

文章编号: 1001-3806(2007)06-0593-03

## 低功率光脉冲在均匀周期结构中的慢光传输

吴建伟<sup>1,2</sup>, 罗风光<sup>1,2\*</sup>

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究低功率信号光脉冲在均匀周期结构阻带外沿且紧靠阻带的传输特性, 采用数值求解非线性薛定谔方程的方法, 进行了理论分析, 给出了脉冲宽度、峰值功率与传输距离的关系曲线和在不同频率失谐量下的脉冲慢光延迟特性。结果表明, 脉冲波形在传输过程中将经历剧烈的演变过程, 当给予入射脉冲合适的初始啁啾参量时, 可以得到与入射脉冲具有相当峰值功率的输出脉冲。这一结果对实验研究低功率信号脉冲在均匀周期结构阻带外沿且紧靠阻带的慢光传输特性具有重要的理论参考价值。

**关键词:** 光电子学; 慢光传输; 数值模拟; 均匀周期结构

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Slow light transmission of low power signal optical pulse in uniform periodic structure

WU Jianwei<sup>1,2</sup>, LUO Feng-guang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To research the transmission characteristic of low power signal optical pulse outside the stop band of uniform periodic structure, the theory analysis was run by the numerical result of the nonlinear Schrödinger equation. The relation curve of pulse width and peak power against the transmission, and the slow light delay of pulse with difference frequency detuning were shown. Results show: pulse waveform will experience a very remarkably evolution, and the peak power of output pulse will hold comparative to that of the incident pulse when the incident pulse has appropriate initial chirp parameter. The theory results obtained will produce importance reference value in experiment.

**Key words:** optoelectronic; slow light transmission; numerical simulation; uniform periodic structure

### 引 言

均匀周期结构 (uniform periodic structure, UPS) 作为一种经典的光学结构得到众多学者的广泛关注和研究, 在现代光通信中扮演着越来越重要的角色。在近十多年来, 人们已经从理论和实验上证明了它在全光开关、光学双稳和脉冲压缩整形等领域的突出应用<sup>[1,2]</sup>。其中, 基于周期结构的慢光传输特性倍受青睐, 因为在全光路由、缓冲器和延迟线中将具有巨大的应用潜能<sup>[3]</sup>。毫无疑问, 慢光传输已成为当今光通信研究领域中的又一前沿课题, 所以, 现在国外一些科研单位已开始从事这方面的研究<sup>[4]</sup>, 国内的南开大学光学中心等科研单位在慢光研究方面也取得了突出的

研究成果<sup>[5]</sup>。

文献研究结果表明<sup>[4,6]</sup>, 为了实现脉冲功率基本稳定的慢光传输都是采用在周期结构中形成隙孤子和布喇格孤子的形式。所谓隙孤子是由于信号脉冲的载波频率位于周期结构的阻带内时而形成的, 它最早由 CHEN 和 MLLS 从理论上提出<sup>[7]</sup>。而布喇格孤子是由于脉冲频率位于周期结构的阻带外沿且紧靠阻带而形成的, SIPE 和 WNFUL 证明了可以利用多尺度方法将非线性耦合模方程简化为非线性薛定谔方程 (non-linear Schrödinger equation, NLSE) 来描述布喇格孤子在阻带外沿的传输特性<sup>[8]</sup>。不管是隙孤子还是布喇格孤子的形成都需要较高的入射功率, 而实际的大部分激光通信光源所输出的光脉冲的峰值功率较低且带有一定的初始啁啾, 因此, 在周期结构中, 脉冲要实现孤子的慢光延迟传输必须进行预放大和消啁啾。基于此, 作者将从更为实际的意义出发, 数值求解 NLSE, 直接对低功率的啁啾信号光脉冲在 UPS 阻带外沿的脉冲波形和慢光传输特性进行研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60677023)

作者简介: 吴建伟 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事光通信方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: fgluo@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-09-04; 收到修改稿日期: 2006-11-21

