

面向微波光子矢量网络分析仪的软件门控方案

王嘉辉,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:为了提高微波光子矢量网络分析仪(MPVNA)进行脉冲测量时的动态范围,提出了一种软件门控方案,该方案利用临时闲置接收通道接收与脉冲激励产生的控制信号同源的脉冲方波,以此生成门控信号。通过这个门控信号对采集到的待测器件脉冲响应进行控制,有效提高了信噪比和测量的动态范围。对 10 GHz 带通滤波器的脉冲散射参数(S 参数)进行了测量,实验结果表明:在占空比为 1% 的脉冲激励下,应用软件门控的测量动态范围相比未应用门控时的提高了约 20 dB;门控处理后测得的 S_{11} 和 S_{22} 参数曲线也因为信噪比的提升更加光滑和稳定。

关键词:微波测量;矢量网络分析;脉冲测量;光采样;软件门控

中图分类号: TN787.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0085-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Software gate control scheme for microwave photonic vector network analyzer

WANG Jiahui, CHEN Xiaoen, CHEN Jianping, WU Guiling*

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 20040, China)

Abstract: To improve the dynamic range of microwave photonic vector network analyzers (MPVNA) during pulse measurements, a software gate control scheme is proposed. This scheme utilizes the temporarily idle receiving channel to receive a pulse square wave that is sourced from the control signal generated by the pulsed excitation, thus generating a gate control signal. By using this gate control signal to control the pulse response of the device under test that has been collected, the signal-to-noise ratio and the measurement's dynamic range are effectively improved. The pulse scattering parameters (S-parameters) of a 10 GHz band-pass filter were measured. Experimental results show that under a 1% duty cycle pulsed excitation, the measurement dynamic range with the software gate control applied has increased by approximately 20 dB compared to when no gate control control was used. The S_{11} and S_{22} parameter curves measured after gate control processing are also smoother and more stable due to the improvement in the signal-to-noise ratio.

Key words: microwave measurement, vector network analysis, pulse measurement, optical sampling, software gate control

0 引言

矢量网络分析仪是微波射频测量的重要仪器。传统矢量网络分析仪使用连续的单音信号激励待测器件(DUT),并通过分析透射信号和反射信号来确定器

收稿日期:2024-07-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(61627817)资助。

作者简介:王嘉辉(1999—),男,硕士研究生,本科毕业于西安交通大学电子与信息学部信息与通信工程学院信息工程专业,主要研究方向为微波光子信息处理。

* 通信作者:吴龟灵(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为微波光子信息处理、光学时间频率传递。



件的特性^[1-2]。随着微波射频技术的发展,特别是在芯片测试领域,脉冲激励的应用场景变得越来越广泛^[3-5]。然而,传统的矢量网络分析仪无法有效地测量在脉冲激励条件下工作的器件。因此,对于这些条件下的散射参数(S 参数)的测量需求变得日益重要。当矢量网络分析仪用于脉冲测量时,若脉冲激励的占空比减小,则测量的动态范围也会相应降低。为了解决这一问题,门控技术被提出作为有效的解决方案之一^[6-7]。2007 年,安捷伦公司^[8]在其 PNA-X 型号矢量网络分析仪中引入了硬件门控和软件门控技术,专门用于 S 参数的脉冲测量。实验表明,在脉冲激励占空比为 0.001% 的情况下,PNA-X 分析仪通过硬件门控实现了大约

