

合成孔径雷达 (SAR) 数据的光学和数学处理技术的现状和未来

胡家陞 张宪英

摘要: 本文介绍并详述了用于合成孔径雷达数据处理的光学和数字技术。比较了二者的优缺点。预测了合成孔径雷达的光学处理和数字处理的发展趋势。

一、绪 言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种强有力的全天时的成像技术。它广泛地应用于地球资源考察和军事侦察。自五十年代后期以来,它的发展一直受到相干光学处理技术的强有力支持。到目前为止,仍然主要依靠光学处理技术来获得雷达图像^{[1][2]}。1978年6月海洋卫星-A (Seasat-A) 进入地球轨道,内装合成孔径雷达系统。从此星载SAR的时代开始了。随后,1981年11月的SIR-A (美国航天飞机成像雷达-A)和1984年10月的SIR-B (美国航天飞机成像雷达-B)相继飞入太空,后两者均装载了SAR的光学记录系统。

无论是现在还是将来,当考虑一种SAR成像系统和它的应用时,必须认真地考虑图像的质量,幅面和信息容量。这些都和所需的费用密切相关。对于雷达图像,通常有两大类型:一类是对图像中所反映的具体环境进行认真的判读和分析,这就需要高的图像分辨率,而对实时性要求不强烈;另一类是对日常现象的成像,例如,浮冰、海洋气候、农业的周期性监视等,对这类图像的质量要求可以放松,但数据量很大,实时性要求高。因此,在选择SAR数据处理系统时,主要考虑的是应用领域和所需的费用。

本文将对目前所使用的光学和数字的数据存储和处理技术进行比较。同时对未来的发展趋势作必要的预测。可以,说到目前为止,无论是光学的还是数字的技术,没有一种是实时的。但其中的某些可看作快速处理和传递系统。就目前所处理的数据量而言,可用于星载的SAR数据处理的最快的系统仍然是斜平面光学处理器。只要给出适当的电-光输入装置和一个可提供实时处理的替代系统,就可研制成实时光电处理器。

光盘存储技术的发展,特别是可涂擦系统的进展^[3],将在SAR的光学处理中具有潜在的应用。一旦对光盘介质存储的数据能够用光学方法实现并行的读取和处理,那么光电实时处理的成功将指日可待。

在追求SAR数据处理的实时化方面,光学技术和数字技术都在发展,它们各自有其优、缺点、根据具体的应用,并在经费允许的情况下,对SAR数据的处理系统进行公正而无偏见的选择是十分重要的。就目前的情况及其发展看,还不足以看出是光学处理方法优越还是数字处理方法优越。但有一点是肯定的,无论是机载的还是星载的SAR系统,目前所使用的主要处理手段还是光学处理器,它已商品化了^[4]。而对于数字处理设备,至今尚无商品,只有实验室设备^[5]。

对于以胶片为基础的光学处理器的一点质疑是动态范围，它通常小于 30dB。但是，如果采用干涉全息探测技术，就可以使动态范围达到 60dB。这对分析地面的背景目标已经足够了。对于数字系统，可用提高计算精度的办法来提高动态范围，这无疑会使计算量大为增加，同时存储也成问题，其结果是机构庞大和费用增加。

综上所述，在可预见的将来，不是光学处理取代数字处理，也不是数字处理代替光学处理，而是二者的相互补充和促进。现在就武断地选择其一，势必会造成难以弥补的损失。

二、SAR数据的光学处理

合成孔径雷达自诞生以来，相干光学处理技术就一直是获得图像的主要方法，目前仍在不断的发展和完善。而且它同光电技术的结合，正在朝光电实时处理的方向发展^[6, 7, 8]。有充分的证据表明：在未来几十年内它不会由于数字的发展而隐退，而是更富有生命力^[8]，因为它具有图像质量高、速度快、信息容量大、成本低等本征特点。

