

激光抖动法抑制光纤调幅有线电视 外调制传输中的受激布里渊散射

蒋洪涛*

(中国矿业大学信电学院, 徐州 221008)

查开德

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 光纤中的受激布里渊散射效应限制了调幅有线电视(AM CATV)外调制传输中的最大注入光功率, 这对有线电视传输是不利的, 因而必须采取措施抑制。通过对激光器抖动法进行理论分析, 导出了激光抖动法提高受激布里渊散射阈值的公式, 实验结果和公式计算是一致的。

关键词 受激布里渊散射, 外调制传输, 抖动法。

1 引 言

光纤中存在许多非线性效应, 如受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射、四波混频、自相位调制、交叉相位调制^[1-2]等等, 但由于受激布里渊散射阈值低, 在普通石英光纤中为 7 dBm ~ 8 dBm^[3], 因而最容易发生。由于调幅有线电视外调制传输研究较晚, 因而对其受激布里渊散射研究也较迟。1992 年 Mao 等人首次发表了关于调幅有线电视外调制传输中受激布里渊散射的实验^[4]。在光纤调幅有线电视外调制传输中, 受激布里渊散射表现为当注入光功率大于受激布里渊散射阈值时, 载噪比(CNR)随着注入光功率的增加反而减小, 这对外调制是十分不利的, 因为外调制的优点之一就是输出功率大, 利用 Nd:YAG 激光器可达 150 mW 左右^[5]。在调幅有线电视传输时, 人们总希望注入尽可能大的光功率, 或用于服务更多的用户, 或用于传输更远的距离, 或用于得到满意的传输质量, 但受激布里渊散射的存在阻碍了上述目标的实现。另外受激布里渊散射还将引起合成二阶变形(CSO)恶化^[6], 因而必须抑制受激布里渊散射。

对折射率均匀分布光纤, 在泵浦波为连续波时受激布里渊散射阈值 P_{th} 表示为^[2]:

$$P_{th} = 21A_{eff}/g_0L_{eff} \quad (1)$$

式中 A_{eff} 和 L_{eff} 分别为纤芯的有效面积和光纤的有效作用长度, 而:

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha \quad (2)$$

* 现通信地址: 深圳福田区燕南路汽车大厦 402 室博康公司, 深圳 518031。

收稿日期: 1997-04-18; 收到修改稿日期: 1997-09-22

式中 α 为光纤的衰减, L 为光纤的长度。(1) 式是在连续波泵浦条件下, 当泵浦波有一定的线宽 $\Delta\nu_L$ 时, 可表示为^[7]:

$$P_{th} = \frac{21A_{eff} \Delta\nu_B + \delta\nu_L}{g_0 L_{eff} \Delta\nu_{int}} \quad (3)$$

式中 $\Delta\nu_{int}$ 为本征受激布里渊散射增益带宽(对石英光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处约等于 35 MHz ^[7]), $\Delta\nu_B$ 则代表在光纤长度上受激布里渊散射增益的累积带宽, 对于在长度方向上折射率分布均匀的光纤, 两者是相等的; 对于非均匀光纤, 两者不相等。目前抑制受激布里渊散射有特殊的信号调制^[2]、采用不同掺杂的光纤级联^[8]、特制受激布里渊散射抑制光纤^[7]、相位调制^[10~12]和对激光抖动^[9~10]等方法。但趋于实用的只有激光抖动法和相位调制法, 前者只适用于分布反馈(DFB)激光器, 后者既适用于分布反馈激光器, 又适用于固体激光器。上述二种方法实质是提高 $\Delta\nu_L$, 此时阈值可表示为:

$$P_{th} = \frac{21A_{eff}}{g_0 L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_B}\right) \quad (4)$$

但 $\Delta\nu_L$ 和具体的参数, 如相位调制度、调制频率、啁啾因子等有何关系, 却不知道。在文献[12]中, Willems 给出了相位调制法提高受激布里渊散射阈值的公式, 但对于激光抖动法尚没有公开报道的理论分析。与直接调制不同, 由于外调制器的啁啾很小^[13], 因而有无有线电视调制信号基本不影响受激布里渊散射的阈值。