### 1 理论模型与方程

图 1 为均匀周期结构的示意图。图中,  $\Lambda$  为周期,

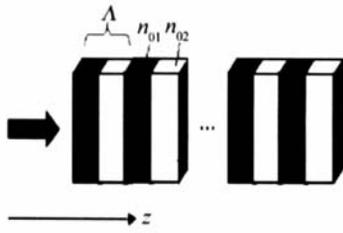


Fig 1 The structure of uniform period

$n_{01}$  和  $n_{02}$  分别为 UPS 的最大折射率和最小折射率,  $z$  代表均匀周期结构的位置。

UPS 的折射率变化可以表示为:

$$n(z) = n_{in} + \Delta n(z) + n_2 I \quad (1)$$

式中,  $n_{in} = (n_{01} + n_{02}) / 2$  是 UPS 的平均折射率,  $\Delta n(z) = \text{sgn} \left[ \cos \left\{ \frac{2\pi}{\Lambda} z \right\} \right] \frac{|n_{01} - n_{02}|}{2}$  是随距离周期变化的折射率调制参数,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $I$  为光强。

光脉冲在 UPS 中传输时所满足的非线性耦合模方程可描述为<sup>[6]</sup>:

$$i \frac{\partial E_+}{\partial z} + i \frac{1}{v} \frac{\partial E_+}{\partial T} + k E_+ + \Gamma_s E_+^2 E_+ + 2\Gamma_x E_-^2 E_+ = 0 \quad (2)$$

$$-i \frac{\partial E_-}{\partial z} + i \frac{1}{v} \frac{\partial E_-}{\partial T} + k E_- + \Gamma_s E_-^2 E_- + 2\Gamma_x E_+^2 E_- = 0 \quad (3)$$

式中,  $E_+$  和  $E_-$  分别是前向波和后向波的慢变振幅,  $z$  是传输距离,  $v = c/n_{in}$  是光在介质中的传播速度,  $T$  是移动参考系下的时间,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $k = \pi \eta \Delta n / \lambda_B$  是耦合系数,  $\Delta n$  是调制深度,  $\eta$  是耦合进介质波导层的光能量,  $\lambda_B$  是布喇格波长,  $\Gamma_s = \Gamma_x = 2\pi n_2 / \lambda$  分别是自相位调制和交叉相位调制参数,  $\lambda$  是信号波长。

当信号脉冲的中心载波频率和频谱位于阻带外沿时,非线性耦合模方程 (2) 式和 (3) 式可简化为非线性薛定谔方程<sup>[9]</sup>:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \Gamma |A|^2 A = 0 \quad (4)$$

式中,  $A$  是脉冲的复振幅,  $\beta_2$  和  $\Gamma$  分别表示 UPS 的群速度色散参量和非线性有效耦合系数, 分别表示为:

$$\beta_2 = \frac{1}{v^2 \gamma^3 v^3 \delta} \quad (5)$$

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{3 - v^2}{2v} \quad (6)$$

式中,  $v = [1 - (k/\delta)^2]^{1/2}$ ,  $\gamma = (1 - v^2)^{-1/2}$ ,  $\delta = 2\pi n_{in} (\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$  表示入射信号光脉冲的中心波长与 UPS 布喇格共振波长之间的失谐参量。

### 2 数值结果与讨论

图 2 中给出了在 UPS 阻带外沿的群速度色散参

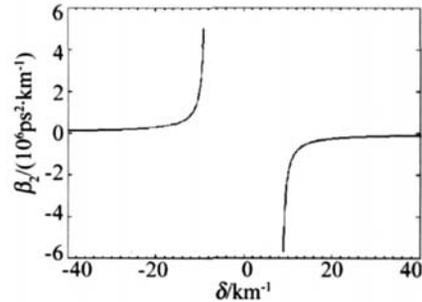


Fig 2 The relation curve of group velocity dispersion against frequency detuning parameter

量与失谐参量之间的关系曲线。作图时的相关参数为:  $n_{in} = 1.495$ ,  $\Delta n = \pm 0.005$ ,  $n_2 = 2.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\eta = 0.8$ ,  $\lambda_B = 1550 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。从图中可以看出,在 UPS 阻带外沿且紧靠阻带的区域具有很大的群速度色散参量 (高色散区域),它比普通光纤中的群速度色散参量要大好几个数量级,因此,当低功率信号脉冲的载波频率位于其中时,在很短的距离内脉冲波形就将经历剧烈的变化过程,但当其失谐量较大时,群速度色散参量趋近于 0,脉冲波形几乎没有任何改变地通过 UPS。而且,在阻带的低频外沿群速度色散参量为正 (即正常色散),在阻带的高频外沿群速度色散参量为负 (即反常色散),其色散参量的符号和大小可以从 (5) 式中得到。

