

SRS 效应对 DWDM 光通信系统质量影响的分析

刘 毓, 孙亚尼, 方立杰, 李世杰

(西安邮电学院 电子与信息工程系, 陕西 西安 710061)

摘要:文章基于在时域分步法存在衰减、色散走离和受激 Raman 散射(SRS)效应作用条件下的 N 信道 SRS 效应计算模型, 使用 MATLAB 软件进行仿真, 通过数据仿真分析了 SRS 耦合效应对密集波分复用(DWDM)光通信系统质量造成的影响以及输入功率、信道数与 SRS 耦合效应的关系, 对进一步研究 SRS 效应对 DWDM 光通信系统性能的影响有着十分重要的意义。

关键词:受激 Raman 散射; 输入功率; Raman 串话; 信噪比

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-8788(2010)01-0001-04

Analysis of stimulated Raman scattering effects on DWDM optical communication systems

Liu Yu, Sun Yani, Fang Lijie, Li Shijie

(Department of Electronic and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: On the basis of the calculation model for N -channel Stimulated Raman Scattering (SRS) effects under the conditions of attenuation, dispersive walk-away and SRS, this article analyzes by numerical simulation the coupling effects of SRS on the performance of DWDM fiber-optic communication systems and the relevance between the input power, number of channels and SRS coupling effect, which is of major importance to the further study on this subject.

Key words: SRS; input power; Raman cross-talk; SNR

本文基于在时域分步法存在衰减、色散走离和受激 Raman 散射(SRS)效应作用条件下的 N 信道 SRS 效应计算模型^[1~2], 通过大量的仿真结果对比分析了 SRS 效应对密集波分复用(DWDM)通信系统质量的影响, 并运用不同输入功率、不同信道数目来分析输入功率及信道数对 SRS 效应所引起的 Raman 串话和 SRS 噪声的影响。

1 SRS 效应引起的 Raman 串话

SRS 耦合效应引起的短波长信道功率向长波长信道功率的转移, 不仅增大了短波长信道功率的损耗, 同时还产生了信道间的 Raman 串话^[3~5], Raman 串话 XT 被定义为

$$XT(z) = E \left[\frac{p_i(z, t) - p_0 e^{-\alpha z}}{p_0 e^{-\alpha z}} \right] = E \left[\frac{p_i(z, t)}{p_0 e^{-\alpha z}} - 1 \right], \quad (1)$$

式中, $p_i(z, t)$ 为有 SRS 效应条件下的传输功率; $p_0 e^{-\alpha z}$ 为仅受衰减影响的传输功率, 即无 SRS 效应条件下的传输功率。从理论上分析, 由于 SRS 效应引起信道间的功率转移, 最短波长信道受 SRS 效应影响最大, 转移出去的功率最多, 同样最长波长信道得到转移来的功率最多; 中间信道不受 SRS 效应影

响, 不得到功率也不转移功率。因此最短波长信道和最长波长信道间的 Raman 串话应最大, 中间信道的 Raman 串话应为零。

为验证理论分析, 使用 MATLAB 软件进行仿真。在衰减、色散走离和 SRS 共同作用的条件下, 我们分别对 5 信道、输入功率为 10 mW、传输距离为 80 km 及 10 信道、输入功率为 1 mW、传输距离为 80 km 的 Raman 串话进行了仿真, 仿真程序中的基本数据设置为: 频率间隔 $\Delta\lambda = 1.61$ nm; 第一信道波长 $\lambda_1 = 1548.51$ nm, $\lambda_i = \lambda_1 + (i-1)\Delta\lambda$; 光纤有效截面积 $A_e = 50 \mu\text{m}^2$; 保偏系数 $M_e = 2$ 。

图 1 所示为 5 信道 Raman 串话随距离变化的曲线, 图中, 各曲线关于第 3 信道对称, 且第 3 信道的 $XT = 0$, 这表明第 3 信道没有 Raman 串话, 不受 SRS 效应的影响, 作为最短和最长波长信道的第 1、5 信道的 Raman 串话最大。图 2 所示为 10 信道 Raman 串话随距离变化的曲线, 图中, 曲线分布较密, 随着信道数的增多, 各信道转移出功率或得到功率增多, 因此 SRS 效应所引起的信道间 Raman 串话也越来越大。仿真图中各曲线分布和我们之前的理论分析达到了很好的吻合。