王嘉辉,陈萧恩,陈建平,等:面向微波光子矢量网络分析仪的软件门控方案

20 dB 的动态范围提升,而软件门控进一步增加了约 20 dB 的动态范围增益^[7]。

太赫兹技术和新一代通信技术的迅速发展显著提升了微波射频器件的工作频率与带宽需求。传统的电矢量网络分析仪通常需要不同波段的转换器才能实现从低频到上百吉赫兹高频的测量,这使得其结构变得异常复杂^[8]。相比之下,光器件容易满足对微波射频器件宽带测量的需求。2022 年,潘磊等人^[9]设计了一种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电光调制器来采样电信号,并通过光/电转换和电量化实现 S 参数的测量。由于接收部分的带宽主要由电光调制器决定,使该分析仪具备超过百吉赫兹的接收带宽。2023 年,DING M 等人^[10]提出了一种基于光采样的脉冲微波光子矢量网络分析仪(p-MPVNA)。在占空比分别为 10%、1% 的脉冲激励下,采用矢量叠加算法将 p-MPVNA 的动态范围分别提高了约 7 dB 和 17 dB。然而,该算法需要在存在光脉冲频偏干扰的情况下提取每个脉冲主瓣中的频率值。当脉冲激励的占空比降低时,需处理的频率值数量增加,从而导致频率值提取的偏差增大和计算复杂度的增加。因此,本文为光采样 MPVNA 设计一种适用于脉冲测量的软件门控方案。

1 软件门控方案

1.1 原理

软件门控的工作方式如图 1 所示。当矢量网络分析仪采集由单音信号经过脉冲调制而成的单音脉冲信号后,软件门控方案依据获取的脉冲通断时间对采集的数字信号进行处理。脉冲导通时间段的信号采样结果得到保留,而关断时间段的采集结果将全部设置为 0。

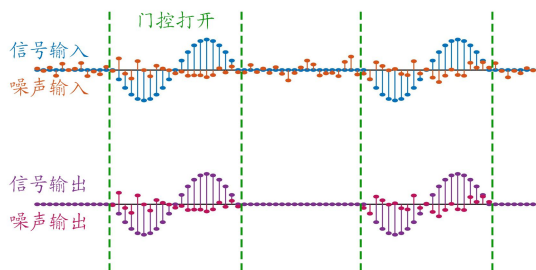


图 1 软件门控的工作方式示意图

假设系统的噪声为白噪声,该噪声的数字化频谱为 $N(\omega)$, ω 为数字角频率,功率谱密度为恒定常数 N_0 ,令系统输出的单音信号功率为 S_0 。在脉冲测量过程中,由于对单音信号进行了占空比为 ε 的脉冲调制,

调制后的脉冲信号在原单音信号频率处的功率减小,测量信噪比降低,致使未应用门控时,动态范围降低 $|20 \log(\varepsilon)| \text{ dB}$ ^[6,11]。无门控时脉冲测量的动态范围 R_{D1} 为

$$R_{D1} = \frac{S}{N} = \varepsilon^2 R_{D0} = \varepsilon^2 \frac{S_0}{N_0 B_R} \quad (1)$$

其中, S 为系统信号功率, N 为系统噪声功率, R_{D0} 为矢量网络分析仪使用连续激励测量时的动态范围, B_R 为系统的分辨率带宽。

当系统对接收到的脉冲信号使用软件门控时,如果门控的开启与关闭完全与脉冲的导通和关断时间同步,则门控不会对采样结果中的信号功率产生影响。而软件门控对噪声的影响类似于脉冲调制的效果。门控后的噪声频谱 $N_G(\omega)$ 为

$$N_G(\omega) = \varepsilon \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\varepsilon k \pi) N(\omega - k \omega_p) \quad (2)$$

其中, ω_p 为调制使用的脉冲方波的频率。利用白噪声频谱互不相关的特性计算门控后的噪声功率谱 $S_G(\omega)$ 为

$$S_G(\omega) \approx \varepsilon^2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}^2(\varepsilon k \pi) N(\omega - k \omega_p) N^*(\omega - k \omega_p) = \varepsilon N_0 \quad (3)$$

使用软件门控后,噪声功率降低,测量信噪比获得提升,其脉冲测量的动态范围 R_{D2} 为

$$R_{D2} = \varepsilon \frac{S_0}{N_0 B_R} \quad (4)$$

使用软件门控后,当采用矢量网络分析仪进行脉冲测量时,动态范围相较于连续激励测量只降低了 $|10 \log(\varepsilon)| \text{ dB}$,对比无门控时的脉冲测量有所提高^[6]。光采样 MPVNA 电量化过程产生的噪声以光电探测中的热噪声和散弹噪声为主,可以等效为白噪声^[12]。因此,使用软件门控在原理上可以提高 MPVNA 脉冲测量的信噪比和动态范围。

