

[北京锦坤科技有限公司](http://www.jonkon.com.cn)
www.jonkon.com.cn

摘要：本文采用激光器、光调制器、可编程[光纤延时阵列](#)及光探测器等构成了新型的[微波光纤延迟线](#)系统，对系统的发射、传输和接收三个组成模块进行了理论分析，建立了各模块及系统的数学模型，对系统的传输特性和时延特性进行了仿真。结果表明，此类[微波光纤延迟线](#)可视为线性系统。并采用矢量网络分析仪对系统进行了实测，幅频特性和相频特性在合理频带范围内均接近于理想情况，群时延测量结果与理论计算一致，延时精度达到 10 ps 以内。

关键词：[微波光纤延迟线](#)；相时延；群时延；矢量网络分析仪

中图分类号：TN253 TN929.1 文献标识码：A 国家标准学科分类代码：510.5020

Analysis and measurement of delay property for programmable [microwave fiber delay line](#)

Zhang Chunxi, Zhang Xiaoqing, Hu Shuling, Chen Yinan, Hu Hanwei

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper presents a novel microwave fiber delay line system made up of a laser diode, an optical modulator, a programmable fiber delay array based on optical switches and a photoelectric detector. The emitting module, transfer module and receiving module are analyzed theoretically; the models of individual modules and the system are built. Simulation results of transmission property and delay property show that the system is linear. Measured by a vector network analyzer, the amplitude-frequency characteristics and phase-frequency characteristics of the system are both close to ideal condition in a reasonable frequency range. The measurement results of group delay accord with theoretical calculation completely. The time delay precision of the microwave fiber delay line is within 10 ps.

Key words: [microwave fiber delay line](#); phase delay; group delay; vector network analyzer

1 引言

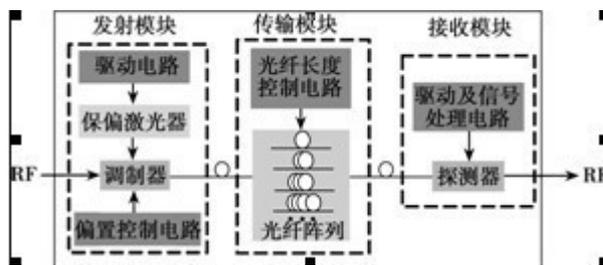
作为新型信号处理器件，[光纤延迟线的应用](#)逐渐在光纤传感、光纤通信及微波光子学领域兴起^[1]。其中，[微波光纤延迟线\(microwave fiber delay line, MFDL\)](#)利用光纤技术对调制在光波上的微波信号进行传输、分配和处理，具有极大的带宽，损耗低，结构简单，抗电磁干扰能力强，重量轻，应用前景广阔，是目前多个学科交叉渗透的研究热点。

可编程[微波光纤延迟线](#)在其传输部分是数字控制的多种光纤长度的阵列，通过精确的光延时可实现所传输信号的精确相位控制，如用在光控相控阵^[2-3]雷达系统中，采用光纤传输微波模拟信号并进行相位的合理分配，对雷达的扫描波束进行控制，可以使雷达信号更好地控制与显示，减轻重量，增大容量，屏蔽干扰，大大提高系统的可靠性。因此，研究[微波光纤延迟线](#)的时延特性^[4-6]非常必要，其目的有两个：

- 1)根据系统的时延特性来确定系统信号传输延迟时间的大小，以便确定信号间的相位差；
- 2)根据时延特性来了解系统失真情况并寻求解决办法。

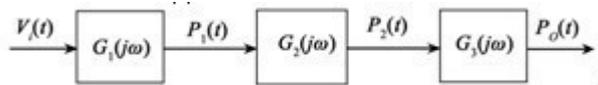
2 MFDL 系统时延特性分析

本文所研究的微波光纤延迟线结构如图 1(a)所示，其简化的数学模型如图 1(b)所示。[微波光纤延迟线](#)主要由光发射模块、传输模块和光接收模块组成。光发射模块采用外调制技术^[7]；传输模块的结构则根据应用功能的要求设计为可编程光纤长度阵列并由 4 个光开关实现切换控制^[8]；光接收模块一般采用相应的速度匹配(1~3 GHz)的光电探测器来接收微波信号。



