

一种基于射频光传输技术的同址干扰抑制方法

朱宏韬,符青松,杨万里

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:在无线信道系统中,同址干扰会导致接收机的接收灵敏度下降。基于微波光子技术,根据强度调制直接检测(IMDD)光链路的非线性特性,提出了一种射频同址干扰抑制方法。首先,建立了IMDD光链路输出功率的数学模型,并用数学方程描述干扰信号和有用信号的输出功率大小,通过令干扰信号输出为零时求得方程的解,获得干扰抑制的条件。然后,通过Matlab定量计算得到链路中干扰信号和有用信号的输出功率随输入干扰信号功率变化的曲线,得出干扰抑制的功率输出点,并分析了半波电压大小对干扰抑制的影响。实验结果表明:该方法的抑制比可达到-64.5 dB,且有用信号的输出功率只损失6.4 dBm,具有优异的干扰信号抑制能力。

关键词:射频光传输;同址干扰;强度调制直接检测;非线性;马赫曾德尔调制器;半波电压

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0073-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Co-site interference suppression method based on radio frequency optical transmission technology

ZHU Hongtao, FU Qingsong, YANG Wanli

(The 34th Research Institute of CETC, GuiLin Guangxi 541004, China)

Abstract: In wireless channel system, co-site interference will cause the receiver's reception sensitivity to decline. Based on microwave photonics technology, according to the nonlinear characteristics of intensity modulated direct detection (IMDD) optical link, a radio frequency co-site interference suppression method is proposed. Firstly, the mathematical model of the output power of IMDD optical link is established, and the output power of interference signal and useful signal is described by mathematical equation. By making the output of interference signal zero, the solution of the equation is obtained, and the conditions of interference suppression are obtained. Then, through Matlab quantitative calculation, the curve of the output power of interference signals and useful signals in the link changing with the input interference signal power is obtained, the power output point of interference suppression is obtained, and the influence of half wave voltage on interference suppression is analyzed. The experimental results show that the suppression ratio of this method can reach -64.5 dB, and the output power of the useful signal is only lost by 6.4 dBm, which has excellent interference signal suppression ability.

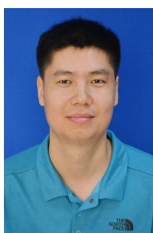
Key words: radio frequency optical transmission, co-site interference, intensity modulated direct detection, nonlinearity, Mach-Zehnder modulator, half wave voltage

0 引言

同址干扰是指无用信号与有用信号的载频相同,发射信号通过接收天线对接收同频有用信号的接收

收稿日期:2022-01-25。

作者简介:朱宏韬(1977—),男,河南驻马店人,本科,中国电子科技集团公司第三十研究所高级工程师,主要研究方向是光纤通信。参与中国电科集团天地一体化项目宽频带微波光设备和二代卫星通信地面站光端机项目研制,获得过中国电科集团三等奖2次。



机造成的干扰。同址干扰问题的存在对接收机的动态范围和灵敏度提出了较大的挑战^[1]。无线通信系统中,同址干扰抑制技术一直是研究的热点,尤其在军事平台中,当天线密集分布时,同址干扰的抑制成为一个急需解决的难题。最初,同址干扰的消除是从模拟电路或者数字电路的角度出发的,但这种传统的电信号处理方法^[2]受电器件带宽和处理速率的限制。

近年来,微波光子的发展为抑制同址干扰提供了新的思路。微波光子是一门交叉学科,研究内容包括

朱宏韬,符青松,杨万里:一种基于射频光传输技术的同址干扰抑制方法

射频光传输、微波信号产生和微波信号光处理等。其中,射频光传输技术通过电/光变换将射频信号加载到光载波上,并通过光纤进行传输,最后实现射频信号解调。该技术具有诸多优于传统电传输链路的性能,如低损耗、大带宽、高速率以及抗电磁干扰能力强等^[3-5]。这些性能为射频同址干扰在电域处理较为复杂且带宽受限的解决方案上提供了思路。因此,本文提出一种基于射频光传输技术的同址干扰抑制方法。

1 基于射频光传输技术的同址干扰抑制方法

1.1 射频传输原理

马赫-曾德尔调制器(MZM)的强度调制直接检测(IMDD)光链路由激光器、MZM、传输光纤以及光电探测器构成,链路结构如图1所示。激光器发射稳定的光信号进入MZM,同时射频信号由MZM输入,加载到光载波上,调制后的光信号通过光纤传输到达光电探测器,然后光电解调输出射频信号。

