

光学 PAM-PDM 转换: 光学临界慢变效应的一种应用

钟立晨 郭奕理
(清华大学无线电电子学系)

提 要

基于光学临界慢变效应对光学双稳器件本文提出了一种新的功能——光学脉冲振幅调制(PAM)到光学脉冲持续时间调制(PDM)的转换,并且在实验上证实了这种功能的可行性。
关键词: 光学脉冲振幅调制; 光学脉冲持续时间调制; 光学临界慢变效应。

一、引 言

在光学双稳性方面,有关临界慢变的研究已有相当多的实验和理论工作^[1]。它不但有重要的理论意义,而且在技术上也十分重要。众所周知,当光学双稳系统靠近临界点 S_c 时,系统的开关时间 t_{sw} 趋向无穷大,即所谓临界慢变效应。这个效应启示人们设想某些新的应用,例如,光学延时线,光强-时间变换器等等。

本文除提出 PAM-PDM 直换转接法外,还利用 LD/PIN 光学可双稳半导体激光二极管(BILD)在实验上证实了这种功能的可行性。我们使用的 BILD 是一种有源可双稳光学器件,它是由一支激光二极管(LD)和一支光电检测器(PIN)构成的^[2,3]。利用 BILD 的优点,是它能使输出 PDM 波增强,便于后处理。

光学 PAM-PDM 转换器对光通讯和光计算都有重要的技术意义。其优点之一,就是 PDM 比 PAM 的抗噪声干扰的性能有很大的改善。因此特别适合于光学传感系统的应用。

二、光强-时间变换的线性模型

随着输入光强 S 越来越靠近临界点 S_c (在 $S \geq S_c$ 方向上),而系统尚未从低态跃迁到高态之前,人们可以观测到开关时间 t_{sw} 有一显著延时部分 t_d ;跃迁一旦开始,输出强度极快地上升,对应的上升时间 t_r 很小,而且同 S 几乎无关。图 1a 给出 BILD 输出对于临界点附近阶跃输入光强 S 的响应,其中 $t_d = 14 \mu s$, $t_r = 1 \mu s$ 。

和热平衡相变类比,远离平衡的光学双稳系统在临界点 S_c 附近表现出一种临界现象的普适性。即当 $S \rightarrow S_c$ 时,开关时间 t_{sw} 按 $(S - S_c)^{-\tau}$ 变化。可写成:

$$t_{sw} = B(S - S_c)^{-\tau}, \quad (1)$$

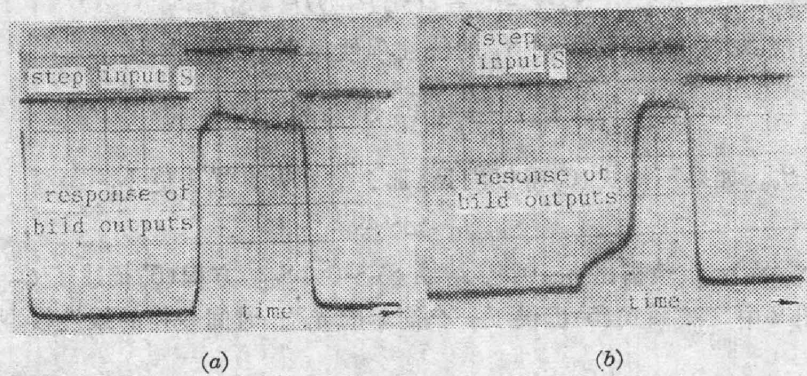


Fig. 1 Transient response of BILD output for the step-inputs $S(\alpha)$ near the critical point S_c . $S(>S_0) \rightarrow S_c$ (b) for from the critical point S_c ($S>S_c$) ($10\mu s/div$)

其中因子 B 同所讨论系统的性质有关, r 就是临界指数, 对所有上(或下)跃迁的边沿临界点来说, 这个指数都是相同的, 理论值 $r=0.5$, 且不论光学双稳系统之间有什么区别。本文把这种普适性当成实验结果^[4~6]。(1)式可以写成:

$$\ln t_{sw} = \ln B - r \ln(S - S_c) \quad (2)$$

在对数坐标中, (2) 式表示斜率为 $r=0.5$ 的直线方程。我们的实验值 $r=0.53$, 和理论值基本一致^[3]。

采样 PAM 波(例如, 来自光纤传感器的光学模拟信号 $f(t)$, 在向转换器传送过程中, 采样方脉冲波列)可以写成:

$$S_{PAM}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [D + f(kT_s)] P(t - kT_s), \quad (3)$$