最早的光学处理器是由柱透镜-锥透镜-球透镜组成的系统。但由于质量不高而又不能跟踪，因此被斜平面光学处理器所取代^[9]。

六十年代末期，ERIM（美国密执安环境研究所）的A·Kozma 等人首先研制成功斜平面光学处理器^[9]。该系统充分利用望远镜系的成像特性，用一组球面望远镜和一组柱面变倍望远镜的巧妙组合来处理具有不同参数的雷达数据，并获得了高分辨率的地面图像。它的结构示意图如图 1 所示。

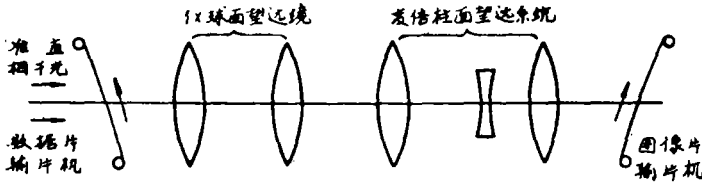


图 1 斜平面光学处理器结构示意图

该系统经过不断改进和完善，至今仍为机载SAR和星载SAR数据的主要处理系统。现在在美国Good Year公司已推出该系统的商品。

ERIM 研制的SAR斜平面光学处理器承担了处理Seasat-A的SAR数据的处理任务，获得了 6.8m 的方位分辨率和 21.6m 的斜距分辨率，接近于理想极限。它在一天内可处理出 12 000km × 100km 的Seasat-A的SAR数据，获得清晰图像。而用最高水平的计算机(1985年水平)处理相同的图像，则需300小时，分辨率仅为 25m。由此可见，无论从速度还是从精度上看，在目前，数字处理技术还十分落后于斜平面光学处理器^[5]。

长春光机所于1986年研制成功斜平面光学处理器，在1:10万比例尺下，地面分辨率可达 1.7m，整个指标达到美国近期生产的UC-3光学处理器的水平。我们还增加了CCD线阵接收器件，可以把图像连续地显示在彩色监视器上，减除了冲洗胶片的程序，大大提高了处理速度。

八十年代初期开始发展 AOD/CCD 型实时光电处理系统^[6]。它把光学和电子学的优势充分结合起来，并利用 SAR 返回信号二维可分离的特性，对斜距维和方位维信号分别进行压缩和相关处理，为SAR数据的光电实时处理开辟了现实可行的途径。

图2是AOD/CCD光电实时处理器的示意图。在该处理器中,雷达返回信号被输入到AOD(声-光器件)中,AOD被激光二极管的光束照明,该光束在X方向被准直,激光二极管与SAR的PRF(重复频率)同步发射,激光二极管的脉冲宽度要小于雷达Chirp带宽的倒数之半,以便使AOD中由于SAR输入信号引起的运动衍射光栅在照明瞬时被冻结。我们知道,地面上每一散射点引起的衍射光栅是夫累涅尔带板,后面再用柱面成像系统聚焦,这就完成了斜距维的脉冲压缩。

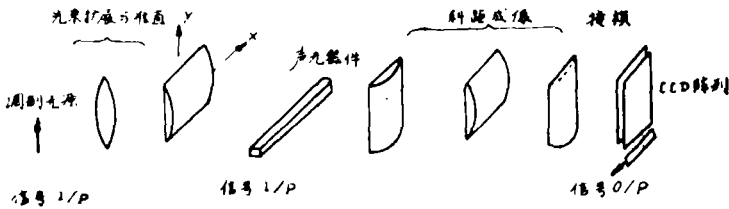


图2 AOD/CCD光电实时SAR处理器

方位脉冲压缩(也称相关)是这样来进行的,使由每个散射点来的雷达返回信号的二次相位因子同一个空间强度调制相关,该空间调制匹配于每个方位维的相位历史。虽然地面上每个散射点的相位历史相同,但它们具有不同的时间延迟,因而导致了图像上空间位置的差别。这样一来,斜距维脉冲压缩的结果和方位维相关的结果均成像在二维CCD探测器上,该CCD工作在位移和相加(Shift and add)的模式中,斜距维和方位维聚焦的图像以等于SAR的PRF(脉冲重复频率)的速率由CCD读出。

