

一种适用于 DCO-OFDM 系统的 DFT 信道估计算法

高天^{1,2}, 李晓记^{1,2*}, 胡云云^{1,2}, 阎威龙^{1,2}, 杜卫海²

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:针对直流偏置光正交频分复用系统中传统离散傅里叶变换(DFT)信道估计算法运算复杂度高和循环前缀(CP)内存在非有效信道系数的问题,提出厄米特对称的 DFT(H-DFT)阈值改进信道估计算法。首先,根据信道时域响应变换到频域满足厄米特对称的性质,只需对有效子载波的信道频域响应做厄米特对称即可获得全部子载波的信道频域响应;其次,根据 CP 外噪声的平均功率对 CP 内的信道抽头数据设置阈值来滤除 CP 内的噪声。仿真结果表明:与传统 DFT 信道估计算法相比,H-DFT 阈值改进信道估计算法有效降低了运算复杂度,在误比特率和均方误差方面也得到了明显的改善。

关键词:水下可见光通信;直流偏置光正交频分复用;信道估计;厄米特对称;厄米特对称的阈值改进

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)04-0038-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



DFT channel estimation algorithm for DCO-OFDM system

GAO Tian^{1,2}, LI Xiaojil^{1,2*}, HU Yunyun^{1,2}, YAN Weilong^{1,2}, DU Weihai²

(1. College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Ministry of Education Key Lab of Cognitive Radio and Information Processing, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems of high computational complexity of traditional discrete Fourier transform (DFT) channel estimation algorithm and inefficient channel coefficients in cyclic prefix (CP) in direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing system, an improved channel estimation algorithm based on Hermite symmetric DFT (H-DFT) threshold is proposed. Firstly, according to the property that the time domain response of the channel is transformed to the frequency domain to satisfy the Hermite symmetry, the frequency domain response of all the subcarriers can be obtained by only making Hermite symmetry for the frequency domain response of the effective subcarriers. Secondly, according to the average power of the noise outside the CP, the threshold value is set for the channel tap data inside the CP to filter the noise inside the CP. Compared with the traditional DFT channel estimation algorithm, the simulation results show that the H-DFT threshold improved channel estimation algorithm can effectively reduce the computational complexity, and improve the bit error rate and mean square error.

Key words: underwater visible light communication; direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; Hermitian symmetry; threshold improvement of Hermitian symmetry

0 引言

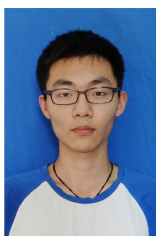
目前,电磁波和水声都难以满足高速实时的无线

收稿日期:2020-09-01。

基金项目:国家自然科学基金(61761014)资助;教育部第二批“新工科”研究与实践项目(E-XTYR20200653)资助;教育部高等学校电子信息类教学指导委员会 2020 年度教学改革研究重点项目(2020-ZD-02)资助;教育部产学研合作协同育人项目(201902180021,202002078046)资助。

作者简介:高天(1995—),男,浙江嘉兴人,硕士生,现就读于桂林电子科技大学信息与通信学院电子与通信工程专业,主要从事水下可见光通信系统中信道估计方面的研究工作。2019 年,参与了“水下 LED 可见光成像 MIMO 通信关键技术研究”国家自然科学基金项目。

* 通信作者:李晓记(E-mail: 46941917@qq.com)。



水下通信需求^[1],而处在海水透射窗口的蓝绿光,却使这一需求成为了可能。但水下复杂环境会使光信号受到不同程度的吸收和散射^[2],并且水下信道的多径效应会进一步恶化接收端的误码率(BER)性能^[3]。为了能在后续的检测与解调过程中准确恢复出原始信号,研究一种易实现、性能好的信道估计算法对整个水下光通信系统来说尤为重要。最小二乘(LS)算法的易实现性,使得它得到的估计值常被作为其它算法的初步估计^[4]。2007 年,KANG Y 等人^[5]在 LS 算法的基础上提出了一种在时域消噪的离散傅里叶变换(DFT)信道估计算法。2012 年,YANG X 等人^[6]将 DFT 算法应用于频谱复用率高且系统复杂度较低的直流偏置光正交频分

复用(DCO-OFDM)系统中, 但该算法忽略了时延内噪声的影响。

本文提出一种厄米特对称的 DFT(H-DFT) 阈值改进信道估计算法, 根据信道频域响应的厄米特对称性, 可直接对有效子载波的信道频域响应做厄米特对称以完成全部子载波的估计。

