光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250614002

# 面向微波光子信道化的高精细阵列波导光栅研究

张业斌[1*]，金　里[2]，韩守保[1]，童　阳[1]，王　凯[1]

（1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所，合肥 230088；2. 联合微电子中心有限责任公司，重庆 401332）

**摘　要：** 针对传统信道化接收机在瞬时工作带宽、处理速度及规模方面的技术瓶颈，提出一种基于阵列波导光栅的无源信道化方法。该方法通过超窄通带的高精细阵列波导光栅来实现对射频调制信号在光域的窄带信道划分。设计和制备的光信道划分芯片性能稳定，封装后的通道光插损约为11 dB，相邻通道光隔离度大于16 dB。系统验证表明，所提方法成功实现了超宽带射频调制信号10 GHz带宽的多通道信道划分。该系统架构简洁紧凑，显著降低了信道化系统的复杂度，并且具备与微波光子前后端系统在光域全光拉通的能力，可有效减小整机微波光子链路的插入损耗，提高接收系统灵敏度。

**关键词：** 微波光子；信道化；高精细；阵列波导光栅

**中图分类号：** TN958　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0699－06

## High-Accuracy Arrayed Waveguide Grating for Microwave Photonic Channelization

ZHANG Yebin[1], JIN Li[2], HAN Shoubao[1], TONG Yang[1], WANG Kai[1]

（1. N0.38 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, CHN;
2. Chongqing United Microelectronics Center Co., Ltd., Chongqing 401332, CHN）

**Abstract:** To break the technical bottlenecks of traditional channelized receivers, including instantaneous operating bandwidth, processing speed, and scale, this paper proposes a passive channelization method based on the high-accuracy arrayed waveguide grating. Narrow-band channel division of RF-modulated optical signals is realized using an ultranarrow passband arrayed waveguide grating. The designed and prepared optical channelization chip has a stable performance. The optical insertion loss of the channel is approximately 11 dB after packaging, and the optical isolation between the adjacent channel is greater than 16 dB. The build channelization system demonstrates multichannel channel division with the 10 GHz bandwidth of the ultra-wideband RF-modulated optical signal. The system is compact, which can greatly reduce the complexity of the channelization system. In addition, it can achieve all-optical interconnection with the microwave photon frontend and backend. The insertion loss of the microwave photonic link can be significantly reduced, and the sensitivity of the receiving system can be improved.

**Key words:** microwave photonic link; channelization; high accuracy; arrayed waveguide gratings

## 0　引言

针对大带宽、多频点信号同时侦察处理的需求，信道化接收技术得到越来越广泛的应用。传统射频信道化接收机[1-3]通常先将整个侦察工作频段

**收稿日期：**2025－06－14.

**基金项目：**国家自然科学基金重大科研仪器专项项目（62127805）；中国科协青年人才托举项目（202102500-0370）.

* **通信作者：**张业斌

通过射频功分器以及带通滤波器分为若干路，每一路再用中心频率不同的带通滤波器截取一个固定子带，随后分别检波、采样并做数字处理，从而在频域上完成均匀子带划分。随着电子辐射源工作频率逐渐向毫米波迈进，传统信道化（包括微波模拟信道化或数字信道化）技术面临巨大的挑战。对微波模拟信道化接收技术而言，需要有能工作在数十吉赫兹的微波器件，这不仅对微波工艺水平提出更严苛要求，而且系统的成本、体积和功耗也随之急剧增加。而数字信道化接收则受高速ADC、数字信号处理速度和规模的限制，也难以支持数十吉赫兹带宽的接收处理。因此，迫切需要研究新技术，以突破传统信道化接收机的技术瓶颈，实现超宽带信道化接收机。

近年来微波光子技术[4-5]发展迅速，因其超宽带、易复用、抗电磁干扰等固有优势被应用于电子信息系统中。基于微波光子技术的光信道化接收技术[6-13]为突破传统信道化接收技术在频率、带宽、动态范围、抗干扰能力以及功耗、体积方面的发展瓶颈，本文提出一种基于高精细阵列波导光栅（AWG）的无源光信道化方法。该方案利用超窄通带AWG直接在光域完成射频调制信号的窄带信道划分，系统架构简洁紧凑。

## 1 信道化系统设计

信道化接收机的核心器件是滤波器[14-15]，其从根本决定了信道化接收机的整体性能。所提出的AWG无源信道化技术，通过超窄通带的AWG来实现对射频调制信号在光域的窄带信道划分，系统架构简洁紧凑，并且具备与微波光子前后端系统在光域全光拉通的能力，可显著减小整机微波光子链路的插入损耗，提高接收系统灵敏度。