1.2 设计和实现

采用软件门控后的 MPVNA 脉冲测量系统的结构如图 2 所示。本文在光采样 MPVNA 的基础上^[9],添加了脉冲发生器与脉冲分配器。在系统进行脉冲测量时,脉冲发生器会输出 2 路具有相同脉宽、相同占空比且时延差固定的脉冲方波信号:其中一路脉冲方波作为输入信号源,用于控制生成脉冲激励。此脉冲激励通过信号分离装置和 DUT,然后进入光采样器进行采样,并由相应的通道接收。由于 MPVNA 在同一时刻仅需要使用 3 个采样通道来测量 S 参数,因此在任何给定的时间点,接收机中总有一个临时闲置的通道^[9]。另一路脉冲方波则被输入到脉冲分配器,并通过开关切换接

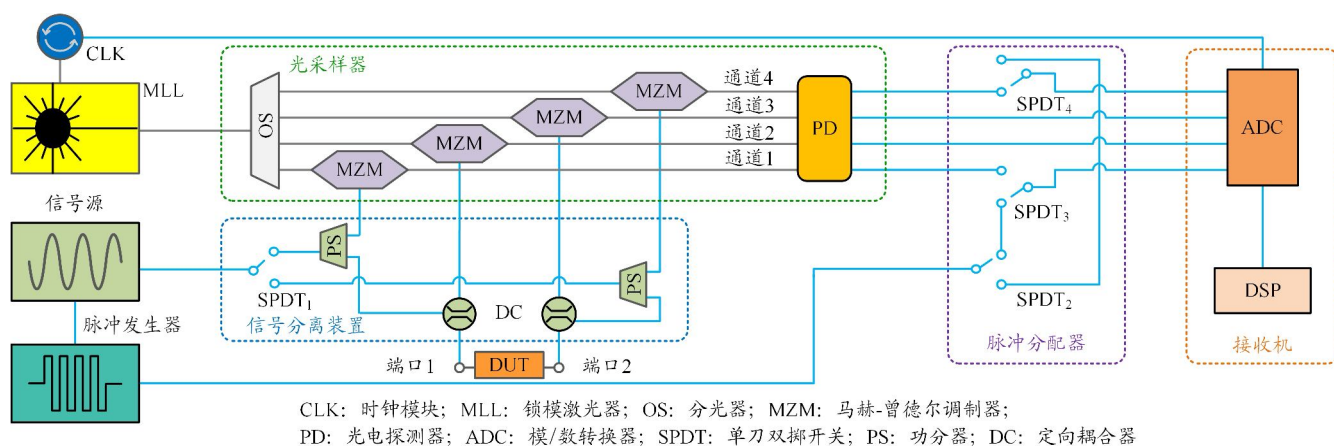


图2 使用软件门控后的MPVNA脉冲测量系统框图

入这个临时闲置的通道进行接收。数字处理模块(DSP)采用互相关法计算接收到的脉冲方波与DUT脉冲响应采样结果之间的时间差,并根据这一时间差调整脉冲方波的时延,使二者的时间差保持在一个采样周期内,从而生成同步的门控信号。在对脉冲信号进行分析时,为了确保接收机的灵敏度,系统需要在单个脉宽内采集一定数量的样本点^[13]。因此,单个采样周期内的时延误差可以忽略不计,不会对接收效果产生显著影响。

同步的门控信号作为时间窗口,用于对脉冲响应采样结果进行时域加窗处理。软件将门控阈值外的采样值(脉冲关断期间采集到的噪声)置零,仅保留位于门控阈值内的、在脉冲导通期间收集的有效信号样本。这样,通过软件门控处理,噪声显著减少,而有效信号几乎不变,从而提升了信噪比。使用经过门控处理的采样数据求解脉冲S参数,可以更准确地获取DUT的频率响应特性,并提高脉冲测量的动态范围。这种方法有效地增强了测量的精确性和可靠性。

