文章编号:1001-5078(2017)01-0087-05

·光纤及光通讯技术 ·

# 不同 FBG 色散补偿结构中 OOK 传输性能对比

王现彬,王颖莉,杨彦彬,贾英茜 (石家庄学院物理与电气信息工程学院,河北石家庄 050000)

摘 要:光纤布拉格光栅(FBG)以其使用方便、造价低、可靠性高等优势在高速光纤通信系统 中逐步得到应用,而其色散补偿能力也一直备受研究者关注。文章对比研究了 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 三种开关键控(OOK)调制格式在预补偿、对称补偿和后补偿三种 FBG 色散补偿结构 中的传输性能,仿真结果表明 OOK 调制格式在 FBG 色散对称补偿结构中具有最好的传输性 能。当在 FBG 色散对称补偿结构中单独考虑非线性效应和偏振模色散(PMD)时 33% RZ 具 有较好的传输特性,而当综合考虑残留色散、非线性效应和 PMD 时,CSRZ 系统传输性能最佳。 关键词:光纤布拉格光栅;色散补偿;非线性效应;偏振模色散

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.01.017

# Comparison of OOK transmission performance in different FBG dispersion compensation structures

WANG Xian-bin, WANG Ying-li, YANG Yan-bin, JIA Ying-qian

(College of physical and electrical information engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract**: Fiber Bragg grating (FBG) has been gradually applied in high speed optical fiber communication systems with the advantages of convenient operation, low cost and high reliability, whose dispersion compensation abilities have attracted much attention. Transmission properties of three kind of on-off keying (OOK) modulation formats, including Not Return to Zero(NRZ), 33% Return to Zero(33% RZ) and Carrier Suppressed Return to Zero(CSRZ), were comparatively studied in FBG dispersion pre-compensation, symmetric-compensation and post-compensation structures. Simulation results show that OOK modulation formats have the best transmission performances in FBG dispersion symmetric-compensation structure. 33% RZ has better transmission characteristics when separately considering nonlinear effects and polarization mode dispersion (PMD), and CSRZ has the best system transmission performances when synthetically considering the residual dispersion, nonlinear effect and PMD.

Key words: fiber Bragg grating; dispersion compensation; nonlinear effects; polarization mode dispersion

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)以其使用方便、造价低、 可靠性高等优势在高速光纤通信系统中逐步得到应 用,特别是具有色散补偿能力的啁啾 FBG(chirp FBG)<sup>[1-2]</sup>。FBG 是一种典型的具有分布布拉格反 射特性的光纤,该种光纤中折射率周期性变化,从而 使得入射到 FBG 的光只有满足干涉时才会被反射 出来。且反射位置与光的波长有关,不同波长的光 在不同位置进行反射,而位置的不同也使得入射光 与反射光的时延有所不同,从而可以实现色散补偿 的功能<sup>[3-5]</sup>。在色散补偿方面,色散补偿光纤 (DCF)得到了充分的研究与应用<sup>[6-7]</sup>,而啁啾 FBG 的色散补偿能力少有研究报道,基于此文章采用预 补偿、对称补偿和后补偿三种 FBG 色散补偿结构,

基金项目:河北省科技计划项目(No. 15210606);石家庄学院科研启动项目(No. 16BS004)资助。

作者简介:王现彬(1981-),男,讲师,博士,主要从事光通信技术研究。E-mail:wswxb8@163.com 收稿日期:2016-05-16

对比研究了非归零码(NRZ)、33% 归零码(33% RZ) 和载波抑制归零码(CSRZ)等三种光开关键控 (OOK)调制格式的系统传输性能。结果表明 OOK 调制格式在 FBG 色散对称补偿结构中具有最好的 传输性能。当在 FBG 色散对称补偿系统中单独考 虑非线性效应和偏振模色散(PMD)时 33% RZ 具有 较好的传输特性;而当综合考虑残留色散、非线性效 应和 PMD 时,CSRZ 的系统传输性能最佳。

