



·效应、试验与评估·

## 光频梳下变频信号光纤延时频率恢复方法\*

王天恒, 谢树果

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 针对光频梳下变频信号接收过程中存在的频率信息丢失问题, 提出了一种基于频率-相位映射的信号频率恢复方法, 该方法使用可调光纤延迟线在两路光频梳变频链路之间产生一组固定已知的时延, 时延在信号原始频率与下变频信号相位差之间建立映射关系, 利用该映射关系可以从测得的相位差计算出信号的原始频率。分析了时延值等参数对频率恢复的影响, 估计了该方法对相位测量不确定度的限值要求, 最后给出了该方法具体实施方案中关键参数的设置策略。所有下变频信号的相位差可以通过快速傅里叶变换等数据处理一次性得出, 因此该方法的时间代价和计算成本几乎不随着信号个数增加而增加。在不考虑下变频信号混叠的情况下, 本文所提出的方法在理论上对处理信号的数量没有限制, 因此相比于已有的光频梳下变频信号频率恢复方法, 在多信号频率恢复方面更具有优势。

**关键词:** 微波光子; 光频梳; 下变频; 频率恢复; 光纤延迟线

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230358

## Frequency recovery method for optical-frequency-comb-based down-converted signal reception using optical delay line

Wang Tianheng, Xie Shuguo

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To recover the missing frequency information in optical-frequency-comb-based down-converted signal receiving, this paper introduces a frequency recovering method based on frequency-phase-mapping. An optical time delay line is used to generate a certain time delay and it builds a frequency-phase-mapping between signal's frequency and down-converted component's phase, which can be acquired by data processing. Thus, the frequency can be calculated through the measurable phase and certain time delay. Then, this paper analyzes parameters such as time delay on frequency recovery, estimates the limit requirements of this method for the uncertainty of phase measurement, and finally gives the setting strategy of key parameters in the specific implementation of this method. The number of signals under test is theoretically unlimited as long as the down-converted components are not aliased. Compared to related works, this method has better performance in multi-signals recovery, because its expense in time consumption and data processing is nearly constant as the number of signals increases.

**Key words:** microwave photonics, optical frequency comb, down-converting, frequency recovering, optical time delay line

在电磁环境监测、宽带电磁成像等领域, 通常需要对分布在大频率范围内的电磁信号进行非合作式接收<sup>[1-3]</sup>。受器件带宽, 特别是模数转换(ADC)的采样率的限制, 接收机的瞬时带宽往往无法覆盖需要监测的频率范围。经典的办法是采用扫频外差式接收机或者频谱仪改变接收机本振频率以实现大频率范围的覆盖, 该方法的优点是对信号接收质量较高, 缺点是扫频过程耗时, 在扫频中容易遗漏信号, 降低了监测系统对瞬发信号的截获概率。为了降低扫频时间, 瞬时测频接收机常被用于引导扫频外差接收机。瞬时测频接收机能够将信号的频率信息实时转化成缓变的信号形式, 进而通过低速 ADC 对缓变信号采集分析解算出信号频率, 再将频率信息用于引导外差接收机调整本振频率实现精确接收。在微波光子技术的加持下, 瞬时测频接收机已经能够实现很宽的测频范围以及

\* 收稿日期: 2023-10-17; 修订日期: 2024-02-05

联系方式: 王天恒, 12021041@buaa.edu.cn;

谢树果, xieshuguo@buaa.edu.cn。

较高的测频精度<sup>[4-8]</sup>,如文献[4]中基于微波光子技术的瞬时测频接收机能够实现 5~67 GHz 的测频范围;文献[5]中基于频率-时间映射的瞬时测频接收机实现了 20 GHz 的测频范围以及优于±100 MHz 的测频精度。瞬时测频接收机的优点是能够快速确定目标频率范围内是否存在信号并给出信号的频率信息,缺点是不能给出信号的幅度、相位等其他信息,无法单独使用。此外,由于瞬时测频接收机将信号频率信息映射到其他维度,如幅度等,当存在多个信号时解算过程往往会变得十分复杂甚至不可解。

基于光频梳下变频的接收方法能够将大频率范围内的信号下变频至第一半重频区间内,拷贝信号保留有原始信号的幅度相位信息,从而利用低速 ADC 实现对大频率范围内非合作信号的实时接收,在宽带电磁成像系统、太赫兹信号接收等领域有所应用<sup>[1-3,9-10]</sup>。