图1所示为基于阵列波导光栅的信道化方法的原理图，激光器输出光载波信号，系统前端接收的射频宽带信号经过电光调制器对光载波信号进行载波抑制双边带调制，经过调制后的光信号进入光信道划分芯片，直接对调制的超宽带边带进行信道划分，将不同窄带的光边带信号对应相应的光通道进行输出。同时光频梳模块产生多根光梳齿输出作为变频本振，经过功分器后分别与光信道划分芯片的各通道输出进行合波，再输入到相应光探测器中进行光电转换，从而得到变频后的多个信道化的射频信号输出。该系统的核心是基于阵列波导光栅的高精细无源光信道划分芯片的设计与实现。

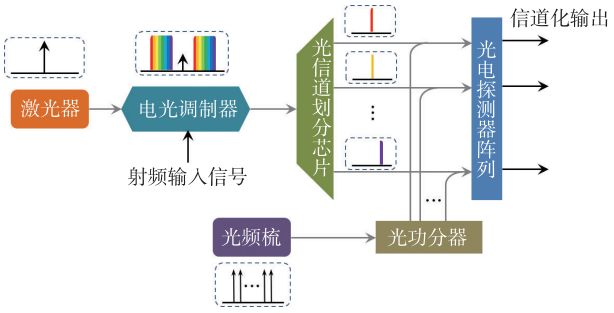



图1 基于阵列波导光栅信道化方法的原理图

## 2 光信道划分芯片

所设计的高精细阵列波导光栅的通道带宽需要足够窄以匹配后端数字处理的能力，同时信道通道需要足够稳定以实现对信号的稳定划分。

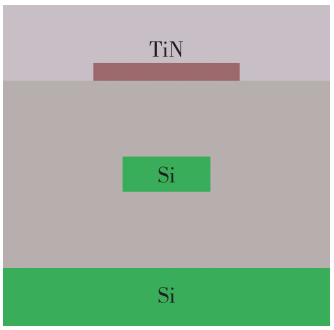
阵列波导光栅通过多路径的干涉可以实现光谱滤波，设计阵列波导之间的延时差，使得不同相位波长的光信号产生干涉，实现不同光谱片段的光信号输出到对应光通道中。阵列波导光栅由一个阵列波导作为衍射光栅连接两个星型耦合器构成，包括输入/输出波导、波导光栅及两个对称型的平板波导。输入波导与输出波导的位置和弯曲阵列波导的位置满足罗兰圆规则，即阵列波导的两端以等间距排列在两个光栅圆周上，正对光栅圆心，中心阵列波导位于光栅圆和罗兰圆的切点。为使阵列波导对衍射光场有尽可能高的耦合率，阵列波导条数必须足够多且能高效率收集所有衍射光。输入/输出信道波导均排列在罗兰圆周上，端口朝向中心阵列波导。阵列波导的两相邻波导有着相等的长度差，这种结构将使阵列波导光栅中的光信号出现与波长相关的不同相位差。当复用光信号在阵列波导光栅中传播时，对应的相位偏移将加强在每个波导中传输的光信号上，使每个相同波长的信号会以不同的波前倾斜聚焦在输出平板波导的焦线上。若设计正好把输出波导的端口定位在输出平板波导焦线上，则不同波前倾斜的光信号将耦合到输出波导的不同通道中。

阵列波导光栅一般以$SiO_2$为原材料，用于实现波分复用功能，这种通信场景的应用通常需要通道间隔取25～100 GHz，即波长精度取0.2～0.8 nm。若想获得更高精度则需要大幅度增加光学路径长度，这不仅增加了芯片面积，还严重影响各项性能

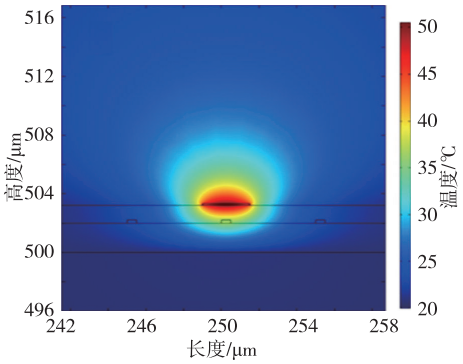
指标。从$SiO_2$材料体系到硅光平台，器件结构变得更加紧凑，但相位噪声问题越加严重，在这种情况下，波导相位的校准变得不可或缺。

