光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.021

基于光纤四波混频效应的 2R 全光再生方法研究

霍恺丽[1]，刘开贤[1]，陈新桥[2*]，狄　晗[2]

（中国传媒大学 1. 数据科学与智能媒体学院；2. 信息与通信工程学院，北京 100024）

摘　要： 提出了一种基于光纤中四波混频(FWM)效应实现对光信号的再放大和再整形的2R再生功能的方法，分析了该方法的工作原理，设计了一种基于光纤FWM效应实现光信号2R再生的光纤传输仿真系统。仿真结果表明，2R再生信号良好，系统 Q 值达到21.59，验证了该方法的可行性。所设计的2R再生方案中，泵浦光的波长与功率是影响FWM效率和2R再生性能的主要因素，对其进行了扫参研究，得出泵浦波长为1 548 nm、功率为40 dBm时，2R再生性能最优。

关键词： 全光2R再生器；四波混频；四波混频效率；光子模拟

中图分类号： TN248；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0116－05

Research on the 2R All-optical Regeneration Method Based on Optical Fiber Four-wave Mixing Effect

HUO Kaili[1], LIU Kaixian[1], CHEN Xinqiao[2], DI Han[2]

(1. School of Date Science and Intelligent Media; 2. College of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, CHN)

Abstract: A method for re-amplifying and re-shaping optical signal based on four-wave mixing effect (FWM) in fiber is proposed to realize optical signal 2R regeneration, and the working principles of this method are analyzed. An optical fiber transmission simulation system based on FWM effect to realize 2R regeneration of optical signal is designed. Simulation results show that, the 2R regeneration signal is good and the system Q value is up to 21.59, which verifies the feasibility of the proposed method. The wavelength and power of pump light are the main factors affecting FWM efficiency and regeneration performance. The optimal performance of the system is obtained when the pump wavelength and power is 1 548 nm and 40 dBm, respectively.

Key words: all-optical 2R regenerator; four-wave mixing; FWM efficiency; photon simulation

0　引言

在通信网络干线中，目前大都采用长距离大容量光纤传输系统。由于受到光纤的色散、非线性效应以及放大器的自发辐射噪声等各种不利因素的影响，随传输距离的增加，光信号传输性能下降，误码率增高。因此每经过一定的传输距离，就需要对光信号进行再放大和再整形，即实现光信号的2R再生，实现这种功能的器件称为2R再生器。目前，大多数商用2R再生器是基于光/电/光(O/E/O)[1]原理实现再生功能的，受电子处理速率的限制，基于O/E/O的2R再生器存在传输数据速率有限、损耗高、误码率高等问题，无法满足现代光通信系统的高速率大容量要求[2]。因此，如何在光域实现对光信号的2R再生成为光纤传输领域的研究热点。

全光2R再生常见的方法是通过光纤或者半导体材料的非线性效应来实现的。Yaccob等提出了

收稿日期：2020－10－24.

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB1404101).

* 通信作者：陈新桥　E-mail：chenxinqiao9999@163.com

一种基于光纤自相位调制(SPM)的 10 Gb/s NRZ 全光 2R 再生方案，该方案设计略显复杂，限用于 10 Gb/s 以下光信号的再生[3]；Tomkos 等利用光纤 SPM 实现了占空比为 10%的 4 信道 10 Gb/s 和占空比为 33%的 3 信道 43 Gb/s 的 RZ 信号的再生[4-5]，其设计方案比较复杂。Wen 等设计了基于高非线性色散不平衡环形器的 2R 再生器，其主要限制是 Q 因子较低[6]。Ciaramella 等[7-8]提出利用光纤中的四波混频(FWM)效应来实现全光信号再生，其结构较复杂。Simos 等[9]利用半导体光放大器(SOA)中的 FWM 效应实现了全光再生，但由于 SOA 中载流子恢复时间的限制，信号的传输速率也受到限制。

