

基于 π 型结构的光电探测器功率合成阵列

龙丹桂,文化锋,柯 昂,刘 春,应祥岳,李 军
(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:针对 ROF(光载无线通信)基站需要高功率大带宽光电探测器的问题,提出 π 型光电探测器阵列功率合成电路。通过将探测器嵌入在用电感互连的人工传输线上,即按照阵列式结构将单个 π 型光电探测器电路组合起来构成所需电路,实现功率合成,从而得到高功率大带宽的信号。电路首尾支路级联两个二极管来降低等效结电容以达到电路的最佳阻抗匹配。仿真结果表明, π 型光电探测器阵列能在保持大带宽的同时对各级光电二极管功率进行有效地合成,相比于同级的行波探测阵列合成效率更高。

关键词: π 型结构;探测阵列;功率合成;光/电转换;行波

中图分类号:TN29 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2016)02-0053-03

The Power Synthesis Photoelectric Detector Array based on PI Type Structure

LONG Dan-gui,WEN Hua-feng,KE Ang,LIU Chun,YING Xiang-yue,LI Jun
(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The high-power high-bandwidth photodetector is required at the base station in the Radio over Fiber (ROF) system. This paper presents a power combining circuit research on PI type photoelectric detector array. The probe is embedded in an inductor connected with artificial transmission lines. In order to obtain high power and large bandwidth signal, each group of unit structure of PI type circuit of photoelectric detector are connected with inductors based on the structure of array structure together to constitute the required structure. In order to achieve the best match, the first and final stage synthetic circuit branches are cascaded with two photodiode to reduce the equivalent capacity of synthetic circuit. Simulation results show that this arrangement can effectively combine multiple RF photocurrents while keeping the large bandwidth. Comparing with traveling wave detector array at the same level, the combining performance of PI type photoelectric detector array is better.

Key words: PI type structure; detector array; power combining; photoelectric conversion;traveling wave

0 引 言

在 ROF(光载无线通信)中,所有复杂的处理都集中在中心站,基站的作用仅用来实现光/电转换,这样可以大大降低基站的成本和复杂度,可以合理地增加基站个数从而使组网更为灵活。光电探测器是 ROF 基站中最关键的器件。由于光电探测器输出的功率有限,基站中需要配置成本昂贵的毫米波功率放大器。如果能获得高功率大带宽的光电探测器,不仅可以改变基站系统结构,取消毫米波功率放大器,降低成本,还可以改善基站以及整个 ROF 的性能^[1]。通过改变单个光电探测器的材料、结构等来提高光电探测器的功率和带宽的研究已经很成熟。在此基础上进一步提出用组合的光电探测器电路来提高毫米波光电探测器的输出功率。目前,对光电探测器进行组合的功率合成电路有两类,一类是行波光电探测阵列功率合成^[2-4];另一类是NBUTC-

PD(线性级联近弹道单行载流子光电二极管功率合成)^[5-6]。本文基于这两种结构提出 π 型光电探测器阵列功率合成电路,它能够对多个光电探测器进行功率合成,得到大带宽高功率的输出。

1 工作原理

1.1 行波光电探测器阵列

光电探测器通常由一个光电二极管、一个 $50\ \Omega$ 的负载电阻和一个 $50\ \Omega$ 的阻抗匹配终端电阻三部分组成,如图 1 所示。探测器输出负载的信号电流为入射的一半。这种探测器带宽主要影响因素是结电容决定的时间常数,探测器响应的截止频率 f_c 可表示为

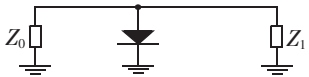


图 1 单个光电二极管阻抗匹配构成的传统光电探测器

$$f_c = \frac{1}{\pi Z_0 C_d} \quad (1)$$

收稿日期:2015-12-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371061);浙江省自然科学基金资助项目(LY12F01010);浙江省重中之重学科开放基金资助项目(xkx11537)
作者简介:龙丹桂(1992—),女,湖南益阳人。硕士,主要研究方向为光载无线通信。
通信作者:文化锋,副教授。E-mail: wenhuafeng@nbu.edu.cn