(a)[微波光纤延迟线](#)内部结构

(a)[Interior structure](#) of MFDL



(b)[微波光纤延迟线](#)数学模型

(b)[Mathematical model of](#) MFDL

2.1 发射模块传递函数

光发射模块采用 M-Z 外调制器实现射频信号的光强调制，为近线性光强度调制。当射频输入信号为时，M-Z 外调制器传递函数可写成：

$$P_o(t) = \frac{P_i}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} V_b + V_i(t) + \theta \right] \right\} \quad (1)$$

式中：\$P_i\$ 为调制器输入光强，\$P_o(t)\$ 为调制器输出光强，\$V_\pi\$ 为调制器半波电压，\$V_b\$ 为调制器偏置电压，\$\theta\$ 为调制器输出的初始相位。令 \$P(t) = 2P_o(t)/P_i\$ (归一化处理)

\$\phi_i = \theta + (\pi V_b)/V_\pi\$，则：

$$P(t) = 1 + \cos[V_i(t) + \phi_i] = 1 + \cos V_i(t) \cos \phi_i - \sin V_i(t) \sin \phi_i \quad (2)$$

用泰勒级数展开并保留至 3 次项，得：

$$P(t) = 1 + \cos \phi_i \left[1 - \frac{1}{2!} V_i^2(t) \right] - \sin \phi_i \left[V_i(t) - \frac{1}{3!} V_i^3(t) \right] \quad (3)$$

设 \$V_i(t) = V_i \cos(\omega t)\$，得：

$$P(t) = 1 + \left(1 - \frac{1}{4} V_i^2 \right) \cos \phi_i - \left(V_i - \frac{1}{8} V_i^3 \right) \sin \phi_i \cos(\omega t) - \frac{1}{4} V_i^2 \cos \phi_i \cos(2\omega t) + \frac{1}{24} V_i^3 \sin \phi_i \cos(3\omega t) \quad (4)$$

结构图中的偏置控制电路正是为了减小二次谐波和三次谐波而设计的。为了简化分析，舍去二次谐波和三次谐波分量，得：

$$P(t) = 1 + (1 - \frac{1}{4}V_i^2) \cos \phi_i - (V_i - \frac{1}{8}V_i^3) \sin \phi_i \cos(\omega t) \quad (5)$$

进一步简化为如下形式：

$$P(t) = P_0 + k_1 V_i(t) \quad (6)$$

式中： k_1 可称为电光转换系数。

因为偏置量 P_0 经后续链路传输后被光电探测器处理电路滤除，可作为能消除的中间变量考虑，则令

$$R_1(t) = P(t) - P_0, \text{ 得：}$$

$$R_1(t) = k_1 V_i(t) \quad (7)$$

由上式可得光发射模块的频率特性如下：

$$G_1(j\omega) = k_1 \quad (8)$$

2.2 传输模块传递函数

本文所测量的微波光纤延迟线的可编程光纤长度阵列由 4 个光开关实现切换控制。具体结构如图 2 所示。

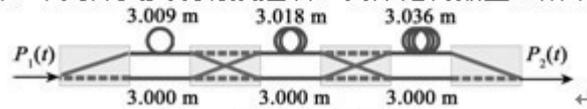


图 2 光开关排列结构

Fig.2 Array configuration of optical switches

每个光开关接入系统后均引起插入损耗，约为 0.5 dB，表现为光功率的衰减，图中不同的光纤通路通光时都需要 4 个光开关同时接入，因此引入的插入损耗相同，可以用同一个衰减系数 k_2 来表示。

不同长度的光纤通路也会引入光功率的衰减。1 550 nm 单模光纤的衰减系数约为 0.5 dB/km，若忽略光开关的内部光程差，图中最短的光纤通路为 9 m，最长的光纤通路为 9.063 m，则最大长度差为 0.063 m，最大衰减差为 0.031 5 dB，这个衰减与光开关引起的光强衰减相比可以忽略。

