

基于光采样的微波光子矢量网络分析仪设计

潘磊, 丁玟, 陈萧恩, 陈建平, 吴龟灵*

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 矢量网络分析仪是射频微波领域的重要测量仪器, 设计实现了一套基于光采样的微波光子矢量网络分析仪。该系统使用锁模激光器的超稳光脉冲序列通过马赫-曾德尔调制器直接采样单音信号, 再采用数字信号处理技术获取待测器件的散射参数。实验测试表明: 采用 20 GHz 电光调制器实现的系统带宽可达 20 GHz, 更大的系统带宽可以通过采用更大带宽的电光调制器达到。系统的动态范围约为 60 dB, 最小频率分辨率为 11.92 Hz。对中心频率为 10 GHz 的带通滤波器的散射参数(S 参数)进行了测试, 在通带范围内, 与商用矢量网络分析仪的测试结果相比, S_{21} 的幅度平均偏差为 0.1241 dB, S_{21} 的相位平均偏差为 3.6356°, 具有很好的一致性。

关键词 仪器, 测量与计量; 微波测量; 矢量网络分析; 散射参数; 光采样

中图分类号 TN911.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1312002

Design of Microwave Photonic Vector Network Analyzer Based on Optical Sampling

Pan Lei, Ding Min, Chen Xiaoen, Chen Jianping, Wu Guiling*

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Vector network analyzer is an important measurement instrument in the fields of radio and microwave. In this paper, we design and implement a microwave photonic vector network analyzer (MPVNA) based on optical sampling, which uses ultrastable optical pulse trains, generated by mode-locked laser, to directly sample single tone signals via a Mach-Zehnder modulator, and then processes the sampling data with digital signal process to obtain the scattering parameters of the device under test. The experimental result shows that MPVNA bandwidth is 20 GHz when using an electro-optic modulator with bandwidth of 20 GHz in the system and a larger system bandwidth can be achieved by using an electro-optic modulator with larger bandwidth. The system dynamic range is about 60 dB and the minimum system frequency resolution is 11.92 Hz. Then we use this system to test the scattering (S) parameters of a bandpass filter with a center frequency of 10 GHz and compare the test result with that of a commercial vector network analyzer. The comparison results show that the average amplitude deviation of S_{21} is 0.1241 dB and the average phase deviation of S_{21} is 3.6356° in the passband of the bandpass filter, which proves that the test results of the system is well consistent with that of a commercial vector network analyzer.

Key words instruments, measurement, and metrology; microwave measurement; vector network analysis; scattering parameters; optical sampling

1 引言

矢量网络分析仪通过分析传输波和反射波的幅度相位来表征待测物体的固有特性^[1-2], 是射频微波领域的核心测试分析仪器之一, 在微波器件的设计测试、信号完整性测量、材料分析等领域发挥着重要作用。高

频宽带应用, 如 5G、毫米波通信等, 对矢量网络分析仪的测量精度、带宽和动态范围提出了越来越高的要求^[3-8]。目前, 商用矢量网络分析仪的带宽已经达到上百吉赫兹, 但是其接收机一般采用微波混频的方法, 必须外接不同频段的专用毫米波转换器来实现直流到几百吉赫兹的频率测量^[9], 系统结构复杂。Frankel 等^[10]

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2021-12-13; 录用日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61627817)

通信作者: *wuguilin@sjtu.edu.cn

提出了一种基于外部电光采样的超高带宽矢量网络分析仪,通过采样待测器件(DUT)的时域冲激响应,获取 DUT 的幅频、相频特性。但这种宽带接收方案的系统噪声水平较高,动态范围提升难度大。Lonappan 等^[11]提出了一种基于时间拉伸技术的网络分析仪,但该系统只测试了 DUT 的冲激响应,即 S_{21} 参数,且采集到的信号功率会随着拉伸因子的增大而减小,由时间拉伸带来的色散惩罚也限制了系统的带宽。

