

基于叠加训练序列的 ACO-OFDM 信道估计

杨顺峰, 姜 斌, 包建荣, 刘 超

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:现有光信道估计方法主要存在复杂度高、估计性能不突出等缺陷。为此,在简要分析 ACO-OFDM 原理的基础上,提出了一种适用于 ACO-OFDM 系统的叠加训练序列信道估计方法。通过对接收信号一阶统计平均的处理,避免了因接收信号多变而引起的检测效果不稳定的缺陷,且具有复杂度低,估计性能好等优势。实验仿真及分析表明,较传统最小二乘法,提出的叠加训练序列信道估计方法有高于 20 dB 的性能增益,适合应用于无线光传输高精度信道估计。

关键词:非对称限幅光 正交频分复用;叠加训练序列;信道估计;一阶统计平均

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1001-9146(2017)04-0025-05

0 引 言

非对称限幅光-正交频分复用(Asymmetrically Clipped Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ACO-OFDM)是由正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)发展而来。由文献[1]可知,ACO-OFDM 解决了光频分复用平均光功率较高等问题。信道估计是 ACO-OFDM 系统有效工作的关键,可分为盲信道估计、导频辅助的信道估计和叠加训练序列的信道估计。盲信道估计不必插入前导,但估计精度不高;导频辅助信道估计是通过插入前导符号,依次估计信息各位置处的信号响应系数,精度提高但降低了系统频谱利用率^[2];相对前两种信道估计方法,叠加训练序列的信道估计方法精度较高,易使传输系统获得较高的传输效率,还可兼顾时间及信道容量等信道因素^[3]。本文就 ACO-OFDM 系统信号均值大于 0 的特点,提出了改进的叠加训练序列信道估计方法。将部分叠加训练序列和改进后的最小均方误差算法结合起来实现了系统的信道估计。相较于传统的最小二乘法信道估计,不仅降低了算法复杂度,且大大提升了信道估计性能。

1 ACO-OFDM 调制原理

光强调制的通信系统中,因光强不能有负值,故需利用新的方法来解决双极性 OFDM 信号的问题。ACO-OFDM 技术是人为地把原 OFDM 信号中小于 0 的部分截去,只留正值^[4]。ACO-OFDM 采用非对称限幅,设 ACO-OFDM 基带信号在无循环保护前缀情况下的时域抽样为:

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{L-1} X_m \exp\left(\frac{j2\pi km}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

其中, $x(k)$ 为时域抽样值序列, k 为抽样序列指数, N 为子载波数, X_m 为经映射后调制到第 m 个子载波对应的频域信息数据。

当信号具备 Hermitian 对称结构时,序列 X 表示为:

$$X = (X_0, X_1, \dots, X_m, \dots, X_{N-1}) = (X_0, X_1, \dots, X_{(N/2)-1}, X_{(N/2)-1}^*, \dots, X_1^*) \quad (2)$$

收稿日期:2016-09-14

基金项目:浙江省自然科学基金(LZ14F010003);浙江省公益性技术应用研究计划资助项目(2015C31103)

作者简介:杨顺峰(1994—),男,浙江诸暨人,硕士研究生,光无线通信技术。通讯作者:姜斌,高级实验师, E-mail:jiangbin@hdu.edu.cn.

其中, X^* 为 X 的共轭序列, 经快速傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 后, 选择奇数子载波传输调制数据, 并将偶数子载波数据置 0, 则序列 X 可表示为:

$$X = (0, X_1, 0, \dots, X_{(N/2)-1}, 0, X_{(N/2)-1}^*, \dots, 0, X_1^*) \quad (3)$$

上述信号经非对称限幅并解调后, 奇数位信号幅值减为一半, 而偶数位信号幅值保持不变. 信号通过非对称限幅处理能使 ACO-OFDM 系统减小所需光功率, 使产生的非线性影响减小.

