

激光与光电子学进展

基于现场可编程门阵列的四相相移键控相干接收技术

张柏硕, 宋延嵩*, 肖磊, 赵德春

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 相干激光通信具有高速率及传输距离长等优势,在星间激光通信中占有重要的地位。相干光通信系统充分利用了光的强度、相位、频率和偏振等信息,不仅能提高频带利用的效率,同时还能够延长光通信中继距离。四相相移键控(QPSK)调制与解调作为一种多进制调制方式,可以大幅度地提升频谱资源的利用率。本文针对相干光激光通信的QPSK调制与解调响应速率的问题,提出了一种改进型的科斯塔斯(Costas)环,实验验证了完整的QPSK调制与解调系统,同时验证了改进型Costas环的性能可行性。

关键词 相干光学与统计光学; 现场可编程门阵列; 四相相移键控; Costas环; 解调; 仿真

中图分类号 TN915

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212640

Quadrature Phase Shift Keying Coherent Receiving Technology Based on Field Programmable Gate Array

Zhang Baishuo, Song Yansong*, Xiao Lei, Zhao Dechun

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Coherent laser communication has the advantages of high speed and long-distance transmission capabilities, both of which play an important role in inter-satellite communication. A coherent optical communication system makes full use of information on light intensity, phase, frequency, and polarization, which cannot only improve the efficiency of frequency band utilization, but also extend the relay distance across which optical communication is possible. As a type of multi band modulation, quadrature phase shift keying (QPSK) modulation and demodulation can greatly improve the utilization of spectrum resources. Aiming to resolve the problem of the response rate of QPSK modulation and demodulation in coherent optical laser communication, an improved Costas loop is proposed in this study. The results of the experiment verify the entire QPSK modulation and demodulation system and the performance feasibility of the improved Costas loop.

Key words coherent optics and statistical optics; field programmable gate array; quadrature phase shift keying; Costas loop; demodulation; simulation

1 引言

光通信具有容量大、损耗低以及抗干扰能力强和保密性好等优势,被广泛应用于高速通信领域^[1-3],在星间激光通信中也有着很广阔的应用前景,已经逐渐成为国内外研究的热点^[4-5]。相干光接收技术具有很强的背景光抗干扰性、很高的探测灵敏度、同时兼容多种调制格式等优势,可作为星地链路及星间链路的主要通信方式,是现在以及未来重要信息传输的主要发展方向^[6]。

锁相环是实现相干探测的重要步骤,它要求本振光与信号光完全匹配,但是受到各种因素的影响,使得

信号光和本振光出现匹配不一致,降低其相干的效率,从而直接导致其探测灵敏度的下降^[7]。

四相相移键控(QPSK),因其具有较强的抗噪特性以及较高的频带利用率等优点从而成为应用比较广泛的调制方式之一,并被广泛应用于移动通信、数字电视和卫星通信中^[8]。将数字相干技术研究应用于各种复杂光调制技术当中,可使无线通信网络中使用的大多数调制方式也可以在光域实现。在通信高速化的现代,复杂的调制技术对高精度控制的设备也提出了新的要求^[9]。

现有的科斯塔斯(Costas)环是利用锁相环提取载波,虽然电路结构复杂,但其工作频率就是载波频率本

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-14; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2022-12-10

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金(YDZJ202101ZYTS193)

通信作者: *654799650@qq.com

身。在载波频率很高的场合下,利用工作频率较低的 Costas 环更容易去实现载波的提取。针对现有的 Costas 环结构比较复杂,本文提出了一种改进型 Costas 环,对其结构进行改进,使其结构更为简单,能拥有更快的响应速度和更短的捕获时间,并提升了频偏跟踪稳定性,同时也具有较强的抗干扰能力,提升了工作效率。

2 基本理论

2.1 Costas 光锁相环

为了实现相干光通信,需要本振光与信号光相位保持完全同步,这需要通信系统必须具备对激光频率具有控制能力。光学锁相环作为其中一种能对光波段进行闭环控制的系统,可实现两束光对相位的匹配,因此成为相干接收机中的核心技术^[10]。Costas 光锁相环是目前应用较多的一种方法,同时也是实现相干探测最重要的步骤,其原理如图 1 所示,包括压控振荡器(VCO)或数字控制振荡器(NCO)、90°混频器、环路滤波器(LF)以及低通滤波器(LPF)。