然而,由于光频梳会将被测信号搬移至每一个半重频区间,信号的原始频率信息在接收过程中丢失。一个直观的解决方法是使用不同重频的光频梳对同一被测信号进行下变频测量,根据下变频后信号频率差异建立方程求解。在文献[11]中,Yasui 等人使用两个重频差 50 kHz 的光频梳实现了太赫兹信号的接收;赵欣等在文献[12]中使用重频差在 1.28 kHz 的两个光频梳实现微波信号的接收,随后在文献[13]中进一步增加了光源个数,消除了双重频接收中存在的“死区”问题。这种频率恢复方法需要让光频梳的重频差稳定保持在一个微小的值上,这对系统稳定性具有较高的需求,从而限制了应用场景。杨燕等改造了频率恢复算法,突破了“微小重频差”这一限制<sup>[14]</sup>,在三光频梳下能够实现 6 个信号频率的恢复且错误率在 1% 以内<sup>[15]</sup>。

然而,随着被测信号数量的增加,求解方程的数量与求解难度大大增加,同时出现伪解的概率也逐渐提高,频率恢复准确性变差。为了提升频率恢复个数,本文提出了一种光纤延时频率恢复方法。该方法利用确定的延时在原始信号频率与下变频信号相位之间建立映射关系,通过测量下变频信号相位求解信号原始频率。该方法中的延时由可调光纤延迟线产生,其能够在很宽的频带内产生精确的无色散延时,被广泛应用于微波信号处理<sup>[16]</sup>与雷达波束合成<sup>[17-18]</sup>等领域。

## 1 基本原理

根据文献[14],光频梳的频谱由一系列等间隔的梳齿组成,梳齿间的间隔为光频梳的重复频率,简称重频。其时域表达式可用冲击串表示。假设待测信号为复数形式的单频信号,则下变频过程可以表示为

$$I_o = TI_0 \left( 1 + \alpha A e^{j2\pi f_r t} \right) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta \left( t - \frac{n}{f_0} \right) \quad (1)$$

式中:  $I_o$  为经调制后的输出光强;  $T$  为光频梳的周期;  $I_0$  为平均光强;  $\alpha$  为调制器的调制深度;  $A$  为信号强度;  $f_r$  为被测信号的频率;  $f_0$  为光频梳的重频,与  $T$  互为倒数;  $n$  为脉冲序数,表示光频梳中包含无数个脉冲尖。由傅里叶级数展开冲击串函数,则式(1)可以表示为

$$I_o = I_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi n f_r t} + \alpha A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi (f_r + n f_0) t} \quad (2)$$

由于  $n$  的取值为所有整数,因此被测信号的分量在每一个重频区间内都存在一个分量,该分量携带原始信号的全部幅度相位信息,因此只需要低速的光探测器和 ADC 对第一重频区间内的分量进行光电转换以及采样即可实现对大频率范围内非合作信号宽开接收。此时位于第一重频区间的信号分量  $v_1$  可以表示为

$$v_1 = G \alpha A e^{j2\pi (f_r - N f_0) t} \quad (3)$$

式中:  $G$  为光探测器增益,  $N$  为信号频率  $f_r$  与重频  $f_0$  比值的下取整。正是  $N$  的未知性,造成了光频梳下变频接收时频率信息的丢失。

为了求解  $N$  值,本文利用可调光纤延迟线产生确定且已知的时延,在  $N$  值与位于第一重频区间的下变频信号的相位之间建立映射关系,具体的实施方法示意图如图 1 所示。图中一个射频信号被分成两路分别调制在两个电光调制器上,同一个光频梳被分成两路经过不同的时延分别给两路调制器提供激光激励,记两路信号时延差为  $\Delta t$ ,上路与下路两路第一重频区间内的下变频信号分别为  $v_{11}$  与  $v_{12}$ ,则其表达式分别为

$$v_{11} = G \alpha A e^{j2\pi (f_r - N f_0) t} \quad (4)$$

$$v_{12} = G \alpha A e^{j2\pi (f_r - N f_0) t} \cdot e^{j2\pi N f_0 \Delta t} \quad (5)$$

