

激光与光电子学进展

直接探测光纤通信系统场信号恢复技术综述

孙梦凡¹, 蔡沅成^{1,2*}, 朱敏^{1,2**}, 张丽瑶¹, 梁胜¹, 雷明政², 张教^{1,2}, 华炳昌², 田亮², 邹显聪², 李爱杰²¹东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;²网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111

摘要 直接探测光纤通信系统凭借其结构简单、成本低廉的优势成为未来短距光通信的主要方案, 而场信号恢复 (FSR) 技术是进一步提升直接探测系统容量的关键技术。介绍了直接探测光纤通信系统中斯托克斯矢量接收机、载波辅助差分检测接收机和 Kramers-Kronig (KK) 接收机的系统结构、工作原理及主要研究进展, 并对比了三种 FSR 技术各自的优缺点。结果表明, 相比其他两种技术, KK 接收机技术有明显优势。最后, 明确了 KK 接收机在未来直接探测光纤通信系统中的重要地位, 并分析了 KK 接收机当前面临的关键技术挑战和解决方案。

关键词 光通信; 直接探测; 场信号恢复; 接收机

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100002

Survey of Field-Signal Recovery Technique in Direct-Detection Optical Fiber Communication System

Sun Mengfan¹, Cai Yuan Cheng^{1,2*}, Zhu Min^{1,2**}, Zhang Liyao¹, Liang Sheng¹, Lei Mingzheng²,
Zhang Jiao^{1,2}, Hua Bingchang², Tian Liang², Zou Yucong², Li Aijie²¹National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;²Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, Jiangsu, China

Abstract The direct-detection optical fiber communication system has become the main solution for the future short-reach optical transmission links due to its simple structure and low cost. The field-signal recovery (FSR) technique is a critical technique to improve the capacity of the direct-detection system. This paper introduces a system structure, working principle and main research progress of Stokes vector receiver, carrier-assisted differential detection receiver and Kramers-Kronig (KK) receiver in direct detection optical fiber communication systems. The advantages and disadvantages of three commonly used FSR techniques are compared. The results show that compared with the other two techniques, and the KK receiver technology has obvious advantages. Finally, the important position of KK receiver in the future direct-detection optical fiber communication systems is clarified. Meanwhile, the key technical challenges faced by KK receiver are analyzed and the solutions for reference are given ultimately.

Key words optical communications; direct-detection; field-signal recovery; receiver

1 引言

凭借光纤在带宽和时延上的优势, 光纤通信系

统已被大量用于骨干网、城域网及接入网的数据传输和通信中。随着各种先进技术如大数据、云计算、流媒体和 5G 技术的不断涌现, 即使在城域网和

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-07-08; 录用日期: 2021-07-13

基金项目: 江苏省重点研发计划 (2020012)、江苏省科技成果转化专项 (2019026)

通信作者: *caiyuancheng@pmlabs.com.cn; **minzhu@seu.edu.cn

接入网中,光纤通信系统也需提供每波长高达百吉比特每秒的通信容量,以满足新兴宽带应用不断增长的流量需求^[1]。与用于骨干网传输的长距光纤通信系统不同,短距光纤通信系统主要在 80 km 内为数据中心、城域网和接入网等应用场景提供高速大容量覆盖通信服务,对系统收发器件的成本和功耗更敏感。因此,如何利用更简单的结构和更低的成本使光纤通信系统具有更高的频谱效率以及更大的系统容量具有重要意义。

光纤通信系统通常分为相干检测系统和直接探测系统两类。相干检测系统支持同相正交(IQ)矢量调制方式,能提供高频谱效率,且相干增益能够提供较高的接收机灵敏度,但相干接收机需要额外的光本地振荡器,且复杂的接收机结构和数字信号处理(DSP)算法导致系统的成本高昂,严重限制了相干检测技术在光纤通信系统中的应用。相比相干检测系统,直接探测系统无需光本地振荡器,在节省激光器成本的同时避免了收发激光器之间复杂的波长校准操作。此外,直接探测系统对相位噪声不敏感,在接收端无需载波相位恢复算法^[2],且能释放发送端对激光器线宽的严格要求。但传统直接探测系统主要基于强度调制直接探测技术,仅支持一维幅度信号的调制和探测,系统容量受频谱效率的限制,且光电探测器(PD)的平方律探测操作会丢失信号的相位信息,导致接收机无法实现矢量场信号的探测和恢复。

为改善直接探测系统的频谱效率,满足当前光纤通信系统日益增长的容量需求,采用基于幅度和相位的二维矢量调制是一个行之有效的办法,如同样采用四电平调制格式时,16进制正交幅度调制(16QAM)可实现的系统容量是4电平脉冲幅度调制(PAM4)的2倍,原因是16QAM在调制信息时结

合了幅度调制和相位调制,将一维幅度调制扩展到了二维矢量调制。为了解决相位信息丢失的问题,人们提出了多种技术方案^[3-7],为直接探测系统提供了矢量场信号的恢复能力。其中,最具代表性的方案有斯托克斯矢量(SV)接收机^[3]、载波辅助差分检测(CADD)接收机^[4]、Kramers-Kronig(KK)接收机^[5]。本文分别介绍了这三种场信号恢复技术的系统结构和工作原理,并综合讨论了三种方案在系统成本、频谱效率和DSP复杂度等方面的优缺点。

