

相干光通信中相位估计与信道均衡的联合使用

宋艳梅, 许 渤, 邱 昆

(电子科技大学 通信与信息工程学院 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 在使用高阶相位调制的 100 Gbit/s 及以上速率的相干光通信系统中, 激光器的相位噪声和光纤传输中的色散效应是影响系统性能的主要因素。为了补偿色散及相位噪声的影响, 文章提出一种将电信道均衡与相位估计模块在电域联合使用的方法, 相位估计在电信道均衡之后完成, 其结果同时用于电信道均衡器的抽头系数更新。该方法可以有效降低对电信道均衡中迭代步长的要求, 有助于系统获得更低的误码率和更稳定的误码性能, 并且能够支持的传输距离也会增加。

关键词: 相干光通信; 载波相位估计; 信道均衡

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1005-8788(2012)01-0006-03

Combined use of phase estimation and channel equalization in coherent optical communications

Song Yanmei, Xu Bo, Qiu Kun

(Key Lab of Broadband Optical Transmission and Communication Network, UESTC, Chengdu 611731, China)

Abstract: In the coherent optical communication systems at 100 Gbit/s and higher rates using high-order phase modulation, laser phase noise and dispersion effects in fiber-optic transmissions are the major factors that affect the system performance. To compensate for these effects, this paper proposes a method for the combined use of electric channel equalization and carrier phase estimation modules in the electric domain. The phase estimation is completed after the electric channel equalization, the results of which are also used in updating the tap coefficients of the equalizer. This method can effectively reduce the requirements for the step-size in the equalization, conducive to acquiring lower bit error rate, more stable error performance and longer transmission distance.

Key words: coherent optical communication; carrier phase estimation, channel equalization

0 引 言

偏振复用、相干检测加高阶调制方式是实现 100 Gbit/s 及以上高速率光通信的关键技术。然而传输速率的提高使得光纤色散对通信系统性能的影响更加严重。另一方面, 激光器的相位噪声也是影响高速相干光通信系统性能的重要因素之一, 因此除了进行信道均衡外^[1], 载波相位的估计和恢复^[2]也是高速相干光通信系统中必不可少的。之前对相位估计的研究^[3]都是在假设系统已在光域进行了色散均衡的条件下进行的, 因此在进行载波相位恢复时不需要考虑色散或者电信道均衡的影响。随着电处理技术的提高, 在电域中进行均衡成本更低, 使用也更灵活, 因而在电域中同时使用电信道均衡和载波相位估计成为了一种趋势, 但是此时电信道均衡器与载波相位估计器间的相互影响将不容忽视。

本文提出了一种将电信道均衡与载波相位估计结合使用的方法, 具体为相位估计模块使用经过电信道均衡后的信号进行载波相位估计, 同时又将相

位估计的结果作为反馈用于电信道均衡器抽头系数的更新中。仿真结果表明, 在电信道均衡之后, 再进一步通过相位估计, 能够使电信道均衡需要的迭代步长减小, 从而避免了迭代不收敛的情况, 使均衡器能够稳定地发挥作用, 同时让系统在相位噪声较大且传输距离较长的情况下也能保持好的误码性能。相关研究内容在已有文献中未见报道。

1 系统模型

本文所研究的高速相干光通信系统的模型如图 1 所示。在发送端, 分别对偏振方向相互垂直的两路光信号进行 QPSK(差分正交相移键控)调制, 考虑到前向纠错的应用, 每一路进入调制器的数据符号速率为 28 Gbit/s。偏振耦合器实现两路光信号的偏振复用, 这样就得到了 112 Gbit/s 的偏振复用 QPSK 传输信号。在 SMF(单模光纤)中传输时, 除了 EDFA(掺铒光纤放大器)引入的 AWGN(加性高斯白噪声)外, 发送端和接收端激光器的 PN(相位噪声)可以看成是一种乘性噪声, 其模型通常

采用随机游动过程来描述^[3]。

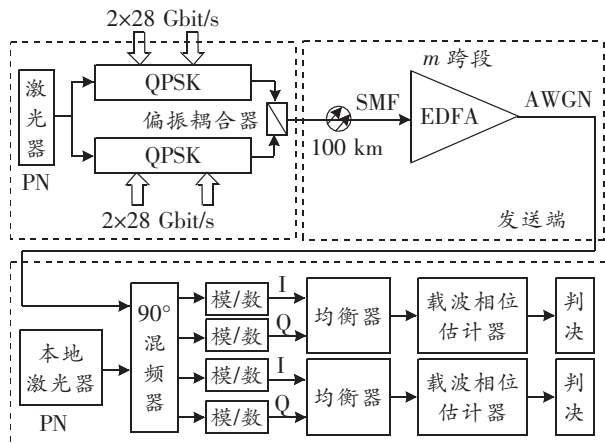


图1 系统模型

在接收端,对偏振复用信号分为两个偏振方向分别进行相干解调^[4]。相干解调后的4路电信号首先需要进行A/D(模/数)采样和量化,采样速率为两倍符号速率,然后再进一步进行基于LMS(最小均方)算法的自适应电信道均衡和相位补偿,最后,相位判决恢复出所发送的数据。

