

基于伪对称序列的 OFDM-PON 系统载波间 干扰抑制算法

路振龙 王军华 孙彦赞 汪敏 方勇

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

摘要 受多种光纤非线性因素的影响,基于正交频分复用(OFDM)技术的无源光网络(PON)会受到较为严重的载波间干扰(ICI)。为了抑制 OFDM-PON 系统中的上述问题,构造了一种新的伪对称序列(PST),并提出将该问题转化为求解两个 Toeplitz 子系统,然后对其中一个子系统的解进行预处理,将其转化为另一子系统的输入,之后利用最小二乘准则对子系统求解,从而达到抑制载波间干扰的目的。在算法实现过程中,利用所构造序列的伪对称特性和快速傅里叶变换(FFT),避免了高阶矩阵直接求逆,从而提升了算法实时性。仿真结果表明,该方法不仅能够有效抑制 OFDM-PON 系统的载波间干扰,而且能有效提升该算法的实时性能。

关键词 光通信; OFDM-PON; 伪对称训练序列; 载波间干扰抑制; 信道均衡算法; 高阶矩阵求逆

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1006002

Inter-Carrier Interference Suppression Algorithm for OFDM-PON Systems Based on Pseudo-Symmetrical Training Sequences

Lu Zhenlong Wang Junhua Sun Yanzan Wang Min Fang Yong

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The inter-carrier interference (ICI) in passive optical network (PON) systems based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology is resulted in seriously by kinds of fiber nonlinear factors. An algorithm based on the pseudo-symmetrical training (PST) sequences is proposed to solve the problem; two Toeplitz sub-systems which are transformed from the mentioned problem are to be solved. The input of the second sub-system is achieved by pre-processing the first sub-system. As a result, the output of the second sub-system can be achieved based on least square (LS) criterion. At last, the suppression of ICI can be achieved. The characteristic of PST sequences and fast Fourier transform (FFT) are introduced into the proposed algorithm refraining from traditional high order inversion. As a result, the real-time performance of the calculation is improved. Simulation results show that the proposed algorithm for OFDM-PON systems can not only suppress ICI, but also improve the real-time performance dramatically.

Key words optical communications; OFDM-PON; pseudo-symmetrical training sequences; inter-carrier interference suppression; equalization algorithm; high-order matrix inversion

OCIS codes 060.2330; 060.4370; 060.4510; 060.7140; 190.4410

1 引言

近年来,正交频分复用(OFDM)技术以其易于

均衡、对于光纤传输过程中色度色散(CD)和偏振模色散(PMD)影响的良好抑制作用以及其对基于数

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61271213, 61132004, 60972056)、上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放基金(SKLSFO2012-03)

作者简介: 路振龙(1989—),男,硕士研究生,主要从事非线性均衡方面的研究。E-mail: luzlon@shu.edu.cn

导师简介: 方勇(1964—),男,博士,教授,主要从事通信信号处理、盲信号处理等方面的研究。

E-mail: yfang@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

字信号处理(DSP)实现的兼容性,成为下一代光接入网络中备受关注的技术之一。同时,由于点到多点无源光网络(PON)拓扑结构具有总体容量大、数据调度粒度小的特点,能够满足全球超大规模光纤到户(FTTH)部署的业务需求^[1-2],使得基于OFDM的PON毫无疑问地成为未来光接入网络中的一个重要角色^[3-5]。

然而,基于OFDM的通信系统要求各子载波间保持严格正交,载波的频率偏差、相位噪声以及同步误差会给系统带来非常严重的影响^[6-9]。其中对频率偏差敏感是OFDM系统的主要缺点之一,若不采取有效措施减小这种干扰引起的载波间干扰(ICI)问题,将会对系统性能带来非常严重的地板效应,即无论如何增加信号的发射功率,也不能显著地改善系统的性能。在PON之中,由于光纤器件的非线性^[4]及色散^[10]等原因,使得这一问题尤为突出。目前OFDM-PON系统中对于ICI问题的讨论和分析多基于光OFDM系统^[11-13]。消除相位噪声引起的ICI主要通过提高本地振荡器的性能实现^[13],消除同步误差带来的ICI则主要通过时域实值训练序列^[8],频率偏移引起的ICI目前主要通过利用循环前缀来完成频率估计。本文主要讨论由频率偏移导致的ICI问题。目前光OFDM系统中主要采用基于保护间隔的方法消除频偏产生的ICI干扰,主要有迫零均衡^[14-17]和频域均衡算法^[18]。迫零均衡算法首先使用迫零方法抽取信道信息,之后使用得到的信息利用最小二乘(LS)或最小均方误差(MMSE)准则计算均衡参数,进而消除ICI对系统

