

L 型阵列探测器合成功率研究与设计^{*}

王红华¹, 文化锋¹, 武晴涛¹, 应祥岳¹, 李 军¹, 施 锋²

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315000;

2. 俄勒冈理工学院, 电子工程与可再生能源工程系, 俄勒冈州 克拉马斯福尔斯市 97601, 美国)

摘 要: 针对行波探测器阵列只能合成输出功率而不能同时提高工作带宽的现状, 基于 m 推演型滤波电路原理, 提出了一种新的 L 型阵列探测器, 即通过在光电二极管之间串联电容减少结电容对截止频率的影响, 再与两个电感串联形成单个阵列单元, 然后将单个阵列单元级联构成全新的 L 型滤波器电路结构。结果表明, L 型探测器阵列能够对射频输出信号进行功率合成, 同时工作带宽提高至 67 GHz, 相较于传统光电探测器, 工作带宽提高两倍。通过增加级联光电二极管的数量, 可以持续增大输出功率, 同时 L 型探测器阵列的推演方法可根据实际需求灵活设计出期望的光电探测器, 为未来大带宽、高功率的光电探测器设计提供理论基础。

关键词: 行波探测器; 阵列; 滤波电路; 功率合成; 光电探测器

中图分类号: TN29; O453

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201830.180236

近年来, 随着互联网业务的不断发展, 用户对接入带宽的需求呈指数型增长。光载无线通信(ROF)系统作为下一代传输网的关键技术之一, 因其灵活融合无线通信和大容量光通信的传输特性, 逐渐成为研究热点^[1]。光电探测器作为 ROF 系统中的关键器件, 能将入射光信号转化为电信号。因此, 其效率与性能对 ROF 系统有极大的影响。随着高通信频率需求和光纤放大器的出现, 对光电探测器提出了大带宽、高功率的迫切要求^[2-4]。文献[5-6]围绕光电探测器的结构展开研究, 如日本 NTT 光子实验室 T. Ishibashi 提出的单行载流子光电二极管(UTC-PD), 因其内部使用快速的电子作为有源载流子, 故饱和功率和工作带宽较大。但单个二极管输出功率有限, 能否实现多个二极管的功率合成意义重大^[7-8]。

C. L. Goldsmith 等^[9-10]首次从电路结构出发, 提出了行波探测器阵列(TWDA), 通过将光电二极管嵌入到高阻抗传输线中来实现对射频信号的合成, 但探测器的带宽并未提高。本文提出了一种区别于传统行波探测器阵列的新型 L 型探测器阵列, 并进行理论分析与模拟验证, 结果表明 L 型探测器阵列能够将多个光电二极管进行功率合成同时工作带宽提高为传统型的两倍, 并且可根据实际需求进行灵活组合, 以实现所需要的带宽和功率, 满足各种光电转换需求。

1 TWDA 原理分析

传统光电探测器内部电路由单个光电二极管和一个阻抗匹配系统(包括负载电阻和终端匹配电阻)构成, 如图 1 所示。典型探测器单元电路通常连接 $50\ \Omega$ 的终端匹配电阻, 防止负载开路阻抗失配时电路传输信号起伏过大损坏光电管, 确保信号的正常传输。为实现整个电路的阻抗匹配, 负载电阻值应等于终端匹配电阻值, 即 $50\ \Omega$ 。因此探测器的信号电流经过负载电阻和终端匹配电阻后分流, 最终只有一半的电流从负载电阻处输出。这种探测器电路的截止频率

