

文章编号 1004-924X(2017)05-1206-07

用于雷达回波仿真的小型化微波光纤延迟线

李冠鹏, 王 辉, 张邦宏, 杨惠霞, 谢 亮*

(中国科学院 半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:针对高分辨率雷达回波信号仿真对带宽、线性度和延时性能的要求,设计了 X 波段雷达测试与校准应用的小型化微波光纤延迟线。分析了雷达回波模拟源对距离延迟单元的性能要求,根据系统指标,研制了用于宽带雷达信号线性光电转换的关键器件—直接调制分布反馈(DFB)激光器。基于光纤反射镜,设计与实现了一种小型化的反射式延迟线结构。最后,利用矢量网络分析仪对系统的微波传输性能进行了测试分析。结果表明:直接调制 DFB 激光器—3dB 模拟调制带宽高达 21 GHz。基于该激光器的微波光纤延迟线,针对 X 波段雷达测试应用可提供 40、80、120 μs 不同延时的目标回波模拟,其带内幅度平坦度小于 ± 0.5 dB,相位非线性小于 10° ,同时线性动态范围大于 60 dB,满足雷达回波仿真与校准过程对于信号附加幅频误差和相频误差的要求。

关键词:雷达回波仿真;光纤延迟线;分布反馈激光器;宽带;延时;线性度

中图分类号: TN253; TN955 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1206

Compact microwave fiber delay line for radar echo simulation

LI Guan-peng, WANG Hui, ZHANG Bang-hong, YANG Hui-xia, XIE Liang*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

* Corresponding author, E-mail: xiel@semi.ac.cn

Abstract: For requirements of a high-resolution radar system for wider bandwidths, higher linearity and longer time delays in the echo simulation, a compact Microwave Fiber Delay Line (MFDL) was designed for measurement and calibration of X-band radars. The performance requirements of a radar echo simulator for the distance delay unit was analyzed. The key component, a directly-modulated Distribution Feedback(DFB) laser, was developed according to the system specifications to implement the linear electro-optic conversion of broadband radar signals. Then, a compact reflective delay line structure was designed and realized based on a fiber mirror. Finally, a vector network analyzer was utilized to measure and analyze the microwave transmission properties of the MFDL. Experimental results indicate that the -3dB analog modulation bandwidth of the DFB laser is up to 21 GHz. The MFDL based on the DFB laser provides the time delays by 40 μs , 80 μs , 120 μs for different targets on typical X-band radar test application, in which the in-band amplitude flatness and phase nonlinearity are less than ± 0.5 dB and 10° , respectively, and the system dynamic range is larger than 60 dB. The designed MFDL meets the requirement of radar echo in simulation and calibration for additional amplitude errors and phase errors.

收稿日期:2016-12-16;修订日期:2017-02-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60902067);吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001)

Key words: radar echo simulation; fiber delay line; Distribution Feedback (DFB) laser; wideband; time delay; linearity

1 引言

雷达遥感是一种高分辨率的主动微波成像技术,具有可见光和红外传感所不具备的全天时、全天候、大幅面观测的工作能力,因此在国土资源管理、海洋环境监测、地质灾害预警以及军事测绘侦查等领域具有重要的应用价值^[1-2]。遥感雷达系统在研制与运行过程中,需要经过严格的半实物回波仿真(Hardware-in-loop Simulation),以保证其性能与成像算法满足系统的设计要求^[3]。半实物回波仿真的关键设备为雷达回波模拟源(Echo Simulator),其根据雷达回波的数学模型进行软件编程,生成真实的单点或点阵目标回波模拟信号,用于回波仿真中带宽、分辨率、冲击响应旁瓣比以及收发通道工作特性等主要性能参数的测试与校准。

