



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110572215 B

(45)授权公告日 2020.09.08

(21)申请号 201910886369.X

H04B 10/556(2013.01)

(22)申请日 2019.09.19

H04B 10/69(2013.01)

H04B 10/70(2013.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110572215 A

(43)申请公布日 2019.12.13

(73)专利权人 南京航空航天大学

地址 210000 江苏省南京市江宁区将军大道29号

(56)对比文件

CN 109981135 A,2019.07.05

US 2010303466 A1,2010.12.02

CN 109084961 A,2018.12.25

CN 109831258 A,2019.05.31

(72)发明人 朱丹 胡晓朋 潘时龙 陈文娟

刘江 丁杰文

审查员 裴国强

(74)专利代理机构 北京德崇智捷知识产权代理

有限公司 11467

代理人 杨楠

(51)Int.Cl.

H04B 10/516(2013.01)

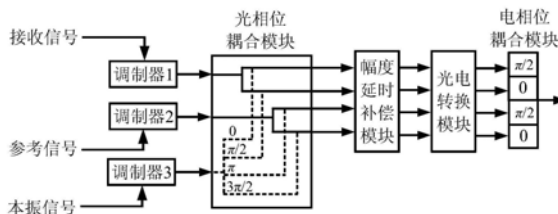
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

光子辅助射频信号接收方法、装置及同时同频全双工系统

(57)摘要

本发明公开了一种光子辅助射频信号接收方法,将射频的接收信号、本振信号、参考信号分别调制到同源的三路光载波上,所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$  的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号;对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配并分别进行光电转换,得到第一~第四电信号;将第一~第四电信号分别相移  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$  后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号。本发明还公开了一种光子辅助射频信号接收装置及一种同时同频全双工系统。本发明可有效解决同时同频全双工技术收发隔离度低或/和镜频干扰的难题。



1. 一种光子辅助射频信号接收方法,用于同时同频全双工系统,其特征在于,将射频接收信号、射频本振信号、射频参考信号分别调制到同源的三路光载波上,分别形成光载接收信号、光载本振信号、光载参考信号,其中射频接收信号和射频参考信号使用至少保留单侧一阶边带的调制方式,射频本振信号使用保留同侧一阶边带的载波抑制单边带调制方式,所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号,其中, $\alpha_1=\varphi+2\pi m_1$ ,

$\alpha_2=\varphi+\pi/2+2\pi m_2$ ,  $\alpha_3=\varphi+\pi+2\pi m_3$ ,  $\alpha_4=\varphi+3\pi/2+2\pi m_4$ ,  $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\varphi$ 为任一相位角;对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配并分别进行光电转换,得到第一~第四电信号;将第一~第四电信号分别相移 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号,其中, $\beta_1=\theta+\pi/2+2\pi n_1$ , $\beta_2=\theta+2\pi n_2$ , $\beta_3=\theta+\pi/2+2\pi n_3$ , $\beta_4=\theta+2\pi n_4$ , $n_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\theta$ 为任一相位角。

2. 如权利要求1所述光子辅助射频信号接收方法,其特征在于,所述匹配是指令以下条件得到满足: $\phi_1=\phi_2$ 且 $\frac{\eta_1}{\eta_2}=\frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1}$ ;或者是指令以下条件得到满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{array} \right. \text{且} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\mathfrak{R}_1 \eta_1 + \mathfrak{R}_2 \eta_2}{\mathfrak{R}_3 \eta_3 + \mathfrak{R}_4 \eta_4} = \frac{b}{a_i} \end{array} \right. ; \text{又或者是指令以下条件得到满足:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{array} \right. \text{且} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1} \\ \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b \mathfrak{R}_3}{a_i \mathfrak{R}_1} \end{array} \right. ;$$

其中, $\eta_{1,2,3,4}$ 和 $\phi_{1,2,3,4}$ 分别表示对第一~第四耦合光信号进行匹配所引入的光功率衰减系数和相位差, $\mathfrak{R}_{1,2,3,4}$ 则表示第一~第四耦合光信号所对应光电探测器的响应度, $a_i$ 表示光载接收信号中干扰信号分量的幅度, $b$ 表示光载参考信号的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 分别表示干扰信号和射频参考信号在调制前由于信道传输所引入的相位差。

3. 一种光子辅助射频信号接收装置,用于同时同频全双工系统,其特征在于,包括:光电调制模块,用于将射频接收信号、射频本振信号、射频参考信号分别调制到同源的三路光载波上,分别形成光载接收信号、光载本振信号、光载参考信号,其中射频接收信号和射频参考信号使用至少保留单侧一阶边带的调制方式,射频本振信号使用保留同侧一阶边带的载波抑制单边带调制方式,所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;

光相位耦合模块,用于将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号,其中, $\alpha_1=\varphi+2\pi m_1$ ,  $\alpha_2=\varphi+\pi/2+2\pi m_2$ ,  $\alpha_3=\varphi+\pi+2\pi m_3$ ,  $\alpha_4=\varphi+3\pi/2+2\pi m_4$ ,  $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数,

$\varphi$  为任一相位角；

幅度延时补偿模块,用于对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配；

光电转换模块,用于对匹配后的第一~第四耦合光信号分别进行光电转换,得到第一~第四电信号；

电相位耦合模块,用于将第一~第四电信号分别相移 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号,其中, $\beta_1 = \theta + \pi/2 + 2\pi n_1$ , $\beta_2 = \theta + 2\pi n_2$ , $\beta_3 = \theta + \pi/2 + 2\pi n_3$ , $\beta_4 = \theta + 2\pi n_4$ , $n_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为整数, $\theta$ 为任一相位角。

4. 如权利要求3所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述匹配是指令以下条件得到满足: $\phi_1 = \phi_2$ 且 $\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1}$ ;或者是指令以下条件得到满足:

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\mathfrak{R}_1\eta_1 + \mathfrak{R}_2\eta_2}{\mathfrak{R}_3\eta_3 + \mathfrak{R}_4\eta_4} = \frac{b}{a_i} \end{cases} ; \text{ 又或者是指令以下条件得到满足:}$$

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1} \\ \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b\mathfrak{R}_3}{a_i\mathfrak{R}_1} \end{cases} ;$$

其中, $n_{1,2,3,4}$ 和 $\phi_{1,2,3,4}$ 分别表示对第一~第四耦合光信号进行匹配所引入的光功率衰减系数和相位差, $\mathfrak{R}_{1,2,3,4}$ 则表示第一~第四耦合光信号所对应光电探测器的响应度, $a_i$ 表示光载接收信号中干扰信号分量的幅度, $b$ 表示光载参考信号的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 分别表示干扰信号和参考信号在调制前由于信道传输所引入的相位差。