性能的影响;频域均衡算法则将已知训练序列应用于信道估计算法,使用单抽头滤波阵列以均衡包括ICI在内的非线性衰减及相位旋转等问题,其中抽头系数是由基于最小均方(LMS)自适应算法迭代更新的。但是这些算法的共同缺点是复杂度太高,不能满足OFDM-PON系统的上(下)行速率达到100 Gb/s(40 Gb/s)目标的需求,进而使得系统实时性能下降。

本文提出一种基于伪对称训练序列预处理的均衡算法,该算法以较高的计算效率有效克服了ICI。在OFDM-PON的信道模型分析的基础上给出ICI影响的模型;通过构造特殊的伪对称训练序列将OFDM-PON系统的均衡问题转化为两个Toeplitz子系统求解问题,并对其中一个子系统的解进行预处理,将其转化为另一子系统的输入,并利用LS准则对该子系统求解。本文所提出的抑制ICI的均衡算法利用伪对称性和快速傅里叶变换(FFT)简化了Toeplitz子系统求解运算,避免了传统算法中的高阶矩阵求逆运算,从而提升了计算实时性能。仿真结果表明了该抑制算法即使在频率偏移为频率间隔的3%左右时,仍可以保持较好的系统性能。

2 OFDM-PON 数学模型及载波间干扰分析

2.1 OFDM-PON 信道数学模型

OFDM-PON网络如图1的模型所示。

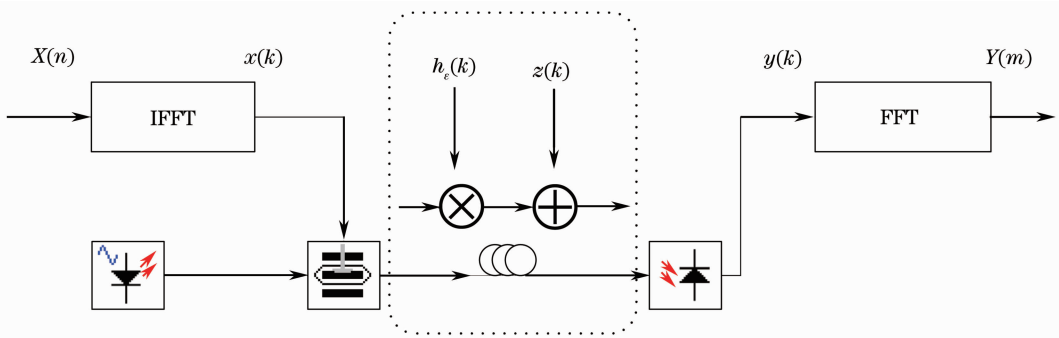


图1 OFDM-PON 信道模型

Fig. 1 Channel model for OFDM-PON

对于有 N 个子载波的基带OFDM系统,用 $X(n)$ 表示发送端信号在第 n 个子载波上的频域信号, $x(k)$ 表示频域信号对应的第 k 个子载波上的时域信号,有

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) W_N^{-nk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (1)$$

式中 j 为虚数, $W_N = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right)$ 。

第 k 个子载波上第 i 个符号可表示为 $x_i(k)$, $x_i(k)$ 经过光纤信道之后, 将收到的信号记为 $y_i(k)$, 并有

$$y_i(k) = h_i(k)x_i(k) + n_i(k), \quad (2)$$

式中 $n_i(k)$ 是由光放大器等器件带来的光噪声; $h_i(k)$ 是第 k 个子载波上的第 i 个符号上的信道特性, 由于光信道特性的变化缓慢, 因此在一些 OFDM 符号块之内信道传输函数可以认为是常数。从而 $h_i(k)$ 可记为^[19-20]

$$h_i(k) = \exp(j\phi_i)c_k\lambda_k = \exp(j\phi_i)\exp\left(j\frac{\pi c}{f_{LD}^2}D_i f_k^2\right) \times \exp\left(j\frac{2\pi k}{N}\epsilon T\right)\lambda_k, \quad (3)$$