不同长度的光纤通路会引起输入信号的传输延迟，延迟量大小与光纤长度有关。设此延迟为 t ，初始相位为 f_0 ，传输模块的频率特性可写成：

$$G_2(j\omega) = k_2 e^{-j(\phi_0 + \omega t)} \quad (9)$$

信号在调制后经过传输模块，其中光纤延时阵列及其光开关控制器件均为线性器件，故信号在传输模块后仅表现为光强略有衰减而波形保持不变。

2.3 接收模块传递函数

信号在光接收模块由光电探测器直接探测光强，同样使之工作在光电探测器的线性区。

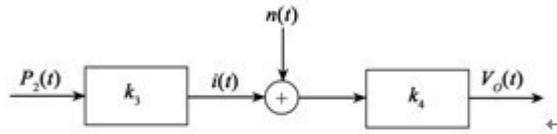


图3 光电探测电路数学模型

Fig.3 Mathematical model of photoelectric detecting circuit

式中： $i(t)$ 为入射光强产生的光电流， $n(t)$ 为光接收模块引入的总噪声。光发射模块和传输模块也会引入噪声，如激光器的相对强度噪声、光纤链路的色散噪声等，但和接收电路模块引入的噪声(包括散粒噪声、热噪声、暗电流噪声等)相比均可忽略。将 k_3 、 k_4 称为光接收模块的光电转换系数，可得光接收模块关于 $V_d(t)$ 和 $P_2(t)$ 的频率特性如下：

2.4 系统时延特性

由式(8)、式(9)、式(10)可得，微波光纤延迟线的频率特性如下：

$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)} = G_1(j\omega)G_2(j\omega)G_3(j\omega) = k_1k_2k_3k_4e^{-j(\phi_0+\tau\omega)} = ke^{-j(\phi_0+\tau\omega)} \quad (11)$$

因此微波光纤延迟线可以看成是一个线性系统且具有线性相位特性，其系统时延特性可以从振幅特性 $A(\omega)$ 和 $\phi(\omega)$ 相位特性导出。对于微波光纤延迟线而言，需要重点关注的是相时延和群时延。相时延 t_p 为：

$$\tau_p = \frac{\phi(\omega_2) - \phi(\omega_1)}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\phi(\omega)}{\omega} = -\left(\frac{\phi_0}{\omega} + \tau\right) \quad (12)$$

相时延取值可正可负，只能用于表征系统输出信号和输入信号瞬时值之间的相对时间关系，不能将相时延理解为信号传播意义上的绝对时间延迟^[9]。

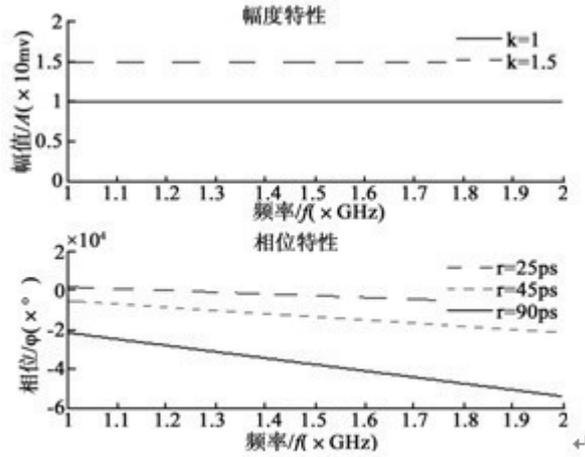


图4 MFDL系统的理想频率特性

Fig.4 Ideal frequency characteristics of MFDL

由于实际系统很难具备恒定的群时延特性，因此引入群时延来描述传输系统相位特性的重要特征。当系统的幅度特性为常数时，群时延完全由系统的相位特性决定，即：

$$\tau_g = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = \tau \quad (13)$$

理想的无失真传输意指输出信号与输入信号之间的幅度成一定的倍数关系，波形完全相同；实际的无失真传输意指输出信号与输入信号之间的幅度成一定的倍数关系，波形保持相同，相位允许保持一定的延迟。对于具有一定带宽的射频信号的调制传输，研究失真时，通频带范围限制为一个小的局部带宽，如中心频率为 ω_c ，

