

文章编号 2095-1531(2015)01-0039-06

# 光学频率梳非线性传输及其在 相位噪声探测中的应用

龚梓博<sup>1</sup>, 陆星<sup>1</sup>, 施可彬<sup>1,2\*</sup>, 龚旗煌<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学物理系人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871;  
2. 量子物质科学协同创新中心, 北京 100871)

**摘要:** 光纤传递链路中相位噪声探测是基于光纤的精确射频标准传递系统中重要组成部分。为解决光纤链路相位噪声探测中节点反射干扰的问题, 本文基于广义非线性薛定谔方程, 理论上研究了窄带光学频率梳在色散位移光纤中的非线性光学传播特性。在理论分析的基础上, 结合密集波分复用架构, 提出了一种基于锁模光学频率梳进行光纤传递射频信号的相位噪声探测新技术, 克服了节点反射干扰, 给出了初步实验验证。

**关键词:** 光学频率梳; 四波混频; 波分复用; 相位噪声探测

中图分类号: O437 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20150801.0039

## Nonlinear propagation of optical frequency comb and its application in phase noise detection

GONG Zi-bo<sup>1</sup>, LU Xing<sup>1</sup>, SHI Ke-bin<sup>1,2\*</sup>, GONG Qi-huang<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Beijing 100871, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: kebinshi@pku.edu.cn*

**Abstract:** Precisely detecting phase noise in the optical fiber is one of the core techniques for high resolution microwave dissemination based on optical fiber link. In order to solve the problem that unwanted reflections from fiber interconnectors greatly reduce the accuracy of phase noise detection, we propose and demonstrate a spectrally shifted optical feedback scheme integrated with wavelength division multiplexing technique for precise phase detection based on nonlinear propagation of narrow band optical frequency comb in dispersion shifted fiber. Theoretical and preliminary experimental results show that the proposed approach efficiently suppresses the reflection noise.

**Key words:** optical frequency comb; four wave mixing; wavelength division multiplexing; phase noise detection

收稿日期: 2014-10-16; 修订日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61322509); 北京大学“未名物理学子班”资助项目; 北京大学“本科生科研训练”校长基金资助项目

## 1 引言

原子钟和光钟等微波段频率标准能提供具有非常高稳定性和精确性的射频振荡信号,对基础物理常数测量、阵列型无线电探测、导航定位和天文观测等领域都有着重要意义<sup>[1-2]</sup>。然而高精度微波频率源往往维护复杂,且不便移动。因此,在许多领域都应用了长距离(公里量级)超稳定频率传递技术,将单个频率标准进行远距离分配从而使用。其中,得益于光纤波导对外界环境的抗干扰性和现代成熟的光通信技术,基于光纤的频率标准传递是使用最为广泛的方案。通过光纤进行长距离频率传递的方法主要有3种<sup>[3]</sup>:第一种方法是通过光纤传递经过振幅调制后的连续激光信号,此种方法非常直接,但由于调制引入较大噪声并需要高频电子学技术进行支撑<sup>[4]</sup>;第二种方法是直接传递一个极窄线宽稳定连续光学频率信号<sup>[5]</sup>,这种方法的优点在于光信号不会受到色散影响,但是将微波信号与光学频率信号嫁接转换的系统需要使用多个宽带高稳定光学频率梳系统,往往十分复杂;最后一种方法是传递锁模激光器所产生的光学频率梳<sup>[6-7]</sup>,梳齿的频率间隔为锁模脉冲序列的重复频率,一般在 MHz-GHz 量级,可以通过控制激光器腔长的办法与微波频率标准进行锁定。这样,传递的光频段信号同时也加载了射频的信息。同时,锁模脉冲一般基于材料的本征电子非线性光学响应而产生,脉冲上升沿一般在飞秒量级,具备高探测信噪比和低占空比等优势。本文的研究背景就是基于锁模脉冲光频率梳进行射频(RF)信号的精确传递。