式中 ϕ_i 是与 OFDM 符号有关相位噪声, f_{LD} 是本地光振荡器频率, c 是光在真空中的速度, D_i 是色散因子, f_k 是第 k 个子载波的频率, ϵ 为归一化的载波频率偏移, λ_k 是与子载波频率有关的幅度因子, T 为 OFDM 符号周期, c_k 是与子载波频率有关的非线性相位影响因子, 表示为 $c_k = \exp\left(j\frac{\pi c}{f_{LD}^2}D_i f_k^2\right)\exp\left(j\frac{2\pi k}{N}\epsilon T\right)$ 。暂不考虑相位噪声的影响, 在一个 OFDM 符号上, ϕ_i 可认为是常数, 从而(2)式写为

$$y_i(k) = \exp(j\phi_i)c_k\lambda_k x_i(k) + n_i(k). \quad (4)$$

若在某个特定的 OFDM 符号考虑(4)式, 则可以暂时将(4)式写为

$$y(k) = \exp(j\phi_i)c_k\lambda_k x(k) + n(k), \quad (5)$$

将 $y(k)$ 经过 FFT, 得到 $Y(m)$:

$$Y(m) = \sum_{k=0}^{N-1} y(k)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}mk\right), \quad 0 \leq m \leq N-1. \quad (6)$$

2.2 频率偏移产生的载波间干扰

OFDM-PON 系统由频率偏移产生 ICI 的主要原因包括载波频率偏移产生的 ICI 以及采样频率偏移产生的 ICI^[21]。在通常情况下, 由采样频率偏移引起的 ICI 是很小的, 对 OFDM 系统性能的影响将非常有限, 故可以不考虑采样频率偏移引起的 ICI 问题。本文主要考虑由载波频率偏移引起的 ICI。具体分析如下:

发送序列为 $x(n)$, 其经过数/模(D/A)转换后为 $x(t)$, 将该信号上变频到频率 f_c 上, 这样接收到的信号可表示为

$$r(t) = h(t)x(t)\exp(j2\pi f_c t) + n(t). \quad (7)$$

在接收端, 由于频率偏移的存在, 下变频之后的信号为

$$y(t) = r(t)\exp[-j2\pi(f_c - \Delta f_c)t] = h(t)x(t)\exp(j2\pi\Delta f_c t) + z(t), \quad (8)$$

式中 $z(t) = n(t)\exp[-j2\pi(f_c - \Delta f_c)t]$ 。从而, 在模/数(A/D)转换之后的信号为

$$y(k) = h(k)x(k)\exp\left(j2\pi\Delta f_c \frac{k}{N}T\right) + z(k). \quad (9)$$

考虑到(5)式, (9)式可写为

$$y(k) = \exp(j\phi_i)c_k\lambda_k x(k)\exp\left(j2\pi\Delta f_c \frac{k}{N}T\right) + z(k). \quad (10)$$

2.3 OFDM-PON 系统载波间干扰表示及消除方法

对 2.1 节的系统模型进一步分析, 可以得到系统的 ICI 模型。将(10)式代入(6)式, 并记 $h_k = c_k\lambda_k \exp\left(j2\pi\Delta f_c \frac{k}{N}T\right)$ 有

$$\begin{aligned} Y(m) &= \sum_{k=0}^{N-1} \left[\exp(j\phi_i)c_k\lambda_k x(k)\exp\left(j2\pi\Delta f_c \frac{k}{N}T\right) + z(k) \right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}mk\right) = \\ &= \exp(j\phi_i) \sum_{k=0}^{N-1} h_k x(k)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}mk\right) + Z(m) = \exp(j\phi_i) \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n \exp\left(j\frac{2\pi}{N}nk\right) \right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}mk\right) + \\ &= \exp(j\phi_i) x_m^U H_0 + \underbrace{\exp(j\phi_i) \sum_{n=1}^{N-1} x_{m-n}^U H_n}_{\text{ICI}} + Z(m), \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k\lambda_k \exp\left(j2\pi\Delta f_c \frac{k}{N}T\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right) \\ x_{m-n}^U = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\exp\left[-j\frac{2\pi}{N}(m-n)k\right] \right\} = \frac{1}{N} X(m-n) \end{cases}. \quad (12)$$

(11)式中的三项分别是接收到的有用信息、ICI 及加性噪声。进一步处理(11)式,则可以将其写为如下两种矩阵形式:

$$\mathbf{y}^U = \mathbf{X}^U \cdot \mathbf{h}^U + \mathbf{e}, \quad (13)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{H}' \cdot \mathbf{x}' + \mathbf{e}, \quad (14)$$