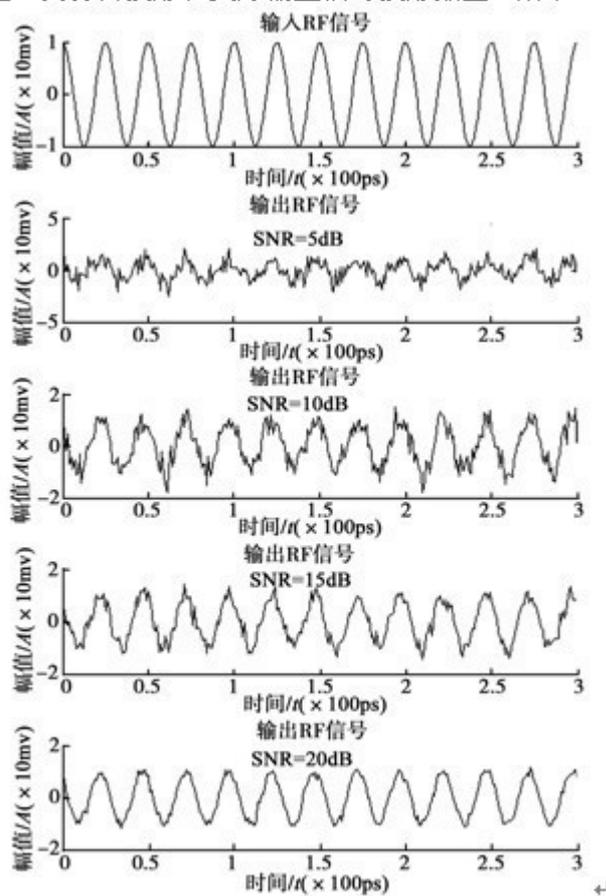
$$\left(\omega_c - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_c + \frac{\Delta\omega}{2}\right),$$

此范围可表示为

其无失真传输准则可归纳如下：

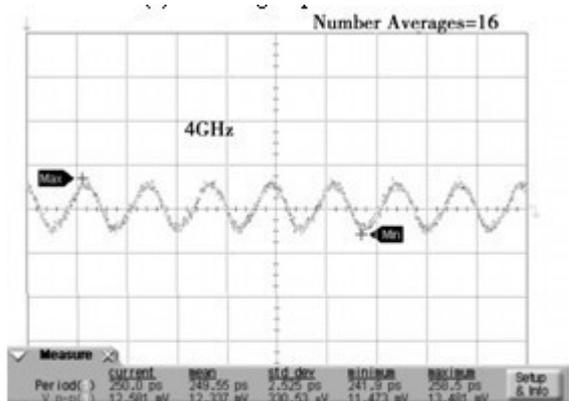
$$\begin{cases} A(\omega) = A(\text{常数}) \\ \tau_g(\omega) = \tau, \tau \text{为常数}, \tau > 0 \end{cases} \quad (14)$$

作为具有接近理想幅度特性的线性相位系统，[微波光纤延迟线\(MFDL\)](#)在合适的频率范围内其群时延表现为常数，因此能够实现相应频率范围内的信号无失真传输。由于信道内噪声的存在，其输出信号仍存在失真。分析噪声的性质，可将 MFDL 视为加性高斯白噪声调制信道，其仿真波形和实际输出信号波形如图 5 所示。



(a) 仿真输出波形。

(a) Simulating output waveforms.



(b) 实际输出波形。

(b) Actual output waveform.

图5 MFDL 信号传输波形。

Fig.5 Waveforms of transferring signals in MFDL.

3 微波光纤延迟线时延特性测量

对于微波光纤延迟线(MFDL), 可以采用矢量网络分析仪测量其时延特性^[10]。本文所测量的微波光纤延迟线看成是一个单端口网络。

测量系统如图 6 所示, 微波光纤延迟线(MFDL)是被测件, 其驱动电路模块用来实现对 MFDL 内部光开关阵列的切换控制, 从而达到切换光纤长度的目的。测量仪器为安捷伦公司矢量网络分析仪 ENA-E5070B。

