

文章编号: 0258-7025(2006)09-1239-04

基于宽谱光源的光控微波延时技术

王伟南, 郑小平, 周波, 张汉一, 李艳和

(清华大学集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 提出一种新型的基于宽谱光源和色散器件结合的光控波束形成网络(OCBFN)方案,与利用独立激光器的方案进行了比较,给出了该方案的工作原理和延时链路理论分析,并通过实验验证了该方案实现光控延时的可行性。实验中利用掺铒光纤放大器(EDFA)作为宽谱光源,10 km单模光纤(SMF)作为色散器件实现光路延时,可调谐光滤波器选择光路的工作波长,利用矢量网络分析仪产生微波信号并测量信号延时特性,在9.25~10.25 GHz微波频段中,实验测得的系统延时范围、延时精度及真延时特性(延时大小与微波信号频率无关)验证了基于宽谱光源的可调谐光控微波延时方案的可行性。

关键词 光电子学;光控波束形成网络;宽谱光源;真延时

中图分类号 TN 929.1 **文献标识码** A

Optical Controlled Microwave Time Delay Technology Based on Broad Band Optical Source

WANG Wei-nan, ZHENG Xiao-ping, ZHOU Bo, ZHANG Han-yi, LI Yan-he

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A novel optical controlled beam forming network (OCBFN) scheme based on broad band optical source and dispersion device is presented and compared with traditional scheme based on laser diode (LD). The principle of this scheme is illustrated by theoretical analysis and the feasibility is validated by experiment. In experiment, Er-doped fiber amplifier (EDFA) is used as broad band optical source, 10 km single mode fiber (SMF) is used as dispersion device for time delay, tuneable optical filter is used to choose operation wavelength, and vector network analyzer is used to generate microwave signal and measure the time delay performance. In 9.25~10.25 GHz microwave band, system time delay range, time delay precision and true time delay performance are measured, and the feasibility of the OCBFN scheme based on broad band optical source is verified by the experiment results.

Key words optoelectronics; optical controlled beam forming network; broad band optical source; true time delay

1 引言

微波光子学是一门光子与微波技术相结合的新兴学科^[1],光控波束形成技术是这门学科的一项重要应用。与传统的电控波束形成网络相比,光控波束形成网络(OCBFN)具有宽带、无束偏、低功耗、体积小、无电磁干扰等优点。因此,随着无线应用频率的升高和带宽需求增大,光控波束形成网络有望成

为未来相控阵雷达^[2]和智能天线^[3]系统的基本结构。

光控波束形成网络是一种延时波束形成网络,通过控制阵列中不同链路间的延时实现对微波信号相位的控制,从而形成定向波束。常用的延时方法有两种,一种是控制光路长度以控制延时,比如利用光开关选路的方法^[4],另一种是利用色散器件^[5~7]通过改变工作波长实现。色散方案有很多优点,比

收稿日期:2006-01-05;收到修改稿日期:2006-03-31

基金项目:自然科学基金(60432020)资助项目。

作者简介:王伟南(1981—),男,黑龙江人,清华大学集成光电子学国家重点实验室硕士研究生,主要从事光微波方面的研究。E-mail:wangwn@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:李艳和(1956—),男,辽宁省营口市人,清华大学电子工程系教授,博士生导师,主要从事光通信、光网络、半导体集成光电子技术和微电子技术研究。E-mail:liyh@mail.tsinghua.edu.cn

如用单个色散器件替代延时矩阵而简化系统结构、提高幅度一致性和相位一致性,延时范围大,调谐速度快,系统可扩展性好等。但是这种方案需要可调谐的多波长光源阵列,系统成本高,控制难度大。

本文提出一种新的基于宽谱光源的光控波束形成网络方案。

2 理论分析

在本方案(图 1(a))中,用宽谱光源代替可调谐多波长光源阵列,用数字可调谐滤波器选取不同波段的信号控制延时。本方案具有基于色散的光控波束形成网络方案的所有优点,同时具有光源简单、成本低的优点,且光源和色散器件都不用调节措施,而是采用更加快速和容易控制的数字调谐滤波器实现延时调节。系统的可扩展性也更加灵活,只需增加数字滤波器无需对光源和延时部分做调整即可增加链路数目。