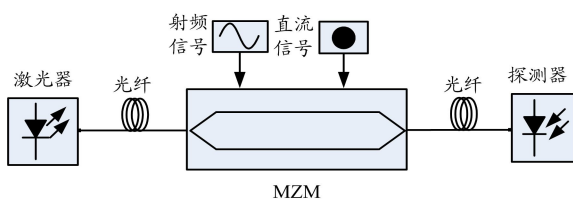
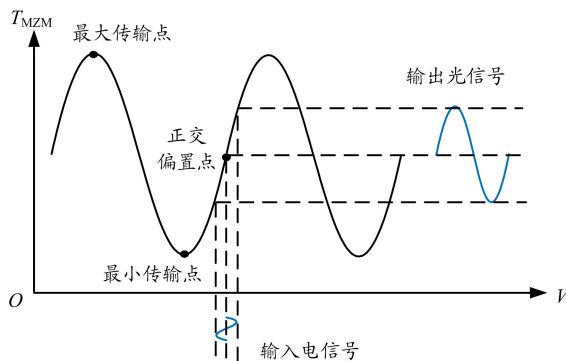


图1 IMDD光链路结构

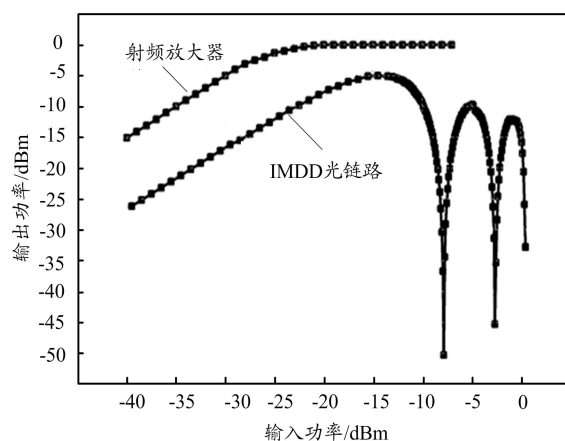
IMDD光链路中,MZM是实现电/光变换的重要器件。图2(a)为MZM传输系数 T_{MZM} 随MZM外加偏置电压 V 变化的曲线图,可以看出MZM的传输系数呈现正弦特性。通常MZM有3个主要的工作点,分别是最大传输点、正交偏置点和最小传输点。当MZM工作在正交偏置点时,对射频信号的传输接近线性,整个IMDD光链路功率传输曲线如图2(b)所示。可以看出,随着输入射频信号功率增加,射频放大器和IMDD光链路的输出射频功率都是先增长后压缩,两者间最主要的区别在于当功率继续增大时,射频放大器的输出功率一直保持压缩状态,而IMDD光链路输出射频功率则会随着输入射频功率的增加呈现周期性波峰波谷的传输特性。

1.2 抑制方法

根据IMDD光链路的传输特性,本文通过增加输入射频信号的功率来抑制干扰信号。随着输入信号功率的增加,必将至少找到一个输入功率点,使得射频信号中的干扰信号的输出功率最小(传输曲线的波谷



(a) MZM传输系数随偏置电压变化的曲线



(b) 射频放大器与IMDD光链路输出功率随输入功率的变化曲线

图2 2种情况的变化周期曲线

位置),而此时有用信号输出功率最大。

为了计算抑制同址干扰的输入功率点,本文使用双音信号对链路进行分析。假设双音信号 $V(t) = V_D + V_g \sin(\omega_g t) + V_s \sin(\omega_s t)$,其中, V_D 为直流信号, $V_g \sin(\omega_g t)$ 为有用信号, $V_s \sin(\omega_s t)$ 为干扰信号,经过MZM后输出的光信号光场^[6]如式(1)所示。

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2} E_0 e^{j\omega_0 t} \{ 1 + e^{j[m_g \sin(\omega_g t) + m_s \sin(\omega_s t) + j\theta]} \} \quad (1)$$

其中, E_0 是调制器输出光信号光场强度, ω_0 、 ω_g 和 ω_s 分别是光载波角频率、有用信号角频率和干扰信号角频率。有用信号和干扰信号的调制深度分别为 $m_g = \pi(V_g/V_\pi)$ 和 $m_s = \pi(V_s/V_\pi)$,其中 V_π 、 V_g 和 V_s 分别为MZM的半波电压、有用信号电压幅度和干扰信号电压幅度, θ 为调制器偏置相位,经过光电探测器进行平方率检波后得到的电流为

$$I_{\text{out}}(t) = \mathcal{R} \{ E_{\text{out}} | E_{\text{out}} |^* \} = \frac{1}{4} \mathcal{R} E_0^2 \left\{ 2 + e^{j[m_g \sin(\omega_g t) + m_s \sin(\omega_s t) + j\theta]} + e^{-j[m_g \sin(\omega_g t) + m_s \sin(\omega_s t) - j\theta]} \right\} \quad (2)$$