本文设计实现了一套基于光采样的微波光子矢量网络分析仪(MPVNA)。该系统利用光脉冲序列通过马赫-曾德尔调制器(MZM)直接采样参考信号和 DUT 的响应信号,并对携带有参考信号和响应信号信息的光脉冲序列进行数字化,进而得到 DUT 的散射参数(S 参数)。MPVNA 的接收机采用光采样实现高频信号的直接下变频和数字化,系统带宽由光脉冲的脉宽和 MZM 的带宽决定,且被动锁模激光器提供的低抖动采样光脉冲序列,保证了对高频信号的采样精度^[12-13]。实验测试表明:系统带宽可达 20 GHz,主要受限于采用的 20 GHz 电光调制器,符合理论预期,采用更大带宽的电光调制器可以达到更大的系统带宽。该

系统对 10 GHz 带通滤波器的测试结果与商用矢量网络分析仪的测试结果一致。

2 系统原理

MPVNA 的原理如图 1 所示。系统由 4 部分组成:信号源、信号分离装置、接收机和数据处理单元。信号源用来产生激励 DUT 的单音信号。信号分离装置控制激励信号在 DUT 两个入射端口之间的切换,并将参考信号、反射信号和透射信号分离送入到接收机的相应接收通道。接收机包含 4 路接收通道,当激励信号进入 DUT 的端口 1 时,通道 1 接收参考信号,通道 2 接收反射信号,通道 3 接收透射信号;当激励信号进入 DUT 的端口 2 时,通道 4 接收参考信号,通道 3 接收反射信号,通道 2 接收透射信号。每路通道都由 MZM、光电探测器和电模数转换器前后级联组成。锁模激光器产生的光脉冲序列经过光分路器进入 4 路通道,通过 MZM 直接采样接收信号;光电探测器将携带接收信号信息的光脉冲转为电脉冲,送给电模数转换器采样量化,并送入数字信号处理单元,提取 DUT 的 S 参数。

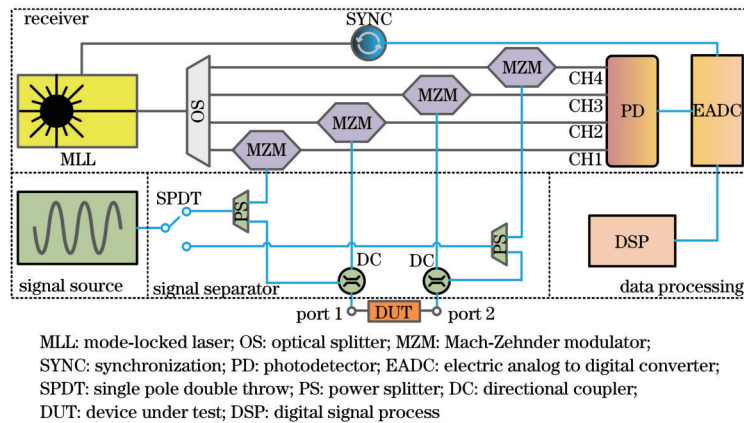


图 1 MPVNA 原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of MPVNA

MPVNA 接收机接收到的响应信号可以表示为^[14]

$$v'(t) = v(t) * s_{ij}(t), \quad i, j = 1, 2, \quad (1)$$

式中: $v(t)$ 是 DUT 的入射信号; $s_{ij}(t)$ 是 S 参数的时域表示, 下标 i 和 j 分别表示 DUT 的输出和输入端口号; 运算符 $*$ 表示卷积运算。相应地, 接收到的参考信号为 $v_i(t) \propto v(t)$ 。