(13)、(14)式为(11)式不同的变形,从而有 $\mathbf{y}' = \mathbf{y}^U$, 且

$$\mathbf{y}' = \mathbf{y}^U = [\exp(-j\phi_i)Y(0), \exp(-j\phi_i)Y(1), \dots, \exp(-j\phi_i)Y(N-1)]^T, \quad \mathbf{h}^U = [H_0, H_1, \dots, H_{N-1}]^T,$$

$$\mathbf{e} = [\exp(-j\phi_i)Z(0), \exp(-j\phi_i)Z(1), \dots, \exp(-j\phi_i)Z(N-1)]^T, \quad \mathbf{x}' = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T.$$

\mathbf{X}^U 为 Toeplitz 矩阵,并考虑到

$$\begin{cases} x_{m-n}^U = x_{N+m-n}^U \\ x_{-k}^U = x_{N-k}^U \end{cases}, \quad (15)$$

于是有

$$\mathbf{X}^U = [x_{m-n}^U]_{m,n=0}^{N-1} = \begin{bmatrix} x_0^U & x_{-1}^U & \dots & x_{-(N-1)}^U \\ x_1^U & x_0^U & \dots & x_{-(N-2)}^U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1}^U & x_{N-2}^U & \dots & x_0^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0^U & x_{N-1}^U & \dots & x_1^U \\ x_1^U & x_0^U & \dots & x_2^U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1}^U & x_{N-2}^U & \dots & x_0^U \end{bmatrix}. \quad (16)$$

\mathbf{H}' 为 Toeplitz 矩阵,记 $h'_n = \frac{1}{N}H_n$, 并考虑到

$$\begin{cases} H_{m-n} = H_{N+m-n} \\ H_{-k} = H_{N-k} \end{cases}, \quad (17)$$

从而

$$\begin{cases} h'_{m-n} = h'_{N+m-n} \\ h'_{-k} = h'_{N-k} \end{cases}, \quad (18)$$

于是有

$$\mathbf{H}' = [h'_{m-n}]_{m,n=0}^{N-1} = \begin{bmatrix} h'_0 & h'_{-1} & \dots & h'_{-(N-1)} \\ h'_1 & h'_0 & \dots & h'_{-(N-2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h'_{N-1} & h'_{N-2} & \dots & h'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_0 & h'_{N-1} & \dots & h'_1 \\ h'_1 & h'_0 & \dots & h'_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h'_{N-1} & h'_{N-2} & \dots & h'_0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

为消除 OFDM-PON 系统 ICI 问题,从(13)和(14)式的关系,可以看出,(19)式可以由(13)式的计算结果 \mathbf{h}^U 通过预处理得到, \mathbf{h}^U 是可以由训练序列

信息得到的信道特性向量。这样,为了得到消除 ICI 后的有用信息 \mathbf{x}' ,可以根据 LS 准则,在训练序列或导频信息的基础上,求解出 \mathbf{h}^U 的估计值,进而

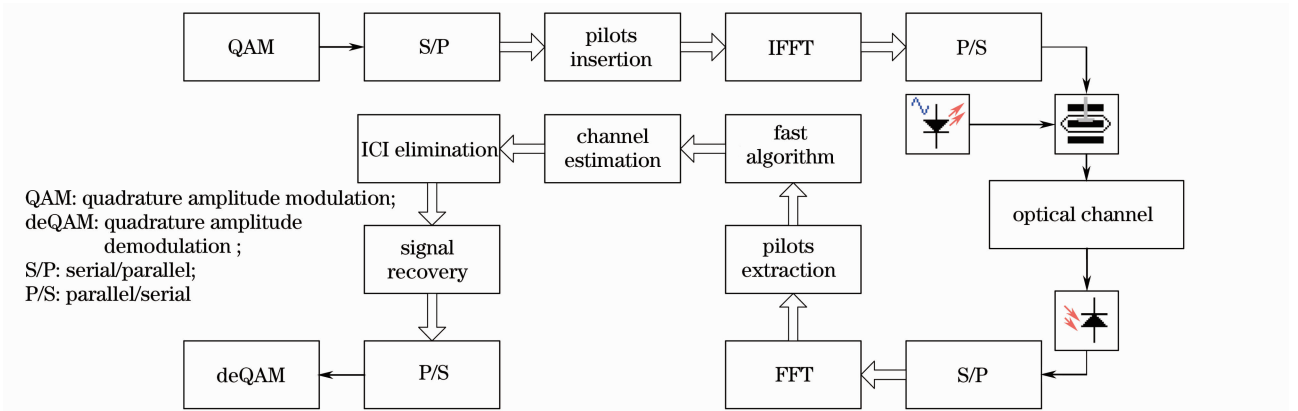


图 2 采用均衡算法抑制 ICI 的收发机结构框图

Fig. 2 Transceiver structure diagram for suppressing ICI using equalization algorithm