5. 如权利要求3或4所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述电光调制模块包括:

光源模块,用于生成光载波并将其分为两路;

双偏振正交相移键控调制器,用于将射频接收信号和射频参考信号分别调制到一路光载波的两个正交偏振态上并耦合在一起;

马赫-增德尔调制器,用于将射频本振信号调制到另一路光载波上,形成光载本振信号。

6. 如权利要求5所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述光相位耦合模块为双偏振90度光混频器。

7. 如权利要求5所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述电相位耦合模块由两个90度微波电桥和一个微波耦合器构成。

8. 如权利要求3或4所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述电光调制模块包括:

锁模激光器,用于产生梳齿间隔为本振信号角频率的光学频率梳;

第一光分束器,用于将所述光学频率梳分成两路;

光滤波器,用于从第一路光学频率梳中选出频率为光载波频率的频率分量;

第二光分束器,用于将光滤波器的输出光信号分为两路;

第一马赫-增德尔调制器和第二马赫-增德尔调制器,分别用于将射频接收信号和射频参考信号分别调制到第二光分束器的两路输出光信号上,得到光载接收信号和光载参考信号;

可编程光处理器,用于从第二路光学频率梳中选出光载本振信号。

9.如权利要求3或4所述光子辅助射频信号接收装置,其特征在于,所述幅度延时补偿模块由四个可调光衰减器和四个可调光延时线组成。

10.一种同时同频全双工系统,包括发射装置和接收装置,其特征在于,所述接收装置为如权利要求3~9任一项所述光子辅助射频信号接收装置。

## 光子辅助射频信号接收方法、装置及同时同频全双工系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种射频信号接收方法,尤其涉及一种用于同时同频全双工系统的光子辅助射频信号接收方法、装置。

### 背景技术

[0002] 无线电系统的发展对信号带宽提出了越来越高的要求,为了有效提高频谱资源利用率,同时同频全双工技术应运而生,并成为无线通信、连续波雷达以及电子战领域的研究热点。同时同频全双工技术面临两大挑战,一是收发隔离度的问题,二是镜频干扰。

[0003] 一方面,由于发射与接收同时进行,发射机发出的信号不可避免地泄露到本地接收机端,这部分自干扰信号与目标信号的频段一致,无法简单地采用滤波器滤除;并且自干扰信号的功率远远大于目标信号的功率,目标信号将被淹没在噪声中造成接收数据错误。针对收发隔离度问题,国内外研究学者提出了很多解决方法,总体可归纳为数字域对消和模拟域对消两类方案。其中,数字域对消主要由对消算法来实现,但对消深度受限于模数转换器(ADC)的动态范围(Z.Li,Y.Xia,W.Pei,K.Wang and D.P.Mandic,“An Augmented Nonlinear LMS for Digital Self-Interference Cancellation in Full-Duplex Direct-Conversion Transceivers,”IEEE Transactions on Signal Processing,2018,66(15):4065-4078.)。模拟域对消的核心思想是构建与自干扰信号幅度相同、相位相反的对消信号并在射频模拟域完成抵消,达到抑制效果。模拟域对消方案灵活多变,还可与其他被动对消技术联合使用,是最具前景的方案。近年,有多篇将射频信号调制到光域进行对消的方案文献报道(M.P.Chang,M.Fok,A.Hofmaier and P.R.Prucnal,“Optical Analog Self-Interference Cancellation Using Electro-Absorption Modulators,”IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2013,23(2):99-101.),但验证的对消带宽有限。

[0004] 另一方面,下变频是无线电系统接收机的一个关键功能。对于一个给定的本振信号 $\omega_{LO}$ ,有两个不同的射频信号 $\omega_{LO} + \omega_{IF}$ 和 $\omega_{LO} - \omega_{IF}$ 可以产生相同的中频信号 $\omega_{IF}$ ,其中一个期望得到的有用信号,另一个就是镜频。镜频信号会作为干扰项混入到中频中,因此需要对其进行抑制。一种简单的方案是采用镜频抑制滤波器,在混频前将信号与镜频分开,但当信号与镜频离得很近时,滤波器难以实现频率的分离。近年,相继有学者利用90度光混频器实现了对射频信号的镜频抑制混频(Z.Tang and S.Pan,“Reconfigurable microwave photonic mixer with minimized path separation and large suppression of mixing spurs,”Optics Letters,2017,42(1):33-36.), (D.Zhu,W.Chen,and S.Pan,“Photonics-enabled balanced Hartley architecture for broadband image-reject microwave mixing,”Optics Express,2018,26(21):28022-28029.),但方案中仅对混频功能进行了研究。

[0005] 目前,有关对消和混频的系统实现的功能较为单一,难以满足未来射频前端对大带宽、多功能的追求。因此,研究能够同时实现射频对消和镜频抑制混频的一体化接收技术

很有意义。

### 发明内容

[0006] 本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术的不足,提供一种光子辅助射频信号接收方法,可有效解决同时同频全双工技术收发隔离度低或/和镜频干扰的难题,并且具有光子技术的优势,一定程度上提高对消带宽和对消深度。

[0007] 本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题:

[0008] 一种光子辅助射频信号接收方法,用于同时同频全双工系统,将射频接收信号、射频本振信号、射频参考信号分别调制到同源的三路光载波上,分别形成光载接收信号、光载本振信号、光载参考信号,其中射频接收信号和射频参考信号使用至少保留单侧一阶边带的调制方式,射频本振信号使用保留同侧一阶边带的载波抑制单边带调制方式,所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号,其中, $\alpha_1=\varphi+2\pi m_1$ ,  $\alpha_2=\varphi+\pi/2+2\pi m_2$ ,  $\alpha_3=\varphi+\pi+2\pi m_3$ ,  $\alpha_4=\varphi+3\pi/2+2\pi m_4$ ,  $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\varphi$ 为任一相位角;对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配并分别进行光电转换,得到第一~第四电信号;将第一~第四电信号分别相移 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号,其中, $\beta_1=\theta+\pi/2+2\pi n_1$ ,  $\beta_2=\theta+2\pi n_2$ ,  $\beta_3=\theta+\pi/2+2\pi n_3$ ,  $\beta_4=\theta+2\pi n_4$ ,  $n_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\theta$ 为任一相位角。

[0009] 优选地,所述匹配是指令以下条件得到满足: $\phi_1=\phi_2$ 且 $\frac{\eta_1}{\eta_2}=\frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1}$ ;或者是指令以下