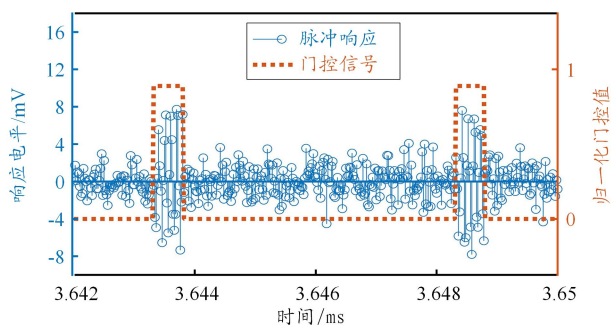
传统的软件门控方法依赖于时间戳来获取执行门控所需的脉冲响应脉宽、占空比和传输延迟等时间信息^[6],这要求系统各个部分必须保持同步。而本文提出的方案则是基于从脉冲方波转换而来的门控信号来获得时间信息。在多端口MPVNA的应用场景中,该方案允许激光器、接收机、信号源和脉冲发生器无需彼此同步工作。这样不仅避免了光电系统之间复杂的同步需求,还有效地降低了系统的整体复杂度。

2 测试结果与分析

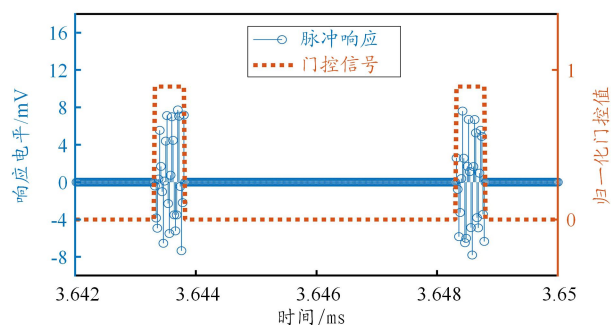
为了评估本文提出的软件门控方案在多端口MPVNA中的性能,首先在一个单一频点下观察其对DUT脉冲响应光采样结果的影响。测试中使用的脉冲激

励信号是由频率为10 GHz的单音信号经过脉冲调制产生的;该调制过程通过脉宽为500 ns、占空比为10%的脉冲方波实现。光采样的周期设定为20 ns。实验选用了中心频率为10 GHz的带通滤波器作为DUT。

使用软件门控前后DUT传输响应的采样结果对比情况如图3所示。可以看出,在时域方面,当使用软件门控后,仅保留了脉冲导通期间的采样数据,而关断期间采样的噪声值则全部被置零。在频域方面,使用软件门控之后,对应待测频率的频谱主瓣中心响应几乎保持不变,但系统底噪显著降低了大约10 dB,导致信噪比提高了约10 dB。上述结果与理论分析中所提出的关于软件门控机制对系统内部信号及噪声影



