

基于 PM 和 CFBG 的宽带微波光子相移系统

翟文胜, 辛运霞

(华北水利水电大学, 郑州 450046)

摘要: 啁啾光纤光栅(CFBG)的延时抖动制约了光子相移系统的稳定性和波束延时精度, 设计了一种信号相位补偿方案。理论分析了系统相移及信号相位抖动抑制原理, 通过调节相位调制器(PM)的直流控制电压, 实现对输出信号相位抖动的抑制。实验结果表明: 在 5~10GHz 的带宽内, 系统实现了 360°的相移, 输出功率波动小于 1.16dB, 相位偏差小于 1.3°。该方案改善了系统稳定性和波束延时精度。

关键词: 光子相移器; 微波光子学; 射频

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)03-0040-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Broadband microwave photonic phase shifter based on PM and CFBG

ZHAI Wensheng, XIN Yunxia

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The delay jitter of chirped fiber bragg grating (CFBG) restricts the stability and beam delay precision of photon phase-shifting system, a signal phase compensation scheme is designed. The principle of the system phase shift and signal phase jitter suppressed by the phase modulator is analyzed theoretically. By adjusting the DC control voltage of the phase modulator (PM), the phase jitter of the output signal can be suppressed. The experimental results implement 360° phase shift for the radio frequency from 5GHz to 10GHz, where the power variation is less than 1.16dB with the phase deviation less than 1.3°. The scheme improves the system stability and beam delay accuracy.

Key words: photonic phase shifter; microwave photonics; radio frequency

0 引言

微波光子相移器在宽带通信和相控阵雷达领域具有广阔的发展前景, 它在星际之间、无线接入和射频(RF)信号传输等方面的应用, 受到很多研究者的重视^[1-3]。光子相移技术的优势主要包括高速度、高稳定性和抗电磁干扰等。近年来, 对光子相移技术的研究方案层出不穷, 文献[4-6]采用外差混频技术、矢量和技术及非线性效应机理等来实现相移。文献[7]采用

调整偏振片的偏振方向实现光延时并完成相移, 其输出信号的幅度波动较小, 得出系统的稳定性好。结合马赫-曾德尔调制器(MZM)的结构特点, 文献[8]提出通过调节马赫-曾德尔干涉仪两臂的信号参数完成相移功能, 相移量范围超过 180°。文献[9]采用分布反馈式激光器作为激光源, 系统随着波长的变化完成相移, 而系统参数优劣与激光器的波长稳定性密切相关。实现相移的方案还有很多种, 例如非线性效应和布里渊散射机理应用等, 均在文献[10-12]中被提出。但是, 对于相移系统, 光信号在处理的过程中, 难免被内部噪声和外界不利因素所干扰, 使有用信号受到一定程度的损伤, 造成信号质量下降, 从而导致波束相移精度低及分辨力减弱; 在雷达工作中, 使雷达对目标的探测能力和分辨能力减弱。

为减小这方面的影响, 本文设计一种信号相位补偿方案, 并对相移系统进行研究。

收稿日期: 2018-10-22。

作者简介: 翟文胜(1979-), 男, 博士研究生, 副教授。2013-2017 年就读于北京邮电大学光通信研究院, 2017 年完成毕业答辩获得博士学位。现于华北水利水电大学任教。主要研究光控相移技术处理机理和微波光子波束形成理论技术等。共发表 SCI/EI 检索的学术论文 6 篇; 在 ECOC/ACP 等光通信领域顶级国际学术会议发表论文 3 篇, 并在会议上做了相应的报告。参与了国家级科研项目 2 项(国家 973 合作课题 1 项、国家自然科学基金课题 1 项)。



1 系统结构及原理

本文所用可调激光器(TLS)具有可调功能, 波长可调谐范围大于 20nm, 覆盖 RF 频率可达 2500GHz 以上。双驱马赫-曾德尔调制器(DDMZ)具有较低的插入损耗, 其消光比大于 15dB。为了使调制效率高, 我们采用半波电压较小的调制器。同时, 为避免光探测器被损害, 所加电压不能超过其峰峰值的要求。