对比(5)与(4)可以发现,下变频信号的相位由于时延  $\Delta t$  的引入而产生变化,该变化与  $N$  以及  $f_0$  有关。下变频

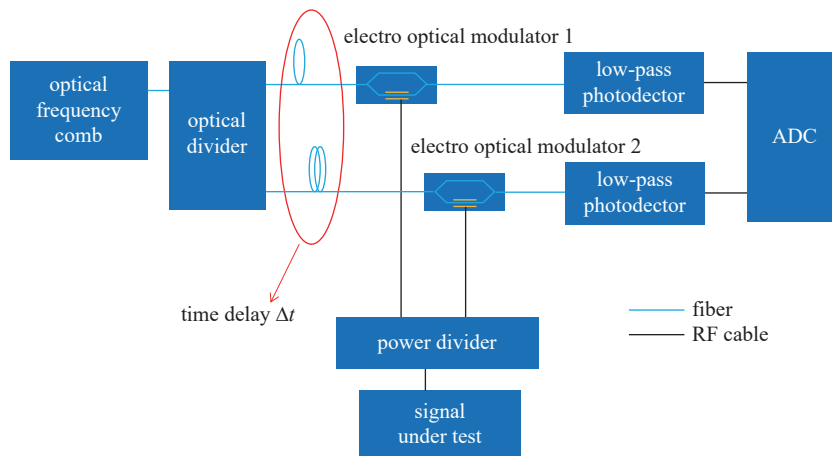


Fig. 1 Scheme of a time-delay frequency recovery system

图 1 光纤延时测频系统示意图

信号的相位可以通过 ADC 转化为数据后经过快速傅里叶变换 (FFT) 获取, 同时光频梳参数  $f_0$  和时延  $\Delta t$  是先验已知的, 因此可以求解出  $N$ , 进而求解出信号原始频率  $f_r$

$$f_r = Nf_0 + f_i \quad (6)$$

式中:  $f_i$  为下变频信号频率。

对于实际中更加常见的实信号, 其拥有一对共轭的频率分量, 分别位于  $-f_r$  与  $f_r$  两个频点处, 在经过光频梳下变频后, 二者的下变频分量会分别位于  $[0, f_0/2]$  内以及  $[f_0/2, f_0]$  内, 因此必要的接收带宽可以进一步降低为第一半重频区间。需要注意的是此时落在第一半重频区的分量可能是正频率搬移的结果, 也可能是负频率搬移的结果, 因此在时延的作用下相位会出现正负号上的差异,  $N$  值既可能是正数也可能是负数, 式(6)应改写为

$$f_r = |Nf_0 + f_i| \quad (7)$$

对于多信号接收的情况, 所有信号在第一半重频区间内分量的相位均可以通过一次 FFT 运算获取, 并各自根据同一个时延计算其  $N$  值, 因此信号个数对频率恢复过程中的计算量产生的影响极小。在下变频信号彼此之间不发生混叠的前提下, 该方法理论上对恢复频率信号个数没有上限。

## 2 实验验证

实验原理图如图 1 所示, 实验实物图如图 2 所示, 其中 ADC 由示波器实现。实验中主要使用到的仪器与型号如表 1 所示。实验中选用的光频梳重频  $f_0 = 213.2$  MHz, 时延设置为 107.6 ps。

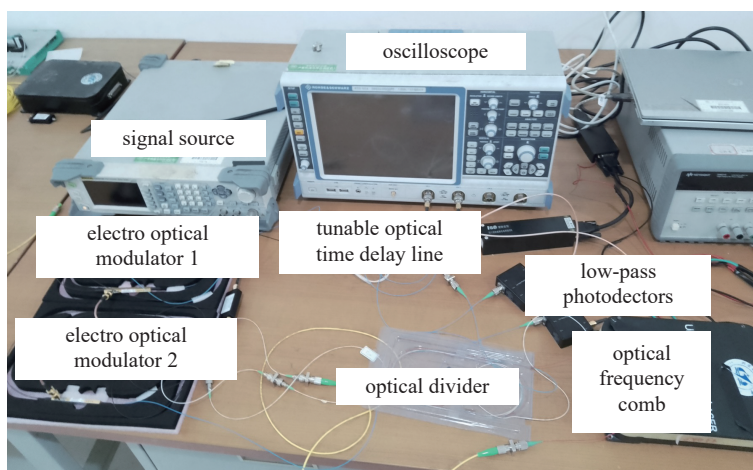


Fig. 2 Photograph of the experiment

图 2 实验装置实物图

实验选取 100 个随机分布在 2~4 GHz 的频点对两路信号相位差进行测量, 每个频点测量 5 次, 结果如图 3 所示。由于在连接中两路信号的射频路径长度、光探测器相位-频率特性等存在差异, 测试前需要对其进行补偿。

