

## 光无线通信中基于哈特莱变换的翻转 OFDM 技术

李炉焦\*, 陈君, 唐志军, 胡仕刚, 陈磊

湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201

**摘要** 提出了一种新的基于快速哈特莱变换(FHT)的翻转光正交频分复用(OFDM)方案(Flip-FHT)。快速哈特莱变换为实三角变换,当用其处理傅里叶变换时,输入信号不需要厄米对称性。同时,与传统的基于快速傅里叶变换(FFT)的非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)中只有奇数子载波携带信息符号不同,该方案由于翻转了实双极信号的负数部分,使得偶数子载波也可以携带信息符号,故该方案适用于强度调制/直接检测(IM/DD)光无线通信(OWC)系统。与 ACO-OFDM 相比,Flip-FHT 的频谱效率提高了 1 倍,计算复杂度在接收端降低了 50%。仿真结果表明,与采用 4QAM 和 16QAM(正交幅度调制)的 ACO-OFDM 相比,采用 BPSK(二进制相移键控)和 4PAM(脉冲幅度调制)的 Flip-FHT 可以在系统结构更简单、星座尺寸更小的情况下获得相同的性能。

**关键词** 光通信; 翻转 FHT; 哈特莱变换; 厄米对称性; 非对称限幅光 OFDM; 强度调制/直接检测

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1906002

## Flip-OFDM Based on Hartley Transform for Optical Wireless Communications

Li Lujiao\*, Chen Jun, Tang Zhijun, Hu Shigang, Chen Lei

School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology,  
Xiangtan, Hunan 411201, China

**Abstract** We proposed a novel flip-optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) scheme based on fast Hartley transform (FHT), namely Flip-FHT. FHT, as a real trigonometric transform, was used to process the Fourier transform. Therefore, Hermitian symmetry was not required for the input signal. At the same time, unlike the traditional fast Fourier transform (FFT)-based asymmetric clipped optical OFDM (ACO-OFDM), in which only odd subcarriers carried information symbols, the proposed scheme flipped the negative part of the real bipolar signal so that even subcarriers could also carry information symbols. Therefore, this scheme is suitable for intensity modulation/direct detection (IM/DD) optical wireless communication (OWC) systems. The spectral efficiency of the Flip-FHT system is 2 times that of the ACO-OFDM system, and the computational complexity at the receiver is 50% that of the ACO-OFDM system. Simulation results show that compared with the ACO-OFDM system under 4-quadrature amplitude modulation (4QAM) and 16QAM, the Flip-FHT system featuring binary phase-shift keying (BPSK) and 4-pulse amplitude modulation (4PAM) achieves the same performance with a simpler system and a smaller constellation size.

**Key words** optical communications; Flip-FHT; Hartley transform; Hermitian symmetry; asymmetric clipped optical orthogonal frequency division multiplexing; intensity modulation/direct detection

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 060.4250

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61674056, 61875054)、湖南省自然科学基金(2020JJ4314, 2020JJ5199)、湖南省教育厅一般项目(20C0799, 18C0296)、湖南科技大学博士研究生启动基金(E51956)

通信作者: \*lujiao-li@hnust.edu.cn

## 1 引言

正交频分复用(OFDM)技术作为一种多载波传输技术,由于其频谱利用率高、抗码间干扰(ISI)等优点,在光无线通信中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在 OFDM 系统中,IM/DD 因其系统比较简单,成为低成本短距离通信中的首选,如可在可见光通信中使用<sup>[4-7]</sup>。然而,在 IM/DD 系统中传输的 OFDM 信号必须是正实信号。

