

# 全光 2R 再生器对星间 DPSK 调制/ 自差检测系统性能的改善

董毅 赵尚弘 李勇军 韩磊 赵卫虎

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 提出了采用基于非线性光纤环形镜(NOLM)的全光 2R(再放大、再整形)再生器对星间差分相移键控(DPSK)信号进行放大、整形的方案。理论推导了再生器的工作原理,给出了对信号进行放大、整形的约束条件;仿真研究了再生器的输入输出功率特性和相位特性,分析了耦合器耦合系数对功率特性的影响。结果表明,全光 2R 再生器对基于自差探测的 DPSK 系统性能具有显著的改善作用,系统误码率较未使用再生器时降低接近两个量级。

**关键词** 光通信;非线性光纤环形镜;2R 再生器;DPSK 调制;自差检测

中图分类号 TN365 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.091405

## Property Improvement of Inter-Satellite DPSK Modulation/ Self-Heterodyne Detection System by All-Optical 2R Regeneration

Dong Yi Zhao Shanghong Li Yongjun Han Lei Zhao Weihu

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract** The scheme of using the all-optical 2R re-amplification, re-shaping regenerator based on nonlinear optical loop mirror to amplify and shape the differential phase-shift keying (DPSK) signals among satellites is proposed. The principle of the regenerator is deduced theoretically, the restrictive condition of amplifying and shaping a signal is given, the input and output characteristics of the power and phase of regenerator are investigated by simulation, and the effect of coupling coefficient of coupler on the power characteristic is analyzed. The result shows that the 2R regenerator can significantly promote the performance of DPSK modulation/self-heterodyne detection system and the bit error rate decreases nearly two orders of magnitude compared with that without the regenerator.

**Key words** optics communicaitons; nonlinear optical loop mirror; 2R regenerator; differential phase-shift keying modulation; self-heterodyne detection

**OCIS codes** 140.3280; 060.4370; 060.4510

## 1 引言

近年来,为了获得高的星间数据传输率、高探测灵敏度,同时降低技术难度,基于自差探测的差分相移键控(DPSK)调制技术<sup>[1-2]</sup>逐渐成为人们关注的热点。然而,由于需要在自差检测前引入光放大器对光信号进行放大,光链路上背景光、光学器件的非线性等造成的信号损伤都得到了放大,加上放大器本身自发辐射噪声的影响,在接收端信号波形严重变形<sup>[3-4]</sup>,因此在进入探测器前对光信号进行整形显得十分必要。

目前,研究人员针对光信号损伤及整形问题做了大量的工作。文献[5-6]深入研究了由光学器件非线性引起的波前畸变对自差探测 DPSK 系统性能的影响;文献[7]提出了一种利用干涉法对由光调制器引入的波前畸变进行补偿的方法,但无法对链路整体损伤进行补偿;文献[8]仿真研究了基于非线性光纤环形镜的再生器在地面光纤网的应用,但还未见到对星间链路应用的报道。

收稿日期: 2013-04-28; 收到修改稿日期: 2013-05-13; 网络出版日期: 2013-08-07

作者简介: 董毅(1987—),男,博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: dongyi\_19870129@sina.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与光通信方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com

基于非线性光纤环形镜(NOLM)的全光 2R(再放大、再整形)再生器由于结构简单,易于实现,且与 3R(再放大、再整形、再定时)再生器比,不需要技术要求较高的时钟恢复,复杂度和成本大大降低,能够很好地满足空间光通信系统对器件的要求。本文对基于 NOLM 的全光 2R 再生器工作原理进行了推导,并就其对星间 DPSK 调制/自差检测系统性能的改善情况进行了仿真研究。

## 2 基于 NOLM 的 2R 再生器理论分析

图 1 给出了基于 NOLM 的 2R 再生器原理图,主要由掺铒光纤放大器(EDFA)和 NOLM 两部分组成。其中,NOLM 作为其主要部分,只需用一段长光纤将光纤耦合器的两个输出端口连接起来形成一个环即可。它的结构与光环形谐振腔类似,但两者工作方式存在明显差异:首先,光信号从 NOLM 输入端口进入,经一次往返后从谐振腔输出,整个过程没有反馈机制;其次,输入光场被分成同向和反向传输的两部分,二者光程相同,并在耦合器内发生相干干涉。实际中,随着高非线性光纤(HNF)技术的成熟,采用 HNF 作为光纤环路使 NOLM 更具有工程实用性。