### 2.1　移相器设计

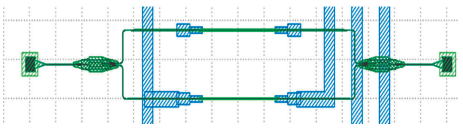
设计阵列波导光栅通道间隔小于 10 GHz，阵列波导间长度差较大，整个阵列波导路径较长。即使在波导宽度变宽后，工艺容差、SOI 顶层硅厚度的不均匀性仍会在长路径上引入大量相位噪声。因此，需在每个通道中增加移相器以进行相位校准。本文采用热光移相器，利用硅材料较高的热光系数，通过局部加热调节波导有效折射率。加热器直接置于波导上方，由 TiN 合金制成，其与硅光波导顶层距离为 800 nm，可保证 TE 模式传输时损耗不受影响。移相器设计结构及模场仿真结果如图 2(a)和(b)所示；图 2(c)展示了采用马赫-曾德干涉仪结构对热光移相器性能进行测试的实验结果；图 3 所示为所设计的热光移相器的测试结果，其 2π 移相功耗约为 50 mW，响应时间小于 40 μs。




(a) 热光移相器截面图

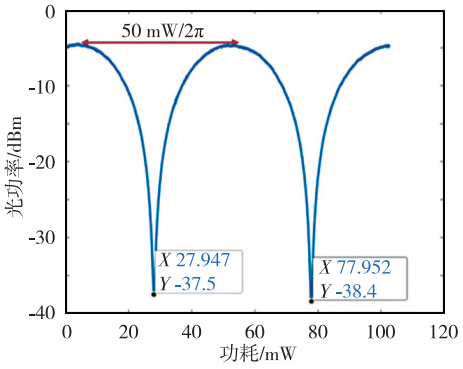



(b) 热学仿真图

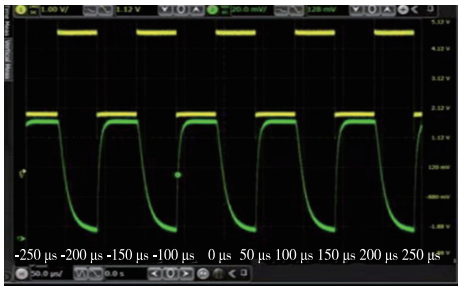


(c) MZI热光移相器测试结构

图 2　移相器的结构设计




(a) 单根波导移相器的移相器效率测试结果




(b) 热光移相器响应速率测试结果

图 3　热光移相器测试结果

### 2.2　阵列波导设计

图 4 所示为设计波导截面结构，由于工艺误差对宽波导影响较小，本方案采用 1 μm 的阵列波导，但同时考虑多模、弯曲半径影响以及单模波导过渡到宽波导锥形结构的损耗和长度问题，因此波导不宜过宽。弯曲部分则采用 450 nm 波导，可以实现更小的弯曲半径。利用 Lumerical MODE 仿真波导有效折射率，波导折射率为 2.746，群折射率为 3.878，平板波导有效折射率为 2.848。图 5 和图 6 分别给出了输入光波导以及平板波导的模场和群折射率。

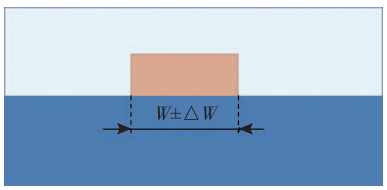
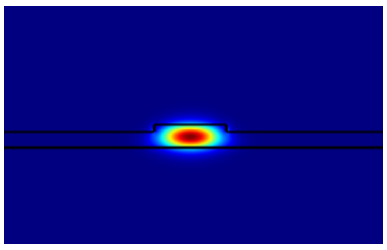
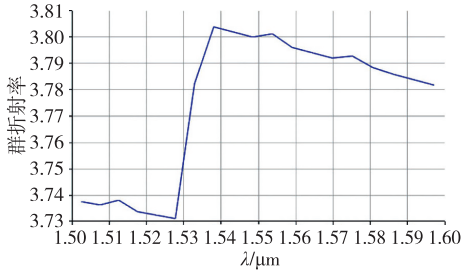