针对这一关键问题,学者们提出了许多解决方案。首先,为了得到实 OFDM 信号,输入信号必须具有厄米对称性<sup>[8]</sup>,但这会浪费 OFDM 的一半子载波。为此,有研究者利用快速哈特莱变换算法来获取实 OFDM 信号,该算法的输入信号不需要厄米对称性<sup>[9-10]</sup>,其充分利用了 OFDM 的各个子载波。利用厄米对称性得到实数双极性 OFDM 信号后,还需进一步将其转换为单极性正信号,典型的转换方法包括直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)<sup>[11-12]</sup>和非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)<sup>[13-16]</sup>。DCO-OFDM 系统需要在 OFDM 信号中加入一个较大的直流偏置值,该值至少是信号标准偏差的两倍。但是,一方面,大的直流偏置值会导致光信号具有高平均功率和低功率效率,另一方面,较低的直流偏置值会导致较高的负时间采样被削波,而零电平削波产生的噪声会导致较强的 ISI。因此,在双极性 OFDM 信号中加入直流偏置是一种低效的解决方案,该方案使得传统的 OFDM 在许多光无线系统中无法使用。与 DCO-OFDM 系统不同,ACO-OFDM 系统中不使用直流偏置,该系统只有奇数子载波携带信息符号。因此,在信号传输之前,负振幅被裁剪为零,但结果表明,限幅产生的噪声与奇数子载波中的信息正交<sup>[8]</sup>,表明限幅不会导致符号失真。因此,使用 ACO 来传输 OFDM 信号具有较高的功率效率。近年来,它已成为光无线通信中主要的单极性 OFDM 方案。然而,在传统的 ACO-OFDM 系统中,只有奇数子载波被用来调制信息,偶数子载波被浪费。2011 年,Fernando 等<sup>[17]</sup>提出将翻转(Flip)作为单极性技术,对发送信号的负值部分在传输之前进行翻转,由此确保在两部分中传送的采样信息都是正数,也就是说,传输信号的正值部分和翻转的负值部分分别在两个连续的 OFDM 子帧中进行传输,这使得奇数、偶数子载波都得到了利用。

本文为解决基于快速傅里叶变换(FFT)的 ACO-OFDM 系统因必须具有厄米对称性而浪费一

半的子载波和将负振幅裁剪为零时剩余子载波又被浪费一半的问题,提出一种基于快速哈特莱变换(FHT)的翻转 OFDM 技术。在该技术中,由于采用了 FHT,且 FHT 是实三角变换,因此实信号的变换结果仍是实数<sup>[18]</sup>,获得的实 OFDM 信号不需要厄米对称性。此外,由于使用了 Flip 技术,偶数子载波也可用于携带信息符号。由此可以看出,通过将 FHT 和 Flip 技术进行结合,OFDM 的所有子载波均得到利用。经过分析,与基于 FFT 的 ACO-OFDM 相比,基于 FHT 的 Flip-OFDM 具有更高的频谱利用率和更低的计算复杂度。仿真结果也表明,采用更小星座尺寸的 Flip-FHT 系统能够得到与更大星座尺寸的 ACO-OFDM 系统相同的性能。

## 2 系统模型

图 1 给出了 IM/DD 系统中基于 FHT 的 Flip-FHT 方案的框图。由于采用了 IM/DD,OFDM 信号必须是正、实信号。为得到实 OFDM 信号,在基于 FFT 的 OFDM 系统中,经过  $M$ -QAM(正交幅度调制)星座映射后,调制符号必须具有厄米对称约束,如图 2(a)所示。对于  $2N$  点的快速傅里叶逆变换(IFFT),该系统中的  $x_0$  和  $x_N$  分别与直流(DC)和奈奎斯特频率分量相对应,并且被设置为零,只有前半部分的  $N-1$  个输入(即  $x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ )可用于传输有效数据,而后半部分的  $N-1$  个输入(即  $x_{N+1}, x_{N+2}, \dots, x_{2N-1}$ )可用于传输复共轭值[如图 2(a)中的 QAM\*]。在基于 FHT 的 OFDM 系统中,用快速哈特莱逆变换(IFHT)和 FHT 分别代替 IFFT 和 FFT 进行 OFDM 调制和解调,实星座(如  $L$ -PAM 和 BPSK)用于映射信息序列,如图 2(b)所示。由于实序列的 FHT 输出信号是实数,输入信号不需要厄米对称性。两种系统中星座点的大小  $M$  和  $L$  的关系式为<sup>[9]</sup>

$$L = 2^{\log_4 M}. \quad (1)$$

因此,基于 FHT 的 OFDM 系统的星座点更小,系统结构更简单。经分析和仿真验证,这两种系统之间当  $M$  和  $L$  满足(1)式时,具有相同的误码率性能。

