

DCO-OFDM 系统压缩感知水下光通信信道估计方法

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

(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:针对传统信道估计算法导频开销大而直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)系统频带利用率低的问题,提出了基于压缩感知深度优先多路径匹配追踪(MMP-DF)的水下光信道估计方法。该方法利用 DCO-OFDM 系统的导频处频域响应构建压缩感知模型,将 MMP-DF 算法用于水下光信道估计中,进而估计出信道时域脉冲响应。仿真结果表明:在 DCO-OFDM 系统中,与传统信道估计算法相比,该方法所需导频开销小但估计精度高;导频数量较少时,估计精度优于正交匹配追踪(OMP)算法。

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;多路径匹配追踪;压缩感知

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)07-0028-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Compressed sensing underwater optical communication channel estimation method of DCO-OFDM system

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

(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 pilot overhead of traditional channel estimation algorithm and low frequency utilization of the underwater direct current optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM) system, an underwater optical channel estimation method based on compressed sensing depth-first multi-path matching pursuit (MMP-DF) is proposed. Based on the frequency domain response at the pilot frequency of DCO-OFDM system, this method constructs a compressed sensing model applies the MMP-DF algorithm to underwater optical channel estimation, and then estimates the channel time-domain impulse response. Simulation results show that in the DCO-OFDM system, compared with the traditional channel estimation algorithm, this method requires less pilot overhead and high estimation accuracy. When the number of pilots is small, the estimation accuracy of MMP-DF algorithm is better than orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm.

Key words: underwater visible light communication; direct current optical orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; multi-path matching pursuit; compressed sensing

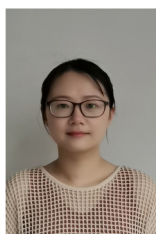
0 引言

可见光在水下环境中的传播衰减、温度波动、散射、色散和波束转向等现象,会造成光信道频率选择

收稿日期:2020-01-19。

基金项目:国家自然科学基金(61761014)资助;广西自然科学基金(2018GXNSFBA281131)资助;广西重点研发计划资助项目(桂林 AB18126030)资助;广西信息科学实验中心项目(编号:PT1604)资助。

作者简介:胡云云(1994—),女,硕士生,现就读于桂林电子科技大学信息与通信学院信息与通信工程专业,主要从事基于压缩感知的水下可见光信道估计研究工作。2018年开始参与“水下LED可见光成像MIMO通信关键技术研究”等国家自然科学基金项目。



*通信作者:李燕龙(E-mail: lyulong@guet.edu.cn)。

性衰减,极大地限制了水下可见光通信在实际场景中的应用^[1]。因此,信道估计对整个水下光通信系统至关重要。目前,常用的信道估计主要有盲信道估计和基于导频的信道估计,前者需要大量数据,收敛速度慢;后者利用收发端已知导频的优势实现快速准确的信道估计而被广泛使用^[2]。传统基于导频辅助算法如最小二乘(LS)算法和最小均方误差(MMSE)算法需要大量导频,导致频带利用率下降。直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)系统的有效子载波仅为 OFDM 的一半,因此使用基于导频的信道估计算法会进一步降低该系统的频谱利用率。近年来,压缩感知技术已被广泛应用于稀疏信道估计中,在估计过程中可以减少导

频使用数量、提高频谱的利用率,且具有良好的估计性能^[3]。基于压缩感知信道估计中常采用的稀疏恢复算法主要有正交匹配追踪(OMP)算法^[4-5]、正则化正交匹配追踪(ROMP)^[6]算法和子空间匹配追踪(SP)^[7]算法。而上述算法在原子重构过程中只选择一个支撑集,导致得到的结果陷入局部最优解。为解决这一问题,文献[8]提出多路径匹配追踪(MMP)算法,设置多个候选集并选择最优支撑集,在复杂度适当增加的情况下,提高正确原子的获得概率。本文通过对水下可见光多径信道频域脉冲响应进行建模,利用逆傅里叶变换(IFFT)得到其对应时域脉冲响应,基于 DCO-OFDM 系统把水下可见光通信信道估计建模为压缩感知问题,将基于压缩感知的 MMP 深度优先(MMP-DF)算法应用于水下可见光信道估计中并对其性能进行研究。