收稿日期: 2009-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60677005); 陕西省自然科学基金资助项目(2006F16)

作者简介: 刘毓(1963-), 女, 甘肃榆中人, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信。

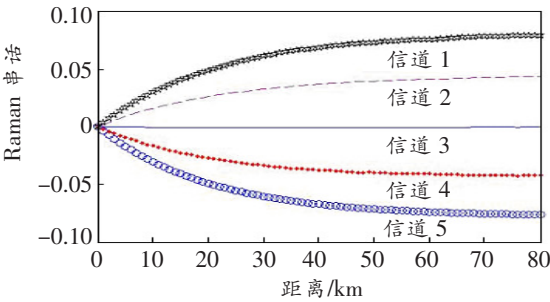


图 1 5 信道 Raman 串话随距离的变化曲线

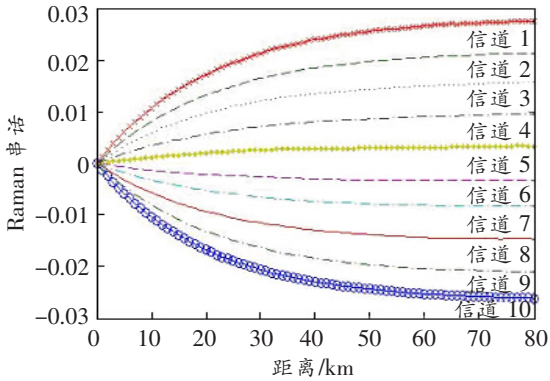


图 2 10 信道 Raman 串话随距离的变化曲线

结合式(1)进行分析,Raman 串话受两个因素 $p(z,t)$ 和 $p_0 e^{-\alpha z}$ 的影响。在传输距离较短时,SRS 效应对各信道的影响较大且远大于各信道衰减的影响,即 $p_i(z,t)$ 远大于 $p_0 e^{-\alpha z}$,XT 的值增幅较大,因此各信道曲线开始时有较大的上升或下降(本系统是 20 km 以内),随着传输距离的增加,SRS 效应逐渐减弱, $p_i(z,t)$ 的值逐渐减小并趋于稳定,XT 的值只受 $p_0 e^{-\alpha z}$ 的影响,由此曲线渐渐趋于平缓。

比较图 1、图 2 还可以看出,信道数不同,输入功率也不同。仿真过程中如果对 10 信道与 5 信道使用相同的输入功率,Raman 串话有很大偏离,达不到我们想要的结果,这说明输入功率、信道数都会影响所产生的 Raman 串话的大小,具体影响我们将在下面详细分析。

2 SRS 效应引起的 SRS 噪声

SRS 效应会引起 SRS 噪声,影响系统性能,要衡量 SRS 效应对通信质量的影响,可以用表示系统性能的参数“输出信噪比(SNR)”来进行分析。输出 SNR 定义为

$$SNR = p_i^{\text{mean}}(z,t)/\sigma_i, \tag{2}$$

式中, $p_i^{\text{mean}}(z,t)$ 为无 SRS 时输出信号的平均功率; σ_i 为输出功率波动的标准差,且

$$\sigma_i = \sqrt{E[p_i(z,t) - p_i^{\text{mean}}(z,t)]^2}。 \tag{3}$$

分析式(2)、(3)可知,在短距离传输时,各信道受 SRS 效应影响较大,即 $p_i(z,t)$ 的值较 $p_i^{\text{mean}}(z,t)$ 大,因此引起 σ_i 波动较大,SNR 较小。随着传输距离的增加,SRS 效应影响减弱, $p_i(z,t)$ 逐渐减小, σ_i 也逐渐减小,SNR 逐渐增大,到达一定的传输距离时基本趋于不变值。从上述公式中还可以看到,受 SRS 效应影响小的信道波动小,则 SNR 较大。同样我们通过仿真图分析一下,仿真程序中的基本数据设置与 Raman 噪声中的数据设置相同,在衰减、色散走离和 SRS 效应共同作用的条件下,分别画出输入功率为 0.05 mW 时,5 信道及 10 信道输出 SNR 经 80 km 传输后的曲线。