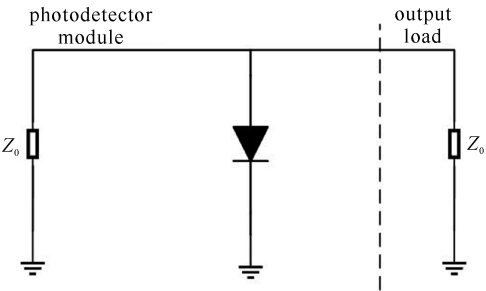


Fig. 1 Internal circuit of traditional photodetector

图 1 传统光电探测器内部电路

$$f_c = \frac{1}{\pi Z_0 C_d} \tag{1}$$

式中: Z_0 是匹配负载阻抗($Z_0 = 50\ \Omega$), C_d 是光电二极管的结电容。

^{*} 收稿日期: 2018-09-15; 修订日期: 2018-11-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(61371061); 浙江省自然科学基金项目(LY12F01010); 宁波市自然科学基金项目(2018A610024)
作者简介: 王红华(1995—), 女, 硕士, 主要研究方向为光载无线通信; 17815936287@163.com。

行波探测器阵列(TWDA)借鉴微波分布式放大器设计的理念将多个光电二极管输出电流合成。其工作原理是光电二极管(结电容 C_d)由高阻抗传输线(电感 L)相互连接,形成一个特征阻抗为 Z_0 的人工传输线。探测器的结电容可以嵌入到 TWDA 中,TWDA 的一端连接到负载阻抗,另一端连接到输出通道,如图 2 所示。

应用 TWDA 这种结构,为了对产生的射频信号进行同相位叠加,需要补偿微波信号传播延迟的差异,随着光路时间的增加,探测器的光路设置延迟,依次对光电管添加信号,因此输出信号功率得以合成。探测器截止频率如公式(1)所示。

2 L 型探测器阵列设计原理

按滤波器的电特性区分,有定 K 型和 m 推演型滤波器,其中 K 与 m 均是涉及滤波器电特性的系数^[11]。在实际应用中, m 推演型滤波器相比于定 K 型滤波器有较为陡峭的截止特性,可以改善归一化定 K 型滤波器滚降系数同时又不影响带内平坦度^[12]。相关文献都是基于定 K 型滤波器原理设计探测器电路结构,本文基于 m 推演型滤波器原理提出了一种 L 型探测器阵列新结构,依据归一化滤波器设计数据,按照程序化步骤通过数值计算即可设计出满足需求的结构。L 型探测器阵列基本单元电路由两个级联电感(L_1 和 L_2)、光电二极管以及电容(C_1)构成,如图 3 所示。

2.1 阻抗匹配

确定 L 型探测器阵列基本单元后,借鉴 m 推演型 LPF 原理,即通过在阻带中截止频率附近设置陷波点来提升滤波器截止频率附近的滚降性能,系数 m 的取值决定相应滤波器对特征阻抗的匹配性。L 型探测器阵列各元件参数满足下列等式

$$m = \sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f_{\text{rejection}}^2}} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{mZ_0}{2\pi f_c} \quad (3)$$

$$L_2 = \left(\frac{1-m^2}{m} \right) \times \frac{Z_0}{2\pi f_c} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{m}{2\pi f_c Z_0} + C_d \quad (5)$$

式中: f_c 为理想探测器截止频率; $f_{\text{rejection}}$ 为陷波点频率,用于选定所要阻挡的信号频率; $f_{\text{rejection}}/f_c$ 表示陷波点频率与截止频率之比,就是陷波点的设计位置; Z_0 为电路的特征阻抗($Z_0 = 50 \Omega$),在 m 约为 0.6 的电路中,相应滤波器对特征阻抗 Z_0 的匹配性最好。当 m 的值确定后,选定待设计理想滤波器的截止频率 f_c ,即可根据式(3)~(5)确定各元件参数取值。将 L 型探测器阵列搭建好放到仿真环境,通过观察回波损耗情况来判断该探测器电路是否满足阻抗匹配。

2.2 功率合成

将 L 型探测器阵列基本单元级联后,输出的信号由于经过的路径不同而存在传播延迟,在负载上光电流无法同相位合成,因此,需在光电二极管上使用恰当的光馈入网络,并且光馈入网络必须提供适当的延迟以便光电流同相位合成。图 4 是 L 型探测器阵列与光路匹配的电路图。