2 三种不同的场信号恢复技术

2.1 斯托克斯矢量接收机

借助与场信号强度相关的斯托克斯参量,SV直接探测(SV-DD)系统可以恢复任意场信号,且频谱效率近似于单偏振相干检测系统^[8]。图1为一个典型SV-DD系统的结构示意图,主要由光发射机、光纤信道、SV接收机三部分组成^[9]。在光发射机中,两个正交偏振态上分别携带了基于IQ调制的矢量信号(x 偏振态, $E_x = S$)和无调制信息的空余光载波(y 偏振态, $E_y = C$),IQ调制器将原始信号分为两路正交信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$,光载波的中心频率为 f_c 。两路光波由偏振合束器(PBC)耦合后经掺铒光纤放大器(EDFA)放大并送入光纤进行传输。在接收端,利用SV接收机完成矢量场信号的恢复。SV接收机包括1个偏振分束器(PBS)、1个 90° 光混频器和3个平衡光电探测器(BPD)。接收的光信号先经过1个PBS分成 x 和 y 两个正交的偏振态,然后通过BPD 1探测得到斯托克斯参量 \hat{S}_1 、通过 90° 光混频器再分别经过BPD 2和BPD 3探测得到斯托克斯参量 \hat{S}_2 和 \hat{S}_3 。

受光纤偏振模色散的影响,发射端偏振复用信号经过光纤传输后,接收端信号的偏振态会发生旋

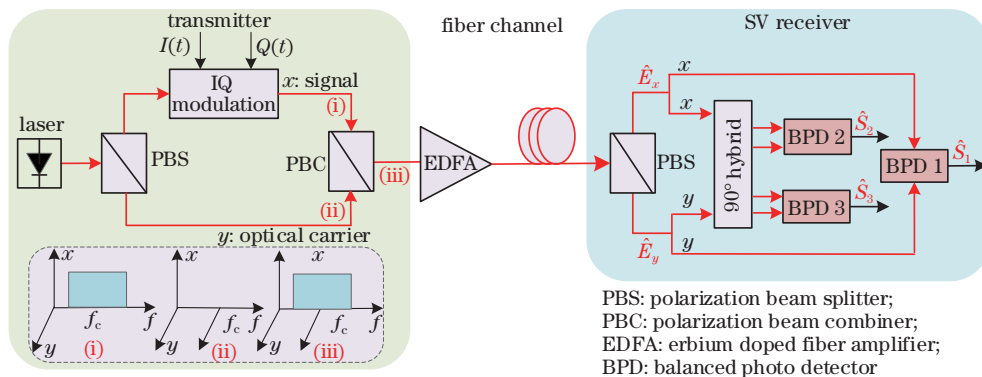


图 1 SV-DD 系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the SV-DD system

转^[10-11]。假设 \mathbf{M}_R 为系统的偏振旋转矩阵,则基于斯托克斯参量的偏振旋转模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \hat{S}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\hat{E}_x|^2 - |\hat{E}_y|^2 \\ 2\text{Re}(\hat{E}_x \hat{E}_y^*) \\ 2\text{Im}(\hat{E}_x \hat{E}_y^*) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_R \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, S_1, S_2, S_3 和 $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3$ 分别为偏振旋转前和偏振旋转后接收端获取的斯托克斯参量, \hat{E}_x 和 \hat{E}_y 为偏振旋转后接收端通过 PBS 得到的两个偏振正交的场信号, 上标 * 表示取共轭, $\text{Re}()$ 和 $\text{Im}()$ 分别为取复数实部和虚部的函数。基于偏振旋转后斯托克斯参量恢复的偏振旋转前信号可表示为

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 - |C|^2 \\ \text{Re}(E_x C^*) \\ \text{Im}(E_x C^*) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_R^{-1} \begin{bmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \hat{S}_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, \mathbf{M}_R 可通过三组正交的训练序列估计^[12]。获得三个独立的斯托克斯参量后, 联合 S_2 和 S_3 可恢复 $E_x C^*$ 场信号, 进而恢复目标矢量场信号 E_x 。

2014 年, Li 等^[3]提出了基于载波与高阶调制格式的偏振复用 SV-DD 传输系统, 引起了人们的广泛关注。表 1 为 SV-DD 系统已有的主要研究成果。其中, 2017 年, Hoang 等^[13]提出了一种基于斯托克斯空间的三维调制方案, 并基于 16QAM-PAM2 信号以 280 Gbit/s 的速率完成了 320 km 的光纤传输。为了进一步提高系统的传输带宽和速率, 2019 年, Ji 等^[14]提出了一种高维 SV-DD 接收机, 可在少模光纤传输系统中实现模式解耦合, 避免了传统耦合模式恢复对相干检测条件的依赖。2019 年, Che 等^[15]在直接探测系统中基于斯托克斯和琼斯空间进行联合偏振恢复, 实现了与相干接收机相同的偏振模色散容忍度。