光子相移系统结构如图 1 所示。光波的频率大小可通过调节激光器的波长来实现。改变加在 DDMZM 上、下两臂的 RF 信号的相位参数, 可以获得光载波的抑制。定义 RF 信号为 $E_{RF}=A\exp(j\omega_m t)$, A 、 ω_m 分别是幅度和角频率(假定信号的初始相位为 0)。当调制器上、下两臂的 RF 信号相位差为 π 时, 调制器输出信号为:

$$E_A(t)=KA\{\exp[j(\omega_c+\omega_m)t]+\exp[j(\omega_c-\omega_m)t]\} \quad (1)$$

其中, K 为光调制器的调制系数, j 为虚数单位, t 为时间参数。 $\omega_c-\omega_m$ 与 $\omega_c+\omega_m$ 分别为上、下边带的角频率, ω_c 为光载波的角频率。首先, 光耦合器把已调光分成功率相同的 2 路光信号, 2 路信号分别通过光带通滤波器(在满足带宽的条件下, 光带通滤波器的传输函数有平坦的幅度谱), 上支路保留下边带, 下支路保留上边带; 接着, 下边带信号经过光环形器投射入啁啾光纤光栅(CFBG)。经过处理后, 不同波长的信号对应不同反射点, 并实现不同的时延, 以产生不同的相移, 定义为:

$$E_C(t)=A\{\exp[j(\omega_c-\omega_m)t-\Delta\varphi]\} \quad (2)$$

其中, $\Delta\varphi$ 为相移量。对于 CFBG 而言, 当入射信号的波长参数满足布喇格方程 $\lambda(z)=2n_{eff}(z)\times\Lambda(z)$ 时, 则满足上述一种线性关系; $\lambda(z)$ 为 Z 点反射的布喇格波长, $n_{eff}(z)$ 为 Z 点的啁啾折射率, $\Lambda(z)$ 为调制周期。 $\tau(\lambda)$ 为不同的波长产生不同的延时量 ($\tau(\lambda)=D\times(\lambda-\lambda_0)=D\times\Delta\lambda_c$), D 为色散系数, $\Delta\lambda_c$ 为波长变化量。上边带信号保持顺利通过下支路后, 上、下边带信号则被偏振合成器(PBC)合成正交模式信号, 信号表示为:

$$E_{PBC}(t)=\hat{x}A\{\exp[j(\omega_c+\omega_m)t]\}+\hat{y}A\{\exp[j(\omega_c-\omega_m)t-\Delta\varphi]\} \quad (3)$$

其中, $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 分别表示正交系数。在现阶段光纤设计工艺受限的条件下, 由于折射率分布、轴向和横向几何尺寸不一致以及残留应力分布不均匀等因素影响, 在实际制作过程中将导致 CFBG 的反射位置上出现波长波动, 从而产生延时抖动效应(GDR), 这将造成信号延时线性度的偏差, 最终会影响光控相移系统的性能。目前, 常用的光栅相位掩模板及法布里-珀罗(F-P)效应制作工艺均会使 CFBG 产生 GDR。

相位调制器(PM)在没有直流偏置的作用下, 可以克服 PM 自身带来的相位漂移。在 PM 的 RF 控制端口注入直流信号, 通过调节直流电压的大小变化量, 可通过 PM 对光信号的相位参数进行大小调整, 从而抑制 CFBG 单元带来的延时抖动影响。

这里, 正交模式信号经过 PM 处理, 在直流信号的控制下, 其仅改变光信号的相位。在直流电压变化量相同的情况下, 对于不同模式的光信号, 调制效率是不同的, 即相位改变量是不同的。对 PM 的输出信号, 可以描述为:

$$E_{PM}(t)=\hat{x}A\{\exp[j(\omega_c+\omega_m)t+\pi V_{DC}(t)/V_\pi]\}+\hat{y}A\{\exp[j(\omega_c-\omega_m)t-\Delta\varphi+\gamma\pi V_{DC}(t)/V_\pi]\} \quad (4)$$

其中, V_π 为半波电压, $V_{DC}(t)$ 为直流偏压, γ 为光探测器效率系数。当信号耦合到偏振镜, 调谐偏振镜的旋钮, 使正交模式信号投射到其轴向 45° 方向, 此方向的能量达到最强, 这样有利于信号的探测, 探测器的输出信号为:

$$i(t)\propto A^2\cos\{2\omega_m t+[(\gamma-1)\times(\pi V_{DC}(t)/V_\pi)+\Delta\varphi]\} \quad (5)$$

