

文章编号: 0253-2239(2003)08-0937-4

光纤传输系统中互相位调制和受激拉曼散射串扰噪声的比较研究 II ——级联传输系统

蒋 志 范崇澄

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 在具有级联光放大器的密集波分复用强度调制-直接检测光纤系统中, 导出了包含互相位调制和受激拉曼散射共同作用的强度/相位矩阵表达式。在计算强度噪声谱的基础上, 研究了互相位调制和受激拉曼散射的相互耦合并用于密集波分复用系统的噪声分析。在带色散补偿的密集波分复用级联光纤传输系统中(如 80 信道, 信道间距 50 GHz), 受激拉曼散射引入的串扰噪声功率可能超过互相位调制。最后, 给出了密集波分复用系统分析与设计的若干建议。

关键词: 光纤通信; 互相位调制; 受激拉曼散射; 串扰噪声; 波分复用系统

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

在“光纤传输系统中互相位调制和受激拉曼散射串扰噪声的比较研究 I”中已经讨论了单级传输系统中互相位调制(SPM)和受激拉曼散射(SRS)串扰噪声及其相互作用^[1]。本文在此基础上讨论级联系统(特别是具有色散补偿的级联系统)中的互相位调制和受激拉曼散射串扰噪声及其相互作用。

2 级联系统互相位调制和受激拉曼散射噪声分析

文献[1]中导出的矩阵表达式很容易应用到级联系统。实际的光纤传输系统中为保证信号传输质量, 通常会采用色散补偿(或色散管理)措施。因为互相位调制需经色散才能转化为强度噪声, 故色散补偿可以大大抑制互相位调制的作用^[2-4]。另一方面, 受激拉曼散射引入的噪声受色散的影响要小得多^[5]。考虑 3×80 km 逐级色散补偿系统, 传输光纤段参量如前, 色散补偿光纤的参量为: $\alpha = 0.5$ dB·km⁻¹, $\gamma = 5.0$ (W·km⁻¹), $D_c = -80$ (ps·km⁻¹·nm⁻¹), $A = 22.8$ μm², 长度 $L_c = 4$ km(完全色散补偿), 光放大器补偿传输损耗和色散补偿光纤损

耗, 且经光放大器后各信道恢复至入纤光功率(放大器的增益平坦功能克服受激拉曼散射引起的平均功率转移)。调制信号的平均功率和连续波的平均功率均为 3 dBm。

图 1 给出了 $\Delta\lambda = 2$ nm 时互相位调制和受激拉曼散射共同作用时强度调制的幅频特性 $|2P_0 T_P(\omega)|$ 。与单段类似, 低频调制主要来源于受激拉曼散射, 高频调制主要来源于互相位调制。在过渡区域, 互相位调制和受激拉曼散射的共同作用与连续波和抽运调制波波长相对位置有关。但是由于色散补偿, 当 $\lambda_0 < \lambda_{\text{mod}}$ 时两者相干相长, $\lambda_0 > \lambda_{\text{mod}}$ 两者相干相消, 正好与单段情况相反。定性解释如下: 以 $\lambda_0 > \lambda_{\text{mod}}$ 为例, 传输过程中由互相位调制产生的相位调制受到余下的传输光纤色散转换^[5], 无色散补偿时, 余下的色散值为正, 互相位调制和受激拉曼散射产生的强度调制同相, 两者相干相长^[6]; 完全色散补偿情况下, 余下的色散值为负, 互相位调制产生的强度调制反相, 而受激拉曼散射不变, 两者相干相消。此外, 图 1 中高频区理论和数值模拟结果差别大于单段, 这是因为抽运调制波波形不变的假定随着级联系统中传输距离增加误差会越来越大。

E-mail: jiangzhi99@mails.tsinghua.edu.cn; deefcc@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2002-04-26; 收到修改稿日期: 2002-07-22

注) 单级情况下, 受激拉曼散射引入的噪声与色散补偿几乎无关。但在多级情况下, 受激拉曼散射引入的噪声在各级均有色散补偿时会比各级均无色散补偿时大, 其原因是经色散补偿后连续波与调制波之间的走离会被“拉回”。

图 2 给出了互相位调制和受激拉曼散射引起的噪声谱。与文献[1]中图 3 的主要区别是:由于色散补偿,当 $\lambda_0 < \lambda_{mod}$ 时两者相干相长噪声增强,而 $\lambda_0 > \lambda_{mod}$ 时两者相干相消。同时,由于色散补偿和级联的因素,噪声谱出现振荡(主要起因于互相位调制效应在某些频率下的“共振”^[2])。

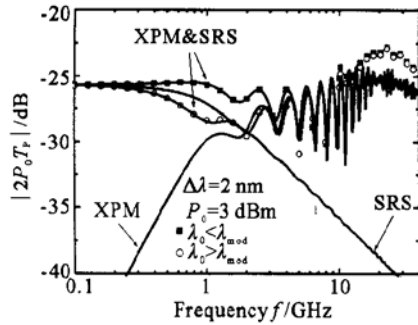


Fig. 1 Frequency response of intensity modulation caused by XPM and SRS in 3×80 km system. Curves: analytical, dots: simulation