实现宽带微波信号线性无失真的长延时是雷达回波模拟源的主要技术难点,一般采用以下几种技术方案:(1)采用数字射频存储器(DRFM)技术^[4],将输入的模拟雷达信号下变频与数字化后保存在数字存储器中,延迟一段时间再对数字信号进行数模转换、幅相调制产生回波模拟信号。但是该方法需要极高速的模数/数模(AD/DA)转换器件,转换的量化精度也会对回波模拟信号引入附加的幅相误差,使仿真结果不真实;(2)采用模拟延迟线直接实现宽带雷达信号的真时延(True Time Delay)^[5]。该器件结构简单、带宽大、附加误差小,是现有雷达回波模拟源中应用最为广泛的技术方案。传统的模拟延迟线主要分为声表面波延迟线(ASW)、电荷耦合器件(CCD)延迟线以及同轴电缆延迟线^[6],其信号处理的时间带宽积有限,难以同时满足雷达回波仿真中微秒级时延与吉赫兹大带宽的需求。本文设计实现的微波光纤延迟线(Microwave Fiber Delay Line, MFDL)采用光纤作为信号的时延传输介质,其特点是重量轻、带宽大、损耗低、抗电磁干扰能力强^[7-8],可有效克服传统模拟延迟线的缺点,因此已逐渐成为实现超宽带雷达信号长时延的新型光载微波信号处理单元。在雷达回波仿真中,模拟延迟线的幅频误差和相频误差决定了目标成像性

能仿真的准确度与有效性,此外延迟线组件的体积也影响其在工程应用中的可行性。从目前相关文献报道来看,Byung-Hee Son 等设计的微波光纤延迟线受限于光电器件性能,其信号处理带宽小于1 GHz^[9],因此仅实现了微波信号光纤时延的理论验证;Emcore 公司的 OTS 系列微波光纤延迟线,虽然工作带宽达18 GHz,但是具有 ± 3 dB的带内幅度误差,同时系统体积较大且模拟延迟量固定无法调谐;中电集团第十三研究所报道的超宽带微波光纤延迟线同样存在着 ± 2.5 dB的带内幅度误差^[10]。

为了解决雷达回波仿真用微波光纤延迟线的带宽、线性度与小型化的问题,本文针对X波段雷达测试与校准应用,研制了模拟带宽高达21 GHz的直接调制分布反馈(DFB)激光器,并在此基础上设计了一种新型的反射式微波光纤延迟线。该微波光纤延迟线具有出色的 ± 0.5 dB带内幅度平坦度与 10° 相位非线性,其线性动态范围高达60 dB,满足工程应用中宽带雷达信号的线性无失真时间延迟。同时,基于磁光开关的延时切换单元可在 $15 \mu\text{s}$ 内实现系统延时通道的快速连续切换,避免了通道切换过程中多路延时信号在探测器端产生干涉而引起的信号失真,保证了系统信号处理的稳定性。因此,该微波光纤延迟线能够为多点目标回波仿真提供40、80、120 μs 可调谐的长时延信道模拟,最终实现雷达系统的标定和校准。

2 微波光纤延迟线的原理与结构

2.1 雷达回波仿真原理

根据雷达回波的数学模型,理想点阵目标的回波模拟源主要由3部分组成:距离延迟的模拟、幅度加权的模拟和相位调制的模拟^[3]。图1所示为半实物回波仿真原理图,它是将雷达系统收发通道与回波信号模拟源构成试验回路,将雷达真实发射信号经过延迟、幅相调制,最终馈送至接收通道进行解调与成像处理。其中微波光纤延迟线用来实现宽带雷达信号的距离延迟模拟,其带宽与线性度等技术指标将影响回波仿真的准确度与有效性。

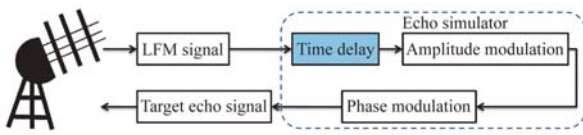


图 1 雷达半实物回波仿真原理图

Fig. 1 Principle of radar hardware-in-loop simulation

2.2 微波光纤延迟线的设计原理

微波光纤延迟线系统一般由光发射模块、光接收模块和单模光纤组成。系统响应带宽与线性度主要由光收、发射模块的光电响应特性以及光纤色散所决定。系统的链路增益用对数单位可以表示为：

$$G_{dB} = 20 \log(\eta_{Tx} \cdot \eta_{Rx}) - 2L_0 + 10 \log(R_{out}/R_{in}), \quad (1)$$