2.2 Costas 环法 QPSK 解调原理

Costas 环法是利用锁相环提取载频,不需要对接

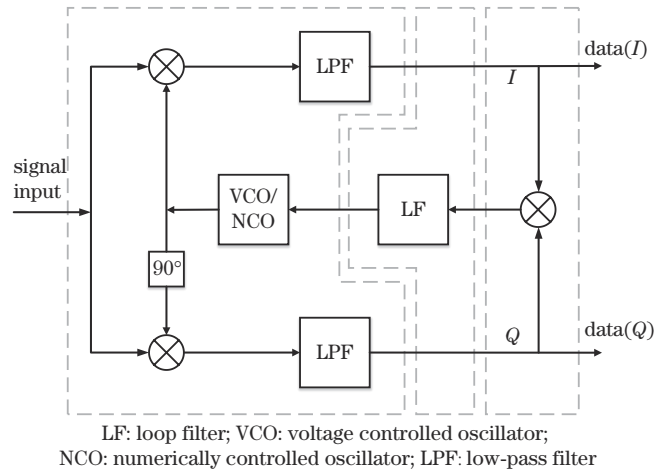


图 1 Costas 环经典结构
Fig. 1 Classic structure of Costas loop

收信号作平方运算就能得到载频输出,同时也可以推广到多进制^[11]。借助它的鉴频特性实现本振光与信号光载波同步,再从 QPSK 信号中提取载波^[12-14]。四相 Costas 环结构如图 2 所示,包括鉴相器(PD)、LPF、乘法器(multiplier)和 VCO。

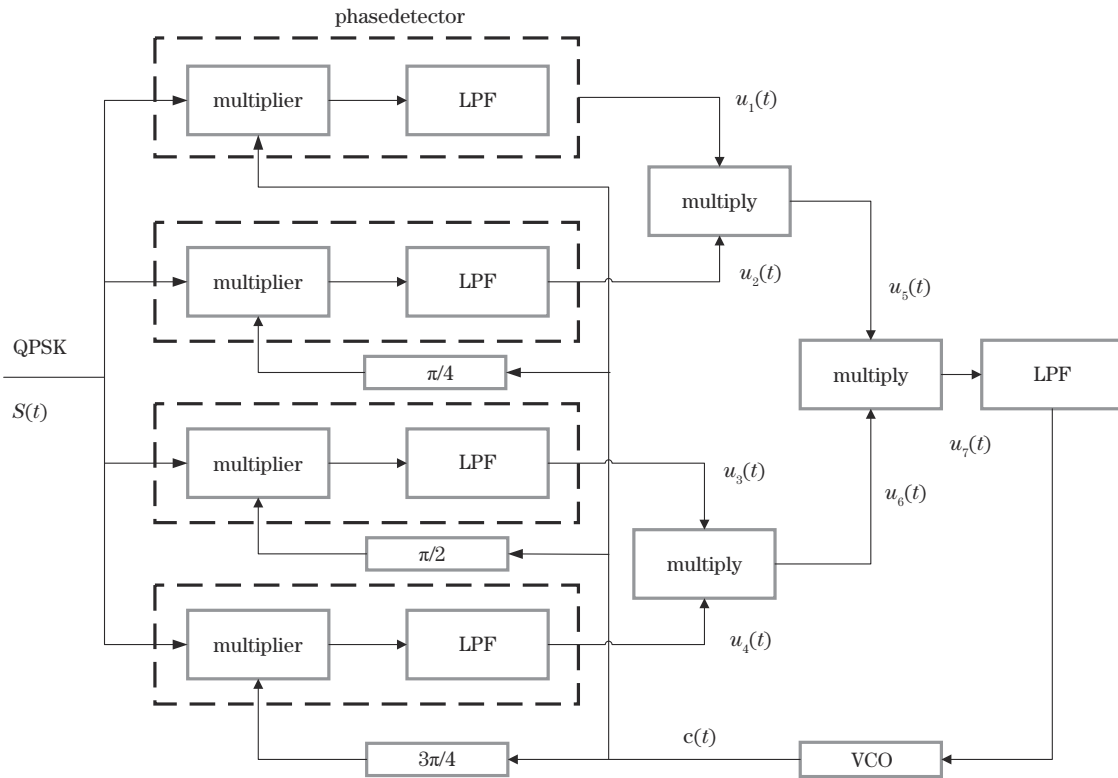


图 2 四相 Costas 环结构
Fig. 2 Structure of four phase Costas loop

设输入的 QPSK 的调制信号为

$$s(t) = I(t)\cos(\omega_c t + \varphi) - Q(t)\sin(\omega_c t + \varphi), \quad (1)$$

式中: ω_c 代表角频率; φ 代表相位; $I(t)$ 与 $Q(t)$ 为两路相互正交的信号。设 VCO 输出的本振信号为

$$V_{vco}(t) = -\sin[\omega_c t + \varphi + \chi_e(t)]. \quad (2)$$

四路乘法及滤波后输出的信号分别为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 、 $y_3(t)$ 、 $y_4(t)$, 分别对应图 2 中的 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 、 $u_3(t)$ 、 $u_4(t)$:

$$y_1(t) = -\frac{I(t)}{2} \cos[\chi_e(t) - \pi/4] + \frac{Q(t)}{2} \sin[\chi_e(t) - \pi/4], \quad (3)$$

$$y_2(t) = -\frac{I(t)}{2} \cos[\chi_e(t)] + \frac{Q(t)}{2} \sin[\chi_e(t)], \quad (4)$$

$$y_3(t) = \frac{I(t)}{2} \sin[\chi_e(t) - \pi/4] + \frac{Q(t)}{2} \cos[\chi_e(t) - \pi/4], \quad (5)$$

$$y_4(t) = -\frac{I(t)}{2} \sin[\chi_e(t)] + \frac{Q(t)}{2} \cos[\chi_e(t)]. \quad (6)$$