ACO-OFDM 系统依次对信号进行 Hermitian 对称及非对称限幅处理, 确保经 IFFT 后的输出信号为实调制符号信号, 且信号以单极性形式进入光调制器. 故系统不存在丢失信号数据的情况, 并降低了信号的光功率敏感性^[5].

2 ACO-OFDM 系统的信道估计技术

信道估计主要用于估计信道模型参数, 是信号进行后续步骤的前提. 因在 ACO-OFDM 系统中, 进行 IFFT 前的输入向量需具备共轭对称性, 同时仅奇载波存有数据, 偶载波为 0. 故基于导频辅助的信道估计方法并不适用. 为解决该问题, 本文改进了传统叠加训练序列的信道估计方法. 所得方法不仅算法简单、精度高, 且具备较高系统传输效率, 还拥有可灵活分配时间、带宽和功率等优势^[6]. 该方法包括 3 个部分: 生成单极性非负周期实序列、生成本地矩阵及完成信道估计的实现方法. 采用叠加训练序列的 ACO-OFDM 系统时域离散模型结构如图 1 所示.

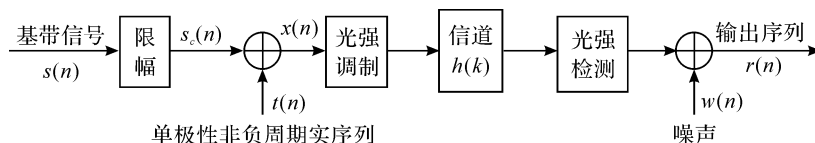


图 1 基于叠加训练序列的 ACO-OFDM 系统的时域离散模型

由时域离散模型可知, 待发送信号序列 $x(n)$ 为:

$$x(n) = s_c(n) + t(n) \quad (4)$$

此时, 所得接收信号为:

$$r(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h(k)x(n - D_k) + w(n) \quad (5)$$

其中, D_k 为第 k 条路径与首条路径的时间差, $h(k)$ 为信道第 k 条路径的响应系数, L 为信道时域脉冲响应的长度, 即多径的数目, $w(n)$ 为加性高斯白噪声.

2.1 单极性非负周期实序列的生成

单极性非负周期实序列依次通过对复数序列的共轭对称、IFFT、并串变换、限幅和拆分组合等方式生成. 具体过程如下:

输入的 PN 序列通过并串变换和 QAM 映射, 得复向量 p . 再对所得复向量完成元素的共轭对称, 产生输入向量 $p'(n)$, 即为:

$$p'(n) = \text{conj}(p'(N-n)), n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

其中, $\text{conj}(\cdot)$ 表示求复共轭. 当 n 为奇数时, $p'(n) = p[(n-1)/2]$; 而当 n 为偶数时, $p'(n) = 0$. 生成输入向量后, 再依次执行 IFFT、限幅和序列拆分组合等处理, 得到一个单极性非负实序列. 此时的序列长度为 Q . 最后, 将该序列重复 N_Q 次, 即得所需训练序列 $t(n)$. 由此, 避免了因限幅和叠加作用引起的数据序列和训练序列的丢失.

2.2 本地矩阵的生成

输入的基带信号满足均值为 0 的正态分布为 $s(n) \sim N(0, \sigma^2)$. 经限幅后, ACO-OFDM 时域信号 $s_c(n)$ 的均值为 $\sigma/\sqrt{2\pi}$. 令 $b = E[s_c(n)] = \sigma/\sqrt{2\pi}$, 由此生成 $Q \times Q$ 阶元素全为 b 的实数矩阵 B . 而循环矩阵 T' 由训练序列作为相应元素构成, 即