条件得到满足:
$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\mathfrak{R}_1\eta_1 + \mathfrak{R}_2\eta_2}{\mathfrak{R}_3\eta_3 + \mathfrak{R}_4\eta_4} = \frac{b}{a_i} \end{cases}; \text{ 又或者是指令以下条件得到满足:}$$

[0010] 
$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1} \\ \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b\mathfrak{R}_3}{a_i\mathfrak{R}_1} \end{cases}; \text{ 其中, } \eta_{1,2,3,4} \text{ 和 } \phi_{1,2,3,4} \text{ 分别表示对第一~第四耦合}$$

光信号进行匹配所引入的光功率衰减系数和相位差, $\mathfrak{R}_{1,2,3,4}$ 则表示第一~第四耦合光信号所对应光电探测器的响应度, $a_i$ 表示光载接收信号中干扰信号分量的幅度, $b$ 表示光载参考信号的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 分别表示干扰信号和参考信号在调制前由于信道传输所引入的相位差。

[0011] 根据相同的发明思路还可以得到以下技术方案:

[0012] 一种光子辅助射频信号接收装置,用于同时同频全双工系统,包括:

[0013] 电光调制模块,用于将射频接收信号、射频本振信号、射频参考信号分别调制到同源的三路光载波上,分别形成光载接收信号、光载本振信号、光载参考信号,其中射频接收信号和射频参考信号使用至少保留单侧一阶边带的调制方式,射频本振信号使用保留同侧

一阶边带的载波抑制单边带调制方式,所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;

[0014] 光相位耦合模块,用于将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号,其中, $\alpha_1=\varphi+2\pi m_1$ , $\alpha_2=\varphi+\pi/2+2\pi m_2$ , $\alpha_3=\varphi+\pi+2\pi m_3$ , $\alpha_4=\varphi+3\pi/2+2\pi m_4$ , $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\varphi$ 为任一相位角;

[0015] 幅度延时补偿模块,用于对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配;

[0016] 光电转换模块,用于对匹配后的第一~第四耦合光信号分别进行光电转换,得到第一~第四电信号;

[0017] 电相位耦合模块,用于将第一~第四电信号分别相移 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号,其中, $\beta_1=\theta+\pi/2+2\pi n_1$ , $\beta_2=\theta+2\pi n_2$ , $\beta_3=\theta+\pi/2+2\pi n_3$ , $\beta_4=\theta+2\pi n_4$ , $n_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数, $\theta$ 为任一相位角。

[0018] 优选地,

[0019] 所述匹配是指令以下条件得到满足: $\phi_1=\phi_2$ 且 $\frac{\eta_1}{\eta_2}=\frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1}$ ;或者是指令以下条件得

到满足: 
$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\mathfrak{R}_1 \eta_1 + \mathfrak{R}_2 \eta_2}{\mathfrak{R}_3 \eta_3 + \mathfrak{R}_4 \eta_4} = \frac{b}{a_i} \end{cases}; \text{ 又或者是指令以下条件得到满足:}$$

[0020] 
$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{R}_1} \\ \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_3} \\ \frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b \mathfrak{R}_3}{a_i \mathfrak{R}_1} \end{cases}; \text{ 其中, } \eta_{1,2,3,4} \text{ 和 } \phi_{1,2,3,4} \text{ 分别表示对第一~第四耦合}$$

光信号进行匹配所引入的光功率衰减系数和相位差, $\mathfrak{R}_{1,2,3,4}$ 则表示第一~第四耦合光信号所对应光电探测器的响应度, $a_i$ 表示光载接收信号中干扰信号分量的幅度, $b$ 表示光载参考信号的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 分别表示干扰信号和参考信号在调制前由于信道传输所引入的相位差。

[0021] 作为其中一个优选方案,所述电光调制模块包括:

[0022] 光源模块,用于生成光载波并将其分为两路;

[0023] 双偏振正交相移键控(DP-QPSK)调制器,用于将射频接收信号和射频参考信号分别调制到一路光载波的两个正交偏振态上并耦合在一起;

[0024] 马赫-增德尔调制器,用于将射频本振信号调制到另一路光载波上,形成光载本振信号。

[0025] 进一步地,所述光相位耦合模块为双偏振90度光混频器。

[0026] 进一步地,所述电相位耦合模块由两个90度微波电桥和一个微波耦合器构成。

[0027] 作为另一个优选方案,所述电光调制模块包括:

[0028] 锁模激光器,用于产生梳齿间隔为本振信号角频率的光学频率梳;

- [0029] 第一光分束器,用于将所述光学频率梳分成两路;
- [0030] 第一光滤波器,用于从第一路光学频率梳中选出频率为光载波频率的频率分量;
- [0031] 第二光分束器,用于将第一光滤波器的输出光信号分为两路;
- [0032] 第一马赫-增德尔调制器和第二马赫-增德尔调制器,分别用于将射频接收信号和射频参考信号分别调制到第二光分束器的两路输出光信号上,得到光载接收信号和光载参考信号;
- [0033] 可编程光处理器,用于从第二路光学频率梳中选出光载本振信号。
- [0034] 优选地,所述幅度延时补偿模块由四个可调光衰减器和四个可调光延时线组成。
- [0035] 一种同时同频全双工系统,包括发射装置和接收装置,所述接收装置为如上任一技术方案所述光子辅助射频信号接收装置。
- [0036] 相比现有技术,本发明技术方案具有以下有益效果:
- [0037] 本发明可在光域实现射频对消或/和镜频抑制,从而有效解决同时同频全双工技术收发隔离度低或/和镜频干扰的难题,并且具有光子技术的抗干扰能力强、带宽大等优势,可一定程度上提高对消带宽和对消深度。

### 附图说明

- [0038] 图1为本发明光子辅助射频信号接收装置的结构原理示意图;
- [0039] 图2为本发明光子辅助射频信号接收装置实施例一的结构示意图;
- [0040] 图3为DP-QPSK调制器的结构示意图;
- [0041] 图4为实施例一接收信号对消前后的幅频响应图;
- [0042] 图5为本发明光子辅助射频信号接收装置实施例二的结构示意图。