表 1 基于 SV 接收机的直接探测系统主要研究成果

Table 1 Main research results of direct-detection system based on SV receiver

Year	Research institute	Research result	Reference
2014	University of Melbourne, Australia	propose the SV-DD system based on carrier and signal polarization multiplexing	Ref. [3]
2014	McGill University, Canada	propose a polarization multiplexed SV-DD based on PAM-4	Ref. [16]
2016	McGill University, Canada	realize the SV-DD system equalization enhanced phase noise via numerical simulation	Ref. [17]
2017	Beijing University of Science and Technology, China	analyze the performance of three optical polarization multiplexing methods	Ref. [12]
2017	McGill University, Canada	propose a three-dimensional modulation scheme in Stokes space	Ref. [13]
2018	University of Melbourne, Australia	propose the Stokes-space field receiver for multiple spatial modes	Ref. [18]
2019	University of Melbourne, Australia	propose high-dimensional SV-DD receiver over few-mode fibers	Ref. [14]
2019	Nokia Bell Labs, United States	realize the establishment of joint polarization recovery based on Stokes space and Jones space	Ref. [15]
2020	University of Tokyo, Japan	propose single-ended photodetectors to reduce the size and cost of SV receiver	Ref. [19]
2020	Jinan University, China	propose a Stokes-space multiplexing system based on spectrum compression	Ref. [20]

2.2 载波辅助差分检测接收机

CADD 接收机是直接探测系统实现场信号恢复的系统, 其结构如图 2(a) 所示^[21]。在发送端, 激光器产生的连续光波分成两路, 一路通过工作在空间的 IQ 调制器调制矢量场信号, 记为 $S(t)$; 另一路作为空余光载波不调制任何信息, 记为 C 。通过调整偏振控制器(PC)使信号 $S(t)$ 和载波 C 处在同一偏振方向, 将两者耦合后通过标准单模光纤(SSMF)进行传输。在接收端, 采用 CADD 接收机

完成复数值双边带信号的探测与解调。首先, 将接收信号分为两路, 一路直接送给 90° 光混频器; 另一路经光延迟器(ODL)延迟时间 τ 后拆分为两部分, 一部分信号经 PD 得到

$$R_1 = |C + S(t - \tau)|^2 = |C|^2 + |S(t - \tau)|^2 + C[S(t - \tau) + S^*(t - \tau)], \quad (3)$$

另一部分信号被送入 90° 光混频器, 两路光信号 $C + S(t)$ 和 $C + S(t - \tau)$ 经过 90° 光混频器和 2 个

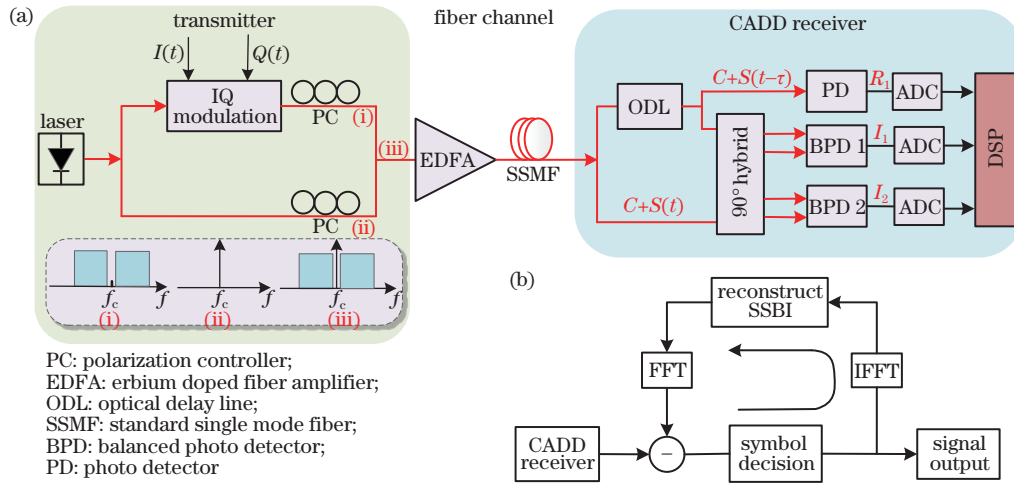


图 2 基于 CADD 接收机的直接探测光纤通信系统图。(a) 系统结构图; (b) DSP 中的 SSBI 迭代消除算法
 Fig. 2 Diagram of direct-detection optical fiber communication system based on CADD receiver. (a) System structure diagram; (b) iterative elimination algorithm of SSBI in DSP

BPD 后分别得到光电流 I_1 和 I_2 , 可表示为

$$I_1 = 4 \operatorname{Re} \left\{ [C + S(t - \tau)]^* \cdot [C + S(t)] \right\}, \quad (4)$$

$$I_2 = 4 \operatorname{Im} \left\{ [C + S(t - \tau)]^* \cdot [C + S(t)] \right\}. \quad (5)$$

根据 I_1 和 I_2 重构的复数信号 R_2 可表示为

$$R_2 = (I_1 + jI_2) / 4 = |C|^2 + C[S(t) + S^*(t - \tau)] + S(t)S^*(t - \tau), \quad (6)$$

