

宽带高精度 PADC 系统中频综模块的设计与实现

蔡光辉, 邹卫文, 杨光, 袁野, 陈建平

(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:在宽带高精度光子模数转换(Photonic Analog-to-Digital Converter, PADC)系统中, 频综模块主要用于驱动 PADC 系统中的光开关阵列来实现并行解复用功能。介绍了 PADC 系统中的频综模块设计与实现, 通过优化设计频综模块的内部器件可以调节光开关阵列的并行解复用性能, 从而改善 PADC 系统的量化有效比特位数 (Effective Number of Bits, ENOB)。实验对比分析了不同频综模块结构对 PADC 系统性能的影响, 在 9.812GHz 的微波信号输入下的量化 ENOB 达 7.73 位, 证明了频综模块优化设计方案的有效性。

关键词:频综模块; 光子模数转换系统; 光开关; 并行解复用

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.001

Design and realization of frequency synthesizer module for a broadband high-precision PADC system

CAI Guanghui, ZOU Weiwen, YANG Guang, YUAN Ye, CHEN Jianping

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

Abstract: In the broadband high-resolution photonic analog-to-digital converter (PADC), the frequency synthesizer is basically used as a microwave driver to the photonic switch arrays in the PADC for parallel demultiplexing. Design and realization of the frequency synthesizer in the PADC is demonstrated. The characteristics of photonic switch arrays can be tuned via optimization of the design of the frequency synthesizer and its influence to the effective number of bits(ENOB) in the PADC is improved. The effectiveness of the frequency synthesizer on the PADC system is explored and the ENOB reaches 7.73-bit resolution at 9.812GHz input carrier.

Key words: frequency synthesizer; photonic analog-to-digital converter; photonic switch; parallel demultiplexing

0 引言

光子模数转换 (Photonic Analog-to-Digital Converter, PADC) 系统采用了低抖动的光脉冲序列作为采样时钟, 具有高精度量化优势。与电模数转换 (Electric Analog-to-Digital Converter, EADC) 系统相比, PADC 系统拥有更好的模数转换综合性能 (采样速率、采样带宽和采样精度), 可应用在不同的工程领域^[1,2]。目前, PADC 系统的实现主要有 3 种方案: 基于时间拉伸原理的 PADC 方案^[3]、基于波长-时间交织的 PADC 方案^[4]和基于并行解复用的 PADC 方案^[5-7]。根据实现途

径的复杂度来看, 基于并行解复用的 PADC 方案具有明显优势, 这是因为其直接采用了高重复频率的低抖动光脉冲作为采样时钟, 使采样输出的光脉冲序列在后端进行光电转换及量化前仅需要进行并行解复用处理。而频综模块主要用于驱动 PADC 系统中的光开关阵列来实现并行解复用功能, 因此本文介绍 PADC 系统中的频综模块设计与实现: 将光采样序列的参考时钟信号经过分频、放大和功分等处理, 可为并行解复用系统提供所需的频率和功率的驱动信号, 从而使基于并行解复用的 PADC 系统获得良好的多通道并行解复用功能和较高的有效比特位 (Effective Number of Bits, ENOB)。

收稿日期: 2017-12-28。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (61571292、61535006) 资助。

作者简介: 蔡光辉 (1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为光子模数转换技术。

1 宽带高精度 PADC 系统与频综模块的架构

图 1 为宽带高精度 PADC 系统和频综模块的结构示意图。参考时钟源分别向主动锁模激光器和频综模块提供相参的高频参考时钟。主动锁模激光器产生重复速率与参考时钟频率相同的光脉冲序列。光脉冲序列输入到电光调制器中对微波信号进行电光采样。采样后输出的光脉冲序列经过并行解复用模块后形成并行、多通道的光采样脉冲序列, 然后输入到光电探测器(Photoelectric Detector, PD)阵列中形成多通道并行的电信号, 最后在后端进行数字量化与数据处理。