其中： μ_{Tx} 表示光发射模块将微波电流信号转换为光调制信号的效率， μ_{Rx} 表示光接收模块的光电转换效率， R_{out} 和 R_{in} 分别表示微波接收端的负载阻抗与发射端的输入阻抗， L_0 表示单模光纤的插入损耗。可以发现 1 dB 的光功率插损会导致 2 dB 的微波功率衰减，所以延迟线的链路增益主要由光纤等无源器件的插入损耗所决定。由于雷达回波模拟源具有距离长、延时大的特点，会导致微波光纤延迟线具有较大的链路电衰减，故需要利用微波放大器进行信号功率的补偿。

由于微波信号的延时量由光调制信号在光纤中的传输距离所决定，取光纤纤芯折射率为 $n=1.5$ ，则信号延时量为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$ 。因此，为了实现 40, 80, 120 μs 的延时设计，信号传输光程分别为 8, 16 与 24 km。

此外，为了实现光纤延迟线的小型化设计，本文提出了一种反射式延迟线结构。但是长距离光纤的布里渊散射(SBS)阈值低，一方面当微波信号频率接近布里渊频移量时，前向输入的光信号将对反射传输的光信号边带产生显著的放大与衰减作用；另一方面光信号在光纤中传输时将产生后向散射斯托克斯光(Stokes)^[11]，其输入光接收模块将与光载波信号拍频产生与布里渊频移相等的微波干扰信号。对于典型的 $1.31 \mu\text{m}$ 或 $1.55 \mu\text{m}$ 通信波段光载波，其在光纤中的布里渊频移量分别约为 13.1 GHz 和 10.7 GHz。针对实际的 X 波段 $[(9.6 \pm 2) \text{GHz}]$ 雷达回波仿真应用，本文研制了波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 的直调 DFB 激光器用于微波信号的线性电光转换，以避免布里渊散射效应对反射式微波光纤延迟线中带内信号的干扰。

2.3 直接调制 DFB 激光器的设计

微波光纤延迟线中实现宽带微波信号电光转换的技术方案一般包括外调制器与直接调制半导体激光器^[12]。基于马赫-曾德尔调制器的外调制方案存在插入损耗大、偏振敏感、偏置点漂移等问题，它需要复杂的偏置点锁定与控制电路保持器件工作在最佳线性调制区域，其结构复杂，不利于系统的小型化设计。考虑高速直调 DFB 半导体激光器具有宽带高线性、小型化以及可单片集成等优势，作者研制与封装了一款宽带直调 DFB 激光器来解决雷达回波仿真中宽带微波信号的线性度与系统小型化等关键技术问题。其中半导体激光器芯片的有源层为 AlGaInAs/InP 量子阱，异质结为 1.2Q InAlGaAs。有源层厚度、激光器腔长、电极尺寸均经过优化设计以减小器件的寄生参数、提高其响应带宽。图 2 所示为宽带直调 DFB 激光器的结构图，设计的单翼蝶形封装结构具有传输频带宽、光耦合效率高等优点。微波信号的输入端口为 40 GHz 安立(Anritsu)射频连接器。封装管壳内设计了特征阻抗为 50Ω 的共面波导(CPW)传输线，用于宽带微波信号的阻抗匹配。此外，还设计了 Bias-tee 馈电电路，分别用于激光器芯片的直流驱动与微波信号的输入。为了保证激光器芯片工作在恒温状态，蝶形管壳中同时封装了热敏电阻(Thermistor)与热电制冷器(TEC)，从而实现了激光器芯片的温度反馈控制。

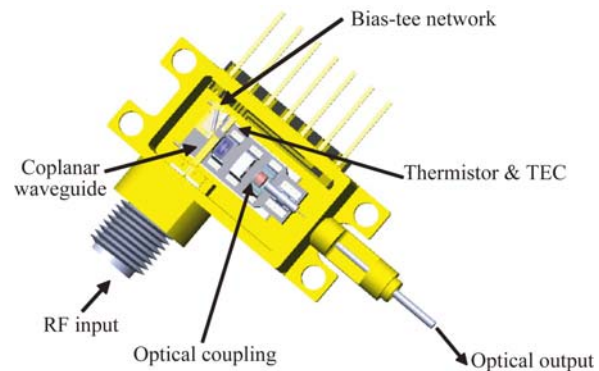


图 2 宽带直调 DFB 激光器的结构图

Fig. 2 Structure of wideband directly-modulated DFB laser

2.4 反射式微波光纤延迟线的系统结构

图 3 为设计的反射式微波光纤延迟线的系统结构图，其中光发射模块由宽带直调 DFB 激光器、自动功率控制电路(APC)与恒温控制电路(TC)组成。宽带微波信号首先由微波低噪声放