下面首先分析对光纤调幅有线电视外调制传输, 有无有线电视调制信号并不影响受激布里渊散射阈值, 然后对激光抖动法进行理论分析, 导出了这种方法提高受激布里渊散射阈值的公式, 所采用的方法类似 Meslener^[14]在分析直接调制色散时采用的方法。最后利用国外公开发表的数据验证了公式的正确性。

2 调幅有线电视外调制方式中光功率的分布

外调制方式几乎没有频率啁啾, 当有 N 个幅度相同但相位彼此独立的有线电视未调制载波信号同时调制时, 假设开启桥式干涉仪(BBI)型波导调制器是经过非线性补偿^[5]而变为不完全线性的, 其电场幅度可近似表示为(仅取开启桥式干涉仪调制器转移特性的+号分析):

$$E = E_0 \sqrt{1 + m_i^E \sum_{i=1}^N \cos(\omega t + \Phi_i) \cos \omega t} \quad (5)$$

式中 E_0 为入射电场幅度, m_i^E 为调制度, ω 为调制信号频率, ω_0 为信号频率。对上式进行级数展开, 忽略 m_i^E 的二阶以上高次项。可得:

$$E = E_0 \left[1 + \frac{1}{2} m_i^E \sum_{i=1}^N \cos(\omega t + \Phi_i) - \frac{(m_i^E)^2}{8} \left[\sum_{i=1}^N \cos(\omega t + \Phi_i) \right]^2 + \dots \right] \cos \omega_0 t =$$

$$E_0 \left(\cos \omega_0 t + \frac{m_i^E}{4} \left[\sum_{i=1}^N \cos [(\omega_0 + \omega)t + \Phi_i] + \sum_{i=1}^N \cos [(\omega_0 - \omega)t - \Phi_i] \right] + \dots \right) \quad (6)$$

一般, 调制度 $m \leq 4\%$, 对于逐行倒相(PAL) 550 MHz 有线电视系统, 共有 59 个频道, 此时边带与光载频的功率比近似为:

$$\frac{N}{8} m^2 = 1.2\% \quad (7)$$

即约 99% 的功率集中在光载频上, 与没有信号调制相比, 几乎没有什么变化。因而受激布里渊散射阈值也基本上没有变化。

3 激光抖动法提高受激布里渊散射阈值的理论分析

激光抖动法框构如图 1 所示。下面分二种情况分析：

3.1 不存在激光抖动时

此时调制器的出射电场如(5)式所示，为分析简便，假设调制器上仅加一个调制信号 ω ，对其傅里叶级数展开可得：

$$E = (1/2) E_0 \sum_{n=0}^{\infty} k_n(m_i^E) [\cos(\omega + n\omega)t + \cos(\omega - n\omega)t] \quad (8)$$

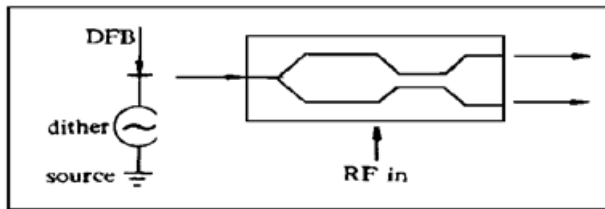


Fig. 1 Block diagram of dithering laser to suppress SBS

其中：

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega_i} \sqrt{1 + m_i^E \cos \omega t} dt, \\ k_n &= \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega_i} \sqrt{1 + m_i^E \cos \omega t} \cos n\omega t dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

通过分析可知，最大功率分量为 $(E_p^2/4) [k_0(m_i^E)]^2$ 。

3.2 存在激光抖动时

设抖动角频率为 Ω ，此时输入到调制器的光场幅度表示为^[14]：

$$E = E_0 \sqrt{1 + m_i^L \cos \Omega t} \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) \quad (10)$$