锁模激光器的输出光脉冲序列一般可表示为^[14-18]

$$p(t) = P_A \sum_{m=-\infty}^{\infty} p_s(t - mT), \quad (2)$$

式中: P_A 是光脉冲序列的平均功率; $p_s(t)$ 是根据 P_A 归一化的单个光脉冲时域波形; T 是锁模激光器输出光脉冲的重复周期。

接收机中的 MZM 工作在正交偏置点, 在小信号输入下, 每路采样结果中的调制分量可表示为^[14-15]

$$v_Q[k] = h_A(t) * v'(t)|_{t=kT}, \quad (3)$$

式中: T_s 是光采样的采样周期, 等于锁模激光器输出

光脉冲的重复周期 T ; $h_A(t)$ 是单个接收通道的等效通道冲激响应。接收信号先被 $h_A(t)$ 滤波再被采样。利用响应通道和参考通道的采样结果, 即可获得对应的 S 参数。

由式(3)可见, MPVNA 的系统带宽由等效采样通道的频率响应决定, 可对 $h_A(t)$ 做傅里叶变换得^[14-17]

$$H_A(\Omega) = -0.5 P_A H_M(\Omega) P_s(\Omega) R(\Omega), \quad (4)$$

式中: P_A 是光脉冲功率函数的平均幅度; $H_M(\Omega)$ 是 MZM 小信号频率响应; $P_s(\Omega)$ 是 $p_s(t)$ 的傅里叶变换; $R(\Omega)$ 的表达式为

$$R(\Omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_E(\Omega + n\Omega_s) \exp[-j(\Omega + n\Omega_s)d_E], \quad (5)$$

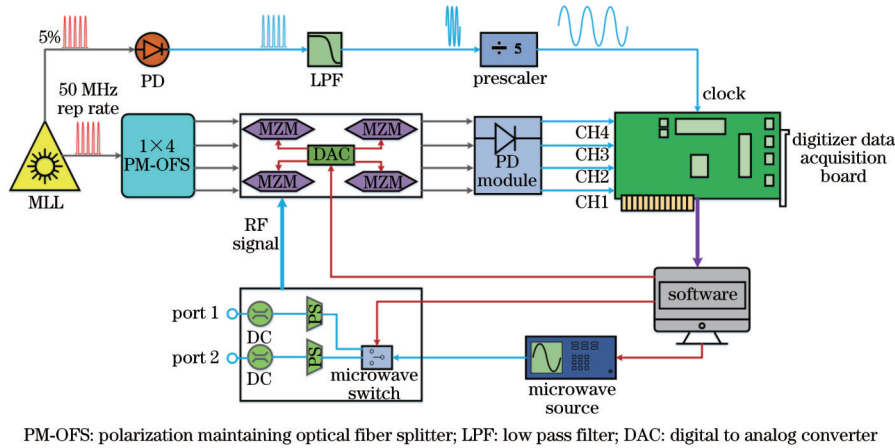
式中: $H_E(\Omega)$ 是从光电探测器到电模数转换器的电后端的频率响应; Ω_s 是锁模激光器的重复频率, 即光采样的采样率; d_E 是从 MZM 到电模数转换器的链路引

入的延迟。根据式(5),由奈奎斯特无串扰准则可知,当电后端带宽大于等于光脉冲重复频率的一半时, $R(\Omega)$ 是一个连续的通带^[15]。由式(4)可见,系统带宽将仅由 MZM 的频率响应 $H_M(\Omega)$ 与光脉冲的频率响应 $P_s(\Omega)$ 决定,而不受限于电后端的带宽^[14-15,18]。理论上,1 ps 高斯脉冲的带宽接近 300 GHz。因此,在采用超窄脉冲的情况下(锁模激光器的脉宽可以达到 100 fs 以下),系统的带宽将主要由 MZM 的带宽决定。