这种与雷达返回信号的二次相位因子相匹配的空间强度调制(也称掩模)可用干涉方法来制作。在起初的实验装置中它是固定不变的^[4],但是雷达和目标之间的几何关系有时会发生动态变化(外因或内因的影响),这样固定的掩模就难于连续地提供完好的聚焦像。为了克服这一缺点,其掩模可以用一个实时的二维SLM(空间光调制器)来代替,以使空间强度调制能随雷达返回信号同步变化,这就提高了该光电处理系统的适应性,成像质量也相应提高了。

由于该系统可实时处理雷达信号,结构紧凑、抗震及抗干扰能力强,可机载或星载。它的斜距维和方位维的分辨率取决于AOD和CCD的水平。就1982年的水平而言,它曾处理Seasat-A的SAR数据,其方位分辨率可达到22.5m,斜距分辨率视Chirp带宽而定,甚至可更高,可见已接近实用程度。它的速度每秒可达1.43亿次加法和乘法运算,斜距画幅为38.5Km。

三、数字SAR数据处理

我们知道,全带宽的星载SAR数据的实时数字处理目前在经济上仍然没有竞争力^[10]。当然,机载的SAR的实时数字处理在七十年末期进行了实验性工作。它采用专用的数字硬件,并装在飞机上。但整个性能是低的,在斜距维没有压缩,仅在方位维进行了相关处理,也没有运动补偿功能。另一方面,为了减少数据量,仅提供了8bit的动态范围。即使作了这些简化,其结果也是费用高,体积大,功耗大。

对于星载的SAR数据的数字处理,目前最好的当推JPL(美国加州的喷气动力实验室)的IDP系统(Interim Digital Processor)。它由一个SEL32/77计算机和三个AP-1208B阵

处理器组成，在分离通道上的两个 Ampex 300 Mbit 的磁盘用作大容量的存储介质，第三个磁盘通道作软件和辅助数据储存，来自 HDDR (High-density digital recorder) 的数据通过光纤输入到磁盘存储系统。这些硬件的费用已超过50万美元，设计费用和软件费用还没包括在内。该系统在处理 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 的 Seasat-A 的 SAR 图像大约需 2.5 小时，分辨率为 25m。很显然，它的处理速度大大低于斜平面光学处理器。

ESA (European Space Agency) 正准备发射海洋监视卫星 (ERS-1)^[11]，它将装载一部 SAR，计划需要两种形式的 SAR 处理器，即 (1) 快速传递系统，在数据捕获的几小时内提供图像 (2) 高分辨率处理器，对时间性不作严格要求。对于快速传递系统，以牺牲像质为代价来实现高速度，争取在 10 分钟左右的时间处理 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 的粗图像，这个速度如能实现，将超过以往的任何数字处理系统。但是即使这样，也仅仅和目前的斜平面光学处理器的速度相当。

现在，速度更快的数字处理器正在研究中，现有的超大型计算机，如 Cray1-S, Cyber 205 和 CCD 高级灵活的处理器，有可能为快速传递系统提供所需要的信息容量，它的另一个好处是，在不用作 SAR 数据处理时，还可做它用。

然而，这样的计算机是相当昂贵的，比如每台计算机本身的费用就高达 800 到 1400 万美元。以 Cyber 205 为例，主机占地 $7 \times 3\text{m}^2$ ，为冷却具有 1 兆字存储的基本中心计算机就需要两个 30 吨的水冷容器。需 250k VA 供电，此外还需备用发电机。如果再把外围设备加上去，其体积和功耗之大就更可想而知了。这样的数字处理器无论是机载还是星载都是不现实的。因此我们认为，要实现 SAR 数据的数字处理的实时化，靠采用大型通用机的办法是不现实的，必须设计专用的数字处理系统，并加强并行处理能力，即采用专用主机与并列处理器组合，再配以相应的外围设备。只有这样，才有可能实现可飞行的 (可机载或星载的) 数字图像处理系统。