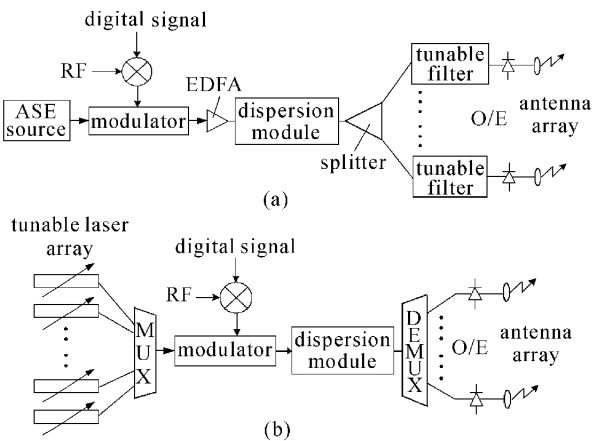


图 1 两种不同结构的光控波束形成网络

(a) 基于宽谱光源的波束形成网络;

(b) 基于可调谐激光器阵列的波束形成网络

Fig. 1 Two different OCBFN architectures

(a) OCBFN based on broad band optical source;

(b) OCBFN based on tunable WDM LD array

宽谱光源方案与采用可调谐激光器的方案(图 1(b))在延时原理上是相同的,都是利用色散实现延时,不同的是前者通过调节滤波器选择系统工作波段,而后者直接调谐光源工作波长。因此,可以预测基于宽谱光源的延时链路的延时值 τ 为

$$\tau = \frac{n_g L}{c}, \quad (1)$$

式中 n_g 为滤波器中心波长处延时模块的等效群折射率, L 为延时链路长度, c 为真空中光速。

下面从理论上分析基于宽谱光源延时方案的可行性。图 2 为该方案的基本链路框图。

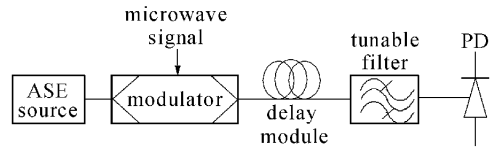


图 2 基于宽谱光源的微波延时链路框图

Fig. 2 Microwave time delay link based on broad band optical source

为了给出物理意义明确的理论分析,采用等效分析的方法建立理论模型。用符号 ω 表示频率,设宽谱光源的功率谱密度为 $P_O(\omega, \omega \in [\omega_0, \omega_0 + W])$, W 为带宽,由宽谱光源的白噪声特性,可将其等效为一系列频率间隔为 $\Delta\omega$ 且互不相干的独立光源叠加的极限形式,则该光源可表示为

$$E_O = \lim_{\substack{\Delta\omega \rightarrow 0 \\ W \rightarrow 0}} \sum_{n=0}^{[W/\Delta\omega]} \sqrt{\Delta\omega P_O(\omega_n)} \exp(j\omega_n t + \phi_n), \quad (2)$$

其中 $\omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega$, ϕ_n 为各等效独立光源的不相干相位。

设调制器的调制系数为 m ,微波信号频率为 ω_f ,则调制器输出光场为

$$E_M = \lim_{\substack{\Delta\omega \rightarrow 0 \\ W \rightarrow 0}} \sum_{n=-[0.5W/\Delta\omega]}^{[0.5W/\Delta\omega]} \sqrt{\Delta\omega P(\omega_n)} \times (1 + m \cos \omega_f t) \exp(j\omega_n t + \phi_n). \quad (3)$$

忽略延时器件的损耗,考虑其色散,则延时器件的传输函数可表示为

$$H_{\text{delay}}(\omega) = \exp(-j\theta), \quad (4)$$

其中 $\theta = \theta_0 + \theta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\theta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2$, θ_1 为式(1)所示的群延时, θ_2 表示色散。