设总光输入为 P_0 ,被分成 N 份流向各支路,则每支路输入光功率为 P_0/N ,每支路之间的光延迟差为 τ_0 ,单个光电二极管光电转换效率为 η ,输入端光电流流经串联电容 C_1 后只有一半流向负载电阻,则负载端输出

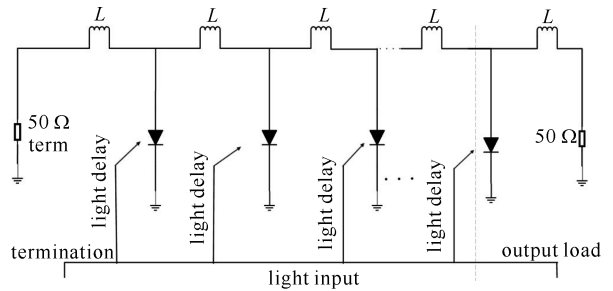


Fig. 2 Schematic diagram of traveling-wave photodetector

图 2 行波探测器工作原理

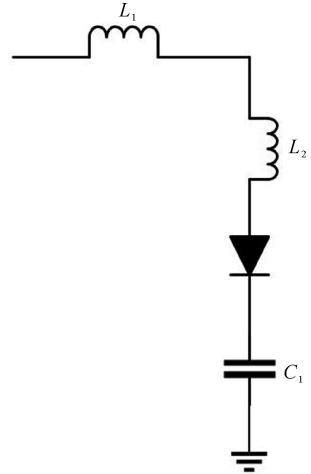


Fig. 3 Basic unit of the L-type detector array

图 3 L 型探测器阵列的基本单元

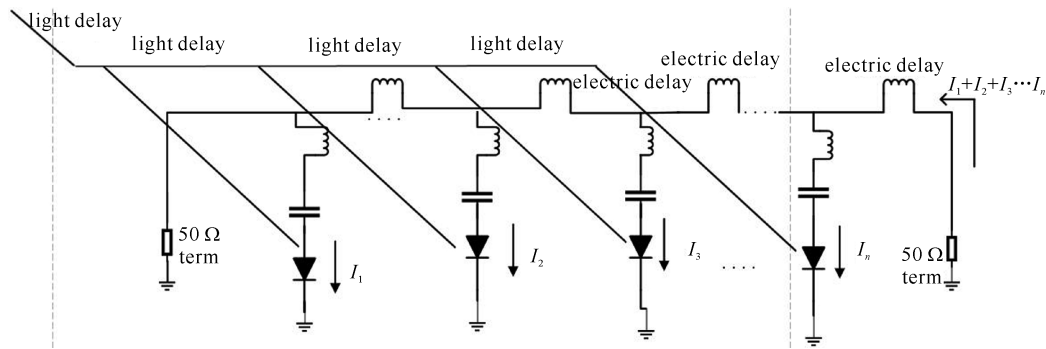


Fig. 4 L-type detector array and optical match circuit diagram

图4 L型探测器阵列与光路匹配电路图

电流 I_n 可表示为

$$I_n = e^{j(n-1)\omega\tau_o} \left(\frac{P_o\eta}{2N} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_d} \right) e^{j(N-n)\omega\tau_e} \quad (6)$$

式中： ω 是输入信号频率； N 是探测器总支路数； τ_e 是相邻探测器单元之间的电时延； n 是自左往右光电二极管序数；式(6)自左往右第一项为光输入到光电二极管的光延迟，第二项是光电流大小，第三项是光电二极管到负载的电延迟。则 L 型探测器阵列终端输出电流 I_{out} 为各单元阵列电流总和，大小为

$$I_{out} = \sum_{n=1}^N I_n = \sum_{n=1}^N \left[e^{j(n-1)\omega\tau_o} \left(\frac{P_o\eta}{2N} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_d} \right) e^{j(N-n)\omega\tau_e} \right] \quad (7)$$

