

基于光电协同的雷达实时信号处理技术

刘兴钊 高叶盛

(上海交通大学电子工程系, 上海, 200240)

摘要: 随着雷达系统在通道数量、带宽和分辨率上的不断提升, 对于数据处理能力和处理速度提出更高的要求。在一些特定的应用场合, 体积、功耗等也是数据处理机设计时需要考虑的重要因素。单纯依靠数字技术的雷达信号处理模式已经或者即将暴露出在运算能力、运算速度和功耗等方面的局限性。本文立足于新型信息处理理论和方法的研究, 提出了光电协同信息处理技术。该技术将光学复杂运算与电子学逻辑控制相结合, 利用空间光学信息处理完成高密度、海量数据的算术运算, 利用电子学处理完成传输控制、逻辑运算等操作。光电协同处理具有高速并行的处理特点, 而且处理主要依靠光学无源器件, 功耗极低。最后给出了光电协同信息处理技术在合成孔径雷达成像处理和阵列雷达波束形成处理上应用的实例。

关键词: 光电协同处理; 实时信息处理; 雷达信号处理; 合成孔径雷达成像; 波束形成

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Real-Time Radar Signal Processing Based on Optics-Electronics Cooperative Information Processing

Liu Xingzhao, Gao Yesheng

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: With the increase of the number of channels, bandwidth and resolution, it makes greater demands on data handling capacity and speed. In some specific applications, the volume and power consumption are important factors to consider when designing a data processor. The radar signal processing mode, which relies solely on digital technology, has exposed limitations in computing power, computing speed and power consumption. Based on the research of new information processing theory and method, this paper puts forward the optics-electronics cooperative information processing. The technology combines optical computing operations with electronic logic control, utilizes the spatial optical information processing to complete the high-density and massive data arithmetic operations, and applies the electronic processing to the transmission control, logic operations and other operations. Photoelectric co-processing has high-speed parallel processing characteristics and the processing relies heavily on optical passive devices with very low power consumption. This paper provides the examples of applications about the optics-electronics cooperative information processing in synthetic aperture radar image formation and array radar beamforming.

Key words: optics-electronics cooperative information processing; real time processing; radar signal processing; SAR image formation; beamforming

引 言

实时信息处理技术是现代信息处理的关键,是由信息获取向决策制定转换的重要环节,尤其在如今信息膨胀和大数据的时代,信息处理的时效性至关重要^[1-3]。雷达是信息化武器装备的“千里眼”,随着雷达多功能、一体化和超宽带等发展趋势的日益深化,实时信息和信号处理的需求迫切,而器件在处理能力和处理功耗等方面的局限日显突出^[4-7]。现代雷达技术的发展离不开数字技术和微波技术的进步,随着雷达系统在高分辨率、多功能和智能化等诸多方面的技术需求,阵列雷达系统将提供多达上万甚至更多的接收通道,而且每个通道的信号带宽高达几十甚至几百兆赫兹。如此大带宽、海量数据传输和处理对于现阶段的数字技术而言都是极大的挑战,同时,传输速率、处理速率、噪声损耗和功耗等都是下一代雷达系统亟待解决的关键问题^[8,9]。

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)是一种高分辨率微波成像雷达,也是雷达谱系中对数据存储和数据处理有较高要求的系统。在军用和民用领域,对星载 SAR 系统都有高分宽度的需求,势必带来海量数据处理的问题。同时,SAR 系统作为一种传感器,为信息和情报的传递服务,处理的时效性往往会成为决策制定的关键要素。相控阵体制是雷达技术的重要发展方向,大型宽带相控阵雷达在收发通道数量、信号带宽等方面对于系统能力都是极大的提升,与之相对的,对信号处理而言是极大的挑战。高速、海量和实时信号处理需求的出现,使得现有的数字技术所提供的处理能力“捉襟见肘”,同时外部工作环境和装备总体对信号处理机的约束也使得很多数字器件无法长期稳定工作,甚至根本无法使用。近些年,光电子技术被引入雷达领域,微波光子学成为研究热点^[10-12]。微波光子学是将微波技术与光子学技术相融合的新兴交叉学科,其主要研究内容包括:微波信号和毫米波信号的光子学产生方法,微波信号在光纤链路中的传输与分配,以及微波信号通过光子学方法进行信号处理等。雷达作为一种主动式探测和感知的工具,回波数据携带各类目标信息而且数量巨大,而现阶段的微波光子学尚不能提供回波数据的信息和信号处理的解决方案。微波光子学的兴起对于雷达技术是重大的革新,系统带宽能提升至十几甚至几十兆赫兹,而如此大量数据的接收、采样和处理以目前数字处理水平无法满足要求,新型雷达实时信号处理技术的需求十分迫切。