图2给出了本文提出的电信道均衡与相位估计联合使用的实现框图。电信道均衡的抽头权值系数更新是一个迭代的过程,迭代步长的选择需要足够小以确保迭代过程能够收敛。相位估计的结果 $\hat{\theta}_k$ 作为反馈用于电信道均衡器的误差信号 ϵ_k 的计算。信号经过均衡器之后进入相位估计器,相位估计具体采用最大似然判决辅助的方法。由于相位估计借助于判决信号,因此在每一次进行相位估计之前都需要一定长度的训练序列来启动相位估计器^[3]。

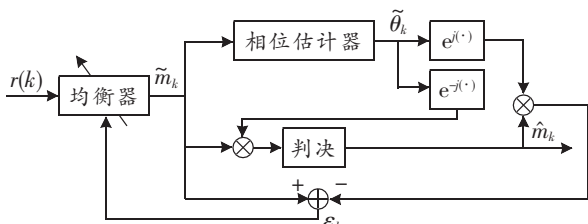


图2 信道均衡与相位估计联合使用的框图

2 仿真结果及分析

本文利用MATLAB仿真平台,通过数值仿真研究了电信道均衡和相位估计之间的相互影响。仿真中SMF的衰减因子为0.2 dB/km,二阶色散系数为 $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$,每段光纤的长度为100 km,由于PMD(偏振模色散)造成的DGD(差分群时延)是随机的,因此在仿真中是在0到符号间隔时间(即信号传输所使用波形的符号周期)内随机取值。对于均

衡器抽头长度的设置,将在后面具体介绍。

电信道均衡器的收敛特性由迭代步长控制,不同的迭代步长下系统的性能也不同。在仅使用电信道均衡的情况下,对没有加入PN以及加入PN两种情况下均衡器所需的最佳迭代步长进行了比较,见图3,仿真中使用的是基于LMS算法的信道均衡抽头系数迭代算法,此时光纤长度固定为100 km,均衡器长度固定为21。其中,图3(a)所示为没有加入PN时,不同均衡器步长对系统性能的影响。可以看出,在没有PN影响时,最佳迭代步长为0.001;当步长增加到0.02时,过大的迭代步长会造成均衡器抽头系数的不稳定,并进一步影响系统性能。图3(b)所示为激光器线宽为100 kHz时,不同均衡器迭代步长对系统性能的影响。从图中可以看出,对应最佳系统性能的最佳迭代步长为0.005和0.010,相比于图3(a),这种最佳迭代步长增大能够对PN的变化进行跟踪,进而对接收信号的相位进行补偿。如果此时仍然使用较小的0.001的迭代步长,由于均衡器不能很好地跟踪到PN的变化,系统性能将明显变差。

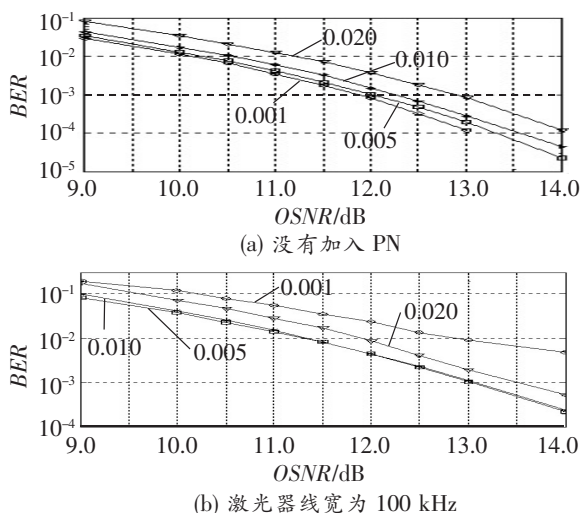
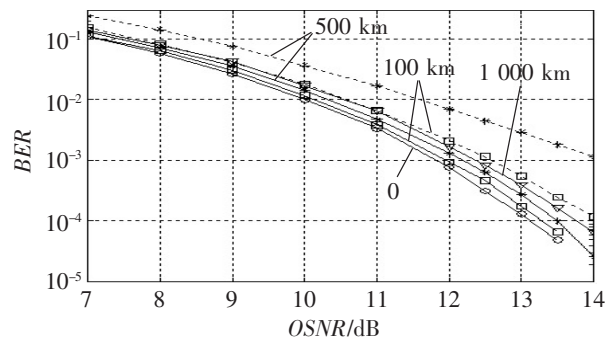


图3 光纤长度为100 km时,不同均衡步长下的误码率

由图3可知,当加入较小的PN(激光器线宽为100 kHz)时,即使不使用相位估计,均衡器也能对接收信号的相位进行自适应补偿,得到较好的性能。但是当加入的PN变大时,仅仅依靠均衡器的抽头系数迭代更新已经不能正确解调信号,这时必须进行载波相位估计。