1 系统框架和信道模型

1.1 水下可见光系统模型

由于光强不能为负值, 且 LED 只能发送实数信号的特殊性^[7], 使得 OFDM 技术不能直接运用于可见光传输系统中。基于此, DCO-OFDM 系统应运而生。

为了使逆向快速傅里叶变换(IFFT)后的数据为实数, 需要使其输入信号满足厄米特对称性:

$$\begin{cases} S_{N-m} = S_m^*, m=1, \dots, N/2-1 \\ S_m = 0, m=0 \text{ or } N/2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, S_m 表示第 m 个子载波发送的数据, S_m^* 表示第 m 个子载波数据的厄米特对称。光信号没有负值, 但是频域数据 S 经过 IFFT 后产生的数据为双极性实数。如果直接使用 DCO-OFDM 系统传输双极性信号会导致负半轴被完全削波, 因此需加上直流偏置, 降低削波带来的失真影响^[8]。DCO-OFDM 系统框图如图 1 所示。

1.2 水下信道模型

水下可见光信道频域响应建模^[9]为:

$$H(f) = \alpha e^{-\beta(f)s} \quad (2)$$

其中, α 表示衰减因子, $\beta(f)$ 表示与频率相关的累积衰

减系数, f 表示光信号频率, s 表示光行进的距离。在水下可见光的实际使用频段范围内, MA X 等人^[10]把衰减系数与频率的关系建模成线性模型, 且由于水下遮挡物引起的多径时延, 会使多条路径的信号在经过不同时间后到达接收端^[11], 因此将信道模型改写为^[10]:

$$H(f) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l e^{-(\beta_l f + \beta_2)s_l} e^{-j2\pi f \frac{s_l}{c_0}} \quad (3)$$

其中, L 是路径的数量; s_l 为第 l 条路径的距离; c_0 表示光速; s_l/c_0 表示第 l 条路径的时延。

2 H-DFT 信道估计算法

本文提出的 H-DFT 阈值改进信道估计算法是在传统 DFT 信道估计算法上, 添加了厄米特对称并配合设定阈值操作的。

2.1 传统 DFT 信道估计算法

为了保证通信系统的有效性与可靠性, 往往需要借助信道估计的方法^[12]。LS 算法出现的时间较早, 其忽略了噪声对估计值产生的偏差, 得到的结果往往差强人意。因此, 为了获得更准确的估计结果, 其它算法需在其基础上进行改进。文献[5]提出了一种基于 LS 算法的变换域信道估计算法, 该算法将 LS 估计出的信道频域响应变换到时域, 并根据信道时域冲激响应集中在循环前缀(CP)内的性质, 仅保留信道冲激响应中小于 CP 长度的值, 将其余的值置为 0, 再将信道时域冲激响应变换回频域。图 2 为传统 DFT 信道估计算法的 OFDM 系统流程图。