3 设计与实现

设计的 MPVNA 系统的结构框图如图 2 所示。使用 100 kHz~43.5 GHz 商用微波源作为信号源。系统

采用的微波开关、功率分配器等微波器件的带宽均大于 40 GHz。锁模激光器的重复频率为 50 MHz,其输出的光脉冲脉宽约为 78 fs。采用的 MZM 可用带宽约为 20 GHz。光电探测器采用 4 通道集成模块,每通道的带宽为 1.2 GHz。4 通道数字化仪的每通道带宽为 800 MHz,其采样时钟与锁模激光器同步。此时,电后端带宽为 800 MHz,大于锁模激光器重频的一半。由前文理论分析可知,满足奈奎斯特无串扰准则,系统带宽主要由 MZM 的带宽决定。MPVNA 的上位机软件用于控制微波开关、MZM 的偏置电压,以及微波源的扫描频率。



PM-OFS: polarization maintaining optical fiber splitter; LPF: low pass filter; DAC: digital to analog converter

图 2 MPVNA 系统结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of MPVNA

提取 DUT 的 S 参数的数据处理过程如图 3 所示,对数字化仪的采样数据做快速傅里叶变换,分别提取参考信号和响应信号的幅度和相位信息。S 参数的幅度由响应信号的幅度与参考信号幅度的比值确定,S

参数的相位由响应信号的相位与参考信号相位的差值确定^[1]。为了抑制 4 路接收通道(包含 MZM、光电探测器等器件)间的差别引起的系统误差,还需对得到的 S 参数进行校准。

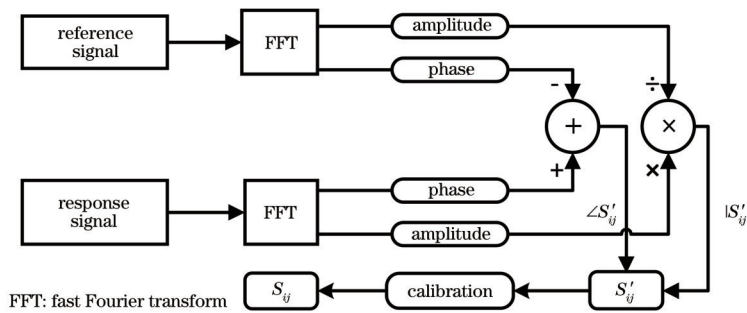


图 3 提取 S 参数数据处理框图

Fig. 3 Block diagram of data processing to extract S parameters

使用快速傅里叶变换(FFT)提取参考信号和响应信号的幅度相位信息时,由于光采样的采样率等于锁模激光器的重复频率,为 50 MHz,FFT 的点数等于光采样的采样点数,受系统硬件性能限制,最大采样点数为 4194304,故 FFT 的频率分辨率最小为 11.92 Hz,系统的频率分辨率等于 FFT 的频率分辨率。

4 测试结果与分析

系统中使用的 MZM 的频率响应如图 4 中虚线所示,其可用带宽为频率响应曲线较平滑的部分,对应频率范围 DC-20 GHz。MPVNA 系统频率响应如图 4 中实线所示,系统的频率响应与 MZM 的频率响应基本