等效 PD 的输出为四路信号进行相乘得到:

$$V_c(t) = y_1(t)y_2(t)y_3(t)y_4(t) = \frac{I^2(t)Q^2(t)}{32} \sin[4\theta_e(t)] = \frac{1}{32} \sin[4\chi_e(t)], \quad (7)$$

式中, $\chi_e(t)$ 为相位误差, 所提取的载波相位会具有周期性多值现象, 也就是四重相位模糊度, 而在锁定的状态下, $\chi_e(t)$ 可能处于 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 附近^[15]。

信号再经过 Costas 环进行处理, 就可以得出 VCO 的输出信号以及接收的 QPSK 信号的相位差。通过控制 VCO 的输出频率, 即可使 QPSK 接收到的信号载波与 VCO 输出的信号保持完全同步, 再用 QPSK 信号进行解调, 最终得到恢复的基带信号。

2.3 改进型 Costas 环

本文对 Costas 环进行改进, 使其响应速度更快、捕

获时间更短。改进的 Costas 环结构如图 3 所示, 包括自适应环路滤波器(ALF)、平滑器(smoother)和限幅器(limiter)。

设输入 QPSK 的调制信号为

$$s(t) = I(t) \cos(\omega_c t + \varphi_0) - Q(t) \sin(\omega_c t + \varphi_0), \quad (8)$$

对于输入信号 QPSK 的调制信号 $s(t)$, 环路中两路乘法 $y_5(t), y_6(t)$ 的表达式分别为

$$y_5(t) = \frac{I(t)}{2} \cos[\chi_e(t)] - \frac{Q(t)}{2} \sin[\chi_e(t)], \quad (9)$$

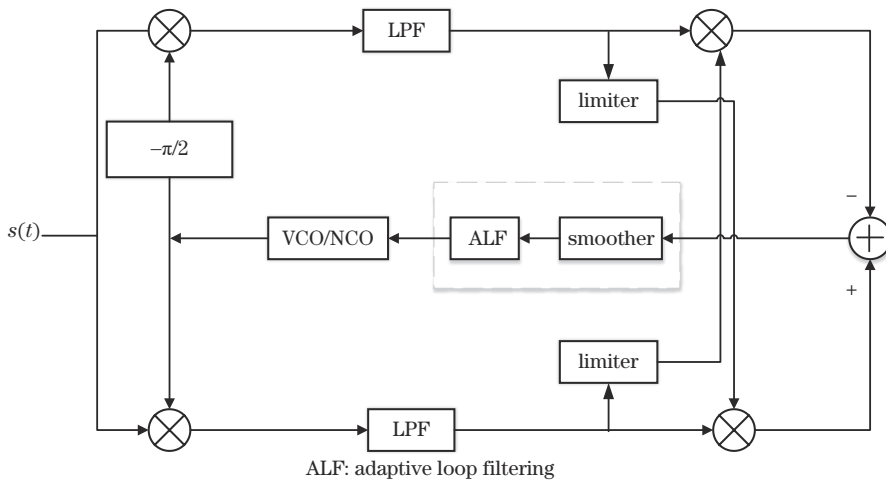
$$y_6(t) = \frac{I(t)}{2} \sin[\chi_e(t)] + \frac{Q(t)}{2} \cos[\chi_e(t)]. \quad (10)$$

环路中 VCO 输出的信号为 $V_c(t)$, 其中 VCO 的输出以及特性的表达式分别为

$$V_c(t) = y_6(t) \times \text{sgn}[y_5(t)] - y_5(t) \times \text{sgn}[y_6(t)], \quad (11)$$

$$D[\chi_e(t)] = \begin{cases} K_d \sin[\chi_e(t)], & -\pi/4 \leq \chi_e(t) \leq \pi/4 \\ -K_d \cos[\chi_e(t)], & \pi/4 \leq \chi_e(t) \leq 3\pi/4 \\ -K_d \sin[\chi_e(t)], & 3\pi/4 \leq \chi_e(t) \leq 5\pi/4 \\ K_d \cos[\chi_e(t)], & 5\pi/4 \leq \chi_e(t) \leq 7\pi/4 \end{cases} \quad (12)$$

式中, K_d 为鉴相器的增益系数。所提取的载波相位也会产生周期性多值现象, 就是四重相位模糊度, 而在锁定的状态下, $\chi_e(t)$ 仍可能处于 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 附近。



ALF: adaptive loop filtering

图 3 改进型 Costas 环的结构

Fig. 3 Structure of improved Costas loop

由于在各种锁相环中, Costas 环与判决反馈环主要构成相似。在 QPSK 调制与解调中, 两者都是通过得到相位误差信号, 从而实现载波的提取。在实现过程中, 可以将判决反馈环简化为 Costas 环。其中加入自适应滤波器, 自适应滤波器可以分为两大类: 非线性自适应滤波器和线性自适应滤波器。非线性自适应滤波器信号处理能力更强, 但计算复杂度较高。所以本文采用的是线性自适应滤波器。