获得(19)式的近似表示,最终通过信道均衡的方法得到消除 ICI 扰后的有用信息 \mathbf{x}' 。由于(16)式和(19)式为 Toeplitz 矩阵,这样对于有用信息 \mathbf{x}' 的求解转化为了对两个 Toeplitz 子系统求解的问题。图 2 是采用均衡算法消除 ICI 的收发机结构框图。该图在插入导频模块中采用梳状导频方式插入所提出的伪对称结构序列,并与导频提取的结果比较,进而使用快速算法计算信道信息,根据信道信息求解 Toeplitz 系统,并最终通过均衡完成 ICI 的抑制。

3 基于伪对称序列预处理的均衡算法

由此可见,在进行信道均衡之前,需要在训练序列信息已知的条件下,求解(13)式。目前针对 Toeplitz 系统的求解有两种主要的方法:直接方法和迭代方法。直接方法主要基于递归的思想求解^[22-23],其算法复杂度为 $O(N^2)$,在文献[24]中提

出的超快算法可将算法复杂度降为 $O(N \lg^2 N)$ 。基于迭代方法的求解方法主要包括共轭梯度算法(CG)及双共轭梯度算法(BCG)等,该类算法通过利用 FFT 使得算法复杂度有所降低,然而其对 Toeplitz 矩阵的要求较为苛刻,使得其在应用时面临困难。同时,由于其并不总是收敛的,不能保证系统均衡的有效性。

3.1 伪对称序列的构造及 Toeplitz 子系统求解算法

为保证计算的收敛性及系统均衡的有效性,考虑采用定理 1 所给出的求解方法^[25],该方法通过利用 FFT 和矩阵的对称性质,极大地提升了计算实时性。

定理 1 若 \mathbf{A} 为可逆 Toeplitz 循环矩阵, $\mathbf{A} = \text{Toep}[x_0, x_1, x_2, \dots, x_2, x_1]$, 则 $\mathbf{A}^{-1} = \text{Toep}[b_0, b_1, b_2, \dots, b_2, b_1] = \mathbf{B}$ 。其中

$$b_s = \begin{cases} \frac{1}{N} \left[\frac{1}{f(W_N^0)} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\cos \frac{2\pi s i}{N}}{f(W_N^{-i})} \right], & N = 2n + 1, \\ \frac{1}{N} \left[\frac{1}{f(W_N^0)} + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\cos \frac{2\pi s i}{N}}{f(W_N^{-i})} + \frac{(-1)^s}{f(W_N^{-n})} \right], & N = 2n, \end{cases} \quad (20)$$

其中 $s = 0, 1, 2, \dots, n, N$ 为矩阵 \mathbf{A} 的维数,且

$$f(W_N^{-i}) = x_0 W_N^0 + x_1 W_N^{-i} + x_2 W_N^{-2i} + \dots + x_2 W_N^{-(N-2)i} + x_1 W_N^{-(N-1)i}, \quad (21)$$

$W_N^{-i} = \exp(j \frac{2\pi i}{N})$, 且有 $(W_N^{-ki})^* = W_N^{-(N-k)i}$, $(\cdot)^*$

表示共轭。

于是,针对(13)式,考虑到定理 1,提出构造一种如图 3 的伪对称序列格式,进而可以将(13)式对应的系统转化为具有对称循环特性的 Toeplitz 系统,从而利用定理 1 可以极大提升其计算实时性。令

$$\mathbf{X}_p^U = \begin{bmatrix} x_{p,0}^U & x_{p,N-1}^U & \dots & x_{p,1}^U \\ x_{p,1}^U & x_{p,0}^U & \dots & x_{p,2}^U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p,N-1}^U & x_{p,N-2}^U & \dots & x_{p,0}^U \end{bmatrix}, \quad (22)$$

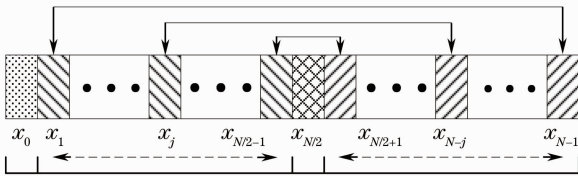


图 3 伪对称训练序列格式

Fig. 3 Structure of pseudo-symmetrical training sequences

并给定 $x_{p,i}^U = x_{p,N-i}^U$, 这样(13)式可写为

$$\mathbf{y}_p^U = \mathbf{X}_p^U \cdot \mathbf{h}_p^U + \mathbf{e}_p. \quad (23)$$