用 R_2 减去 R_1 , 以消除直流分量, 得到

$$R = R_2 - R_1 = C[S(t) - S(t - \tau)] + S_2, \quad (7)$$

式中, $S_2 = S(t)S^*(t - \tau) - |S(t - \tau)|^2$ 为信号与信号间的拍频干扰 (SSBI), 会引起信号失真及误码。图 2(b) 为一种适用于正交频分复用 (OFDM) 多载波的 SSBI 迭代消除算法, 可通过多次迭代逼近并消除 S_2 。首先, 对携带 SSBI 的失真信号在频域进行符号判决; 然后, 基于判决结果在时域重建 SSBI; 最后, 在频域用原始失真信号减去重建的 SSBI 项, 达到抑制 SSBI 的目的。为了实现更好的 SSBI 消除效果, 需要进行多次迭代, 实验结果表明, 一般需要 4 次迭代信号误差才能收敛^[4]。

对式 (7) 进行傅里叶变换, 得到目标信号的频域表达式为

$$S(f) = [1 - \exp(j2\pi f\tau)]^{-1} \mathcal{F}[(R - S_2)/C], \quad (8)$$

式中, \mathcal{F} 为快速傅里叶变换 (FFT)。令 $H(f) = 1 - \exp(j2\pi f\tau)$ 为 CADD 接收机的传输函数, 由于其在零频处存在零点, 导致恢复的 $S(f)$ 在零频附近出现严重失真。为了提高信号恢复的准确度, 需

在零频附近设置一定的保护间隔 (约为信号带宽的 10%)^[4], 如图 2(a) 的插图所示。值得注意的是, 对于符号在频域加载的多载波调制格式 (如 OFDM), 式 (8) 可直接恢复目标符号信息; 而对于符号在时域加载的单载波方式, 还需经快速傅里叶反变换 (IFFT) 转换到时域才能完成目标符号的解调。

CADD 直接探测光纤通信系统方案最早由 Shieh 等^[4] 提出, 可实现基于复数值双边带场信号的恢复和解调。为了降低该方案所需的高载波信号功率比 (CSPR), 2020 年, Ji 等^[22] 提出了双边带信号的交错子载波加载方案; Zhu 等^[23] 提出并讨论了非对称 CADD (C-CADD) 接收机和对称 CADD (A-CADD) 接收机的性能, 并得出 A-CADD 比 C-CADD 接收机灵敏度更高的结论; Wang 等^[24] 研究了 C-CADD 和 A-CADD 接收机的延迟偏差容限, 得到 C-CADD 接收机比 A-CADD 具有更好延迟偏差容限的结论。

2.3 Kramers-Kronig 接收机

基于 KK 接收机的直接探测光纤通信系统结构如图 3 所示。在发送端, $I(t)$ 和 $Q(t)$ 为一组希尔伯特变换信号对, 即 $Q(t) = X_{\text{Hilbert}}[I(t)]$ 。将 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 分别作为双驱动马赫-曾德尔调制器 (DDMZM) 上下臂的驱动信号。为了产生图 3(a) 中插图 i 所示的带载波光单边带信号, 在正交点设置 DDMZM 的直流偏置, 即上下臂的直流偏置差 $V_{b2} - V_{b1} = V_{\text{pi}}/2$ 。其中, V_{pi} 为 DDMZM 的半波电压参数。在接收端, 采用 1 个单端 PD 对接收到的光单边带信号进行光电探测, 然后将信号经模数转换器 (ADC) 转换到数字

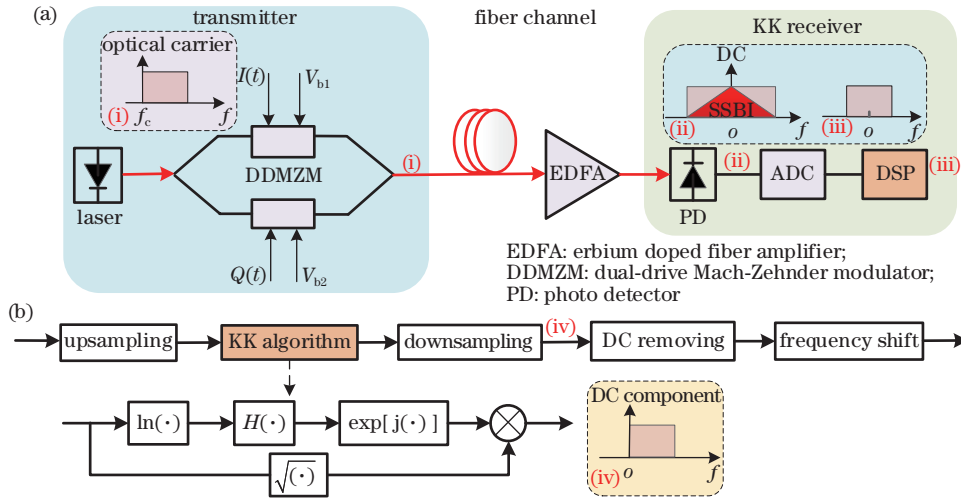


图 3 基于 KK 接收机的直接探测光纤通信系统图。(a) 系统结构; (b) DSP 中 KK 算法的流程图

Fig. 3 Diagram of direct-detection optical fiber communication system based on KK receiver. (a) System structure; (b) flow chart of KK algorithm in DSP