式中, C_d 为光电二极管的结电容; Z_0 为匹配负载阻抗, $Z_0 = 50 \Omega$ 。

行波光电探测器是将探测器嵌入在一个用电感相互连接的人工传输线上的阵列电路。这种人造传输线的特性阻抗 Z_a 为电感与电容的比,即

$$Z_a = \sqrt{L/C_d} \quad (2)$$

式中, L 为每个滤波器部分电感。

该光电二极管阵列的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC_d}} \quad (3)$$

这种结构结电容不会叠加,但每个光电二极管的光电流在每条支路上会有时间常数延迟分离。电流的传播延时为

$$\tau_c \approx \sqrt{LC_d} \quad (4)$$

由于这个延迟,光电流不能在终端负载上同相位的合成。解决这个问题的办法是在光电探测器上加上适当的光馈入网络来实现与电延时同步的光延时。行波探测阵列光路馈送原理如图 2 所示。

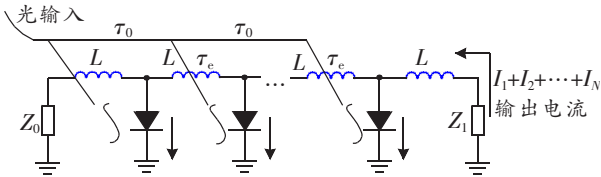


图 2 行波探测阵列光路馈送原理图

1.2 π 型光电探测器阵列

π 型光电探测器阵列结构等效电路的基本单元包含两个探测器等效结电容和一个电感元件,等效于一个 π 型滤波器电路,如图 3 所示。

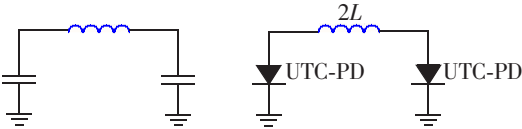


图 3 π 型滤波器和 π 型光电探测器阵列单元结构

将这些低通滤波器级联在一起产生一个阶梯网络,类似于传输线的近似集总参数,也就是我们提出的 π 型光电探测器阵列结构,如图 4 所示。

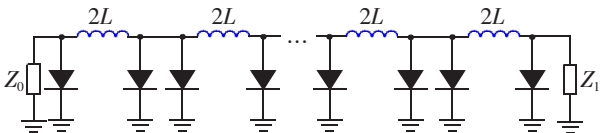


图 4 直接用基本单元级联的 π 型光电探测器阵列结构

由式(2)可知,人造传输线的特性阻抗 Z_a 为电感与电容的比,在这个结构中,等效结电容为 $2C_d$,因为特性阻抗 Z_a 为固定值($Z_a = 50 \Omega$),所以有

$$Z_a = 50 = \sqrt{\frac{L}{C_d}} = \sqrt{\frac{2L}{2C_d}} \quad (5)$$

式中, $2L$ 为滤波器部分的电感。这样一来,该光电探测器阵列的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{2L2C_d}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_d}} = \frac{1}{2} f_c \quad (6)$$

按照上述方法进行合成,相比于传统的光电探测器阵列,不仅性能没有提高,带宽反而变小了。为了解决这一问题,文中将每个 π 型滤波器基本单元的等效电容减半,即相应的基本单元两条支路的等效电容值均变为 $C_d/2$,根据式(2),相应的电感值变成 L ,级联以后,中间支路等效电容并联合并后为一个光电二极管的等效结电容 C_d ,第 1 个和第 N 个支路为 $1/2$ 倍光电二极管等效结电容。因为在电路中基本的器件是光电二极管,而二极管的等效结电容是固定的,所以在第 1 个和第 N 个支路中不能通过改变基本元器件来减少等效电容,这里采取的办法是通过串联两个光电二极管,达到减少等效结电容的目的,整体结构如图 5 所示。