式中 m_i^L 代表对激光器的强度调制度， m_f 为由于频率啁啾而等效的频率调制度，设激光器的调频因子为 η ，激光器的偏置电流为 I_b ，阈值电流为 I_{th} ，则有：

$$m_f = m_i^L \eta (I_b - I_{th}) / \Omega \quad (11)$$

入射到调制器的光在经过调制器时，受到二次强度调制，因而调制器的出射光场幅度可表示为：

$$E = E_0 \sqrt{1 + m_i^E \cos \omega t} \sqrt{1 + m_i^L \cos \Omega t} \cos(\omega t + m_f \sin \Omega t) \quad (12)$$

对上式进行傅里叶级数和贝塞耳函数展开：

$$\begin{aligned} E &= E_0 \sum_{n_1=0}^{\infty} k_{n_1}(m_i^L) \cos n_1 \Omega t \sum_{n_2=0}^{\infty} k_{n_2}(m_i^E) \cos n_2 \omega t \sum_{l=-\infty}^{+\infty} J_l(m_f) \cos(\omega + l\Omega)t = \\ &k_0(m_i^L) k_0(m_i^E) \sum_{l=-\infty}^{+\infty} J_l(m_f) \cos(\omega + l\Omega)t + \\ &E_0 \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=1}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} k_{n_1}(m_i^L) k_{n_2}(m_i^E) J_l(m_f) \cos n_1 \Omega t \cos n_2 \omega t \cos(\omega + l\Omega)t + \\ &E_0 \sum_{n_1=1}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} k_{n_1}(m_i^L) k_{n_2}(m_i^E) J_l(m_f) \cos n_1 \Omega t \cos n_2 \omega t \cos(\omega + l\Omega)t \end{aligned} \quad (13)$$

其最大功率分量为 $\frac{E_0^2}{4} [k_0(m_i^L)]^2 [k_0(m_i^E)]^2 \max \{ [J_l(m_f)]^2, l = -\infty, \dots, 0, \dots, +\infty \}$ 。

激光抖动存在与否的最大功率分量比较，可得受激布里渊散射阈值提高为：

$$\Delta P_{th} = 10 \log \left(\max \{ [J_l(m_f)]^2, l = -\infty, \dots, 0, \dots, +\infty \} \right) - 10 \log [k_0(m_i^L)]^2 \quad (14)$$

图 2 给出了阈值提高随相位调制度的变化曲线。

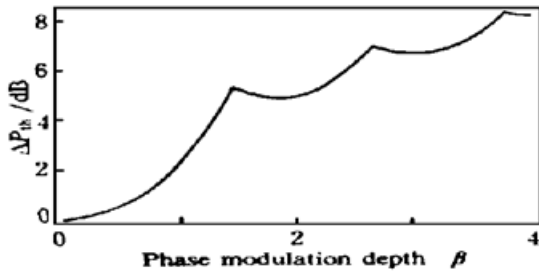


Fig. 2 SBS threshold increase vs phase modulation depth. ($\eta = 0.2$ GHz/mA, $I_b - I_{th} = 30$ mA, $\Omega = 1.5$ GHz. β changing from 0 to 4 corresponds m_i^l changing from 0 to 1)

4 实验验证及讨论

Wilson 等人在 1996 年发表了有关采用激光抖动以提高受激布里渊散射阈值的实验^[9]。实验结果如图 3 所示。实验中使用了分布反馈半导体激光器与电吸收型调制器集成一体型的发射机。受激布里渊散射的出现是以载噪比降低为标志。实验中抖动频率为 $\Omega = 1.7$ GHz, 不存在激光抖动时, 受激布里渊散射阈值为 8 dBm; 当施加抖动, 强度调制度为 16.5% 时, 受激布里渊散射阈值为 10 dBm, 提高了 2 dB; 当调制度提高到 25.6% 时, 受激布里渊散射阈值为 13.6 dBm, 提高了 5.6 dB。

由于该文中没有给出激光器的啁啾因子 η 和偏置电流及阈值电流, 因而这里首先用其中一组数据作校准, 对另一组数据进行验证。由 $m_i^l = 16.5\%$ 时, 阈值提高 2 dB, 根据(14)式:

$$\Delta P_{th} = -10 \log \left(\max \{ [J_l(m_f)]^2, l = -\infty, \dots, 0, \dots, +\infty \} \right) - 10 \log [k_0(m_i^l)]^2 = 2 \text{ dB} \quad (15)$$