域进行后续 DSP 处理。鉴于 PD 的平方律特性, 探测后的信号会丢失矢量场的相位信息。常规解调方案可以从载波与信号的拍频项中提取目标信号, 一方面, 在平方律作用下信号与信号拍频同时会产生 SSBI, 如果发送端没有预留充足的频域保护间隔, SSBI 频谱会与目标信号重叠, 从而引起严重的信号失真, 如图 3(a) 的插图 ii; 另一方面, 相位缺失导致无法重建光纤传输中的矢量场信号, 阻碍了接收端 DSP 对光纤引起的色散和非线性等失真的有效补偿。KK 接收机可以解决上述难题, 既能基于 PD 探测的幅度信息重建整个单边带矢量场信号, 也能在理论上完美消除 SSBI 的影响, 从而实现高频谱效率和高接收机灵敏度。

KK 算法的流程如图 3(b) 所示, 主要包括幅度恢复和相位恢复两个分支。其核心原理是最小相位条件下, 基于希尔伯特变换通过信号的幅度信息恢复丢失的相位信息, 从而重建完整的单边带矢量场信号。假设一个单边带信号为

$$b(t) = E_0 + s(t) \exp(j2\pi Bt), \quad (9)$$

式中, E_0 为载波的幅度, $s(t)$ 为一个半带宽为 B 的基带信号, $s(t) \exp(j2\pi Bt)$ 为一个负频率为 0 的单边带信号。当 $|E_0| > |s(t)|$ 时, 式(9) 也被称为最小相位条件, 此时, $b(t)$ 为最小相位信号。默认 PD 的响应度为 1, 经过平方率探测后信号可表示为

$$I(t) = |b(t)|^2. \quad (10)$$

最小相位信号 $b(t)$ 的幅度可通过对 $I(t)$ 开方获得, 然后, 利用 KK 算法通过希尔伯特变换从获得的

幅度信息恢复最小相位信号丢失的相位信息, 并进一步重建完整的矢量场信号。该过程可完美避免调制信号 $s(t)$ 产生的 SSBI 对系统性能的影响。KK 算法的过程可表示为

$$\varphi_E(t) = \frac{1}{2\pi} \text{P.V} \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \frac{\ln[I(t')]}{t - t'}, \quad (11)$$

$$s_r(t) = \left\{ \sqrt{I(t)} \exp[j\varphi_E(t)] - E_0 \right\} \exp(-j2\pi Bt), \quad (12)$$

式中, P.V 为柯西主值积分, $\varphi_E(t)$ 为恢复的相位信息, $\sqrt{I(t)} \exp[j\varphi_E(t)]$ 为重建的单边带矢量场信号, E_0 为单边带矢量场信号的均值。基于重建的矢量场信号, 可高效地进行电域线性和非线性失真的补偿, 通过移除直流并反向移频即可恢复目标基带信号 $s_r(t)$ 。

1966 年, Voelcker^[25] 提出了利用 KK 算法 (单边带信号实部与虚部之间的转化关系) 恢复单边带矢量场信号的理论, 在基于包络检波方式的无线通信系统中, 通过 KK 算法在模拟域实现了单边带矢量场信号的恢复。2016 年, Mecozzi 等^[5] 将 KK 算法从传统无线通信系统推广到光纤通信领域, 在数字域实现了单边带调制直接探测光纤通信系统矢量场信号的恢复。之后, 人们结合实际需求对 KK 接收机进行不断改进和补充, 主要研究成果如表 2 所示。其中, 2017 年, Hoang 等^[26] 将 KK 算法用于 SV 接收机, 实现了单波长 400 Gbit/s 速率的 80 km 传输。2018 年, Chen 等^[27] 在波分复用系统中, 基于单边带调制和 KK 接收机, 实现 4×240 Gbit/s 的传输速率

表 2 基于 KK 接收机的直接探测光纤通信系统主要研究成果

Table 2 Main research results of the direct-detection optical communication system based on KK receiver

Year	Research institute	Research result	Reference
2016	University of L'Aquila, Italy	KK receiver is used to reconstruct the single sideband vector field-signal at the first time	Ref. [5]
2017	McGill University, Canada	KK algorithm is used in Stokes vector receiver. Achieved a single-wavelength 400 Gbit/s rate of 80 km transmission	Ref. [26]
2017	University of London, UK	discuss the impact of resampling rate and carrier signal power ratio on the performance of KK receivers	Ref. [30]
2018	Huazhong University of Science and Technology, China	discuss the feasibility of KK algorithm in optical access networks	Ref. [31]
2018	University of Electronic Science and Technology, China	achieve single-channel, single polarization 102.4-Gbit/s Nyquist PAM-4 over 800-km standard single-mode fiber	Ref. [32]
2018	KAIST, Korea	propose a non-iterative KK receiver that avoids digital upsampling	Ref. [33]
2019	Shanghai Jiaotong University, China	propose exponential operation that reduces the system's requirements for the carrier signal power ratio	Ref. [34]
2019	University of Melbourne, Australia	propose a novel scheme to relax the requirement of high carrier-to-signal power ratio for KK receiver	Ref. [35]
2020	Monash University, Australia	propose two methods of reducing error rates for weak carriers	Ref. [36]
2020	KAIST, Korea	zero-padding method is proposed to estimate the DC component lost by the KK receiver	Ref. [37]
2020	Monash University, Australia	propose the MP condition is not sufficient to guarantee error-free performance in noiseless conditions	Ref. [38]
2021	Hunan Normal University, China	propose KK algorithm combined with the discrete Fourier transform precoding technology; extend the transmission distance and improve receiver sensitivity	Ref. [28]
2021	Monash University, Australia	propose analog low-latency KK optical single-sideband receiver	Ref. [29]