设可调滤波器带宽为 W_F , 功率传输函数为 $P_F(\omega - \omega_F)$, 其中 ω_F 为滤波中心波长。

对光电探测器应用平方律模型,设 $E_{PD}(t)$ 为光电探测器输入光场, R 为响应度,则探测器输出电流为

$$i_{PD}(t) = R \frac{E_{PD}(t) E_{PD}^*(t)}{2}. \quad (5)$$

考虑到 $W_F \ll W$, 在滤波器通带内 $P_O(\omega)$ 可视为常数 P_O 。经过理论计算,光电探测器输出的微波信号可表示为

$$i_{PD}(\omega_f) = i(\omega_f) + i_{\text{mix}}(\omega_f), \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned}
 i(\omega_f) &\propto mRP_0 \lim_{\frac{\Delta\omega}{W} \rightarrow 0} \sum_{n=0}^{[W/\Delta\omega]} \Delta\omega P_F(\omega_n) \cos(\theta_2 \omega_n^2 / 2) \cos\omega_f [t - \theta_1 - \theta_2(\omega_n - \omega_f)] = \\
 &mRP_0 \cos(\theta_2 \omega_f^2 / 2) \int_{\omega_f - W_F/2}^{\omega_f + W_F/2} P_F(\omega) \cos\omega_f [t - \theta_1 - \theta_2(\omega - \omega_f)] d\omega = \\
 &2mRP_0 \cos(\theta_2 \omega_f^2 / 2) \cos\omega_f (t - \theta_1) \int_0^{W_F/2} P_F(\omega - \omega_f) \cos\theta_2 \omega d\omega, \tag{7}
 \end{aligned}$$

为各光载波自身解调输出微波信号的叠加。\$i_{mix}(\omega_f)\$ 为各相位无关光频率分量之间差拍产生的频率为 \$\omega_f\$ 的信号，由于满足该条件的频率分量数目远远小于通带内频率分量数目，且这些差拍产生的微波信号相位无关，故 \$\frac{i_{mix}(\omega_f)}{i(\omega_f)} \approx 0\$，由式(7)可得基于宽谱光源的微波延时链路可以获得与使用独立激光器方案相同的延时。为了验证上述结论，用实验验证基于宽谱光源的微波延时技术的可行性。

3 实验装置及结果

3.1 实验装置

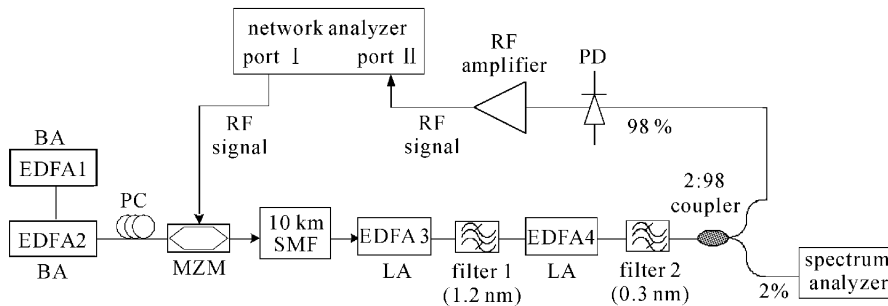


图 3 基于宽谱光源的微波延时链路实验系统框图

Fig. 3 Microwave time delay link experiment system based on broad band optical source

3.2 实验结果

系统的相位响应如图 4 所示(网络分析仪显示结果照片)，图 4 中横轴为微波频率，为了观察周期特性，图中观察频段为 9.25~9.25005 GHz，纵轴为相位，单位为度。由图 4 可以看出，系统的相位响应呈较好的线性。由实验观察到单频点处相位抖动小于 \$5^\circ\$，转化为延时抖动不超过 9.4 ps。

下面对比实验结果和理论结果，根据式(1)，普通单模光纤做延时器件，在 1550 nm 波段 \$n_g\$ 约为 1.47，则微波相位变化 \$2\pi\$ 对应频率变化周期为 \$\Delta f = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{n_g L}\$，取 \$L = 10\$ km，\$\Delta f \approx 20.4\$ kHz。图 3 中实验测得该变化周期约为 20 kHz，与理论值基本吻

合，这也验证了第二节中的讨论。实验系统框图如图 3 所示。其中利用两个掺铒光纤放大器(EDFA)级联构成宽谱光源。调制器是强度调制型 MZM 调制器，10 km 单模光纤为延时介质。滤波器 1 带宽为 1.2 nm，滤波器 2 带宽为 0.3 nm，探测器工作带宽为 1~20 GHz。网络分析仪为 Agilent 公司的 E8394 矢量网络分析仪。微波放大器工作带宽为 9.25~10.25 GHz。其中滤波器 1 的功能是滤除噪声，通过光谱仪监测可调滤波器工作波段，通过网络分析仪测量系统 S21 参数测量该延时链路的幅度和相位特性，再通过相位数据得到系统的延时性能。