为使得最终输出电流可以同相位合成并且电流值可以达到最大，则满足加在相邻光电二极管上的光延迟等于其电流输出的电延迟，这可以通过控制馈光光纤的长度来实现，即

$$\tau_o = \tau_e = \tau \quad (8)$$

则 L 型探测器阵列最终输出电流为

$$I_{out} = \sum_{n=1}^N I_n = \left(\frac{P_o\eta}{2} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_d} \right) e^{j(N-1)\omega\tau} \quad (9)$$

行波探测器阵列最终输出电流为

$$I_o = \sum_{n=1}^N I_n = \left(\frac{P_o\eta}{2} \right) e^{j(N-1)\omega\tau} \quad (10)$$

因此，L 型探测器阵列实现了功率合成，对比传统光电探测器，可以合成 $\frac{C_1}{C_1 + C_d} \cdot N$ 倍的电流，是行波探测器阵列的 $\frac{C_1}{C_1 + C_d}$ 倍。

3 仿真结果分析

为了验证本文提出的 L 型阵列探测器的有效性，使用先进设计系统(Advanced Design System)软件测量了 L 型阵列探测器电路的输出功率和工作带宽，分别从电路的结构和性能两方面与传统行波探测器阵列进行对比，分析 L 型探测器阵列的可行性。

3.1 结构对比

图 2 为行波探测器工作原理图，就单个电路结构来说，L 型探测器阵列比行波探测器阵列增加了一个电容，电容值可根据实际设计要求改变，在精简整个电路的同时更加具有灵活性，最大的优点就是易于在单片集成实现，实用性强。

3.2 性能对比

完成 L 型阵列探测器和行波探测器阵列的电路搭建后，仿真分析等数量的光电二极管组成的两种不同结构。本文选择六元 L 型探测器阵列和六元传统 TWDA 进行对比分析，其中，光电探测器选用 NBUTC-PD^[13-14]，光电探测器结电容一般为 0.15~0.2 pF，本文取 $C_d = 0.2$ pF， $Z_0 = 50 \Omega$ ，单个光电二极管输出电流为 200 mA，实验测得电延迟 $\tau_e = 2.6$ ps，根据式(3)~(5)可以计算出电感 L_1 、 L_2 值和串联电容 C_1 的值。

$$L_1 = m \times \frac{Z_0}{2\pi f_c} = 0.63897 \times \frac{50}{2\pi \times 60 \times 10^9} = 84.746 \text{ pH} \quad (11)$$

$$L_2 = \left(\frac{1-m^2}{m} \right) \times \frac{Z_0}{2\pi f_c} = \frac{1-0.638\ 97^2}{0.638\ 97} \times \frac{50}{2\pi \times 60 \times 10^9} = 122.821\ \text{pH} \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{m}{2\pi f_c Z_0} + C_d = 0.638\ 97 \times \frac{1}{2\pi \times 60 \times 10^9 \times 50} + 0.2 = 0.037\ 85\ \text{pF} \quad (13)$$

将计算出来的值代入电路结构进行仿真,首先观察 L 型探测器阵列结构单元与 TWDA 结构单元的频率响应及回波损耗,仿真结果如图 5 和图 6。

从图 5 可以看出,在单个光电二极管的情况下,本文提出的 L 型探测器阵列的 3 dB 带宽有显著的提高,达到近 67 GHz,而 TWDA 单元结构的 3 dB 带宽仅为 32 GHz, L 型探测器阵列工作带宽是 TWDA 工作带宽的 2 倍,验证了 L 型探测器阵列结构的正确性。

从图 6 的回波损耗图可知,在单个光电二极管的情况下,−15 dB 时 TWDA 单元结构带宽仅为 18 GHz, L 型探测器阵列带宽达到了 45 GHz,相比之下得到了明显的提高,说明在带内的驻波特性上,电路的匹配得到了极好的改善, L 型阵列探测器性能确实优于传统探测器阵列。