### 具体实施方式

- [0043] 下面结合附图对本发明的技术方案进行详细说明:
- [0044] 本发明的光子辅助射频信号接收装置,如图1所示,包括:电光调制模块(包括电光调制器1~电光调制器3),用于将接收天线所接收到的射频接收信号(包含有用信号、镜频信号和干扰信号)以及射频本振信号、射频参考信号分别调制到同源的三路光载波上,分别形成光载接收信号、光载本振信号、光载参考信号,其中射频接收信号和射频参考信号使用至少保留单侧一阶边带的调制方式(例如,单边带调制、双边带调制、载波抑制双边带调制、载波抑制单边带调制等),射频本振信号使用保留同侧一阶边带的载波抑制单边带调制方式(假设射频接收信号和射频参考信号调制后仅保留了+1阶边带或者仅保留了-1阶边带,则射频本振信号调制后也应相应保留+1/-1阶边带;如果光载接收信号和光载参考信号中同时保留了 $\pm 1$ 阶边带,则光载本振信号中既可以只保留+1阶边带也可以仅保留-1阶边带),所述射频参考信号为同时同频全双工系统发射信号的分束信号;光相位耦合模块,用于将光载接收信号和光载参考信号各自分成两路并与分别相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 的光载本振信号的第一~第四分束信号分别耦合,得到第一~第四耦合光信号,相移 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 所满足的关系为: $\alpha_1=\varphi+2\pi m_1$ ,  $\alpha_2=\varphi+\pi/2+2\pi m_2$ ,  $\alpha_3=\varphi+\pi+2\pi m_3$ ,  $\alpha_4=\varphi+3\pi/2+2\pi m_4$ ,  $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ )为整数;幅度延时补偿模块,用于对第一~第四耦合光信号的幅度和相位进行匹配;光电转换模块,用于对匹配后的第一~第四耦合光信号分别进行光电转换,得到第一~第四电信



号;电相位耦合模块,用于将第一~第四电信号分别相移 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 后耦合在一起,得到下变频的射频接收信号,其中, $\beta_1 = \theta + \pi/2 + 2\pi n_1$ , $\beta_2 = \theta + 2\pi n_2$ , $\beta_3 = \theta + \pi/2 + 2\pi n_3$ , $\beta_4 = \theta + 2\pi n_4$ , $n_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为整数; $\varphi$ 、 $\theta$ 为任一相位角。

[0045] 为便于公众理解,首先对本发明的原理进行说明如下:

[0046] 假设光载波的角频率为 $\omega_c$ ,接收天线接收的信号包含从外界接收到的有用信号 $s(t) = V_s \sin(\omega_s t)$ 、镜频信号 $m(t) = V_m \sin(\omega_m t)$ 以及发射机带来的自干扰信号 $i(t) = V_i \sin(\omega_r t)$ ,并通过调制器1产生光载接收信号 $E_{s1}$ ;参考信号 $r(t) = V_r \sin(\omega_r t)$ 从发射机端引出,并通过调制器2产生光载参考信号 $E_{s2}$ ;两个光信号的光场分别表示为:

$$[0047] \quad E_{s1} = a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_i]} \quad (1)$$

$$[0048] \quad E_{s2} = b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} \quad (2)$$

[0049] 其中, $a_s$ 、 $a_m$ 、 $a_i$ 和 $b$ 表示相应频谱成分的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 分别表示干扰信号和参考信号在调制前由于信道传输所引入的相位差。

[0050] 将本振信号调制到另一路光载波上形成光载本振信号,输出光场 $E_{LO}$ 表示为:

$$[0051] \quad E_{LO} = c e^{j(\omega_c - \omega_L)t} \quad (3)$$

[0052] 其中, $c$ 表示光载本振信号的幅度。信号光和本振光分别注入光相位耦合模块,得到:

$$[0053] \quad \begin{aligned} e_1 &\propto a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_i]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \alpha_1} \\ e_2 &\propto a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_i]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \alpha_2} \\ e_3 &\propto b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \alpha_3} \\ e_4 &\propto b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \alpha_4} \end{aligned} \quad (4)$$

[0054] 四路光信号经过光电转换模块后,得到四路电流表示为:

$$[0055] \quad \begin{aligned} i_1 &\propto \Re_1 \eta_1 \left\{ a_s c \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi + \phi_1] + a_m c \cos[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \phi_1] \right. \\ &\quad \left. + a_i c \cos[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + (\phi_i + \phi_1)] \right\} \\ i_2 &\propto \Re_2 \eta_2 \left\{ -a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi + \phi_2] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \phi_2] \right. \\ &\quad \left. - a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + (\phi_i + \phi_2)] \right\} \\ i_3 &\propto -\Re_3 \eta_3 b c \cos[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + (\phi_r + \phi_3)] \\ i_4 &\propto \Re_4 \eta_4 b c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + (\phi_r + \phi_4)] \end{aligned} \quad (5)$$

[0056] 其中, $\eta_{1,2,3,4}$ 和 $\phi_{1,2,3,4}$ 表示每路相应的可调光衰减器带来的光功率衰减系数以及可调光延时线带来的相位差, $\Re_{1,2,3,4}$ 则表示相应光电探测器的响应度。电相位耦合模块分别对四路电信号进行 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 的相移后耦合到一起,输出电流表示为:

$$\begin{aligned}
i &= i_1 \angle \beta_1 + i_2 \angle \beta_2 + i_3 \angle \beta_3 + i_4 \angle \beta_4 \\
&= -\Re_1 \eta_1 \left\{ \begin{aligned} &a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi + \theta + \phi_1] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \theta + \phi_1] \\ &+ a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_i + \phi_1)] \end{aligned} \right\} \\
[0057] \quad &+\Re_2 \eta_2 \left\{ \begin{aligned} &-a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi + \theta + \phi_2] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \theta + \phi_2] \\ &-a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_i + \phi_2)] \end{aligned} \right\} \quad (6) \\
&+\Re_3 \eta_3 bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_r + \phi_3)] \\
&+\Re_4 \eta_4 bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_r + \phi_4)]
\end{aligned}$$

[0058] 为使式(6)中镜频成分 $|\omega_1 - \omega_m|$ 被抑制,则要求满足以下条件:

$$[0059] \quad -\Re_1 \eta_1 a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \theta + \phi_1] + \Re_2 \eta_2 a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \varphi + \theta + \phi_2] = 0 \quad (7)$$

[0060] 通过化简,得出镜频抑制的条件为:

$$[0061] \quad \phi_1 = \phi_2 \text{ 且 } \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Re_2}{\Re_1} \quad (8)$$

[0062] 为使式(6)中自干扰成分 $|\omega_r - \omega_L|$ 被消除,则要求满足以下条件:

$$[0063] \quad -\Re_1 \eta_1 a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_i + \phi_1)] - \Re_2 \eta_2 a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_i + \phi_2)] \\ + \Re_3 \eta_3 bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_r + \phi_3)] + \Re_4 \eta_4 bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + \varphi + \theta + (\phi_r + \phi_4)] = 0 \quad (9)$$