1 水下可见光信道模型

文献[9]指出水下可见光信道的频率脉冲响应模型为:

$$H(f) = \alpha e^{-\beta(f)s} \quad (1)$$

其中, α 为衰减因子; f 为可见光频率; s 为光信号传输距离; $\beta(f)$ 为衰减系数,只受吸收与散射影响。海水中可见光的衰减系数与频率在几十兆赫兹(MHz)实际使用频率带宽范围内可以近似看成线性关系,如式(2)所示。

$$\beta(f) = \beta_1 f + \beta_2 \quad (2)$$

其中, β_1 和 β_2 分别为线性因子,水下环境中信号经过多径散射后会产生时延扩展^[10],因此信道模型可以改写为^[11]:

$$H(f) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha e^{-(\beta_1 f + \beta_2)s_l} e^{-j2\pi f \frac{s_l}{c_0}} \quad (3)$$

其中, s_l 为第 l 条路径的距离; L 为路径数量; c_0 为光速, s_l/c_0 为每条路径的时延。此时,水下可见光信道衰减系数与频率有关,可以用一个闭式方程来表示。本文采用五径可见光信道,在 0~30 MHz 内对其频域脉冲响应进行 IFFT,得到的等效基带时域脉冲响应 $h(n)$ 中 85% 的能量集中在主要路径上^[12],其余路径影响较小。为了简化分析,本文将 $h(n)$ 中小于阈值 0.05 的抽头值置 0,得到阈值处理后的时域脉冲响应满足稀疏信号特征。因此,可以将基于 DCO-OFDM 系统的水下可见光信道估计建模为压缩感知的信号重构问题来进行解决。

2 MMP 信道估计算法

2.1 基于压缩感知的信道估计模型

DCO-OFDM 系统时域信号经过水下信道传输后,接收端的信号可表示为:

$$Y = XWh + V \quad (4)$$

其中, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$, $X = \text{diag}[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 为傅里叶变换后的 DCO-OFDM 符号数据, $h = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]^T$ 为信道时域脉冲响应, L 为信道长度, W 为 $N \times L$ 的快速傅里叶变换矩阵, V 为加性高斯白噪声。

DCO-OFDM 系统接收导频信号为:

$$Y_p = X_p W_p h + V_p \quad (5)$$

其中, P 是子载波插入导频的个数,由选择矩阵 S 从接收信号里获得导频位置的对应数据,即 $Y_p = SY$, $X_p = SX$, $W_p = SW$, 并且 Y_p , X_p 和 W_p 为已知信号。在接收端对信道时域脉冲响应 h 进行估计,即可得到对应的信道频域脉冲响应: $H = Wh$ 。

压缩感知的系统模型为:

$$g = At + n \quad (6)$$

其中, g 为观测向量,维度为 $M \times 1$; A 是测量矩阵,维度为 $M \times N$ (M 为导频数目, N 为 DCO-OFDM 子载波数目); n 为噪声向量; t 为稀疏信号,维度为 $N \times 1$, t 中非零原子个数即为稀疏度 K ($K < M$, $M < N$),在压缩感知中稀疏信号 t 可以由重构算法进行求解。由于信道时域脉冲响应 h 满足稀疏信号特征,因此可以将水下可见光信道估计与压缩感知中稀疏信号重构问题结合,由式(5)和式(6)相对应,可得 $g = Y_p$, $A = X_p W_p$, 而 $t = h$, 即可通过重构算法进行信道估计。