表 1 实验主要仪器型号参数  
Table 1 Main devices of the experiment

device	manufacture(version)
signal source	RIGOL (DSG3120)
tunable optical time delay line	LIGHTSOS (0-330 ps)
oscilloscope	R&S (RTO2014,1 GHz,10 GS/s)
optical frequency comb	made by Beihang University (213.2 MHz)
photodetector	KEYANG (KY-PRM-200M-I-FC)
electro optical modulator	CONQUER (KG-AM-15-10G)

### 3 实验结果分析

显然,在没有噪声等非理想因素的影响下,测量得到的相位差应该与实线的值相等,然而在噪声的干扰下,测量值分布在理想值的附近。由于  $N$  值为整数,因此当相位测量的不确定度小于相邻  $N$  值间相位差异的一半时,采用就近选取的方法仍能够正确地恢复出信号频率。因此,该方法对相位测量的不确定度限值的可以使用式(8)来近似评估

$$d\varphi < \frac{\pi}{2N_{\max}} \quad (8)$$

式中:  $N_{\max}$  为所有  $N$  的可能取值中的最大值。即在时延选取合适的前提下,  $2N_{\max}$  个相位值均匀分布在  $[0, 2\pi]$  区间内,其最小间距为  $\pi/N_{\max}$ 。此时时延的值为  $1/2N_{\max}f_0$ 。

通常情况下,相位测量的不确定性由接收过程中的噪声造成,并且可以利用式(9)来进行估算

$$d\varphi = 2\arctan(1/\sqrt{\sigma_{\text{SNR}}}) \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{\text{SNR}}$  信噪比。由式(8)与式(9)可知,当  $N_{\max}$  较大时对接受信噪比有着较为严苛的要求。

为了降低对接受信噪比的要求,或者说提高给定信噪比下的被测信号频率范围,可以增加测量系统的光路,且新增的光路具有不同的时延,时延值为系统设置的关键参数。测量路数与相位不确定度之间的关系以及具体的时延设置策略将在下文中给出。

记  $M = F_{\text{floor}}(\pi/d\varphi)$ , 其中  $F_{\text{floor}}$  函数为下取整。由于存在  $d\varphi$  的相位测量不确定度,一次测量所能够区分的  $N$  的个数为  $M$ , 当  $N_{\max} > M$  时则会有多个  $N$  值对应的相位由于彼此之间离得太近处于相位测量的模糊范围内而无法区分,此时则需要通过引入多路测量进一步区分这些离得较近的相位。记  $t_0 = 1/(2N_{\max}f_0)$  为一个时延长度单位;测量路数为  $p+1$ , 则当每一路时延值分别为  $0, t_0, Mt_0, \dots, M^{p-1}t_0$  时,系统最多可以实现  $N_{\max} = M^p$  的频率恢复,即最高可恢复频率的上限为  $M^p f_0$ 。由于相位测量的不确定性,  $M^p$  个相位值在时延为  $t_0$  的测量路中被分成了  $M$  组,每组中仍然存在  $M^{p-1}$  个可能的频率模糊,而这些模糊会在时延  $Mt_0$  测量路中以同样的方式降低为  $M^{p-2}$  个,依次类推,如图 4 所示,最终在时延  $M^{p-1}t_0$  测量路锁定唯一正确的相位,进而恢复出正确的频率。

当测频系统的测量路数与时延值按照上述方式设置时,信噪比、接收系统路数与测量频率范围三者之间存在如下的制约关系

$$N_{\max} = \left( \frac{\pi}{2\arctan(1/\sqrt{\sigma_{\text{SNR}}})} \right)^p \quad (10)$$