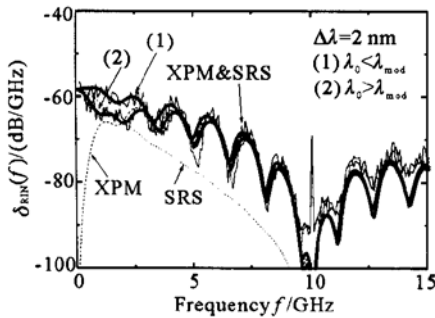


Fig. 2 Relative intensity noise spectral density $\delta_{RIN}(f)$ caused by XPM and SRS in a 3×80 km system. Curves: analytical, zigzag lines: simulation

图 3 给出了相对强度噪声 σ_{RIN}^2 随信道间距的关系。与单级无色散系统比较,色散补偿大大抑制了互相位调制引入的噪声。由图 3 可见,当 $\Delta\lambda > 2$ nm 时噪声主要来源于受激拉曼散射而不是互相位调制。

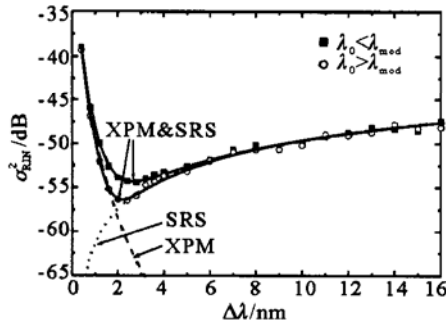


Fig. 3 Relative intensity noise σ_{RIN}^2 caused by XPM and SRS in a 3×80 km system. Curves: analytical, dots: simulation

考察信道间距 50 GHz(0.4 nm)的 40 信道和 80 信道波分复用系统。由于各个调制信号相互独立,某一信道总的串扰噪声是各个信道引起的噪声之和。在多信道完全色散补偿情况下,受激拉曼散射引起的串扰就有可能和互相位调制相比拟。利用图 3 可以计算出各个信道受到的总串扰噪声功率 σ_{RIN}^2 及受激拉曼散射引起的串扰噪声功率所占的比例

$$\frac{\sigma_{SRS}^2}{\sigma_{RIN}^2} \approx \frac{\sigma_{RIN}^2 |_{|\Delta\lambda| > 2 \text{ nm}}}{\sigma_{RIN}^2}$$

为简化计,虽然所有信道都同时产生互相位调制和受激拉曼散射串扰噪声,但计算中把 $|\Delta\lambda| > 2$ nm 的总串扰噪声都作为受激拉曼散射串扰噪声,而把 $|\Delta\lambda| \leq 2$ nm 的总串扰噪声都作为互相位调制串扰噪声。本近似的合理性见前。计算结果见图 4,可见:

1) 物理上,互相位调制引起的串扰噪声仅与邻近的少数信道有关。因此,趋于边缘的信道,互相位调制串扰噪声变弱;而靠近频带中心的大部分信道,其互相位调制串扰噪声与信道号基本无关;故互相位调制串扰噪声与信道数的关系类似于某种梯形函数。另一方面,受激拉曼散射正比于信道间隔,故中间信道比边缘信道的受激拉曼散射串扰噪声低,使受激拉曼散射串扰噪声与信道数的关系类似于某种马鞍型函数。显然,在总串扰噪声中,中间频道的受激拉曼散射串扰噪声所占比例最小。这些规律在图 4 中都得到了体现。

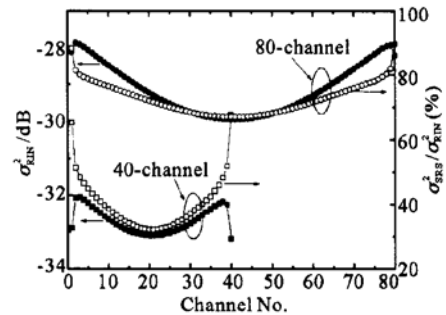


Fig. 4 σ_{RIN}^2 versus channel No. in 40- and 80-channel systems

2) 在给定条件下,对 40 信道系统,各信道受到的串扰噪声以互相位调制串扰噪声为主;而对 80 信道的系统,则受激拉曼散射串扰噪声可能超过互相位调制串扰噪声,成为限制系统性能的主要因素。

需要指出的是:这里仅计算了互相位调制与受激拉曼散射的串扰噪声功率,对系统误码的影响还要求知道噪声的具体统计特性。文献[7]指出波分复用系统中受激拉曼散射噪声呈对数正态分布。而互相位

调制由于只有几个邻近信道起主要作用,且这几个信道引入的互相位调制串扰噪声彼此相差甚大,不能用大数定理近似为正态分布,其统计特性不易计算。因此互相位调制和受激拉曼散射串扰噪声功率对系统误码特性的影响还需要进一步另行分析。