#### 2 光纤仿真系统构成

图1给出了仿真结构图,同时在图1的方框中 从上到下也给出了预补偿、对称补偿和后补偿方式 的三种 FBG 色散补偿结构。在 FBG 色散预补偿方 式中光信号进入信道后先通过 FBG 进行色散预补 偿,随后通过标准单模光纤(SSMF),再通过掺铒光 纤放大器(EDFA)进行功率放大,以补偿衰减的影 响;而在后补方式中则是将预补偿中的三个模块进 行位置颠倒,即先通过光纤传输,再用 EDFA 进行功 率放大,最后进行 FBG 的色散补偿;对称补偿方式 中前后各有一个 FBG 分别进行色散预补偿和后补 偿,具体结构如图1 所示。



图 1 仿真系统构成及信道中三种 FBG 色散补偿结构 Fig. 1 Simulation system structure diagram and three kinds of FBG dispersion compensation structure diagram in optical fiber communication system

图中 Loop 可以设置传输距离,在 FBG 色散预补偿 和后补偿方式中每个 Loop 中 SSMF 长度为 100 km,衰 减、色散和色散斜率分别为 0.2 dB/km、16 ps/nm/km 和 0.08 ps/nm<sup>2</sup>/km, 而差分群时延、有效纤芯面积和 纤芯 折射率指数分别为 3 ps/km、80  $\mu$ m<sup>2</sup> 和 2.6 × 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup>/W。EDFA 增益为 20 dB, 其噪声指数为 4 dB。FBG 中心频率和带宽分别设置为 193.1 THz 和 1 THz, 色散设置为 – 1600 ps/nm。在对称补偿方 式中每一个 Loop 有两段 SSMF、两个 EDFA 和两个 FBG 构成:每段 SSMF 长度为 50 km,其它参数与另外两种补偿方式相同;每个 FBG 色散为-800 ps/km, 其他参数也与另外两种补偿方式保持一致;每个 EDFA 的增益和噪声指数分别为 10 dB 和 2 dB。接 收机采用响应度为1 A/W 的 PIN 光电二极管,最后 在其后面级联一个截止频率为 0.8 倍传输速率的电 贝塞尔低通滤波器。

# 3 仿真结果分析

图 2 分别给出了 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 在预补 偿、对称补偿和后补偿三种 FBG 色散补偿方式下 Q 值与传输距离的对应关系。在仿真时忽略了非线性 效应(因为入纤功率低于 - 3 dBm),同时系统传输 速率设置为 10 Gbit/s,故 PMD 影响也可忽略,这样 只分析色散及衰减等的影响。

图 2 中的插图为 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 的光 频谱图,对比可以看出,NRZ的主瓣带宽最窄,而 33% RZ 主瓣带宽最宽。频谱越宽,意味着频率分 量越丰富,不同频率成分之间的时延差也更大,从 而频谱越宽受色散影响越严重。同时也可以看出 CSRZ 载波得到了有效抑制,从而可在一定程度上 提高其非线性容忍度。从图2可以看出,随着传 输距离的增大,三种 FBG 色散补偿方式下的系统 Q 值都在减小。在图 2(a) FBG 色散预补偿和后补 偿方式中,NRZ的Q值大小接近,表明NRZ在 FBG 色散预补偿和后补偿方式下传输性能相似, 当传输距离从 100 km 增大到 2000 km 时,系统 Q 值从 36.4 降低到 5.7。NRZ 在 FBG 色散对称补 偿方式下传输性能最好,当传输距离从100 km 增 大到 2000 km 时,系统 Q 值从 127.4 降低到了 21.6,传输性能明显优于预补偿和后补偿方式。 图 2(c) 也有类似的趋势, 即 CSRZ 在预补偿和后 补偿方式中传输性能相似,而在对称补偿方式中 传输性能最好,传输 2000 km 后, CSRZ 在 FBG 色 散预补偿和后补偿方式中系统 Q 值近似为 7.3, 而 在对称补偿方式下系统Q值为25.7。

