

文章编号: 1672-8785(2008)12-0005-04

光子学射频移相器的研究及进展

陈青松 廖进昆 唐雄贵 陆荣国 李和平

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘 要: 本文介绍了光实时延迟线移相器、光学外差 SSB 射频移相器和基于矢量和技术的光子学射频移相器, 并对其各自的工作原理和技术特点做了分析。

关键词: 光学射频移相器; 光实时延迟线; 光学外差 SSB 技术; 矢量和技术

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

Study and Development of Photonic RF Phase Shifter

CHEN Qing-song, LIAO Jing-kun, TANG Xiong-gui, LU Rong-guo, LI He-ping

(College of Optoelectronic Information, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, the Optical True Time Delay (OTTD) shifter, optical heterodyne SSB radio frequency (RF) shifter and the photonic RF phase shifter based on vector sum technique are presented and their operation principle and technical features are analyzed respectively.

Key words: photonic RF phase shifter; OTTD; photonic heterodyne SSB technique; vector sum technique

1 引言

20 世纪提出的相控阵系统至今仍然是一个热门的研究课题, 并被广泛应用于雷达和天线中。作为多功能的相控阵雷达, 可能由数千个阵元同时产生数十个天线波束, 需要大量的分布式发射、接收模块和复杂的互连控制网络。传统微波器件的传输、分配及波束形成技术已经难以适应需要, 集中表现在使用大量移相器及波导互连传输分配系统而造成整个系统体积过于笨重、损耗大、易受电磁干扰、带宽窄等方面^[1]。

由于光波器件及光纤技术在损耗、带宽、体积质量、抗电磁干扰及串话等方面的本质优点, 使得它能在电磁干扰大、环境条件恶劣的空间和空中雷达上使用。因此在相控阵雷达中引入光波技术已成为一种必然趋势。可控的光子射频移相器是光控相控阵的关键器件, 它控制着

天线的扫描方向, 基本满足了相控阵天线中的移相器应具有移相数值精确、性能稳定、足够的频带和功率容量、便于快速控制、激励功率和插入损耗小、体积小重量轻等特点的要求, 因此, 光子学射频移相器成为了移相器未来发展的方向。

2 光子学射频移相器的分类及特点

光子射频移相器根据其工作原理可分为基于 OTTD^[2]、基于光学外差 SSB 技术、基于矢量和三种不同的类型。第一种用于宽频带波束控制, 可对微波信号实现粗调; 后两种则更适用于频带较小的场合, 可对波束进行精确的连续控制, 近几年发展较为迅速。

2.1 基于 OTTD 的光子学射频移相器

基于光传输的 OTTD 具有低损耗、低色散、重量轻、体积小、不受电磁干扰等优点。目前, 实现 OTTD 的技术途径有如下几种。

收稿日期: 2008-07-10

基金项目: 总装预研基金 (9140A02060807XXXX)

作者简介: 陈青松 (1983 —), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为微波多路高精度移相器。

(1) 基于电切换和光纤环的 OTTD

该 OTTD 采用电开关切换, 使 RF 信号调制到不同的激光器从而经过不同长度的光纤, 实现不同的延时。该方案在休斯公司的实验系统中曾使用过^[3]。特点是结构复杂, 造价昂贵, 插损大。

(2) 基于光开关切换和光纤环的 OTTD

该方案是用光开关对光路进行切换, 结构类似基于 PIN 管的移相器, 该类 OTTD 的延时完全由光纤长度决定, 理论上延时可以任意长, 其它指标, 如切换时间、隔离度、插入损耗等主要由光开关决定。因此光开关性能是该类 OTTD 技术性能的关键^[4]。

(3) 基于集成光学的 OTTD

该方案是将光切换开关和延时部件 (或光波导) 集成于同一 OMMIC 基片上, 由于体积小, 其最大延时通常较小, 因此该 OTTD 适用于频率较高的场合或单元移相器。