#### 2.1 初始啁啾对传输脉冲波形的影响

图 3 和图 4 分别给出了在不同的初始啁啾条件

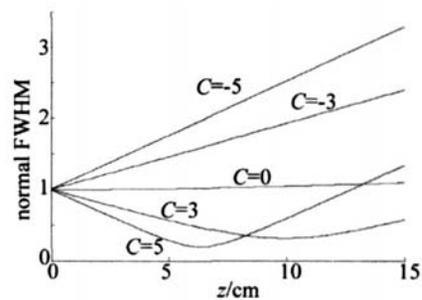


Fig 3 The relation curves of pulse width against the transmission distance

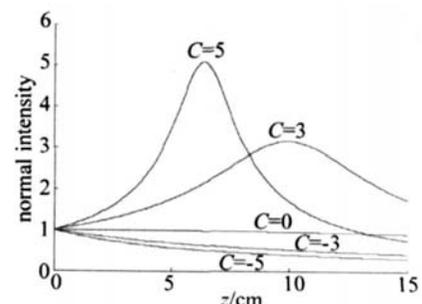


Fig 4 The relation curves of pulse peak power against the transmission distance

下,入射脉冲的载波频率位于 UPS 阻带外沿的高色散区域时半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 和峰值功率的归一化变化曲线。假设入射的信号脉冲为啁啾高斯脉冲  $A = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right] \exp(-i2\pi c\lambda^{-1}T)$ , 其中  $P_0$ ,  $C$  和  $T_0$  分别为入射脉冲的峰值功率、初始啁啾参量和脉冲峰值功率的  $1/e$  强度点的半峰全宽。作图所用的其它数据为:  $P_0 = 1\text{mW}$ ,  $T_0 = 20\text{ps}$ , 信号波长  $\lambda = 1546.5\text{nm}$ , 由于 UPS 几何长度非常短, 因此, 在数值模拟中忽略一切损耗。从图 3 和图 4 中可以看出, 具有不同初始啁啾的脉冲在 UPS 中传输时都经历了剧烈的变化过程, 但是由于初始啁啾参量值的不同, 它们的变化趋势也不尽相同。如此现象可解释为, 在入射信号脉冲的峰值功率很小时, 介质的非线性效应非常微弱, 当信号脉冲的载波频率位于 UPS 阻带的高频外沿的高色散区域时 (群速度色散参量为负值)。脉冲的非线性长度远远大于其色散长度, 此时, 群色散起主导作用并决定脉冲波形的演变。由于群色散为负值, 所以, 脉冲的短波长比长波长传播的速度要快, 从而脉冲的前沿到后沿将出现由色散效应引起的线性下啁啾, 当入射脉冲具有初始的线性上啁啾时 ( $C > 0$ ), 将出现初始啁啾与色散啁啾的相互抵消, 因而, 脉冲的宽度将有一压缩过程, 随着传输距离的增加, 色散啁啾将完全抵消初始啁啾, 这时脉冲宽度达到最小值, 在传输距离进一步增加时, 由于群色散的影响, 脉冲将迅速展宽, 而且, 初始的线性上啁啾越大, 脉冲变化越剧烈, 脉宽达到的最小值也越小。根据能量守恒, 脉冲的峰值功率将经历先增加后减小的变化过程。但是, 当初始啁啾为负时, 由于脉冲色散啁啾和初始啁啾具有相同的符号, 所以脉冲宽度和峰值功率将经历单调递增和递减的变化过程。因此, 为了保证低功率脉冲从 UPS 输出时仍然具有与入射脉冲相当的峰值功率, 应给予入射脉冲一定量的且与群色散参量符号相反的初始预啁啾。

## 2.2 慢光延迟特性

所谓 UPS 的慢光延迟特性是当信号脉冲的载波频率位于 UPS 阻带外沿的高色散区域时脉冲的传播速度比远离高色散区域的脉冲传播速度要慢。图 5 给出了低功率入射脉冲的中心波长与 UPS 的布喇格波长具有不同的失谐量时, 经历不同的慢光传输后的输出脉冲波形。作图所用的其它数据为: 初始啁啾参量  $C = 1$ , UPS 长度为  $15\text{cm}$ 。从图中可以看出, 在 UPS 的几何长度一定时, 中心波长位于阻带外沿的脉冲与布喇格共振波长的失谐量越小, 脉冲的慢光延迟时间越长, 即脉冲的传播速度越慢。这主要是由于, 失谐量越