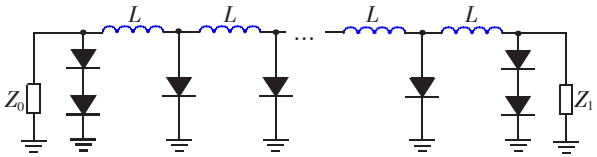


图 5 π 型光电探测器阵列结构原理图

在这个结构中, π 型光电二极管阵列的截止频率也可用式(3)表示,即带宽不再变小。但电路中会存在电延时现象,我们通过光馈入网络来解决这个问题。在光电探测器中加入适当的光馈入网络,实现与电延时同步的光延时。电路的延时可以用式(4)表示。单条探测支路的输出电流 I_n 可以表示为

$$I_n = e^{j(n-1)\omega\tau_0} \cdot \frac{\eta p_{out}}{2N} \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c} \quad (7)$$

式中, ω 为微波信号频率; τ_0 为各光电二极管支路输出之间的光时延差; η 为探测器的响应率; p_{out} 为输出光功率; N 为探测器输出支路数; n 为从左到右输出支路的序号。则各支路探测器输出的电流之和 I_0 可以表示为

$$I_0 = \sum I_n = \sum_{n=1}^N \left[e^{j(n-1)\omega\tau_0} \cdot \frac{\eta p_{out}}{2N} \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c} \right] \quad (8)$$

由于光延迟和电延迟相等,所以探测器总的射频输出电流为

$$I_0 = \sum I_n = \frac{\eta p_{out}}{2} \cdot e^{j(N-1)\omega\tau} \quad (9)$$

即在 π 型光电探测器阵列的负载端获得了 N 倍于单条支路二极管的光电流。

2 仿真及结果分析

为了验证所提出的 π 型探测器阵列电路的可行性,下面将具体对一级 π 型探测器、四级 π 型探测器和四级行波探测器阵列的性能进行仿真比较。常见的光电二极管的结电容为 $0.15\sim 0.2\text{ pF}$,仿真中取 $C_d=0.2\text{ pF}$,由式(3)得出 $L=500\text{ pH}$,单个光电二极管输出电流设置为 100 mA 。

图 6、图 7 分别为一级 π 型探测器与四级 π 型探测器阵列的仿真结果。由图 6 可以看出,四级 π 型探测器阵列输出电流幅值(250 mA)比一级 π 型探测器输出电流幅值(100 mA)大,因为一级 π 型探测器中有两条支路,而四级 π 型探测器阵列中有 5 条支路,从而可以得出四级 π 型探测器阵列实现了