本文提出了基于光电协同的雷达实时信号处理技术。事实上,早已有利用光学技术解决雷达信号处理问题的成功先例。20 世纪 60 年代,美国环境实验室(Environmental Research Institute of Michigan, ERIM)的研究人员利用斜平面处理技术成果实现了 SAR 数据的聚焦成像^[13]。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 1.7 m,系统指标达到美国当时生产的 UC-3 光学处理器水平。随着大型甚至巨型相控阵雷达系统的研究与发展,庞大通道数和大带宽所需要的数据处理能力对于现阶段数字技术而言是巨大的挑战。与此同时,光学处理本身具有的高速并行能力和高密度数据承载能力使其重新获得雷达领域研究人员的重视,具备为未来雷达系统提供快速海量数据处理的潜力。而且,光学处理系统还具有体积小、重量轻、功耗小和抗宇宙辐照等特点。

从 2008 年开始,加拿大国家光学研究所(National Optics Institute, INO)联合欧空局(European Space Agency, ESA)研制了实时星上 SAR 光学处理原型系统^[14,15]。该系统是针对 ENVISAT 搭载的 ASAR 载荷的专用处理器。目前从公开报道的内容看该光学系统质量为 17.7 kg,体积为 630 mm × 207 mm × 140 mm(长×高×宽),功耗为 15.6 W。

在通用型的光电协处理器方面,以色列 LENSLET 公司作为这一领域的先驱提出了若干通用处理器件的构型。其中 2003 年提出了代号为 EnLight256 光学向量矩阵乘法器作为通用半导体处理器的协处理器。EnLight256 是一个功能强大的通用光学 DSP 协处理器,能够在单个时钟周期内实现向量与向量和向量与矩阵乘法。256 个元素的向量,每个元素 8 bit。该处理器可实现 256 × 256 矩阵与

1×256 向量的乘法。其数据处理流量为 $256 \times 256 \times 125 \text{ MHz} = 8\,000 \text{ GB}$ 。该系统在定位上是针对通用处理而设计的,完成的功能相对单一。其主要存在的问题是:(1)光电数字接口所能提供的数据转换量化精度十分有限,光学处理的结果无法满足后续数字运算的精度;(2)光电转换的速率过低,无法与数字系统匹配。虽然光计算很快,但数据的输入与输出效率过低,因此频繁的利用光协处理器将导致系统的效率下降。

本文立足于新型信息处理理论和方法的研究,提出了光电协同信息处理技术(Optics-electronics cooperative information processing, OPECIP)。该技术将光学复杂运算与电子学逻辑控制相结合,利用空间光学信息处理完成高密度、海量数据的算术运算,利用电子学处理完成传输控制、逻辑运算等操作。光电协同处理具有高速并行的处理特点,而且处理主要依靠光学无源器件,功耗极低。

1 光电协同信息处理理论和方法

1.1 物理含义

光电协同处理的物理学含义可用光对偶来解释。将接收到的回波中的微波波段载波替换为光载波,从而形成微波系统与光系统之间的一种对偶结构。由于采用了光载波,则可以利用光学元件对信号进行各种处理,从而代替传统的基于 DSP 的运算。图 1 中给出了一个光电对偶结构的示意图,显示了将 X 波段的阵列微波信号转换为 532 nm 波长的绿光调制的对偶结构。

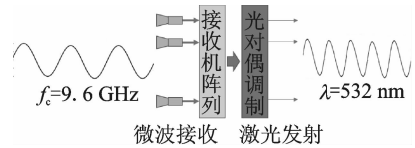


图 1 光电对偶结构示意图

Fig. 1 Sketch of counterpart processing of electronics and optics

从本质上来说,光电协同处理是基于调制理论的,它是一种把带有目标信息的射频信号调制到光频率上,在光域进行信息处理的方法。同时,进行光电对偶运算研究,在光域运用光学元件完成相应处理运算的过程。很多数字信号处理中的复杂运算在光学系统中则可以通过少数简单的透镜结构完成,因此利用光电对偶系统结构可以将电信号的处理问题转换为光信息的处理问题,而在光学系统中信号处理的时间等于光束通过整个光路的时间。光处理系统与电处理系统之间的对偶性是指两者在物理上的等效性而非数学运算过程的一致。