根据 MMSE 准则,信道特性的估计值可以表示为

$$\hat{\mathbf{h}}_p^U = (\mathbf{X}_p^{UT} \mathbf{X}_p^U)^{-1} \mathbf{X}_p^{UT} \mathbf{y}_p^U. \quad (24)$$

当 \mathbf{X}_p^U 为方阵时,(24)式可化为 $\hat{\mathbf{h}}_p^U = (\mathbf{X}_p^U)^{-1} \mathbf{y}_p^U = [\hat{H}_{p,0}, \hat{H}_{p,1}, \dots, \hat{H}_{p,N-1}]^T$ 或写作 $\mathbf{X}_p^U \hat{\mathbf{h}}_p^U = \mathbf{y}_p^U$, 特别是当子载波数目较多时,该式表示为典型的 Toeplitz 系统求解问题,在这种系统中,对于 Toeplitz 矩阵及其逆矩阵的分析和求解是系统求解及性能分析的基础。当 \mathbf{X}_p^U 的维数较高时,其求解过程需要耗费过多的计算时间和资源,从而影响超高速实时信号传输的有效实现。

3.2 基于伪对称序列预处理均衡算法的步骤

利用(13)~(20)式可以得到消除系统 ICI 的均衡算法的步骤如下。

1) 构建导频 Toeplitz 矩阵中关于训练序列的矢量 \mathbf{p}^U , 即

$$\mathbf{p}^U = [x_{p,0}^U, x_{p,1}^U, \dots, x_{p,j}^U, \dots, x_{p,N-j}^U, \dots, x_{p,N-1}^U], \quad (25)$$

且有 $\mathbf{x}_{p,j}^U = \mathbf{x}_{p,N-j}^U = \frac{1}{N}p(j)$, $1 \leq j \leq N-1$, 同时可以看出, $\mathbf{X}_p^U = \text{Toep}(\mathbf{p}^U)$, 矢量 \mathbf{p} 为在发送端插入的训练序列, 该序列具有如下特性:

$$p(j) = p(N-j), \quad 1 \leq j \leq N-1. \quad (26)$$

2) 计算矢量 \mathbf{p}^U 的逆快速傅里叶变换 (IFFT, F^{-1}) 矢量 \mathbf{f}^U , 即

$$\mathbf{f}^U(k) = NF^{-1}(\mathbf{p}^U) = N \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p^U(n) \exp\left(i \frac{2\pi}{N}nk\right) \right], \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (27)$$

3) 由定理 1 可得 $(\mathbf{X}_p^U)^{-1}$ 为循环对称 Toeplitz 矩阵, 若

$$(\mathbf{X}_p^U)^{-1} \triangleq \mathbf{B} = \text{Toep}[b_0, b_1, b_2, \dots, b_{N-2}, b_{N-1}], \quad (28)$$

则有 $b_s = b_{N-s}$, 且

$$b_s = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{f^U(0)} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\cos \frac{2\pi s j}{N}}{f^U(j)} + \frac{(-1)^s}{f^U(s)} \right], \quad (29)$$

式中 $0 \leq s \leq n$, $n = N/2$.

4) 求解矢量 $\hat{\mathbf{h}}_p^U$, 考虑到(13)式及(22)式, 有

$$\hat{\mathbf{h}}_p^U = (\mathbf{X}_p^U)^{-1} \mathbf{y}_p^U = \mathbf{B} \mathbf{y}_p^U. \quad (30)$$

5) 构造信道特性均衡矩阵 $\hat{\mathbf{H}}'$, 考虑到(19)式, 有

$$\hat{\mathbf{H}}' = \frac{1}{N} \text{Toep}(\hat{\mathbf{h}}_p^U). \quad (31)$$

6) 构造均衡后的信号, 考虑到(14)式, 有

$$\mathbf{x}'_{\text{eq}} = (\hat{\mathbf{H}}'^T \hat{\mathbf{H}}')^{-1} \hat{\mathbf{H}}'^T \mathbf{y}', \quad (32)$$

式中 \mathbf{y}' 为接收到的信号, \mathbf{x}'_{eq} 为均衡后的信号。

于是, 上述均衡算法达到了有效抑制接收信号中由频率偏移引起的 ICI 的目的, 可以在极大改善系统性能的同时, 通过对定理 1 的使用极大地提升算法的实时性, 能够有效促进整个系统计算性能的提升, 从而使该算法非常适合于超高信号传输速率的 OFDM-PON 系统。