在基于 FHT 的系统中,映射后,进行 IFHT,根据文献[18]中哈特莱变换的定义,得到实 OFDM 的符号序列  $x(n)$  为

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{2N-1} X(k) [\cos(2\pi kn/2N) + \sin(2\pi kn/2N)], \quad (2)$$

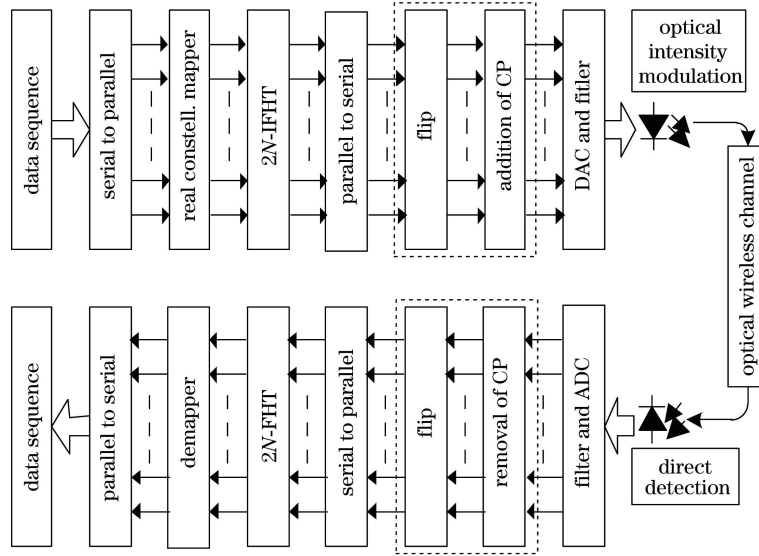


图 1 基于哈特莱变换的 IM/DD 系统框图

Fig. 1 Block diagram of IM/DD system based on Hartley transform

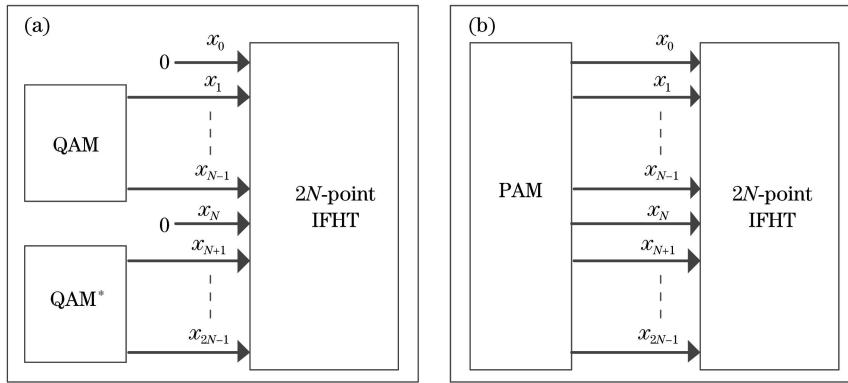


图 2 OFDM 调制器。(a)基于 FFT 和 QAM 星座映射；(b)基于 FHT 和 PAM 实星座映射

Fig. 2 OFDM modulator. (a) Based on FFT and QAM constellation mapping; (b) based on FHT and PAM real constellation mapping

其中  $X(k)$  表示发送的 PAM 符号序列,  $2N$  是 FHT 点数, 如图 1 所示。对于 IFHT, 其表达式为

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{2N-1} X(k) \exp[j2\pi kn/(2N)] = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{2N-1} X(k) \cos[2\pi kn/(2N)] + j \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{2N-1} X(k) \sin[2\pi kn/(2N)]. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可知, IFHT 的实部和虚部分别对应于 IFHT 的偶数部分和奇数部分, IFHT 只是多了一个虚部单位<sup>[18]</sup>。另外, IFHT 的窄带信道之间具有相互正交的子载波, 同时, IFHT 的镜像对称子带能够确保子载波的正交性<sup>[19]</sup>, 因此, 可用快速哈特莱变换代替 FFT 算法获取 OFDM 符号。