1.2 光电协同信息处理方法

光电协同处理理论的基本思想是将待处理的雷达信号调制在激光上,利用激光波前的空间分布实现信息的高密度承载,再将激光束通过各类光学元件以完成复杂的数学运算,而最终的结果经由光电转换器件完成数字化采样,实现与现有装备一致的数据接口。在信号处理的过程中主要的时序控制、反馈控制采用以电为主的技术手段,从而形成运算以空间光学系统为主、控制及接口以电子系统为主的光电协同处理基本架构。图 2 中给出了这一思想的基本示意图。

基于光电协同信息处理的理论和方法,进一步给出光电协同信息处理平台体系架构方法。光学处理的特点在于高速并行,处理速度与数据量无关,而只与光波传播的距离有关,数字处理的控制和运算灵活,逻辑运算便捷。本文给出了光学处理器和数字处理器“双核”协同工作的架构方案,如图 3 所示。

光电协同处理技术将电信号形式的时变信号通过光电对偶系统和光电时空转换技术使之以光信号的形式在空间中呈现一定的分布,进而利用光学元件实现对承载在光载波的电信号进行处理,达成信号处理目标。根据以上分析,该技术可以总结如下。

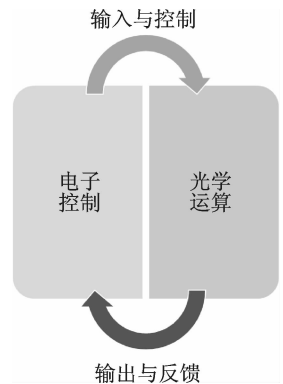


图 2 光电协同处理思想示意图

Fig. 2 Sketch of OPECIP

(1)其主要特点是信号处理的时间与信号的数据量基本无关,仅与光束通过光学元件和全部光路所需时间有关。

(2)复杂的数学运算均利用光束透过和光束反射过程实现,在模拟信号的层面解决,不需要高速的采样和高精度量化器件。

(3)系统的重要功率需求仅为激光器功率,因此在功耗、散热等方面极低。又由于采用的半导体器件和数字器件较少,系统的抗辐射性能极好,可以适应严苛的环境和系统约束。

(4)由于运算过程是以空间光的模拟信号形式完成的,因此运算过程中动态范围的变化对最终结果的精度几乎没有任何影响。

(5)由于系统处理性能提升以及系统结构的变化,允许技术人员采用更加有效和复杂的算法以进一步提升雷达系统的性能。

(6)光电协同处理技术在系统构成方面将是针对某一特定处理需求而构建的系统,其目标是技术方面通用化而在系统实现方面则是针对专门的需求而设计。

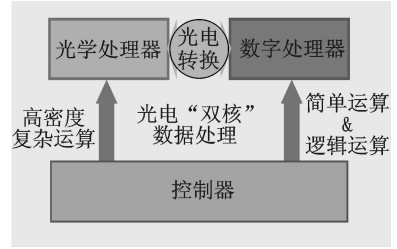


图3 光电协同处理平台架构设计
Fig.3 Design of OPECIP platform

2 光电协同 SAR 成像处理

2.1 处理系统设计

光电协同 SAR 成像处理系统的基本组成和数据流关系如图 4 中所示。图 4 所示系统结构设计主要利用空间光调制器将 SAR 回波数据调制到平行相干的激光束上,带有 SAR 回波信息的激光束通过透镜成像系统聚焦成为 SAR 图像。CCD 相机被置于透镜成像与伺服系统的像平面上,采集聚焦后的 SAR 图像并进行数字化。为使得光学 SAR 成像处理系统具有良好的成像适应性,聚焦后的 SAR 图像将送至控制器对图像质量进行分析以校正聚焦透镜系统的焦距和其他成像参数,实现基于反馈的精细聚焦处理。