一致,根据前文理论分析,MPVNA的系统带宽主要受MZM带宽的限制,实验结果符合理论分析。

为评估设计的MPVNA系统的性能,测量了一个

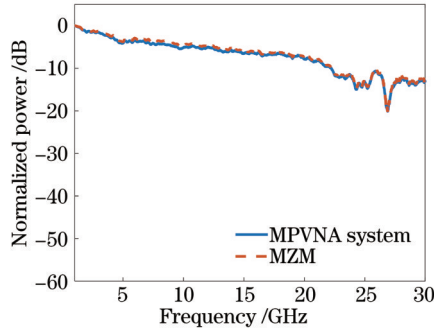


图4 MPVNA系统和MZM的频率响应

Fig. 4 Frequency response of MZM and MPVNA system

中心频率为 10 GHz 带通滤波器的 S 参数,并与商用矢量网络分析仪(PNA N5224A, Keysight)的测量结果比较。两套系统使用同一套校准件(85056D, Keysight)校准^[19]。如图 5 所示,虚线为 MPVNA 的测量结果,实线为商用矢量网络分析仪的测量结果。从图中 $|S_{21}|$ 的测试结果可以看出,此带通滤波器的中心频率约为 10 GHz, 3 dB 带宽约为 130 MHz。在通带范围内,MPVNA 测得的 $|S_{12}|$ 与商用矢量网络分析仪测得的 $|S_{12}|$ 的平均偏差为 0.1 dB [图 5(a) 中散圈图], $\angle S_{12}$ 的平均偏差为 3.5999° , $|S_{21}|$ 的平均偏差为 0.1241 dB [图 5(c) 中散圈图], $\angle S_{21}$ 的平均偏差为 3.6356° 。结果表明,MPVNA 的测量结果与商用矢量网络分析仪的测试结果具有很好的一致性。从图 5(c) 和图 5(e) 中的幅度曲线两侧边界可以看出,系统的动态范围约为 60 dB。当测量超出系统动态范围时,信号淹没在噪声中,便不能测量出准确的 S 参数。

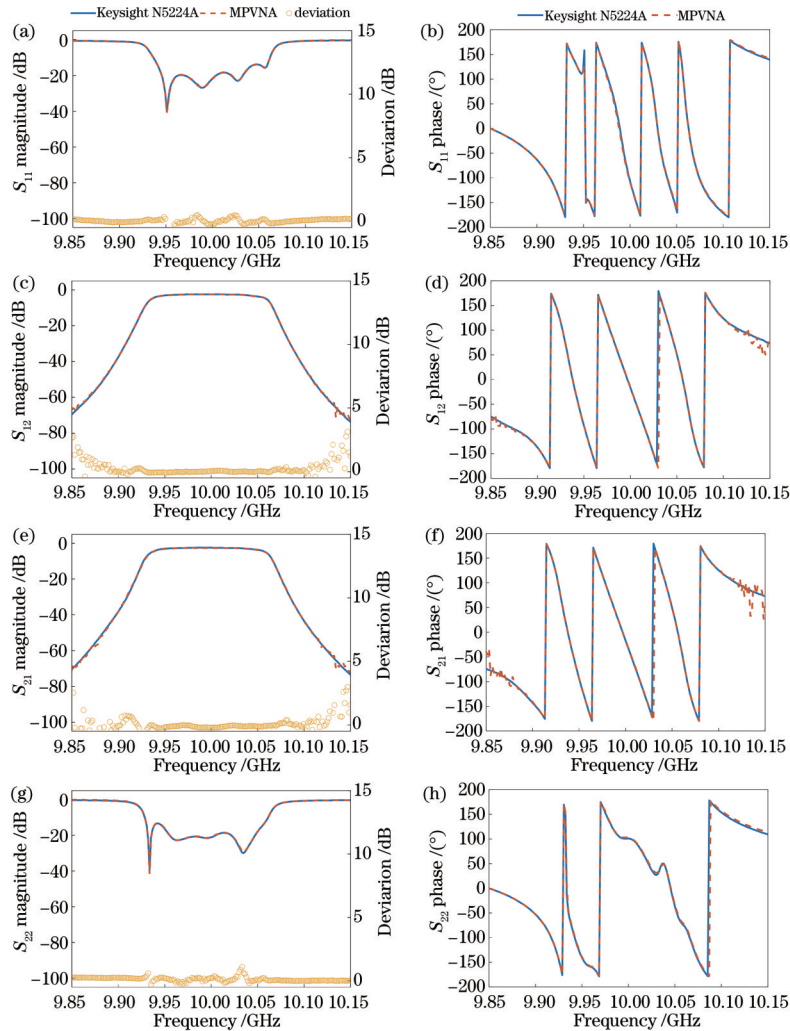


图5 中心频率为 10 GHz 的带通滤波器的 S 参数测量结果。(a) S_{11} 幅度;(b) S_{11} 相位;(c) S_{12} 幅度;(d) S_{12} 相位;(e) S_{21} 幅度;(f) S_{21} 相位;(g) S_{22} 幅度;(h) S_{22} 相位