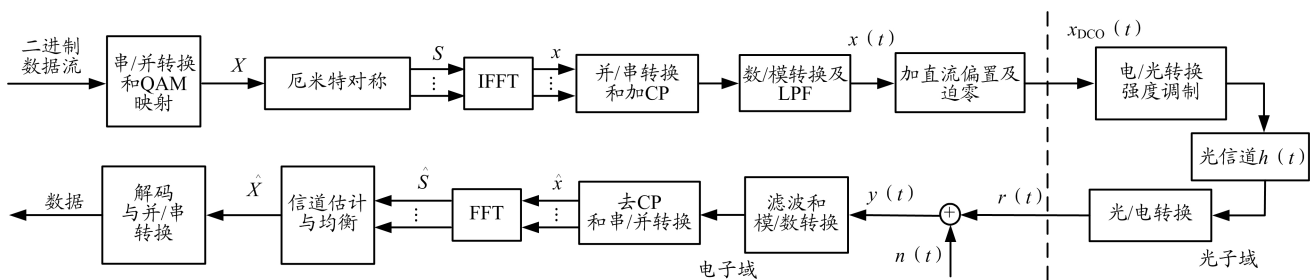


图 1 DCO-OFDM 系统框图

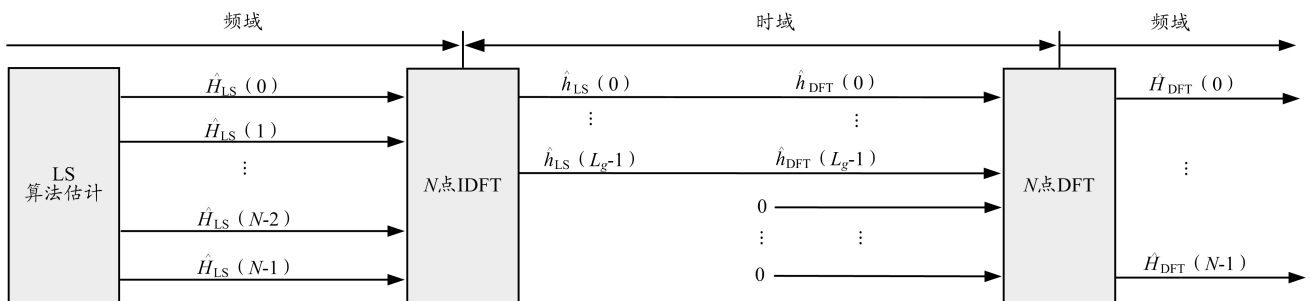


图 2 传统 DFT 信道估计算法的 OFDM 系统流程图

2.2 H-DFT 信道估计算法

若在 DCO-OFDM 系统中采用传统 DFT 信道估计算法, 需先估计出所有子载波的信道频域响应, 会增加运算量; 若只估计有效子载波, 会破坏信号间的正交性。因此, 需对传统 DFT 信道估计算法进行改进。信道频域响应满足厄米特对称的特性如下:

$$H(m) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp\left(-j \frac{2\pi nm}{N}\right) \quad (4)$$

$$H(N-m) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp\left[-j \frac{2\pi n}{N} (N-m)\right] = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp\left(j \frac{2\pi nm}{N}\right) \exp(-j2\pi n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[h(n) \exp\left(j \frac{2\pi nm}{N}\right) \right] = H^*(m) \quad (5)$$

其中, $H(m)$ 表示第 m 个子载波的信道频域响应, $H^*(m)$ 表示信道频域响应的厄米特对称, $h(n)$ 表示第 n 个子载波的时域冲激响应, N 表示子载波的总数量。

本文在 DCO-OFDM 系统中利用此特性, 仅需对有效子载波的信道频域响应做厄米特对称, 就可避免再次估计与插值处理, 大大减少了运算量。H-DFT 信道估计算法的 OFDM 系统流程图如图 3 所示。

经过 N 点 IDFT 后的信道时域冲激响应的表达式为:

$$\hat{h}_{\text{LS}}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{H}_{\text{LS}}(k) \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N}\right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (6)$$

其中, $\hat{H}_{\text{LS}}(k)$ 表示 LS 算法估计出来的第 k 个子载波的

信道频域响应, $\hat{h}_{\text{LS}}(n)$ 表示将 $\hat{H}_{\text{LS}}(k)$ 变换至时域的信道时域冲激响应。

在 DCO-OFDM 系统中, 估计后的信道时域冲激响应集中在 CP 内, 而噪声主要集中在 CP 外。因此, 为了滤除噪声带来的影响, 需保留 CP 内的信道时域冲激响应, 将 CP 外的采样点置为 0, 如式(7)所示。

$$\hat{h}_{\text{DFT}}(n) = \begin{cases} \hat{h}_{\text{LS}}(n), & 0 \leq n \leq L_g - 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

其中, L_g 表示 CP 的长度, $\hat{h}_{\text{DFT}}(n)$ 为经过消噪处理之后的信道时域冲激响应。

再经过 DFT 将信道时域冲激响应变换回频域:

$$\hat{H}_{\text{DFT}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{h}_{\text{DFT}}(n) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{N}\right), 0 \leq k \leq N-1 \quad (8)$$

其中, $\hat{H}_{\text{DFT}}(k)$ 表示经过 DFT 后得到的所有子载波的信道频域响应。

2.3 H-DFT 阈值改进信道估计算法

虽然在传统 DFT 信道估计算法中添加了厄米特对称操作, 降低了时间复杂度, 也有效地滤除了 CP 外的噪声, 但 CP 内的噪声被忽视了。实际上, 在 CP 内, 并非所有的信道抽头都是有效的, 有些仅仅包含噪声。为此, 在添加厄米特对称操作的基础上, 需要进一步做出改进。本文对 CP 内的抽头数据设置一个阈值门限, 将小于门限值的抽头数据设置为 0, 对 CP 外消噪, 以提高算法估计的性能。H-DFT 阈值改进信道估计算法流程图如图 4 所示。