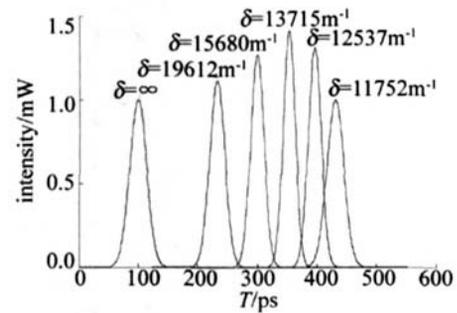


Fig 5 The output pulses with different frequency detuning parameter 小, 脉冲所受的群色散效应越大, 因而脉冲的传播速度越慢。但随着失谐量的增加, 脉冲所受的群色散效应逐渐减小, 脉冲的传播速度将逐渐增加, 当失谐量增加到足够大时, 色散效应趋于 0, 脉冲将保持波形基本不变地通过 UPS, 此时的脉冲传播速度与其在均匀介质中的传播速度一样 ( $v = c/n_m$ )。因而, 从以上分析看出, 在 UPS 中, 可以通过调节不同的失谐量来达到控制低功率脉冲在 UPS 中的传输速度, 即不同的慢光延迟时间, 如图 6 所示。实际上 UPS 的阻带具有与入射

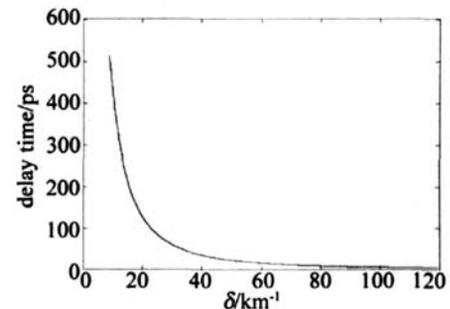


Fig 6 The relation curve of delay time against the frequency detuning parameter

功率相关的物理特征<sup>[10]</sup>, 但是, 在入射脉冲的功率处于低功率范围内时, UPS 的非线性效应非常微弱, 此时功率的改变基本不会引起 UPS 阻带的特征发生改变, 因而, 脉冲的传播速度与功率改变没有关系; 当入射脉冲的功率足够高时, UPS 的非线性效应将不可忽略, 其阻带的特征将变得与入射脉冲的功率相关, 此时, 随功率增加, UPS 的阻带将逐渐变宽, 并且向低频方向漂移, 因而脉冲的传播速度也将随入射功率的变化而变化。

## 3 结论

当高斯信号脉冲的载波频率位于 UPS 的阻带外沿时, 复杂的耦合模方程可以简化为 NLSE。作者对此方程进行数值求解, 详细分析了低功率信号脉冲在 UPS 中的慢光传输特性。结果表明, 在 UPS 阻带外沿且紧靠阻带的区域内有比普通光纤大几个数量级的群色散参量, 它将使载波频率处于其中的传输脉冲波形产生剧烈的变化。当入射脉冲的初始预啁啾参量与群

(下转第 599 页)

### 3 集卡定位系统的实施效果

多个激光雷达协同的工作方式和改进的 ICIP 算法,缩短了扫描时间,与单个激光雷达相比较平均缩短时间达到 50%。先粗后精的定位方法,提高了定位精度,误差控制在 5mm 以内。整个集卡定位系统降低了集卡司机的驾驶难度,满足自动化堆场内 RMG 对集卡装卸集装箱的对箱定位要求,提高了装卸效率。

该集卡定位系统已经于 2006 年 3 月在上港集装箱外高桥码头分公司投入工业性试生产,至今共完成了 11240 TEU 标准箱的工作任务,起重机的装卸效率达到 80 TEU/h。该系统大大提高了堆场的装卸效率,降低了运行成本,年通过能力超过 54 万标箱。2006-09-19,整个基于激光雷达定位的无人堆场系统获得鉴定专家委员会的鉴定通过。

### 4 结束语

采用运动控制卡控制步进电机,带动 2-D 激光雷达旋转,实现了二维平面扫描到三维空间扫描,降低了定位系统开发的成本。基于三维空间扫描定位原理,开发了一种多激光雷达协同的工作方式,并提出了一种基于该系统的改进 ICIP 算法以及分级定位的思想,提高了扫描的效率、扫描精度和定位精度,在集卡定位系统中获得了良好的效果。系统首次实现了自动化无