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} t(0) & t(1) & t(2) & \cdots & t(Q-1) \\ t(Q-1) & t(0) & t(1) & \cdots & t(Q-2) \\ t(Q-2) & t(Q-1) & t(0) & \cdots & t(Q-3) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t(1) & t(2) & t(3) & \cdots & t(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时,可构造本地矩阵 $\mathbf{T} = \mathbf{B} + \mathbf{T}'$,其表达式为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t(0) + b & t(1) + b & t(2) + b & \cdots & t(Q-1) + b \\ t(Q-1) + b & t(0) + b & t(1) + b & \cdots & t(Q-2) + b \\ t(Q-2) + b & t(Q-1) + b & t(0) + b & \cdots & t(Q-3) + b \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t(1) + b & t(2) + b & t(3) + b & \cdots & t(0) + b \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, b 不仅与接收信号时域统计特性有关,还受功率分配因子 P 的约束^[7]. 具体可表示为:

$$b = \sigma\sqrt{1-P}/(\sqrt{2\pi}) \quad (9)$$

据式(9)可知, P 越大,式(9)的分子部分相应变小,从而导致 b 的降低.

2.3 信道估计算法

在信道估计时,需将接收信号 $r(n)$ 分为 Q 路,每路依次对其 Q 倍下进行信号采样. 之后对每路采样信号分别求均值,得接收信号的量化序列 $y(n)$,即有:

$$y(n) = E[r(kQ + n)], n = 0, 1, \cdots, Q-1, k = 0, 1, \cdots, N_Q - 1 \quad (10)$$

结合式(5),将其变换为:

$$y(n) = E\left[\sum_{l=0}^{L-1} h(l)s_c(kQ + n - l)\right] + E\left[\sum_{l=0}^{L-1} h(l)t(kQ + n - l)\right] + E[w(kQ + n)], n = 0, 1, \cdots, Q-1, k = 0, 1, \cdots, N_Q - 1 \quad (11)$$

其中, N_Q 为序列重复次数;因高斯白噪声序列均值为 0. 故式(11)中 $E[w(kQ + n)]$ 为 0;且由上述时域信号均值可知: $b = E[s_c(n)] = \sigma/\sqrt{2\pi}$. 故式(11)可化简为:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)[B + t(kQ + n - l)], n = 0, 1, \cdots, Q-1, k = 0, 1, \cdots, N_Q - 1 \quad (12)$$

当且仅当 $Q = L$, 且其系数矩阵满秩时,式(12)具有唯一解. 但信道阶数 L 只能为估计值的上限,此时可令 Q 等于信道阶数所能取得的上限值. 将式(12)表示为:

$$\mathbf{Th} = \mathbf{y} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{h} = [h(Q-1), h(Q-2), \cdots, h(0)]^T$, $\mathbf{y} = [y(Q-1), y(Q-2), \cdots, y(0)]^T$. 并对 $\mathbf{y}$ 作无偏估计,得:

$$\hat{y}(n) = 1/N_Q \sum_{k=0}^{N_Q-1} r(kQ + n), n = 0, 1, \cdots, Q-1 \quad (14)$$

最后,结合式(13)、式(14)可得信道估计结果如下:

$$\mathbf{h} = \mathbf{T}^{-1}\hat{\mathbf{y}} \quad (15)$$

3 仿真分析

为了体现本文方法的性能优越性,用传统的 LS 算法进行信道估计,取信噪比 SNR 为 0 ~ 30 dB,输入信号为复高斯信号,且每个信号的子载波数为 32,利用多组求平均的方法得到估计结果. 信道估计的效果通常通过估计结果的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 进行评价,仿真结果如图 2 所示.

采用本文提出的叠加训练序列的 ACO-OFDM 信道估计进行仿真. 其均方误差计算式如下:

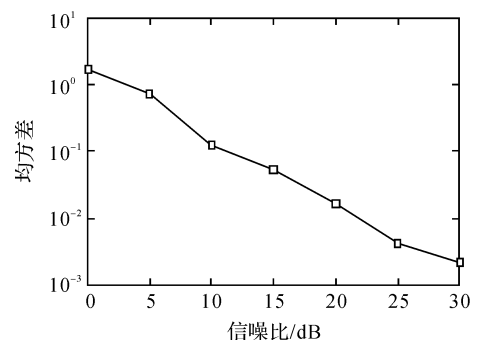


图2 LS 算法的信道估计结果图

$$M = (\pi - 1) / \left\{ S \cdot N [(\pi - 2)P + 1 + 2\sqrt{P} \sqrt{1 - P}] \right\} \quad (16)$$

其中, M 为信道估计的均方误差, 即 MSE; S 为信道的信噪比, 即 SNR.