2.2 MMP-DF 算法

MMP 算法为压缩感知中的一种重构算法,该算法结合组合树搜索模型从多条路径按序构建候选集并找到残差最小的候选集作为支撑集,可以避免 OMP 算法中因只选择一个候选集而陷入局部最优解的问题。MMP 算法分为广度优先多路径匹配追踪(MMP-BF)算法和深度优先多路径匹配追踪(MMP-DF)算法。由于 MMP-BP 算法在实际计算中复杂度较高,应用较少。因此,本文将 MMP-DF 算法与 DCO-OFDM 系统相结合进行水下可见光信道估计。在该方法中,候选支撑集按照一定路径及顺序进行搜索,当残差满足一定条件或者候选支撑集的数量 $N_{\max}$ 达到预定值即停止搜索,顺序化的搜索和对候选支撑集数量的限制可以严格控制 MMP-DF 算法的复杂度。当 $N_{\max} = 1$ 时, MMP-DF 算法等效于 OMP 算法;当 $N_{\max} = L$ 时,等效于

MMP-BF 算法(I 为每次迭代产生的子路径数)。MMP-DF 每次迭代按序将满足要求的原子加入候选支撑集中,因此该方法比 MMP-BF 复杂度低,同时在 $N_{\max}$ 较小时可以确保信号重构精度。MMP-DF 算法采用了模数策略的搜索顺序,在搜索过程中优先考虑有希望的路径及相关原子,第 i 个候选支撑集第 K 次迭代中原子选择的顺序满足以下关系:

$$i=1+\sum_{k=1}^K (c_k-1)I^{k-1} \quad (7)$$

其中, c_k 的取值表示观测矩阵 $\mathbf{A}$ 原子与残差相关的程度。 $c_k=1$ 时表示 $\mathbf{A}$ 中与残差最相关的原子; $c_k=2$ 时表示 $\mathbf{A}$ 中与残差次相关的原子,以此类推。如当 $I=2, K=4$ 时, $\Gamma_1^K=(c_1, c_2, c_3, c_4)=(1, 1, 1, 1)$ 为每次迭代选择出与残差最相关的原子加入支撑集。所有支撑集的搜索顺序和迭代顺序间的关系如表 1 所示, MMP-DF 算法流程如图 1 所示。

表 1 支撑集的搜索顺序和迭代顺序之间的关系

支撑集 i	每次迭代支撑集
搜索顺序	所选原子
1	(1, 1, 1, 1)
2	(2, 1, 1, 1)
3	(1, 2, 1, 1)
4	(2, 2, 1, 1)
5	(1, 1, 2, 1)
6	(2, 1, 2, 1)
$\vdots$	$\vdots$
16	(2, 2, 2, 2)

3 仿真与分析

DCO-OFDM 系统加直流偏置和削波处理会造成系统误码率(BER)降低^[13]。本文基于 DCO-OFDM 水下光通信系统分别对 LS、OMP 和 MMP-DF 算法进行仿真和性能对比。仿真参数操作如下:调制采用 4QAM,子载波数 $N=512$;以梳状导频方式插入,均方误差(MSE)作为估计精度衡量指标。 H_i 为真实信道频域响应, $\hat{H}_i$ 表示估计出的信道频域响应。MSE 可表示为:

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N (H_i-\hat{H}_i)^2 \quad (8)$$

本文针对不同导频数量和不同信道估计的算法进行仿真,对 MSE 和 BER 进行对比。当插入导频 $P=32$ 时,MSE 和 BER 如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可知,在水下 DCO-OFDM 通信系统中,低信噪比(SNR)条件时,由于信道噪声较大,造成 OMP 与 MMP-DF 算法中采样值的失真,使得这 2 种算法的 MSE 大于 LS 算法;随着 SNR 的增加,OMP 和 MMP-DF 算法的 MSE 远小于 LS 算法,2 种算法具有显著的

优越性。由图 3 可知,当 OMP 算法的 $BER=10^{-2}$ 时,MMP-DF 算法的 SNR 较 OMP 算法改善了 4.5 dB 左右。因此,MMP-DF 比 OMP 算法估计精度高。

本文增加导频数量进一步对 3 种算法进行分析。当 $P=74$ 时,仿真结果如图 4、图 5 所示。可以看出,当导频数量增加,传统 LS 算法估计性能并没有得到很大的改善,而 MMP-DF 与 OMP 算法估计性能均有所提高。同时,这 2 种算法估计性能逐渐接近,在 $SNR<35$ dB 时两者性能几乎一样,但是当 SNR 增大时,MMP-DF 算法 MSE 更小。从图 5 可知,在 $BER=3 \times 10^{-4}$ 时,MMP-DF 算法较 OMP 算法的 SNR 改善 4 dB 左右。并且当 $SNR=45$ dB 时,MMP-DF 算法的 $BER=8.5 \times 10^{-6}$,远低于 OMP 算法,因此使用 MMP-DF 算法进行估计具有绝对优势。