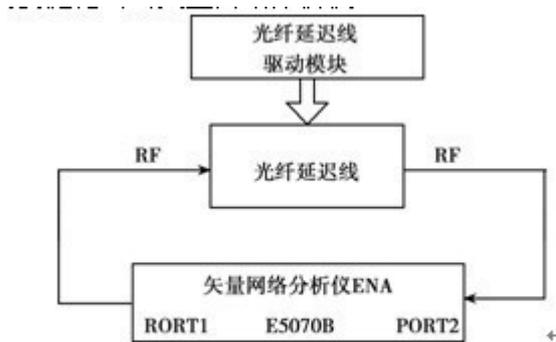


图 6 时延特性测量系统框图

Fig.6 System framework of measuring delay property

3.1 幅频特性测量

采用矢量网络分析仪测量微波光纤延迟线时, 由仪器的 PORT1 端口输出频率扫描信号, 通过 MFDL 后再由 PORT2 端口输入带有被测网络相位信息的 RF 信号进行测量。同理, 通过测量被测网络对功率扫描测试信号的幅度的影响来确定幅频特性。

基于光开关光纤延时阵列的微波光纤延迟线是对微波信号实施传输和处理的器件, 按照信号无失真传输准则, 要求其幅频特性在理想情况下为常数, 即为一条平行于频率轴的直线。应用矢量网络分析仪对所设计组装的 MFDL 进行实测, 得到的幅频特性曲线如图 7 所示。明显看出, 该曲线近似为一条平坦的直线, 而在 0.5 GHz~1.2 GHz 范围内是很好的直线特性。

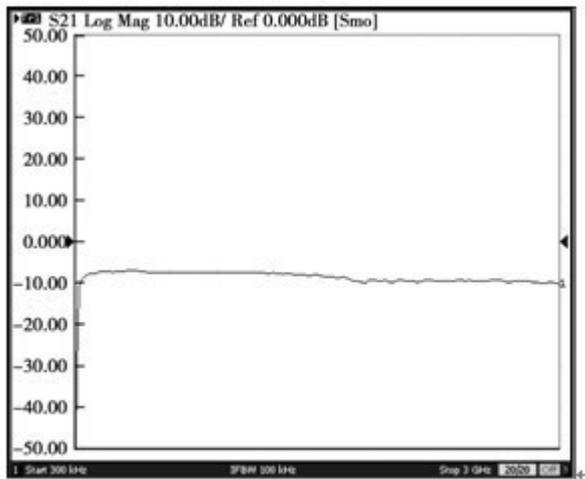


图 7 MFDL 幅频特性测量

Fig.7 Measurement of amplitude-frequency characteristics of MFDL

3.2 相频特性测量

MFDL 器件的相频特性测量结果如图 8 所示，测量时将光纤延迟线模块的光纤总长度设置为 9.009 m。

从相频特性可以看出，[微波光纤延迟线](#)是具有线性相位特性的传输器件。其相频特性解卷绕后并不是一条过零点的负斜率直线，且存在一定的相位噪声。因此对于各频率分量产生的相时延值各不相同，即实际的微波光纤延迟线不具有恒定的相时延。

但是从实验测得的相频特性出发可求出实际系统的群时延。由群时延的表达式可知，群时延 t_g 等于相频特性 $\angle(\omega)$ 的一阶微分，即：

$$\tau_g = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \approx -\frac{\Delta\phi(\text{度})}{360 \cdot \Delta f(\text{赫兹})} \quad (15)$$

对图 8 中相频特性 5 个标记点进行最小二乘拟合，所得直线如图 9 所示，拟合直线斜率 $b = -9022.21$ ，进行符号和单位换算，得到群时延 $\tau_g = -b/360 = 25.062(\text{ns})$ 。