由图 3 可以看出,5 信道中第 3 信道的输出 SNR 最大,因此受到 SRS 噪声干扰最小,系统性能最好;其次是第 2、第 4 信道,其输出 SNR 小于第 3 信道,SNR 大小非常接近,这说明它们受到的 SRS 噪声干扰相当;第 1、第 5 信道 SNR 最小,且大小非常接近,可见它们受到的 SRS 噪声干扰是最大的,验证了我们的公式分析。

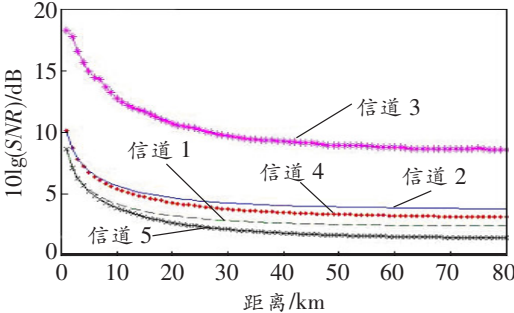


图 3 5 信道输出 SNR 随传输距离的变化曲线

图 4 中,中间的第 5 信道虽然比其他信道的输出 SNR 稍大,但各信道输出 SNR 趋于接近;我们还可以看出,在使用与 5 信道相同的输入功率时,随着信道数的增多,信道间受 SRS 效应影响增大,波动的标准差增大,SNR 有下降的趋势,说明系统受 SRS 噪声的影响随信道数的增加越来越明显。

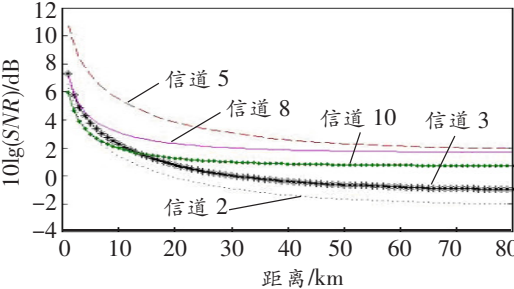


图 4 10 信道输出 SNR 随传输距离的变化曲线

由图 3、图 4 可知,在本系统中,起初的前 20 km,由于各信道的 SRS 噪声比信道的平均功

率小,因此 SNR 大,但随着传输距离的增加,SNR 有明显的下降,这表明 SRS 噪声干扰在逐渐增大,且大过信道的平均功率。传输到 20 km 以后,输出 SNR 基本趋于稳定,与公式分析一致。

3 输入功率与 SRS 效应的关系

由前文分析可知,在传输距离较短时, $XT > 1$, 若对式(1)取对数则 $\lg XT$ 是单调递增的。随着传输距离增加, XT 趋于稳定, $\lg XT$ 是一个常数。

数据设置同前,输入功率分别为 1、10、100 mW 时,5 信道中最短波长信道的 Raman 串话及输出 SNR 随传输距离的变化曲线。如图 5、图 6 所示。

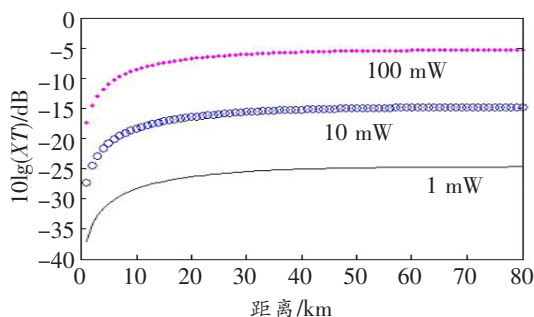


图 5 不同输入功率时 Raman 串话随传输距离的变化曲线

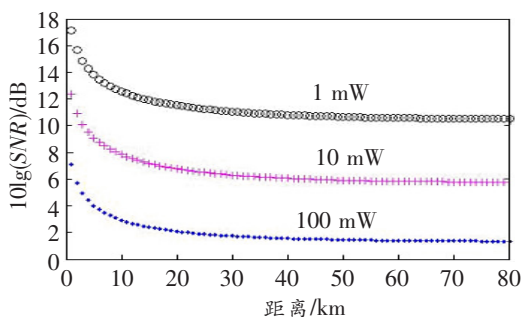


图 6 不同输入功率时 SNR 随传输距离的变化曲线

在图 6 中,输入功率较小时,所引起的 SRS 噪声也较小,因此输出 SNR 就大;随着输入功率的增加,引起的 SRS 噪声也随之增大,输出 SNR 随之减小。可见,输入功率的大小与输出 SNR 的大小密切相关。