图 4　设计波导截面图

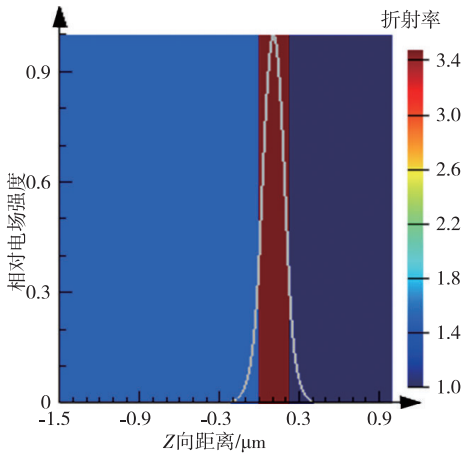


(a) 光波导模场

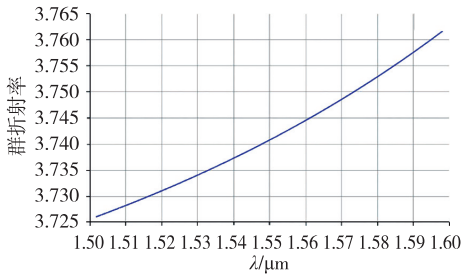



（b）群折射率

图5 输入光波导模场及群折射率示意图




（a）平面波导模场




（b）群折射率

图6 平板波导模场及群折射率示意图

计算入射光经过输入波导后经过平板区后达到星型波导阵列所需距离，设计时平板区发散的光束90%以内都需要被星型波导阵列收集。采用Lumerical MODE仿真输入光经过平板区域，图7描述了光场|*E*|分布与角度的关系，当角度在±19.8°时满足设计要求，因此当平板区域长度为150 μm和300 μm时对应210 μm和420 μm星型阵列波导宽度，当阵列波导间隔为1.6 μm时，分别需要66和132个波导即可满足要求，分别采用40和75个阵列波导。

根据设计要求，阵列波导光栅的通道间隔0.08 nm（对应10 GHz），最终设计的高精细阵列波导光栅设计版图和仿真性能如图8所示。

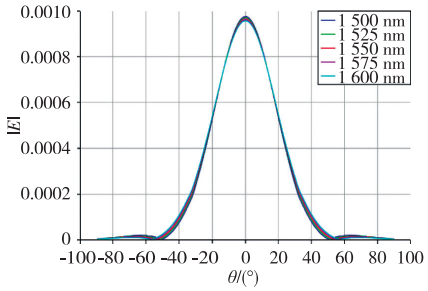
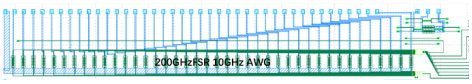
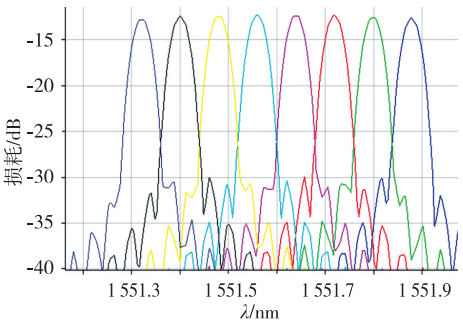



图7 光场|*E*|分布与角度关系




（a）设计版图




（b）仿真性能

图8 阵列波导光栅设计版图及其仿真性能

## 3 测试与结果

设计光信道划分芯片的制备版图如图9所示，根据设计版图进行芯片的流片以及光电封装后的实物图如图10所示。

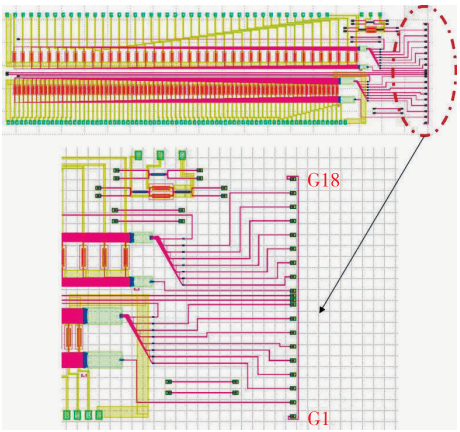



图9 光信道划分芯片的制备版图

经光学封装的耦合损耗测试结果如图11所示，采用的是图9中所示的G1和G18之间的光栅和直波导来进行耦合损耗测试，测得封装后单端光栅耦合损耗在1 550 nm处为3.28 dB。