当被测信号频率范围即  $N_{\max}$  与接收系统路数  $p$  确定,则可以估计出接收信号的必要信噪比;或者当接收信号信噪比和频率范围确定时,可以预估必要的接收路数。以接收信号 20 dB 信噪比为例,其对应的相位不确定度为 0.2 rad, 则当只是用 2 路接收时,最多能够区分 15 个  $N$  值,也即最高可测量的频率范围为  $7f_0$ , 当测量路数提升至 3 时,测频范围可达到  $112f_0$ ; 若接收路数为 4 路,信号接收频率范围为  $100f_0$ , 则接受信噪比的限制可以降低至约 6 dB。

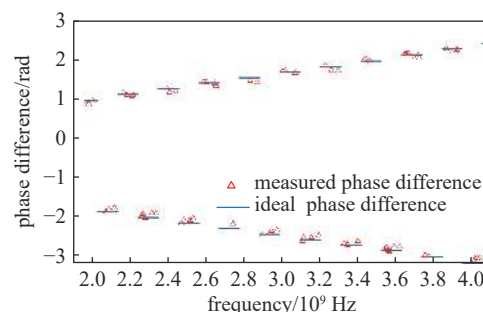
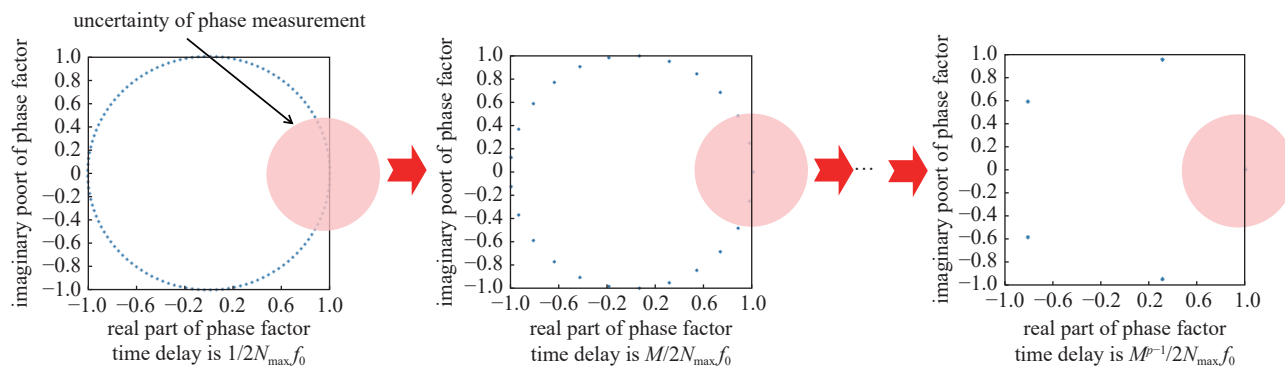


Fig. 3 Results of the phase difference measurements at different frequencies

图 3 频率-相位差测试结果



Fig. 4 Planisphere of  $N$  in different time delay图4 不同  $N$  值下相位分布“星座图”

## 4 结论

针对光频梳下变频接收中信号频率信息丢失问题, 本文提出了一种光纤延时的测频方法。该方法利用可调光纤延迟线在原始信号频率与下变频信号相位之间建立映射关系, 利用可测的下变频信号相位与已知的时延求解信号原始频率。本文所提出的方法在理论上可恢复信号数量没有上限且恢复过程中的计算量几乎不随信号个数变化。与文献[14-15]中所使用的余数匹配频率恢复方法相比, 本文所提出的频率-相位映射频率恢复方法在多信号频率恢复问题中更具有优势, 且整个系统只需要一个光频梳作为光源, 降低了成本与复杂度。在响应时间方面, 本文所提出的方法时间消耗集中在数据采集与处理阶段, 频率恢复过程增加的运算损耗与FFT相比可以忽略, 因此该方法在响应时间方面与同等数据量的经典接收方式基本相同。在本文提出的方法的加持下, 光频梳下变频接收系统针对大频率范围非合作信号的接收能力进一步提升。综上, 本文为大频率范围非合作信号接收提供了一种快速、便捷、轻盈的接收方式。