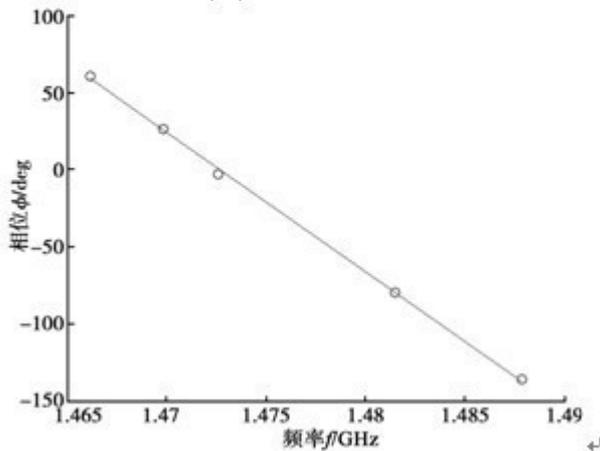


图 9 用最小二乘拟合方法计算群时延

Fig.9 Least-square fitting of group delay

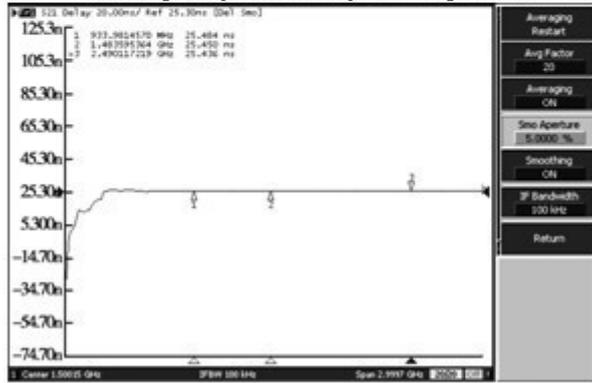
3.3 群时延特性测量

矢量网络分析仪具有直接测量系统群时延并实时显示群时延曲线和数值的功能。值得注意的是应根据系统带宽合理选择测量的平滑孔径 Δf 。这里的平滑孔径 Δf 以该次测量的扫频范围(span)的百分数来确定。如扫频范围为 2 GHz，平滑孔径 Δf 选为 1.5%，则平滑孔径 Δf 实际为 0.03 GHz。平滑孔径 Δf 增大，相位测量精度会相应增加。但是，大的孔径 Δf 会使群时延分辨率降低及微小的群时延变得模糊。孔径 Δf 的适当选择取决于被测网络的群时延特性，要考虑所测群时延的测量精度和群时延相对于频率的变化量。对于文中微波光纤延迟线，选取不同孔径的群时延测量结果如图 10 所示。



(a)测量孔径为 1.5%的群时延

(a)Group delay measured by a 1.5% aperture



(b)测量孔径为 5%的群时延

(b)Group delay measured by a 5% aperture

图 10 微波光纤延迟线群时延测量

Fig.10 Group delay measurement of MFDL

测量结果表明，由于微波光纤延迟线是线性器件，在频带内具有平坦的群时延特性，为了提高群时延测量精度，可设置较大的平滑孔径进行群时延测量。

4 MFDL 多通道群时延特性测量

对于图 2 所示的光纤长度阵列排列结构，排除光开关直通和斜通所产生的光程差，余下 4 个光开关光程完全相同的通道可用于精确的延时控制，对这四个通道进行了群时延的测量，平滑孔径 Δf 设为 5%。测量及计算结果总结在表 1 中，此结果暂未减去仪器测试时引入的电缆连线的延时长度系统误差，该项误差并不影响相对延时差计算结果。设通道 n 的光纤

总长度为 L_n ，其群时延为 τ_n ，则通道间的相对延时差为 $\Delta\tau_n = \tau_n - \tau_1$ ，理论计算值为

$\Delta\tau'_n = (L'_n - L_1)n_p / c$ ，延时精度为 $\Delta t_n = \Delta\tau_n - \Delta\tau'_n$ 。因延迟线内部采用了 1 550 nm 单模光纤，将光纤纤芯群折射率设为 $n=4.1580$ ， c 为真空中的光速。

表1 MFDL4 通道群时延测量

Table 1 Group delay measurement of 4 channels of MFDL

| 通道 | 光纤总长度 | 群时延 | 相对时延差 | 理论计算值 | 延时精度 |
|-----|-----------|---------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| n | L_n / m | τ_n / ns | $\Delta \tau_n / ps$ | $\Delta \tau_n' / ps$ | $\Delta t_n / ps$ |
| 1 | 9.009 | 25.058 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 9.027 | 25.149 | 91 | 87.48 | 3.52 |
| 3 | 9.036 | 25.192 | 134 | 131.22 | 2.78 |
| 4 | 9.054 | 25.283 | 225 | 218.70 | 6.30 |

测量结果表明，延时精度的平均值为 4.2 ps，标准差约为 1.5 ps，可见所设计的微波光纤延迟线相对延时差控制得很好，与理论计算基本一致，延迟精度可控制在 10 ps 以内。将前面由相频特性数据人工计算出来的群时延与仪器自身运算得到的群时延结果相比较也是一致的。