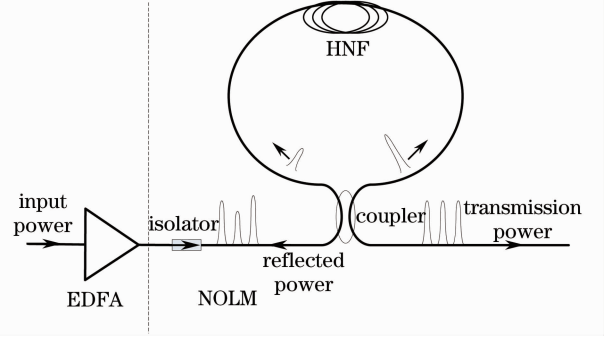


图 1 基于 NOLM 的 2R 再生器原理

Fig. 1 Principle of 2R regenerator based on NOLM

假设 NOLM 输入光信号的振幅为  $A_0$ ,在不考虑插入损耗和回波损耗的情况下,耦合器的传输矩阵为  $C = \begin{bmatrix} \sqrt{c} & i\sqrt{1-c} \\ i\sqrt{1-c} & \sqrt{c} \end{bmatrix}$ ,其中  $c$  为耦合器的耦合系数。则 NOLM 前向(顺时针)和后向(逆时针)传输的光场振幅分别为

$$A_f = \sqrt{c}A_0, \quad (1)$$

$$A_b = i\sqrt{1-c}A_0, \quad (2)$$

由(2)式可见,耦合器对后向传输的光场  $A_b$  引入了  $\pi/2$  的相移。经过一次往返后,两个光场不仅获得了线性相移,还将获得自相位调制和交叉相位调制带来的非线性相移。此时,两束光通过耦合器后变为<sup>[9]</sup>

$$A'_f = A_f \exp[i\varphi_0 + i\gamma(|A_f|^2 + 2|A_b|^2)L], \quad (3)$$

$$A'_b = A_b \exp[i\varphi_0 + i\gamma(|A_b|^2 + 2|A_f|^2)L], \quad (4)$$

式中  $\varphi_0 = \beta L$  为线性相移, $L$  为光纤环长度, $\beta$  为光纤环的传输常数, $\gamma$  为非线性参数。

再利用耦合器的传输矩阵可以得到通过耦合器后前向和后向传输光的光场为

$$\begin{bmatrix} A_t \\ A_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{c} & i\sqrt{1-c} \\ i\sqrt{1-c} & \sqrt{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_f \\ A'_b \end{bmatrix}, \quad (5)$$

从而可得透射后前向光表述为

$$\begin{aligned} A_t &= \sqrt{c}A'_f + i\sqrt{1-c}A'_b = \\ &= \sqrt{c}A_f \exp[i\varphi_0 + i\gamma(|A_f|^2 + 2|A_b|^2)L] + i\sqrt{1-c}A_b \exp[i\varphi_0 + i\gamma(|A_b|^2 + 2|A_f|^2)L] = \\ &= cA_0 \cos[\varphi_0 + \gamma(2-c)A_0^2L] - (1-c)A_0 \cos[\varphi_0 + \gamma(1+c)A_0^2L] + \\ &= i\{cA_0 \sin[\varphi_0 + \gamma(2-c)A_0^2L] - (1-c)A_0 \sin[\varphi_0 + \gamma(1+c)A_0^2L]\}, \end{aligned} \quad (6)$$