[0064] 通过化简,得到对消的条件为:

$$[0065] \quad \begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\Re_4}{\Re_3} \\ \frac{\Re_1 \eta_1 + \Re_2 \eta_2}{\Re_3 \eta_3 + \Re_4 \eta_4} = \frac{b}{a_i} \end{cases} \quad (10)$$

[0066] 进一步地,当式(8)和式(10)的条件均得到满足时,镜频抑制和射频对消将同时得以实现,所满足的条件归结为:

$$[0067] \quad \begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_3 = \phi_4 \\ \phi_1 - \phi_3 = \phi_r - \phi_i \end{cases} \text{ 且 } \begin{cases} \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Re_2}{\Re_1} \\ \frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\Re_4}{\Re_3} \\ \frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b \Re_3}{a_i \Re_1} \end{cases} \quad (11)$$

[0068] 此时,对应的最终输出为:

$$[0069] \quad i \propto -2\Re_1 \eta_1 a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \varphi + \theta + \phi_1] \quad (12)$$

[0070] 从式(12)可以看出,镜频成分 $|\omega_1 - \omega_m|$ 和自干扰成分 $|\omega_r - \omega_L|$ 均得到抑制,只有需要的中频成分 $|\omega_s - \omega_L|$ 保留了下来。

[0071] 上述装置的具体构建形式多种多样,例如,调制器1和调制器2可采用两个马赫-增德尔调制器,也可用一个DP-QPSK调制器实现。光相位耦合模块可以直接采用双偏振90度光混频器,也可通过偏振控制器、偏振分束器、若干光分束器和延时线搭建而成。电相位耦合模块可以直接采用一个四相位耦合器,也可通过多个单通道微波移相器和微波耦合器搭建而成。

[0072] 为了公众更好地理解,下面以两个优选实例来进一步说明本发明技术方案。

[0073] 实施例一：

[0074] 本实施例的射频接收装置为一个模拟装置，采用两个微波源和一个任意信号发生器分别模拟输出射频接收信号、射频本振信号和射频参考信号。如图2所示，该装置包括微波源1、任意信号发生器、激光器、微波耦合器1、微波功分器、90:10光分束器、DP-QPSK调制器、光滤波器1、光放大器1、偏振控制器1、微波源2、马赫-增德尔调制器、光滤波器2、光放大器2、偏振控制器2、双偏振90度光混频器、可调光延时线1~4、可调光衰减器1~4、光电探测器1~4、90度电桥1、90度电桥2、微波耦合器2。

[0075] DP-QPSK调制器的结构示意图如图3所示，由两个QPSK调制器、一个90度偏振旋转器以及一个光合束器构成。两个QPSK调制器并联，分别为X-QPSK调制器和Y-QPSK调制器。两个QPSK调制器均包括三个马赫-增德尔调制器，其中一个马赫-增德尔调制器作为主调制器，另外两个作为子调制器嵌在主调制器中， $\phi_{11,12,13,21,22,23}$ 分别用来控制相应调制器所处的偏置点。其中，XI、XQ、YI和YQ四个子调制器均偏置在传输曲线的最小点，而X-QPSK和Y-QPSK两个主调制器均偏置在最大传输点。接收信号包含从外界接收到的有用信号 $s(t) = V_s \sin(\omega_s t)$ 、镜频信号 $m(t) = V_m \sin(\omega_m t)$ 以及自干扰信号 $i(t) = V_i \sin(\omega_r t)$ ，接收信号驱动X-QPSK调制器的XI子调制器，参考信号 $r(t) = V_r \sin(\omega_r t)$ 驱动Y-QPSK调制器的YQ子调制器，而XQ和YI两个子调制器不加载射频信号。这样，DP-QPSK调制器输出光信号经过光滤波器1滤出单边带后，光场 $E_s$ 表示为：

$$E_s = \hat{e}_x \cdot E_{RFx} + \hat{e}_y \cdot E_{RFy}$$

$$= \hat{e}_x \cdot \left\{ a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_i]} \right\} + \hat{e}_y \cdot b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} \quad (13)$$

[0077] 其中， $\hat{e}_x$ 和 $\hat{e}_y$ 表示一对正交的偏振态， $a_s$ 、 $a_m$ 、 $a_i$ 和 $b$ 表示相应频谱成分的幅度， $\phi_i$ 和 $\phi_r$ 表示由信道传输带来的相位差。

[0078] 微波源2产生频率位于 $\omega_L$ 的单频信号并驱动马赫-增德尔调制器产生本振调制光信号，马赫-增德尔调制器偏置在最小传输点，调制器输出抑制载波双边带的调制光信号再经过光滤波器2滤出单边带后，输出光场 $E_{LO}$ 表示为：

$$E_{LO} = c e^{j(\omega_c - \omega_L)t} \quad (14)$$

[0080] 其中， $c$ 表示本振光的幅度。信号光和本振光进入双偏振90度光混频器进行混频，双偏振90度光混频器的功能是使本振光产生 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相移然后和信号光耦合，在两个正交偏振态上分别得到两个同相输出 ( $I_{1x,y} \propto \hat{e}_{x,y} E_{RFx,y} + \hat{e}_{x,y} E_{LO}$ ,  $I_{2x,y} \propto \hat{e}_{x,y} E_{RFx,y} - \hat{e}_{x,y} E_{LO}$ ) 和两个正交输出 ( $Q_{1x,y} \propto \hat{e}_{x,y} E_{RFx,y} + j \hat{e}_{x,y} E_{LO}$ ,  $Q_{2x,y} \propto \hat{e}_{x,y} E_{RFx,y} - j \hat{e}_{x,y} E_{LO}$ )。在 $I_{1x}$ 、 $Q_{1x}$ 、 $I_{2y}$ 和 $Q_{2y}$ 四个输出端口中，两个同相输出 ( $I_{1x} \propto E_{RFx} + E_{LO}$ 和 $I_{2y} \propto E_{RFy} - E_{LO}$ ) 以及两个正交输出 ( $Q_{1x} \propto E_{RFx} + j E_{LO}$ 和 $Q_{2y} \propto E_{RFy} - j E_{LO}$ ) 的本振信号之间均被引入了 $180^\circ$ 的相位差。四路光信号经过光电探测器进行光电转换，得到四路电流表示为：

$$\begin{aligned}
i_{I_{1x}} &\propto \mathfrak{R}_{I_{1x}} \eta_{I_{1x}} \left\{ \begin{aligned} &a_s c \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_{I_{1x}}] + a_m c \cos[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_{I_{1x}}] \\ &+ a_i c \cos[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_i + \phi_{I_{1x}})] \end{aligned} \right\} \\
[0081] \quad i_{Q_{1x}} &\propto \mathfrak{R}_{Q_{1x}} \eta_{Q_{1x}} \left\{ \begin{aligned} &-a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_{Q_{1x}}] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_{Q_{1x}}] \\ &-a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_i + \phi_{Q_{1x}})] \end{aligned} \right\} \\
i_{I_{2y}} &\propto -\mathfrak{R}_{I_{2y}} \eta_{I_{2y}} bc \cos[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_{I_{2y}})] \\
i_{Q_{2y}} &\propto \mathfrak{R}_{Q_{2y}} \eta_{Q_{2y}} bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_{Q_{2y}})]
\end{aligned} \tag{15}$$