以及 100 km 光纤传输, 频谱效率高达 5.3 bit/s/Hz, 进一步推动了 KK 接收机在大容量短距光纤通信领域中的应用和探索。2021 年, Wang 等^[28]将 KK 算法与离散傅里叶变换以及编码技术相结合, 在 120 km 单模光纤传输情况下的接收机灵敏度达 7 dB; Lowery 等^[29]提出了适用于单边带直接探测光纤通信系统的模拟低延时 KK 接收机。目前, KK 接收机的应用及改进仍然是人们研究和讨论的热点问题。

3 直接探测光纤通信系统场信号恢复技术的对比及展望

场信号恢复作为直接探测光纤通信系统重要的技术之一, 关系到直接探测光纤通信系统可实现的最大频谱效率和最高通信容量。虽然上述三种场信号恢复技术都能提高传统直接探测光纤通信

系统的性能, 但考虑到系统的规模化和实用化时, 需要考量不同技术在成本、频谱效率以及复杂度等方面的优缺点。基于 SV、CADD 和 KK 接收机的三种直接探测系统的详细对比如表 3 所示。

在收发机器件成本方面, SV 和 CADD 直接探测系统均高于 KK 直接探测系统, 但其接收机端至少需要 1 个 90° 光混频器、3 个 ADC 和 2 个以上 BPD, 而 KK 接收机仅需 1 个单端 PD 和 1 个 ADC, 器件成本较低。在偏振相关及频谱效率方面, SV 直接探测系统依赖于双偏振结构实现场信号的恢复, 虽然改进的 SV 接收机也能支持双偏振调制数据的解调, 但其光谱效率 (OSE) 和电谱效率 (ESE) 最高只能达到相干偏振复用系统 75%^[39]。CADD 直接探测系统需在上下边带之间插入一定保护间隔 (约占信号带宽的 10%) 优化接收性能, OSE 和 ESE 最高只能达到

表 3 三种场信号恢复技术方案的对比
Table 3 Comparison of three kinds of field signal recovery technical solutions

Direct-detection system	SV	CADD	KK
Transmitter composition	LD×1, IQ modulator×1, DAC×2, PBS×1, PBC×1 (complex)	LD×1, IQ modulator×1, DAC×2(middle)	LD×1, DDMZM×1, DAC×2 (simple)
Receiver composition	optical hybrid×1, BPD×3, ADC×3 (complex)	optical hybrid×1, PD×1, BPD×2, ADC×3, ODL×1 (complex)	PD×1, ADC×1 (simple)
Polarization dependent	yes	no	no
Spectral efficiency	OSE: low ESE: middle	OSE: middle ESE: high	OSE: high ESE: low
DSP complexity	low	high	middle
System cost	high	high	low

90%^[21];KK 直接探测系统采用单边带调制, OSE 可达 100%, 但 ESE 只有 50%。在 DSP 复杂度方面, CADD 接收机需要通过多次迭代精确估计 SSBI, 同时涉及傅里叶和傅里叶逆变换, DSP 复杂度最高; SV 接收机仅需预先通过训练序列估计偏振态旋转变化获得偏振旋转矩阵, DSP 复杂度最低; 而 KK 接收机涉及非线性的对数操作, DSP 复杂度适中。在系统整体成本方面, 凭借接收机上的超低成本优势, KK 直接探测系统远低于其他两个系统。在传输距离方面, 三种系统都支持超过 100 km 的光纤传输能力^[3, 21, 27], 满足短距光传输应用场景的需求。但在相同的传输速率情况下, 采用 10% 保护间隔的 CADD 接收机系统性能与 KK 接收机近似, 原因是两者的最佳 CSPR 近似相等, 约为 8 dB^[4]。受益于低至 0 dB 的 CSPR^[3], SV 接收机在相同发送速率和入纤功率下可以实现更远的传输距离。

相干探测系统可以充分利用收发机带宽, 提供高频谱效率和高功率利用率, 但受收发器件硬件成本及复杂 DSP 的限制。在高带宽、大容量等商业需求驱动下, 随着 IQ 调制和相干接收机成本的逐渐降低, 相干光通信技术将逐渐从核心网下沉到城域网和接入网。与相干光通信技术相比, 直接探测技术在频谱效率、系统容量以及功率利用效率方面还存在一些缺陷, 如: KK 直接探测系统需要采用单边带形式, 不能充分利用接收机带宽; CADD 直接探测系统需要保留频谱间隔, 牺牲了部分频谱利用率与 SVDD 直接探测对偏振的依赖, 会降低系统架构的灵活性。但直接探测技术依然是短距光纤通信系统最主要的选择。综合考虑后, 在上述三种场信号恢复技术中, 基于 KK 接收机的直接探测系统具有的优势更显著, 能为未来大容量短距光互联或光接