自适应滤波器作为一个去相关系统, 去除或得到输入信号端和期望信号端的相关部分。自适应噪声抵消器的求解过程即为自适应滤波器理论部分, 只是输入信号和期望信号与最终输出信号的物理意义不同。自适应噪声抵消器的目的是去掉噪声源和信号源的相关部分。

改进型 Costas 环结构相比于传统 Costas 环更为简单, 同时系统中 ALF 可以有效提高系统的收敛性以及

稳定性,整个环路不需要进行乘法运算。改进型 Costas 环中一组两个输入数据的符号,一个为正,一个负,得出四路数据,相比于传统 Costas 环不仅能减少链路计算时间,还能使其拥有更快的响应速度和更短的捕获时间,有效提高系统的收敛性以及稳定性。

2.4 改进型 Costas 环仿真对比

基于 Matlab 代入新型改进系统,建立数据仿真,对同一频率但相位不同的信号进行相位跟踪。在本次仿真实验中,信号采样率为 50 MHz,输入信号频率为 500 kHz,信号长度为 600,输入信号信噪比为 25 dB。

图 4 给出了仿真结果。

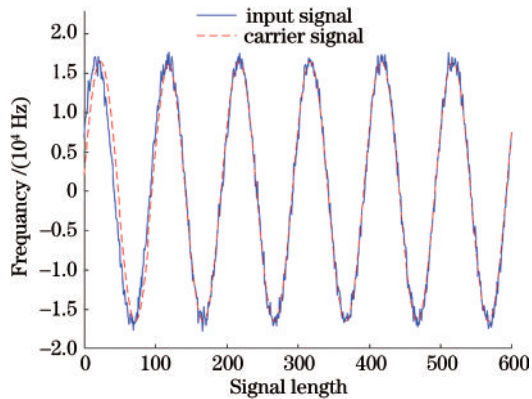


图 4 改进的 Costas 环相位跟踪图

Fig. 4 Improved Costas loop phase tracking diagram

如图 4 所示,可以粗略地看出输入信号 Costas 环在第 110 个点附近就完成了相位的锁定,同时可以看出在信噪比为 25 dB 时依然可以实现相位的跟踪锁定,证明改进的 Costas 环具有高精度的相位跟踪能力和较强的抗干扰能力。

为了验证本文提出的 Costas 环的性能,通过 Matlab 仿真,设置系统采样率为 6 MHz,载波频率为 2 MHz,多普勒频移为 2 MHz,数据长度设置为 5000,环路滤波器快系数分别为 0.01 和 0.001,慢系数分别为 0.001 和 0.000001,初始相位设计为随机相位,系统的采样率设计为 4,采用 QPSK 的调制类型。引进一个其他改进型 Costas 环进行对比,其他改进是指在 PD 以及环路滤波上进行了改进。仿真结果如图 5 所示。

仿真结果如图 5 所示,测试图中横坐标为采样点,纵坐标为频率。通过对比传统 Costas 环和其他改进型 Costas 环,传统 Costas 环捕获过程持续的时间要更长,而且捕获频率跟踪的过程中依然存在着较大的抖动。而其他改进型 Costas 环和改进型 Costas 环均具有捕获过程较快的优势,且捕获后期跟踪的过程比较稳定。但其他改进型 Costas 环在前期相比于改进型 Costas 环存在着较大的抖动,采用本文提出的新型改进型 Costas 环,不但可以获得更加稳定的频率跟踪效果,还可以获得更快的捕获速度。

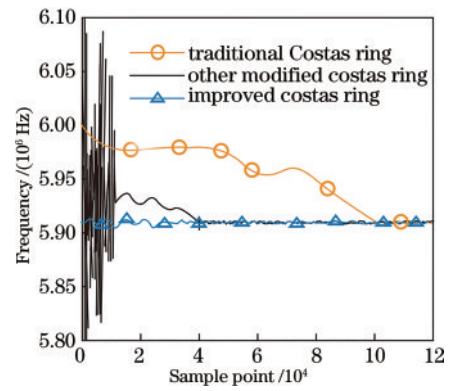


图 5 频率捕获跟踪对比放大图

Fig. 5 Comparison of enlarged diagram of frequency capture and tracking

3 数值仿真

3.1 Matlab 仿真

基于 Matlab 针对本文改进型 Costas 环系统做锁相环频率响应特性曲线以及相位响应曲线,分析锁相环的数据星座图以及锁相环锁相稳定之后的数据星座图,结果如图 6 所示。

通过图 6 可以看出,改进型 Costas 环是具有良好载波提取能力的锁相环全拼(PLL),能较好地恢复出原始信号的频率和相位,证明了该 Costas 环具有一定的实验价值。

同时,运用 Matlab 在改进型 Costas 环系统做出 I 路 Q 路的发射信息以及接收解调后的信息仿真,对比结果如图 7 所示,进而验证了该改进型 Costas 环路系统的可行性。