(4) 基于空间光路切换的 OTTD

该类 OTTD 的原理是通过一系列的可控反射镜, 改变光在空间反射的次数, 使光经过不同的光程, 实现不同的延时, 该类 OTTD 的结构较复杂^[5]。

(5) 基于可调谐激光器和光传播色散的 OTTD

该类 OTTD 的基本工作原理是, 改变可调谐激光器的光波频率, 产生不同频率的光载波, 光通过具有色散特性的光纤、光栅棱镜或布拉格光栅实现不同的延时。

总之, OTTD 克服了同轴电缆、金属波导等作为延迟线的缺点, 具有较宽的频带、较低的色散和损耗, 又不受电磁干扰。目前国外的相关技术已比较成熟, 虽然国内这方面的研究取得了较大进展, 但距实用化还有一段时间。

2.2 基于有机聚合物的光学外差法 SSB 射频移相器

早在 20 世纪 90 年代, 人们就提出了一种有机聚合物移相器, 其结构如图 1 所示^[6]。激光器的输入光信号为 $E_{in} = E_1 \cos(\Omega t)$, 在第一个 Y 分支处按比率分开, 并在第二个 Y 分支处以

相同比率叠加。电极臂 1、2 被相同的射频信号所驱动, 只是电极臂 2 有一个附加的相移 θ , 射频信号的频率为 ω , 振幅为 V_m 。如果我们选择 $\theta = \pi/2$, 那么输出就是一个含有频率 $\Omega + \omega$ 的单边带信号, M-Z 的两臂输出 $\alpha E'$ 、 $\beta E''$ 就可以表达为以下两个式子

$$\alpha E' = \alpha \frac{E_i}{2} [\cos(\Omega t + \Delta \sin \omega t) + \cos(\Omega t + \pi/2 + \Delta \cos \omega t)] \quad (1)$$

$$\beta E'' = \beta E_i [\cos(\Omega t + \phi_{DC})] \quad (2)$$

式中, $\Delta = \pi V_m / V_\pi$, $\phi_{DC} = \pi V_{DC} / V_\pi$, V_π 为有机聚合物的半波电压。 V_{DC} 为控制电压。

当 $\alpha = \beta = 1/2$ 时, 总的输出为

$$V_{out} = \frac{1}{2}(E' + E'') = \frac{E_i}{2} \left\{ \frac{1}{2} [\cos(\Omega t + \Delta \sin \omega t) - \sin(\Omega t + \Delta \cos \omega t)] + \cos(\Omega t + \phi_{DC}) \right\} \quad (3)$$

其强度:

$$I(\omega) \propto \frac{E_i^2}{16} [2 \cos(\Delta \sin \omega t - \phi_{DC}) - 2 \sin(\Delta \cos \omega t - \phi_{DC}) + \sin(\Delta \sin \omega t - \Delta \cos \omega t)] \quad (4)$$

将式 (4) 用贝塞尔函数展开并且只考虑一阶后可得:

$$I_\omega = \frac{E_i^2}{16} \left\{ [\sqrt{2} J_1(\sqrt{2} \Delta) + 4 J_1(\Delta) \sin \phi_{DC}] \sin \omega t - [\sqrt{2} J_1(\sqrt{2} \Delta) + 4 J_1(\Delta) \cos \phi_{DC}] \cos \omega t \right\}$$

式中, J_1 为一阶贝塞尔函数。

当 $\Delta = 2.71$ 时, $J_1(\sqrt{2} \Delta) = 0$, 此时上式可变为

$$I_\omega = \frac{E_i^2}{4} J_1(2.71) \cos(\omega t + \phi_{DC} + \pi) \quad (5)$$

从上式我们可以看出, 通过调节 V_{DC} 可以改变 ϕ_{DC} , 从而可以改变输出信号的相位, 达到移相的目的。从图 2 中我们可以看出理论计算的输出相位与控制电压的关系, 其中虚线为 $\Delta = 2.72$ 时输出电压与控制电压的关系曲线, 实线为 $\Delta = 0.52$ 时输出相位与控制电压的关系曲线。