在图 2(b)中,33% RZ 同样在 FBG 色散对称补 偿方式中传输性能最优,而在预补偿方式中传输性 能最差;传输 2000 km 后,33% RZ 在 FBG 色散预补 偿、对称补偿和后补偿方式中系统 Q 值分别为 5.0、 22.0 和 8.3。可以看出在只考虑色散时 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 三种调制格式在 FBG 色散对称补偿方式 中传输性能最优,而通过对比图1可知系统性能提 升是以增大系统复杂度为代价换来的。





FBG dispersion compensation structures only considering dispersion

为了作进一步分析,图 3 给出了 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 三种调制格式在 FBG 色散对称补偿方式 下系统 Q 值与传输距离的对应关系。从图 3 可以 看出,当传输距离低于 1000 km 时,33% RZ 调制 格式传输性能最好,NRZ 次之,CSRZ 性能最差;当 传输距离超过 1000 km 后,CSRZ 传输性能最好, 而 33% RZ 性能最差。传输距离较短时,残余色散 较少,由于 33% RZ 时域最窄,从而对残余色散所 引起的脉冲展宽具有最大的容忍度; NRZ 占空比 为 100%,但其频域最窄,从而也具有较大的色散 容忍度;而 CSRZ 时域和频域都不占优势,故其抗 色散能力最差。但随着传输距离的增大,传输性 能发生了翻转,原因是残留色散随传输距离进一 步变大,导致时域脉冲进一步展宽,而三者中 33% RZ 具有最宽的频谱,从而受色散影响最为严重, 虽然其脉冲宽度最窄,但脉冲展宽速度却最大,故 系统传输性能最差; NRZ 脉冲宽度最宽,但其 NRZ 频谱最窄,故受色散影响较 33% RZ 低一些; CSRZ 时域和频域中宽度都居中,从而具有最大的色散 容忍度。



图 4 给出了在最佳色散补偿方式下,即 FBG 色 散对称补偿方式中三种 OOK 调制格式的系统误码 率(BER)与接收光功率的对应关系,由于传输速率 仍为 10 Gbit/s,故不考虑 PMD 的影响,仿真时传输 距离设置为 600 km。当 BER 为  $10^{-3}$ 时(考虑前向 纠错后光纤传输系统所能承受的最高 BER),NRZ、 33% RZ 和 CSRZ 所对应的接收光功率分别为: – 19.54 dBm、– 22.76 dBm 和 – 22.65 dBm,可以看 出 33% RZ 具有最高的接收机灵敏度。当接收光功 率为 – 20 dBm 时,NRZ、33% RZ 和 CSRZ 所对应的 lg(BER)分别为: – 2.74、– 5.12 和 – 5.10,由此可 以看出 CSRZ 和 33% RZ 具有相似的抗非线性效应 能力,而 NRZ 抗非线性效应能力最低。





为了比较 PMD 在最佳补偿方式下对调制格式 的影响,将系统传输速率提高到 40 Gbit/s,同时为 了忽略非线性效应的影响,将入纤功率设置为 -3 dBm,传输距离设为 1000 km,其他参数设置与 前述相同。图 5 为按上述设置进行仿真后所得到三 种调制格式在 FBG 色散对称补偿方式中的传输眼 图,同时在眼图中给出了各自的 Q 值。其中 NRZ、 33% RZ 和 CSRZ 所对应的 Q 值分别为 11.2、17.2 和 16.1,从眼图的张开度也可以看出 33% RZ 抗 PMD 能力最强。原因是 33% RZ 时域脉冲最窄,其 占空比最小,具有最大的脉冲展宽冗余度,故在只考 虑 PMD 情况下其抗 PMD 能力最强。



图 5 只考虑 PMD 时三种 OOK 调制格式在 FBG 色散对称补偿系统中的眼图 Fig. 5 Eye diagram of three kinds of OOK modulation formats only