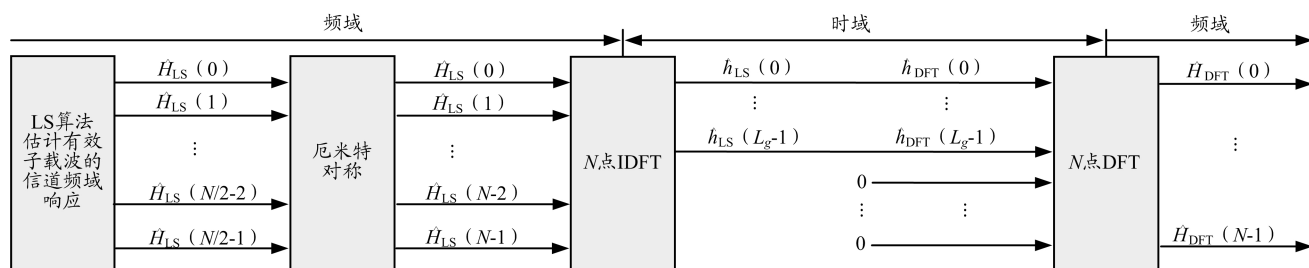


图 3 H-DFT 信道估计算法的 OFDM 系统流程图

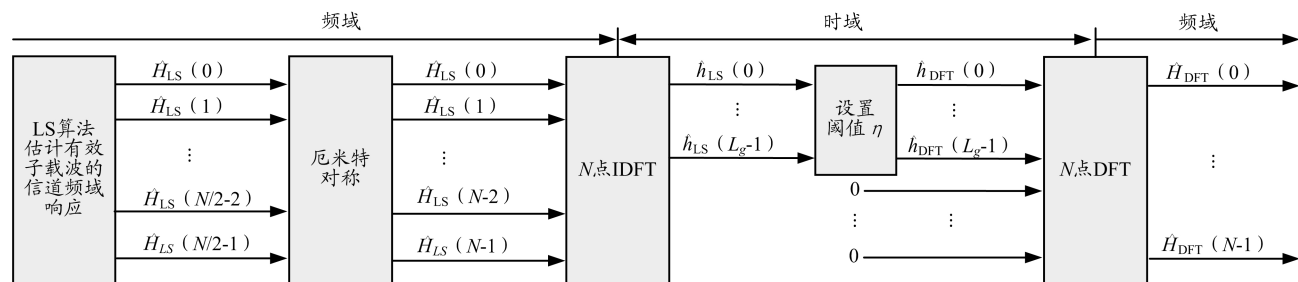


图 4 基于 DCO-OFDM 系统的 H-DFT 算法流程图

根据 CP 外的噪声分量设定阈值, 利用此阈值对 CP 内做消噪处理。将噪声功率表示为:

$$\eta = \delta_{\text{wt}}^2 = \frac{1}{N-L_g} \sum_{n=L_g}^{N-1} |\hat{h}_{\text{LS}}(n)|^2 \quad (9)$$

其中, η 表示阈值, δ_{wt}^2 为噪声平均功率。

将 $\hat{h}_{\text{DFT}}(n)$ 中小于阈值门限的值置为 0。阈值处理如式(10)所示。

$$\hat{h}_{\text{prop}}(n) = \begin{cases} \hat{h}_{\text{DFT}}(n), & |\hat{h}_{\text{DFT}}(n)|^2 > \eta \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\hat{h}_{\text{prop}}(n)$ 为经阈值处理后得到的信道频域响应。

本文提出的 H-DFT 阈值信道估计算法通过阈值门限的设定, 滤除了 CP 内的噪声, 提升了估计精度。

3 仿真与分析

本文在不同信噪比的情况下对 LS 算法、线性最小均方误差(LMMSE)算法、奇异值分解(SVD)算法、传统 DFT 信道估计算法、H-DFT 信道估计算法以及阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法进行了对比仿真。采用的导频插入方式为梳状结构, 正交振幅调制(QAM)为 4 阶, 导频间隔设为 7, 子载波个数为 256。仿真环境为: win10 操作系统, 中央处理器为 4 核 2.3 GHz, 随机存取存储器为 8 GB, 仿真次数为 100 次。仿真结果为: 传统 DFT 信道估计算法与 H-DFT 信道估计算法的运行时间分别为 14 s 和 9 s, 后者比前者的运行时间减少约 36%。这是因为 H-DFT 信道估计算法仅需要对有效子载波进行估计, 可以避免对非有效子载波的再次估计与插值处理, 大大降低了运算的复杂度。