(a) 使用软件门控前的时域采样结果



(b) 使用软件门控后的时域采样结果

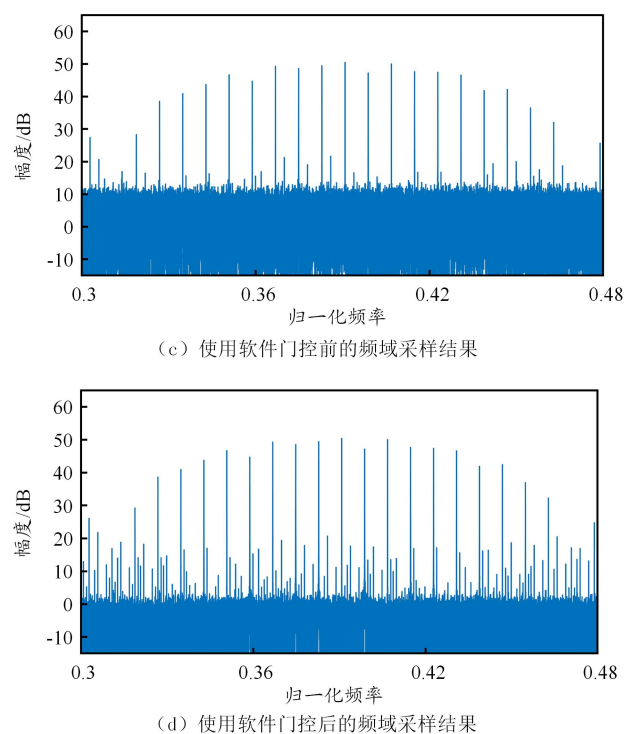


图3 使用软件门控前后,在单个频点下DUT对脉冲激励的传输响应的光采样结果

响的论断相一致。此外,实验还验证了恢复出的门控信号与接收机接收到的脉冲响应之间的时间差控制在一个采样周期(20 ns)之内,这表明所提出的软件门控方案能够满足同步要求,从而证明了其有效性和可行性。

然后,在连续激励和1%占空比的脉冲激励条件下,本文对中心频率为10 GHz的带通滤波器的S参数进行测量。 S_{12} 、 S_{21} 参数的测量结果如图4所示。图中,蓝色线表示连续激励,红色线表示使用门控前的脉冲激励,绿色线表示使用门控后的脉冲激励。由图4可知,在测量过程中,不同测量方法在9.94~10.06 GHz频段,即滤波器通带范围内所测量的幅度和相位基本相同。但由于测量动态范围的不同,各测量方法对滤波器过渡带的测量差异较大。当滤波器的衰减大于测量动态范围时,测量所得 S_{12} 和 S_{21} 参数的幅度和相位发生失真。此外,未应用门控时,脉冲测量所得 S_{12} 和 S_{21} 参数在滤波器通带外的幅度和相位出现失真的情况最为严重。应用门控后,幅度和相位失真有所缓解。

S_{11} 、 S_{22} 参数的测量结果如图5所示。图中曲线表示与图4一致。可以看出,未使用软件门控时, S_{11} 和 S_{22} 参数的幅度曲线在9.94~10.06 GHz频段上显示出明显的波动,其相位曲线在同一频段内也存在波动现象。

此外,使用软件门控后的 S_{11} 和 S_{22} 参数的幅度和相位曲线显得更为平滑,表明测量结果更加稳定。这种改进主要是因为软件门控增强了测量结果的信噪比,从而减少了噪声干扰对测量过程的影响。