NOLM 的透射功率为  $P_t = |A_t|^2$ ,将(6)式代入可得

$$P_t = P_0 - 2P_0c(1-c)\{1 + \cos[(1-2c)\gamma P_0L]\}, \quad (7)$$

式中  $P_0 = |A_0|^2$  为入射光功率。

分析(7)式可知:通过 NOLM 透射的光信号相当于对其功率引入了一个乘性因子  $1 - 2c(1-c)\{1 + \cos[(1-2c)\gamma P_0L]\}$ ,而该因子随着入射光功率  $P_0$  的改变是呈余弦函数特性变化的,因此其变化的斜率将周期性地在一到 1 之间改变。调节射光功率使斜率控制在 0 附近,透射光功率将保持恒定,即实现了对光

信号的整形(如图 1 所示)。如果在 NOLM 之前再引入放大器对光信号进行放大,就构成了全光 2R 再生器。

再生器的透射率为  $\eta = P_t/P_0$ , 即

$$\eta = 1 - 2c(1 - c)\{1 + \cos[(1 - 2c)\gamma P_0 L]\}, \quad (8)$$

当耦合系数  $c=0.5$  时,透射率  $\eta=0$ ,即几乎没有光透射;只要满足

$$|1 - 2c|\gamma P_0 L = (2m - 1)\pi, \quad m \in \mathbf{Z}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{Z}$  为整数集。由光纤环引入的相移就会使输入的光信号全部透射。

## 3 仿真分析

### 3.1 再生器输入输出特性分析

采用光学软件 Optisystem 对再生器的输入输出特性进行仿真分析。仿真中选取波长为 1550 nm 的连续光作为光源,光纤环采用长为 2.7 km 的 HNF,其中光纤色散系数  $D=0.3 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,衰减系数  $\alpha=0.38 \text{ dB/km}$ ,非线性参数  $\gamma=10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

以码元速率为 10 Gb/s, 占空比为 33% 的光信号为输入信号,图 2 给出了不同耦合器耦合系数情况下 NOLM 的输出平均光功率特性。从图中可以看出,随着输入功率的增大,特性曲线周期性地出现一个斜率接近 0 的平稳区,在该平稳区内输入功率的变化不会引起输出功率的改变。因此,如果将通信信号的输入功率控制在特性曲线的平稳区,输出信号功率上的起伏就能得到平滑,从而起到整形的作用。同时,随着耦合系数的增大,特性曲线的平稳区域也逐渐增大,这意味着再生器能够对更大的功率起伏进行整形。与地面光纤网对再生器要求不同,星间距离的周期性变化使得接收端的光功率是一个动态变化的值,因此再生器对平稳区宽度的要求要更高。然而,耦合系数的增大也导致透射光功率减小,造成了光功率的浪费,实际应用时需综合考虑透射光功率和整形能力的大小来选取合适的耦合系数。

图 3 对再生器的输入输出波形进行了对比,其中再生器平均输入功率为 2.2 mW。从图中可以看出,再生器不仅使输入波形振幅的起伏得到了抑制,而且前后脉冲重叠形成的“基座”高度也被一定程度地削减。图 3(a)中连“1”码造成的前后脉冲重叠在图 3(b)中得到了有效缓解,“0”码处的功率起伏几乎完全被滤除掉。