## 2 研究背景和思路

尽管光纤链路受环境扰动程度较小,但环境温度和振动等外部因素造成传输光信号的相位变化,会对传递的射频信号带来相位噪声,不能满足超高精度频标传递稳定度要求。因此,光纤传输链路上的相位噪声探测成为精确补偿相位噪声的前提条件,对系统性能提高显得尤为重要。为了

实时准确测量光纤链路中的相位抖动,一般会将传递到远端的光脉冲信号部分反射回发射端,再与发射端的初始射频信号进行相位比对,从而实时检测链路中的相位噪声。但是,在实际光纤链路中往往存在多个光纤连接节点,在各节点处不可避免地存在着反射。这些链路中途多端面反射信号与需要用来相位比对的最远端反射信号混合,会造成相位探测误差,从而影响后续的相位噪声补偿。为了克服节点反射所造成的相位探测误差,主要运用了以下几种方法进行抑制<sup>[8]</sup>:降低发射信号功率从而避免节点反射功率过强;将链路中光纤活动连接节点进行熔融焊接;将远端信号用不同的物理光纤导回。然而,降低发射功率直接导致系统信噪比的下降,对长距离光纤进行熔融焊接在大多数外场光纤链路上不具备可操作性,使用不同物理光纤导回信号将引起往返相位噪声探测的不对称性。本文将探讨一种结合非线性光学和密集波分复用技术,从而克服节点反射的相位噪声探测方法。基本物理思想为:利用光通信中的密集波分复用技术,在光学载频上将反射和反射的光学频率梳脉冲分开。同时,由于传递的射频信号是加载在频梳的梳齿间隔上,载频的移动并不影响导回光脉冲传递的射频信号。系统设计原理如图1所示,一个中心波长为 1 550 nm 波段的掺铒锁模光纤激光器脉冲序列重复频率通过锁定电路和微波源锁定,经过波分复用器件后,光频谱宽度被滤至 100 GHz(中心波长为  $\lambda_1$ ,大约包含  $10^3$  个梳齿模式)。将其作为向前传递的信号,经过长距离光纤传输后,在远端用完全相同的波分复用号光的光谱展宽。频谱展宽后的信号应相干保持原有信号的频率梳齿结构,通过远端波分复用器件滤波,选择波长  $\lambda_2$  通道传回,在发射端相同通道下载光脉冲信号后,进行链路中相位噪声探测。由于只使用很窄一段光谱进行光频率梳的传播,这种方法受链路中光纤色散影响较小,并且采用波分复用国际标准,适用于目前的实际光纤网络。

如图1所示,在光纤链路远端实现有效的光频梳载频移动并且保持梳齿间隔频率的相干性是实现本文提出新方法的关键。光学频率的变换属

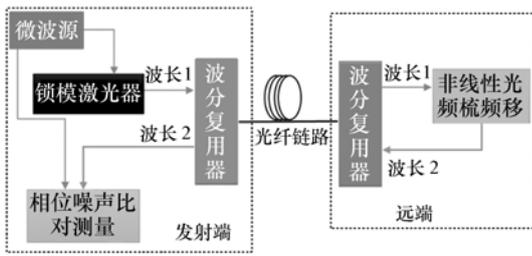


图 1 系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of system configuration