四、未来的数字的和光学的 SAR 数据处理

在一定意义上，SAR 的趋势将朝向更大的画幅 (200km 或更大) 和实时处理能力方向发展。对粗的 SAR 数据进行快速处理，对感兴趣的图像进行事后精处理。以 1984 年 10 月发射的 SIR-B 为例，该系统飞行持续了若干天，所装载的 SAR 获得的数据几乎要花二年的时间才能发理完，最快的判读员最少需要若干个月才能粗略地判读一遍。

另一个例子是计划中 VOIR (金星轨道成像雷达)。它的分辨率为 300m，斜距为 400km，它的处理要求将是 Seasat-A 的 SAR 数据量的 3 000 倍^[12]。

第三个例子是美国 SDI 计划中的合成孔径雷达，它可能需要高达每秒 10^{12} 次的浮点运算的处理速度，相当于 2 000 个 Cray 超大型计算机。虽然数字处理的费用一直在下降，速度和容量在提高，但也难以承受这么大的数据量。要知道，仍然用增加集成度的办法来提高加法的速度已经不像以前那么容易了。为了获得适用于特殊目的的更高速度 (例如 SAR 的需要)，就必须引进并行处理，这无疑会大大增加硬件的费用，但除此以外，别无它法。

有人曾对光学装置能否安装在卫星上 (或其它空间载体上) 持怀疑态度^[13]。实际上，许多复杂的光学系统早已安装在飞机上或卫星上了，如大地卫星 (Landsat), SIR-A, 等均安装了光学记录仪，至于侦察相机和航测相机那就更不用说了。因此只要对光学零部件进行精心制作，对相干光学处理器进行必要的封装和减震处理，(实际上，星体上的防震要比飞机上

好得多),光学处理器装在星体上是毫无问题的。这就是说,相干光学处理系统和光电实时处理系统是可飞行的,上述的理由鼓励人们进一步研究结构紧凑,稳定性好的相干光学处理系统^{[6], [7]}。

对于机载或星载的 SAR 数据的实时处理系统,还有一些问题要解决。比如图像的传输系统和以地面为基础的图像记录和储存设备。就目前而言,无论从记录图像的密度还是从经济上来考虑,胶片仍不失为最好的记录介质,当然从发展看,光盘存储可能会有巨大的潜力,这些记录方式更适合于光学记录。

是可飞行的 SAR 处理器好,还是地基的实时处理系统更好些,这是目前仍然在争论的问题。对于可飞行的处理系统,主要取决于应用、费用和载体的承载能力,但我们认为,在满足应用的前提下,以地面为基础的实时处理系统会更好些。这对于体积、重量和供电问题

表 1

种类 特点	SAR数据的光学处理	SAR数据的数字处理
尺 寸	目前的体积较大,但 AOD/CCD 型光电处理结构紧凑,具有可飞行性。	目前的体积大、笨重,但随着集成度的提高及阵列处理器的实现,体积可缩小,也具有可飞行性。
速 度	具有并行处理能力,速度快、容量大,使用 AOD 和 CCD 后可实现实时处理。	具有实时处理潜力,但目前尚难以实现。
成 本	成本低	成本高
灵 活 性	可处理不同参数的 SAR 数据且可编程序控制。灵活性逊于数字处理	对专用数字系统,灵活性受限制,也可编程控制。
使用情况	目前 SAR 数据的绝大多数处理仍采用光学装置,且已有商品。	只有实验性装置,无商品
实 时 性	目前处理速度快于数字系统,可望实现实时光电处理。	处理速度慢于光学,可实现实时处理。
动态范围	输出受显示和记录介质限制,一般为 8 bit,干涉记录和实时显示可增加动态范围。	取决于字的长度,受经费限制,一般为 8 bit
信号和图像存储	胶片是十分有效的二维数据存储介质,也可用光盘存储。	用磁带或高密度磁带,体积庞大,有可能用光盘记录。
运动补偿	对斜平面光学处理器有一定困难,但用 AOD/CCD 实时光电处理则可利用多点技术。	可利用多点技术
旁瓣控制	采用孔径加权技术	信号数据加权技术
聚 焦	人工聚焦快且方便,自动聚焦也简单易行	人工聚焦不可能,自动聚焦可用相位信息实现
发展趋势	AOD/CCD 光电实时处理,近期内可望实现实时处理。	专用机加阵列处理器,实现实时处理尚需相当时间