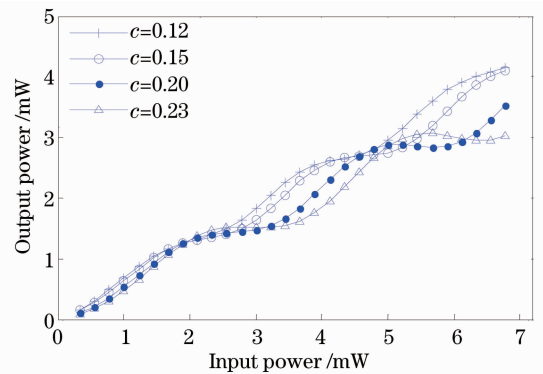


图 2 NOLM 输出功率特性

Fig. 2 Characteristics of NOLM output power

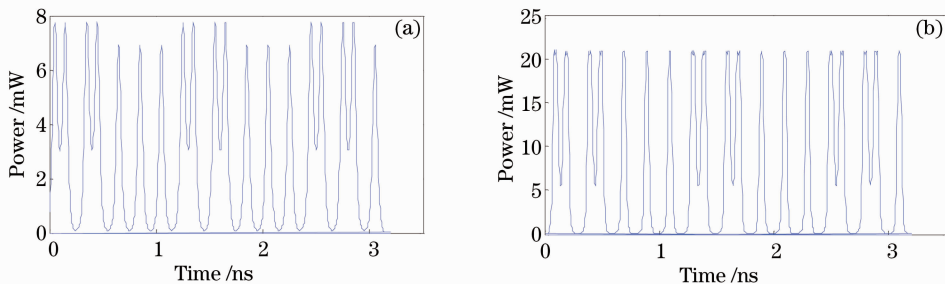


图 3 再生器输入输出波形对比。(a)输入波形;(b)输出波形

Fig. 3 Characteristics of the pulses of regenerator. (a) Shape of input pulse; (b) shape of output pulse

对于相位调制,系统误码率对信号相位的变化尤为敏感。图 4 是在耦合效率为 0.15 时再生器输出相位随输入功率的变化特性。从图中可以看出,对应于功率特性曲线的平稳区,输出相位随功率变化的斜率也接近于 0,说明再生器在对信号幅度进行整形的过程中几乎不对信号相位信息产生影响。以图 4 为例,在平稳区内信号相位的变化最大只有 0.157 rad。

### 3.2 对 DPSK 调制/自差检测系统性能的提高

为了研究再生器在空间 DPSK 调制/自差检测系统中的应用性能,仿真场景如图 5 所示。发射端以伪随机序列模仿信源信息,码元速率为 10 Gb/s,激光器波长选为 1550 nm,DPSK 信号脉冲占空比 33%。信号由光发送系统进入 3000 km 距离的自由空间进行传播,在接收端采用掺铒光纤放大器(EDFA)进行前置放大,放大器增益为 37 dB,然后送入再生器进行整形,再生器参数设置与 3.1 节相同,最后采用马赫-曾德尔干涉仪进行自差检测。传播过程中主要考虑几何损耗造成的功率衰减以及 EDFA 引入的自发辐射噪声的影响。

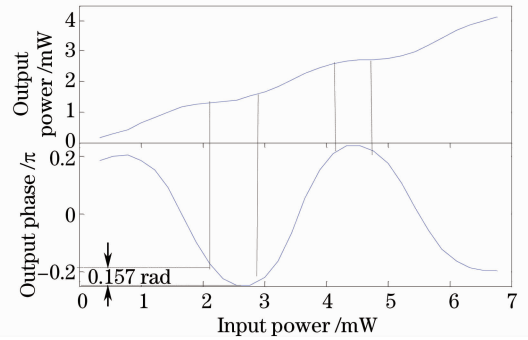


图 4 再生器相位变化特性

Fig. 4 Phase characteristics of regenerator

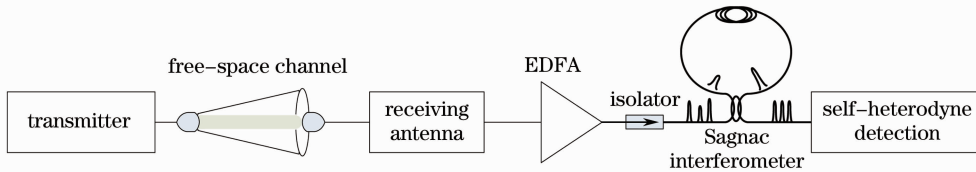


图 5 仿真场景

Fig. 5 Setup of simulation

图 6 是在采用 2R 再生和无再生时仿真得到的系统误码率(BER,  $R_{BE}$ )和眼图特性对比情况。从图 6(a)的误码率曲线可以看出,在使用 2R 再生器后系统误码率较使用前降低接近两个量级,当误码率达到  $10^{-9}$  时,使用再生器时所需的光信噪比(OSNR)也比使用前减小 1 dB。对比图 6(b)和 6(c)相同输入功率下得到的眼图可知,有再生器时眼图的张开度比无再生器时提高约 30%,说明再生器的使用使相邻码间的串扰减小了。