由于  $X(k)$  是实数, IFHT 的输出  $x(n)$  也是实数, 但具有正值和负值, 为双极性信号, 故定义  $x^+(n)$

和  $x^-(n)$  分别表示  $x(n)$  的正值部分和负值部分, 即

$$x(n) = x^+(n) + x^-(n), \quad (4)$$

其中  $x^+(n)$  和  $x^-(n)$  分别定义为

$$x^+(n) = \begin{cases} x(n), & x(n) \geq 0 \\ 0, & x(n) < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$x^-(n) = \begin{cases} x(n), & x(n) < 0 \\ 0, & x(n) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了保证时域信号的非负性, 在传统的 ACO-OFDM 中  $x^-(n)$  被裁剪为零, 而在 Flip-FHT 中  $x^-(n)$  被翻转。在 Flip-FHT 中, 首先对  $x^+(n)$  和  $x^-(n)$  进行极性分离, 在将  $x^-(n)$  翻转后, 两部分分别加上循环前缀(CP), 然后复用在一起, 并在两个连续的 OFDM 子帧上进行传输, 即正分量  $x^+(n)$  在第一个子帧中传输, 而负分量的翻转信号  $-x^-(n)$  在第二个子帧中传输, 如图 3(同图 1 中发送端的虚线部分)所示。

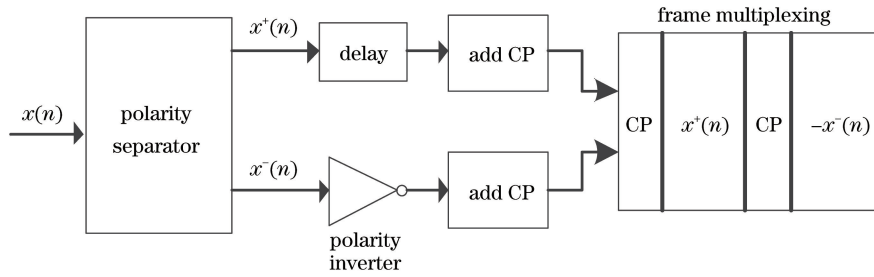


图 3 发送端 Flip-FHT 的框图和帧结构

Fig. 3 Block diagram and frame structure of Flip-FHT at the transmitter

经过无线信道后,接收端恢复数据序列的操作与发送端正好相反。直接检测(DD)用于将光信号转换成电信号。经过模数转换器(ADC)后,接收到的两个连续子帧被分离,然后去除两个子帧的循环前缀。假设  $y(n)$ 、 $y^+(n)$  和  $y^-(n)$  分别表示接收的双极性信号、第一个子帧和第二个子帧的接收信

号,  $y^-(n)$  在被翻转后与  $y^+(n)$  复用,即

$$y(n) = y^+(n) - y^-(n), \quad (7)$$

如图 4(同图 1 中接收端的虚线部分)所示。复用后执行 FHT。由于正、逆哈特莱变换公式相同,故实双极性信号  $y(n)$  的 FHT 仍是实信号。FHT 变换后,继续完成解映射、误码计算等操作。