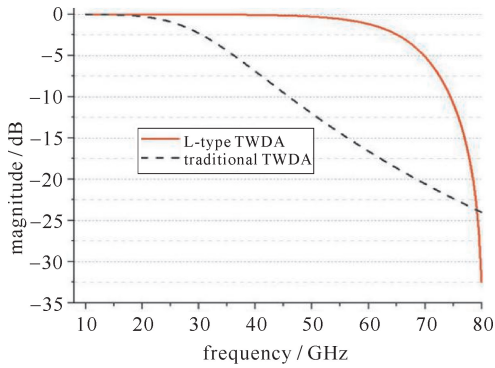


Fig. 5 Contrast diagram of frequency response of structural units

图 5 结构单元频率响应对比

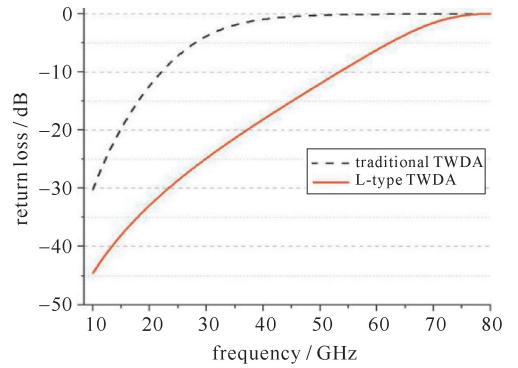


Fig. 6 Contrast diagram of echo loss of structural units

图 6 结构单元回波损耗对比

以上是关于结构单元的对比分析,对于级联后多元的 TWDA,以六元 TWDA 为例继续分析性能。图 7 是六元 TWDA 频率响应图。

从图 7 可知,本文提出的新 TWDA 的 3 dB 带宽达到近 67 GHz,而原 TWDA 仅为 30 GHz,说明 L 型探测器阵列可以实现有效级联,同时保持带宽不变,仍旧是传统 TWDA 的 2 倍,并且实际带宽仿真结果比理论值还要更理想一点,验证了 L 型探测器阵列更满足通信大带宽需求。同时,实验分别测量了六元、十元、十二元 L 型探测器的工作带宽,由图 8 可以看出 3 dB 时十二元 L 型探测器的工作带宽大于前两者,达到 68 GHz,说明 L 型阵列探测器随着级联数目的增加,带宽仍有小幅度增长。

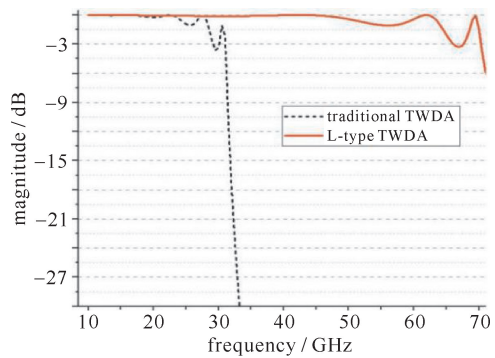


Fig. 7 Frequency response of six element TWDA

图 7 六元 TWDA 频率响应

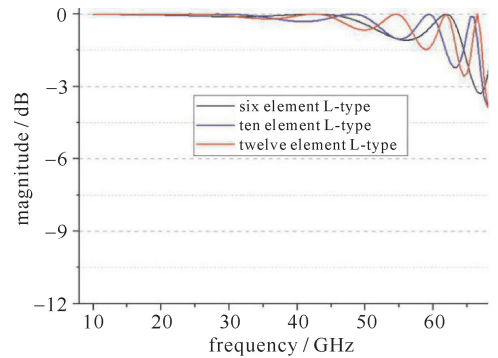


Fig. 8 Baud chart of L-type detectors of different cascades number

图 8 不同级联数目 L 型探测器波特图

在带宽达到理想目标的基础上再研究功率合成特性,仿真结果如图 9 所示。

图 9(a)表示原 TWDA 负载端输出信号波形图,图 9(b)表示本文所设计的 L 型 TWDA 在负载端的信号波形图,实验结果表明:以上两种结构均能将输出信号进行合成,由信号幅度可知, L 型探测器阵列的输出电流略次于传统 TWDA 结构,说明本文设计提出的 TWDA 带宽上有着极大的提高,但在合成功率上略有所下降。为了解决合成功率上的缺憾,增加探测器阵列的数目即增加至 12 个,观察输出电流波形,由图 10 的输出电流

