

文章编号:1001-5078(2007)09-0806-03

集成光子学微波移相器研究进展

廖进昆¹, 刘永智¹, 侯文婷², 杨亚培¹, 戴基智¹, 陆荣国¹, 高宇¹

(1. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; 2. 中国科技大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要:从集成光子学多路、高精度微波移相器在光控相控阵雷达系统中的应用背景出发, 探讨了该器件的研究进展和应用前景。

关键词:集成光子学; 微波移相器; 光控相控阵雷达; 波束形成网络

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

The Research Development of Integrated Photonic Microwave Phase Shifter

LIAO Jin-kun¹, LIU Yong-zhi¹, HOU Wen-ting², YANG Ya-pei¹, DAI Ji-zhi¹, LU Rong-guo¹, GAO Yu¹

(1. School of Opto-electronic Information, UESTC, Chengdu 610054, China;

2. Physics Department, the University of Science & Technology, Hefei 230026, China)

Abstract: The research development of integrated photonic multi-channel high precision microwave phase shifter is described, considering its applications in optical phased-array radar system.

Key words: integrated photonics; microwave phase shifter; optical phased-array radar; beam-forming network

1 引言

相控阵系统的优越性已为雷达界所认同, 正逐步应用于搜索、火控及制导雷达, 一些民用雷达也开始采用相控阵技术。但是, 电子学相控阵系统的复杂度限制了该技术优势的进一步发挥, 为克服这一不足, 目前各发达国家都在大力发展光相控阵技术。鉴于光子技术的优异特性, 雷达系统研发人员在相控阵系统中引入该技术, 如用光纤作为雷达的数据和信号传输线, 用光处理器进行雷达信号和数据的处理等。在相控阵系统中采用光子技术具有下列优点: 尺寸小、质量轻、瞬时带宽宽、传输损耗低、不受电磁干扰等, 因而该技术受到重视^[1]。

同传统的相控阵技术一样, 光控相控阵技术的关键在于波束形成, 而波束形成网络一般采用光纤延迟线真延时模块或光子学微波移相器对微波信号进行处理^[2]。随着微波信号频率的提高和相控阵天线阵元数不断增多, 采用光纤延迟线的方案由于受到体积与延时精度等方面的限制, 实现起来有一定困难, 对于机载光控相控阵雷达系统限制更为严

格。近年来, 集成光子学微波移相器取得了长足进步, 引起人们的兴趣, 本文就该领域的研究进展作一介绍。

2 集成光子学 LiNbO₃ 移相器

20 世纪 80 年代初, 日本学者 M. Izutsu 等人声称: 首次采用 Ti 扩散 LiNbO₃ 波导制备出集成光子学单边带调制器/移频器, 该器件实现了对光波的单边带调制或移频^[3]。虽然该器件主要以相干光通信与光谱学领域中的应用为背景, 但是其器件的结构形式、理论分析方法及制备工艺等都可以运用于集成光子学微波移相器的研制, 因此西方学者大多将这一工作视为微波移相器的开拓性成果。借鉴该研究工作, 有关光子学波束形成网络的研究不断涌现, 特别是有关集成光子学微波移相器的研究有较大进

基金项目: 总装预研基金 (No. 51402040105DZ02)。

作者简介: 廖进昆 (1962 -), 男, 电子科技大学光电信息学院副教授, 主要从事集成光学, 微波光电子学, 量子信息学的研究。
E-mail: jkliao66@126.com

收稿日期: 2006-11-08; **修订日期:** 2007-04-13

展,其间器件的结构形式就提出了多种,尽管这些方案不断简化并且可实现波束的大角度扫描,但是不能对每一阵元的相移量进行独立的调控,给系统的调整带来不便,使得该器件的应用受到一定的影响。

90年代初,美国 Lockheed 导弹与空间公司的 J. F. Coward 等人提出了一种新型的光子学微波移相器,即 I-Q 移相器^[4]。该器件可应用于相控阵天线波束成形,具有高的相移精度和幅度稳定度,并利用分离的集成光学部件进行了验证实验,其工作原理如图 1 所示。

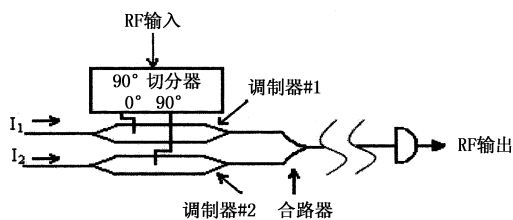


图1 I-Q 移相器原理框图

由图 1 可见,来自两激光器的光功率分别注入两只 Mach-Zehnder 调制器,微波信号由 90°功分器分成两路,即分为同相分量(I)与正交分量(Q),分别通过两只 MZ 电光调制器对光波进行调制,合路的光波经探测器实现微波信号的提取。实验表明:通过光功率 I_1 、 I_2 或调制器偏置电压的调整,微波信号可以在 360°范围内实现相移,其相移精度为 1°,幅度波动优于 0.25dB,而温度稳定性在 25℃ 以上优于 2°;若利用 Mach-Zehnder 调制器的偏置电压来控制相移量,相移量关于电压的线性度较好,这对于相移量的精确控制至关重要。