在稳定的功率输出情况下, 系统可以完成 360° 的相移。

2 实验结果分析

本文设光源 TLS150 的调谐速度为 10ps, 线宽为 100kHz, 输出功率为 16dBm; 设光调制器(FTM7921-ER)的半波调制电压约为 8V, 插入损耗约 4.5dB; 采用带宽为 20~40GHz 的测量仪器矢量网络分析仪(Agilent, N5242A)。实验用 Waveshaper 完成滤波、幅频和相位的调谐。该滤波器的插入损耗约 6.51dB; 幅度衰减范围为 0~

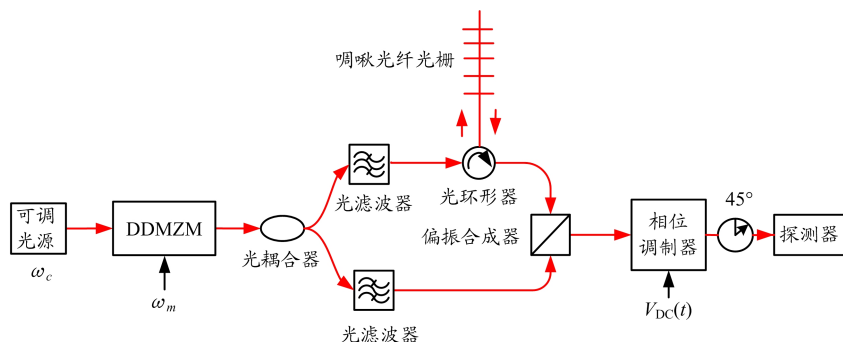


图 1 光子相移系统结构图

30dB, 回波损耗在 25.2dB 以上, 隔离性良好。

载波抑制双边带调制图如图 2 所示。通过调节调制器上、下两臂信号的相位差, 实时观察光谱分析仪窗口的光谱变化, 使上、下边带的幅度达到近似相等, 功率值约为 -12.3dBm, 抑制光载波到最小幅度为止。这样系统灵敏度可以得到一定改善, 并能提高抗噪能力。

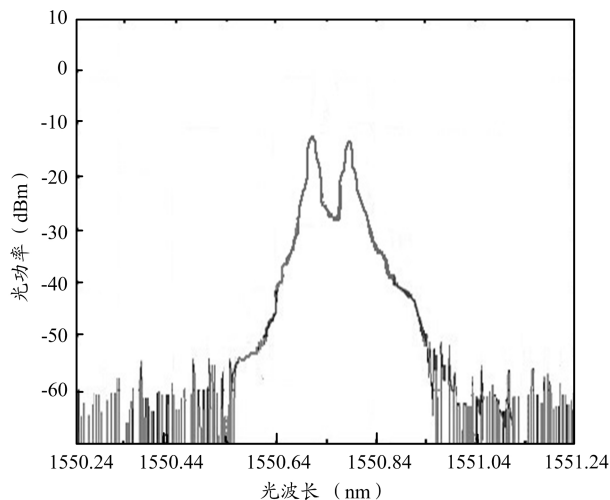


图 2 载波抑制双边带调制图

在实验中, 要保持周围环境温度的基本稳定, 以减少温度和机械应力对 CFBG 的影响。为减小随机误差, 提高系统的稳定性, 当光纤在固定和盘卷时, 应尽量减少机械应力的作用。

本文采用间接测量法来计算相应的信号延时量的大小, 采用矢量网络分析仪(N5242A)来测试 RF 信号的相位参数和幅度参数, 不同波长获得的延时特性曲线如图 3 所示。

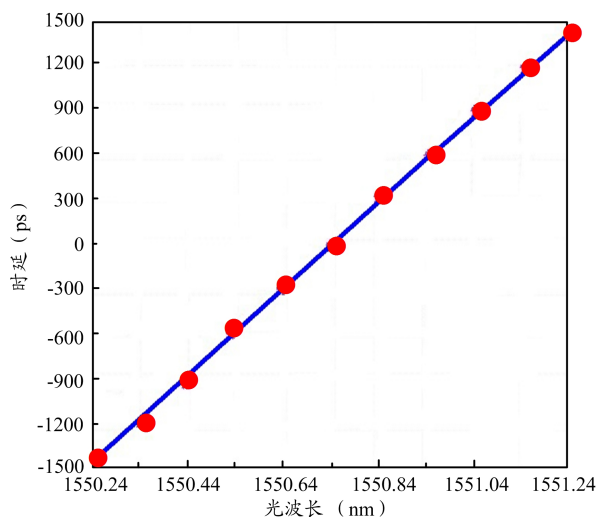


图 3 光信号延时图

为抑制 CFBG 产生的 GDR, 我们适当调整 PM 的直流控制电压 $V_{DC}(t)$ 大小, 使上、下边带信号的相位差发生相应的变化。RF 信号相移图如图 4 所示。可以看出, RF 信号的相位偏差抖动幅度低于 1.3° 。RF 信号波动幅度较小, 说明系统具有良好的稳定性。假如光器件的带宽足够宽, 该系统便可以工作在更高数量级的频段。