4 仿真分析

设 OFDM-PON 系统下行链路采用 16 阶正交幅度调制 (16QAM) 调制方式, 子载波数为 $N = 1024$, 本地光振荡器频率为 193.1 THz, OFDM 符号周期为 $0.0410 \mu\text{s}$, 去除保护间隔以进一步提升系统效率, 相位噪声系数在同一个 OFDM 符号上假定为常量, 且已得到较好补偿, 并假设在光纤信道中未

采用光放大器。仿真中分别考虑频率偏移为子载波频率间隔的 1%~5%。仿真平台采用 Intel Core i3-2120, 运行环境为 Matlab R2012b。

图 4 给出了消除 ICI 的均衡算法在不同频率偏移情况下的误比特率 (BER) 性能。 f_d 表示子载波频率间隔。由仿真结果可见, 当频率偏移较大时, 随着信噪比 (SNR) 的增大, 误比特率将趋于平稳; 而在频率偏移较小的情况下, 系统误比特率性能随着信噪比的增大而显著改善。同时, 可以看出在频率偏移相对较小的情况下, 提高信噪比可以有效提升系统性能, 而在频率偏移较为严重的情况下, 当信噪比达到一定水平之后, 提高信噪比将不能有效提升系统性能。然而, 两种情况下的总体趋势均为提高信噪比则可以提高系统性能, 这也是符合常理的。

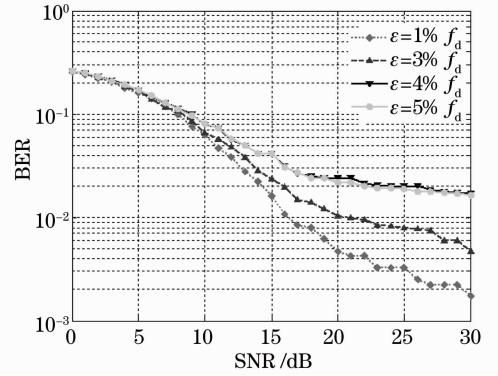


图 4 不同频率偏移下 ICI 抑制性能

Fig. 4 ICI suppression performances under different frequency-shifts

图 5 给出在不同训练序列长度条件下, 本研究提出的新算法与直接方法的时间复杂度情况。新方法是指使用定理 1 提供的算法对系统求解, 传统方法是采用高阶矩阵直接求逆的方法。可见随着训练序列长度的不断增加, 两种方法的时间复杂度差异

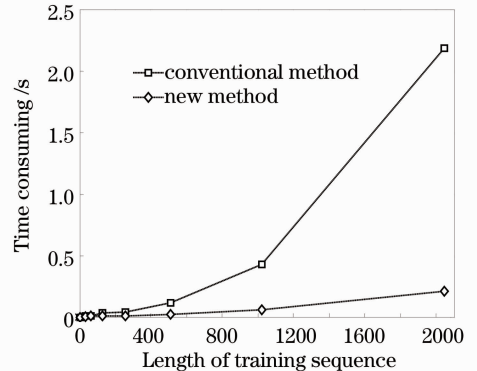


图 5 不同训练序列长度下时间复杂度

Fig. 5 Time complexities under different lengths of training sequence

迅速变大,新方法的时间复杂度上升速度远低于传统方法的速度。

5 结 论

针对 OFDM-PON 系统中由频率偏移引起的 ICI 问题,提出了一种基于直接 Toeplitz 系统求解方法求解循环对称 Toeplitz 线性系统的 LS 均衡算法。该均衡算法将求解高阶 Toeplitz 线性系统的运算简化为求解高阶循环对称 Toeplitz 系统的运算,求解中利用伪对称训练序列带来的循环性及 FFT 技术,极大地提高了计算速度,同时也避免了传统 LS 均衡算法中的传统高阶矩阵求逆运算,从而大大地降低了计算复杂度,提升了系统的计算效率,使得该算法适用于超高信号传输速率的 OFDM-PON 系统。计算机仿真结果表明,本文提出的均衡算法能够在较为严重的频率偏移下较好地消除 ICI 问题,使得系统获得良好的 BER 性能。