Fig. 5 S parameters measurement results of band pass filter with center frequency of 10 GHz. (a) Magnitudes of S_{11} ; (b) phases of S_{11} ; (c) magnitudes of S_{12} ; (d) phases of S_{12} ; (e) magnitudes of S_{21} ; (f) phases of S_{21} ; (g) magnitudes of S_{22} ; (h) phases of S_{22}

5 结 论

设计实现了一套基于光采样的微波光子矢量网络分析仪。该系统采用锁模激光器输出的超窄光脉冲序列对微波信号进行采样,实现直接下变频和数字化,降低了对光电探测器、电模数转换器等后端光电器件的带宽要求。实验结果表明,所设计的系统测得的带通滤波器的 S 参数与商用矢量网络分析仪的测量结果一致,且系统的带宽主要受限于采用的电光调制器。采用更大带宽的电光调制器可以达到更大的系统带宽。

参 考 文 献

- [1] Dunsmore J P. Handbook of microwave component measurements[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [2] Teppati V, Ferrero A, Sayed M. Modern RF and microwave measurement techniques[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [3] Ghosh A, Thomas T A, Cudak M C, et al. Millimeter-wave enhanced local area systems: a high-data-rate approach for future wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1152-1163.
- [4] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [5] Dilli R. Analysis of 5G wireless systems in FR1 and FR2 frequency bands[C]//2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), March 5-7, 2020, Bangalore, India. New York: IEEE Press, 2020: 767-772.
- [6] 丁俊杰, 王演祯, 张教, 等. W波段PS-PAM8信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2406003.
Ding J J, Wang Y Y, Zhang J, et al. Wired transmission of PS-PAM8 signal at W-band over terahertz hollow-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2406003.
- [7] 刘君, 赵峰, 孟佳欣, 等. 一种矢量毫米波信号的几何成形性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2106002.
Liu J, Zhao F, Meng J X, et al. Analysis of geometric shaping performance of a vector millimeter wave signal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2106002.
- [8] 刘君, 赵峰, 孟佳欣, 等. 一种矢量毫米波信号的几何成形性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2306004.
Liu J, Zhao F, Meng J X, et al. Analysis of geometric shaping performance of a vector millimeter wave signal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2306004.
- [9] Martens J. Multiband mm-wave transceiver analysis and modeling[C]//WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, April 15-17, 2012, Cocoa Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2012: 12770471.
- [10] Frankel M Y, Whitaker J F, Mourou G A, et al. Ultrahigh-bandwidth vector network analyzer based on external electro-optic sampling[J]. Solid-State Electronics, 1992, 35(3): 325-332.
- [11] Lonappan C K, Madni A M, Jalali B. Single-shot network analyzer for extremely fast measurements[J]. Applied Optics, 2016, 55(30): 8406-8412.
- [12] Wiberg A O J. Progress in photonic sampled analog-to-digital conversion[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: M2E.1.
- [13] Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [14] Ding M, Jin Z T, Chen J P, et al. Photonic network analyzer based on optical sampling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(4): 212-215.
- [15] Su F R, Wu G L, Ye L, et al. Effects of the photonic sampling pulse width and the photodetection bandwidth on the channel response of photonic ADCs[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 924-934.
- [16] Jin Z T, Wu G L, Shi F F, et al. Equalization based inter symbol interference mitigation for time-interleaved photonic analog-to-digital converters[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34373-34383.
- [17] Su F R, Wu G L, Chen J P. Photonic analog-to-digital conversion with equivalent analog prefiltering by shaping sampling pulses[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2779-2782.
- [18] Wang S T, Wu G L, Sun Y W, et al. Principle of integrated filtering and digitizing based on periodic signal multiplying[J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1766-1769.
- [19] Rytting D K. An analysis of vector measurement accuracy enhancement techniques[EB/OL]. [2021-02-03]. http://hparchive.com/seminar_notes/a-218.pdf.