[0082] 其中 $\eta_{I_{1x}, Q_{1x}, I_{2y}, Q_{2y}}$ 和 $\phi_{I_{1x}, Q_{1x}, I_{2y}, Q_{2y}}$ 表示每路相应的可调光衰减器带来的光功率衰减系数以及可调光延时线带来的相位差,  $\mathfrak{R}_{I_{1x}, Q_{1x}, I_{2y}, Q_{2y}}$ 则表示相应光电探测器的响应度。用两个 $90^\circ$ 电桥分别将 $i_{I_{1x}}$ 和 $i_{Q_{1x}}$ 以及 $i_{I_{2y}}$ 和 $i_{Q_{2y}}$ 耦合到一起形成 $i_1$ 和 $i_2$ ,并通过微波耦合器2最终合为一路,输出电流 $i$ 表示为:

$$\begin{aligned}
i &= i_1 + i_2 \\
&= \left( i_{I_{1x}} \angle \frac{\pi}{2} + i_{Q_{1x}} \angle 0 \right) + \left( i_{I_{2y}} \angle \frac{\pi}{2} + i_{Q_{2y}} \angle 0 \right) \\
[0083] \quad &= -\mathfrak{R}_{I_{1x}} \eta_{I_{1x}} \left\{ \begin{aligned} &a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_{I_{1x}}] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_{I_{1x}}] \\ &+ a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_i + \phi_{I_{1x}})] \end{aligned} \right\} \\
&+ \mathfrak{R}_{Q_{1x}} \eta_{Q_{1x}} \left\{ \begin{aligned} &-a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_{Q_{1x}}] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_{Q_{1x}}] \\ &-a_i c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_i + \phi_{Q_{1x}})] \end{aligned} \right\} \\
&+ \mathfrak{R}_{I_{2y}} \eta_{I_{2y}} bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_{I_{2y}})] \\
&+ \mathfrak{R}_{Q_{2y}} \eta_{Q_{2y}} bc \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_{Q_{2y}})]
\end{aligned} \tag{16}$$

[0084] 通过调节四路可调光衰减器和可调光延时线使得 $\phi_{I_{1x}} = \phi_{Q_{1x}}$ 、 $\phi_{I_{2y}} = \phi_{Q_{2y}}$ 、 $\phi_{I_{1x}} -$

$\phi_{I_{2y}} = \phi_r - \phi_i$ 、 $\frac{\eta_{I_{1x}}}{\eta_{Q_{1x}}} = \frac{\mathfrak{R}_{Q_{1x}}}{\mathfrak{R}_{I_{1x}}}$ 、 $\frac{\eta_{I_{2y}}}{\eta_{Q_{2y}}} = \frac{\mathfrak{R}_{Q_{2y}}}{\mathfrak{R}_{I_{2y}}}$ 、 $\frac{\eta_{I_{1x}}}{\eta_{I_{2y}}} = \frac{b\mathfrak{R}_{I_{2y}}}{a_i \mathfrak{R}_{I_{1x}}}$ 成立,镜频成分 $|\omega_1 - \omega_m|$ 和自干扰成分 $|\omega_r - \omega_L|$ 均得到抑制,只有需要的中频成分 $|\omega_s - \omega_L|$ 保留下来。此时,输出电流表示为:

$$[0085] \quad i \propto i_1 + i_2 \propto -2\mathfrak{R}_{I_{1x}} \eta_{I_{1x}} a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_{I_{1x}}] \tag{17}$$

[0086] 如图2所示搭建实验平台。激光器(Teraxion NLL)产生波长为1550.52nm,功率为16dBm的光载波。任意信号发生器(Keysight M8195A)产生载频为10GHz、带宽为100MHz、功率为0dBm的线性调频信号(用于模拟发射机发出的信号),通过微波功分器后一路送入DP-QPSK调制器(Fujitsu FTM7977)的Y-QPSK调制器,另一路与第一微波源产生的频率为8GHz、功率为0dBm的单频信号(用于模拟从外界接收的有用信号)通过微波耦合器1耦合后送入X-QPSK调制器。X-QPSK调制器和Y-QPSK调制器均通过调节偏置电压设定在最小传输点,光滤波器1采用Yenista XTM-50过滤出-1阶边带,光放大器1采用Amonics AEDFA-35-B-FA使得输出的信号光功率为5dBm。微波源2(Anapico APSIN20G)产生的频率为9GHz、功率为20dBm的单频信号(用于模拟本振信号)送入马赫-增德尔调制器(Fujitsu FTM7938)对光载波进行调制,调节偏置电压使其产生抑制载波双边带,光滤波器2采用Yenista XTM-50过滤出-1阶边带,光放大器2采用Amonics AEDFA-35-B-FA使得输出的本振光功率为5dBm。双偏振90度光混频器后选择 $I_{1x}$ 、 $Q_{1x}$ 、 $I_{2y}$ 和 $Q_{2y}$ 四个输出端口作为输出,调节偏振控制器1和偏振控制器

2并通过光谱仪 (Apex AP2040D) 实时观察将接收信号和对消信号分别从 $I_{1x}/Q_{1x}$ 和 $I_{2y}/Q_{2y}$ 解复用。四路分别依次连接可调光延时线 (General Photonics)、可调光衰减器 (四川梓冠) 和光电探测器 (GD45216S)。微调可调光衰减器和可调光延时线使得各路延时和幅度相匹配。电桥1和电桥2分别用来耦合两路电流,微波耦合器2输出系统的信号幅频响应由频谱仪 (Agilent N9010A) 测得。