基于光纤 FWM 效应，本文提出了一种结构简单、性能良好的全光 2R 再生方法，采用 Optisystem 光子模拟软件实现 10 Gb/s NRZ 信号在光域中的 2R 再生，结果显示再生信号良好，具有较高的 Q 值和较低的误码率。

1　基于光纤 FWM 的 2R 全光再生器原理分析

光纤中的 FWM 是一种三阶非线性效应。当入纤光功率较强时，在三阶非线性极化作用下，光纤会产生 FWM 效应。注入光纤中的两个不同波长的光分别称为泵浦光(Pump)和信号光(Signal)，由光纤 FWM 效应产生新的波长的光，称为闲频光(Idler)。在 FWM 过程中，能量可以在上述各光波之间转移，这个转移过程遵循能量和动量守恒定律。设注入光纤中的信号光和泵浦光频率分别为 ω_s 和 ω_p，当这两个光信号注入光纤后，由文献[10]可知，FWM 效应会产生两个闲频光，其频率 ω_i 分别为 $2\omega_s-\omega_p$ 和 $2\omega_p-\omega_s$，如图 1 所示。

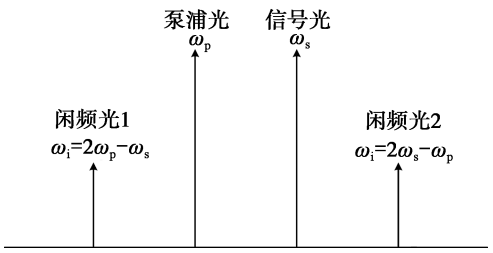


图 1　光纤 FWM 效应的频谱图

利用光纤中 FWM 效应实现 2R 再生的原理是：首先利用 FWM 效应产生的闲频光，将调制在信号光上的数据信息转移到闲频光上，再利用带通滤波器有效抑制光纤传输链路上产生的噪声，实现信号的再整形。

由以上分析可知，FWM 效应的效率是决定 2R 再生性能的关键，而该效率则主要取决于光纤色散和信号光与泵浦光之间的波长间隔。光纤色散越小、两波长间相位匹配度越高，FWM 效率越高。注入到光纤的信号光和泵浦光之间的波长间隔越小，它们之间的相互作用程度越高，FWM 效率就越高。

FWM 效率 η 是闲频光功率和信号光功率的比值[11]，单位为 dB，计算公式如下：

$$\eta=10\lg(P_i/P_s)=P_i-P_s \tag{1}$$

式中，P_i 和 P_s 分别表示闲频光功率和信号光功率，单位为 dBm。

2　基于 FWM 的全光 2R 再生系统设计

基于光纤 FWM 效应的全光 2R 再生系统由光发射机、光纤信道、2R 光再生器和光接收机四部分构成，其设计框图如图 2 所示。图中标注了 A～E 五个端点，它们分别表示光发射机输出端、2R 再生器输入端、HNLF 输入端、HNLF 输出端和 2R 再生器输出端。

2.1　光发射机

光发射机由伪随机码发生器(PRBS)、NRZ 码型发生器、连续波(CW)激光器和马赫-曾德尔调制器(MZM)构成。PRBS 产生随机数字序列，经 NRZ 码型发生器产生 NRZ 脉冲信号，该信号通过 MZM 调制到 CW 激光器发出的光载波上后，注入系统的光纤信道。

2.2　光纤信道

光纤信道由一个噪声源和传输光纤组成，噪声源(Noise Source)的作用是模拟系统中的各种噪声。光信号通过光纤信道后，进入 2R 再生器中进行 2R 再生。

2.3　2R 光再生器

全光 2R 再生器通常包括输入放大级、光整形单元、输出放大级等几部分。输入放大级的作用是将输入光信号放大到能够使光纤产生明显的非线性效应的功率水平；光整形单元是全光 2R 再生技术的关键部分，其主要作用是抑制传输链路中产生的噪声；输出放大级是将整形后的光信号进一步放大，以使输出功率提升到所需的输出电平。

