

文章编号: 0253-2239(2005)09-1171-5

采用光纤拉曼放大改善 1550 nm 外调制 有线电视系统的组合二阶失真指标*

王春华 李 力 李凤勤

(上海大学通信学院, 上海 200072)

摘要: 为克服长距离光纤有线电视(CATV)系统中采用高增益掺铒光纤放大器(EDFA)所带来的非线性损伤,对在残留边带调幅(AM-VSB)外调制光纤有线电视系统中采用光纤分布拉曼放大时的组合二阶失真(CSO)进行了理论研究。根据拉曼放大对信号光强的增益作用,导出了分布拉曼放大条件下的薛定谔方程,并采用微扰法解出了存在拉曼分布放大时,残留边带调幅外调制有线电视系统中,自相位调制(SPM)导致的组合二阶失真的解析表达式。相应数值计算结果表明,相对于采用掺铒光纤放大器功放,采用相同放大倍数的分布拉曼放大可使长距离系统中自相位调制导致的组合二阶失真性能改善 10 dB 以上。因此可以得出结论:在长距离残留边带调幅调制的有线电视系统中,采用分布式光纤拉曼放大可以较好地改善由自相位调制导致的组合二阶失真恶化。

关键词: 光纤通信; 光纤有线电视; 光纤拉曼放大器; 自相位调制; 组合二阶失真; 微扰

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Improving Composite Second Order Distortion Performances of Externally-Modulated CATV Systems by Optical Fiber Raman Amplifiers

Wang Chunhua Li Li Li Fengqin

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: The composite second order distortion (CSO) induced by self-phase modulation (SPM) in a vestigial sideband amplitude modulation (AM-VSB) externally modulated CATV system employing optical fiber Raman amplifier is studied theoretically. Firstly, the SPM-induced CSO expression is obtained analytically by solving Schrödinger equation with the help of perturbation method. Subsequently the corresponding numerical results are presented and discussed. According to the calculation results, it is shown that, compared with using EDFA, the CSO performance can be improved by more than 10 dB by using distributed Raman amplification in the system.

Key words: optical fiber communication; optical fiber CATV; optical fiber Raman amplifier; self-phase modulation; composite second order distortion; perturbation

1 引 言

目前的长距离($L > 100$ km)模拟光纤有线电视(CATV)系统主要是采用残留边带调幅(AM-VSB)方式的 1550 nm 波长外调制系统,系统中采用掺铒光纤放大器(EDFA)级联方式,来实现长距离系统的功率预算。如果进行合理的功率预算设计,可以设计出满足载噪比(CNR)的系统。但长距离系统

中,除载噪比之外,更重要的是 1550 nm 波长上光纤的大色散系数、大入纤光功率及较长的传输距离,使得光纤非线性导致的组合二阶失真(CSO)严重恶化。在直接调制有线电视系统中,直接强度调制产生的相位啁啾,在色散作用下产生的组合二阶失真是直接调制系统中光纤导致的组合二阶失真的主要因素。而对外调制系统而言,光纤中的组合二阶失

* 上海市科学技术重点基础性研究项目(00JC14026)资助课题。

作者简介: 王春华(1963~),女,山东人,上海大学副教授,博士,主要从事光纤传感器、光纤通信及光网络技术方面的研究。E-mail: lizawch@sina.com

收稿日期: 2004-09-28; 收到修改稿日期: 2005-03-07

真则主要来自于自相位调制导致的相位啁啾、一定的光源谱宽及为抑制受激布里渊散射(SBS)而产生的光谱展宽在色散作用下导致的组合二阶失真。因此考虑各种有效的方法补偿长距离有线电视系统中的色散与自相位效应一直是该领域的研究热点。

对于光谱展宽或一定的光源谱宽在色散作用下导致的组合二阶失真可以通过负色散补偿光纤或线性啁啾光纤光栅进行消除。而对自相位调制导致的组合二阶失真的补偿方法,现已报道的主要有三种:一是采用新型的大有效截面光纤(LEAF)^[1],该方法虽然可以降低自相位调制效应,同时还可以提高光纤的受激布里渊散射阈值,但效果有限且大有效截面光纤价格较高。二是在发送端对光信号进行预相位调制^[2],该方案的设备复杂,需要专门的外调制器进行预啁啾。三是采用波长复用的方法^[3],该方法的缺点是需要两台发射机。