[0087] 为了得到系统的对消性能,首先断开 $I_{2y}$ 和 $Q_{2y}$ 两路,图4中的(a)为对消前的幅频响应曲线。随后将 $I_{2y}$ 和 $Q_{2y}$ 两路连接上,(b)为对消后的幅频响应曲线,可以看出,100MHz带宽对应的对消深度有35dB,并且系统对消前后对有用信号几乎没有造成影响。接着,用第一微波源产生频率为6GHz、功率为0dBm的单频信号(用于模拟镜频信号),(c)的实线为镜频输入的结果,可以看出镜频得到有效抑制已位于残余干扰信号的下方。为了进一步得到准确的镜频抑制比,将任意信号发生器的输出断开,此时(c)的虚线为镜频的结果,可以看出,镜频几乎跟噪底处于同一水平,单频信号的镜频抑制比达到了67dB。

[0088] 实施例二:

[0089] 如图5所示,本实施例中的射频信号接收装置包括:锁模激光器,光分束器、马赫-增德尔调制器1、马赫-增德尔调制器2、光滤波器、可编程光处理器(waveshaper)、偏振分束器、光耦合器、可调光延时线阵列、可调光衰减器阵列、光电探测器阵列、四相位耦合器。

[0090] 将角频率为 $\omega_L$ 的本振信号注入到锁模激光器中,产生间隔为 $\omega_L$ 的光学频率梳。输出光通过光分束器分成两路,其中一路经过光滤波器将频率为 $\omega_c$ 的分量选出,另一路送入waveshaper。将接收信号送入马赫-增德尔调制器1的射频输入口,对频率为 $\omega_c$ 光载波进行调制形成光载接收信号;参考信号送入马赫-增德尔调制器2,同样对频率为 $\omega_c$ 的光载波进行调制形成光载参考信号,两个马赫-增德尔调制器均采用抑制载波双边带的调制方式。假设接收信号包含从外界接收到的有用信号 $s(t) = V_s \sin(\omega_s t)$ 、镜频信号 $m(t) = V_m \sin(\omega_m t)$ 以及自干扰信号 $i(t) = V_i \sin(\omega_r t)$ ,参考信号 $r(t) = V_r \sin(\omega_r t)$ ,那么光载接收信号 $E_{s1}$ 、光载参考信号 $E_{s2}$ 与光载本振信号 $E_{LO}$ 分别表示为:

$$[0091] \quad E_{s1} = a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_i]} + a_s e^{j(\omega_c + \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c + \omega_m)t} + a_i e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_i]} \quad (18)$$

$$[0092] \quad E_{s2} = b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} + b e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_r]} \quad (19)$$

$$[0093] \quad E_{LO} = c e^{j(\omega_c - \omega_L)t} \quad (20)$$

[0094] 其中, $a_s$ 、 $a_m$ 、 $a_i$ 、 $b$ 和 $c$ 表示相应频谱成分的幅度, $\phi_i$ 和 $\phi_s$ 表示由初始相位和信道传输带来的相位差。

[0095] 接着光载接收信号和光载参考信号各自通过一个光分束器进而分成四路信号光;waveshaper将频率为 $\omega_c - \omega_L$ 的分量选出形成光载本振信号,并通过编译将四路输出本振光分别产生 $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$ 的相移。四路信号光与四路本振光分别通过光耦合器两两耦合成一路,输出表示为:

$$\begin{aligned}
e_1 &\propto a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_r e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_1]} + a_s e^{j(\omega_c + \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c + \omega_m)t} + a_r e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_1]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t} \\
e_2 &\propto a_s e^{j(\omega_c - \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c - \omega_m)t} + a_r e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_1]} + a_s e^{j(\omega_c + \omega_s)t} + a_m e^{j(\omega_c + \omega_m)t} + a_r e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_1]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \frac{\pi}{2}} \\
[0096] \quad e_3 &\propto b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} + b e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_r]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \pi} \\
e_4 &\propto b e^{j[(\omega_c - \omega_r)t + \phi_r]} + b e^{j[(\omega_c + \omega_r)t + \phi_r]} + c e^{j(\omega_c - \omega_L)t + \frac{3\pi}{2}}
\end{aligned} \tag{21}$$

[0097] 随后进入可调光延时线阵列和可调光衰减器阵列构成的幅度延时补偿模块。四路光信号经过光电探测器进行光电转换,得到四路电流表示为:

$$\begin{aligned}
i_1 &\propto \Re_1 \eta_1 \left\{ a_s c \cos[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_1] + a_m c \cos[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_1] \right\} \\
[0098] \quad i_2 &\propto \Re_2 \eta_2 \left\{ -a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_2] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_2] \right\} \\
i_3 &\propto -\Re_3 \eta_3 b c \cos[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_3)] \\
i_4 &\propto \Re_4 \eta_4 b c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_4)]
\end{aligned} \tag{22}$$

[0099] 其中,  $\eta_{1,2,3,4}$  和  $\phi_{1,2,3,4}$  表示每路相应的可调光衰减器带来的光功率衰减系数以及可调光延时线带来的相位差,  $\Re_{1,2,3,4}$  则表示相应光电探测器的响应度。四相位耦合器分别对四路电信号进行  $\pi/2$ 、0、 $\pi/2$ 、0 的相移后耦合到一起,输出电流表示为:

$$\begin{aligned}
i &= i_1 \angle \frac{\pi}{2} + i_2 \angle 0 + i_3 \angle \frac{\pi}{2} + i_4 \angle 0 \\
&= -\Re_1 \eta_1 \left\{ a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_1] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_1] \right\} \\
[0100] \quad &+ \Re_2 \eta_2 \left\{ -a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_2] + a_m c \sin[(\omega_L - \omega_m)t + \phi_2] \right\} \\
&+ \Re_3 \eta_3 b c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_3)] \\
&+ \Re_4 \eta_4 b c \sin[(\omega_r - \omega_L)t + (\phi_r + \phi_4)]
\end{aligned} \tag{23}$$

[0101] 通过调节四路可调光衰减器和可调光延时线使得  $\phi_1 = \phi_2$ 、 $\phi_3 = \phi_4$ 、 $\phi_1 - \phi_3 =$

$\phi_r - \phi_i$ 、 $\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Re_2}{\Re_1}$ 、 $\frac{\eta_3}{\eta_4} = \frac{\Re_4}{\Re_3}$ 、 $\frac{\eta_1}{\eta_3} = \frac{b \Re_3}{a_r \Re_1}$  成立,镜频成分  $|\omega_1 - \omega_m|$  和自干扰成分  $|\omega_r - \omega_L|$

均得到抑制,只有需要的中频成分  $|\omega_s - \omega_L|$  保留下来,镜频抑制混频和射频对消同时得到实现。此时,输出电流表示为:

$$[0102] \quad i \propto i_1 + i_2 \propto -2 \Re_1 \eta_1 a_s c \sin[(\omega_s - \omega_L)t + \phi_1] \tag{24}$$