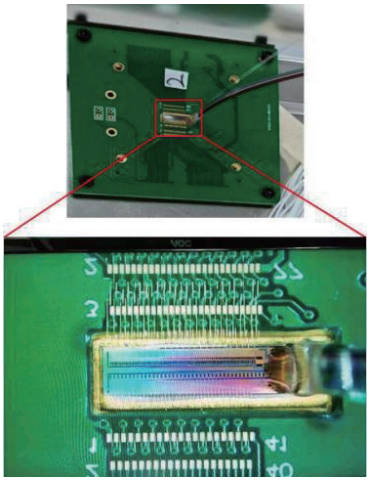


图 10　光信道划分芯片封装后的实物图

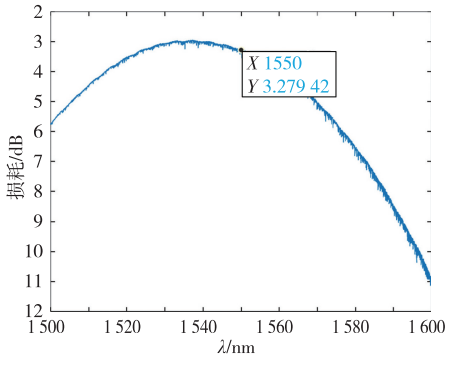



图 11　芯片耦合封装插损测试结果图

图 12 所示是经过芯片中移相器的通道补偿和校准前后的光信道划分芯片所有的输出通道扫谱得到的传输特性曲线集合，可以发现通过芯片的波导移相补偿可以实现阵列波导光栅的通道特性在一定范围内可调。由于芯片的周期性效应，测试芯片在 1 530～1 560 nm 的宽光谱范围内都可以实现对应通道的滤波分光芯片的自由光谱范围为 1.6 nm，其中 1 个周期内的光谱特性如图 13 所示，7 个输出通道的损耗在 11 dB 左右，通道的插损一致性小于 1 dB，且平均每个通道之间的间隔约为 0.08 nm，对应 10 GHz 的频率间隔。

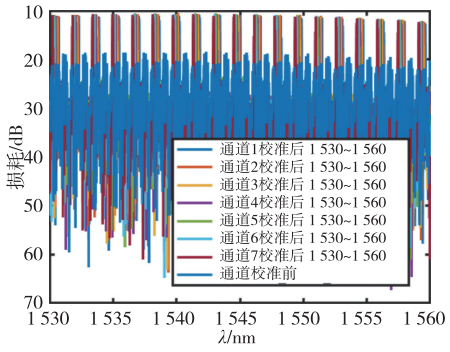



图 12　芯片扫描光谱图

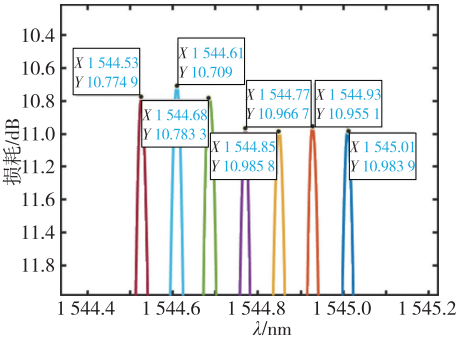



图 13　芯片通道插损一致性测试图

图 14 所示为测得的比对后的相邻通道最大功率范围和最小功率范围水平，两组虚线表示相应功率位置，可以看到相邻通道之间的串扰水平约为 16.5 dB。

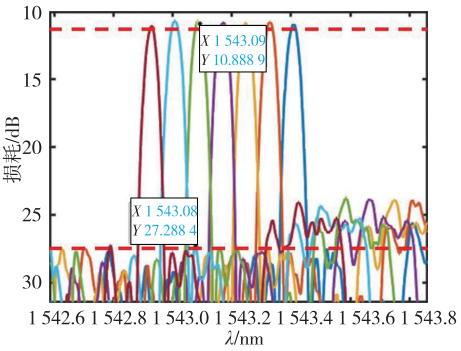



图 14　芯片相邻通道串扰测试图

上述测试结果表明，基于阵列波导相位校准设计及所制备的芯片模块，可以实现硅基高精细的小通道间隔、小尺寸的阵列波导光栅，可用于信道化系统的超宽带光调制信号在光域的直接信道划分。

图 15 为载波抑制双边带调制信号在 15，25 和 35 GHz 的测试结果，其中上边带的调制边带分别对应信道划分通道，经过光信道划分芯片模块后分别在对应信道输出，完成信道划分。可以看出，下边带以及载波经过信道划分芯片后，其输出光谱对应的上边带消光比均为 18 dB 以上，这说明了基于高精细阵列波导光栅的微波光子信道化的可行性。