3.2 现场可编程逻辑门阵列(FPGA)仿真

本实验所设计的数字通信系统中的数字信号源生成的待传输的数字比特信息是由伯努利算法随机产生的。采用伯努利二进制信号生成器输出数据的种类、采样率、初始种子以及概率参数等为参数设置,因为波形被设置为随机生成,所以每次生成的波形很可能不一样,信源随机仿真图如图 8 所示,速率为 2 Gbit/s。

两条信号通信线路中比特信息是单信号极性,后信号极性由单信号极性转换为双信号极性,如图 9 所示。

低频信号信息加载到高频载波,实现将两路输入的信号进行调制处理。观察载波信号的仿真图,显示正余弦的载波信号频率高于初始信号的频率。经过极性转换的信号和另一路余弦载波信号进行相干。对相干信号进行相应的参数设置,定下采样频率、信号幅度和正余弦的类型,使得相干后的信号利用相加模块进行相加,经调制后的 QPSK 信号如图 10 所示。

如图 11 所示是接收系统中的解调模块寄存器传输级(RTL)图,其中包括 NCO 模块、有限长单位冲激

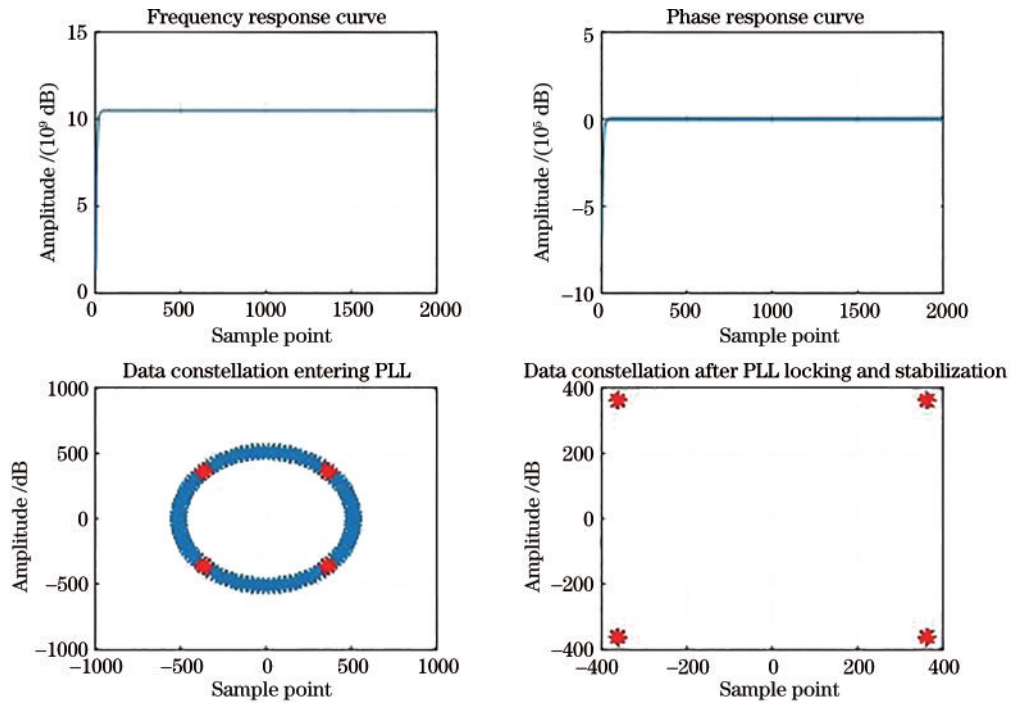


图 6 基于 Matlab 的 Costas 环性能仿真图

Fig. 6 Costas loop performance simulation diagram based on Matlab

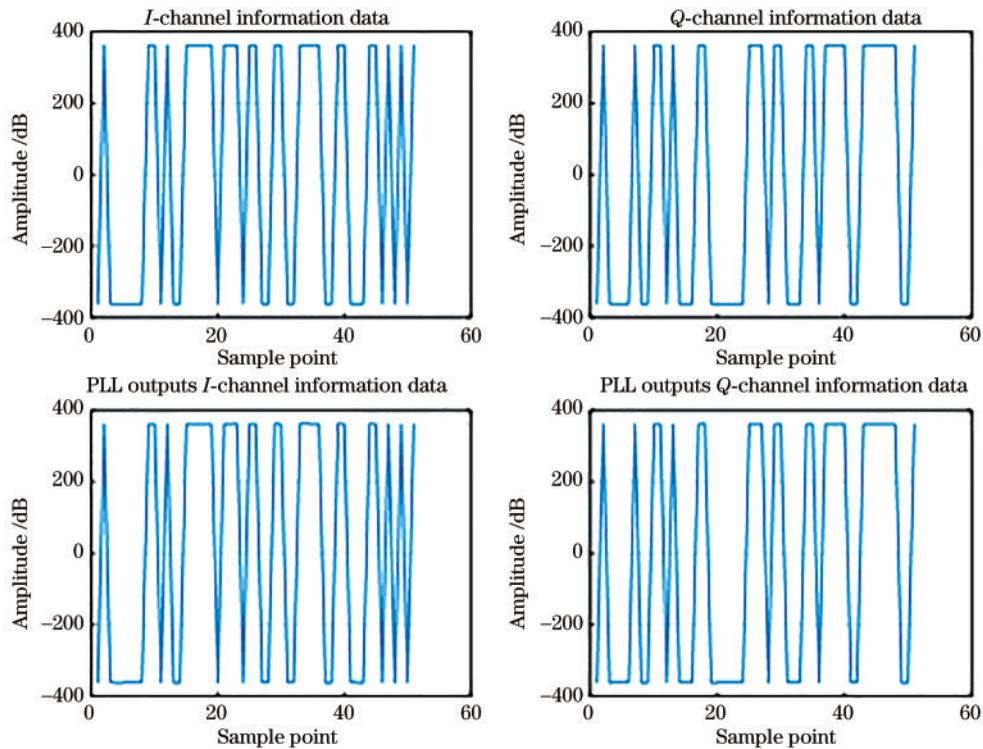


图 7 Costas 环 I 路 Q 路前后数据对比图

Fig. 7 Comparison of data before and after Costas loop I and Q

响应滤波器模块 (fir)、乘法器模块、码同步模块、Costas 环载波同步模块、判决模块和并串转换模块。

设计 LPF, 接收的 QPSK 信号经过解调后保留低频信号部分如图 12 所示。

设计 Costas 环解调低频信号输出部分如图 13 所示。

判决模块仿真图如图 14 所示。

实验设计了基于改进波同步的 Costas 环载 QPSK 调制解调系统。实验部分调试载波为 5.1 GHz, 信息速率为 2 Gbit/s, 符号速率为 1 Mbit/s。解调部分 NCO 配置的载波为 5 GHz, 同时保留 100 MHz 频偏。通过 Costas 环去除 100 MHz 频偏, 通关仿真最终得出