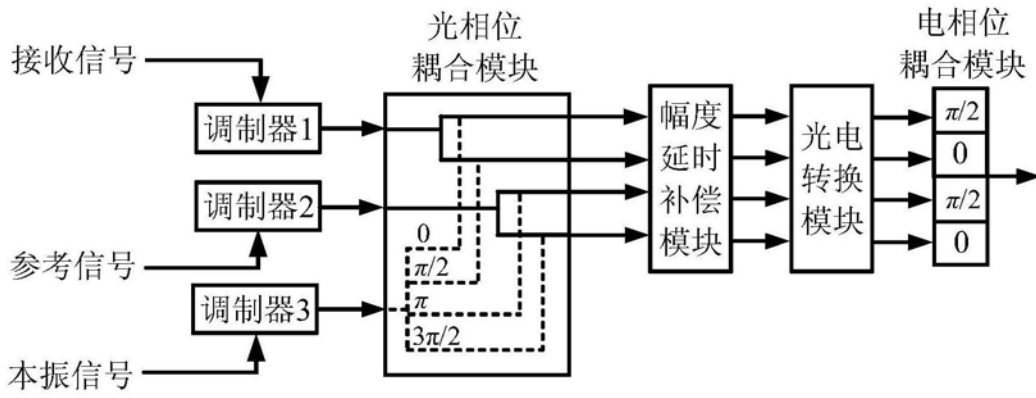


图1

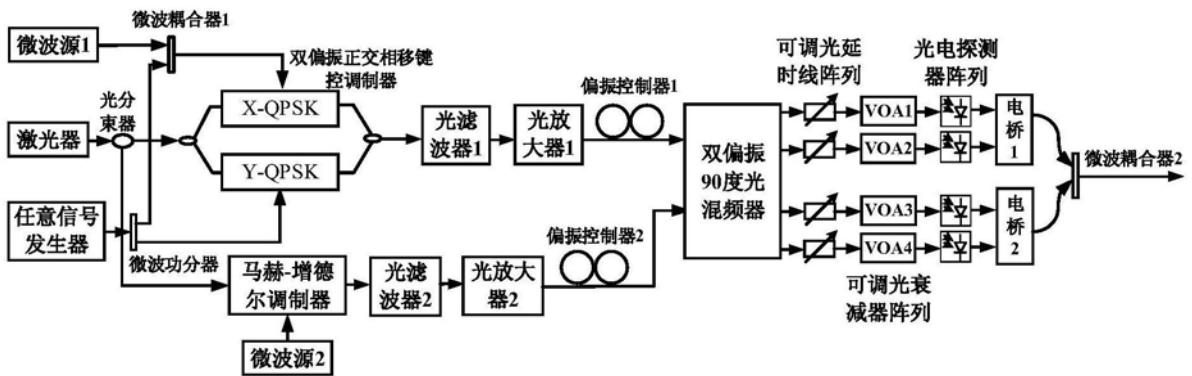


图2

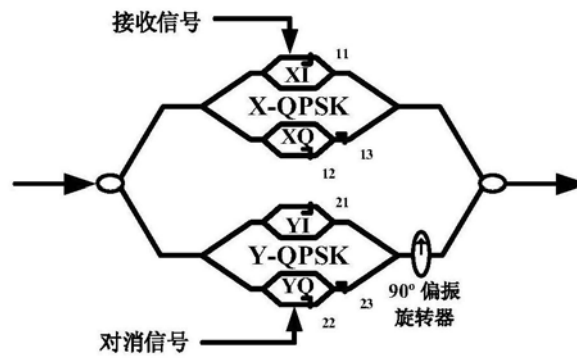


图3

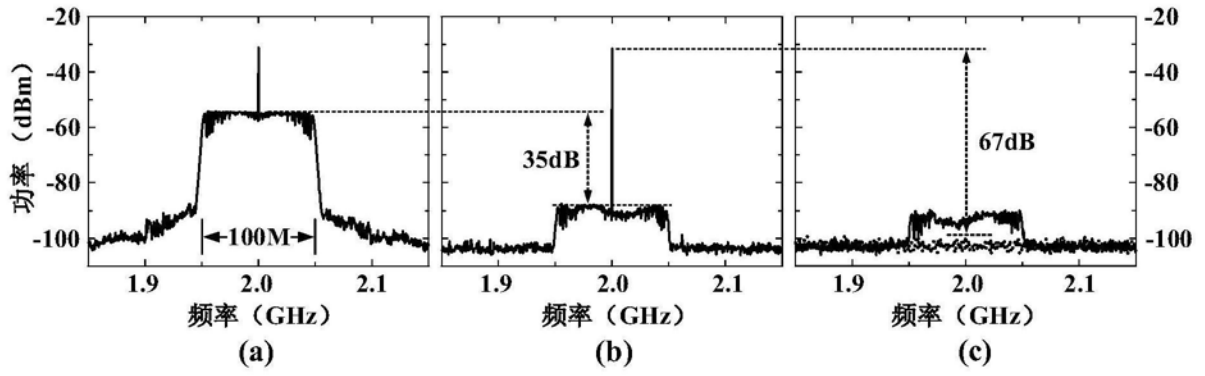


图4

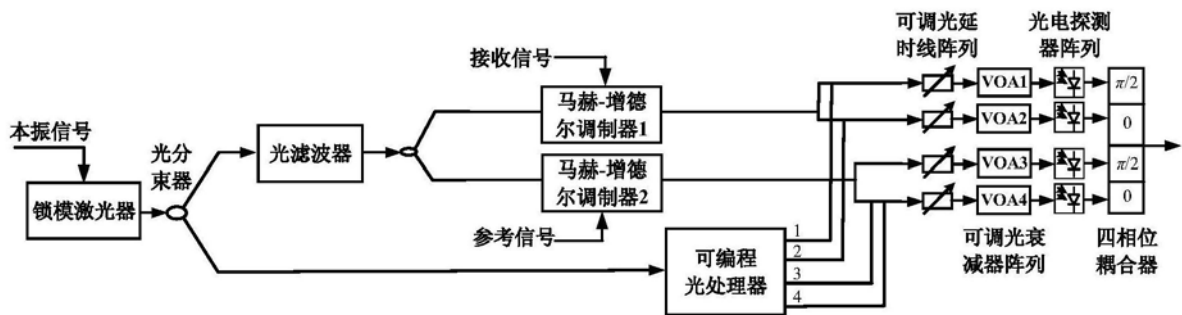


图5