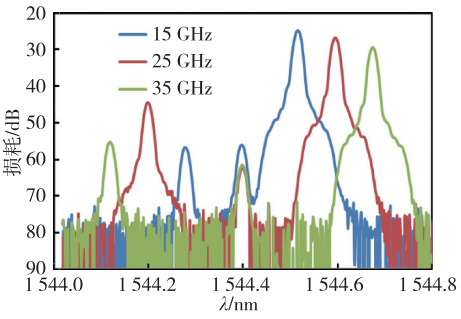



图 15　载波抑制双边带信号信道划分测试结果图

## 3 总结

本文提出一种基于阵列波导光栅的微波光子信道化方法，通过高精细无源阵列波导光栅来实现对射频调制信号在光域的窄带信道划分。设计并制备了光信道划分芯片，并建立了信道化验证系统进行实验验证。实验结果表明，高精细阵列波导光栅的通道光插损约为11 dB，相邻通道光隔离度大于16 dB，系统实现了超宽带射频调制信号10 GHz带宽的多通道信道划分。该信道化系统架构简洁紧凑，具备与微波光子前后端系统在光域全光拉通的能力，可显著减小整机微波光子链路的插入损耗，提高系统接收系统灵敏度，有望突破传统信道化接收机在瞬时工作带宽、处理速度及规模方面的技术瓶颈。

**参考文献：**


[1] 毛自灿. 超宽带侦察接收机的实现途径[J]. 无线电工程，1995，25(6)：55-60.

[2] 龚仕仙，魏玺章，黎 湘. 宽带数字信道化接收机综述[J]. 电子学报，2013，41(5)：949-959.
Gong Shixian，Wei Xizhang，Li Xiang. Review of wideband digital channelized receivers [J]. Acta Electronica Sinica，2013，41(5)：949-959.

[3] Weiss A J，Friedlander B. Simultaneous signals in IFM receivers [J]. IEEE Proceedings - Radar，Sonar and Navigation，1997，144(4)：181.

[4] Yao J. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology，2009，27(3)：314-335.

[5] Marpaung D，Yao J，Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics，2019，13(2)：80-90.

[6] Satoh T，Takahashi K，Matsui H，et al. 10-GS/s 5-bit real-time optical quantization for photonic analog-to-digital conversion[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2012，24(10)：830-832.

[7] 王家秀，李白宇. 微波光子超宽带信道化接收机综述[J]. 现代雷达，2022，44(8)：100-105.
Wang Jiaxiu，Li Baiyu. An overview of microwave photonics ultra-wideband channelized receiver[J]. Modern Radar，2022，44(8)：100-105.

[8] Winnall S T，Lindsay A C，Austin M W，et al. A microwave channelizer and spectroscope based on an integrated optical Bragg-grating Fabry-Perot and integrated hybrid Fresnel lens system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，2006，54(2)：868-872.

[9] Brès C S，Zlatanovic S，Wiberg A O J，et al. Parametric photonic channelized RF receiver [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2011，23(6)：344-346.

[10] Wiberg A O J，Esman D J，Liu L，et al. Coherent filterless wideband microwave/millimeter-wave channelizer based on broadband parametric mixers [J]. Journal of Lightwave Technology，2014，32(20)：3609-3617.

[11] Tang Z，Zhu D，Pan S. Coherent optical RF channelizer with large instantaneous bandwidth and large in-band interference suppression[J]. Journal of Lightwave Technology，2018，36(19)：4219-4226.

[12] Chen B，Fan Y，Tian Z，et al. An ultra-wideband microwave photonic channelized receiver with zero-IF architecture [J]. Applied Sciences，2020，10(1)：30.

[13] Xu X，Tan M，Wu J，et al. Broadband photonic RF channelizer with 92 channels based on a soliton crystal microcomb[J]. Journal of Lightwave Technology，2020，38(18)：5116-5121.

[14] Gehl M，Trotter D，Starbuck A，et al. Active phase correction of high resolution silicon photonic arrayed waveguide gratings[J]. Optics Express，2017，25(6)：6320-6334.

[15] Baek J H，Soares F M，Seo S W，et al. 10-GHz and 20-GHz channel spacing high-resolution AWGs on InP [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2009，21(5)：298-300.


**作者简介：**

**张业斌**(1988—)，男，安徽省无为市人，博士，正高级工程师，主要研究微波光子技术。