入提供助益。虽然 KK 接收机在改善直接探测系统的性能方面有显著效果, 但还面临着一些内在的关键技术挑战, 主要体现在硬件复杂度下降、直流分量添加以及 CSPR 降低等方面。

1) 硬件复杂度有待进一步下降。执行 KK 算法所需的数字信号处理器模块包括非线性运算, 如平方根、对数和指数运算。为防止非线性运算带来的频谱混叠, KK 算法至少需要 3 倍过采样率才能发挥优越的性能^[30], 使算法在实用化过程中对硬件资源提出了较高要求。如何降低 KK 接收机对高过采样倍数的依赖、完全避免过采样的方法还有待进一步研究, 其中, 采用多个乘法器和加法器逼近非线性的指数和对数操作是一个有效的技术途径^[33]。

2) 光电探测时丢失直流分量。在 KK 直接探测系统中, 带载波的单边带信号经过 PD 后理论上存在直流分量, 且该直流分量对 KK 算法实现矢量场信号的恢复不可或缺。但在实际系统中, 高速直接探测系统通常采用交流耦合 PD, 导致探测后直流分量丢失。因此, 如何高效精准地添加直流分量是实现高性能 KK 接收机的一个关键因素。其中, 一个有效的参考方案是 2020 年 Bo 等^[37]提出的基于拍零填充的直流恢复技术。

3) 降低对高 CSPR 的依赖。KK 接收机需要工作在最小相位条件下, 通常要求 CSPR 不低于 6 dB^[30]。但在该 CSPR 情况下, 信号的功率远小于载波的功率, 导致系统的抗噪性不够理想, 一定程度上限制了 KK 直接探测系统的性能。因此, 如何降低对高 CSPR 的依赖、实现基于低 CSPR 的 KK 直接探测系统也成为人们的研究重点。2019 年, An 等^[34-35]针对低 CSPR 的 KK 接收机分别提出了相应的参考解决方案。

4) 提高接收机频谱效率。KK 接收机需要采用单边带调制格式,但单边带信号会浪费一半的接收机带宽,导致接收机的 ESE 只能达到相干检测系统的 50%,可采用孪生双边带调制方式,在左、右边带都加载不同的信号提高接收机 ESE^[40]。

综上所述,在基于直接探测的短距光纤通信系统中,相较 SV 和 CADD 两种场信号恢复技术, KK 接收机具有明显优势,应用前景广阔。虽然其在硬件复杂度、直流分量恢复和 CSPR 降低等方面有待进一步改进,但人们仍在积极探索高效可靠的技术推动 KK 接收机的发展与应用。随着 KK 接收机相关技术的不断发展与成熟,基于直接探测的 KK 接收机有望进一步逼近相干接收机的性能。

4 结 论

场信号恢复技术架起了传统强度调制直接探测系统向基于幅度和相位矢量调制的相干检测系统转换的桥梁,为未来高光谱效率光收发器的设计和 100 Gbit/s 以上通信速率的短距光传输系统的实现提供了思路。首先,从系统结构、工作原理和研究进展等方面详细阐述了直接探测光纤通信系统中 SV、CADD 和 KK 接收机场信号恢复技术。然后,分别从系统成本、频谱效率、DSP 复杂度等方面对比了三种技术的优缺点,明确了 KK 接收机在相关领域具有显著优势。最后,讨论了 KK 接收机面临的挑战和可行的解决方案,为下一步 KK 接收机的发展指明了方向。相信随着 KK 接收机在硬件复杂度、频谱效率、接收机灵敏度等方面的进一步改善,直接探测光纤通信系统的性能也会得到进一步提升。

参 考 文 献

- [1] 毛雪. 面向短距光互联的斯托克斯矢量接收机信号处理算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1-2.
Mao X. Research on signal processing algorithms of Stokes vector receiver for short-reach optical interconnection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1-2.
- [2] 徐文婧, 李岩, 刘宇旻, 等. 相干光通信载波相位恢复算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206002.
Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery algorithm for coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206002.
- [3] Li A, Che D, Chen V, et al. Spectrally efficient optical transmission based on Stokes vector direct detection[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15662-15667.
- [4] Shieh W, Sun C, Ji H L. Carrier-assisted differential detection[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 18.
- [5] Mecozzi A, Antonelli C, Shtaif M. Kramers-Kronig coherent receiver[J]. Optica, 2016, 3(11): 1220-1227.
- [6] Matsumoto M. Optical signal phase reconstruction based on temporal transport-of-intensity equation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4722-4729.
- [7] Chen H S, Fontaine N K, Gene J M, et al. Dual polarization full-field signal waveform reconstruction using intensity only measurements for coherent communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(9): 2587-2597.
- [8] 尚琦淞. 斯托克斯向量直接检测中偏振损伤效应均衡技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 2-3.
Shang Q S. Research on equalization of polarization effect in Stokes direct detection[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019: 2-3.
- [9] 余建军, 迟楠, 陈林. 基于数字信号处理的相干光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 10-11.
Yu J J, Chi N, Chen L. Coherent optical communication technology based on digital signal processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013: 10-11.
- [10] Mecozzi A, Shtaif M. The statistics of polarization-dependent loss in optical communication systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(3): 313-315.
- [11] 黄媛, 赵家钰, 王金东, 等. 一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406003.
Huang Y, Zhao J Y, Wang J D, et al. A real-time polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing for optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406003.
- [12] 周娴, 霍佳皓, 钟康平, 等. 偏振复用直接检测短距光纤传输系统[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(2): 21-28.
Zhou X, Huo J H, Zhong K P, et al. Polarization division multiplexing system with direct decision for short reach optical communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(2): 21-28.