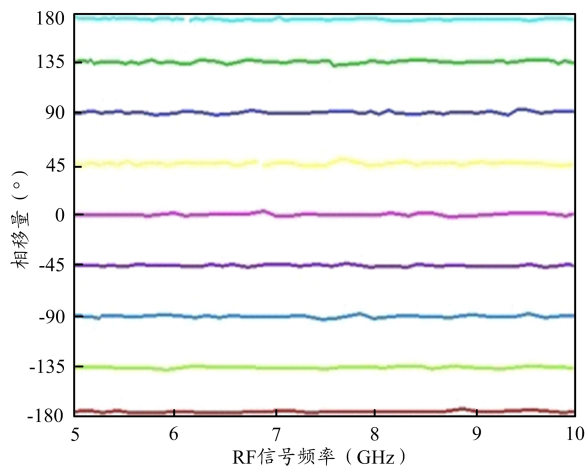


图 4 RF 信号相移图

光子相移器的抗噪性能可以由频率稳定度来考量。本文通过频谱分析仪器观察出在有、无 PM 作用的情况下, 相位噪声谱的分布, 其噪声功率如图 5 所示。在相同的频偏范围内, 蓝色曲线是无 PM 作用的相位噪声谱的分布趋势, 可以看出曲线的噪声功率较大, 轮廓较粗糙, 说明 CFBG 延时抖动影响相对较大。在雷达应用中, 会引起雷达极化信号的旁瓣增加, 主瓣减弱, 这样会导致雷达的距离探测能力降低; 红色曲线是有 PM 作用的相位噪声谱的分布趋势, 可以看出曲

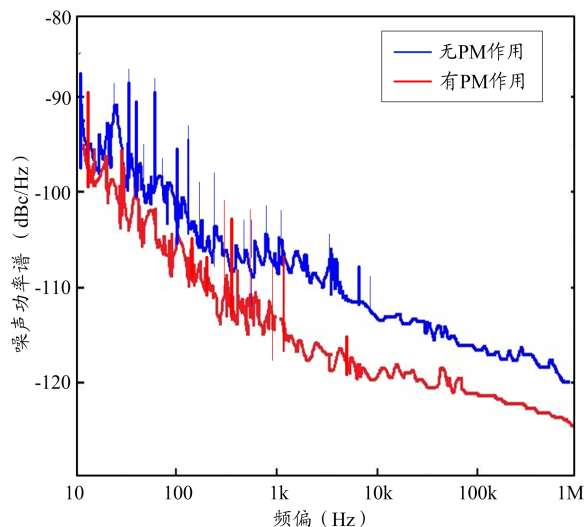


图 5 噪声功率图

线的轮廓相对圆润些, 说明 CFBG 延时抖动影响相对较小。在雷达的应用中, 主瓣会增加, 旁瓣减弱, 雷达的距离探测能力得到提升。

光子相移技术应用在相控阵雷达系统中, 系统输出信号的波动幅度较小, 其输出信噪比相对较大、雷达的抗干扰能力则会增强; 雷达从杂波中提取目标信息的能力也就越强, 探测距离也会更远。功率归一化图如图 6 所示。可以看出, 对系统功率值进行归一化处理后, 幅度波动小于 1.16dB, 系统稳定性高。