于典型非线性光学范畴,因此研究相干非线性光学效应实现光频梳移频将是本文讨论的主要内容。对于拟采用的密集波分复用架构,单个通道光脉冲频谱宽度约为 100 GHz,对应于我们采用的 100 MHz 频率间隔光频梳,单通道将传递约 1 000 根频率梳齿,可以满足恢复足够射频信噪比的要求。同时,由于 DWDM 的滤波效应,发射源的飞秒光脉冲在经过 DWDM 耦合器后,脉冲时间宽度将展宽到皮秒量级,导致峰值功率下降,不足以支撑基于强非线性光学效应的光脉冲移频机制(例如拉曼孤子频移效应)。本文将讨论基于光纤中三阶光学非线性的频谱展宽效应。一般来说,在功率很高、相互作用距离很长并且横截面积很小的情况下,很容易在光纤中观测到非线性效应。这些非线性效应主要包括拉曼散射(RS)、布里渊散射(BS)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)<sup>[9-10]</sup>等。对于频谱宽度 100 GHz 的光信号,发生布里渊散射的阈值功率极高,不属于本文讨论范围。而基于光学三阶非线性的拉曼和四波混频过程,在光学频率梳研究领域已经被证明是有效进行相干梳齿频率扩展的方法。对于本文采用的皮秒光脉冲,为了增强非线性效应,另一个必要条件是要满足相位匹配从而使得非线性频率变换过程得到增强。群速度色散零点在 1 550 nm 波段的色散位移光纤正是满足这一条件的理想非线性光纤介质。图 2 显示实验可获得的色散位移光纤的二阶色散曲线,从图中可以看出,其群速度色散零点在 1 550 nm 附近。下面讨论皮秒光脉冲信号在色散位移光纤中的非线性效应,并模拟计算光谱的展宽。并以此来验证要文方法的合理性。

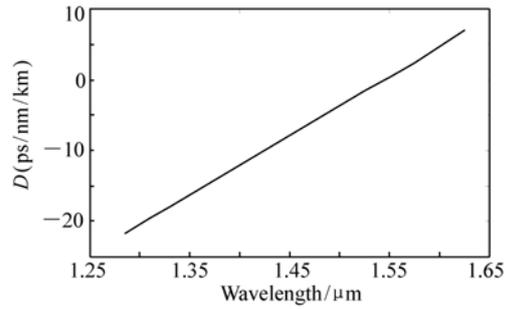


图 2 非线性脉冲模拟计算所用色散位移光纤阶色散系数

Fig. 2 Group velocity dispersion curve used in nonlinear pulse propagation simulation

### 3 脉冲在光纤中非线性传输理论和模拟

使用广义非线性薛定谔方程(GNLSE)来精确描述脉冲光在光纤中的传播过程,方程如下所示<sup>[9, 11-12]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A - \sum_{n \geq 2} \frac{i^{n+1}}{n!} \beta_n \frac{\partial^n A}{\partial T^n} = i\gamma \left(1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T}\right) A \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} R(T') |A(z, T - T')|^2 dT', \quad (1)$$

式中, $\alpha$  代表损耗系数; $\gamma$  表示光纤的非线性系数; $\beta_n$  表示  $\beta(\omega)$  的  $n$  阶导数,为高阶色散系数; $\beta(\omega)$  表示频率为  $\omega$  的波矢,可以用泰勒级数在高阶色散项进行如下展开:

$$\beta(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta_n}{n!} (\omega - \omega_0)^n, \quad (2)$$

式中, $A(z, t)$  为脉冲光的复包络,在程序模拟中使用双曲余切函数来描述信号包络,如式(3)所示。

$$A(0, T) = A_0 \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \\ T = t - \frac{z}{u_g(\omega_0)}, \quad (3)$$

式中, $T_0$  与脉冲光的半高全宽有以下联系: $1.763 T_0 = T_{\text{FWHM}}$ ;  $u_g$  代表在中心频率  $\omega_0$  处的群速度; $R(T)$  用来描述瞬时和延迟的材料响应,包含介质中电子对入射激光场的响应和分子体系响应

(即拉曼散射), 光纤材料中  $R(T)$  各项参数参见文献[9]。

$$R(T) = (1 - f_r)\delta(T) + f_r h_r(T). \quad (4)$$

要求解的广义非线性薛定谔方程一般很难得到解析解, 一般使用分布傅里叶方法做近似数值求解。在本文的模拟中, 运用了分布傅里叶法和二阶 RUNGE-KUTTA 法进行近似求解<sup>[11,13]</sup>。其中, 考虑到波分复用滤波后脉冲光谱宽带 0.8 nm, 其对应的变换极限光脉冲宽度在 1 550 nm 波段约为 1 ps。使用此条件, 考虑脉冲包络为式(3)所示, 模拟了不同入纤功率和传播长度下的光频谱展宽行为, 结果如图 3 所示。图 3(a) 显示了经过