并行解复用模块由多级光开关阵列级联构成, 各级光开关由频综模块进行驱动以实现开关响应。输入到并行解复用模块的光脉冲序列被分成时间互补、按通道路数降速的多路光脉冲序列, 从而实现并行解复用效果。由于每级光开关阵列均需要输入相应幅度的驱动信号, 且前一级开关所需的驱动信号的频率是后一级的两倍^[7], 因此, 需要优化设计频综模块的内部结构, 使得并行解复用模块具有较好的开关状态。

根据并行解复用模块对驱动信号的频率和功率要求, 本文设计的频综模块采用了如图 1 所示的多级分频结构, 通过对输入的参考时钟进行多级分频处理后, 输出多路不同频率的驱动信号。同时, 为了使频综模块的输出信号幅度能达到并行解复用模块的驱动功率和谐波抑制的要求, 需要对分频后的驱动信号进行放大和滤波处理。

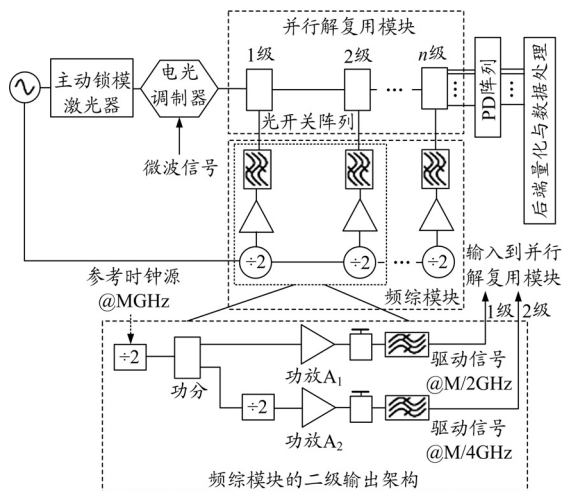


图 1 宽带高精度 PADC 系统和频综模块的结构示意图

2 实验测试与结果分析

2.1 频综模块内部器件的性能测试

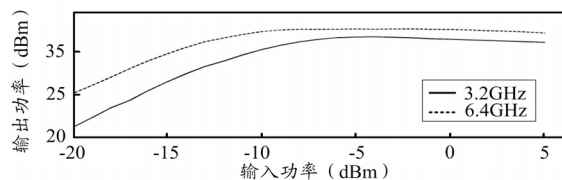
为了验证本文方案的可行性和有效性, 实验采用的参考时钟频率为 12.8GHz, 频综模块和并行解复用

模块均采用二级架构。在参考时钟的作用下, 主动锁模激光器产生 12.8GS/s 的光脉冲序列, 并通过电光调制器对微波信号进行采样。采样后输出的光采样脉冲序列输入到并行解复用模块中, 经过解复用处理后形成 4 路, 每路速率降为 3.2GS/s 的光采样脉冲序列。经过降速的光采样脉冲序列通过 PD 阵列后, 转换为 4 路并行的电信号, 最后输入到电后端进行量化与数据处理。

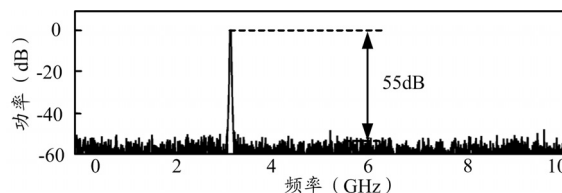
频综模块的二级架构如图 1 下半部所示。该模块对输入的参考时钟信号进行二级降频处理后输出两路信号, 频率分别为 6.4GHz 和 3.2GHz。该两信号作为驱动信号, 分别输入到并行解复用模块的第一级和第二级光开关阵列中。实验中发现, 并行解复用模块的驱动信号功率需控制在 17~19dBm 时, 方能取得较好的开关特性, 进而获得有效的解复用效果。为了有效调节并行解复用模块中的驱动信号功率, 在各级分频线路中加入了功率放大器和可调衰减器。

两个分频线路中的功率放大特性如图 2(a) 所示, 输入到功率放大器之前的 3.2GHz 和 6.4GHz 驱动信号功率分别为 4.11dBm 和 -12.42dBm, 根据此特性可以得出经过放大后的功率分别达到 36dBm 和 36.4dBm, 均大于 19dBm。放大后的两路驱动信号再分别经过可调衰减器进行一定程度的衰减后, 驱动信号功率可以控制在 17~19dBm 的范围内。