拉曼放大由于其宽光谱特性,一直以来被认为

是密集波分复用(DWDM)系统的光放大器^[4,5]。虽然相对掺铒光纤放大器的集中放大,拉曼分布放大可以大大减少光纤中信号光功率密度,降低非线性效应的影响。但由于掺铒光纤放大器的放大效率较高、价格相对低廉,因此拉曼放大在单波长有线电视中未得到广泛应用。有关拉曼放大器对有线电视系统指标的影响尚未见研究报道,仅有文献[8]对拉曼放大的载噪比(CNR)进行了部分实验研究。本文研究了在残留边带调幅光纤有线电视系统中使用分布拉曼光放大对系统组合二阶失真指标的影响。

2 理论推导

光纤中存在分布拉曼放大时,沿光纤分布的信号光功率为^[7]

$$x(z) = x(0)\exp[-\alpha_s z + G(z)], \quad (1)$$

其中

$$G(z) = \begin{cases} \frac{K \ln G_f}{L_{\text{eff}} \alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p z)], & \text{(前向抽运)} \\ \frac{K \ln G_b}{L_{\text{eff}} \alpha_p} \{ \exp[-\alpha_p (L - z)] - \exp(-\alpha_p L) \}, & \text{(后向抽运)} \end{cases} \quad (2)$$

$K = 1 \sim 2$,为拉曼效应的偏振因子, L 为光纤长度, $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)]/\alpha_p$ 为光纤等效长度, G_f, G_b 为前、后向抽运时的拉曼增益, α_s, α_p 分别为光纤的信号光和抽运光损耗。由于后向抽运拉曼放大将引起系统载噪比(CNR)指标的严重劣化^[7],因此只讨论前向抽运拉曼放大的情况。

如果同时考虑光纤中的拉曼放大、光纤损耗、色散及非线性,抽运光场不仅对信号光场带来(1)式的振幅增益,而且由于互相位调制(XPM)效应,会引入相位啁啾^[8],但一般而言由于作为放大作用的抽运光功率基本保持恒定,因此拉曼抽运导致的相位啁啾可以忽略不计,而只考虑其增益影响。因此由文献[9]和(1)式可以得到存在拉曼放大时,信号光

在光纤中传输的薛定谔方程为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \dot{\beta} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{j}{2} \ddot{\beta} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \alpha_s A = j\gamma |A|^2 A + \frac{1}{2} \frac{dG(z)}{dz} A, \quad (3)$$

其中 $\dot{\beta} = 1/v_g, \ddot{\beta} = -\lambda^2 D/2\pi c$ 为光纤的一阶、二阶色散系数, v_g 为群速度, λ 为光波波长, D 为光纤色散系数, c 为真空中光速, α_s 为信号光损耗, $\gamma = k_0 n_2/A_{\text{eff}}$ 为光纤非线性系数, k_0 为真空中波数, n_2 为二次折射率系数, A_{eff} 为光纤有效面积。 $G(z)$ 为信号光的拉曼分布放大系数。

考虑到光纤损耗与拉曼增益,残留边带调幅外调制有线电视传输系统中,信号的光场表达式可设为

$$A(z, t) = \sqrt{A_0 \bar{x}(z, t)} \exp[-\alpha_s z + G(z)] \exp[j \bar{y}(z, t)], \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式可得到信号光强度和相位 $\bar{x}(z, t), \bar{y}(z, t)$ 的方程分别如下:

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial z} + \dot{\beta} \frac{\partial \bar{x}}{\partial t} = \dot{\beta} \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial t} \frac{\partial \bar{y}}{\partial t} + \bar{x} \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial t^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial z} + \dot{\beta} \frac{\partial \bar{y}}{\partial t} = -\frac{\ddot{\beta}}{8 \bar{x}^2} \left[-\left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial t} \right)^2 + 2 \bar{x} \frac{\partial^2 \bar{x}}{\partial t^2} - 4 \bar{x}^2 \left(\frac{\partial \bar{y}}{\partial t} \right)^2 \right] + \frac{k_0 n_2}{A_{\text{eff}}} A_0^2 \bar{x} \exp[-\alpha_s z + G(z)], \quad (6)$$

对上式中 t 进行 $u = t - \beta z$ 变量置换,信号光强度和相位相应改变为 $x(z, u)$ 和 $y(z, u)$ 。因为以 u 为变量的函