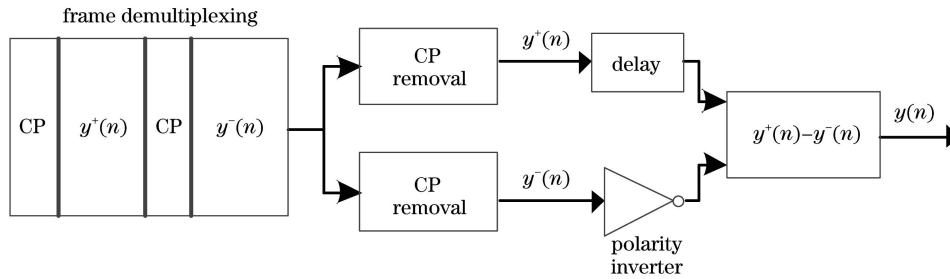


图 4 接收端 Flip-FHT 的框图和帧结构

Fig. 4 Block diagram and frame structure of Flip-FHT at the receiver

### 3 分析与仿真结果

本研究对 ACO-OFDM 和 Flip-FHT 系统的一些关键参数进行了比较,包括:频谱效率、计算复杂度和误码率(BER)性能。

1) 频谱效率。对  $M$  进制调制的 OFDM 系统来说,  $N$  个子载波占用的带宽为

$$B = (N + 1)\Delta f, \quad (8)$$

其中  $\Delta f$  为子载波之间的间隔。  $N$  个子载波一共携带的比特数为  $N \log_2 M$ , 则其比特率为

$$R_b = \frac{N \log_2 M}{T_s} = N \log_2 M \Delta f, \quad (9)$$

其中  $T_s$  为符号时长, 根据频谱效率定义, 其值为

$$\frac{R_b}{B} = \frac{N \log_2 M \Delta f}{(N + 1)\Delta f} = \frac{N \log_2 M}{N + 1}, \quad (10)$$

当  $N$  足够大时, 频谱效率近似为  $\log_2 M$ 。

对于 ACO-OFDM 系统, 利用厄米对称性的特性获得正、实 OFDM 信号, 但这将牺牲一半的频谱, 只利用了前半部分子载波。同时, 在利用厄米对称

性得到实双极性信号后, 剩余子载波只使用其中的奇数子载波来传输信息, 从而能够完成从双极性到非负单极性信号的转变。因此, 在 ACO-OFDM 系统中, 总体上只利用了四分之一的子载波用于携带信息符号, 即其比特率为  $R'_b = \frac{R_b}{4}$ , 故其频谱效率为

$$\frac{R'_b}{B} = \frac{\frac{N}{4} \Delta f \log_2 M}{(N + 1)\Delta f} = \frac{\frac{N}{4} \log_2 M}{N + 1} \approx \frac{1}{4} \log_2 M, \quad (11)$$

即 ACO-OFDM 系统的频谱效率是典型 OFDM 系统的四分之一<sup>[17]</sup>。

对于 Flip-FHT 系统来说, 利用 Flip 技术和 FHT 算法来获得正、实 OFDM 信号。当用翻转(Flip)技术取代 ACO 技术后, 虽然 Flip 技术能够在奇数和偶数子载波上传输符号序列, 但翻转操作需要两个子帧来获得双极性信号, 因此, 从这个角度来说, 频谱效率没有得到提升, 即 Flip 技术并没有提高频谱效率, 因此 Flip 系统的频谱效率与 ACO 系统相同, 为  $\frac{1}{4} \log_2 M$ <sup>[17]</sup>。然而, 由于 Flip-

FHT 系统还采用了快速哈特莱变换,此时系统不需要采用厄米对称性来获取实双极性信号,前后两半部分的子载波都可以用于携带符号序列,因此,相比 ACO-OFDM 系统来说,FHT 系统将提高 1 倍的频谱效率,也就是说,Flip-FHT 系统与 ACO-OFDM

系统的频谱效率相比,提高了 1 倍,其值为  $\frac{1}{2} \lg M$ 。

如在采用 4 进制调制的 64 个子载波系统中,对于典型 OFDM 系统来说,64 个子载波均可用于携带符号序列,故其频谱效率为  $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ;而对于 ACO-OFDM 系统来说,只有前半分子载波中的奇数子载波用于携带符号序列,即只有 16 个子载波携带信息符号,故其频谱效率为  $0.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ;相比 ACO-OFDM 系统来说,Flip-FHT 系统的所有子载波均可用于携带信息符号,但由于 Flip 技术需要两个子帧来重构双极性信号,故其频谱效率只比 ACO-OFDM 系统增加了 1 倍,为  $1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

2) 计算复杂度。对于 FHT 算法和实数输入向量的 FFT 算法来说,它们的计算复杂度基本一致,其乘法次数相同,均为  $(N \lg N - 3N + 4)/2$ ,而加法次数 FHT 算法比 FFT 算法多 2 次,其值分别为  $(3N \lg N - 5N)/2 + 6$  和  $(3N \lg N - 5N)/2 + 4$ <sup>[9]</sup>,  $N$  为 FFT(或 FHT)点数。但是对于采用 FFT 算法的系统来说,还需一些额外的资源来计算复共轭向量,以满足厄米对称性,进而得到实数输入向量。此外,因 FHT 是自逆算法,故其正变换和逆变换的计算次数相同,可采用相同的设备进行处理,而对于 IFFT 来说,需要额外的计算来处理算法中的虚数单位。因此,在发送端,采用 FHT 算法的系统要比采用 FFT 算法的系统计算复杂度低,在接收端,两者基本相同。另一方面,Flip 技术与 ACO 技术在发送端的计算复杂度相同,而在接收端,Flip 技术的