大器(LNA)放大 14 dB,从而减小级联微波光子链路的噪声系数。功率放大后的微波信号直接调制光发射模块,得到的光调制信号通过光环行器(OC)输入三段 G. 652D 细径单模光纤(SMF)。各段单模光纤的长度均为 4 km,通过 1×2 磁光开关(Switch)连接,其插入损耗与串扰分别为 0.75 dB 与 55 dB,切换速度小于 15 μs。为了实现系统的小型化,此微波光纤延迟线基于光纤反射镜(Fiber Mirror)设计为反射式延迟线结构,在延时量一定的情况下可以减小一半的光纤盘体积。每段单模光纤与光纤反射镜构成了光程为 2×4 km 的光信号往返传输,相当于 40 μs 的信号延时。通过 TTL 信号控制磁光开关的状态,该微波光纤延迟线可实现 40,80 和 120 μs 信号延迟的快速切换。最终,光调制信号经由光环行器输出并在光电探测器(PD)中解调得到微波信号。系统最后级联了一个 14 dB 增益的微波低噪声放大器用以补偿链路的信号衰减。图 4 为所研制的微波光纤延迟线的实物图,其外部接口简单,包括射频输入、输出端口以及电源与控制接口,整体尺寸仅为 22 cm×13 cm×12 cm,满足应用中雷达系统对组件小型化的要求。

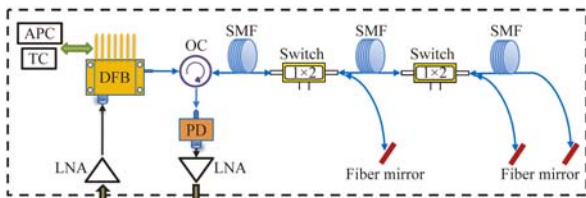


图 3 反射式微波光纤延迟线的系统结构图

Fig. 3 System structure of proposed reflective MFDL

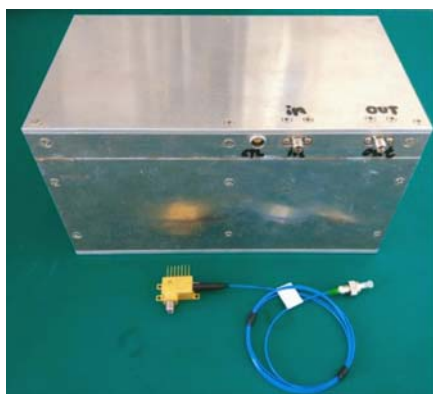


图 4 微波光纤延迟线及 DFB 激光器的实物图

Fig. 4 Prototype of MFDL and DFB laser

3 测试结果与分析

3.1 直调 DFB 激光器的特征参数测试

宽带直调 DFB 激光器的光谱如图 5 所示。其中中心波长为 1 310.60 nm,边模抑制比(SMSR)高达 55 dB。测试结果满足设计波长,可以有效地避免延迟线中布里渊散射对 X 波段雷达信号的干扰,并且 1.31 μm 为单模光纤的零色散波长。所研制的 DFB 激光器作为载波光源可有效降低光调制信号在光纤中传输时引起的微波功率衰落效应。此外,为了减小延迟线系统的体积,设计的光纤盘的复绕直径小于 35 mm,使光纤在大于 1.55 μm 的光波段具有明显的宏弯损耗。所以 1.31 μm 直调光源在该微波光纤延迟线中传输时的插入损耗较低,可有效提高链路的微波信号增益。