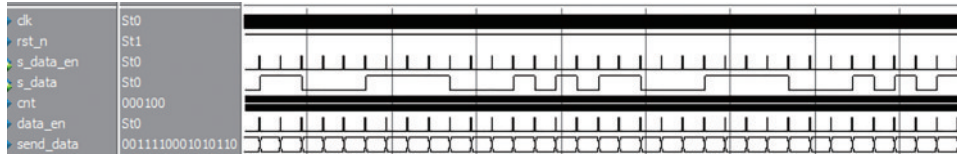


图 8 随机信源仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of random source

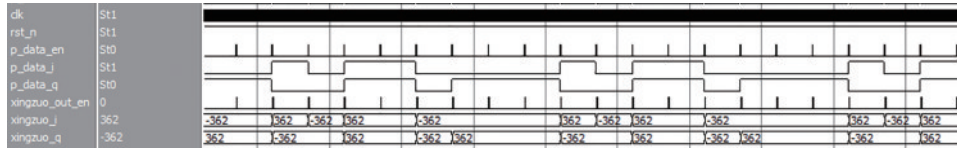


图 9 星座映射仿真图

Fig. 9 Constellation mapping simulation diagram

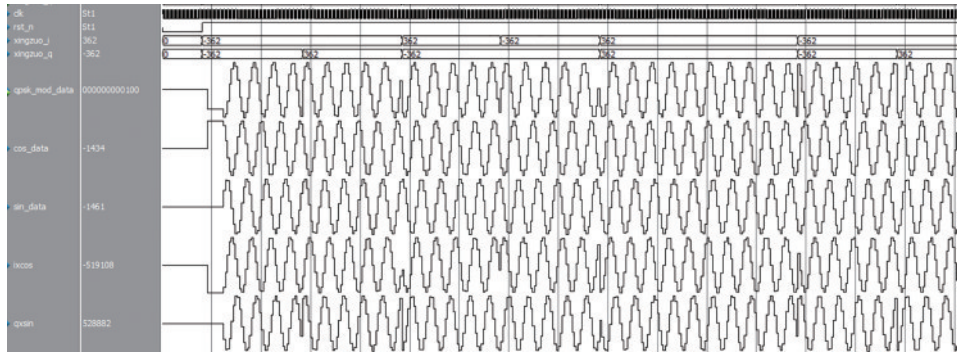


图 10 调制仿真图

Fig. 10 Modulation simulation diagram

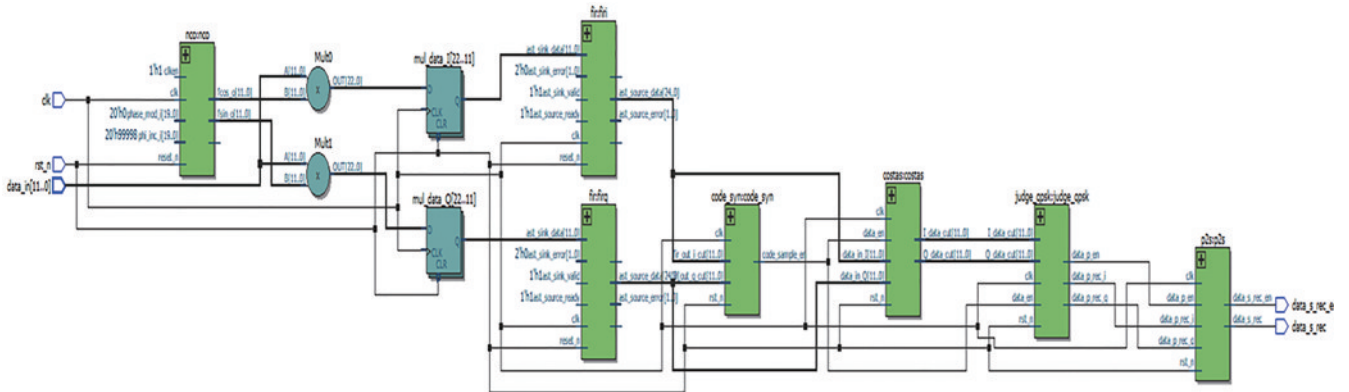


图 11 解调模块 RTL 图

Fig. 11 Register transfer level (RTL) diagram of demodulator module

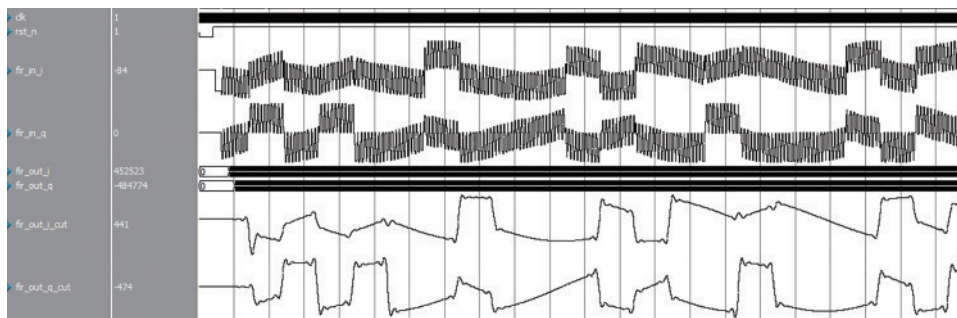


图 12 解调 LPF 前后数据仿真图

Fig. 12 Data simulation before and after demodulating LPF

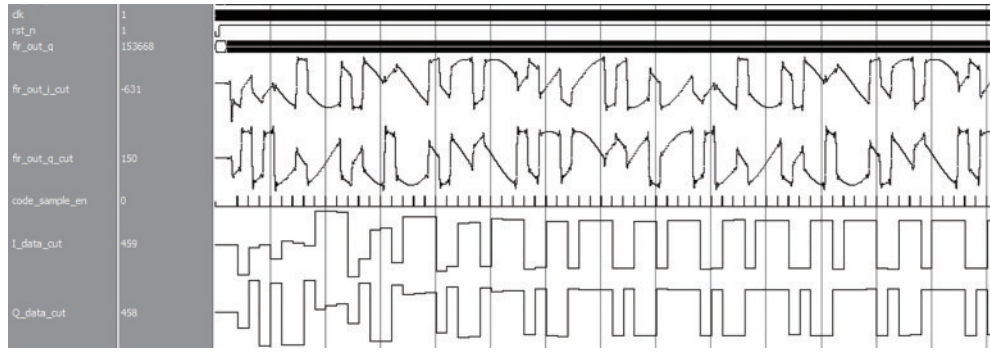


图 13 Costas 环输出仿真图

Fig. 13 Costas loop output simulation diagram

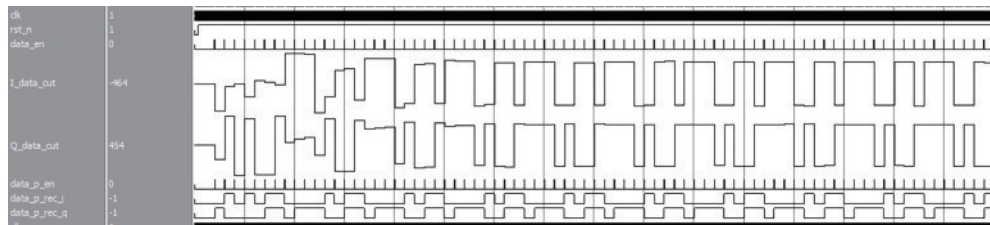


图 14 判决模块仿真图

Fig. 14 Simulation diagram of decision module

正确解调数据。结果如图 15 所示。

改进型 Costas 环与传统 Costas 环频率跟踪响应对比如图 16 所示,传统 Costas 环频率跟踪响应在 110 ms

左右,改进型 Costas 环频率跟踪响应在 60 ms 左右,通过仿真可以看出改进型 Costas 环频率跟踪响应较快。

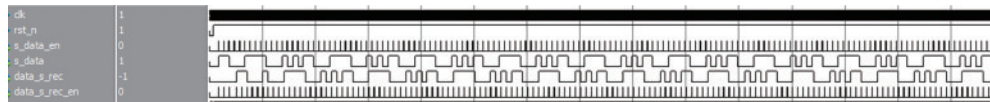


图 15 结果对比仿真图

Fig. 15 Comparison of simulation results

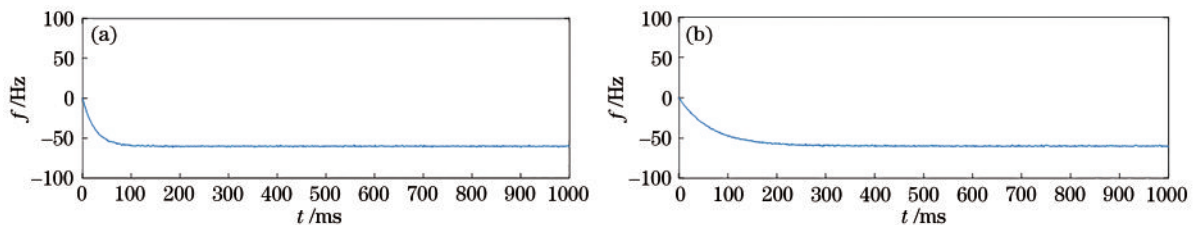


图 16 Costas 环频率跟踪曲线对比。(a)改进型 Costas 环频率跟踪响应;(b)传统 Costas 环频率跟踪响应

Fig.16 Comparison of Costas loop frequency tracking curves. (a) Frequency tracking response of improved Coatas loop; (b) frequency tracking response of traditional Coatas loop

4 结 论

基于 FPGA 完成了 QPSK 信号的解调,设计了基于 Matlab 的 Costas 环设计和串并转换的相关设计,并且提出了一种改进的新型 Costas 环,给出了相关的关键仿真结果并进行了分析。经过分析,成功实现了基于改进型 Costas 环的 QPSK 解调。通过实验对比可知,提出的改进型 Costas 环具有提高环路稳定性和同步性的优势,同时系统中 ALF 可以有效提高系统的收敛性以及稳定性。实验分析了频偏为 100 MHz 时的

