

调制光学相干度的激光在光纤中的传播与解调

董孝义 盛秋琴

(南开大学现代光学研究所)

提要: 提出一种新型的解调方法,它具有相关检测的性质,因此信噪比可以大幅度提高。

Transmission and demodulation of laser light for modulating optical coherent degree in optical fibers

Dong Xiaoyi, Sheng Qiuling

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

Abstract: A new type of demodulation method is presented. It has correlative detection property, thus the detected SNR increases remarkably.

在光通信中人们是通过光调制的手段将待传送的信息加到激光载波上去的。到目前为止,已发展了多种调制方式,如调幅、调频、调相以及脉冲调制等等。这些调制的共同特点是,调制仅在“时间轴”上进行,或者说光波的“空间特性”被忽视了。目前不管是那种类型的调制,从实质上讲,均将光波看作光线。最近,在几篇有关声光调制光学相干度的论文中提出了相干度调制的新概念^[1~3]。令输入、输出光场相应两点 $\{x'_1, y'_1; x'_2, y'_2\}$ 和 $\{x_1, y_1; x_2, y_2\}$ 的互相关函数分别为 $\Gamma'_{12}(x'_1, x'_2, y'_1, y'_2)$ 和 $\Gamma_{12}(x_1, x_2, y_1, y_2)$,声光调制器的作用则可用一个调制相干因子 $G_{12}(x_1, x_2, y_1, y_2, v)$ 来表征,即有^[4]

$$\Gamma'_{12}(x'_1, x'_2, y'_1, y'_2) = G_{12}(x_1, x_2, y_1, y_2, v) \cdot \Gamma_{12}(x'_1, x'_2, y'_1, y'_2), \quad (1)$$

经过理论计算和相应的实验结果已证明^[1~3],无论是哪种形式的声光调制,其调制相干因子具有类似的形式,即

$$G_{12}(r_1, r_2, v) = J_0 \left\{ v \sin \left[\frac{\pi}{\Lambda} (r_1 - r_2) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 J_0 为第一类零阶贝塞尔函数, Λ 为超声波波长, r_1, r_2 为受到声光调制波面上任意两点的坐标, v 为声光 Raman-Nath 参数,它与声功率(或通过换能器激励声场的电功率)成正比。从(2)式中不难看出,在声光调制情况下 G_{12} 因子正比于 R-N 参数 v ,或者

说正比于声光调制器的电激励功率^[4]。因此可以说,调制的电信号将导致调制的相干度,从而使激光载波也会像调幅、调频那样具有了加载信息的能力,所不同的是,前者可以用常规的解调方法(如平方律检波、拍频检波等)将信息从激光载波中检测出来,而后者无法运用常规解调方法将信息解调出来,必须寻找新的解调方法。

另外已知,光纤相干光通信已成为光通信发展的下一个战略目标^[5]。在这种光通信系统中由于使用了光外差检测,所以信噪比可以大幅度提高。但是,这类系统对激光(包括信号光和本地光)及其传输光纤提出十分苛刻的要求,以致使目前很难具有实际意义^[6]。本文提出的对调制相干度的激光的解调方法具有相关检测性质,并且通过实验证明,在一般单模光纤传输系统中其信噪比显著提高,用于光纤通信系统将是可能的。

为简明起见,我们以一维情况为例进行分析,并假定声光调制器的驱动信号为单频调幅波,如图1所示,其数学表达形式为

$$u = u_0(1 + M \sin \omega_s t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad (3)$$