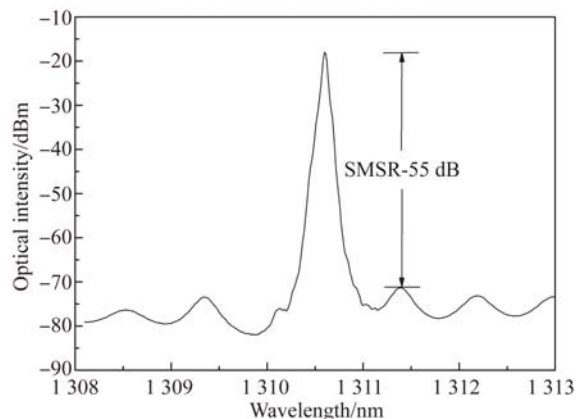


图 5 DFB 激光器的光谱(100 mA 偏置电流)

Fig. 5 Optical spectrum of DFB laser (100 mA bias current)

使用电矢量网络分析仪(EVNA, Anritsu MS4644A)与 40 GHz 宽带光电探测器(Discovery)测试了直调 DFB 激光器的小信号调制带宽,图 6 所示为 DFB 激光器的归一化幅度频率响应曲线。随着偏置电流的增加,DFB 激光器的张弛振荡峰得到抑制,相应的调制带宽向高频位置偏移。当激光器工作在 100 mA 偏置状态时,其-3 dB 调制带宽高达 21 GHz,并且在 X 波段带内平坦度仅为 0.5 dB。

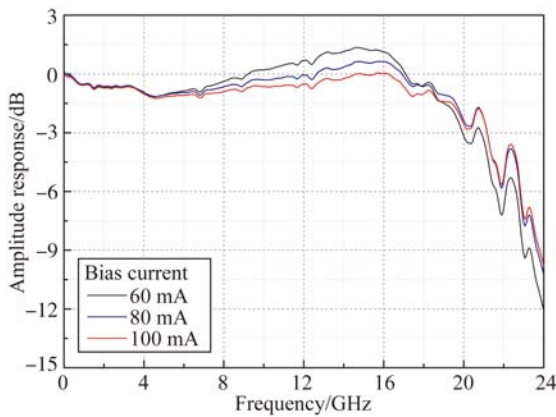


图 6 不同偏置电流时 DFB 激光器的归一化幅度频率响应
Fig. 6 Normalized amplitude-frequency responses of DFB laser at different bias currents

3.2 微波光纤延迟线的性能测试

针对典型的 X 波段 $[9.6 \pm 2] \text{ GHz}$ 雷达回波仿真应用,测试了不同延时量微波光纤延迟线的宽带幅度响应与相位响应(如图 7),其中相位响应与无源介质光纤的长度无关。可以发现 3 种延时状态下光纤延迟线在 4 GHz 宽带内的整体幅度平坦度小于 $\pm 0.5 \text{ dB}$,相位非线性小于 10° 。实际的雷达回波仿真过程是将 X 波段划分为多个 600 MHz 的子通道分别进行测试^[3],如果回波模拟中多普勒相位调制采用 7 位加权,则相位调制的分辨率为 $360^\circ/2^7 = 2.8125^\circ$ 。由图 7 测试结果可以发现微波光纤延迟线在 8.4~10.8 GHz 的相位非线性约为 2.5° ,相当于在每个 600 MHz 通道内具有 0.682° 的平均相位误差,小于多普勒相位调制的分辨率。所以,经过光延时的回波模拟信号具有极高的调频信号保真度,满足雷达成像性能的高精度半实物仿真。受限于所研制光电器件本身的相位非线性,微波光纤延迟线在 7.6~8.4 GHz 与 10.8~11.6 GHz 频段内的相位误差较大,需要进一步研究与改进光电子器件的调制特性。但是由于在上述频段内相位误差与频率呈近似线性关系,也可以对相频响应做线性拟合处理,解调得到延时误差 $\Delta T = d\varphi(f)/df$,式中 $\varphi(f)$ 为拟合的线性相频误差(如图 7 中拟合直线所示);然后,在电域信号处理中对相应频段进行延时补偿,从而提高系统的线性工作带宽。

用于远距离目标仿真的长延时微波光纤延迟线,其光无源器件的插入损耗是链路微波信号衰减的主要影响因素。若考虑光信号的往返传输,由 4 km 单模光纤、磁光开关与光纤反射镜组成