其中, $\mathcal{R}$ 为光电二极管的响应度。为了解调出的射频信号进行频谱分析, 本文利用雅可比-安格尔恒等式将信号电流分解为傅里叶级数之和的形式, 如式(3)所示。

$$I_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2} E_0^2 \mathcal{R} + \frac{1}{4} \mathcal{R} E_0^2 \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \times \right. \\ \left. \left[J_n(m_g) J_p(m_s) e^{j(n\omega_g + p\omega_s)t + j\theta} + \right. \right. \\ \left. \left. J_n(m_g) J_p(m_s) e^{j(n\omega_g + p\omega_s)t + (n+p)\pi - j\theta} \right] \right\} \quad (3)$$

其中, J_n 和 J_p 分别为 n 阶和 p 阶贝塞尔函数, 可知干扰信号和有用信号的基波电流分别为

$$I_s = \mathcal{R} E_0^2 \sin \theta J_0(m_g) J_1(m_s) \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

$$I_g = \mathcal{R} E_0^2 \sin \theta J_1(m_g) J_0(m_s) \sin(\omega_g t) \quad (5)$$

其中, J_1 和 J_0 分别为 1 阶和 0 阶贝塞尔函数, 光场强 E_0 和光功率 P_0 之间的关系为 $E_0 = \sqrt{2P_0/A} (\mu_r \mu_0 / \epsilon_r \epsilon_0)^{1/4}$, 光纤折射率 n 和光纤相对介电常数 ϵ_r 关系为 $n^2 = \epsilon_r$, $n^2 = \epsilon_r$ 。其中, μ_r 为光纤相对磁导率, μ_0 为真空磁导率, ϵ_0 为真空介电常数, A 为传输光信号的光波导的有效横截面积。

当调制器工作在正交偏置点时, $\theta = \pi/2$, 可将式(4)和式(5)写成

$$I_s = 2\mathcal{R} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{P_0}{nA} J_0(m_g) J_1(m_s) \sin(\omega_s t) \quad (6)$$

$$I_g = 2\mathcal{R} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{P_0}{nA} J_1(m_g) J_0(m_s) \sin(\omega_g t) \quad (7)$$

由欧姆定律功率计算公式 $P = \frac{1}{2} I^2 R$ (其中, R 为输出负载阻抗) 可得, 干扰信号和有用信号的功率分别为

$$P_s = 2\mathcal{R}^2 \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{P_0}{nA} \right)^2 J_0(m_g)^2 J_1(m_s)^2 R \quad (8)$$

$$P_g = 2\mathcal{R}^2 \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{P_0}{nA} \right)^2 J_1(m_g)^2 J_0(m_s)^2 R \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知, 有用信号和干扰信号的输出功率都会受到干扰信号输入功率的影响, 导致有用信号输出功率降低, 且以 $J_0(m_g)^2$ 为系数衰减。若使干扰信号输出功率为零, 即 $J_1(m_g) = 0$, 便可实现对干扰信号的输出抑制。

由此可以计算出输出干扰信号被抑制时所需干扰信号输入功率大小为

$$P_{\text{null}} = \frac{1}{2R} (V_{\pi} m_s / \pi)^2 \quad (10)$$

2 仿真计算及分析

本文采用 Matlab 对链路进行仿真, 验证所提方法的可行性。仿真中, 调制器半波电压为 1 V, 输入光功率为 0 dBm, 输入有用信号频率为 3 GHz, 干扰信号频率为 3.01 GHz。

干扰信号和有用信号的输出功率随干扰信号输入功率的变化情况如图 3 所示。可以看出, 随着干扰信号输入功率逐渐增加, 干扰信号的输出功率曲线呈现先线性增加、后压缩, 接着表现为周期性波峰波谷传输的特性; 而有用信号输出功率曲线先略微减小, 后表现为周期性波峰波谷传输的特性, 但各个波峰处的功率逐渐递减。干扰信号的输出功率曲线的波峰和波谷传输刚好和有用信号输出功率曲线的波谷和波峰互补, 因此本文选用干扰信号输出功率曲线的第一个波谷点为同址干扰抑制的最佳工作点。此时, 干扰信号输入功率为 11.7 dBm, 干扰信号输出功率曲线到达第一个“零”输出点, 输出功率为 -90.9 dBm; 有用信号输出功率为 -26.4 dBm, 相对于最大输出 -20 dBm, 降低约 6.4 dBm, 但实现了干扰信号抑制, 干扰抑制比为 -64.5 dB。

