向 DPC 多波束成像处理技术采用方位向一发多收形式,将方位向实际采样率提高为发射脉冲重复频率 PRF 的几倍,在实现宽观测带(对应低 PRF)的同时,提高方位向分辨率。这种方法不存在旁瓣干扰,但是会因为采用多通道技术,而增大天线的方位向长度;观测带宽不能大于“盲区”间可选的最大观测带限制,只能在菱形区内选择;另外,当 PRF 与平台速度失配时,引入“方位向非均匀采样”问题,但是此问题的解决有着较好的理论基础和实践经验。

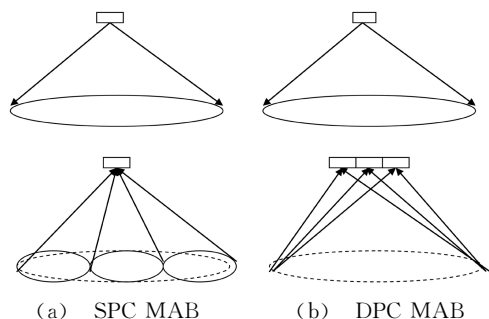


图 5 方位向单发多收示意图

4 高分辨率宽观测带 SAR 设计实例

在上一节中着重讨论了四大类实现宽观测带 SAR 的技术方案,通过分析发现它们都有明显的

优点,但是在解决一方面问题的同时有存在其他方面的问题。当星载 SAR 系统的分辨率和观测带宽指标要求都非常高时,“盲区”问题尤为突出时,具有“距离向同时多波束”性质的技术方案都不太合适,如脉冲调制技术、双波段系统技术、距离向多波束技术。

因而,只有考虑具有“距离向分时多波束”和“方位向多波束”的方案,即 ScanSAR 和方位偏置相位中心多波束(DPC MAB),如图 6 所示。但是,ScanSAR 技术是以牺牲方位分辨率为代价增加观测带宽,适合低分辨率场合,没有“盲区”问题。而 DPC MAB 技术是在增加观测带的同时提高分辨率,但是观测带宽不能突破“盲区”间可选的最大观测带限制。

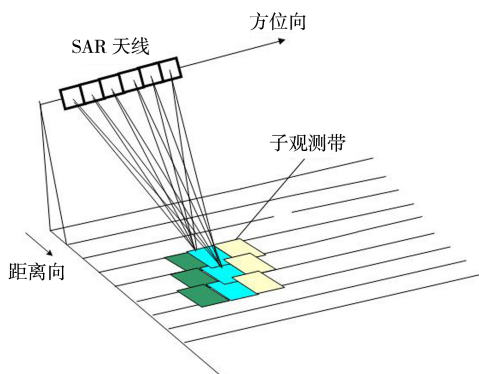


图 6 方位向单发多收+距离向波束扫描原理示意图

通过比较 ScanSAR 与 DPC MAB 的优缺点,发现具有明显的互补性。因而,本文提出一种新的实现高分辨率宽观测带 SAR 的方法——方位向偏置相位中心多波束结合距离向波束扫描,即 DPC MAB+ScanSAR 技术。利用 DPC MAB 技术,使用多通道天线后,在保持 PRF 不变的情况下,提高系统的极限分辨率,再利用 ScanSAR 技术,通过距离向波束扫描,分时覆盖宽观测带,同时将分辨率下降到目标分辨率,实质上是利用 DPC MAB 技术解决 ScanSAR 增加观测带宽同时分辨率下降的问题。

以前面的参数为例,常规 SAR 模式天线方位向尺寸 9 m 时,可以实现 5 m 分辨率和 60 km 观测带,通过 ScanSAR 技术,4 次扫描,观测带增加到大于 200 km,但是方位向分辨率下降 $4+1=5$ 倍,即 25 m 分辨率,此时,再采用 DPC MAB 技术,在方位向形成 5 个波束,9 m 长天线被分为 5 个通

道,每个通道天线长度为 1.8 m,得到极限分辨率为 $1.8/2 \times 1.1 = 0.99\text{ m}$,4 次扫描后,分辨率为 $0.99 \times (4+1) = 4.95\text{ m} \approx 5\text{ m}$,达到了不扫描时系统的高分辨率。由此可见,在天线长度尺寸不变的情况下,利用 5 个通道和 4 次扫描实现了高分辨率宽观测带指标,另外轨道高度的设计与可获得的最大观测带宽有密切关系,此处不再详述。采用上述参数进行了子观测带的波位设计与系统灵敏度指标的仿真分析结果如图 7 和图 8 所示。