参 考 文 献

- 1 W Yi, W Shieh, Y Tang. Phase estimation for coherent optical OFDM [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(12): 919–921.
- 2 Guo Yamin, Zhang Xuping, Xie Fei, *et al.*. Characteristic research and detection scheme of gigabit passive optical network upstream optical signal [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0306003.
郭亚敏, 张旭苹, 谢飞, 等. 千兆无源光网络上行光信号特性研究与检测方案[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0306003.
- 3 L Zhang, X Xin, B Liu, *et al.*. A novel ECDM-OFDM-PON architecture for next-generation optical access network [J]. Opt Express, 2010, 18(17): 18347–18353.
- 4 N Cvijetic. OFDM for next generation optical access networks [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(4): 384–398.
- 5 Dayou Qian, Junqiang Hu, Jianjun Yu, *et al.*. Experimental demonstration of a novel OFDM-A based 10 Gb/s PON architecture [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2007.
- 6 Q Jing, W Zhong, Y Lu, *et al.*. Research on carrier frequency offset estimation algorithm based on PN sequence preamble in OFDM system [J]. Radioelectronics and Communications Systems, 2013, 56(1): 29–35.
- 7 K V S Ramiah, M Zivkovic. OFDM synchronization in the presence of interference [C]. International Conference on Communications, Signal Processing and Their Applications, 2013.
- 8 C X Hao. A simple and accurate timing synchronization algorithm for IMDD optical OFDM [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2012. 166–167.

- 9 Qiao Yaojun, Qian Wenhui, Ji Yuefeng. Affection of Gordon-Mollenauer effect in CO-OFDM system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(S1): S106006.
乔耀军, 钱文辉, 纪越峰. 相干正交频分复用系统中高登米勒效应的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(S1): S106006.
- 10 Hao Yaohong, Li Yuquan, Wang Rong. Optimum design for optical modulator in coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305003.
郝耀鸿, 李玉权, 王荣. 相干光正交频分复用系统中光调制的优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305003.
- 11 Yuelin Du, Jingxian Zhang. The performance of synchronization algorithm in real-time OFDM-PON system [J]. Telkomnika Indonesian J Electrical Engineering, 2012, 10(7): 1785–1794.
- 12 C H Wang, C W Chow, C H Yeh, *et al.*. Demonstration of hybrid 10 Gb/s PON and 10 Gb/s OFDM ROF architecture towards next generation access networks [C]. Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2009.
- 13 W Shieh. OFDM for flexible high-speed optical networks [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(10): 1560–1577.
- 14 W Shieh, X Yi, Y Ma, *et al.*. Coherent optical OFDM: has its time come? [J]. J Optical Networking, 2008, 7(3): 234–255.
- 15 I B Djordjevic, B Vasic. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission [J]. Opt Express, 2006, 14(9): 3767–3775.
- 16 S L Jansen, I Morita, T C W Schenk, *et al.*. Coherent optical 25.8-Gb/s OFDM transmission over 4160-km SSMF [J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(1): 6–15.
- 17 S L Jansen, I Morita, T C W Schenk. Theoretical and experimental investigations of direct-detected RF-tone assisted optical OFDM systems [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(10): 1332–1339.
- 18 S Y Kim, H Kimura, H Hadama. Cyclic prefix free 10-Gb/s OFDM for a DML-based long-reach optical access using joint time and frequency domain equalization algorithm [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011.
- 19 W Shieh, Y Tang. Phase estimation for coherent optical OFDM [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(12): 919–921.
- 20 W Shieh, H Bao, Y Tang. Coherent optical OFDM: theory and design [J]. Opt Express, 2008, 16(2): 841–859.
- 21 Qin Wen. Research on ICI Forming and Cancellation in OFDM Systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
秦文. OFDM系统中子载波间干扰的产生因素及消除研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- 22 J Durbin. The fitting of time series models [J]. Revue Inst Int De Stat, 1960, 28(3): 233–244.
- 23 H Khalil, B Mourrain, M Schatzman. Superfast solution of Toeplitz systems based on syzygy reduction [J]. Linear Algebra and Its Applications, 2013, 438(9): 3563–3575.
- 24 S Chandrasekaran, M Gu, X Sun, *et al.*. A superfast algorithm for Toeplitz systems of linear equations [J]. SIAM J Matrix Analysis and Applications, 2007, 29(4): 1247–1266.
- 25 Liu Zanwu. Discussing about Toeplitz cyclic matrix [J]. J Institute of Surveying and Mapping, 2002, 19(2): 82–84.
刘缙武. 关于 Toeplitz 循环矩阵的讨论[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(2): 82–84.

栏目编辑: 王晓斌