50 m 色散位移光纤, 不同峰值功率下光脉冲频谱模拟结果, 图中光谱都经过归一化处理。图 3(b) 显示了在实验可行的光脉冲峰值功率 20 W 条件下, 光频谱随不同光纤传输距离变化的计算结果。图 3 中可以看出, 在波分复用系统可获得的较低入射光功率和较短的光纤传播距离下, 由于色散位移光纤的理想相位匹配特性, 光脉冲的频谱可以得到有效的展宽。同时, 基于三阶非线性的拉曼散射和四波混频可以相干地保持入射光脉冲中光频率梳齿结构。因此, 扩展到其他光载频的信号也具备承载原有微波频率的特性。

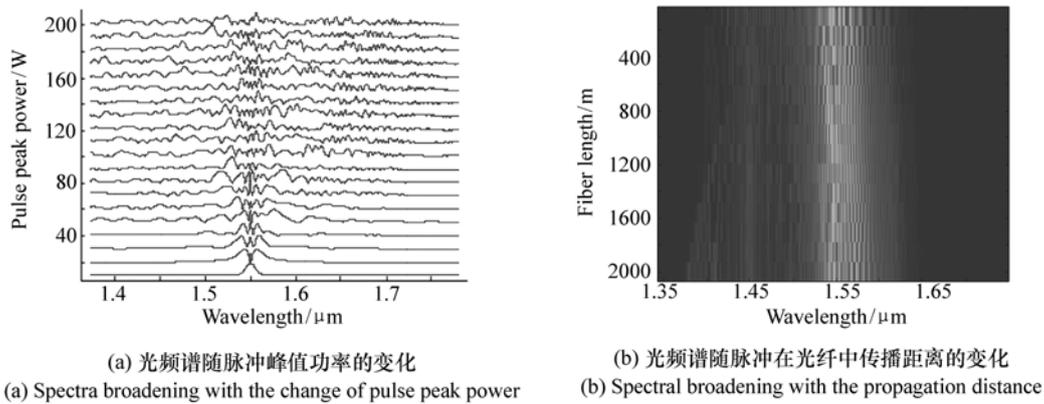


图 3 不同条件下脉冲光谱展宽模拟结果

Fig. 3 Simulated spectral broadening effects under different conditions

## 4 实验验证

根据理论计算结果, 选取 1 km 长色散位移光纤进行光频谱的展宽实验验证, 并根据图 1 所示系统框图对 50 km 长的实验室光纤传输链路的相位噪声进行探测。图 4(a) 为光脉冲经 1 km 色散位移光纤传输后光谱输出的理论模拟结果, 计算时使用条件均为实际实验中测量结果, 其中: 色散位移光纤长度为 1 km; 脉冲宽度为 1 ps; 中心波长为 1 550 nm; 峰值功率为 198 W。从图 4(a) 可看出, 0.8 nm 光谱宽度的皮秒光脉冲经 1 km 色散位移光纤传输后, 光谱展宽可以为我们提出的

方法提供新的光学载频, 而同时保持梳齿结构的相干性。为了保证移频后的信噪比, 采用相邻通道的波分复用波长进行系统实验验证。如图 4(b) 显示, 图中蓝线为发射端发送到远端后波长 1 通道实验光谱图, 红线为远端频谱扩展后经波长 2 通道返回到发射端的实验光谱图。波长 1 和波长 2 分别为国际电信联盟标准 DWDM 波长通道 31 和 20, 对应波长分别为 1 552.52 和 1 554.13 nm。图 4(c) 显示返回的移频光脉冲经光电探测器后输出的电信号频谱测量结果。对于 100 MHz 间隔的光频梳, 从图中可以看到恢复的基频电频谱及其高次谐波信号保持了较好的信噪比, 从实验角度有力地证明了本文方法的可行性。