数表示了以群速 $1/\beta$ 无畸变传播的信号包络。变量置换后的强度及相位方程为：

$$\frac{\partial x}{\partial z} = \dot{\beta} \left(\frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial u} + x \frac{\partial^2 y}{\partial u^2} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial y}{\partial z} = -\frac{\dot{\beta}}{8x^2} \left[-\left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + 2x \frac{\partial^2 x}{\partial u^2} - 4x^2 \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 \right] + \frac{k_0 n_2}{A_{\text{eff}}} A_0^2 x \exp[-\alpha_s z + G(z)], \quad (8)$$

下面利用微扰法求解(7)式、(8)式微分方程。设

$$x(u) = x_0(u) + x_1(z, u), \quad y(u) = y_0(u) + y_1(z, u), \quad (9)$$

其中 $x_0(u)$ 、 $y_0(u)$ 为不考虑色散、非线性时的零阶解，即信号包络无畸变传输时的解，而 $x_1(u)$ 、 $y_1(u)$ 则为光场受色散、非线性影响的微扰项。

外调制有线电视系统中，由调制引起的初始啁啾很小，因此可设初始相位为常量。即

$$x_0 = x_0(u); \quad y_0 = \phi_0 = R, \quad (10)$$

R 为常量，根据迭代法，可求出微扰项 x_1 为

$$x_1 = \frac{\dot{\beta}^2}{8} \left[\frac{2x_0^4}{x_0^3} - \frac{5x_0^2 x_0''}{x_0^2} + \frac{2x_0''^2 + x_0' x_0'''}{x_0} - x_0^{(4)} \right] z^2 + \frac{k_0 A_0^2}{A_{\text{eff}}} n_2 \dot{\beta} (x_0^2 + x_0 x_0'') \int_0^z f(\xi) d\xi, \quad (11)$$

其中 $\int_0^z f(\xi) d\xi = \int_0^z \int_0^\xi \exp[-\alpha_s \eta + G(\eta)] d\eta d\xi$,

由于 $\dot{\beta}$ 、 n_2 为较小量，因此推导过程中忽略了 $\dot{\beta}$ 、 n_2 两次以上的各项。(11) 式中，方括弧项表示了由色散作用导致的信号畸变分量，而第二项为自相位调制导致的啁啾在色散的作用下引起的信号畸变。由(11)式可见，色散引起的畸变分量与拉曼作用无关，仅与二阶色散系数及传输距离的平方有关。而自相位调制导致的信号畸变则与拉曼作用有关。从(11)式可见，在忽略了 $\dot{\beta}$ 、 n_2 的二次以上分量之后的光强微扰项仅剩 x_0 的二次失真项，因此可知由色散及自相位调制导致的组合三阶差拍(CTB)皆来源于 $\dot{\beta}$ 、 n_2 的二次以上分量，由此也可推至自相位调制导致的组合三阶差拍的劣化，远小于对组合二阶失真的影响。

自相位调制导致的二次信号分量为：

$$2HD|_{\text{SPM}} = \frac{k_0 A_0^2}{A_{\text{eff}}} n_2 \dot{\beta} (x_0^2 + x_0 x_0'') \int_0^z f(\xi) d\xi. \quad (12)$$

在外调制有线电视系统中，可设输入端信号强度为

$$x_0(u) = 1 + m_0 \sum_{i=1}^N \cos(\Omega_i u), \quad (13)$$

没有非线性和色散作用时，调制信号包络在光纤中无畸变地以(13)式传播。其中 N 为载波频道总数， m_0 为信道调制系数， Ω_i 为各信道载波角频率。

将(13)式代入(12)式，可以导出采用前向拉曼分布放大的残留边带调幅调制有线电视系统中由自相位调制引起的组合二阶失真 $\text{CSO}(\Omega_i, z)$ 表达式为

$$\text{CSO}(\Omega_i, z) = 20 \lg \left[\dot{\beta} m_0 \Omega_i^2 \frac{k n_2}{A_{\text{eff}}} A_0^2 \int_0^z \int_0^\xi \exp[-\alpha_s \xi + G(\xi)] d\xi d\eta \right] + 10 \lg(2N_{\text{Hj}} + N_{2i}), \quad (14)$$

(14)式表示了自相位调制对组合二阶失真的贡献，非线性自相位调制引起的相位啁啾，在色散的作用下导致组合二阶失真恶化。 N_{Hj} 、 N_{2i} 为落入该频道的二阶互调及二次谐波产物数目。