计算复杂度只有 ACO 技术计算复杂度的 50%<sup>[17]</sup>。可以看出,FHT 算法与 Flip 技术结合后的 Flip-FHT 系统,其发送端的计算复杂度略低于 ACO-OFDM 系统,而接收端的计算复杂度是 ACO-OFDM 系统的 50%。

3) 误码性能。一方面,在 ACO 技术中,由于非对称剪裁,传输能量的一半被浪费,而 Flip 技术不浪费传输能量,故 Flip 技术的信号能量是 ACO 技术信号能量的 2 倍,但 Flip 技术在接收端恢复双极性 OFDM 符号的过程中,噪声功率增加了 1 倍,因此,ACO 和 Flip 技术在电域中具有相同的误码率性能<sup>[17]</sup>,即 ACO-OFDM 系统和 Flip-OFDM 系统的误码性能一样。另一方面,采用 FHT 算法的系统由于不需要厄米对称性,偶数子载波也可以传输信息符号,因此当传输具有较低星座尺寸的同比特率信号时,可以获得与采用较高星座尺寸的 FFT 系统相同的性能<sup>[9]</sup>,即采用实  $L$  进制星座的 FHT 系统具有与采用  $M$  进制星座的 FFT 系统相同的误码率性能[ $M$  和  $L$  的关系式见(1)式]。如采用 4PAM 的 Flip-FHT 系统、ACO-FHT 系统和采用 16QAM 的 ACO-OFDM 系统具有相同的误码性能;同样,采用 BPSK 的 Flip-FHT 系统、ACO-FHT 系统和采用 4QAM 的 ACO-OFDM 系统具有相同的误码性能。

本研究通过 Matlab 仿真比较了 Flip-FHT 和 ACO-OFDM 系统的误码率性能。仿真参数如表 1 所示。为简单起见,不考虑循环前缀。图 5 显示了 4PAM(或 BPSK)的 Flip-FHT 系统、4PAM(或 BPSK)的 ACO-FHT 系统和 16QAM(或 4QAM)的 ACO-OFDM 系统的 BER 性能比较。可以看出,它们的误码率性能完全相同,验证了误码性能分析结果的准确性。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	ACO-OFDM	ACO-FHT	Flip-FHT
FFT (FHT) size	256	256	256
Symbol constellation mapping	16QAM (or 4QAM)	4PAM (or BPSK)	4PAM (or BPSK)
Constellation size	16 (or 4)	4 (or 2)	4 (or 2)
Subcarriers carrying information	64	128	256
Channel	AWGN	AWGN	AGWN
Hermitian symmetry	Required	NOT Required	NOT Required

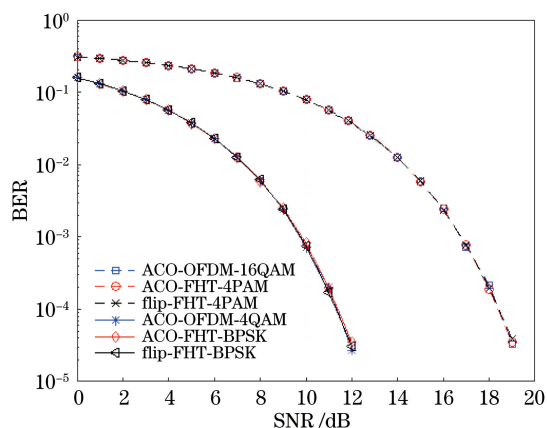


图 5 采用 4PAM(或 BPSK)的 Flip-FHT、采用 4PAM(或 BPSK)的 ACO-FHT 和采用 16QAM(或 4QAM)的 ACO-OFDM 系统误码率性能比较