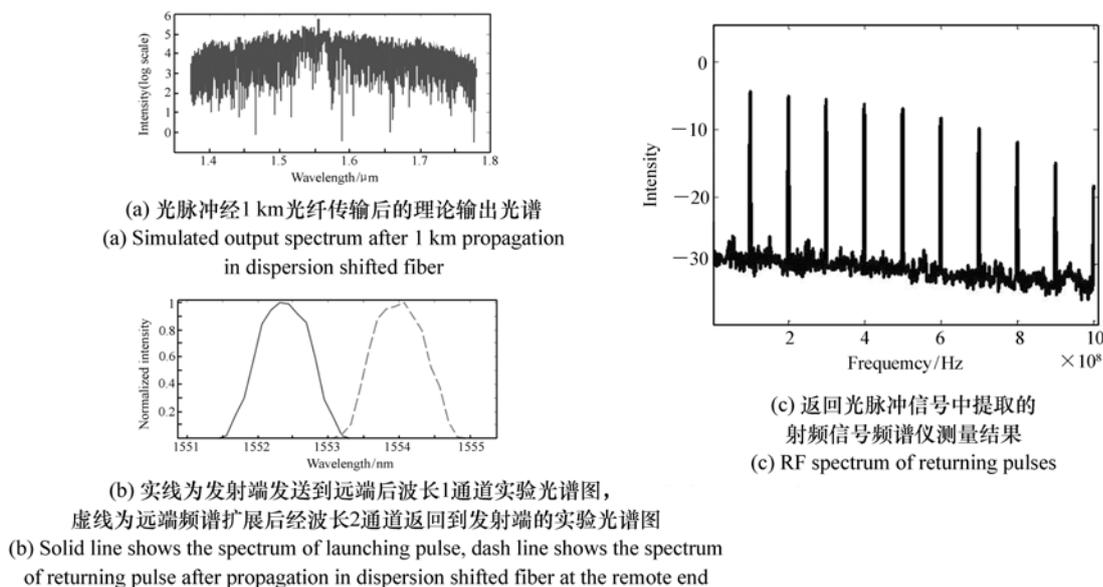


图4 经1 km 色散位移光纤传输后的非线性频谱变化及光频梳结构变化的理论和实验验证

Fig.4 Theoretical and experimental results of nonlinear spectral shifting after pulse propagation in 1 km-long dispersion shifted fiber

实验中,在远端移频后光脉冲信号成功返回发射端后,提取的射频信号和射频源信号在900 MHz谐波上使用鉴相电路进行相位噪声探测。鉴相电路的电压输出与探测到的相位噪声

成正比。图5为约1 h内光纤链路上相位噪声探测输出值,验证了本文提出的光频梳非线性移频在光纤链路相位噪声探测中的使用可行性。

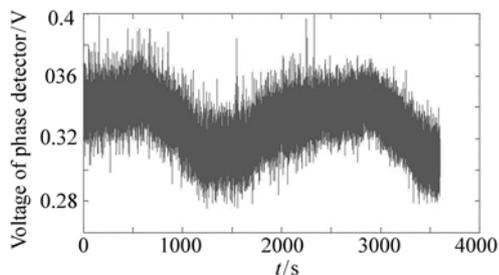


图5 利用移频返回光频梳信号进行的光纤相位噪声探测实验结果

Fig.5 Result of phase noise detection based on the spectrally shifted scheme

## 5 结 论

本文提出了一种利用光学频率梳非线性光谱变换和波分复用技术结合光脉冲承载射频的相位探测新方法。对于皮秒级低峰值功率脉冲,从理论角度详细模拟了其光谱展宽机制,并以此为基础,进行了实验验证。基于光纤中拉曼和四波混频的非线性光频率梳载频变换保证了新产生频谱梳齿结构的相干性。同时,本文提出的与波分复用相结合的方案,使得在脉冲传输过程中对色散积累不敏感,在长距离光纤传递射频应用中有更好的适用性。

## 参考文献:

[1] ANDERSON S G, BARTY C P J, BETTS S M, *et al.*. Short-pulse, high-brightness X-ray production with the PLEIADES Thomson-scattering source[J]. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 2004, 78: 891-894.