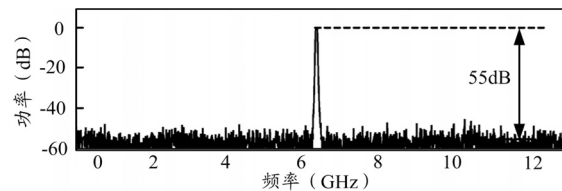
在分频过程中, 分频器输出的信号频谱存在高次



(a) 两个功率放大器的放大特性曲线



(b) 中心频率在 3.2GHz 的窄带滤波器特性曲线



(c) 中心频率在 6.4GHz 的窄带滤波器特性曲线

图 2 频综模块内部主要器件的实验测试结果

谐波(主要是二次谐波)会恶化驱动信号的频谱特性,进而影响并行解复用模块的性能。为了消除高次谐波的影响,本文采用窄带滤波器对各级分频线路输出的驱动信号进行滤波处理。利用网络分析仪对 3.2GHz 和 6.4GHz 分频线路中的窄带滤波器进行频率特性分析,结果如图 2(b)、图 2(c)所示,在对应驱动信号的二次谐波的频率点(分别为 6.4GHz 和 12.8GHz)及其附近频率区域上具有较高的抑制比(达到了 55dB)。

2.2 频综模块输出信号的性能测试

为了评估 PADC 系统中的频综模块性能,我们通过电谱仪对频综模块输出的两路驱动信号进行频谱分析,得到了两路驱动信号的归一化功率谱,测试结果如图 3 所示。在分别移除频综模块两路输出线路中的窄带滤波器后,测得频综输出的两路驱动信号的功率谱分别如图 3(a)和图 3(b)所示,未经滤波处理的驱动信号会携带一定大小的二次谐波。由于二次谐波会在一定程度上影响驱动信号对并行解复用系统的驱动效果,因此需要在频综模块的输出线路中加入滤波器来滤除这类谐波。当保留频综模块输出线路中的窄带滤波器时,测得两路驱动信号的功率谱分别如图 3(c)和图 3(d)所示。分别对比图 3(a)和图 3(c)以及图 3(b)和图 3(d),可以看出,经过窄带滤波器后驱动信号的二次谐波会受到有效的抑制。

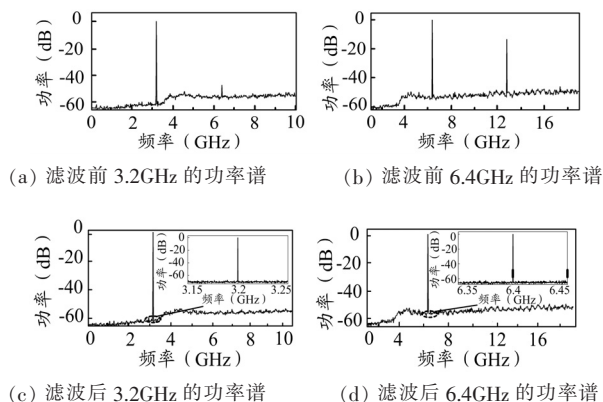


图 3 频综模块输出的驱动信号滤波前/后的功率谱

在实际测量中,受电谱仪内部噪声的影响,当测量的频率范围增大时,频谱噪声也随之增加,影响了对信号功率抑制比的测试。为了更精确地测试两路驱动信号的功率抑制比,在对应中心频率附近 100MHz 的频率范围内,分别测试了两路驱动信号的功率谱,结果如图 3(c)和图 3(d)中的插图所示。由两插图可以看出,3.2GHz 和 6.4GHz 驱动信号的抑制比分别达到了 68dB 和 60dB,表明频综模块系统中的谐波噪声处于较低水平。

2.3 频综模块输出信号功率对并行解复用模块的影响

为了测试频综模块输出信号的功率对并行解复用模块工作性能的影响,在改变某一路信号功率时,我们测试了并行解复用模块的输出波形图。测试中的 PADC 系统不加载微波信号,并仍采用 12.8GHz 的参考时钟。