的 $40 \mu\text{s}$ 延迟线的插入损耗约为 5 dB。所以该微波光纤延迟线系统在不同延迟状态下的电插入损耗预计相差 $2 \times 5 \text{ dB}$,与图 7 中的测试结果一致。利用微波功率放大器可以进一步补偿损耗,或者优化与提高 DFB 激光器的电光转化效率。图 8 所示为在 9.6 GHz 固定频点通过功率扫描方法测试的微波光纤延迟线的线性增益动态范围。由于光纤作为无源介质仅影响输出微波信号功率的绝对值,与输入 1 dB 压缩点测试无关,此处给出了 $40 \mu\text{s}$ 延时状态的压缩动态范围测试结果,其中输入增益 1 dB 压缩点为 4 dBm,线性动态范围高达 60 dB,满足大动态范围雷达回波信号延迟模拟的要求。系统的线性动态范围主要受限于前置低噪声放大器与 DFB 激光器的增益压缩效应,可以通过改善发射端的微波、光电器件的增益压缩点来提高延迟线系统的动态范围。

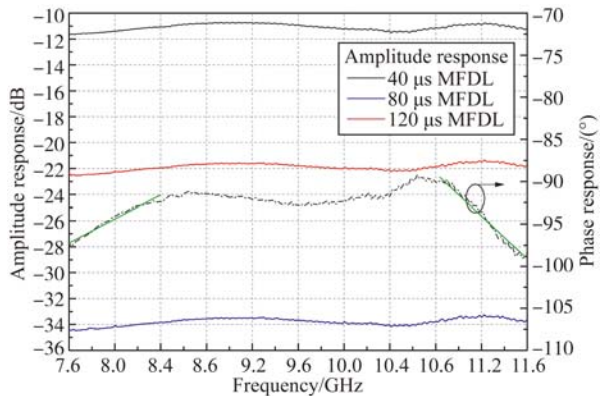


图 7 不同延时量的微波光纤延迟线的幅度与相位响应
Fig. 7 Measured amplitude and phase responses of the MFDL with different time delays

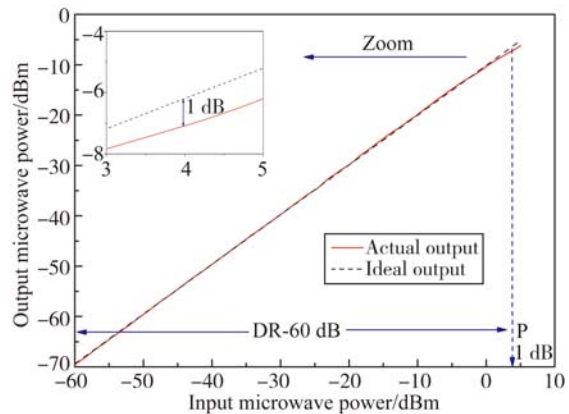


图 8 微波光纤延迟线的输入 1 dB 压缩点和线性动态范围
Fig. 8 Input 1 dB compression points and linear dynamic ranges of the MFDL

根据香农采样定律,对于长延时的信号处理单元,需要提高相频测试的采样率才能计算出真实的信号群时延,最大采样频率间隔由下式决定:

$$\Delta f \leq \frac{2\pi}{(N-1) \cdot 2\pi \cdot t}, \quad (2)$$

其中: N 表示 2π 周期内需要的采样点数, t 表示设计的信号延时量。本文研制的微波光纤延迟线的最大延迟量为 $120 \mu\text{s}$, 根据上式可得在系统群时延测试中采样频率间隔需要小于 4 kHz 。由于 EVNA 的采样点数有限,且光纤延迟线的作用是对宽带微波信号作真时延信号处理,即信号延时量与测量的频率无关,所以如图 9 所示,使用电矢量网络分析仪在 9.6 GHz 频点以 1 kHz 采样间隔测试了微波光纤延迟线的群时延特性。测试结果表明该微波光纤延迟线能够提供 40 、 80 、 $120 \mu\text{s}$ 3 种状态的信号时延,实现了不同距离目标模拟的设计要求。此外在雷达回波测试与校准应用中,系统关注的是目标模拟的相对距离,信号延时的绝对精度并不影响系统成像性能仿真的有效性。