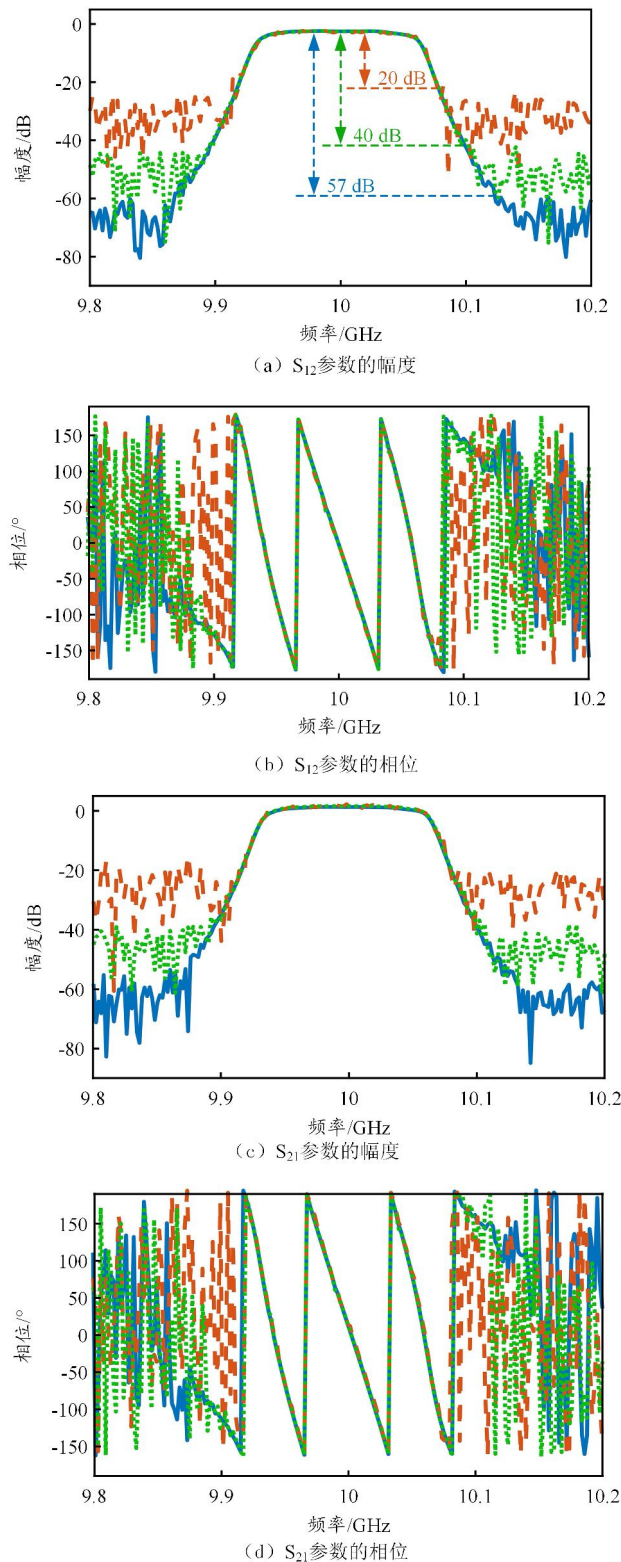
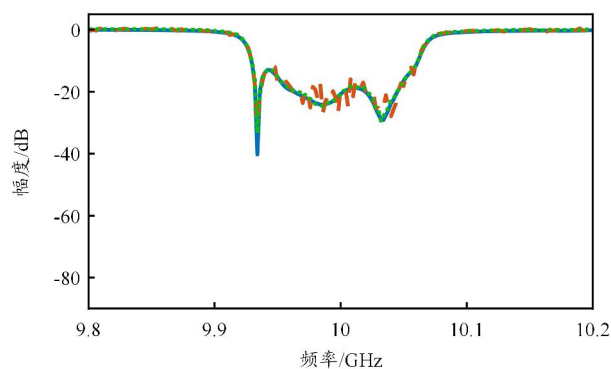
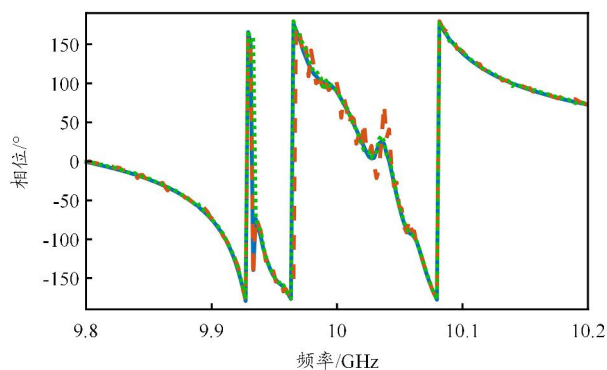
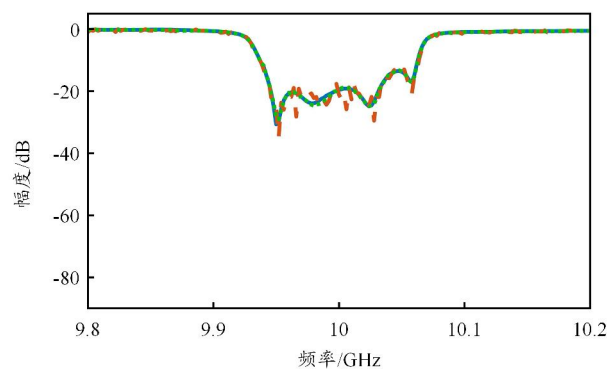
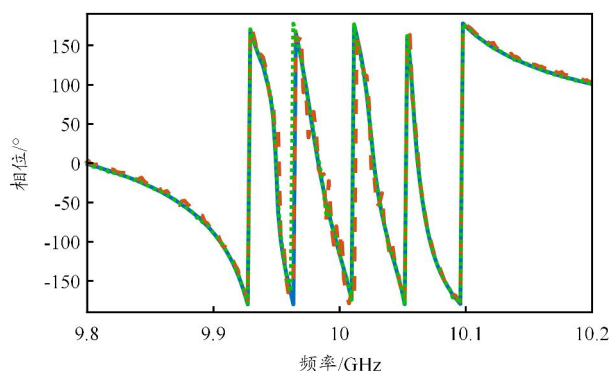