合，这也验证了第二节中的讨论。

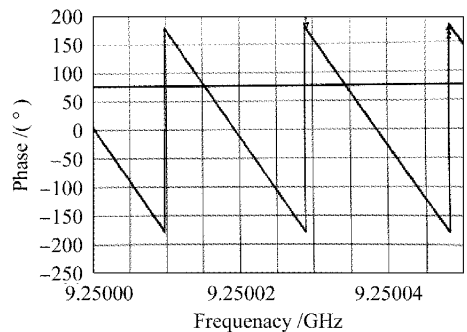


图 4 系统相位响应曲线

Fig. 4 System phase response curve

调谐滤波器 2 的中心波长,可以测得不同频率下系统延时随光路工作波长的变化关系。实验中微波频率分别取 9.25, 9.75, 10.00, 10.25 GHz, 光路工作波段选择 1545~1555 nm, 间隔为 1 nm, 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 系统延时与波长基本呈线性变化关系, 且不同频率延时曲线基本重合, 即链路延时由系统工作波长和色散器件的色散值决定, 与微波频率无关, 即在所测量频段内(1 GHz)表现出真延时特性。

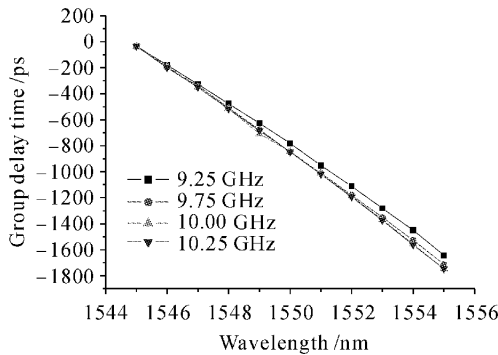


图 5 不同频率微波信号延时-波长曲线

Fig. 5 Time delay-optical wavelength curve with different microwave frequencies

4 结 论

提出了一种基于宽谱光源的光控微波延时技术及基于此技术的光控波束形成网络结构方案, 并通过实验测量了方案中光控微波延时性能。实验结果

证明, 在 9.25~10.25 GHz 频段内该系统呈现延时一致性较好、抖动较小、真延时等特点, 系统的相位响应也与理论预测结果十分吻合。由此可以说明, 基于宽谱光源的光控波束形成网络方案的可行性得到了验证, 该方案在光源复杂度和成本、调谐速度、系统扩展性等方面表现出较多的优点, 是一种有价值的波束形成网络新方案。

参 考 文 献

- 1 Alwyn J. Seeds. Microwave photonics [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3):877~887
- 2 T. Merlet, S. Formont, D. Dolfi *et al.*. Photonics for RF signal processing in radar systems [C]. *Microwave Photonics, MWP'04. 2004 IEEE International Topical Meeting on 4~6 Oct. 2004*:305~308
- 3 Gerd Grosskopf, R. Eggemann, H. Ehlers *et al.*. Maximum directivity beam-former at 60 GHz with optical feeder [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(11):3040~3046
- 4 B. Vidal, M. A. Piqueras, J. Herrera *et al.*. Experimental demonstration of a 3-bit photonic beamformer at the mm-band in transmission and receiving modes [C]. *Microwave Photonics, MWP'04. 2004 IEEE International Topical Meeting on 4~6 Oct. 2004*:309~312
- 5 David A. Tulchinsky, Paul J. Matthews. Ultrawide-band fiber-optic control of a millimeter-wave transmit beamformer [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(7):1248~1253
- 6 Nabeel A. Riza, Muzammil A. Arain, Sajjad A. Khan. Hybrid analog-digital variable fiber-optic delay line [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2):619~624
- 7 Yongqiang Jiang, Brie Howley, Zhong Shi *et al.*. Dispersion-enhanced photonic crystal fiber array for a true time-delay structured X-band phased array antenna [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1):187~189