在具体仿真中, 取 SNR 为 5 ~ 25 dB, 功率分配因子 P 取值分别取 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 取子载波数为定值 $N = 512$, 可得功率分配因子对信道估计性能影响的仿真结果如图 3 所示. 同理, 取 SNR 为 5 ~ 25 dB, 子载波数 N 分别取 128, 256, 512, 1 024, 2 048, 取 $P = 0.7$, 得到子载波数目对信道估计性能影响的仿真结果如图 4 所示.

图 3 中, 通过式(16)的理论分析可知, 当 SNR 和 N 不变, $P = 0.7$ 左右时, MSE 值最小, 即此时的信道估计准确率最优. 图 3 中也可看出, 随 P 值变大, 均方误差呈现先变大后减小的趋势. 另外, 当信噪比低于 15 dB 时, 均方误差落差较大, 而当信噪比高于 15 dB 后, 均方误差趋于平稳. 其原因在于, 当数据信号叠加上训练序列后, 数据信号与训练序列间的影响是关联存在的. 当信噪比大于 15 dB 后, 训练序列与数据信号相对功率基本保持不变. 且因训练序列能量越高, 信道估计性能就越好, 故此时数据信号就成了影响信道估计性能的主要因素.

由图 4 可知, 添加子载波数越多, 系统的信道估计均方误差就越小. 这是因为子载波数越大, 叠加的训练序列就越长, 所携带数据在一阶统计平均处理时, 所得均值就越靠近整体服从的统计分布. 此时数据序列对训练序列的影响减小, 所得信道估计精度有所提高. 故在信道估计时, 可用增加少量算法复杂度的微小代价, 来改善信道估计精度, 同时也能减小信噪比对信道估计性能的影响.

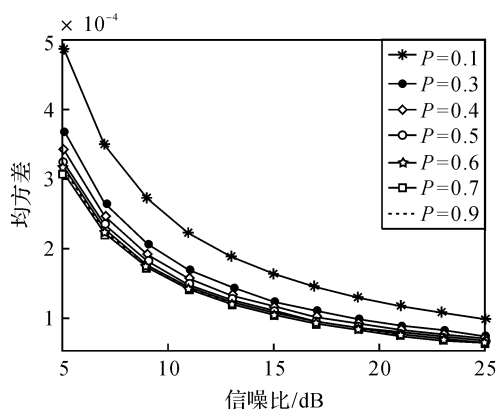


图 3 功率分配因子与信道估计 MSE 的关系图

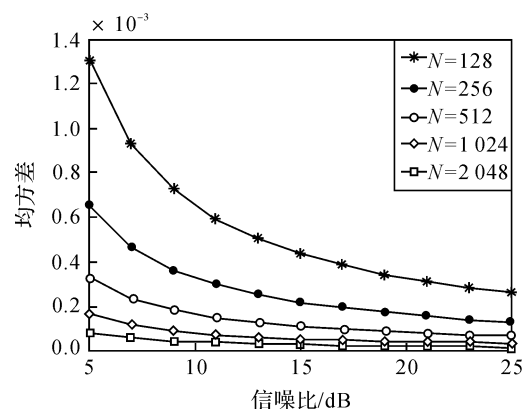


图 4 子载波数目与信道估计 MSE 的关系图

通过对比图 3、图 4 与图 2 可知, 传统 LS 算法的 MSE 基本处于 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 级, 而本文的信道估计方法的 MSE 基本处于 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 级, 本文方法具有更高的精度; 在相同的 MSE 情况下, 本文方法比传统 LS 算法可提高信噪比 20 dB 以上. 同时, 本文方法还可以通过调整功率分配因子和子载波数目等参数来提高信道估计精度, 显得更加灵活.