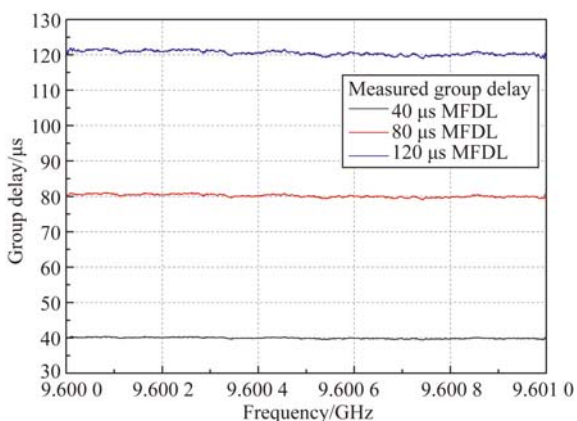


图 9 微波光纤延迟线的群时延测试
Fig. 9 Measured group delay of the MFDL

3.3 微波光纤延迟线的相位稳定性测试

在雷达回波仿真中,宽带延时信号需要满足一定的相位稳定性要求,即由雷达收发通道与回波模拟源构成的试验回路在一次测试与校准过程中的回波信号相位漂移需要控制在有限的校准误差范围之内。在实际工程应用中,雷达系统提出了在 5 min 的校准周期中回波相位漂移小于 15° 的稳定性要求,相当于 $\lambda/24$ 的信号误差。然而由于光纤的热光效应和热膨胀效应,信号在光纤中传输的群时延随温度存在 $35 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 的漂移^[13]。本文所设计的微波光纤延迟线采用热绝缘的方案来保持系统中光纤的热稳定性。利用航天

用绝热材料二氧化硅气凝胶对延迟线中的单模光纤进行气密封装,其热导率低至 $0.017 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。根据雷达测试系统提出的相位稳定性指标,试验发现二氧化硅气凝胶的平均厚度达到 2 cm ,可以满足系统性能要求。

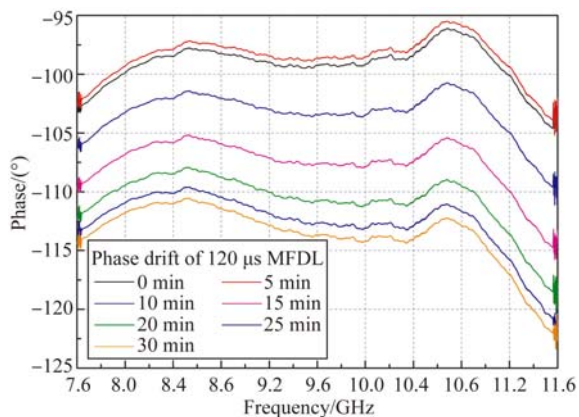


图 10 室温下宽带微波信号在 $120 \mu\text{s}$ 延迟线中的相位漂移
Fig. 10 Measured phase drift of broadband microwave signal in $120 \mu\text{s}$ MFDL at room temperature

信号相位漂移是光纤累积作用的结果,即在相同环境状态下,光纤越长信号的相位漂移就越大,所以为了说明延迟线系统中宽带微波信号的相位稳定性,测量了 $120 \mu\text{s}$ 最大时延光纤延迟线中 X 波段微波信号在室温下的相位漂移,如图 10 所示。在整个测试的 30 min 内,微波信号的带内最大相位漂移小于 20° 。实验结果中量程边界的相位抖动是由于电矢量网络分析仪的测量不确定性引起的。实验显示微波光纤延迟线在室温下的平均相位漂移小于 $0.67(^\circ)/\text{min}$,很好地满足了雷达测试过程对于回波信号相位稳定性与校准误差的要求。对于存在剧烈环境温度变化的应用场景,可以通过进一步增加绝热层厚度来达到系统对回波信号相位稳定性的要求。

4 结 论

根据雷达回波仿真带宽大、线性度高、延迟时间长特点,本文针对 X 波段雷达测试与校准应用,设计了小型化的微波光纤延迟线。研制了系统关键器件直接调制 DFB 激光器,用于实现宽带雷达信号的线性电光转换;基于光纤反射镜提出了一种小型化的反射式延迟线结构;采用热绝缘的方案优化了系统中微波信号的相位稳定性。实验结果表明:所研制微波光纤延迟线的带内幅度