其中 $P(t)$ 是一平顶方脉冲, 具有无量纲振幅 P , 持续时间 τ_0 , 采样速率 $\omega_s = 2\pi/T_s$, 采样间隔为 T_s , D 是光的直流成分。如果光学模拟信号 $f(t)$ 是低通受限的, 也就是说, 在 $\bar{\omega}_r$ (rad/s) 以上, 它就没有频率成分了, 那么采样定理要求 $T_s \leq \pi/\bar{\omega}_f$ 。图 2 给出开关时间 t_{sw} 作为输入 S 的函数关系。其中虚线 ab 段在实验上无法达到, 由示波器可以观察到, 这时的输出光强随机地处于高态或低态。实验曲线的 cd 段没有延时效应。因此, 我们必须把输入采样 PAM 信号 $S_{PAM}(t)$ 的工作点置于曲线 bc 的中心。若 $S_{PAM}(t)$ 波的振幅为 $S_0 + S_F(t)$, 持续时间为 τ_0 , 速率为 ω_s , 那么 (3) 式的另一种形式为

$$S_{PAM}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{S_0(t - kT_s) + S_F(t - kT_s)\},$$

其中 $S_0(t)$ 是一平顶方脉冲, 其振幅是一不变的常数 S_0 , 并且 S_0 正是工作点 Q 的直流偏置。因此, 双极性采样方脉冲 $S_F(t)$ 可写成:

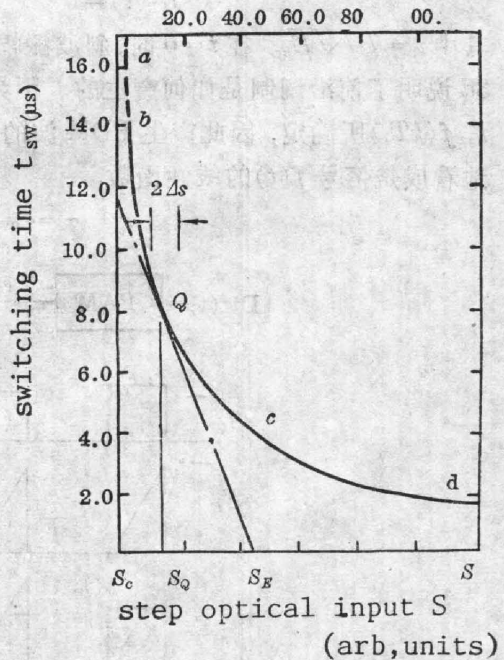


Fig. 2 The switching time t_{sw} as an experimental function of input S

$$S_F(t-t') = f(t')P + DP - S_{Q_0} \tag{4}$$

把(1)式右边围绕 S_{Q_0} 展开, 只保留到 S_F 的线性项便得到一线性方程:

$$t_{sw} = \frac{B}{\sqrt{E_s}}(1 - S_F/2E_s), \tag{5}$$

其中 $E_s = S_{Q_0} - S_0$ 。如果不等式(6)得以满足, 那么信号失真就会更小:

$$S_F/S_{Q_0} \leq \Delta S/S_{Q_0} < \eta, \tag{6}$$

其中 $\eta = (1 - S_0/S_{Q_0})$, 实验指出 $\eta \sim 0.1$, 结果 $S_F \sim 0.1S_{Q_0}$ 。方程(5)描述了 t_{sw} 同 S_F 的线性关系, 并示于图 2 中。关系式(5)提供了一个简单的光强-时间变换的线性模型。

三、PDM 信号波的发生

可以认为光学双稳系统是由光学延时线(ODL)和光学开关(OS)组成的。ODL 有阈值 S_0 , 有如下性质: 当系统从低输入光强方向靠近临界点 S_0 时, 延时 t_d 始终保持无穷大, 即 $S \leq S_0$ 时 $t_{sw} \rightarrow \infty$; 当 $S > S_0$ 时, $t_d \rightarrow 0$, $t_{sw} \approx t_r$, t_r 同 S 无关。当输入光强在正方向靠近 S_0 时, 只要满足 $S_{Q_0} - \Delta S \leq S \leq S_{Q_0} + \Delta S$, 开关时间 t_{sw} 服从(5)式。图 3a 给出了总的 PAM-PDM 转换的方块图。因此, ODL 对采样 PAM 波的时间响应可用同步脉冲斜波 $R_T(t)$ 描述, 其重复频率也为 ω_s , 见图 4c。利用(5)式, 斜波 $R_T(t)$ 可以示成

$$\begin{aligned} R_T(t) &= 2E_s(1 - t/t_s) + S_{Q_0}, & \text{当 } 0 \leq t \leq 3t_s/2 \\ R_T(t) &= 0, & \text{当 } 0 > t > 3t_s/2 \end{aligned} \tag{7}$$