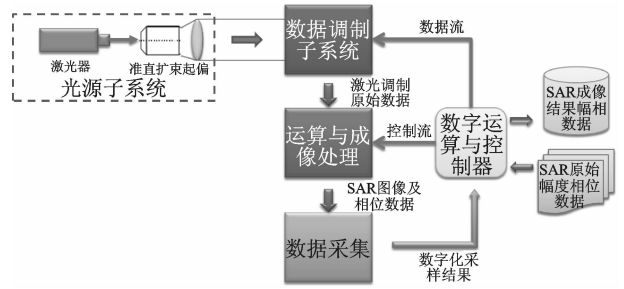


图4 系统结构和组成
Fig.4 System design of optronic SAR processing

由图 4 中可见系统可以划分为以下组成部分。

- (1)光源子系统。提供系统中的相参光源,具有高度的频率稳定性和功率稳定性。
- (2)数据调制子系统。将 SAR 原始数据加载在激光束上,这里主要是利用相位和幅度型的空间光调制器实现幅度和相位数据向激光束的调制。
- (3)运算与成像处理子系统。系统的核心之一,由透镜和相位型空间光调制器构成,完成全部的成像及所需运算。
- (4)数据采集子系统。利用光电转换器件对成像后的光信号进行采集并转化为数字信号。
- (5)数字运算与控制器。实现系统的流程控制,并根据成像结果对系统进行反馈调整,同时担负光学成像系统的输入输出接口以及完成必要的缓冲。

2.2 关键运算的光学实现

2.2.1 光学匹配滤波

如图 5 所示,令透镜的最大厚度为 Δ_0 ,在坐标 (x, y) 处的厚度为 $\Delta(x, y)$ 。它与会聚球面透镜的不同之处在于它只在轴一个维度上成弧形,从而在平面上看上去是一个矩阵而不是圆形。仍然将透镜劈

成 3 部分,如图 6 所示。注意它和会聚透镜的厚度函数非常相似,只是所有函数只和 y 有关,而与 x 无关,总的厚度为

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 - R_1(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{R_1^2}}) + R_2(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{R_2^2}}) \quad (1)$$

式中 $\Delta_0 = \Delta_{01} + \Delta_{02} + \Delta_{03}$ 。

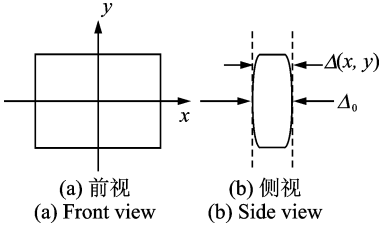


图 5 柱面透镜厚度函数

Fig. 5 Function of the cylindrical lens

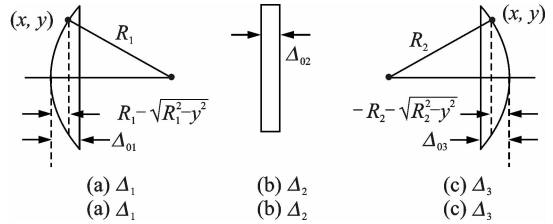


图 6 柱面透镜厚度函数计算

Fig. 6 Transform function of the cylindrical lens

同样做傍轴近似,仅仅考虑足够小的和值,使得下述公式近似成立,有

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - \frac{y^2}{R_1^2}} &\approx 1 - \frac{y^2}{2R_1^2} \\ \sqrt{1 - \frac{y^2}{R_2^2}} &\approx 1 - \frac{y^2}{2R_2^2} \end{aligned} \quad (2)$$

在这些近似下,厚度函数变成

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 - \frac{y^2}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得到

$$t_t(x, y) = \exp[jkn\Delta_0] \exp[-jk(n-1) \frac{y^2}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)] \quad (4)$$

类似地,将 n, R_1 和 R_2 组合为该透镜的焦距参数

$$\frac{1}{f} \equiv (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

忽略常相位因子,柱面透镜的相位变换改写为

$$t_t(x, y) = \exp[-j \frac{k}{2f} \cdot y^2] \quad (6)$$

从式(6)的形式来看,它可以作为二维图像其中一维(这里是 y 方向)的匹配滤波,而二次相位的系数可以通过调整焦距 f 的大小(f 也可以是负数)来调节。

2.2.2 光学距离徙动校正

距离徙动校正是高分辨率 SAR 所必须的处理步骤^[16],在本文中实现这一处理的主要思路就是利用空间光调制器的乘法功能,配合以光学系统的傅里叶变换实现在频域内的相位补偿,进而完成时域内的距离徙动校正,徙动校正量可以根据成像参数经由空间光调制器加以调整,使系统具有较高的灵活性。