其中 ω_0 和 ω_s 分别表示调幅波的载波角频率

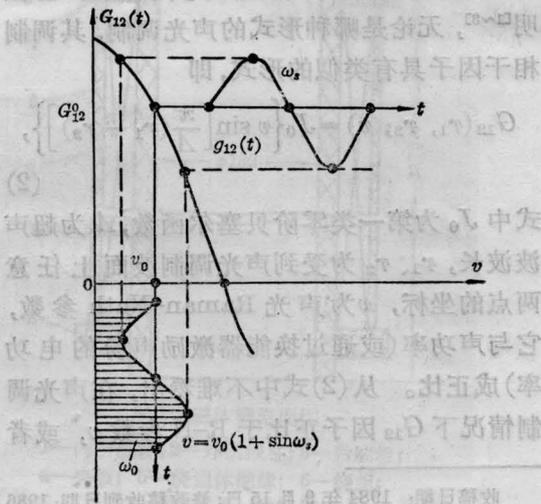


图 1

和包络信号(即待传输信息)的角频率, M 为调幅系数,在小信号运用时有 $M \ll 1$ 。由于 $u_0 \cdot \sin \omega_0 t$ 产生的声功率给出一个定常偏置,并以 R-N 参数 v_0 表示,因此由驱动信号(3)引起的变化的 R-N 参数 v 可以写成以下形式:

$$v = v_0(1 + M \sin \omega_s t). \quad (3)$$

将此式代入(2)式,即可得到被调制的调制相干因子,即

$$G_{12}(\Delta r, t) = J_0 \left\{ v_0(1 + M \sin \omega_s t) \sin \left(\frac{\pi \Delta r}{\lambda} \right) \right\}, \quad (4)$$

式中

$$\Delta r = r_1 - r_2, \\ r_1 = (x_1^2 + y_1^2)^{1/2}, r_2 = (x_2^2 + y_2^2)^{1/2}.$$

在 $M \ll 1$ 的情况下,可将(4)式在

$$V_0 = v_0 \sin \left(\frac{\pi \Delta r}{\lambda} \right)$$

处作泰勒级数展开,并略去高阶小项,则得

$$G_{12}(V_0, t) \approx J_0(V_0) + J'_0(V_0) \cdot V_0 M \sin \omega_s t = G_{12}^0 + g_{12}(t), \quad (5)$$

如图1所示, $G_{12}^0 = J_0(V_0)$

和 $g_{12}(t) = J'_0(V_0) V_0 M \sin \omega_s t$

分别为“直流”和“交流”成分,其中“交流”部分按信号的形式作相应变化,或者说,激光载波加进了信号信息。不难看出,由于调制曲线是非线性的,因此,这里所推导的结果只适用于小信号。如果 $M \approx 1$,即在大信号运用时,则非线性失真将不可避免。

为了对这种调制了相干度的激光解调,可采用双狭缝装置或其它能引起干涉的装置^[3],将相干度的时间变化转化为干涉条纹的强度变化,而后者是可以通过光电器件检测的。这样一来,调制相干度的解调便转化为调制可见度的解调。如图2所示,在双狭缝后面的小屏上形成干涉条纹,条纹的最大亮暗点的光强分别以 I_{\max} 和 I_{\min} 表示。在一般光学教科书中均可找到它们的数学表达

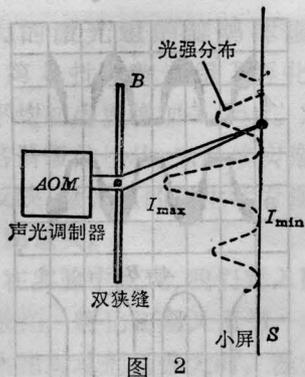


图 2 AOM—声光调制器; B—双狭缝

式, 即^[7]

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= 2I_0 + A_0 G_{12}, \\ I_{\min} &= 2I_0 - A_0 G_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这里 G_{12} 和我们上面推导的 $G_{12}(V_0, t)$ 有相同意义, 因此可将(5)式代入, 则得

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= \alpha + \beta \sin \omega_s t, \\ I_{\min} &= \gamma - \beta \sin \omega_s t, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