首先,我们在并行解复用模块中未输入驱动信号的情况下,通过采样示波器获得了并行解复用模块经过 PD 阵列后输出的某一路波形,结果如图 4(a)所示。由于没有输入驱动信号,并行解复用模块未获得解复用效果,因此图 4(a)所示的脉冲序列速率仍然为 12.8GS/s,对应的脉冲周期为 78.125ps。然后,将频综模块输出的两路信号分别经过滤波后的信号加载到并行解复用模块中(本文只演示 3.2GHz 信号功率对并行解复用模块工作性能的影响,6.4GHz 信号类似)。在保证 6.4GHz 驱动信号的功率为 18.55dBm 时,将 3.2GHz 驱动信号功率调低,使其低于所需的范围(如 10dBm),并行解复用模块输出的脉冲波形如图 4(b)所示。从图 4(b)中可以发现,输入到并行解复用模块的部分脉冲开始被抑制,说明并行解复用模块开始工作;但并没有被完全抑制,这是因为输入的信号功率未能达到要求,使得并行解复用的性能受到影响。将 3.2GHz 驱动信号功率调高,使其高于所需的范围(如 22dBm),测试得到的脉冲波形如图 4(c)所示。此时,并行解复用模块也开始工作,但依然在别的时序上出现残余脉冲。图 4(b)和图 4(c)表明,频综模块提供的信号功率不论高于还是低于所需的功率范围时,并行解复用模块的解复用性能都会受到影响。最后,我们测试了 3.2GHz 驱动信号功率在 18.55dBm 时并行解复用模块输出的脉冲波形,结果如图 4(d)所示。与图 4(a)对比可以发现,此时的脉冲速率降为原来的 1/4,且具有较高的抑制比。

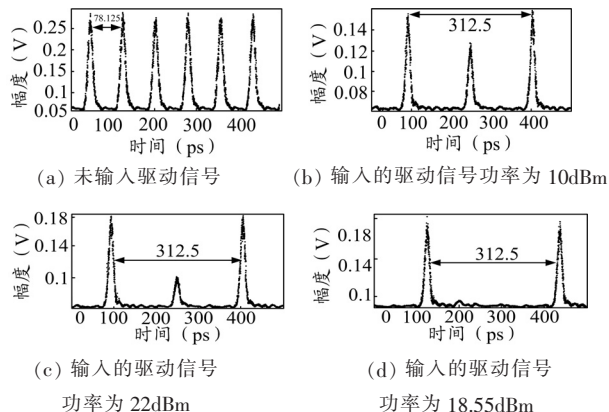


图 4 12.8GS/s 光脉冲序列经过并行解复用模块输出的脉冲波

2.4 频综模块对 PADC 系统有效比特位数的影响

频综模块中的器件处于不同状态时, 为并行解复用模块输出不同性能的驱动信号, 此处我们介绍其对 PADC 系统 ENOB 的影响。实验中, 先在采样门中输入 9.812GHz 微波信号, 然后在 EADC 阵列中获得 4 路并行的数字信号, 其中一路的归一化量化频谱结果如图 5 所示。

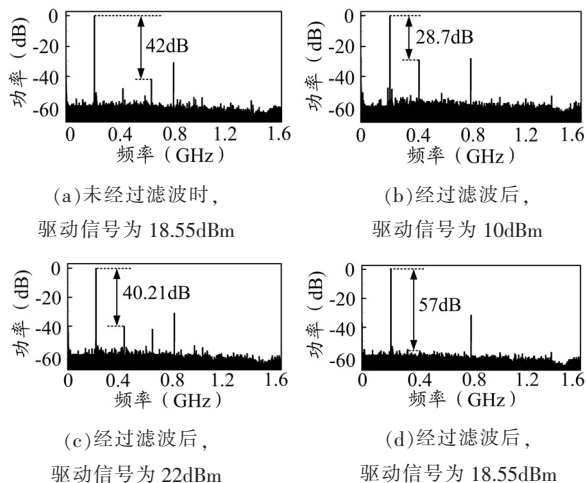


图 5 频综模块输出不同信号时, PADC 系统采样 9.812GHz 微波信号的量化频谱图

根据欠采样原理, EADC 阵列测量得到的量化频谱图的信号功率主要集中在 212MHz 的频率点上。此外, 量化后的二次谐波和三次谐波分别在 424MHz 和 636MHz 的频率点上。EADC 阵列量化在 400MHz、800MHz 和 1200MHz 的频率点处产生固有杂散, 在计算 PADC 系统量化 ENOB 时, 本文暂不考虑这些固有杂散的影响。