设 SAR 雷达系统采用脉冲线性调频信号,调频斜率为 k ,发射信号波长为 λ ,去掉载波频率后的点目标回波信号形式可以写为

$$ss(\tau, t, R) = a\left(\tau - \frac{2r}{c}\right) \exp[-j\pi k\left(\tau - \frac{2r}{c}\right)^2 - j4\pi \frac{r}{\lambda}] \quad (7)$$

式中: $a(\cdot)$ 为发射信号包络函数; τ 为发射信号内时间(快时间或称距离时间)。

由于条带 SAR 信号具有方位移不变的特性,所以对条带模式下 SAR 信号的分析以及处理一般均在 Doppler 域展开。SAR 信号方位向的特性是与目标所在的距离门直接相关的,所以在距离时域、方位 Doppler 域内对信号进行分析和处理十分理想。信号在距离-Doppler 域内的形式,有

$$S_s(\tau, f_a, R) = \exp\left[j\left(2\pi f_a t_s - \frac{4\pi R\sqrt{4}}{\lambda} - j\pi K m_R(\tau - \tau_R)^2\right)\right] \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{1}{K m_R} &= \frac{1}{k} + R_y \\ K m_R &= \frac{k}{1 + R k \gamma}, \gamma = \frac{2\lambda(1 - A)}{c^2(\sqrt{A})^3} \\ A &= 1 - \left(\frac{f_a \lambda}{2V}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:下标 R 代表 $K m$ 在距离门 R 处的取值; f_a 为 Doppler 频率参量。其中 $\tau_R = \frac{2R}{c\sqrt{A}}$ 即为需要校正的距离徙动量在距离多普勒域内的形式。信号处理的流程如图 7 所示。

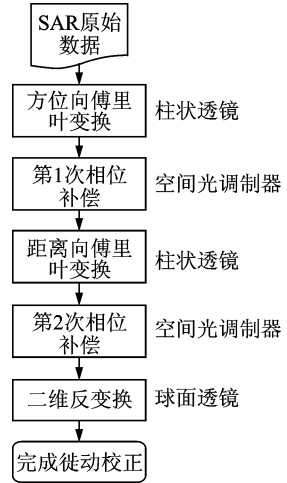


图 7 光学距离徙动校正流程图
Fig. 7 Flow chart of optical RCMC

3 阵列雷达光电协同波束形成处理

3.1 处理系统设计

阵列雷达光电协同波束形成处理总体设计方法如图 8 所示。由图 8 可见,阵列雷达光电协同波束形成处理由 5 个功能模块组成,分别为:数据缓存模块,电光转换模块,波束形成运算模块,光电转换模块和输出演示模块。每个模块的功能简述如下。

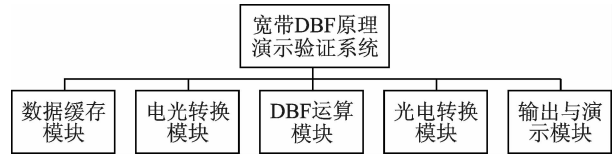


图 8 阵列雷达光电协同波束形成处理组成示意图
Fig. 8 Sketch of phased array radar optoelectronic beamforming system

(1) 数据缓存模块。用于暂存 N 个通道的雷达回波数据,后面将提到选用数字微镜阵列(Digital micromirror device, DMD)作为电光调制器件,其板上有 4~8 Gbits 的存储空间,将其作为雷达回波数据的缓存空间,能有效地提高 DMD 加载速率。

(2) 电光转换模块。用以输入数字信号与光学 DBF 处理器的接口,实现数字信号到光信号的转换。演示验证系统中选用 DMD 来实现电光转换。值得指出的是,DMD 本质上是由机械结构控制的许多反射镜构成的阵列,其本身只具备光强调制的能力,通常用于投影、显示等领域。这里将利用超像素技术(Superpixel),使得 DMD 具备高速、高精度幅度和相位调制的能力。另外,波束形成运算中的 FIR 滤波处理涉及各阶延时样本,DMD 具有阵列式结构,所以利用 DMD 进行电光调制同时也实现了 32 个通道延时样本的光输出。

(3) DBF 运算模块。用以加载滤波器权值以及求和运算。完成包括幅相加权、时延滤波和均衡滤波的权值加载。这里依然利用 DMD 超像素技术得到幅度和相位调制结果,来完成对雷达回波数据的复数加权处理。