以及

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} - I_{\min} &= (\alpha - \gamma) + 2\beta \sin \omega_s t, \\ I_{\max} + I_{\min} &= \alpha + \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 2I_0 + A_0 J_0(V_0), \\ \gamma &= 2I_0 - A_0 J_0(V_0), \\ \beta &= A_0 J'_0(V_0) M V_0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由此可见差值 $I_{\max} - I_{\min}$ 包含着调制信息, 并且反映出相关检测性质, 即解调信号加倍, 信噪比提高。这里我们分析的是单频调制情况, 如果是更复杂的调制信号, 只要保证 $M \ll 1$ 条件, 那么上述结果仍然适用。 $I_{\max} + I_{\min}$ 值不包含信息项, 只表现为“直流”成份, 因此可用来作最佳解调状态的调整判据。

图 3(a)、(b) 给出了两种实验装置的方框图。两个装置的区别仅在于双狭缝的位置。在图 3(a) 中双狭缝置于接收端, 因此发射端输出的是相干度调制波, 这种调制是通过 R-N 声光调制器完成的。为了传输这种相干度调制波, 传输光纤必须选用单模的, 因为已证明只有单模光纤才具有保持传输激光相干度的能力, 而多模光纤, 由于模的干涉作用, 将使传输激光的空间相干度迅速降低^[8],

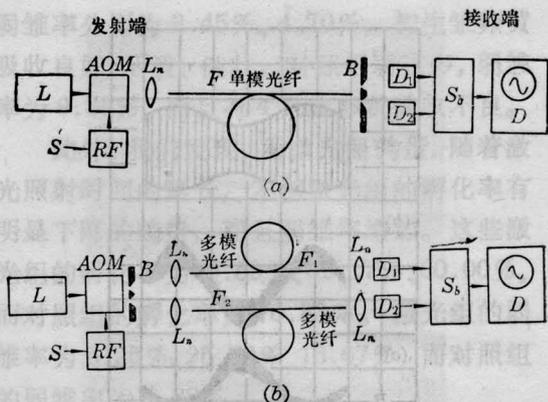


图 3 传输与解调原理图

L—氦—氖激光器; S—信号; B—双狭缝; AOM—声光调制器; RF—射频信号源; L_n —透镜; D_1, D_2 —光电探测器; D—显示; F—单模光纤, F_1, F_2 —多模光纤; S_b —减法器

在单模光纤的终端安置一双狭缝, 并在其后方放置两个光电探测器 D_1, D_2 , 分别将干涉条纹的亮、暗处信号检测出来, 并送至减法器完成相减, 即完成(8)式的运算。在图 3(b) 所示的实验装置中, 双狭缝置于发射端, 在其后方形成干涉条纹, 并将两条光纤分别置于亮、暗条纹处。这样, 信号便分别被传输到接收端, 这里的 D_1, D_2 作用和上面的实验装置是相似的。由于两条光纤传输的是光强信号, 因此可以使用多模光纤。

我们用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作光源, 用载频为 10 MHz 的调幅信号驱动声光调制器工作, 调幅信号为 100 Hz~100 kHz, 调幅系数 M 可在 0~1 任意调节。多模光纤选用的是阶跃型结构, 纤芯直径为 100 μm , 长度为 35 m; 单模光纤选用的也是阶跃型结构, 纤芯直径约为 8 μm , 长度为 10 m。实验结果如图 4~6 所示。图 4 是显示器屏幕显示的复制图, 其中 (a) 是声光调制器的驱动信号; (b)、(c) 分别为探测器 D_1, D_2 给出的光电信号; (d) 为由减法器输出的 A-B 信号, 即相关信号, 它是驱动信号 (a) 的包络的复现。不难看出, A-B 与 A 或与 B 信号比较, 信噪比有显著提高, 在我们的实验中, 最佳时可提高 8~10 dB。而 A 或 B 信号正是