误差小于 ± 0.5 dB,相位误差小于 10° ,线性动态范围高达 60 dB,满足雷达回波仿真对于准确度与有效性的要求。同时该系统能够为多点目标仿真提供快速可切换的 40、80、120 μs 的信号延时,室温条件下宽带微波信号的平均相位漂移小于

$0.67^\circ/\text{min}$,满足雷达测试周期对信号相位稳定性的要求。该微波光纤延迟线的外部接口简单,整体尺寸仅为 $22\text{ cm}\times 13\text{ cm}\times 12\text{ cm}$ 。本研究可为雷达回波仿真用微波光纤延迟线的性能提高与设计优化提供参考。

参考文献:

- [1] OUCHI K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2):716-807.
- [2] 张雄美,易昭湘,田淞,等. 结合形态学属性断面与支持向量机的合成孔径雷达图像变化检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10):2832-2839.
ZHANG X M, YI ZH X, TIAN S, *et al.*. Change detection of SAR images using morphologic attribute profile and support vector machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2832-2839. (in Chinese)
- [3] 张文彬,邓云凯,倪江. 基于光延迟线的星载 SAR 目标回波信号模拟[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(9):1652-1654.
ZHANG W B, DENG Y K, NI J. Spaceborne SAR echo simulator based on optic-fiber delay [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(9): 1652-1654. (in Chinese)
- [4] SHU T, TANG B, YIN K, *et al.*. Development of multichannel real-time hardware-in-the-loop radar environment simulator for missile-borne synthetic aperture radar [C]. *Radar Conference. IEEE*, Johannesburg, South Africa, 2015:0368-0373.
- [5] 张春熹,张晓青,胡妹玲. 光纤延迟线应用研究动态[J]. *中国激光*, 2009, 36(9):2234-2244.
ZHANG CH X, ZHANG X Q, HU SH L. Development of application research on fiber delay lines [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2234-2244. (in Chinese)
- [6] 邱绍峰,范戈. 光纤延迟线在雷达信号处理中的应用[J]. *光学技术*, 2003, 29(4):429-430.
QIU SH F, FAN G. Applications of fiber delay line in radar [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 429-430. (in Chinese)
- [7] QI X Q, XIE L, WANG H. Wideband fiber-optic delay line with dynamic delay drift compensation [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57(5):1219-1222.
- [8] 赵新才,陶世兴,刘宁文,等. 精密光纤延迟线的设计及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2622-2626.
ZHAO X C, TAO SH X, LIU N W, *et al.*. Design and experimental verification of precision optical fiber delay line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2622-2626. (in Chinese)
- [9] SON B H, KIM K J, LI Y, *et al.*. Design of hybrid optical delay line for automotive radar test system [C]. *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications*, 2015, 9362: 936212.
- [10] 马玉培. 超宽带微波光纤延迟线[J]. *半导体技术*, 2007, 32(2):129-132.
MA Y P. Super broad band microwave optical fiber delay line [J]. *Semiconductor Technology*, 2007, 32(2): 129-132. (in Chinese)
- [11] 朱永祥,陆启生. 受激布里渊散射中 Stokes 光的反 Stokes 散射与慢光效应[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):487-492.
ZHU Y X, LU Q SH. Anti-Stokes scattering of Stokes light and slow light in stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 487-492. (in Chinese)
- [12] KHWANDAH S A, COSMAS J P, GLOVER I A, *et al.*. Direct and external intensity modulation in OFDM RoF links [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4):1-10.
- [13] CHOI H S, TAYLOR H F, LEE C E. High-performance fiber-optic temperature sensor using low-coherence interferometry. [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(23):1814-6.

作者简介:



李冠鹏(1989—),男,湖北汉川人,博士研究生,2012年于华中科技大学获得学士学位,主要从事高速光模块、微波光子学方面的研究。E-mail: gppli@semi.ac.cn

导师简介:



谢亮(1969—),男,甘肃兰州人,博士研究生,1998年于兰州大学获得博士学位,主要从事高速光电子器件及光模块、光纤传感技术的研究。E-mail: xiel@semi.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)