其中 $t_s = B/\sqrt{E_s}$ 。在 $t=0$ 时, 斜波振幅 $S_E = R_T(0)$, 它是图 2 中直线 QE 和 S 轴的截距。图 3d 说明了前沿调制是如何产生的。因为 PDM 的所有脉冲宽度 τ 都是波时间上均匀瞬时采样 $f(kT_s)$ 所确定, 因此产生 PDM 波的基本方法属于均匀采样。脉冲宽度 τ 现在可以近似地看成是信号 $f(t)$ 的线性函数:

$$\tau = \tau_0 - t_{sw} = \tilde{\tau} + k_{PDM} t_s f(t), \tag{8}$$

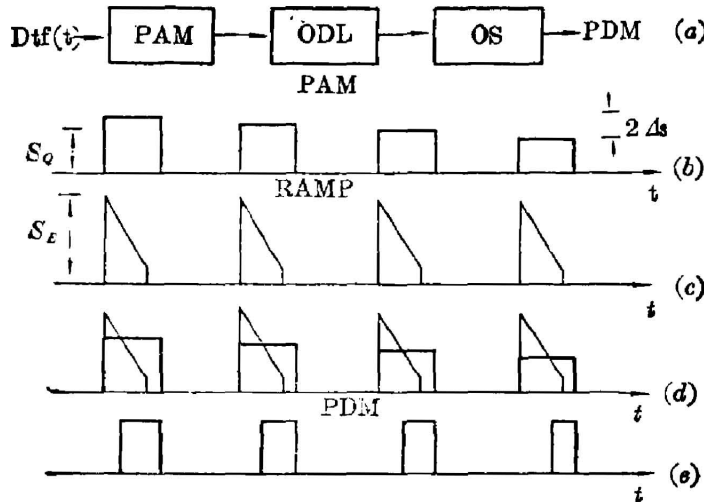


Fig. 3 Generation method for PAM-PDM conversion

其中 $\tilde{\tau}$ 是脉冲平均宽度, $k_{\text{PDM}} = t_s P / 2\sqrt{E_s}$, 是一常数。振幅为 A , 持续时间为 τ , 速率为 ω_s 的方脉冲波列在形式上可写成

$$S_p(t) = \frac{A\tau}{T_s} + \frac{A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \{ \sin[k\omega_s(t+\tau/2)] - \sin[k\omega_s(t-\tau/2)] \}。$$

把(8)式代入此方程, 得到熟知的有关 PDM 波的类似方程^[7]。如果平均脉冲持续时间 $\tilde{\tau}$ 相对 T_s 来说很小, 对前沿均匀采样调制来说, 有关 PDM 波的性质和信号处理的结论, 都是基本正确的。

把光信号变成电的 PDM 信号之后, 来自光纤传感系统的模拟信号 $f(t)$ 便可利用低通滤波或再现方法使之恢复。这些都是熟知的方法。低通滤波器恢复信号虽然方法简单, 但它包含了固有失真, 输出信噪比也偏低。利用信号再现方法恢复信号 $f(t)$, 结构虽复杂但输出信噪比要大得多。