的要求就不那么苛刻了,剩下的只是数据传输问题了。

光学处理由于具有二维并行处理的本征能力,因此处理速度之快和信息容量之大,是目前数字计算机无法相比的,光学处理实时化的问题不在于速度和容量,而在于数据输入/输出,记录和存储等。而这些问题在数字计算机中也会遇到。当然,一般认为,数字处理技术在灵活性方面要比光学技术好些,这是指一般的情况。而对SAR数据的实时处理却不是这种情况。因为至今所有的数字处理器都是耗资巨大的专用系统。以满足速度和数据量的要求,以后的发展更会如此。因此在这种情况下,数字系统的灵活性就差多了,显不出比光学处理器优越。

目前已经进行和正在进行的工作是,强有力的光学并行处理设备同灵活的数字控制系统,以及AOD、CCD器件的巧妙结合使高质量的,结构紧凑的,功耗低的,可飞行的实时光电处理器得以实现^[4],且具有相当大的灵活性。

现在国际上用于SAR的数字和光学处理技术均在迅速发展。但离开真正的实时处理还具有一定的距离。可以预料,在不久的将来,实时光电处理系统和数字处理系统均可能出现。但基本上可以肯定的是,在相当的一般时期内,光电处理系统的价格-性能比要优于数字系统

根据文献^{[5], [6]}提供的数据和资料,可以将SAR数据的光学处理技术和数字处理技术列表1比较。

五、结 论

从以上的讨论和分析,可以得出以下几点结论性意见。

1. 目前的SAR数据(不论是机载的SAR还是星载的SAR)基本上以光学处理为主,尚未实现真正的实时处理,计算机处理只有实验室装置。

2. SAR数据的光学处理和数字处理的发展表明,它们都是可飞行的,但二者均要做相当的工作。

3. 到目前为止,光学处理的速度高于数字处理,而且光学处理的成本低,功能低、速度快。灵活性方面稍逊于数字处理。

4. 不论光学处理还是数字处理,它们都在迅速发展,它们都可以实现准实时和实时处理,但还有许多工作要做。由于SAR的数据量太大,要考虑的不仅是速度问题,而且还有数据记录和存储问题等。

5. 光学处理和数字处理各自有其优缺点,它们不是一种取代另一种,而是互相促进,互相补充,仅仅考虑一种技术都是不明智的,这样会导致不可弥补的损失。

参 考 文 献

- [1] C. J. Cutrona, et. al., Proc. IEE, 54, 1026 (1966)
- [2] C. I. Dwyer, et. al., Proc of a Working Group Meeting, Esrin, Frascati, Italy 1979, p43-52
- [3] Topical Meeting on Optical Data Storage, IEEE Catalog. No84 CH 2038-8, Monterey, California, 1984
- [4] See UC-3 Optical Processor, Good Year Company.

- [5] D. A. Ausherman, Opt. Eng., 19 No2 157 (1980)
- [6] D. Psaltis, et. al., Opt. Eng., 21, No5, 822 (1982)
- [7] M. Haney, et. al., Proc. SPIE 495, 1984
- [8] M. Haney, et. al., Proc. SPIE 545 108 (1985)
- [9] A. Kozma, et. al., Appl. Opt., 11 1766 (1972)
- [10] C. D. Daniel, IEE Proceedings, 133 pt. J., No.17 (1986)
- [11] M. Jones, et. al., E S A J., 145 (1983)
- [12] C. Wu, Proc. SPIE, 241, 11 (1980)

The Nowday State and Potential Development on Optical and Digital Techniques for Processing SAR data

Hu Jiasheng Zhang Xianying

Abstract

In this paper optical and digital techniques for processing SAR data are introduced and reviewed. Advantages and disadvantages of both optical and digital processing are compared. The nowday state of the processing techniques for SAR is discussed. There potential development for the future is also foretold in the paper.