图4所示为当传输距离固定为100 km,所加PN不同时,只进行信道均衡和信道均衡与相位估计相结合两种情况下的系统性能比较,此时的均衡

器长度固定为 21。图中每一条曲线所用的均衡步长均为最佳步长,具体值如表 1 所示。



(实线表示均衡与相位估计相结合,虚线表示只进行均衡,当 PN = 0 时,两种情况所得曲线重合)

图 4 光纤长度为 100 km 时,不同 PN 下的误码率

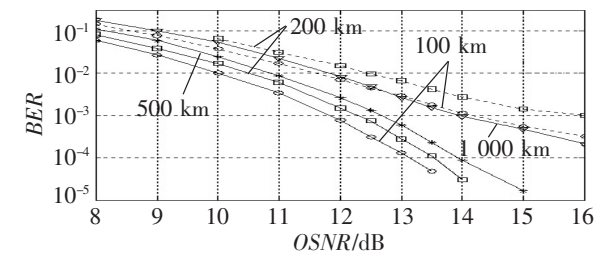
表 1 光纤长度为 100 km,不同 PN 下所用的均衡器最佳步长

激光器线宽/kHz	0	100	500	1 000
只使用均衡	0.001	0.005	0.010	
均衡与相位估计结合	0.001	0.001	0.001	0.001

从表 1 可以看出,当 PN 增大时,对于只使用信道均衡的系统,均衡器所需的最佳均衡步长也要随之增大,但是当激光器线宽为 1 MHz 时,不管用多大的迭代步长,系统的性能都非常糟糕,所以在图 4 中没有画出该性能曲线。而加入相位估计之后,在相同的 PN 下,均衡器最佳步长相较于只有均衡的系统大大减小;另外,即使 PN 增大,均衡步长也不需要随之增大,从而避免了步长过大使得迭代过程不收敛的情况。同时,从图 4 还可以看出,将均衡与相位估计联合使用可以使系统性能得到提高,如在误码率为 10^{-3} 的条件下,若只使用信道均衡,激光器线宽为 500 kHz 时与没有 PN 情况下所需的 OSNR(光信噪比)相差 2 dB,而若将均衡与相位估计相结合,两者仅仅相差 0.3 dB;即使当激光器线宽为 1 MHz 时,与没有 PN 情况下所需的 OSNR 也仅相差 0.5 dB。

信道均衡与相位估计联合使用还能使系统在较大的 PN 下传输更长的距离。图 5 给出了激光器线宽为 500 kHz 时,不同传输距离下的误码率性能比较。当传输距离分别为 100、200、500 和 1 000 km 时,均衡器长度分别设置为 21、41、81 和 161。对于只使用均衡器的情况,图 5 中只画出了传输距离为 100 和 200 km 的误码率曲线,因为当传输距离为 500 和 1000 km 时,系统已经无法正确解调出信号。若将均衡与相位估计结合使用,图中所示的各个传输距离都能够达到所需的

误码率为 10^{-3} 的要求。传输距离越长,联合使用均衡和相位估计时获得的性能增益越高。



(实线表示均衡与相位估计相结合,虚线表示只进行均衡)

图 5 激光器线宽为 500 kHz 时,不同传输距离下的误码率

3 结束语

本文提出了一种在高速相干光通信系统中将信道均衡与载波相位均衡在电域中联合使用的方法,该方法能够有效降低对均衡器迭代步长的要求,能够容忍更大的 PN,还能够增大传输距离。仿真结果也证明了上述结论。加入 PN 后,在只使用电信道均衡的系统中,所需要的均衡器最佳步长比没有 PN 的系统所需要的更大,而当 PN 增大到一定程度时,这样的系统将无法工作。将电信道均衡与相位估计相结合,能够使均衡器所需要的最佳迭代步长减小,避免了因迭代步长过大而使得均衡器抽头系数更新的迭代过程不收敛的情况,因此这样的系统所能容忍的 PN 远远大于只有电信道均衡的系统。同时,将电信道均衡与相位估计结合使用的系统,还能够支持更长的传输距离。

参考文献:

[1] Fludger Chris R S, Duthel Thomas, Borne Dirk van den. Coherent Equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for Robust 100-GE Transmission [J]. J of Lightwave Technology, 2008,26(1):64-72.

[2] Seimetz Matthias. Laser Linewidth Limitations for Optical Systems with High-Order Modulation Employing Feed Forward Digital Carrier Phase Estimation [A]. OFC/NFOEC 2008 [C]. San Diego, America: OSA,IEEE and LEOS,2008. 1-3.

[3] Zhang Shaoliang, Kam Pooi-Yuen, Yu Changyuan. Decision-Aided Carrier Phase Estimation for Coherent Optical Communications [J]. J of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1597-1607.

[4] Michael G, Taylor. Phase Estimation Methods for Optical Coherent Detection Using Digital Signal Processing [J]. J of Lightwave Technology, 2009,27(7): 901-914.