由于信号需要经过额外的光电-电光转换, 在调制与转化过程中会引入额外的噪声, 因此该方法在灵敏度方面会有损失, 同时本文所提及的频率恢复方法对信噪比具有一定的要求, 当信噪比较低时将无法恢复出准确的频率。另外, 本文针对单频信号开展了理论分析与实验验证, 对于带有一定带宽的信号而言, 可以采用窄带信道划分策略以及窄带鉴相算法实现相位提取之后带入本文所提出的方法进行频率恢复, 然而对于具体的不同类型信号, 本文尚未开展通用的或具有针对性的信道化策略与窄带鉴相算法研究。此外, 本文中提出的方法无法应用于下变频信号存在混叠的情况, 当信号数量增加或信号带宽提高, 下变频信号发生混叠的概率会提高, 进而影响频率恢复的成功率。在后续的研究工作中将进一步研究不同调制方式的宽带信号与下变频后发生混叠的信号的频率恢复方法。

## 参考文献:

- [1] Xie Shuguo, Luan Shenshen, Wang Tianheng, et al. Frequency estimation method for wideband microwave camera[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6838-6847.
- [2] Xie Shuguo, Wang Tianheng, Hao Xuchun, et al. Localization and frequency identification of large-range wide-band electromagnetic interference sources in electromagnetic imaging system[J]. *Electronics*, 2019, 8: 499.
- [3] Luan Shenshen, Xie Shuguo, Wang Tianheng, et al. A space-variant deblur method for focal-plane microwave imaging[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8: 2166.
- [4] Shi Jingzhan, Zhang Fangzheng, Ben De, et al. Photonics-based broadband microwave instantaneous frequency measurement by frequency-to-phase-slope mapping[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(2): 544-552.
- [5] Zhu Beibei, Tang Jian, Zhang Weifeng, et al. Broadband instantaneous multi-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked laser[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(10): 4576-4583.
- [6] Singh K, Preußler S, Misra A, et al. Photonic microwave frequency measurement with high accuracy and sub-MHz resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 2748-2753.
- [7] 刘可欣, 高娜. 基于受激布里渊散射的光子辅助瞬时测频方案[J]. *光子学报*, 2022, 51: 0306008. (Liu Kexin, Gao Na. Photon-assisted instantaneous frequency measurement scheme based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51: 0306008)
- [8] 杨一鸣, 许方星. 一款光学瞬时测频接收机[J]. *电讯技术*, 2020, 60(7): 764-770. (Yang Yiming, Xu Fangxing. A photonic instantaneous frequency measurement receiver[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(7): 764-770)
- [9] Sasaki A I, Nagatsuma T. Millimeter-wave imaging using an electrooptic detector as a harmonic mixer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum*

- [Electronics](#), 2000, 6(5): 735-740.
- [10] Juodawlkis P W, Hargreaves J J, Younger R D, et al. Optical down-sampling of wide-band microwave signals[J]. [Journal of Lightwave Technology](#), 2003, 21(12): 3116-3124.
- [11] Yasui T, Hayashi K, Ichikawa R, et al. Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings[J]. [Optics Express](#), 2015, 23(9): 11367-11377.
- [12] Zhao Xin, Li Cui, Pan Yingling, et al. Dual-comb-assisted real-time microwave frequency measurement with a single mode-locked fiber laser[C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2016: JTh2A. 134.
- [13] Zhao Xin, Li Cui, Li Ting, et al. Dead-band-free, high-resolution microwave frequency measurement using a free-running triple-comb fiber laser[J]. [IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics](#), 2018, 24: 1101008.
- [14] Yang Yan, Xie Shuguo, Dong Yakai, et al. A frequency recovering method for photonic under-sampling E-field measurement[J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2021, 21(12): 13495-13505.
- [15] Yang Yan, Xie Shuguo, Wang Tianheng, et al. Multi-frequency electric field measurement method for optical under-sampling system[J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2021, 21(20): 23024-23036.
- [16] Zhang Jiejun, Yao Jianping. Broadband microwave signal processing based on photonic dispersive delay lines[J]. [IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques](#), 2017, 65(5): 1891-1903.
- [17] Lialios D I, Zekios C L, Georgakopoulos S V. A planar true time delay 2D beamformer[C]//2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. 2022: 1898-1899.
- [18] 吴彭生, 谷一英, 程旭升, 等. 用于 X 波段相控阵天线的高速可调光纤延迟线[J]. [光通信技术](#), 2013, 37(4): 5-7. (Wu Pengsheng, Gu Yiyang, Cheng Xusheng, et al. High-speed tunable optic true-time delay line for X-band antenna[J]. [Optical Communication Technology](#), 2013, 37(4): 5-7)