considering PMD in FBG dispersion symmetric-compensation system

图 6 给出了在 FBG 色散对称补偿方式中考虑 残留色散、非线性效应和 PMD 时,三种 OOK 调制 格式的 BER 随传输距离变化关系。为了考虑非线 性效应,仿真时设置入纤功率为 5 dBm,系统传输 速率为 40 Gbit/s,故 PMD 影响也需考虑在内。从 图 6 可以看出,在综合情况下,CSRZ 调制格式具 有最优的传输特性,33% RZ 居中,NRZ 传输特性 最差,当传输距离为 300 km 时,CSRZ、33% RZ 和 NRZ 所对应的 lg(BER)分别为 - 21.1、15.4 和 -9.4。在图6中还给出了当传输距离为 400 km 时三 种调制格式的眼图,对比眼图也可以看出 CSRZ 传 输特性最好。这主要得益于 CSRZ 的载波抑制能 力,从而使信号功率得到有效降低,减小了非线性效 应的影响;同时其时域的占空比和频域的频带宽度 居于三种调制格式中间,使其具有最佳的抗色散和 PMD 的能力。



图 6 综合考虑残留色散、非线性效应和 PMD 时 FBG 色散对称补偿结构中系统 BER 与传输距离对应关系 Fig. 6 Corresponding relationship between BER and transmission distance in FBG dispersion symmetric-compensation structure synthetically considering polarization mode dispersion, nonlinear effect and residual dispersion

### 4 结 论

FBG 以其使用方便、造价低、可靠性高等优势 在高速光纤通信系统中逐步得到应用,而其色散补 偿能力也一直备受研究者关注。文章对比研究了 NRZ、33% RZ 和 CSRZ 三种 OOK 调制格式在预补 偿、对称补偿和后补偿的 FBG 色散补偿结构中的传 输性能,仿真结果表明,三种 OOK 调制格式在 FBG 色散对称补偿结构中相较于 FBG 预补偿和后补偿 方式具有更好的传输性能。且三种 OOK 调制格式 在 FBG 色散对称补偿方式中传输性能也不同:当传 输距离低于 1000 km 时,33% RZ 调制格式传输性能 最好,NRZ次之,CSRZ性能最差;而当传输距离超 过1000 km 后, CSRZ 传输性能最好, 而 33% RZ 性 能最差。在只考虑非线性效应时,33% RZ 具有更高 的接收机灵敏度和抗非线性效应的能力。当只考虑 PMD 时,33% RZ 同样具有最好的传输特性。当综 合考虑残留色散、非线性效应和 PMD 时, CSRZ 具有 最佳的系统传输性能,在传输距离为300 km时,CS- RZ、33% RZ 和 NRZ 所对应的 lg(BER)分别为 -21.1、15.4 和 -9.4。该仿真结果为 FBG 色散补 偿应用提供了理论参考。

## 参考文献:

- Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments [J]. Sensors, 2012, 12(2):1898 1918.
- [2] Miller J W, Mendez A. Fiber Bragg grating sensors: market overview and new perspectives [J]. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation, 2014:313 – 320.
- [3] Panda M T K, Sahu A N, Sinha A. Performance analysis of 50km long fiber optic link using fiber bragg grating for dispersion compensation [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2016, 3(3):95-98.
- [4] Hessainia A, El-akrmi S, Triki H, et al. Analysis of fiber bragg grating with exponential-linear and parabolic taper profiles for dispersion slope compensation in optical fiber links[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17):4642-4645.

- [5] CAO Jihong, WANG Muguang, ZHANG Jianyong, et al. 40 Gbps NRZ transmitted over 500km based on broadband dispersion compensation CFBG [J]. Optical Technique, 2011,37(2):167-171. (in Chinese) 曹继红,王目光,张建勇,等. 40Gbps NRZ 在基于宽带 CFBG 色散补偿的 G. 652 光纤中无电中继传输 500km [J]. 光学技术,2011,37(2):167-171.
  [6] WANG Xianbin, JIA Yingqian, LU Zhijia, et al. Perform-
- [6] WANG Xianbin, JIA Tingqian, LO Zinjia, et al. Performance analysis of optical DQPSK modulation formats in different dispersion compensation systems [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1):80 - 83. (in Chinese) 王现彬, 贾英茜, 卢智嘉,等. 光 DQPSK 调制在不同色 散补偿系统中的性能[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 80 - 83.
- [7] Choudhary J, Garia L S, Shahi R S. Comparative analysis of DWDM system using different modulation and dispersion compensation techniques at different bit rates [J]. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), ISSN, 2014:2278 – 1021.