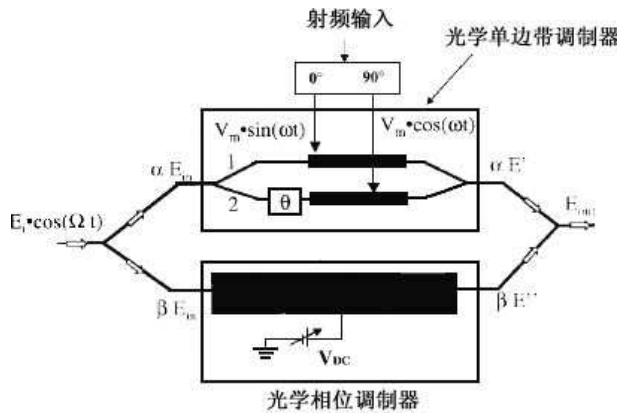


图 1 移相器示意图

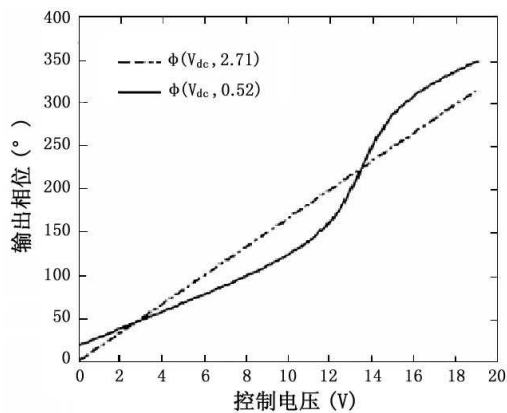


图 2 理论计算的输出相位与控制电压的关系

通过控制电压 V_{DC} 可以改变射频信号的相位，且其变化曲线的线性度高达 140° 。但是，在控制电压高于 2 倍半波电压的情况下，其变化曲线的线性度将受到影响，并且射频能量变化有 15dB 左右的起伏。上述问题是光学射频移相器实现大规模军用和民用的主要障碍。其主要原因是 SSB 光学调制器单元的载波基带信号对于输出功率和调制效率的负面影响。当载波基带信号和移相后的同频率光信号叠加之后，其输出光信号中的高次谐波产生信号失真。所以人们通过加入平衡电压调制器，使载波信号被平衡调制器抑制，从而消除前述问题对移相器输出信号的影响。

从图 3 [8] 中我们可以看到，50Hz 的三角波在 7.8V 的控制电压作用下实现了相移。

2.3 基于矢量和法的光子学射频移相器

基于矢量和法的光子学射频移相器的基本原理 [9] 是将两个具有相同角频率和固定相位差

但是强度不同的正弦信号叠加，这两路信号可分别表示为

$$E_1 = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (6)$$

$$E_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi_2) \quad (7)$$

式中， A_1 、 A_2 为振幅， ϕ_1 、 ϕ_2 为两路信号相对于射频信号的固定相移。将这两路信号合路后的输出信号为

$$E_{out} = E_1 + E_2 = A \sin(\omega t + \phi) \quad (8)$$

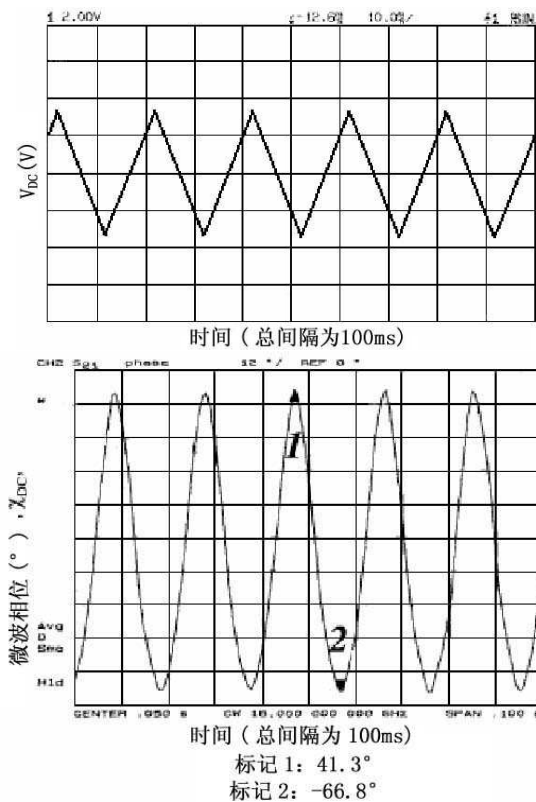


图 3 50Hz 的三角波信号在 7.8V 控制电压作用下的相位改变

式中，

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2} \right)$$

从上式可以看出，通过选择固定相移 ϕ_1 、 ϕ_2 来改变 A_1 、 A_2 的比值，就可以实现 ϕ 在 $0^\circ \rightarrow 360^\circ$