(4) 光电转换模块。用以光学处理得到的 DBF 结果转换为相应的电信号,以便后续的输出和显示。这里选用高速 CCD 来完成对图像的采集工作。

(5) 输出与演示模块。将由光电转换模块得到的模拟电信号量化为数字信号,以及把 DBF 运算结果进行整体展示。通过改变空间导向矢量使得波束在空间形成扫描,从而利用采集的幅度数据来逐一描绘出天线波瓣图。

3.2 高精度幅度相位联合调制

针对系统设计要求和器件性能,本文提出了基于超像素技术的数字微镜阵列幅度和相位调制方法。利用这个方法,能有效地解决高速高精度幅度相位调制的问题。DMD 器件及其开发板如图 9 所示。

为了在大多数苛刻环境条件下提供高质量的图像,大屏幕投影系统转向发展数字式光处理(Digital light processing, DLP)技术。DLP 是基于微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)的器件,被称为 DMD,由美国 TI 公司在 1987 年发明。DLP 投影显示技术的核心是数字微镜器件,它是一种基于半导体制造技术,由高速数字式光反射开关阵列组成的器件,采用二进制脉宽调制技术能精确地控制光的灰度等级,加上图像处理、存储器、光源和光学系统便组成 DLP 系统,能投射大屏幕、高亮度、无缝的以及高对比度彩色图像。DMD 光开关是被称为 MEMS 的一个组件,是采用 CMOS 工艺的单片制造方式集成在 CMOS 存储器上面。每一个光开关有一片微镜子,它能转动两个方向:其中一个方向能将入射光反射到投射透镜,投射到银幕上;另一个方向可将入射光反射到吸收平面,由吸收平面把光吸收。

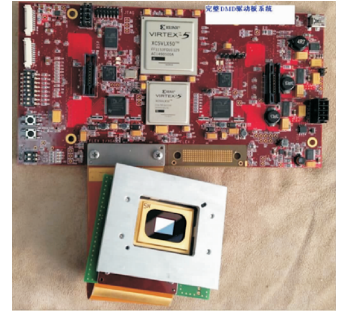


图 9 DMD 及其开发板
Fig.9 DMD and its development kit

DMD 本质上是众多反射镜构成的器件,具备对光强调制的能力,并不能直接实现对光束波前或者相位调制的能力。而在雷达信号处理中大量需要相位调制,对于宽带 DBF 演示验证系统极需要一种高速、高精度的幅度和相位调制的方法。本文提出了一种基于超像素合成技术的 DMD 幅度和相位联合调制方法。其基本原理如图 10 所示。

图 11 给出利用 DMD 4×4 (保留 3 位小数)像素融合形成的相位调制曲线。结果比较来看, 4×4 超像素具有更好的线性度,并且相位调制的种类更多,更加均匀地分布在 $0 \sim 2\pi$ 之间。

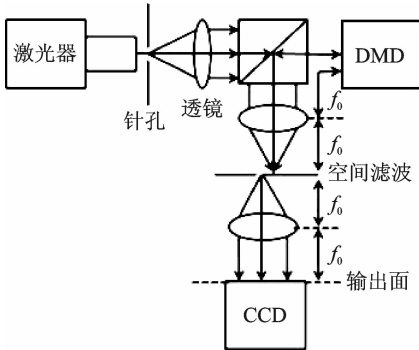


图 10 基于 DMD 的幅度相位联合调制原理图
Fig. 10 Schematic diagram of amplitude and phase modulation based on DMD

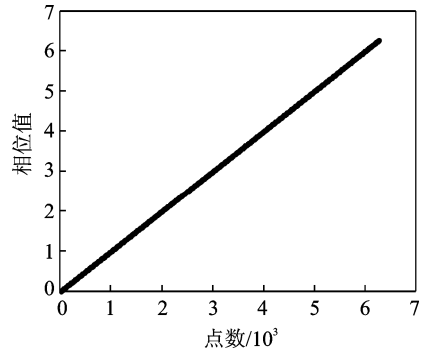


图 11 幅度相位联合调制相位调制曲线示例(4x4)
Fig. 11 Phase modulation curve of the amplitude and phase modulation(4x4)

4 试验系统与性能分析

4.1 光电协同 SAR 成像处理

光电协同 SAR 成像处理试验台系统如图 12 所示。核心器件包括: Holoeye 相位型空间光调制器,分辨率为 $1920 \text{ 像素} \times 1080 \text{ 像素}$,像素尺寸 $8 \mu\text{m}$; Holoeye 幅度型空间光调制器,分辨率为 $1920 \text{ 像素} \times 1080 \text{ 像素}$,像素尺寸 $8 \mu\text{m}$; 焦距 300 mm 透镜; Basler avA1900-60km CCD 相机。利用图 12 所示的试验台装置,对国内 1 m 机载 SAR 数据处理,结果如图 13 所示。同时,对加拿大 RADARSAT-1 数据光电协同处理结果如图 14 所示。