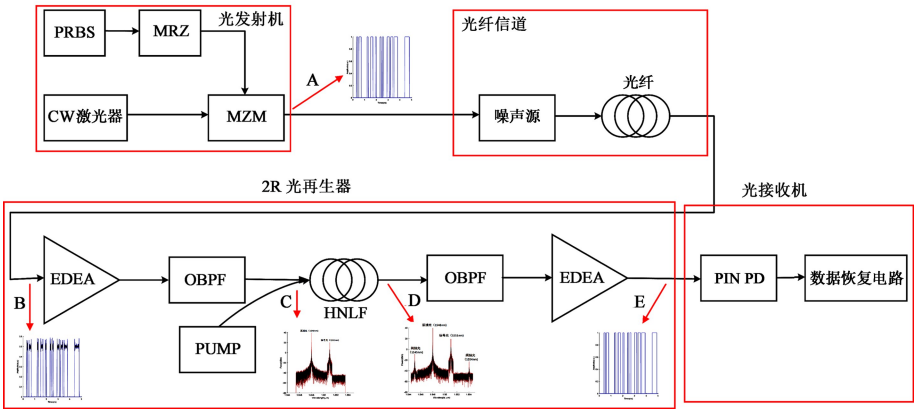


图 2 基于 FWM 的全光 2R 再生系统设计框图

本文所设计的 2R 光再生器由两个掺铒光纤放大器(EDFA)、两个带通滤波器(OBPF)、一段高非线性光纤(HNLF)和泵浦(Pump)光源构成。第一个 EDFA 主要用于对光信号进行放大,提高 HNLF 的入纤功率,增强光纤的 FWM 效应。第一个 OBPF 的作用主要是对光信号的噪声进行抑制。Pump 光源的作用是产生泵浦光,当泵浦光与信号光一起注入 HNLF 中,产生 FWM 效应,生成闲频光。第二个 OBPF 的作用是滤出闲频光,这时闲频光上就携带了数据信号,实现了整形。第二个 EDFA 的作用是对滤出的闲频光进行再放大,这时就实现了对闲频光上携带的数据信号的放大。2R 再生器输出的光信号直接注入光接收机。

2R 再生器实现 2R 再生的原理是:由于光纤中的 FWM 效应,信号光上携带的数据信号会转移到闲频光上,通过 OBPF 滤出闲频光。由于噪声相位是随机的,在 FWM 效应中噪声处于相位失配状态,这导致信号光上的噪声转移到闲频光上的概率很低,因此,滤波出来的闲频光上携带的数据信号是几乎没有噪声的数据信号,即实现了信号全光再整形,滤出的闲频光注入到光放大器中,实现数据信号的放大。至此,完成了光信号的全光 2R 再生。

2.4 光接收机

光接收机由光检测器(PINPD)、数据恢复电路(Data Recovery)等构成。PINPD 完成光信号的光电转换,Data Recovery 实现信号的恢复。

3 仿真实验

3.1 仿真实验系统设计

参照图 2,采用光子模拟软件搭建了一种基于光纤 FWM 效应的全光 2R 再生系统。设置 NRZ 码传输速率为 10 Gb/s;信号光由 CW 激光器产生,其输出波长 λ_s 为 1 551 nm,输出功率为 0 dBm;噪声源采用零增益的 EDFA 来实现,其噪声系数设置为 10 dB;泵浦光由 CW 激光器产生,其输出波长 λ_p 为 1 548 nm,功率为 40 dBm;HNLF 的非线性系数设置为 10.3 $W^{-1}\cdot km^{-1}$,长度为 0.5 km,损耗系数为 0.2 dB/km,色散系数为 0.2 ps/(nm·km^{-1}),色散斜率为 0.032 ps/($nm^2\cdot km^{-1}$)。根据前面所述,FWM 效应中产生的两个闲频光的波长分别为 $\lambda_i=2\lambda_p-\lambda_s=1\,545$ nm 和 $\lambda_i=2\lambda_s-\lambda_p=1\,554$ nm,选取 1 545 nm 为 2R 再生的波长,故 OBPF 中心波长设置为 1 545 nm,带宽为 100 GHz。