4 信道数与 SRS 效应的关系

各信道的平均传输功率随传输距离变化表示为

$$p_i^{\text{mean}}(z) = E[P_i(z, t)], \quad (4)$$

从式(4)可以看出,输出功率大的信道,即得到功率多的信道,其输出功率均值也大。我们采用与前面相同的信道间隔、光纤衰减系数、色散参量以及相同的 Raman 增益曲线,对输入功率为 100 mW 的 5 信

道及 10 信道输出功率均值进行了数据仿真,结果如图 7、图 8 所示。

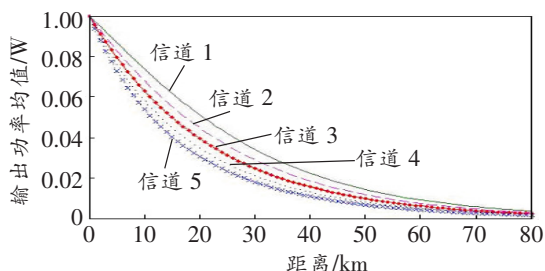


图 7 5 信道输出功率均值随传输距离的变化

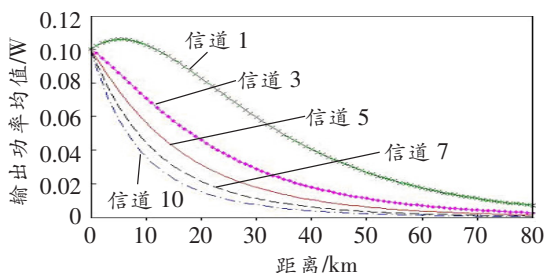


图 8 10 信道输出功率均值随传输距离的变化

在图 7 中,曲线由上到下依次为最长波长的第 1 信道到最短波长的第 5 信道,第 3 信道是中间信道,没有受到 SRS 效应的影响。随着信道数的增多, SRS 效应使信道间功率转移加大。

图 8 中可以看到一种现象,最长波长的第 1 信道在最初的 10 km 传输中输出功率均值超过了输入功率值,这是由于在最初 10 km 的传输距离中,信道数的增多使得 SRS 效应对信道间功率转移的影响增大,如和 5 信道图中使用相同的输入功率就会出现最长波长信道输出功率均值大过初始输入功率的现象。随着传输距离的增加, SRS 效应逐渐减弱,衰减又成为了主要的影响因素。还可以看到各曲线间偏离加大,因此随着信道数的增多, SRS 效应产生的影响也越来越大。

前面已给出输出功率波动标准差的表达式(见式(3)),采用与前面相同的条件进行数据仿真,得到了在衰减、色散走离和 SRS 效应共同作用下,5 信道及 10 信道时 σ_i 随传输距离变化的曲线如图 9、图 10 所示。

分析图 9、图 10 可知,中间信道或者靠近中间信道的信道较小,即波动较小。传输之初,曲线逐渐上升,在 10 km 左右,输出功率标准差的波动最大,这是因为在传输距离 < 10 km 时, SRS 效应对各信道的影响较之各信道的衰减较小。随着传输距离的增加, SRS 效应的影响逐渐增大,大过各信道衰减的影响,到 10 km 处各信道受到 SRS 效应的影响最

大。随着传输距离的继续增加,波动逐渐减小,在 80 km 以后基本趋于平缓。图 10 中,为了比较各信道输出功率标准差的波动大小,分别画出第 2、3、5、7、10 信道的输出功率标准差随传输距离变化的波动曲线图,由图可见,使用相同的输入功率,增加信道数,波动的标准差的值有明显增大。