整体解调过程,还有相关的具体流程和关键部分的仿真,最后给出了解调后的基带信号。仿真证明基于改进型 Costas 环的 QPSK 信号解调方案是可行的,以后还将对改进型 Costas 环做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Bosco G. Advanced modulation techniques for flexible optical transceivers: the rate/reach tradeoff[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(1): 36-49.
- [2] Li H S, Sang X Y. SNR and transmission error rate for

- remote laser communication system in real atmosphere channel[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 258: 156-162.
- [3] Li J W, Zhang Z, Gao J Q, et al. Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 254-260.
- [4] Li X L, Geng T W, Ma S, et al. Performance improvement of coherent free-space optical communication with quadrature phase-shift keying modulation using digital phase estimation[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4695-4701.
- [5] Li L, Geng T W, Wang Y, et al. Free-space optical communication using coherent detection and double adaptive detection thresholds[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 7900217.
- [6] Hao S Q, Zhang D, Zhao Q S, et al. Coherent receiving efficiency in satellite-ground coherent laser communication system based on analysis of polarization[J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 267-274.
- [7] Ding D, Xu L T, Li Y F. Stability, noise, and nonlinear distortion analysis of a sampling OPLL[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2783-2790.
- [8] 常青, 毕存磊, 张其善. 直扩 QPSK 系统中 Costas 环原理及其实现 [J]. *微计算机信息*, 2006, 22(35): 241-242, 209.
Chang Q, Bi C L, Zhang Q S. Principle and implementation of Costas loop in direct-sequence spread-spectrum & QPSK-modulating communication system [J]. *Control & Automation*, 2006, 22(35): 241-242, 209.