移除频综模块的 3.2GHz 线路中的窄带滤波器时, 通过调节该路可调衰减器使频综输出的 3.2GHz 信号功率为 18.55dBm, 测得 PADC 系统输出的量化频谱如图 5(a) 所示。根据 ENOB 的定义和计算方法^[9], 计算得出该量化频谱对应的 ENOB 为 7.09。然后, 将被移除的窄带滤波器接回到原来的线路中, 调节该线路中的可调衰减器, 使得频综输出的 3.2GHz 驱动信号功率分别为 10dBm、22dBm, 测得的这两种情况下 PADC 系统输出的量化频谱分别如图 5(b) 和图 5(c) 所示。计算得到的 ENOB 分别为 6.06 和 6.83。最后, 仅调节可调衰减器, 使 3.2GHz 驱动信号功率为 18.55dBm, PADC 系统输出的量化频谱结果如图 5(d) 所示, 经过计算得到的 ENOB 为 7.73。

为了进一步说明频综模块对 PADC 系统量化频谱中的谐波抑制影响, 图 5(a)~图 5(d) 分别标出了信号

功率与最大的谐波功率的比值, 对比这 4 个量化频谱图和对应的 ENOB 可以发现, 当频综模块提供的 3.2GHz 驱动信号经过滤波后且输出功率保持在合适的范围内时, PADC 系统量化频谱的谐波抑制效果最好, 同时对应的 ENOB 也最高。因此, 使用优化设计后的频综模块所输出信号来驱动并行解复用模块可改善 PADC 系统的量化 ENOB。换言之, 先经过滤波消除分频谐波的影响, 并将其功率控制在有效范围内时, PADC 系统的量化 ENOB 最高。

3 结束语

本文介绍了一种应用于宽带高精度 PADC 系统的频综模块方案设计和实验架构。本频综模块在参考时钟的作用下, 通过产生多种频率的高频信号, 为 PADC 系统中的并行解复用模块提供驱动信号。实验测试并分析了频综模块的不同输出信号对 PADC 系统的并行解复用性能、量化频谱和由此计算得出 ENOB 等的综合影响。测试结果表明, 当频综模块的输出信号满足并行解复用模块的功率要求且分频谐波得到有效抑制时, 采样率为 12.8GS/s 的光子模数转换系统在 9.812GHz 的微波信号输入下的量化有效比特位数为 7.73, 证明了频综模块优化设计方案的有效性。

参考文献:

- [1] VALLEY G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 1955–1982.
- [2] 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.
- [3] 钱阿权, 邹卫文, 吴龟灵, 等. 光子时间拉伸模数转换系统的多通道化设计与实现[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 146–153.
- [4] JUODAWLKIS P W, TWICHELL J C, BETTS G E, et al. Optically sampled analog-to-digital converters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2001, 49(10): 1840–1853.
- [5] GATHMAN T D, BUCKWALTER J F. An 8-bit integrate-and-sample receiver for rate-scalable photonic analog-to-digital conversion [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60 (12): 3798–3809.
- [6] SONG W S. Optically sampling, demultiplexing, and A/D converting system with improved speed[P]. US patent, 6118396, 2000.
- [7] YU L, ZOU W, YANG G, et al. Electro-optical switching based demultiplexing in high-speed photonic analog-to-digital converter based on actively mode-locked laser[C]// 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics. Oct, 23–26, 2017. Beijing China. IEEE, 2017: THP.29.
- [8] YANG G, ZOU W W, YU L, et al. Compensation of multi-channel mismatches in high-speed high-resolution photonic analog-to-digital converter [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24061–24074.