内的连续调节。由此可见,如何选择和改变上述两组值是关键。从目前来看,人们都是通过光纤延迟线的长度实现对固定相移的选择的。对于振幅 A_1 和 A_2 ,较多的是利用改变两路信号强度的方法^[10]。由于矢量和技术原理简单,易于实现,所以倍受研究人员青睐。

3 光子学射频移相器的国内外研究进展

自 20 世纪 90 年代以来,集成光子学移相器的开发取得了很大的进展。1991 年,日本三菱电器公司报道了采用集成光学波导器件的微波移相器,800MHz 的微波信号,半波电压为 7V,此项工作受到了日本 ATR 光与无线电通信研究所和日本 Osaka 大学的支持。1993 年, J.F.Coward 等人报道了用于相控阵阵列天线的集成光学移相器,其特点为采用双 M-Z 调制器,可以实现 360° 移相,误差为 10°。1997 年,澳大利亚电子学与监视研究实验室的 S. T. Winnall 等人报道了采用集成光学器件宽带微波移频移相器,中心频率范围为 2GHz ~ 18GHz,微波信号移相范围为 2π 。最大相位标准偏差为 10°。1999 年, Sang-Shin Lee 和 Anand H. Udupa 等人报道了在美国空军和海军科学研究管理处资助下的集成光学微波移相器的研究工作,半波电压为 10.8V,工作频率可以达到 20GHz,获得了 108° 的线性移相范围。2002 年, Jeehoon Han 等人利用聚合物材料 PW1/APC 制成了移相器,其在 20GHz 的移相特性在 150° 范围内近似是线性变化的; 2003 年,加州大学洛山矶分校的 H.R.FETTERMAN 小组提出一种新型的单片集成电光有机聚合物 RF 移相器方案并进行了实验验证。2006 年, Nickolas Kingsley 等人第一次报告他们利用液晶聚合物制成了 4bit 的微型机电系统移相器,其平均的插入损耗为 0.96dB,其移相特性较好。

国内在有机聚合物移相器方面的研究与发达国家相比有较大差距。1995 年的《现代雷达》刊登了沈明亚、林守远等人的“用集成光学方法

实现相控阵系统的幅项控制”的文章,文中提出了基于集成光学 M-Z 调制器的 8 路微波调制、移相的方案设想。但是对于实际器件并没有公开报道。

从国外研究^[11]的情况来看,用于光控相控阵雷达的集成光学有机聚合物移相器已经向小型化、实用化方向发展。因为有机聚合物材料具有成本低廉、制造方便、光传输损耗低和宽带传输等优点。

4 结论

由于光子学射频移相器所具有的体积小、低损耗、宽带宽、不易受电磁干扰等优点,光子学射频移相器必将成为移相器未来的发展方向。虽然目前它还没有投入大规模的生产,但是它克服了传统移相器的诸多缺点。伴随着集成光电子学的进一步发展和光子学射频移相器的进一步研发,它最终会拥有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] S Kim, H Zhang, D Chang, et al. Eelectrooptic polymer modulators with an inverted-rib waveguide structure [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15: 218-220.
- [2] SHEEHAN P G, FOREEST R J. The use of optical techniques for beam-forming phased arrays [J]. SPIE, 1984, 75-81.
- [3] Lee J J, Loo R Y, Livingston S, et al. Photonicwide-band arrayantennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 966-982.
- [4] Fetterman H, Han J, H, et al. Multiple output photonicRF phase shifters for optically controlled radar systems [A]. MIT S Digest [C]. Los Angeles, CA, USA: Dept of Electr Eng California, 2002, 1937-1940.
- [5] Etem Y, Lewis F Design. Performance of an optically controlled phased array antenna [A]. Microwave Photonics, 1996, MWP' 96. Technical Digest, 1996, International Topical Meeting IC. Malvern, UK: DRA, 1996, 209-212.

(下转第 44 页)