四、实 验

图 4 给出了实验装置。正弦波信号发生器 SG 提供模拟信号 $f(t)$, 脉冲信号发生器 PG 提供方脉冲, 模拟乘法器 MN 使信号相乘并提供采样 PAM 波。光发射二极管 LED 把电信号变成了光的 PAM 波, 经光导纤维 OF 传送给 BILD。BILD 的输出给出 PDM 光波, 经检测器 D 后把变换成电的 PDM 波送往示波器 CH₂ 信道。而 CH₁ 信道的信号取自输入电的 PAM 波。详细装置见[2]。图 2 给出示波器图形。在临界点 S_c 附近, BILD 的输出对阶跃输入 S 的瞬变响应(见图 1), 以及开关时间 t_{sw} 作为输入光强 S 的函数关系(见图 2), 这两个实验都是用图 4 的装置完成的(只是不用 SG 和 MN)。在图 5 中, 上边的 PAM 的示波图形, 看起来似乎没有采样调制信号 $S_F(t - KT_s)$, 振幅几乎不变化。这是因为脉冲方波 $S_0(t)$ 的振幅远比 $S_F(t)$ 大, $S_F \sim 0.1S_0$ 。事实上, $S_F(t - kT_s)$ 是正弦波上一段准线性部分; 正弦波频率 $f_0 = 4 \text{ kHz}$, 比脉冲采样速率 $f_s = 33 \text{ kHz}$ 小得多。下边的 PDM 波显然指出波列中的脉冲宽度 τ , 随着调制信号幅度的减少也成线性地减小。这个结果是和(8)式的估计是一致的。正如图 1 所示, 入射光脉冲的上升时间($\sim 30 \text{ ns}$)比 BILD 的响应($\sim 1 \mu\text{s}$)短得多。BILD 对阶跃输入 S 的后沿响应, 在实验上也作过详尽研究。我们的输入阶跃脉冲 $S(t)$ 总是结束于零光强, 而后沿对应的下跃迁边沿临界光强 S'_c 远大于零(可调制

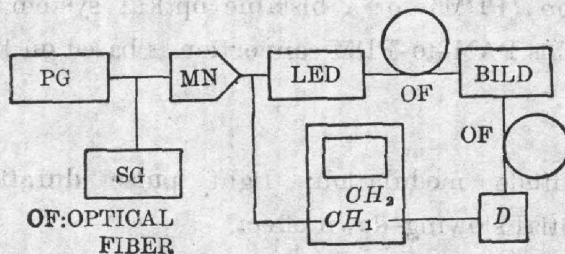


Fig. 4 Experimental set-up

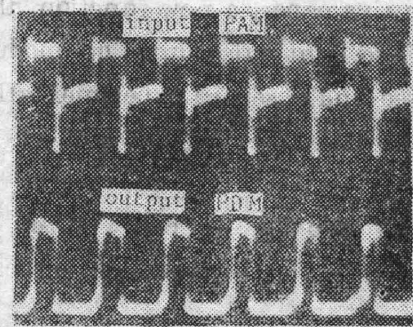


Fig. 5 Observation of PAM-PDM conversion on an oscilloscope

BILD 参数来保证), 因此不会构成临界条件。图 1 指出, BILD 的后沿延时时对输入 S 并不敏感, 并且很小 ($\sim 1 \mu\text{s}$)。为了保证实现 PAM-PDM 转换, BILD 后沿响应对 S 不显示慢变效应是必要条件。

五、结 论

我们在本文中提出了光学双稳器件的一种新功能——PAM-PDM 转换。并在实验上证实了这种功能的可行性。使用这种转换器, 输出信噪比的净改善直接正比于脉冲的带宽。对光学传输系统这是一种有用的调制技术。进一步研究(信号恢复实验, 抗干扰性等)正在进行, 看来这种技术特别适合纤维光学传输系统。

参 考 文 献

- [1] R. Bonifacio and P. Meystre; *Optics Commun.*, 1979, **29**, No. 1 (Apr), 131~134.
- [2] 钟立晨等; 《中国激光》, 1986, **13**, No. 1 (Jan), 19~22.
- [3] 钟立晨等; 《中国激光》, 1987, **14**, No. 5 (May), 262~266.
- [4] A. T. Rosenberger *et al.*; "Fluctuations and Sensitivity in Nonequilibrium Systems", (W. Horsthemke *et al.*, Springer-Verlag, Germany, Berlin, 1984), 62~69.
- [5] S. Cribier *et al.*; *Opt. Commun.*, 1983, **47**, No. 2 (Aug), 170~172.
- [6] E. Garmire *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, No. 6 (Mar), 374~376.
- [7] P. Z. Peebles, Jr.; "Communication System Principles", (Addison-Wesley, Canada, Ontario, 1976).

Optical PAM-to-PDM conversion: An application of optical critical slowing-down effect

ZHONG LICHEN AND GUO YILI

(Department Information Electronics, Tsinghua University, Beijing)

(Received 26 September 1986; revised 27 January 1987)

Abstract

In this paper, a new function that converts optical pulse amplitude modulation (PAM) to light pulse duration modulation (PDM) for a bistable optical system is proposed and observed experimentally. This PAM-to-PDM conversion is based on the optical critical slowing-down effect.

Key words: optical pulse amplitude modulation; light pulse duration modulation; optical critical slowing-down effect.