4 结束语

本文主要提出了一种适用于 ACO-OFDM 系统的信道估计方法. 为使本文方法适用于光强不能为负值的光强调制, 在原有叠加训练序列信道估计方法基础上, 改善了训练序列及本地矩阵的生成方法. 与传统信道估计方法相比, 更易实现且精度更高、估计性能更好; 还可通过调节功率分配因子提高估计精度, 并使整个系统具有一定的移动性. 但由于功率分配因子的选择缺乏实时性和连续性, 有待进一步研究.

参考文献

- [1] 戈勇华, 罗仁泽, 党煜蒲, 等. ACO-OFDM 系统叠加训练序列时间同步方法[J]. 光通信研究, 2011(6): 38-40.
- [2] 张继东, 郑宝玉. 基于导频的 OFDM 信道估计及其研究进展[J]. 通信学报, 2003, 24(11): 116-123.
- [3] KIM B W, JUNG S Y. Time-interpolated channel estimation for increasing channel capacity of superimposed

- training-based precoding schemes[J]. IET Communications, 2015,9(7):933-939.
- [4] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of aco-ofdm, dco-ofdm and ado-ofdm in im/dd systems[J]. Journal of lightwave technology, 2013,31(7):1063-1072.
- [5] YESILKAYA A, ALSAN H F, MIRAMIRKHANI F, et al. Modeling of visible light channels and performance analysis of ACO-OFDM[C]//2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2015:2102-2105.
- [6] 李明慧. 空间光 ACO-OFDM 通信系统信道估计技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2014.
- [7] 何纯全, 窦高奇, 高俊, 等. 基于叠加训练序列的低复杂度事变信道估计方案[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2194-2199.

Superimposed Training Sequence Based ACO-OFDM Channel Estimation

YANG Shunfeng, JIANG Bin, BAO Jianrong, LIU Chao

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: In broadband wireless optical communications, the multiple carrier asymmetrically clipped optical-orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) modulation can be adopted to adapt the light intensity modulation(LIM). So the channel estimation suited to the LIM can be used for the fading space optical communication channel and the ACO-OFDM modulation. Based on the briefly analysis of the principle of the ACO-OFDM modulation, a superimposed training sequence based channel estimation for the ACO-OFDM modulation is proposed. By first-order statistical averaging of the received signals, it can avoid the deficiency of the unstable detection effect caused by the variance of the received signals, and so on. Finally, the proposed ACO-OFDM channel estimation algorithm is simulated to verify the good channel estimation effect approaching to the ideal performance. In addition, the performance of the channel estimation can be improved by adjusting the power allocation factor, the number of the sub-carriers, and so on. Therefore, the proposed channel estimation algorithm is very suitable for the high resolution channel estimation applications in the wireless optical transmissions.

Key words: asymmetrically clipped optical-orthogonal frequency division multiplexing; superimposed training sequence; channel estimation; first-order statistical average

(上接第 5 页)

A New Chaotic System and Its Coexisting Attractors

SHI Chuanbao, WANG Guangyi, ZANG Shouchi

(School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: In order to further study the characteristics of chaotic system, a three-dimensional continuous chaotic system with multi-stability is proposed. The influence of parameters on the dynamic characteristics of the system is introduced by equilibrium point, Lyapunov exponent, bifurcation diagram and dynamic map. When parameters are fixed, the Lyapunov exponent spectrum of varying initial value is analyzed, and a variety of coexisting attractors are obtained. The simulation circuit is designed to realize the system, and the experimental results are in agreement with the simulation results. The NIST random test is carried out on the two value sequence of the chaotic system, which is better than the Lorenz system for the random properties. It can be used as a random signal source for information encryption and secure communication.

Key words: 3D chaotic system; dynamic map; coexisting attractor