可求出:

$$m_f = 0.925, \quad \eta(I_b - I_{th}) = 9.530 \quad (16)$$

当 $m_i^l = 25.6\%$ 时, 同样根据(14)式, 可求出此时: $m_f = 1.435$, 对应 $\Delta P_{th} = 5.3$ dB。与实验结果 5.6 dB 非常吻合, 这在一定程度上验证了(14)式的正确性。

为进一步说明(14)式的正确性, 这里再进行有关理论分析。

不管是激光抖动, 还是相位调制, 其实质是一样的: 就是展开光纤中传输光的频谱。激光抖动法其目的不是进行强度调制, 而是利用激光器的啁啾效应, 也即相位调制。如果激光器没有频率啁啾, 这种方法也不能用于提高受激布里渊散射阈值。

Willems^[12]在推导相位调制提高受激布里渊散射阈值公式时, 从调制器出射的电场表示为:

$$E = \sqrt{2P_0} \sqrt{1 + m \sum_{i=1}^N \cos \omega t \cos (\omega t + \beta \sin \Omega t)} \quad (17)$$

式中 P_0 为平均输出光功率, m 为强度调制度, β 为相位调制度, ω 、 ω_0 和 Ω 分别为射频调制信号频率、光载波信号频率和相位调制信号频率。在单频调制时, (17)式可写为:

$$E = E_0 \sqrt{1 + m_i^E \cos \omega t \cos (\omega t + \beta \sin \Omega t)} \quad (18)$$

其中: $E_0 = \sqrt{2P_0}$, $m_i^E = m$ 。推导出的受激布里渊散射阈值提高 ΔP_{th} 为^[12]:

$$\Delta P_{th} = -10 \log \left[\max \{ [J_l(\beta)]^2, l = -\infty, \dots, 0, \dots, +\infty \} \right] \quad (19)$$

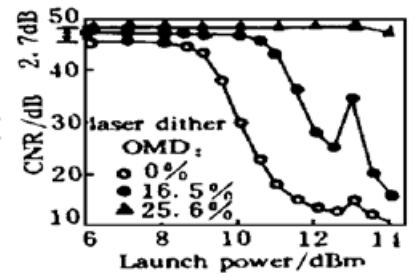


Fig. 3 CNR vs. fiber launch power at various laser dither modulation depth

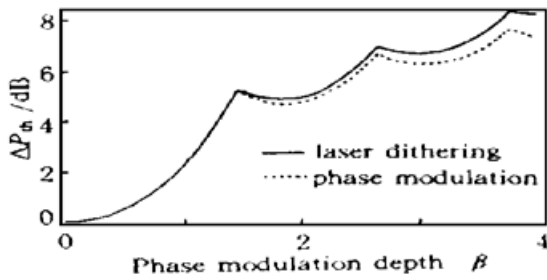


Fig. 4 SBS threshold increase for laser dithering and phase modulation. The calculation assumes $\eta = 0.2 \text{ GHz/mA}$, $I_b - I_{th} = 30 \text{ mA}$, $\Omega = 1.5 \text{ GHz}$. β changing from 0 to 4 corresponding to m_i^l changing from 0 to 1

式中 $J_l(\beta)$ 是以 β 为参数的 l 阶第一类贝塞耳函数。注意 (18) 式和 (12) 式进行对比: 如果对激光抖动引起的等效相位调制度 m_f 等于相位调制法中的相位调制度 β , 那么其差别就只有 $\sqrt{1 + m_i^l \cos \Omega t}$ 项。这是因为存在激光器抖动时, 强度调制和相位调制是同时存在的。公式 (14) 与公式 (19) 相比, 也多了一项 $-10 \log [k_0(m_i^l)]^2$, 此即抖动时强度调制的影响。由于:

$$-10 \log [k_0(m_i^l)]^2 > 0 \quad (20)$$

因而在同样相位调制度下, 抖动法得到的受激布里渊散射阈值提高比相位调制法要高。图 4 绘出了阈值提高随相位调制度的变化曲线。在调制度较小时, 激光抖动引起的强度调制影响较小, 此时激光抖动法和相位调制法的