当不计拉曼放大时(14)式则变为

$$\text{CSO}(\Omega, z) = 20 \lg \left[\dot{\beta} m_0 \Omega^2 \frac{k n_2}{A_{\text{eff}}} A_0^2 \frac{\alpha_s z - 1 + \exp(-\alpha_s z)}{\alpha_s^2} \right] + 10 \lg(2N_{\text{Hj}} + N_{2i}). \quad (15)$$

(15)式与文献[2,10]的结论相同，表示了无拉曼分布放大时，沿光纤传输方向的组合二阶失真表达式。

3 计算结果与讨论

(13)式中的双重积分难以得出解析表达，因此需要数值计算。以下的讨论中设光纤为常规单模光

纤,且抽运光损耗与信号光损耗相同。计算中使用的一般数据由表 1 给出。

表 1 计算中所用参量之值

Table 1 Parameter values used in the numerical calculation

Parameter	Value
Fiber	G. 652
$n_2 / (\text{cm}^2 / \text{mW})$	3.2×10^{-20}
$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	80
$D / [\text{ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})]$	17
$\alpha_s = \alpha_p / (\text{dB} / \text{km})$	0.2
N_{i+j}	12
Ω / MHz	599
λ / nm	1550
A_0^2 / mW	1

图 1 给出了对一段 80 km 光纤系统,分别采用 16dB 的掺铒光纤放大器在前端做功放、及 16 dB 的前、后向抽运拉曼放大,信号光强沿光纤长度方向的分布曲线。系统中发射机输出光功率为 0 dBm,接收端灵敏度要求 0 dBm,为满足光纤损耗要求光放大增益为 16 dB(忽略连接损耗,信号光损耗 0.2 dB/km)。由图 1 曲线可见,采用拉曼放大可以大大减小光纤中的信号光功率,由此减少各种非线性如自相位调制、受激布里渊散射等影响。图中,后向抽运拉曼放大时的光纤中信号光功率密度最小,因此非线性影响最小,但由于后向抽运将导致载噪比指标的严重劣化,而前向抽运拉曼放大则对载噪比不会产生影响,因此残留边带调幅调制的有线电视系统中不宜采用后向抽运拉曼放大。

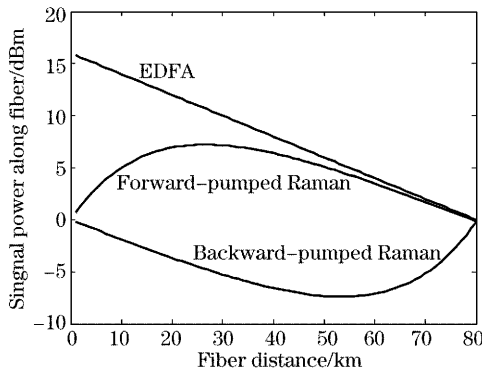


图 1 信号光强沿光纤长度的分布

Fig. 1 Optical power distribution along fiber length

图 2 给出了分别采用掺铒光纤放大器功放和前向抽运拉曼放大时,由(14)式计算得出的组合二阶失真与光纤链路长度之间的关系曲线。其中发射机输出光功率为 0 dBm,光纤损耗为 0.2 dB/km。由于系统链路长度越长,满足功率损耗预算要求的光放大增益越高。如光纤长度为 80 km 时,要求光放

大增益为 16 dB。若采用掺铒光纤放大器,则光纤的入纤光功率为 16 dBm,而采用拉曼放大,则光入纤功率依然为 0 dBm。图中结果表明了采用拉曼放大将会大大改善组合二阶失真指标。光纤长度超过 60 km 的系统,采用拉曼放大可以使组合二阶失真改善 10 dB 以上。

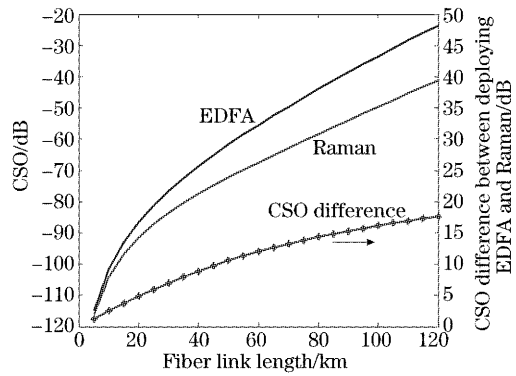


图 2 初始光功率 0 dBm,满足光纤损耗的功率预算时,掺铒光纤放大器和前向拉曼放大时的组合二阶失真与光纤链路长度之间的关系曲线

Fig. 2 The relationship between SPM-induced CSO and fiber length in case of with proper optical gains