1997 年,加拿大 McMaster 大学光电子材料与器件中心的 D. R. Jez 等人首次提出了利用嵌套的 Mach-Zehnder 调制器来实现微波信号的相移^[5]。该研究在前人研究成果的基础上,进一步简化器件结构,除了具有易于实现器件的集成化等优点之外,理论分析表明器件的性能得到了提高。该项研究还在此基础上设计、制备出集成化的多路、高精度移相器,其测试结果表明该器件在 180°范围内线性度尚好;由于制备工艺等方面的问题没有将移相器与相移控制部分集成在 LiNbO₃ 单片上。与此同时,德国 Dortmund 大学的 E. Voges 等人在 Z 切 LiNbO₃ 衬底上制备出工作频率达 10GHz 的 2bit 集成光子学真延时微波移相器,其中采用小型化设计,并运用交叉波导开关来实现光延迟线的级联^[6]。

3 有机聚合物移相器

由于无机材料工艺历史相对较长,集成光子学

多路、高精度微波移相器多采用无机晶体材料 LiNbO₃ 制备,虽然在光波导和行波电极的设计与制备方面取得了重大进展,但是在提高器件的响应带宽、降低驱动电压和提高器件的集成度等方面存在困难。1999 年,以美国南加州大学(USC)的 Larry R. Dalton, William H. Steier 教授和加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 Harold R. Fetterman 教授为首的研究小组公布了他们的研究成果^[7]:他们在研究有机聚合物非线性电光材料及其器件制备工艺取得重大突破的基础上,采用新近合成的非线性聚合物材料 CLD2-ISX 首次制备出集成光子学微波移相器,该器件采用嵌套式 Mach-Zehnder 调制器构形,半波电压为 10.8V,频率响应达 20GHz;通过直流电压控制,在 7.8V 的电压调节范围内对 16GHz 的微波信号实现了移相,其线性移相范围达 108°。该器件的结构示意图如图 2 所示。

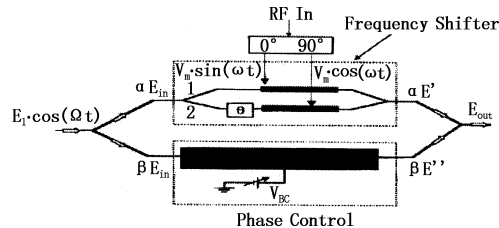


图2 嵌套 MZ 微波移相器结构示意图

由图 2 可见,该移相器由单边带调制器(SSB)与移相器(PS)构成,输入光波场经 Y 分支后分别注入 SSB 和 PS。理论分析与实验研究表明,该集成光子学聚合物微波移相器在直流控制电压下,可以实现线性移相。

2002 年,Jecheon Han 等人利用聚合物新材料 CPW1/APC 及其相关的制备工艺研制出具有独立多输出端口的光子学微波移相器^[8]。测试表明,在 20GHz 线性移相范围达 150°左右,但是在 360°范围内,相移特性呈非线性,特别是微波信号功率波动达 15dB;又经过一年多的努力,Jecheon Han 等人在单片上集成了移相器单元与四路相移控制单元,测量结果显示四路输出相互独立,在 20GHz 线性移相范围超过 360°并且线性度与微波功率波动等性能大为提高^[9],其原理结构如图 3 所示。

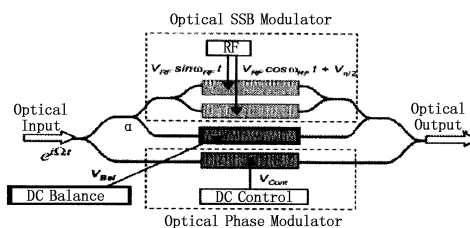


图3 带平衡电极的移相器

从图3所示,移相器部分仍由光学SSB调制器与移相控制器构成,所不同的是在原嵌套式Mach-Zehnder调制器中增加了平衡电极,旨在提高器件的线性度与功率平坦度。理论分析表明:相移量与控制电压呈线性关系,同时微波信号功率亦保持恒定,相应的理论计算结果如图4所示。

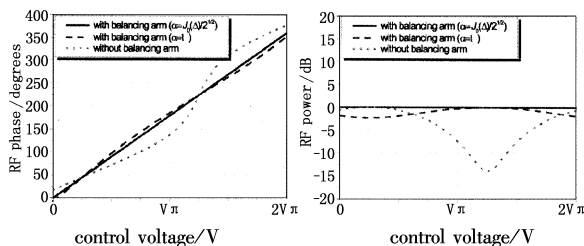


图4 相移特性与微波功率输出的理论结果

由图4可见,当 $\alpha = J_0(\Delta)/\sqrt{2}$ 时相移特性是理想的直线,微波输出功率亦保持恒定。特别是当 $\alpha = 1$ 时(对应于对称Y分支的情况),相移特性接近理想线性,微波功率波动低于3dB。从这些理论分析可见,只要在原来嵌套式MZ结构中再增加平衡电极,Y分支取为对称结构即可实现移相器的线性移相,功率波动低于3dB。实测的特性曲线如图5所示。