传统 DFT 信道估计算法与 H-DFT 信道估计算法的性能对比情况如图 5 和图 6 所示。可以看出, 2 种算法在均方误差(MSE)和 BER 方面曲线完全重合。虽然添加厄米特对称后加快了运算速度, 但是在 BER 和 MSE 上并未有所改善, 因此本文又在此基础上设定阈值对 CP 内的噪声进行滤除, 从而使得系统总体性能优于传统的 DFT 信道估计算法。阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法与其它信道估计算法性能对比如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知, 在 MSE 相同的情况下, 相比于 LS 算法, 传统 DFT 信道估计算法在信噪比(SNR)增益上均有不同程度的提升; 而阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法针对 CP 内的数据设置门限滤除噪声, 可近一

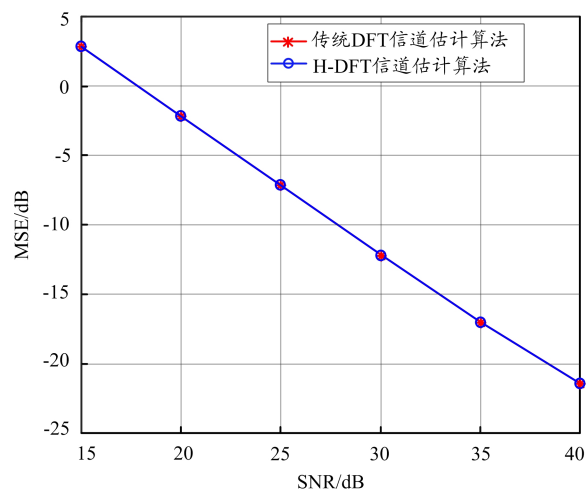


图 5 有无厄米特对称操作的 DFT 算法 MSE 对比图

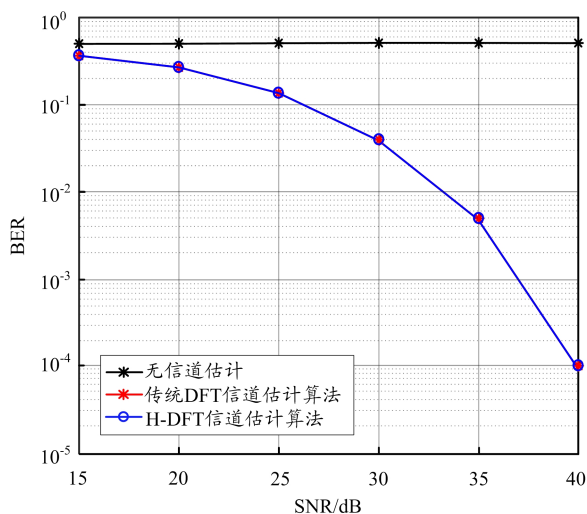


图 6 有无厄米特对称操作的 DFT 算法 BER 对比图

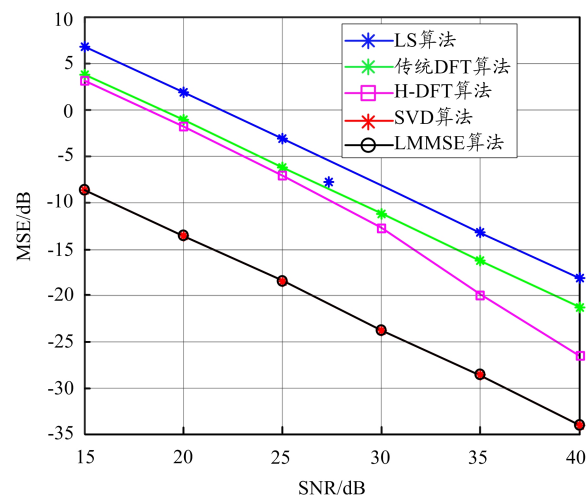


图 7 阈值改进后的 H-DFT 算法与其它信道估计算法 MSE 对比图

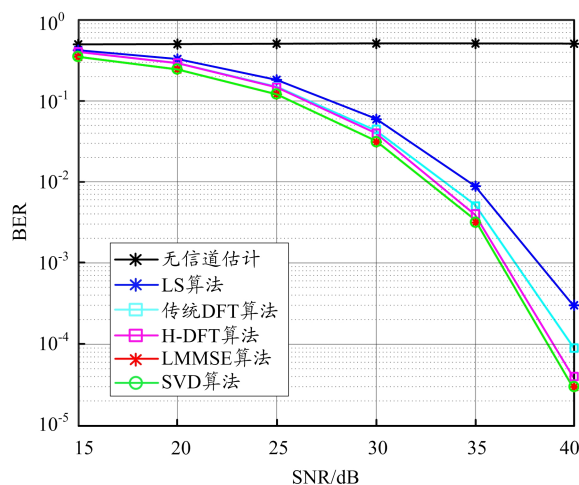


图8 阈值改进后的 H-DFT 算法与其它信道估计算法 BER 对比图

步扩大增益。在 $\text{SNR} < 30 \text{ dB}$ 时, 阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法比传统 DFT 信道估计算法的 MSE 降低了 1~2 dB; 而当 $\text{SNR} > 30 \text{ dB}$ 后, MSE 则下降了大约 2~5 dB, 这是因为 LMMSE 算法和 SVD 算法不仅考虑了噪声的影响, 还利用了信道的先验信息, 所以得到的 MSE 比较小。虽然本文提出的 H-DFT 阈值改进信道估计算法的 MSE 相比于 LMMSE 算法和 SVD 算法的 MSE 仍然有一定差距, 但是该算法复杂度较低, 比 LMMSE 算法和 SVD 算法更适用于实时性高的通信系统中。

由图 8 可知, LMMSE 算法和 SVD 算法的估计准确率最高。与未消噪处理的 LS 算法相比, 传统 DFT 信道估计算法估计精度提升较大, 这是因为滤除了 CP 外的噪声, 所以相较于 LS 算法其精度有了一定的提升; 而本文提出的 H-DFT 阈值改进信道估计算法针对 CP 内的数据也做出了相应的去噪处理, 使精度再次获得了提升。当 SNR 为 35 dB 时, LS 算法的 BER 为 8.9×10^{-3} , 传统 DFT 信道估计算法的 BER 为 5.2×10^{-3} , 阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法 BER 为 3.9×10^{-3} 。当 SNR 为 40 dB 时, 阈值改进后的 H-DFT 信道估计算法的 BER 接近 LMMSE 算法和 SVD 算法, 因为无需进行大量的求逆运算, 所以 H-DFT 信道估计算法的计算复杂度远低于上述 2 种算法。

4 结束语