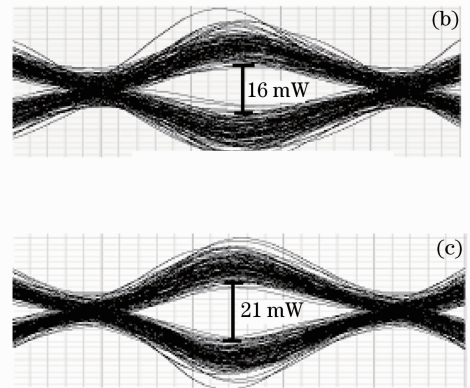
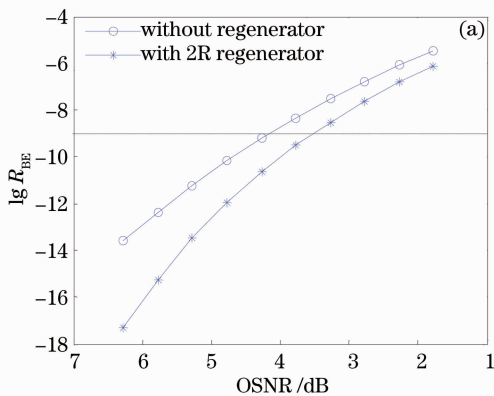


图 6 空间 DPSK 系统误码率及眼图特性。(a)系统误码率;(b)无再生器;(c)有再生器

Fig. 6 BER and eye diagrams of the inter-satellite DPSK system. (a) BER of the system; (b) without regenerator; (c) with regenerator

## 4 结 论

由于避开了控制复杂的光学锁相环,基于自查检测的 DPSK 调制被认为是一种极具竞争力的星间通信方式。然而,前置光放大器的引入使光链路上各种因素造成的信号损伤都得到了放大,加上放大器自发辐射噪声的影响,在接收端对光信号进行整形变得十分必要。本文提出了采用基于 NOLM 的全光 2R 再生器对接收信号进行放大、整形,理论推导了全光再生器的工作原理,并对影响再生器性能的器件参数进行了讨论,

结果表明全光再生器的引入能够显著改善系统的误码性能。

### 参 考 文 献

- 1 Fang Zhao, Jing Ma, Siyuan Yu, *et al.*. Impact of random angular jitter on fiber-coupled DPSK receivers with Mach-Zehnder interferometer demodulation [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(31): 6024–6029.
- 2 X Zhang, Z Qu, G Yang. Probability density function of noise statistics for optically pre-amplified DPSK receivers with optical Mach-Zehnder interferometer demodulation [J]. *Opt Commun*, 2006, 258(2): 177–183.
- 3 K P Ho. The effect of interferometer phase error on direct-detection DPSK and DQPSK signals [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(1): 308–310.
- 4 S Yamakawa, T Araki, H Morikawa. Analysis of noises generated in high-power-operated erbium doped fiber amplifiers and their influences on IM-DD/coherent OIC system performance [C]. *SPIE*, 2000, 39(32): 196–204.
- 5 Yuqiang Yang, Qiqi Han, Liying Tan, *et al.*. Research on bit error rate in the presence of local wavefront aberration in intersatellite laser communications [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(19): 2893–2898.
- 6 Jing Ma, Fang Zhao, Liying Tan, *et al.*. Degradation of single-mode fiber coupling efficiency due to localized wavefront aberrations in free-space laser communications [J]. *Opt Engng*, 2010, 49(4): 045004.
- 7 J Garcia-Marquez, J E A Landgrave, N Alcalá-Ochoa, *et al.*. Recursive wavefront aberration correction method for LCoS spatial light modulators [J]. *Optics and Laser Engineering*, 2011, 49: 743–748.
- 8 K Cvecek, K Sponsel, G Onishchukov, *et al.*. 2R-Regeneration of an RZ-DPSK signal using a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(3): 146–148.
- 9 Govind P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics Application of Nonlinear Fiber Optics (2th Edition)* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.*. Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.  
Govind P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用(第二版) [M]. 贾东方, 余震虹, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010.