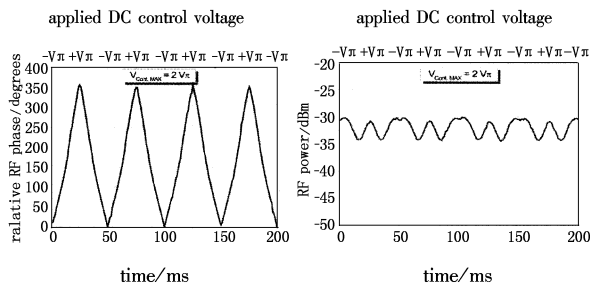


图5 相移特性与微波信号功率波动的实测曲线

由图5可以看出,该移相器在 360° 范围内线性度好,微波信号的功率波动低于4dB;这表明理论分析与实际器件十分吻合。该项研究还将移相器单元与四路相移控制、输出单元集成在一起,实现了单片集成式电光聚合物光子学微波移相器阵列,器件的尺寸为 $3.8\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 。器件的原理图与实物照片如图6所示。

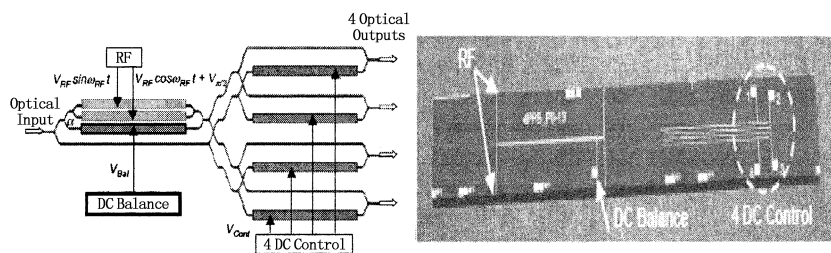


图6 多路移相器的原理图与实物照片

4 结束语

随着光控相控阵雷达系统在现代军事领域中战略地位的不断提升,其中的核心部件——集成光子学微波移相器受到人们的高度重视。从构成光波导的材料来看,该器件主要由无机晶体 LiNbO_3 或有机聚合物制备。采用 LiNbO_3 材料,制备工艺复杂,在提高集成度、降低驱动电压等方面存在困难;而非线性电光聚合物材料,其电光系数大、制备工艺简单、易于实现器件的平面与垂直集成,在制备高性能集成光子学微波移相器方面具有潜力^[10]。

参考文献:

- [1] 中电集团电子38所. 光控相控阵技术文集[M]. 合肥: 内部资料, 1999.
- [2] Peter Herczfeld. Optically controlled phased array antenna from X-band to terahertz[J]. IEEE MWP'04, 2004, 8 - 11.
- [3] Masayuki Izutsu, Shinsuke Shikama, Tadasi Sueta. Integrated optical SSB modulator/frequency shifter[J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 1981, 17(11): 2225 - 2227.
- [4] D R Jez, K J Cearns, P E Jessop. Optical waveguide components for beam forming in phased-array antennas[J]. Microwave & Optical Tech. Lett., 1997, 15(1): 46 - 49.
- [5] J F Coward, T K Yee, C H Chalfant, et al. A photonic integrated-optic RF phase shifter for phased array antenna beam-forming applications [J]. IEEE J. of Lightwave Tech., 1993, 11(12): 2201 - 2205.
- [6] E Voges, K Kuckelhaus, B Hosselbarth. True time delay integrated optical RF phase shifter in lithium niobate[J]. Elec. lett., 1997, 33(23): 1950 - 1951.
- [7] Sang-Shin Lee, Anand H Udupa, Hernan Erlig, et al. Demonstration of a photonic controlled RF phase shifter[J]. IEEE Microwave & Guided Wave Lett., 1999, 9(9): 357 - 359.
- [8] Jeehoon Han, Hernan Erlig, Dan Chang, et al. Multiple output photonic RF phase shifter using a novel polymer technology [J]. IEEE Photonics Tech. Lett., 2002, 14(4): 531 - 533.
- [9] Jeehoon Han, Byoung-Joon Seo, Seongk Ku Kim, et al. Single-chip integrated electro-optic polymer photonic RF phase shifter array [J]. IEEE J. of Lightwave Tech., 2003, 21(12): 3257 - 3261.
- [10] Jeehoon Han, Byoung-Joon Seo, Harold R Fetterman, et al. New applications using single-sideband polymer electro-optic modulators [J]. Proc. of SPIE, 2003, 4991: 562 - 574.