[2] MATVEEV A, PARTHEY C G, PREDEHL K, *et al.*. Precision measurement of the hydrogen 1S-2S frequency via a 920-km fiber link[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 230801.

[3] FOREMAN S M, HOLMAN K W, HUDSON D D, *et al.*. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber net-

- works[J]. *Review of Scientific Instruments*,2007,78:021101.
- [4] FUJIEDA M,KUMAGAI M,GOTOH T,*et al.*. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,2009,58:1223-1228.
- [5] PREDEHL K,GROSCHKE G,RAUPACH S M F,*et al.*. A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place[J]. *Science*,2012,336:441-444.
- [6] MARRA G,MARGOLIS H S,RICHARDSON D J. Dissemination of an optical frequency comb over fiber with  $3 \times 10^{-18}$  fractional accuracy[J]. *Opt. Express*,2012,20:1775-1782.
- [7] JUNG K,SHIN J,KANG J,*et al.*. Frequency comb-based microwave transfer over fiber with  $7 \times 10^{-19}$  instability using fiber-loop optical-microwave phase detectors[J]. *Opt. Lett.*,2014,39:1577-1580.
- [8] MARRA G,SLAVIK R,MARGOLIS H S,*et al.*. High-resolution microwave frequency transfer over an 86-km-long optical fiber network using a mode-locked laser[J]. *Optics Letters*,2011,36:511-513.
- [9] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. New York:Academic Press,2001.
- [10] DUDLEY J M,GENTY G,COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev. Mod. Phys.*,2006,78:1135-1184.
- [11] BLOW K J,WOOD D. Theoretical description of transient stimulated raman-scattering in optical fibers[J]. *IEEE J. Quantum Elect.*,1989,25:2665-2673.
- [12] DUDLEY J M,COEN S. Numerical simulations and coherence properties of supercontinuum generation in photonic crystal and tapered optical fibers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*,2002,8:651-659.
- [13] CRISTIANI I,TEDIOSI R,TARTARA L,*et al.*. Dispersive wave generation by solitons in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*,2004,12:124-135.

#### 作者简介:



龚梓博(1993—),男,北京人,本科生,主要从事光学频率梳、光纤传感等方面的研究。E-mail:gfansty@pku.edu.cn



施可彬(1976—),男,江苏南京人,博士,研究员,博士生导师,1998年、2001年于南开大学分别获得学士、硕士学位,2007年于美国宾夕法尼亚州立大学获得博士学位,主要从事非线性光学光谱和成像等方面的研究。E-mail:kebinshi@pku.edu.cn



陆星(1989—),男,湖北孝感人,博士研究生,2013年于天津大学获得学士学位,主要从事光学频率梳、光纤传感等方面的研究。E-mail:xlu@pku.edu.cn



龚旗煌(1964—),男,福建莆田华亭园头人,中国科学院院士,北京大学首批长江特聘教授,人工微结构和介观物理国家重点实验室主任、国家973项目首席科学家、国家自然科学基金委创新研究群体负责人、美国光学学会会士、英国物理学会会士、中国光学学会副理事长兼秘书长、中国物理学会常务理事兼国际交流委员会主任。1983年、1989年于北京大学分别获得学士、博士学位(中英联合培养),主要从事介观光学及超快光物理方面的研究。以第一完成人获国家自然科学基金二等奖、北京市科技一等奖、王大珩光学奖和饶毓泰物理奖等奖励。