3.2 仿真实验结果

图 3 和图 4 分别是 HNLF 的输入端和输出端光信号图谱。从图 4 可见,由于光纤的 FWM 效应,在 1 545 nm 和 1 554 nm 处产生了两个闲频光,其功率分别为−6.21 和−19.6 dBm。

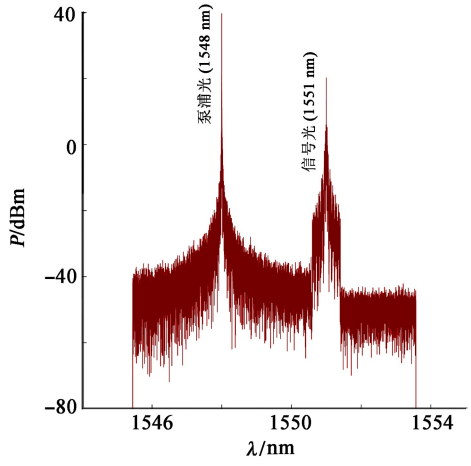


图 3 HNLF 输入端(图 2 中 C 点)的信号光谱图

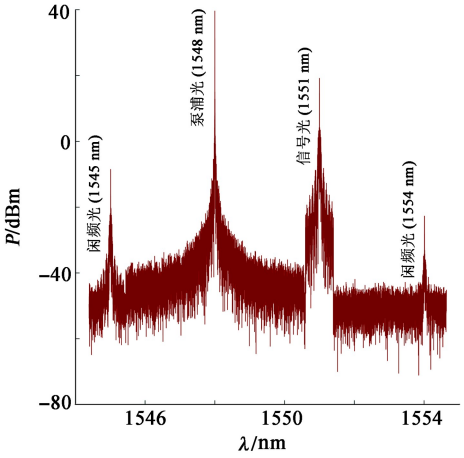
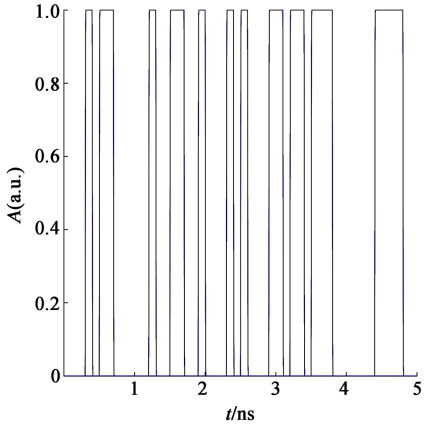
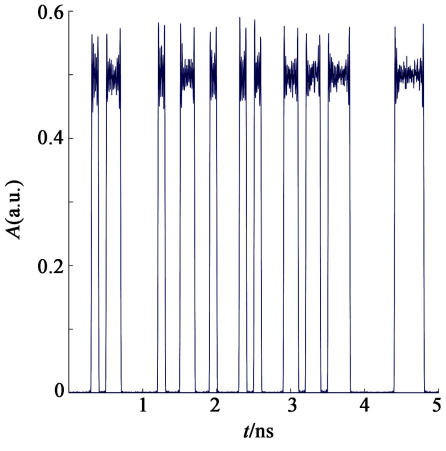