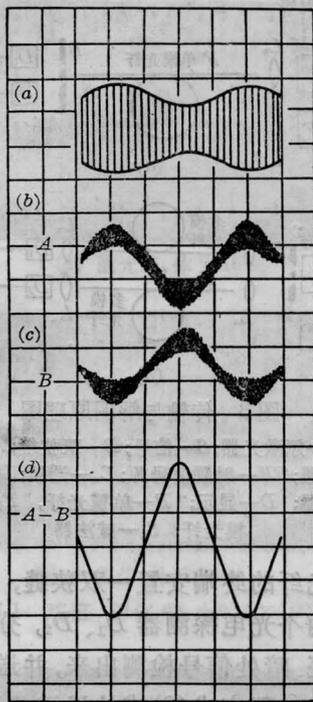


图 4

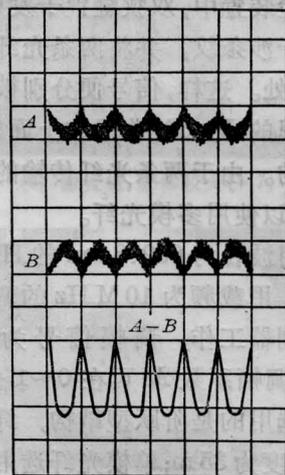


图 5

目前所谓强度调制/直接检测光通信方式给出的解调信号,由此可以得出结论,采用这里提出的相干度调制与解调系统将可望得到比目前通行的激光通信装置高得多的灵敏度。

图 4 是在最佳状态下得到的结果,即 $M=0.1$, 偏置在线性区(见图 1 所示)的情况。如偏置较低(驱动功率过低)或较高(驱动功率过高)以及 $M \rightarrow 1$ 时,解调信号将出现

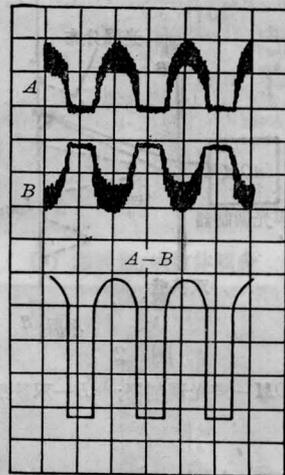


图 6

严重失真。图 5 是无偏置且 $M=1$ 的情况,此时解调信号是传输包络信号的倍频;图 6 是偏置在线性区,而 $M=1$ 的情况,解调信号严重失真。从这一实验结果不难看出,在这种装置中声光调制器的工作点(即驱动功率)对解调信号的准确性有较大的影响,因此,如使该装置实用化,则必须采取稳定驱动功率的有关措施。不过,在数字光通信系统中,由于是脉冲信号调制,所以有关驱动功率的稳定性问题也就无关紧要了。

还有一点是值得讨论的。在上述相干度调制的解调中使用两个探测器 D_1 、 D_2 , 它们分别取一对亮暗条纹作输入,而其它无数对亮暗条纹则被遗弃了,或者说,在解调时只利用激光载体的一部分能量。显然,这对接收灵敏度有一定影响,影响的程度尚有待进一步定量研究。由于任何一对探测器给出的解调信号是相同的,因此还可望这种解调装置能应用于激光多通道通信方面。

影响相干度调制与解调装置灵敏度和准确性的另一个重要因素是激光传输中的相位起伏,波面上的相位起伏将影响解调的质量。在图 3(b)的装置中,为了克服这一影响,应该选用两根特性全同而且长度严格相等的多模光纤;在图 3(a)的装置中则要求单模光纤

(下转第 80 页)

β CyD 分子腔体的特殊结构尺寸改变了被包接 R6G 分子的空间环境,影响了 R6G 分子激发态弛豫的途径,而荧光寿命则能灵敏地反映这种激发态弛豫动力学过程的变化。R6G 浓度为 3.5×10^{-5} M, β CyD 浓度为 7.5×10^{-3} M 的 R6G- β CyD 水溶液的荧光寿命值为 5.41 ns,而 R6G 纯水溶液则是 4.59 ns。两种样品的荧光衰减曲线见图 4。