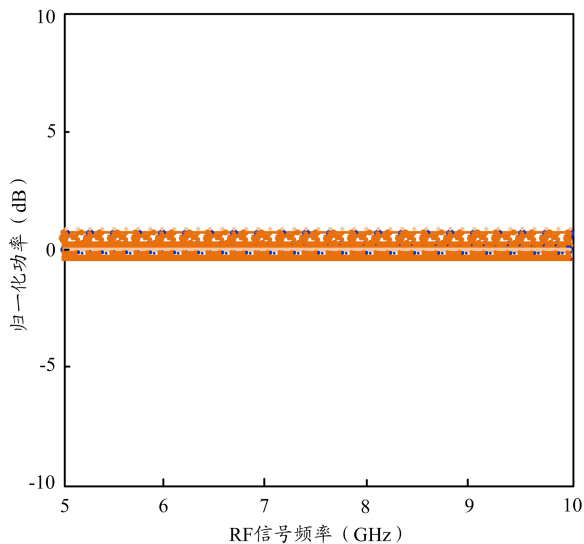


图 6 功率归一化图

3 结束语

本文设计了一种相位补偿方案, 利用 CFBG 延时处理单元完成信号相移, 采用了 PM 通过相位补偿的方式来抑制 CFBG 的延时抖动, 从而改善系统波束精度和稳定度, 提升雷达的分辨力。在更高的频段, 我们将进一步研究和改善系统稳定度和波束延时精度。

参考文献:

- [1] SOLIMAN E A, BREBELS S, BEYNE E, et al. Vandenbosch, CPW-fed cusp antenna[J]. Microwave Opt. Technol Lett., 1999, 22(4): 288–290.
- [2] ZHAI Wensheng, GAO Xinlu, XU Wenjing, et al. Microwave photonic phase shifter with spectral separation processing using a linear chirped fiber Bragg grating[J]. China Opt. Lett., 2016, 14(4): 040601-1–040601-4.
- [3] HAN Chen, SUN Mingming, DING Yi, et al. A tunable linear radio frequency phase shifter using single semiconductor optical amplifier[J]. Microwave Opt. Technol Lett., 2014, 56(1): 340–343.
- [4] HAN Chen, YI Dong, HAO He, et al. Photonic radio-frequency phase shifter based on polarization interference[J]. Opt. Lett., 2009, 34(15): 2375–2378.
- [5] LIU W, LI W, YAO J P. An Ultra-Wideband Microwave Photonic Phase Shifter With a Full 360° Phase Tunable Range [J]. IEEE Photon Technol Lett., 2013, 25(12): 1107–1110.
- [6] WEI Li, NING Huazhu, LI XianWang. Photonic Phase Shifter Based on Wavelength Dependence of Brillouin Frequency Shift [J]. IEEE Photon Technol Lett., 2011, 23(13): 1013–1016.
- [7] PAN S, ZHANG Y. A tunable and wideband microwave photonic phase shifter based on a single sideband polarization modulator and a polarizer[J]. Opt. Lett., 2012, 37(21): 4483–4485.
- [8] DONG Y, HE H, HU W. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2007, 32(7): 745–747.
- [9] FISHER M R, CHUANG S L. A microwave photonic phase-shifter based on wavelength conversion in a DFB laser[J]. IEEE Photon Technol Lett., 2006, 18(16): 1714–1716.
- [10] LI W, ZHU N H, WANG L X, et al. Broadband phase-to-intensity modulation conversion for microwave photonics processing using Brillouin-assisted carrier phase shifter [J]. Lightw Technol, 2011, 29 (24): 3616–3621.
- [11] LOAYSSA A, LAHOZ F J. Broad-band RF photonic phase shifter based on stimulated Brillouin scattering and singlesideband modulation[J]. IEEE Photon Technol Lett., 2006, 18(1): 208–210.
- [12] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. Engin Struct, 2006, 28(5): 648–659.

2019 全国微波光子雷达技术研讨会即将召开

微波光子雷达利用光子技术实现宽带微波毫米波信号的产生、分配、控制和处理, 能够有效提升雷达系统的目标分辨率、作用距离、响应速度等关键性能, 有助于实现侦察、干扰、探测、通信的一体化, 近年来受到了国内外同行的广泛关注。美国海军实验室做出了“光子学照亮雷达未来”的评价, 而俄罗斯、欧盟等都在开展实用化微波光子雷达相关的研究。基于这种形势, 在多位院士的提议下, 中国电子学会拟于 2019 年 4 月 27~28 日在南京举办“2019 全国微波光子雷达技术研讨会”。

主办单位: 中国电子学会

大会交流形式: 大会将邀请相关领域的著名专家, 就光子技术在雷达领域的应用做特邀报告

联系人: 骆阳, 010-83687508, 13521652196 邮箱: ly_job@163.com