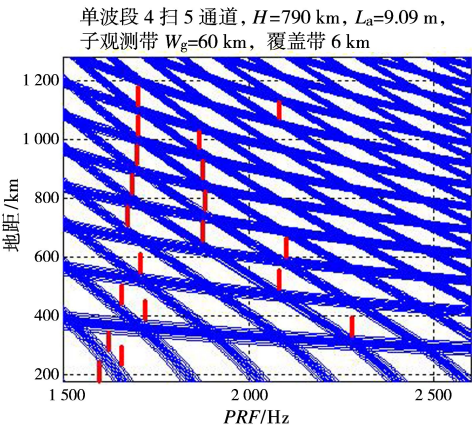


图 7 子观测带的波位设计

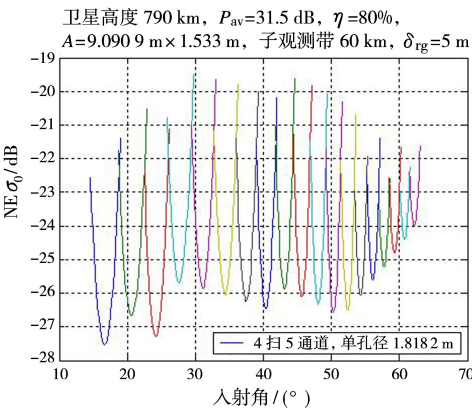


图 8 子观测带的系统灵敏度 NESZ 指标

通过仿真分析,发现采用该技术方案后,星载 SAR 能够实现高分辨率、宽观测带指标的同时,因为每个子观测带的 PRF 可变,能够避开“盲区”的问题,没有旁瓣干扰问题。但是,在系统设计时,需要处理好以下几方面问题。

(1) 方位向非均匀采样可以通过方位向 DPC 多波束成像处理算法来解决,目前有频域法、时域法和空域法三种可以选用,计算量较大,需要采用快速算法,并提高地面处理站的数据处理能力。

(2) 多通道幅相一致性问题。当多通道之间

的初相误差不进行补偿时,方位向多通道综合处理的性能会明显下降。这个问题可以通过两方面来解决,一是设计出幅相一致性较好的多通道接收系统,二是通过 SAR 系统的内定标网络和外定标测试,进行初相误差、带内起伏特性的测量。SAR 是一个线性时不变系统,初相误差是一个常量,在成像处理时很容易进行补偿。而各个通道的带内起伏特性,则可以用内定标方法进行消除。

(3) 由于 DPC MAB+ScanSAR 技术采用了多波束宽发宽收,因而雷达天线的发射增益减小,接收增益不变,与其他多波束宽观测带方案一样也存在对功率要求有所增加的问题,这是宽观测带 SAR 固有的特性,因为要在更宽的观测带内达到相同的图像信噪比,就必须把更多的能量辐射出去。为了降低对平台电源功率消耗,可以适当增加天线面积,重量会略增加,体现折衷设计思想。但这是宽观测带星载 SAR 系统中卫星平台必须要承担的资源消耗任务,因为没有理由在提高性能的同时,而不增加相关资源的消耗。

5 结束语

本文分析了常规星载 SAR 系统无法实现高分辨率宽观测带指标的原因,讨论现有的几种宽观测带 SAR 技术方案的基本原理,总结了系统设计与工程实现时遇到的和需要解决的相关问题。在全面比较现有技术方案的优点与缺点后,提出一种新颖的,却有较好技术基础的,用于实现高分辨率宽观测带星载 SAR 系统的技术方案——方位向偏置相位中心多波束结合距离向波束扫描,即 DPC MAB+ScanSAR 技术,它结合方位向多波束技术和 ScanSAR 技术的特点,相互取长补短,实现高分辨率和宽观测带的性能。

参考文献:

[1] 彭发祥,李宏伟,蔡斌,等. 超高分辨大测绘带星载 MIMO-SAR 成像[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(5): 409-415.
PENG Fa-xiang, LI Hong-wei, CAI Bin, et al. Ultra-High Resolution Wide Swath Imaging with Spaceborne MIMO-SAR [J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(5):409-415. (in Chinese)