从上文可知,当 $P=32$ 和 $P=74$ 时,少于本系统根

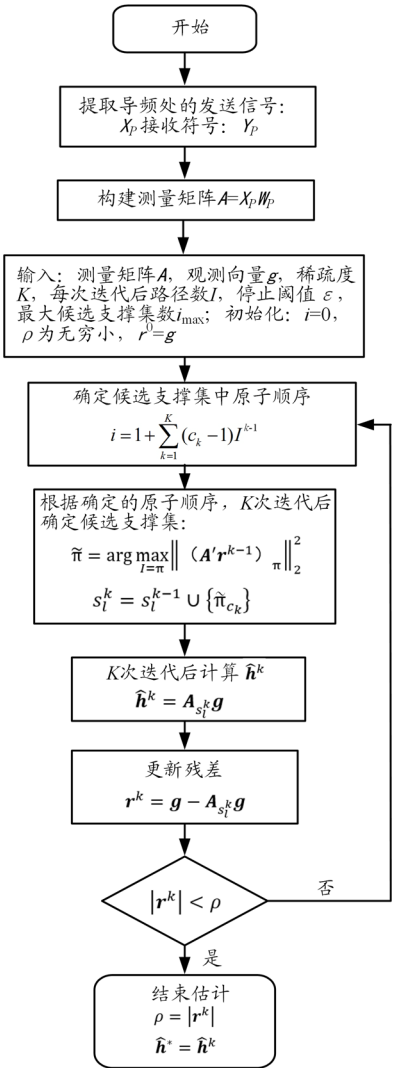


图 1 基于 MMP-DF 信道估计算法流程图

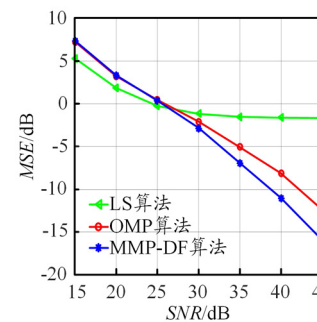


图 2 $P=32$ 时各算法 MSE 对比

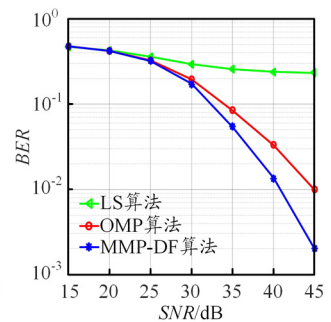
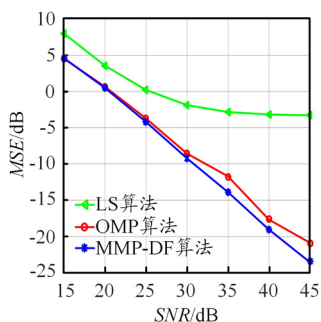
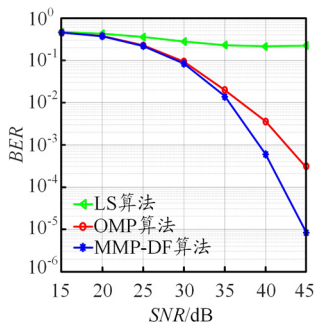
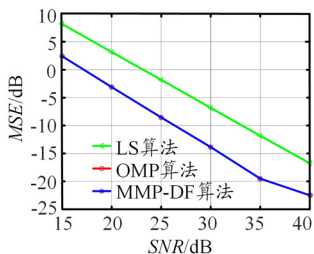
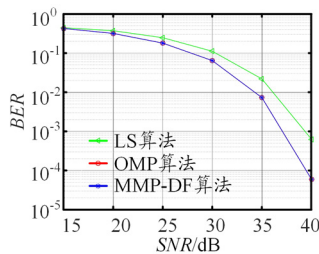