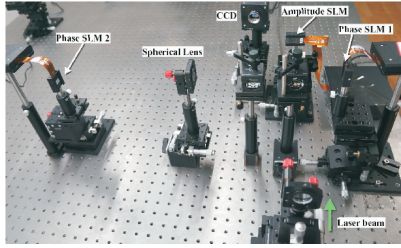


图 12 试验台系统实物展示

Fig. 12 Experiment setup of optronic SAR processing



图 13 机载 SAR 数据光电协同处理结果

Fig. 13 Result of optronic SAR processing of airborne SAR real data



图 14 RADARSAT-1 数据光电协同处理结果

Fig. 14 Result of optronic SAR processing of RADARSAT-1 real data

以上对光电协同信息处理理论进行了验证,并设计相应的处理系统完成 SAR 数据的聚焦实验。由于商用 SLM 分辨率的限制($1\,920$ 像素 $\times 1\,080$ 像素),所以上述两个成像结果是利用多个聚焦后的子图拼接而成(机载结果由 55 个子图拼接,星载结果由 60 个子图拼接而成)。需要指出,每一个子图聚焦处理的时间仅与光束传播距离有关,在上述实验中整个光路的长度约 800 mm。

4.2 阵列雷达光电协同波束形成演示验证系统

阵列雷达光电协同波束形成演示验证系统选用 TI 公司 DLP9500,分辨率 $1\,920$ 像素 $\times 1\,080$ 像素,像素尺寸 $10.8\ \mu\text{m}$ 。演示验证系统现场装调照片如图 15 所示。

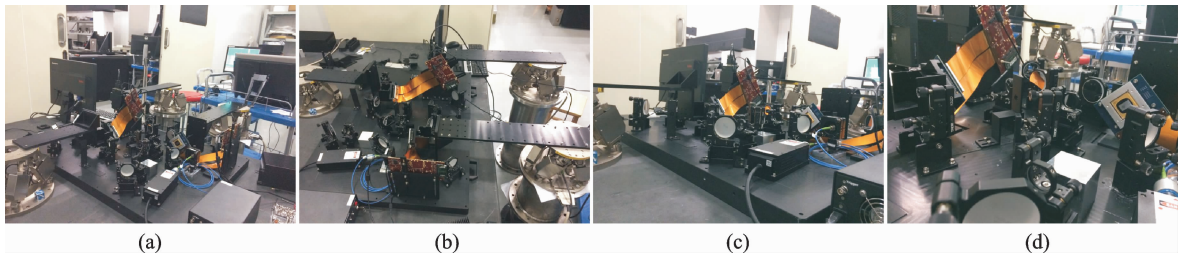


图 15 阵列雷达光电协同波束形成演示验证系统装调现场

Fig. 15 Experimental setup of PAR optoelectronic beamforming

利用 32 通道回波数据开展波束形成试验。试验的输入为模拟生成的 32 个通道的回波复数据,利用 3.2 节介绍的基于 DMD 的幅度相位联合调制方法将其加载到激光上。同时,滤波器复系数利用另一组 DMD 加载,与前者完成相关运算,最终利用透镜完成聚焦运算。单一波束形成结果与同时八波束结果用 COMS 相机记录如下。图 16 给出的是固定波束指向的结果。将波束不同指向结果逐一描绘,可得到对应的波瓣图,图 17 给出的是波束指向法线的波瓣图,其主副比为 13.35 dB,这与数值分析的结果一致。

5 结束语

本文提出了光电协同信息处理理论和方法,该技术将光学复杂运算与电子学逻辑控制相结合,利用空间光学信息处理完成高密度、海量数据的算术运算,利用电子学处理完成传输控制、逻辑运算等操作,该方法和技术具有高速并行信息处理的能力,同时具备低功耗的特点。本文基于光电协同信息处理技术,分别给出光电协同 SAR 成像处理系统和阵列雷达光电协同波束形成演示验证系统设计方法和试验结果。