- [13] Hoang T, Sowailem M, Osman M, et al. 280-Gb/s 320-km transmission of polarization-division multiplexed QAM-PAM with Stokes vector receiver[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: W3B.4.
- [14] Ji H L, Che D, Sun C, et al. High-dimensional Stokes vector direct detection over few-mode fibers [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 2065-2068.
- [15] Che D, Chandrasekhar S, Shieh W. PMD-tolerant direct detection in Stokes space[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), September 22-26, 2019, Dublin, Ireland. London: Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [16] Morsy-Osman M, Chagnon M, Poulin M, et al. $1\lambda \times 224$ Gb/s 10 km transmission of polarization division multiplexed PAM-4 signals using 1.3 μm SiP intensity modulator and a direct-detection MIMO-based receiver[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21-25, 2014, Cannes, France. New York: IEEE Press, 2014: 14768190.
- [17] Qiu M, Zhuge Q B, Sowailem M Y S, et al. Equalization-enhanced phase noise in Stokes-vector direct detection systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 16516037.
- [18] Che D, Sun C, Shieh W. Direct detection of the optical field beyond single polarization mode[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3368-3380.
- [19] Tanemura T, Suganuma T, Nakano Y. Sensitivity analysis of photonic integrated direct-detection Stokes-vector receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 447-456.
- [20] 李霞, 张黎杰, 黄斌, 等. 基于频谱压缩的斯托克斯空间复用系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090602.
Li X, Zhang L J, Huang B, et al. Stokes space multiplexing system using spectrum compression[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090602.
- [21] Sun C, Ji T H, Ji H L, et al. Experimental demonstration of complex-valued DSB signal field recovery via direct detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(10): 585-588.
- [22] Ji T H, Sun C, Ji H L, et al. Field recovery at low CSPR using interleaved carrier assisted differential detection[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2020: W4A.3.
- [23] Zhu Y X, Li L S, Fu Y, et al. Symmetric carrier assisted differential detection receiver with low-complexity signal-signal beating interference mitigation [J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19008-19022.
- [24] Wang Z H, Zhu M Y, Zhang J, et al. Delay deviation tolerance of carrier assisted differential detection system[C]//2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC), October 24-27, 2020, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2020: 20529364.
- [25] Voelcker H. Demodulation of single-sideband signals via envelope detection[J]. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1966, 14(1): 22-30.
- [26] Hoang T M, Sowailem M Y S, Zhuge Q, et al. Single wavelength 480 Gb/s direct detection over 80km SSMF enabled by Stokes vector Kramers Kronig transceiver[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33534-33542.
- [27] Chen X, Antonelli C, Chandrasekhar S, et al. Kramers-Kronig receivers for 100-km datacenter interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 79-89.
- [28] Wang L, Chen M, Zhang L, et al. Precoded OVSF-OFDM transmission system using DML with Kramers-Kronig receiver[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 63: 102523.
- [29] Lowery A J, Feleppa T. Analog low-latency Kramers-Kronig optical single-sideband receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(10): 3130-3136.
- [30] Li Z, Erkilinç M S, Shi K, et al. Joint optimisation of resampling rate and carrier-to-signal power ratio in direct-detection Kramers-Kronig receivers[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017: 17733605.
- [31] Li D, Yu Q, Deng L, et al. Bidirectional long-reach PON using Kramers-Kronig-based receiver for Rayleigh Backscattering noise and SSBI interference elimination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19020-19036.
- [32] Zhu M Y, Zhang J, Yi X W, et al. Optical single side-band Nyquist PAM-4 transmission using dual-drive MZM modulation and direct detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6629-6638.

- [33] Bo T W, Kim H. Kramers-Kronig receiver operable without digital upsampling[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13810-13818.
- [34] An S H, Zhu Q M, Li J C, et al. Modified KK receiver with accurate field reconstruction at low CSRR condition[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 18618677.
- [35] Sun C, Che D, Ji H L, et al. Towards low carrier-to-signal power ratio for Kramers-Kronig receiver[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, March 3-7, 2019, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: M1H.6.
- [36] Lowery A J, Wang T Y, Corcoran B. Enhanced Kramers-Kronig single-sideband receivers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(12): 3229-3237.
- [37] Bo T W, Kim H. Recovery of DC component in Kramers-Kronig receiver utilizing AC-coupled photo-detector[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2020: M3J.1.
- [38] Wang T Y, Lowery A J. Minimum phase conditions in Kramers-Kronig optical receivers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6214-6220.
- [39] Che D, Sun C, Shieh W. Optical field recovery in Stokes space[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 451-460.
- [40] Fan S J, Zhuge Q B, Sowailem M Y S, et al. Twin-SSB direct detection transmission over 80 km SSMF using Kramers-Kronig receiver[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017: 17733500.