本文根据 DCO-OFDM 系统中信道频域响应的厄米特对称性和对 CP 内的抽头数据设置阈值, 提出了一种 H-DFT 阈值改进信道估计算法。仿真结果表明: 在 DCO-OFDM 系统中, 利用信道频域响应的厄米特对称性进行子载波估计可有效降低算法的复杂度, 在此基础上的阈值改进则能有效提升估计精度, 接近于 LMMSE 算法和 SVD 算法。因此, 从时间复杂度和算法估计性能方面综合考虑, 本文提出的 H-DFT 阈值改进信道估计算法较适用于 DCO-OFDM 系统。

参考文献:

- [1] 迟楠, 王超凡, 李韦萍, 等. 基于蓝绿光 LED 的水下可见光通信技术研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2019, 58(5): 537-548.
- [2] 郭银景, 徐锋, 屈衍玺, 等. 水下可见光通信关键技术综述[J]. 光通信研究, 2020(2): 1-6+19.
- [3] 林格平. 基于压缩感知的水下多径信道估计方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [4] LI Y. Pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM in wireless systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49 (4): 1207-1215.
- [5] KANG Y, KIM K, PARK H. Efficient DFT-based channel estimation for OFDM systems on multipath channels[J]. IET Communications, 2007, 1 (2): 197-202.
- [6] YANG X, MIN Z, XIONGYAN T, et al. A post-processing channel estimation method for DCO-OFDM visible light communication[C]//2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), July 18-20. 2012, Poznan, Poland. Piscataway: IEEE, 2012: 1-4.
- [7] 焦晶晶. 可见光 DCO-OFDM 通信系统信道估计算法研究及其实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [8] 张明轩. 无线可见光通信关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [9] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4(1): 1518-1547.
- [10] MA X, YANG F, LIU S, et al. Channel estimation for wideband underwater visible light communication: a compressive sensing perspective [J]. Optics express, 2018, 26(1): 311-321.
- [11] LI J, MA Y, ZHOU Q, et al. Monte Carlo study on pulse response of underwater optical channel[J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 1-6.
- [12] 聂雪峰. 基于 OFDM 的低压电力线通信系统信道估计的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.