图 4　HNLF 输出端(图 2 中 D 点)信号光谱图

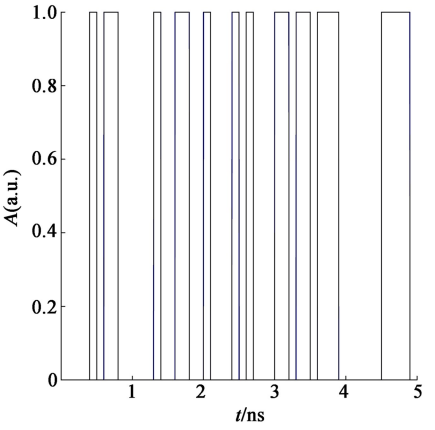
图 5(a)为经 NRZ 码型发生器产生的 NRZ 脉冲信号时域波形图。图 5(b)为注入到 HNLF 中的光信号中提取出的数据信号时域波形图,可见,由于噪声的影响,其波形发生了畸变。图 5(c)为从 2R 全光再生器中的第二个 OBPF 输出光信号中提取出的信号时域波形图,与图 5(b)对比可见,信号波形得到整形,与图 5(a)对比可见,信号得到了再生。



(a)　A 点处



(b)　B 点处



(c)　E 点处

图 5　全光 2R 再生系统中不同端点处提取出的数据信号波形图

图 6 为再生数据信号的眼图,Q 值为 21.59,BER 为 6.53×10^{-104}。从图 5 和图 6 可见,再生信号的 Q 值高,眼图清晰,再生数据波形同原始数据波形高度一致,验证了本方案的可行性。

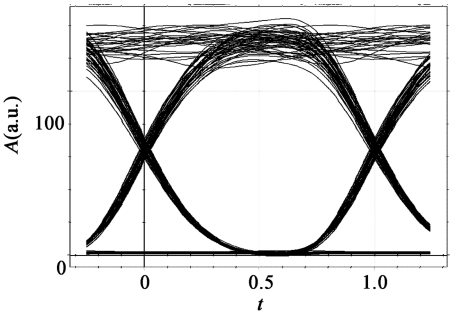


图 6　再生数据信号的眼图

4　泵浦光对 2R 再生器性能的影响分析

本文所设计的 2R 再生器的原理是基于 HNLF 的 FWM 效应,2R 再生器性能的优劣主要取决于光纤中产生 FWM 效应的效率。泵浦光的波长以及功率是影响 HNLF 中 FWM 效率最重要的因素,需要对其进行研究。

4.1　泵浦光的波长对 FWM 效率的影响

光纤中 FWM 效应的效率与信号光与泵浦光的波长间隔密切相关。一般情况下,信号光的波长是不变的,设其为 1 551 nm。泵浦光的波长是可以调节的,设其变化区间为 1 547.0～1 550.5 nm,变化步长为 0.5 nm,得到信号光与泵浦光之间的波长间隔的变化范围为 4.0～0.5 nm。

根据式(1),由信号光功率和闲频光功率,可得

到四波混频效率 η，通过对泵浦光波长进行扫参仿真，得到不同波长间隔的 Q 值和误码率，从而可得到波长间隔与 FWM 效率和系统 Q 值的关系，如图 7 所示。由图 7 可见，当波长间隔为 3 nm 时，即当泵浦光信号波长为 1 548 nm 时，FWM 效率最高，达到－45.533 dB，Q 值最大，BER 最小。

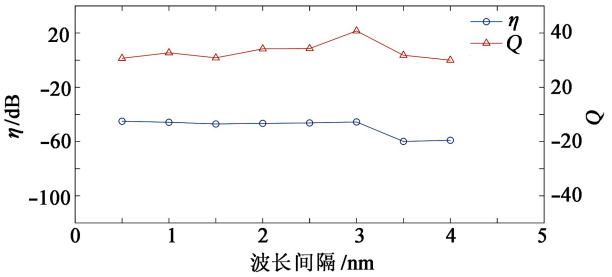


图 7 波长间隔与 FWM 效率和系统 Q 值的关系图

4.2 泵浦光功率对 2R 再生器再生性能的影响

为了研究泵浦光功率对 2R 再生器性能的影响，对泵浦光功率从 36～43 dBm 进行扫参仿真，得到泵浦光功率 P 与系统 Q 值的关系图，如图 8 所示。从图 8 可见，泵浦光功率越高，系统的再生性能越好。此结果可归因于随泵浦光功率增加，FWM 效应也随之增加，从而闲频光功率也逐渐增加，再生信号质量更高。