- [9] 王小燕. QPSK 信号的相干光检测的 EVM 值分析 [J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2021, 35(2): 60-64.
Wang X Y. EVM analysis of coherent light detection of QPSK signal [J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences)*, 2021, 35(2): 60-64.
- [10] Schaefer S, Rosenkranz W. Costas-loop based carrier recovery in optical coherent intersatellite communications systems[C]//2015 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), October 6-8, 2015, Brno, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2015: 30-34.
- [11] 刘艳华. 基于 costas 环的 QPSK 信号解调的研究与实现 [J]. *盐城工学院学报(自然科学版)*, 2012, 25(1): 53-57.
Liu Y H. Research and implementation of demodulation of QPSK signal based on the Costas [J]. *Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 25(1): 53-57.
- [12] 刘洋, 佟首峰, 常帅, 等. 相干激光通信系统光学锁相环路载波恢复技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106001.
Liu Y, Tong S F, Chang S, et al. Carrier recovery technology of optical phase locked loop in coherent laser communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106001.
- [13] Okamura Y, Koga M, Takada A. First demonstration of phase-sensitive gain stabilization by using heterodyne Costas optical phase-locked loop [J]. *IEICE Communications Express*, 2016, 5(6): 152-157.
- [14] 杜勇. 数字通信同步技术的 MATLAB 与 FPGA 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 30-99.
Du Y. The synchronization in digital communication based on MATLAB and FPGA [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 30-99.
- [15] 杜勇. 数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 260-264.
Du Y. MATLAB and FPGA implementation of digital modulation and demodulation technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 260-264.