图 3 $P=32$ 时各算法 BER 对比

图4 $P=74$ 时各算法 MSE 对比图5 $P=74$ 时各算法 BER 对比

据奈奎斯特准则确定的最少导频数 86^[14], 因此 LS 算法估计性能极差。当 $P=104$ 时, 本文对 3 种算法进行仿真, 仿真结果如图 6、图 7 所示。可以看出, LS 算法估计性能比 $P=32$ 和 $P=74$ 时大大改善, 但此时 OMP 算法依然优于 LS 算法; 同时, 随着导频数量的增加, 使 OMP 算法增大了最优支撑集获得概率, 估计精度提高, 与 MMP-DF 算法的性能一致。

图6 $P=104$ 时各算法 MSE 对比图7 $P=104$ 时各算法 BER 对比

在上述仿真环境中, 本文通过运行时间对 OMP 和 MMP-DF 算法的复杂度进行分析。表 2 为 2 种算法在 DCO-OFDM 系统中进行信道估计时运行时间。由表 2 可知, MMP-DF 算法运行时间为 OMP 算法的 1.6 倍。由于 OMP 算法在每次迭代时只有一个支撑集, 而 MMP-DF 算法从多路径按次序建立多个候选集, 选取残差最小的候选集作为最终支撑集。因此, MMP-DF 算法虽然会提高算法的复杂度, 但也提高了获取正确支撑集的概率和信道估计精度。

表 2 不同算法运行时间

算法名称	运行时间(s)
OMP	20
MMP-DF	32

4 结束语

本文通过对水下可见光多径信道频域响应进行建模, 利用 IFFT 变换得到其对应时域脉冲响应, 提出

了 DCO-OFDM 系统的基于压缩感知 MMP-DF 的水下可见光信道估计方法, 可以有效降低系统的导频开销并提升估计精度。仿真结果表明: 在 DCO-OFDM 系统中, 当导频数目较少时 MMP-DF 算法在稀疏信道估计中性能最好; 随着导频数目增加 OMP 算法估计性能逐渐接近 MMP-DF 算法, 最终获得相同的估计结果。因此, 对于 DCO-OFDM 系统, 为节约频带利用率并保证系统误码率, MMP-DF 信道估计方法相对而言是最优的选择。

参考文献:

- [1] MA X, YANG F, LIU S, et al. Novel Compressive Sensing Based Channel Estimation for Wideband Underwater Visible Light Communication[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20–24, 2018, Kansas City, USA. Piscataway: IEEE, 2018: 1–6.
- [2] MENG J, YIN W, LI Y, et al. Compressive sensing based high resolution channel estimation for OFDM system [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 6(1): 15–25.
- [3] HE X, SONG R, ZHU W P. Pilot allocation for sparse channel estimation in MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2013, 60(9): 612–616.
- [4] LIU X, CHEN X, XUE L, et al. Channel estimation of OQAM/OFDM based on compressed sensing [J]. IEICE Transactions on Communications, 2017, E100-B(6): 955–962.
- [5] CAI T T, WANG L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise [J]. IEEE Transactions on Information theory, 2011, 57(7): 4680–4688.
- [6] UWAECHIA A N, MAHYUDDIN N M. A review on sparse channel estimation in OFDM system using compressed sensing [J]. IETE Technical Review, 2017, 34(5): 514–531.
- [7] ZU B K, XIA X Y, XIA K W, et al. Channel estimation on 60 GHz wireless communication system based on subspace pursuit [J]. Journal of Computation Information Systems, 2014, 10(24): 10565–10572.
- [8] KWON S, WANG J, SHIM B. Multipath matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2986–3001.
- [9] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE access, 2016, 4(1): 1518–1547.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ZHANG T, GUO S, CHEN H, et al. Enhancing the bit error rate of indoor visible light communication systems using adaptive channel estimation algorithm[J]. IET Communications, 2014, 9(4): 501–507.
- [13] 张明轩. 无线可见光通信关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [14] 何雪云. 基于压缩感知的无线 OFDM 信道估计及导频优化研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.