波形可知,十二元 TWDA 的输出电流大于传统 TWDA,合成功率大大提高。

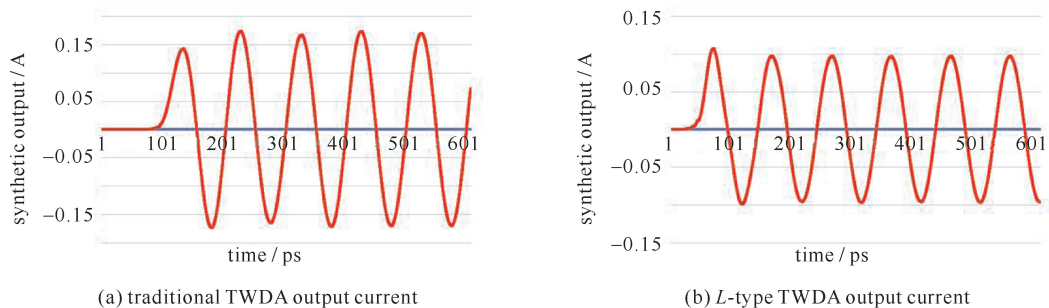


Fig. 9 Load synthesis signal waveform of six element TWDAs

图 9 六元 TWDA 负载合成信号波形

为了更直观比较不同级联数目 L 型探测器的输出电流,分别测量了六元、十元、十二元 L 型阵列探测器的输出电流,如图 11 所示,十二元 L 型探测器输出电流远远大于前两者,说明通过增加支路上的阵列单元的数目,可以持续提高合成功率。因此本文提出的 L 型阵列探测器在功率合成的基础上实现了工作带宽的提高,并且随着级联数目的增长,合成功率和工作带宽均有增长,满足未来光载无线通信对光电探测器的需求。