人堆场中集装箱吊具对集卡的自动定位。

### 参 考 文 献

- [1] YANG W J, LUO Zh X, LU J G. Container unload position system [J]. Application of Electronic Technique, 2006, 31 (3): 81 ~ 83 (in Chinese).
- [2] XU X W, GUO J, YU Q Y *et al*. Key technique of laser range gated imaging [J]. Laser Technology, 2003, 27 (6): 603 ~ 605 (in Chinese).
- [3] JIA Y H. Automatic on-ling load measurement system for mine truck based on the laser-radar survey technology [J]. Mining Research and Development, 2006, 26 (2): 62 ~ 63 (in Chinese).
- [4] SICK A G Cop. Technical description: LMS200/LMS211/LMS220/LMS221/LMS291 laser measurement systems [EB/OL]. <http://www.sick.com>, 2003-04-04.
- [5] TIAN J, SHA F, ZHANG X Sh. Applied image analyzing and processing technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995. 77 ~ 81.
- [6] BESL P J, MCKAY C D. A method for registration of 3-d shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine in Telligence, 1992, 14 (2): 239 ~ 256.
- [7] GUO H, LI H, WANF Y X. Investigation of main techniques in robot three-dimensional localization [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (S1): 99 ~ 102 (in Chinese).
- [8] HUANG X F, JIANG W Sh, GONG J Y. Real-time radar large amount of point clouds data [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30 (11): 975 ~ 978 (in Chinese).
- [9] GAO Zh, ZHONG S D, SONG L H. 3-D model reconstruction based on data of laser radar [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (S2): 495 ~ 499 (in Chinese).
- [10] MOK J T, EGLETON B J. Expect more delays [J]. Nature, 2005, 433 (7028): 811 ~ 812.
- [11] MOK J T, TSOY E, LITLER ICM *et al*. Slow gap soliton propagation excited by microchip Q-switched pulses [A]. The 18th Annual Meeting of IEEE Lasers & Electro-Optics Society [C]. Los Alamitos: IEEE, 2005. 509 ~ 510.
- [12] ZHANG G Q, BO F, DONG R *et al*. Phase-coupling-induced ultrashort light propagation in solids at room temperature [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93 (13): 133903-1 ~ 133903-4.
- [13] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I. Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev Lett, 1989, 62 (15): 1746 ~ 1749.
- [14] CHEN W, MLLSD L. Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (2): 160 ~ 163.
- [15] SPIE JOHN E, WNFUL HERBERT G. Nonlinear schrödinger solitons in a periodic structure [J]. Opt Lett, 1988, 13 (2): 132 ~ 133.
- [16] LITICH NITSER N, AGRAWAL G, EGLETON B *et al*. High-repetition-rate soliton-train generation using fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 1998, 3 (11): 411 ~ 417.
- [17] YE W N. All-optical signal processing using nonlinear periodic structures: a study of temporal response [D]. Toronto: University of Toronto, 2002. 16 ~ 17.

### 参 考 文 献

- [1] WILLIAM C KM, CHU P L, MALOMED B A. Solitary waves in coupled nonlinear waveguides with Bragg gratings [J]. J O S A, 1998, B15 (6): 1685 ~ 1692.
- [2] LIU YM, YU Zh Y, YANG H B *et al*. The investigation of the nonlinear characteristics of fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology,

(上接第 595 页)

色散参量有相反的符号时,脉冲峰值将经历先增加后减小、脉冲宽度将经历先减小后增加的演变过程;而当啁啾参量为 0 或啁啾参量与色散参量有相同的符号时,脉冲峰值将经历单调递减、脉冲宽度将经历单调递增的演变过程。从脉冲传输的速度来看,此时的脉冲还表现出一定的慢光延迟特性,并且传输速度随失谐量的减小而减小,即在传输相同的距离时,延迟时间越长。因此,在 UPS 中,可以通过调节失谐量的大小来控制脉冲的传输速度,为了实现低功率的脉冲在一定的延迟传输后仍然具有与入射脉冲相当的峰值功率,应给予入射脉冲一定量的与群色散参量符号相反的初始啁啾参量。