曲线基本重合; 当强度度增大时, 强度调制的影响增大, 曲线渐渐分开。这是合理的, 因而也说明了 (14) 式的正确性。

结 论 通过理论分析和数学推导, 本文给出了激光器抖动法提高光纤调幅有线电视外调制传输的受激布里渊散射阈值的公式, 并利用公开发表的实验数据验证了公式的正确性。在推导过程中, 对抖动频率没有提出要求, 即 (14) 式对任意抖动频率都适用。但为避免抖动频率在有线电视频带内引入附加合成二阶变压和合成三阶变形, 抖动频率是不能任意选择的^[12]。最后还需指出: 虽然本文是以开启模式干涉仪调制器为模型进行分析的, 但导出的公式也适用于电吸收型调幅调制器及其他类型的强度调制器。

文中利用了 AT&T Bell Lab. 的 Wilson 等人发表的实验数据, 作者对此表示感谢。此研究是在清华大学电子工程系完成的, 作者对曾给予过帮助的所有老师表示感谢。作者还要感谢中国矿业大学信电学院院长谭得健教授所给予的支持。

参 考 文 献

- [1] G. P. Agrawal 著, 胡国峰, 黄国译, 非线性光纤光学, 第一版, 天津: 天津大学, 1992. 189~ 308
- [2] A. R. Chraplyvy, Limitations on lightwave communications imposed by optical fiber nonlinearities. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(10): 1548~ 1555
- [3] D. Cotter, Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber. *Opt. Commun.*, 1983, **4**(2): 10~ 19
- [4] X. P. Mao, G. E. Bodeep, R. W. Tkan *et al.*, Brillouin scattering in externally modulated lightwave AM-VSB CATV transmission systems. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, **4**(3): 287~ 289
- [5] M. Nazarathy, J. Berger, A. J. Ley *et al.*, Progress in externally modulated AM CATV transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(1): 82~ 104
- [6] H. Yoshinaga, Influence of stimulated Brillouin scattering on nonlinear distortion in SCM video transmission. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(19): 1707~ 1708
- [7] K. Shiraki, M. Ohashi, M. Tateda, Performance of strain-free stimulated Brillouin scattering suppression fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(4): 549~ 554

- [8] X. P. Mao, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy *et al.*, Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, **4**(1) : 66~ 69
- [9] G. C. Wilson, T. H. Wood, J. L. Zyskind, SBS and MPI suppression in analog systems with integrated electroabsorption modulator/DFB laser transmitters. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(16) : 1502~ 1503
- [10] F. W. Willems, W. Muys, J. S. Leong, Simultaneous suppression of stimulated Brillouin scattering and interferometric noise in externally modulated lightwave AM-SCM systems. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(12) : 1476~ 1478
- [11] F. W. Willems, W. Muys, Suppression of interferometric noise in externally modulated lightwave Am CATV systems by phase modulation. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **29**(4) : 2062~ 2063
- [12] F. W. Willems, J. C. van der Plaats, W. Muys, Harmonic distortion caused by stimulated Brillouin scattering suppression in externally modulated lightwave AM CATV systems. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(4) : 343~ 344
- [13] F. Koyama, Frequency chirping in external modulators. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(1) : 87~ 92
- [14] G. J. Meslener, Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(10) : 1208~ 1217

Laser Dithering to Suppress Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fiber AM CATV Externally Modulated Transmission System

Jiang Hongtao

(Faculty of Information and Electronic Engineering,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

Zha Kaide

(Department of Electro-Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 18 April 1997; revised 22 September 1997)

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) in optical fiber limits the maximum launch power of Am CATV externally modulated transmission system, for the reason it must be suppressed. The authors present the theoretical analysis on laser dithering and give the formula of SBS threshold increased by employing this method. The experimental result agrees well with the formula.

Key words SBS, externally modulated transmission, dithering.