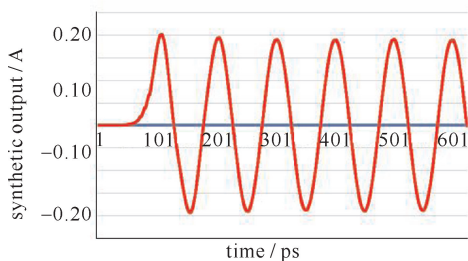


Fig. 10 Output current waveform schematic of twelve element TWDA

图 10 十二元 TWDA 输出电流波形

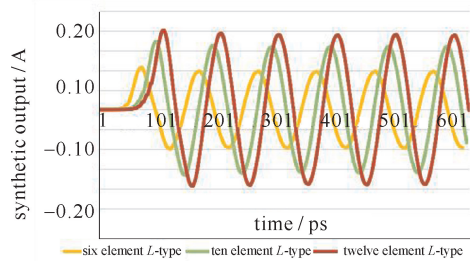


Fig. 11 Output current chart of L-type detectors of different cascades number

图 11 不同级联数目 L 型探测器输出电流图

4 结 论

本文针对传统 TWDA 只能提高光电探测器功率却不能同时提高带宽的现状,提出了一种区别于传统定 K 型滤波器的 L 型阵列探测器,通过理论分析和模拟结果,证实 L 型阵列探测器能在提高合成功率的同时提高工作带宽,相较于传统阵列探测器和现研究已提出的探测器结构,L 型阵列探测器的工作带宽达到近 67 GHz,通过增加阵列单元的数目可持续增大信号合成功率和工作带宽,同时回波损耗有较大改善,电路匹配性优势明显,满足未来通信需求。本文提出的推演方法能够灵活根据实际需求设计出探测器,为未来高性能光电探测器的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 武蓓蓓. 光载无线系统中传输方案与光域微波信号处理技术的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017: 3-5. (Wu Beilei. Research on transmission scheme and microwave signal processing technology in optical-borne wireless system. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 3-5)
- [2] Shi T, Xiong B, Sun C Z, et al. Applications of high-saturation-current photodiode in the RoF links with low noise figure and high gain[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(1): 56-62.
- [3] Yao C. Key technologies of high speed photodiodes[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 6-12.
- [4] 颜强. 高性能光探测器设计与性能测量研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2012: 5-9. (Yan Qiang. Research on the design and measurement of high-performance semiconductor photodetector. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012: 5-9)
- [5] Che X, Zhang Y, Ning J, et al. A low dark current and high responsivity InGaAs/InP pin photodetector[J]. Micronanoelectronic Technology, 2014, 51(4): 214-218.
- [6] 胡伟, 豆贤安, 孙晓泉. 强光照射下的 InGaAs 二极管内部光生载流子分析[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 138-142. (Hu Wei, Dou Xian'an, Sun Xiaoquan. The analysis of the photo-carriers of the InGaAs P-I-N photodiode response to the high optical injection. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 138-142)

- [7] Khanra S. Traveling wave model of uni-traveling carrier photodiode[C]//International Conference on Optics and Photonics. International Society for Optics and Photonics. 2015: 96541L.
- [8] Shi T, Xiong B, Sun C Z, et al. Applications of high-saturation-current photodiode in the RoF links with low noise figure and high gain[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(1): 56-62.
- [9] Meng Q Q, Wang H, Liu C Y, et al. High-photocurrent and wide-bandwidth UTC photodiodes with dipole-doped structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1952-1955.
- [10] Park J W, Han S, Lee D, et al. High-speed traveling-wave photodetector with a 3-dB bandwidth of 410 GHz[J]. ETRI Journal, 2012, 34(6): 942-945.
- [11] 刘砚涛, 刘玉蓓, 尹伟. LC 滤波器设计方法介绍及其仿真特性比较[J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 17-21. (Liu Yantao, Liu Yubei, Yin Wei. Introduction of design methods of LC filter and simulation of responding characteristics. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(5): 17-21)
- [12] 汪弈舟, 吴小林, 黄明, 等. 基于 m 推演型的 500 MHz 低通 LC 滤波器设计[J]. 工业技术创新, 2017, 4(6): 7-10. (Wang Yizhou, Wu Xiaolin, Huang Ming, et al. Design of 500 MHz low-pass LC filter based on m -derived type. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(6): 7-10)
- [13] Kuo F M, Chou M Z, Shi J W. Linear-cascade near-ballistic unitraveling-carrier photodiodes with an extremely high saturation current-bandwidth product[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 432-438.
- [14] Shi J W, Kuo F M, Wu C J, et al. Extremely high saturation current-bandwidth product performance of a near-ballistic uni-traveling-carrier photodiode with a flip-chip bonding structure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 46(1): 80-86.

Research and design of L-type array detector

Wang Honghua¹, Wen Huafeng¹, Wu Qingtao¹, Ying Xiangyue¹, Li Jun¹, Shi Feng²

(1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315000, China;

2. Department of Electrical Engineering and Renewable Energy Engineering, Oregon Institute of Technology,
3201 Campus Drive, Klamath Falls, OR 97601, USA)

Abstract: For the status quo of traveling wave detector array which can synthesize output power but can't improve work bandwidth, this paper proposes a new L-type array detector. Using a capacitance, a photodiode, and two inductance in series to form a single array unit, the L-type array detector has a cascade cell array structure. The results show that L-type detector can carry on power synthesis of the RF output signal, increase working bandwidth to 67 GHz at the same time; Compared with the traditional photoelectric detector, the work bandwidth is tripled. The reasoning method proposed in this paper can be adopted to flexible design of ideal photodiodes, providing a theoretical foundation for future study of photoelectric detectors.

Key words: traveling wave detector; array; filter circuit; power synthesis; photodetector

PACS: 85.60.GZ; 85.60.DW