图 3 给出了在 59 频道的逐行倒相 D 制式 (PALD)系统中,传输距离为 80 km,分别采用掺铒光纤放大器和前向抽运拉曼放大器时,由自相位调制导致的各个频道的组合二阶失真分布。图中虚线为对应频道的二阶互调项产物数分布曲线。可见,相比采用掺铒光纤放大器的系统,采用前向抽运拉曼放大的系统中所有频道中自相位调制导致的组合二阶失真都会得到约 14 dB 的改善。

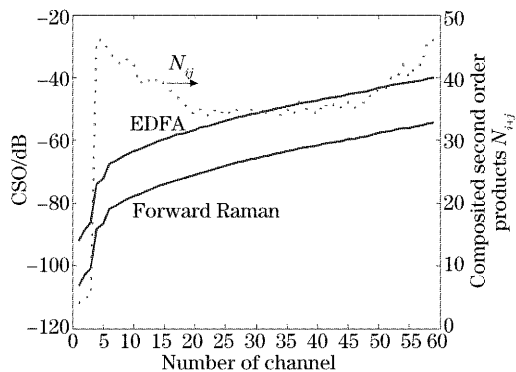


图 3 59 频道逐行倒相 D 制式系统中,分别采用掺铒光纤放大器或前向抽运拉曼放大器时各信道由自相位调制导致的组合二阶失真曲线

Fig. 3 The SPM induced CSO of each channel for a 59-channel PALD CATV system which employs EDFA and forward-pumped Raman amplifier respectively

4 结 论

对采用拉曼光放大的外调制残留边带调幅光纤有线电视系统中的组合二阶失真特性进行了理论研究。数值计算结果表明,相对于采用相同放大倍数的掺铒光纤放大器,采用前向拉曼分布放大可使非线性自相位调制导致的组合二阶失真减小 10 dB 以上。因此在长距离残留边带调幅调制的有线电视系统中,相比于采用掺铒光纤放大器,采用光纤拉曼放大可以较好地改善由自相位调制导致的组合二阶失真恶化。

此外由于拉曼分布放大对光纤中信号光强分布的降低,不仅会改善自相位调制导致的组合二阶失真,而且定性来讲,如果能够良好控制光纤中的信号功率分布,使其低于受激布里渊散射阈值,便可大大减小光发射机中为抑制受激布里渊散射而导致的光谱展宽,由此使得光源谱宽在光纤色散作用下导致的组合二阶失真得到改善,有关此方面的理论工作正在进行中。

参 考 文 献

- 1 H. H. Lu, W. S. Tsai. A hybrid CATV/256-QAM/OC-48 DWDM system over an 80-km LEAF transport [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2003, **49**(1): 97~102
- 2 C. Desem. Composite second order distortion due to self-phase modulation in externally modulated optical AM-SCM systems operating at 1550 nm [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30** (24): 2055~2056
- 3 H. H. Lu, C. T. Lee. Directly modulated CATV transmission system using split-band and wavelength-division-multiplexing techniques [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1653~1655
- 4 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming *et al.*. Improvement of transmission performances of optical communication systems by distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 729~734 (in Chinese)
张 巍, 彭江德, 刘小明 等. 分布光纤拉曼放大器对光通信系统传输性能的提高 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 729~734
- 5 Ma Yonghong, Xie Shizhong. Optimal design and analysis of broadband fiber Raman amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 42~47 (in Chinese)
马永红, 谢世忠. 宽带光纤拉曼放大器的优化设计与分析 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 42~47
- 6 Noboru Takachio, Hiro Suzuki. Application of Raman distributed amplification to WDM transmission systems using 1.55 μm dispersion-shift fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(1): 60~69
- 7 Tang Jiahong. Study of transmission of optical fiber CATV system with Raman amplifier [D]. Opto-Electronic Engineering Institute of Taiwan Sun Yat-sen University. 2002. 15~20 (in Chinese)
汤家鸿. 拉曼光放大之光纤有线电视传输技术之研究 [D]. 台湾中山大学光电工程研究所, 2002. 15~20
- 8 M. R. Phillips, Daniel M. Ott. Crosstalk due to optical fiber nonlinearities in WDM CATV lightwave systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1782~1792
- 9 Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Boston: Academic Press, 1989. 219~235
- 10 M. R. Phillips, T. E. Darcie, D. Marcuse *et al.*. Nonlinear distortion generated by dispersive transmission of chirped intensity-modulated signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(5): 481~483