Fig. 5 BER performance versus SNR for Flip-FHT with 4PAM (or BPSK), ACO-FHT with 4PAM (or BPSK) and ACO-OFDM with 16QAM (or 4QAM)

## 4 结 论

基于哈特莱变换和翻转技术,提出了一种新的在光无线 IM/DD 系统中用于获得正、实 OFDM 信号的 Flip-FHT 机制。在 Flip-FHT 系统中,不需要厄米对称性,输入信号的负值部分被翻转用于传输信息,从而显著提高了频谱效率,降低了计算复杂度。仿真结果显示,采用低星座尺寸的简单 Flip-FHT 系统具有与更高星座尺寸的 ACO-OFDM 系统相同的误码率性能。

## 参 考 文 献

[1] Armstrong J. OFDM for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.

[2] Lowery A J, Armstrong J. 10 Gbit/s multimode fiber link using power-efficient orthogonal-frequency-division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10003-10009.

[3] Li C H, Wu Y T, Yu Y, et al. Dynamic encryption scheme based on channel phase information in OFDM-PON system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006004.  
李春华, 吴雅婷, 余衍, 等. OFDM-PON 系统中基于信道相位信息的动态加密方案[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006004.

[4] Zhang T, Ji H, Ghassemlooy Z, et al. Spectrum-efficient triple-layer hybrid optical OFDM for IM/DD-based optical wireless communications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 10352-10362.

[5] Gonzalez O, Perez-Jimenez R, Rodriguez S, et al. OFDM over indoor wireless optical channel[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(4): 199-204.

[6] He C W, Wang T Q, Armstrong J. Performance of optical receivers using photodetectors with different fields of view in a MIMO ACO-OFDM system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4957-4967.

[7] Chen L, Krongold B, Evans J. Performance analysis for optical OFDM transmission in short-range IM/DD systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 974-983.

[8] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(6): 370-372.

[9] Moreolo M S, Munoz R, Junyent G. Novel power efficient optical OFDM based on Hartley transform for intensity-modulated direct-detection systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(5): 798-805.

[10] Chen C, Zhong X, Liu M, et al. DHT-OFDM based spatial modulation for optical wireless communication [C]//2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference (OGC), September 7-11, 2020, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2020: 32-35.

[11] González O, Rabadán J, Pérez-Jiménez R, et al. Adaptive OFDM system for communications over the indoor wireless optical channel[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2006, 153(4): 139-144.

[12] Carruthers J B, Kahn J M. Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(3): 538-546.

[13] Armstrong J, Schmidt B J C. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(5): 343-345.

[14] Liu X S, Li J F, Li J K, et al. Symmetry recovery-based ACO-OFDM performance in LED nonlinear channel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 210603.  
刘晓爽, 李建锋, 李建科, 等. LED 非线性信道下基于对称恢复的 ACO-OFDM 性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 210603.

[15] Li J F, Liu X S, Li J K, et al. ACO-OFDM diversity combining receiver with direct current offset in visible light communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190604.  
李建锋, 刘晓爽, 李建科, 等. 可见光通信中直流偏移的 ACO-OFDM 分集合并接收机[J]. *激光与光电*

子学进展, 2020, 57(19): 190604.

- [16] Zhang Q, Yue D W. Design of indoor receiver using multiple-input and multiple-output ACO-OFDM visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0106001.  
张琦, 岳殿武. 室内 MIMO ACO-OFDM 可见光通信系统接收机设计 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0106001.
- [17] Fernando N, Hong Y, Viterbo E. Flip-OFDM for optical wireless communications [C] // 2011 IEEE Information Theory Workshop, October 16-20, 2011, Paraty, Brazil. New York: IEEE Press, 2011: 5-9.
- [18] Bracewell R N. Discrete Hartley transform [J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(12): 1832-1835.
- [19] Moreolo M S, Sacchieri V, Cincotti G. Signal processing based on trigonometric transforms for high-speed optical networks[C]//2009 11st International Conference on Transparent Optical Networks, June 28-July 2, 2009, Ponta Delgada, Portugal. New York: IEEE Press, 2009: 1-4.