5 结论

基于光开关光纤延时阵列的微波光纤延迟线结构简单，延时精度高，延时范围大，是很有潜力的光纤信号处理器件。一般情况下，采用矢量网络分析仪对其延迟量(群时延)进行测量，能够满足精度要求。影响测量和计算群时延精度的主要因素是相位测量准确度、激励信号源的频率稳定度、被测件的温度稳定性、测试环境的振动干扰以及光纤绕环的曲率半径等。另外，本文中的光开关光纤延时阵列结构还有待进一步优化，以充分利用各个通道实现更多位数的延时控制。

参考文献

[1] ANNE V, BÉATRICE C, JEAN C. Microwave photonics from components to applications and systems[M]. Boston/Dordercht/London: Kluwer Academic Publishers, 2003:334-348.

[2] POOMPAT S, VINCENT W S C. Using optical switches and fiber delay lines for wideband beamforming with RF uniform linear antenna arrays[J]. IEEE, 2004,0-7803-8560:555-558.

SHIN J D, LEE B S, KIM B G. Optical true time-delay feeder for X-Band phased array antennas composed of 2×2 optical MEMS switches and fiber delay lines[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004,16(5):1364- 1366.

[2] ZHU X W, LI Y L, YONG S W, et al. A novel definition and measurement method of group delay and its application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009,58(1):229-233.

[3] 朱旭东. 系统绝对群时延测量的研究[J]. 现代雷达, 2006,28(11):75-80. ZHU X D. Study of measurement for absolute group delay[J]. Modern Radar, 2006,28(11):75-80.

[4] 魏玲,薛定宇,鄂大志,等. 网络控制系统中网络时延与建模分析[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(6):1323-1327. WEI L, XUE D Y, E D ZH, et al. Analysis of network-induced delay and modeling in networked control systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(6):1323-1327.

- [5] 王伟南,李艳和,郑小平,等. 应用马赫-曾德尔调制器的光微波链路建模[J]. 光学学报, 2007,27(1):159-165.
WANG W N, LI Y H, ZHENG X P, et al. Modelling of fiber radio link using mach-zehnder modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2007,27(1):159-165.
- [6] CHEN R, ZHENG X P, ZHANG H Y. The error of optical true time delay network caused by optical switches[C]. Proc. of SPIE, Bellingham, WA, 2005,5625:519-527.
- [7] 李德儒. 析线性网络的时延特性[J]. 重庆邮电学院学报, 2000,12(3):1-7.
LI D R. An analysis of the time-delay characteristics of the linear network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2000,12(3):1-7.
- [8] 吴海涛,王丹妮,边玉敬. Cs Sync 1000 型罗兰 C 接收机系统时延的测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(13):22-27.
WU H T, WANG D N, BIAN Y J. Delay measurement methods of Cs sync 1000 loran-C receiver system[J]. Journal of Electronics Measurement and Instrument, 2002,16(13):22-27.

作者简介

张春熹, 1986 年于湘潭大学获得学士学位, 1989 年于军械工程学院获得硕士学位, 1996 年于浙江大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 主要研究方向是光纤技术及先进信号处理。

E-mail: zhangchunxi@buaa.edu.cn

Zhang Chunxi received BSc from Xiangtan University in 1986, MSc from Ordnance Engineering College in 1989 and PhD from Zhejiang University in 1996. He is currently a professor working in Beijing University of Aeronautics and Astronautics and his main research interests are optical fiber technology and advanced signal processing.

张晓青, 1988 年于重庆大学获得学士学位, 1994 年于北京机械工业学院获得硕士学位, 现为北京航空航天大学在职博士研究生, 主要研究方向是光电检测技术及先进信号处理。

E-mail: zxqbim@163.com

Zhang Xiaoqing received BSc from Chongqing University in 1988 and MSc from Beijing Institute of Machinery in 1994. She is currently a PhD candidate in Beijing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests are photoelectric detecting technology and advanced signal processing.

[北京锦坤科技有限公司](http://www.jonkon.com.cn)

www.jonkon.com.cn