3 对于级联放大密集波分复用系统分析与设计的若干建议

根据以上讨论,可提出如下建议供级联密集波分复用系统的分析与设计作参考。

1) 多信道密集波分复用系统受激拉曼散射引入的噪声功率有可能超过互相位调制引入的噪声功率,因此在系统设计、分析和仿真中必须加以考虑。例如在系统仿真时,如果仅计算互相位调制,那么一般计算相邻几个信道的作用就可以满足计算精度,而计算受激拉曼散射则必须考虑所有信道的相互作用,同时由于相隔较远的信道走离明显,要求模拟计算步长足够短。再者,由于受激拉曼散射引入低频噪声,因此准确的模拟计算需要较长的码序列(2^{10} 或更多)。这几个方面的要求将使得包含受激拉曼散射噪声的系统仿真时间和空间复杂度大大增加。

2) 把互相位调制和受激拉曼散射引入串扰噪声功率大小作为系统设计的考虑之一。例如在给定噪声功率容限的情况下,合理选择信道间距和总信道数;在对系统色散管理方案进行优化时,尽可能抑制互相位调制和受激拉曼散射引入的串扰噪声等。具体的工作在进一步进行中。

3) 理论分析相对于数值模拟可以大大节约计算时间。此点非常适合在系统初期设计中确定系统参量,再根据这些参量进行更实际的数值模拟并进一步优化系统参量。

4 总 结

在级联强度调制-直接检测光纤系统中,导出了包含互相位调制和受激拉曼散射共同作用下的强度/相位矩阵表达式,由于互相位调制引入相位调制而受激拉曼散射引入强度调制,因此两者在物理起因和数学形式上具有对称性。在计算强度噪声谱的基础上,研究了互相位调制和受激拉曼散射的相互耦合用于波分复用系统分析。分析表明:受激拉曼

散射主要引起低频串扰噪声,互相位调制主要引入高频串扰噪声。相邻较近信道引入的串扰噪声主要来源于互相位调制,相邻较远信道引入的串扰噪声主要来源于受激拉曼散射。无色散补偿系统,当 $\lambda_0 < \lambda_{\text{mod}}$ 互相位调制和受激拉曼散射的作用趋于相消,而 $\lambda_0 > \lambda_{\text{mod}}$ 时两者的作用趋于相长;有色散补偿系统,互相位调制和受激拉曼散射之间的作用正好相反。无色散补偿系统,互相位调制的作用超过受激拉曼散射,这类系统性能首先受到互相位调制的限制。有色散补偿系统,由于色散补偿可以大大抑制互相位调制转化的强度噪声,因此在多信道带色散补偿的光纤系统中(如80信道,信道间距0.4 nm),受激拉曼散射引入的噪声功率可能会超过互相位调制。据此给出了密集波分复用系统分析与设计的若干建议:必须考虑所有信道的受激拉曼散射;把互相位调制和受激拉曼散射引入串扰噪声功率大小作为系统设计的考虑之一;理论分析相对于数值模拟可以大大节约计算时间,有利于进一步优化系统参量。

参 考 文 献

- 1 Jiang Zhi, Fan Chongcheng. Comparative study of XPM- and SRS-induced crosstalk in optical fiber transmission systems I -single span transmission system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 834~ 839 (in Chinese)
- 2 Cartaxo A. Cross phase modulation in intensity modulation-direct detection WDM systems with multiple optical amplifiers and dispersion compensators. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(2): 178~ 190
- 3 Hui R, Demarest K R, Allen C T. Cross phase modulation in multispan WDM optical fiber systems. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(6): 1018~ 1026
- 4 Shatif M, Eiselt M. Analysis of intensity interference caused by cross phase modulation in dispersive optical fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(7): 979~ 981
- 5 Cartaxo A. Impact of modulation frequency on cross-phase modulation effect in intensity modulation direct detection WDM systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(9): 1268~ 1270
- 6 Yang F S, Marhic M E, Kazovsky L G. Nonlinear crosstalk and two countermeasures in SCM-WDM optical communication systems. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(4): 512~ 520
- 7 Ho K P. Statistical properties of stimulated Raman crosstalk in WDM systems. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(7): 915~ 921

Comparative Study of XPM- and SRS-Induced Crosstalk in Optical Fiber Transmission Systems II —— Cascaded Transmission System

Jiang Zhi Fan Chongcheng

(*Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 26 April 2002; revised 22 July 2002)

Abstract: Intensity/phase transfer matrices are derived to characterize both cross-phase modulation (XPM) and Stimulated Raman Scattering (SRS) in cascaded IM-DD optical fiber transmission systems. Based on the calculation of intensity noise spectrum, comparative study of XPM- and SRS-induced crosstalk is performed analytically and numerically. Analysis reveals that SRS and XPM leads mainly to low-frequency and high-frequency noise, respectively; crosstalk from adjacent channels is mainly attributed to XPM while that from channels afar mainly attributed to SRS; in cascaded transmission systems, crosstalk noise power from SRS may even exceed that from XPM. Finally, some suggestions are proposed for the design and analysis of DWDM systems.

Key words: optical fiber communication; cross-phase modulation (XPM); stimulated Raman scattering (SRS); crosstalk; wavelength-division multiplexing (WDM)