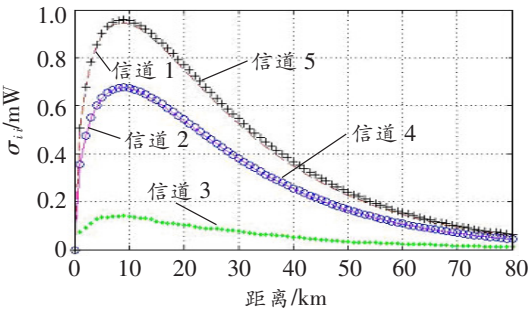


图 9 5 信道时 σ_i 随距离的变化曲线

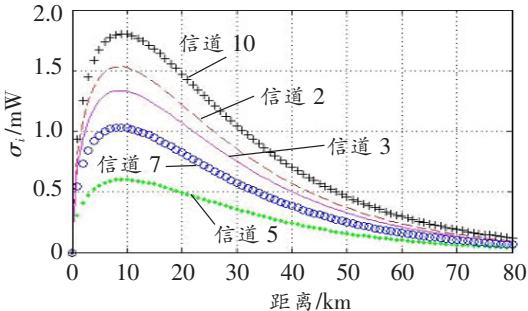


图 10 10 信道时 σ_i 随距离的变化曲线

图 11 给出了在不同的传输距离处,最短波长信道的输出功率波动的标准差与系统信道数的关系。比较图 10 和图 11 可知,在 10 km 传输距离处,最短波长信道的 σ_i 波动最大,且信道数越多,波动越大。随传输距离、信道数的增加, σ_i 逐渐减小,到 80 km 时波动很小,已基本趋于平缓,两幅仿真图的分析达到了很好的一致。

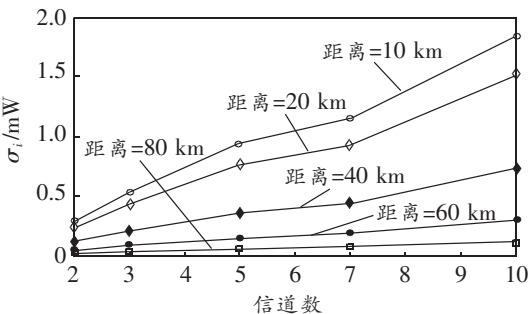


图 11 σ_i 与系统信道数的关系

图 12 给出了不同传输距离处,最短波长信道的 SNR 与系统信道数的关系。随着复用信道数的增多,SRS 噪声所引起的 SNR 随之减小,信道数越

多,SNR 越小;从图中还可以看出,传输距离在 10 km 时,系统的输出 SNR 相对较大,随着传输距离的增加,系统的输出 SNR 随之减小,但是当传输距离达到一定值时,如本系统中 >40 km 以后,系统的输出 SNR 的值相差很小,基本趋于不变。

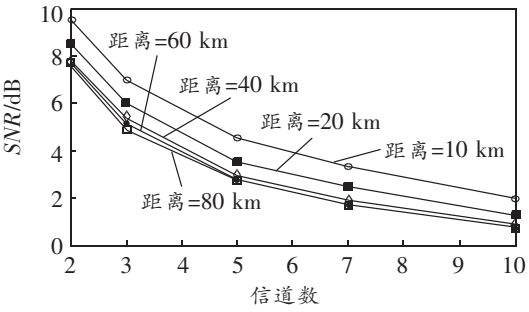


图 12 输出 SNR 与系统信道数的关系

5 结束语

非线性 SRS 耦合效应使得短波长信道的功率向长波长信道转移,这个转移与信道的输入功率、信道的复用数目以及传输距离等因素有关。输入功率、复用信道数越大,SRS 效应越大,对通信系统的影响也就越大。本文基于衰减、色散走离和 SRS 效应共同作用下的 5 信道及 10 信道的输出光功率的数据值,分析了 SRS 效应对 DWDM 光通信传输系统质量的影响,并通过大量的仿真结果对比,详细分析了输入功率和信道数与 SRS 耦合效应的关系,这对于我们进一步研究 SRS 效应对 DWDM 光通信系统性能的影响有着十分重要的意义。

参考文献:

[1] 刘毓. SRS 对 DWDM 光纤通信系统性能影响的研究 [D]. 西安:中国科学院研究生院(国家授时中心), 2006.

[2] 刘毓,方强,巩稼民,等. DWDM 系统中色散对受激喇曼散射的影响 [J]. SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS, 2006, 27(5): 590-594.

[3] 巩稼民,方强,刘娟,等. 密集波分复用石英光纤中受激喇曼散射对信号光的影响 [J]. 物理学报, 2000, 49(3): 449-454.

[4] 刘毓,方强,阴亚芳. WDM 系统中色散走离条件下的拉曼串话研究 [J]. 光通信研究, 2006, (4): 10-12.

[5] SINGH M L, HUDIARA I S. A piece wise linear solution for nonlinear SRS effect in DWDM fiber optic communication systems [J]. Journal of Microwaves and Optoelectronics, 2004, 3(4): 29-38.