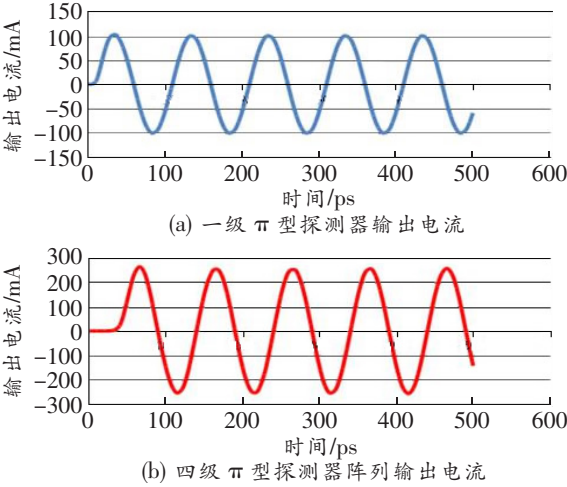


图 6 一级 π 型探测器与四级 π 型探测器阵列输出电流比较

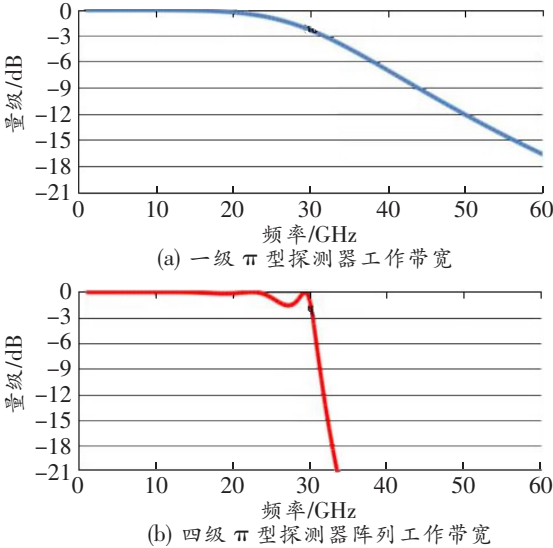


图 7 一级 π 型探测器与四级 π 型探测器阵列工作带宽比较

各支路光电二极管输出的功率合成。由图 7 可得出,四级 π 型探测器阵列和一级 π 型探测器工作带宽(-3 dB 带宽)都约为 30 GHz ,与理论计算结果一致。即相比于一级 π 型探测器,四级 π 型探测器阵列在保持工作带宽的同时,既合成了功率,也提高了电路的匹配性能。

图 8、图 9 分别为四级行波探测器与四级 π 型探测器阵列的模拟结果。由图 8 可以看出,四级 π 型探测器阵列输出电流幅值(250 mA)比四级行波探测器输出电流幅值(200 mA)大。由图 9 可得到,四级 π 型探测器阵列和四级行波探测器工作带宽(-3 dB 带宽)都约为 30 GHz ,与理论计算结果一致。即相比于四级行波探测器,四级 π 型探测器阵列在保持工作带宽的同时,在级数相同的情况下输出电流要大。

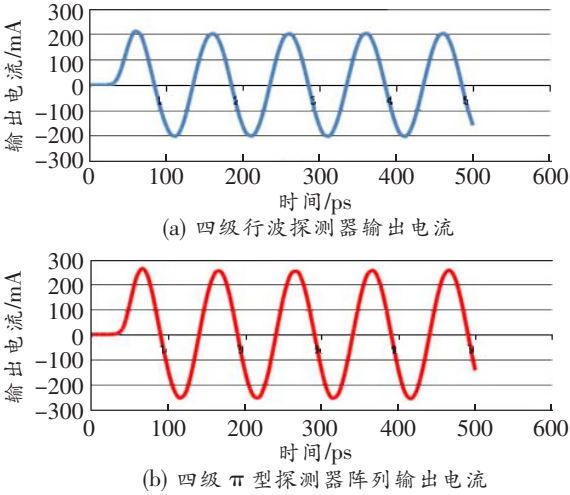


图 8 四级行波探测器与四级 π 型探测器阵列电流比较

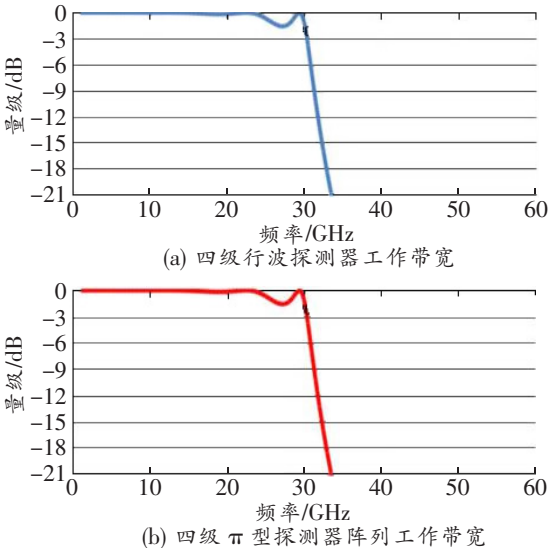


图 9 四级行波探测器与四级 π 型探测器阵列带宽比较

(下转第 74 页)