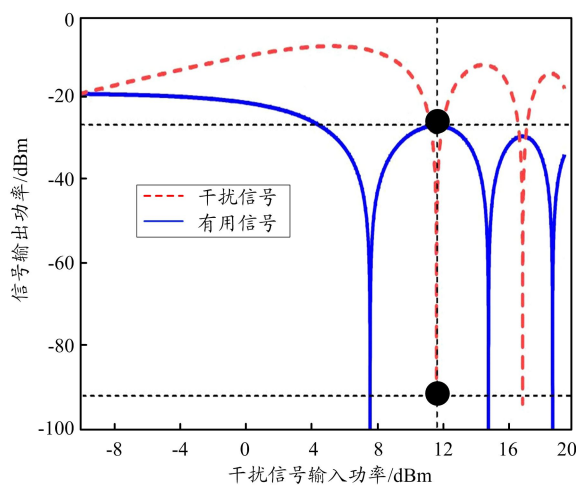


图 3 2 种信号输出功率随干扰信号输入功率变化曲线

为了研究调制器半波电压对同址干扰抑制性能的影响, 本文对比了不同半波电压下功率传输的变化曲线如图 4 所示。可以看出, 当半波电压增大时, 输出干扰信号功率曲线的第一个零点逐渐右移, 即要达到干扰信号抑制所需要的条件, 需使得干扰信号输入功率增加。实验结果表明: 采用低半波电压的调制器可以降低干扰信号抑制所需要的干扰信号输入功率, 故采用低半波电压的调制器更利于干扰信号的抑制。

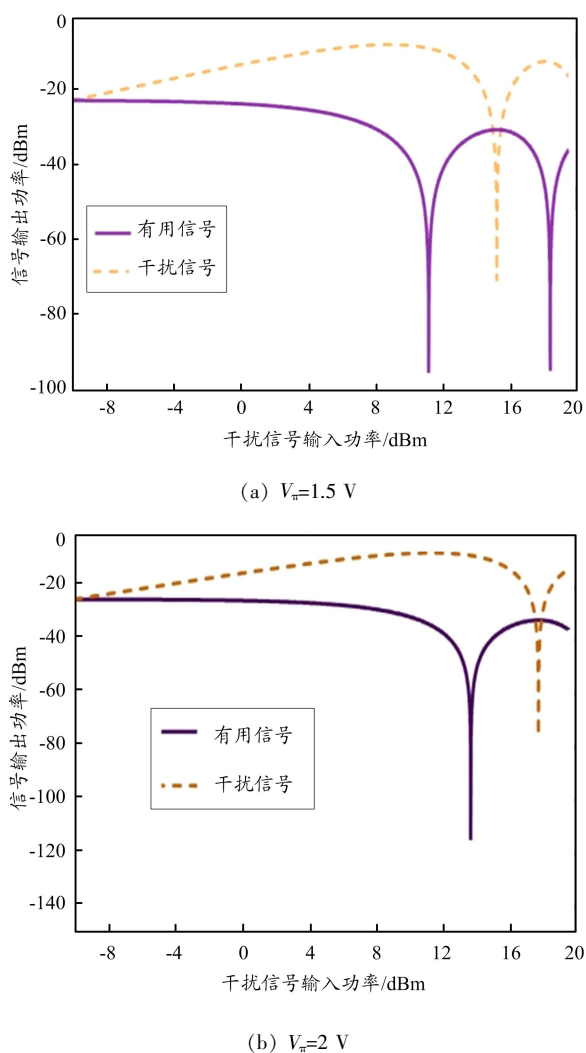


图4 采用不同半波电压的调制器,
2种链路输出信号随干扰信号输入功率变化曲线

3 结束语

本文提出了一种基于射频光传输技术的同址干扰抑制方法,利用 IMDD 光链路特殊的功率传输特性,通过增加干扰信号输入功率的大小,实现对输出干扰信号的抑制。本文提出的同址干扰抑制技术,以牺牲 6.4 dBm 有用信号功率为代价,实现了干扰信号抑制比为-64.5 dB,具有优异的干扰信号抑制能力。

但是,本文所提出的同址干扰抑制会产生相当量的三阶交调分量,这需要通过一些非线性抑制方法去进一步解决。关于非线性抑制的方法有很多,例如采用串联或者并联 MZM 调制结构、链路预失真电路和链路后补失真等。因此,下一步的研究可以结合非线性抑制技术,如级联多级调制器去消除链路三阶失真,进一步地提高链路的性能。

参考文献:

- [1] 赵波,全厚德,崔佩璋.无线电同址干扰定量分析方法研究[J].电波科学学报,2011,5(26):15-21.
- [2] 赵波,全厚德,赵汇强.无线电通信中的同址干扰问题研究[J].计算机应用研究,2010,11(27):4242-4244.
- [3] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics [J]. Journal of Light wave Technology, 2007, 24(12): 4628-4641.
- [4] CHRLIS H C, III. Analog optical links: theory and practice [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [5] URICKVJ, MCKINNEYJ D, WILLIAMSK J. Fundamentals of microwave photonics [M]. Hoboken: Wiley, 2015.
- [6] ZHU U, ZHAO S, XUAN L, et al. Dynamic range improvement for an analog photonic link using an integrated electro-optic dual-polarization modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-10.