图4 S_{12} 、 S_{21} 参数测量结果

(a) S_{11} 参数的幅度(b) S_{11} 参数的相位(c) S_{22} 参数的幅度(d) S_{22} 参数的相位图5 S_{11} 、 S_{22} 参数测量结果

3 结束语

本文提出了一种针对光采样 MPVNA 脉冲测量的软件门控方案,利用未使用的接收通道部分接收同源方波信号,通过互相关算法计算时延并调整延迟时间生成门控信号,降低噪声干扰,提升信噪比和动态范围。实验成功测量了 10 GHz 带通滤波器的脉冲 S 参数,结果显示该方案符合理论预期,显著提高了信噪比及动态范围,简化了系统结构,提供了高效经济的解决方案。

参考文献:

- [1] DUNSMORE J P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques[M]. Chichester: John Wiley & Son, 2020: 1–70.
- [2] TEPPATI V, FERRER A, SAYED M. Modern RF and microwave measurement techniques[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 18–35.
- [3] WILSON C, ZHU A, KING J. Intrinsic capacitance extraction from pulsed s-parameters[C]//2019 14th European Microwave Integrated Circuits Conference, September 30–October 1, 2019, Paris, France. Piscataway: IEEE, 2019: 132–135.
- [4] LITTLE M O, JONES E J, DUCHARE D J, et al. Techniques for pulsed microwave measurements [C]//27th ARFTG Conference, June 5–6, 1986, Baltimore, USA. Piscataway: IEEE, 1986: 22–33.
- [5] SALCINE C, HOLZINGE B, KALLFASS I. Characterization of Intrinsic capacitances of power transistors under high current conduction based on pulsed s-parameter measurements [C]//2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, October 31–November 2, 2018, Atlanta, USA. Piscataway: IEEE, 2018: 180–184.
- [6] BETTS L. Tracking advances in pulsed s-parameter measurements[J]. Microwaves RF, 2007, 46(9): 61–62, 65–66, 68, 71–72.
- [7] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Active-device characterization in pulsed operation[EB/OL]. (2014–08–03)[2024–06–25]. <https://www.keysight.com.cn/cn/zh/assets/7018-02951/application-notes/5990-7781.pdf>.
- [8] MARTENS J. Multiband mm-wave transceiver analysis and modeling [C]//WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, April 15–17, 2012, Cocoa Beach, USA. Piscataway: IEEE, 2012: 1–4.
- [9] 潘磊,丁玟,陈萧恩,等. 基于光采样的微波光子矢量网络分析仪设计[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 84–88.
- [10] DING M, CHEN X, JIN Z, et al. Pulsed microwave photonic vector network analyzer based on direct sampling[J]. Optics Express, 2023, 31(3): 3821–3830.
- [11] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Wideband and narrowband detection for pulsed-RF component testing[EB/OL]. (2014–07–31)[2024–06–25]. <https://www.keysight.com.cn/cn/zh/assets/7018-01374/application-notes/5989-4839.pdf>.
- [12] JIN Z, WU G, WANG S, et al. Noise characterization for time interleaved photonic analog to digital converters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1230–1242.
- [13] LOTTIC V, D'ANDREA A N, MENGALI U. Channel estimation for ultra-wideband communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 20(9): 1638–1645.