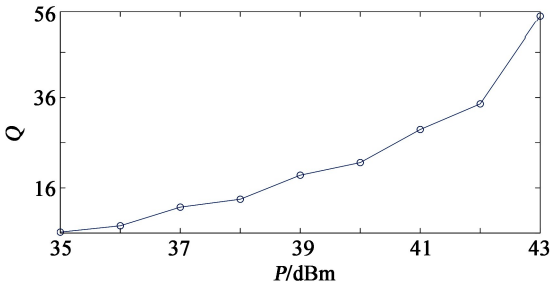


图 8 系统 Q 值随泵浦光功率的变化关系

5 结论

本文提出了一种基于光纤 FWM 效应实现全光 2R 再生的设计方法，分析了其工作原理。根据所提出的方法，采用光子模拟软件，设计了一种基于光纤 FWM 效应实现 2R 再生的光纤传输系统，验证了所提方法的可行性。同时，研究了泵浦光波长及功率对 2R 再生性能的影响。

仿真结果表明，系统 Q 值可达 21.59，再生信号与原信号一致度高。与现有的光再生器相比，本文提出的全光 2R 再生方法具有设计简单、所用元件较少、成本低廉、Q 值高等优点，在大容量长距离光纤传输中具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Simon J C, Billes L, Bramerie L. All optical regeneration [C]// IEEE Electronic-enhanced Optics, Optical Sensing in Semiconductor Manufacturing, Electro-optics in Space, Broadband Optical Networks, Digest of the Leos Summer Topical Meetings, 2002.

[2] Timko M P. Method of converting an analog signal to a digital signal: United State, 684487[P]. 1997-11-04.

[3] Yaacob S S M, Shah N S M, Shamsuddin N N, et al. 10 GB/S NRZ based on self-phase modulation in all optical 2R regeneration[J]. ARPN J. of Engin. and Appl. Sciences, 2015, 5(2): 1-4.

[4] Tomkos I, Tzanakaki A, Leuthold J, et al. Transparent ring interconnection using multi-wavelength processing switches [C]// Proc. of 2006 Inter. Conf. on Transparent Optical Networks, 2006, 1: 23-23.

[5] Leuthold J, Freude W, Sygletos S, et al. An all-optical grooming switch to interconnect access and metro ring networks[C]//Proc. of IEEE 10th Anniversary Inter. Conf. on Transparent Optical Networks, 2008, 3: 207-210.

[6] Wen F, Sygletos S, Tsekrekos C P, et al. Multilevel power transfer function characterization of nonlinear optical loop mirror[C]// Proc. of IEEE 19th Inter. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON), 2017: 1-4.

[7] Ciaramella E, Trillo S. All-optical signal reshaping via four-wave mixing in optical fibers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(7): 849-851.

[8] Ciaramella E, Curti F, Trillo S. All-optical signal reshaping by means of four-wave mixing in optical fibers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 13(2): 142-144.

[9] Simos H, Bogris A, Syvridis D. Investigation of a 2R all-optical regenerator based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. J. of Lightwave Technol., 2004, 22(2): 595-603.

[10] Keiser G. Optical Fiber Communications [M]. American Cancer Society: Wiley Encyclopedia of Telecommunications, 2003.

[11] Manzoor H U, Zafar M, Manzoor S U, et al. Improving FWM efficiency in bi-directional ultra DWDM-PON networking centered light source by using PMD emulator[J]. Results in Physics, 2020, 16: 102922.

作者简介：

霍恺丽(1996－)，女，山西朔州人，硕士研究生，研究方向为光器件与光通信；

陈新桥(1965－)，男，博士，研究员，主要研究方向为光纤传输、微波光子学等。