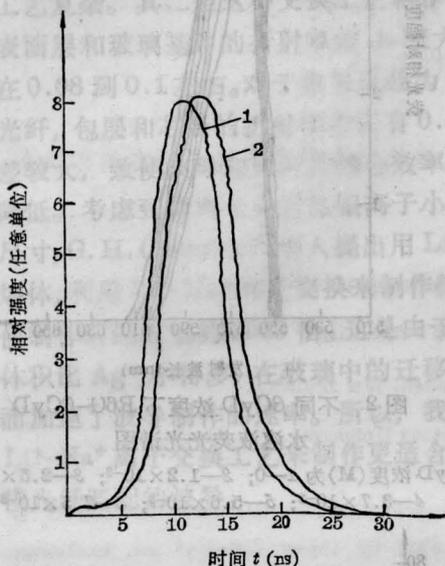


图4 R6G- β CyD 水溶液(1)和 R6G 水溶液(2)的荧光衰减曲线

实验结果表明, R6G- β CyD 水溶液体系的光物理性质和 R6G 水溶液相比有了明显的变化;随着 β CyD 分子的加入,吸收光谱

(上接第 76 页)

的输入输出端面有很好的光学平面特性,最好是作光学对磨。为了判定相位起伏的影响,在实验上可以通过检测 $A+B$ 值的情况来实现。如果处于相关检测最佳状态,则 $A+B$ 值应像(8)式那样,没有“交流”成分。

使用二维或多维声光调制^[3,9]可以得到类似结果,但携带的信息将大幅度增加,这是目前通用的调制解调制式无法比美的。进一步研究相干度调制与解调方法,无论从理论上还是从实际应用上来说都是极有意义的。

上表征二聚物的肩部趋于平缓,荧光量子效率增大,荧光寿命值变长。这说明 R6G 分子以一定的几何构型进入到 β CyD 分子腔体中,并发生了一定程度的相互作用。

从 R6G- β CyD 的络合常数值和荧光发射增强比值来看, R6G- β CyD 分子络合作用并不太强。同 β CyD 分子腔体尺寸(直径 ~ 0.7 nm, 深度 ~ 0.7 nm)相比, R6G 分子具有较大的整体尺寸,因此不可能整个分子进入到 β CyD 分子腔体内而形成牢固的络合物。可以认为在 R6G- β CyD 水溶液中,只是 R6G 分子的某一部分进入到 β CyD 分子腔体中。从 R6G 的分子结构和实验结果,可能同时存在 9 位取代苯环和 2 位(或 6 位)乙基胺基团与 β CyD 分子络合的几何构型。在第一种构型中,被包接的 R6G 分子 9 位取代苯环上的 C=O 与外界“隔离”,不能再与另外的 R6G 单体分子形成氢键而缔合。在第二种构型中,进入到 β CyD 分子腔体内的乙基胺基团在空间的旋转受到阻碍,增加了 R6G 分子“刚性化”程度,导致荧光寿命增长^[4]。

参 考 文 献

- [1] M. L. Bender, M. Komiyama; *Cyclodextrin Chemistry*, Springer-Verlag, New York, 1978.
- [2] J. E. Selwyn, J. I. Steinfeld; *J. Phys. Chem.*, 1972, **76**, 30.
- [3] 张兴康等;《化学通报》, 1982, No. 1, 30.
- [4] 张兴康等;《物理化学学报》, 1986, **2**, 493.

李征、夏顺保等同志参加了部分实验

参 考 文 献

- [1] 董孝义等;《光学学报》, 1984, **4**, 760.
- [2] Y. Ohtsuka, Y. Imai; *Opt. Acta*, 1982, **29**, 771.
- [3] 董孝义等;《中国激光》, 1986, **13**, 8.
- [4] 徐介平;“声光器件的原理、设计和应用”, 科学出版社, 北京, 1982年, § 2.4, 5.3.
- [5] 斋藤茂; *O plus E*, 1983, No. 43(Nov.), 63.
- [6] 董孝义;《物理》, 1986, **15**, No. 6, 376.
- [7] E. Hecht *et al.*; “Optics”, Addison-Wesley Publishing Company, 1976, Chapter 9, 12.
- [8] H. Takahara, *Opt. Acta*, 1982, **29**, 441.
- [9] 董孝义, 盛秋琴;《中国激光》, 1983, **10**, 97.