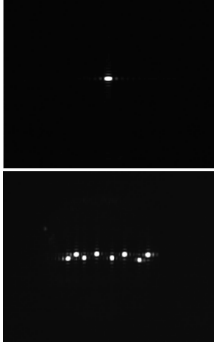
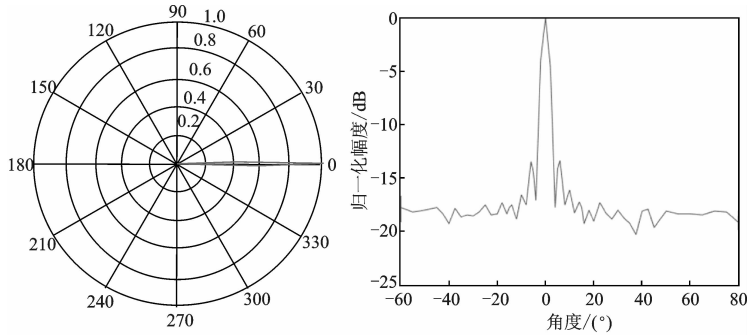


图 16 光电协同波束形成结果(单波束和同时八波束)

Fig. 16 Results of optronic beamforming



(a) 波束法线方向波瓣图
(a) Array patterns of beam normal direction

(b) 水平方向剖面图
(b) Horizon-slice map

图 17 波束法线指向波瓣图

Fig. 17 Lobe pattern of the broadside direction

参考文献:

- [1] Kuo Chin-Fu, Kuo Tei-Wei, Chang Cheng. Real-time digital signal processing of phased array radars[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2003, 14(5): 433-446.
- [2] Hsieh C H, Chiu Y F, Shen Y H, et al. A UWB radar signal processing platform for real-time human respiratory feature extraction based on four-segment linear waveform model[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2016, 10(1): 219-230.
- [3] Bonfield D J, Thomas J R E. Synthetic aperture radar real-time processing [J]. *Communications, Radar and Signal Processing*, IEE Proceedings F, 1980, 127(2): 155-162.
- [4] Pierro R S. Space-based radar: Overview, history and recent developments[J]. *IEEE Conference Long Island Systems, Applications and Technology*, 2005: 30-35.
- [5] Blunt S D, Mokole E L. Overview of radar waveform diversity[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(11): 2-42.
- [6] Quan S, Qian W, Guq J, et al. Radar communication integration: An overview[C]// *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*. Fuzhou: [s. n.], 2014: 98-103.
- [7] Mushtaq M T, Butt F A, Malik A. An overview of spectrum sensing in cognitive RADAR systems[C]// *2014 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*. Kiev: [s. n.], 2014: 115-118.
- [8] Brookner E. Recent developments and future trends in phased arrays[C]// *2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Waltham, MA: IEEE, 2013: 43-53.
- [9] Stephen L P. Recent advances in radar technology[J]. *Microwave Journal*, 2015, 58(9): 6-28.
- [10] Paolo Ghelfi, Francesco Laghezza, Filippo Scotti, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507: 341-345.
- [11] Ridgway R W, Dohrman C L, Conway J A. Microwave photonics programs at DARPA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3428-3439.
- [12] Esman R, Pappert S. Photonics for microwave generation, transmission, and processing[C]// *Optical Fiber Communication-Includes Post Deadline Papers*. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-3.
- [13] Kozma A, Leith E N, Massey N G. Tilted-plane optical processor[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(8): 1766-1777.
- [14] Marchese L, Doucet M, Harnisch B, et al. A real-time high-resolution optical SAR processor[C]// *Proc SPIE 7669, Radar Sensor Technolony XIV, 76690M*. Orlando, Florida: SPIE, 2010.
- [15] Marchese L, Bourqui P, Turgeon S, et al. Extended capability overview of real-time optronic SAR processing[C]// *IET International Conference on Radr System(Radar 2012)*. Glasgow, UK: IET, 2012: 1-5.
- [16] 朱岱寅, 俞翔, 汪玲. 海面舰船目标 ISAR 最优成像时间选择算法[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(4): 526-532.
Zhu Daiyin, Yu Xiang, Wang Ling. Optimal processing time and duration selection algorithm for ISAR[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(4): 526-532.

作者简介:



刘兴钊(1962-),男,博士,教授,研究方向:雷达系统、新体制微波遥感技术, E-mail: xzhliu@sjtu.edu.cn。



高叶盛(1983-),男,博士,助理研究员,研究方向:雷达信号处理, E-mail: ysgao@sjtu.edu.cn。