

基于相关序列脉冲的布里渊光时域反射测量系统 解码方法研究

梁 浩 路元刚 李存磊 王祥传 张旭苹

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 布里渊光时域反射测量(BOTDR)系统空间分辨率和传感距离存在相互制约的关系。相关序列脉冲编码技术可用于解决这一矛盾,但直接对编码脉冲的布里渊散射采样信号进行解码,会因采样时间间隔小于编码单位脉冲宽度而导致解码信号的失真,从而降低了系统空间分辨率和测量精度。分析了直接互相关解码对 BOTDR 系统空间分辨率的影响,提出一种基于重采样的互相关解码方法,该方法解决了直接相关运算造成的系统性能降低问题。实验中用 512 bit 20 ns 的互补序列在 20 km 光纤末端获得 2 m 的空间分辨率。实验结果表明,与直接互相关的解码方法相比,基于重采样的互相关方法是一种有效的序列脉冲 BOTDR 信号解码方法。

关键词 光纤传感;布里渊光时域反射;相关序列;编码脉冲;采样率

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1006002

Study on Decoding Method of Correlation Coded Pulses Based Brillouin Optical Time-Domain Reflectometric System

Liang Hao Lu Yuangang Li Cunlei Wang Xiangchuan Zhang Xuping

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract There is a trade-off between spatial resolution and sensing range of conventional Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) system. Correlation coded pulses encoding technique has been used to solve this problem. However, when the sampling duration is smaller than the unit pulse width, the restored traces might be distorted by using direct correlation decoded method, thus it will decrease the spatial resolution and accuracy of the system. The influence of the direct correlation based decoded method on the spatial resolution of the system is studied, and a re-sampling based correlation technique is proposed to solve the problem introduced by the direct correlation method. 2 m spatial resolution is achieved over 20 km fiber by using 512 bit 20 ns Golay complementary codes and the new decoded method. The experimental result shows that the proposed decoding method is an effective technique for data processing of coded pulse based BOTDR system.

Key words optical fiber sensor; Brillouin optical time domain reflectometry; correlation sequence; coded pulse; sampling rate

OCIS codes 060.2370; 290.5830; 280.4788

1 引 言

布里渊光时域反射(BOTDR)技术是基于自发布里渊散射的分布式光纤传感技术,它可以通过光纤中自发布里渊散射光的频移和功率变化与温度和应力的线性关系来进行传感^[1~4]。该技术在桥梁、

大坝等大型建筑结构的健康检测中具有很好的应用前景^[5~7]。但是由于自发布里渊散射光非常微弱,传统 BOTDR 系统的信噪比(SNR)较低,使其动态范围和分辨率受到限制。通过将探测脉冲光调制成序列脉冲的方法,可以提高系统的信噪比^[8~10],从

收稿日期: 2011-04-14; **收到修改稿日期**: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61027017,60644001)和国家 973 计划(2010CB327803)资助课题。

作者简介: 梁 浩(1983—),女,博士研究生,主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。

E-mail: lianghao1509@gmail.com

导师简介: 张旭苹(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信网络的监测与故障定位、分布式光纤传感技术和光通信系统关键器件与组件等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420707S)

而使得分布式光纤传感器可以实现长距离、高分辨率的传感。而互相关序列脉冲由于其脉冲编码和解码简单,对基于序列脉冲的 BOTDR 系统信噪比提高和测量时间缩短具有很大优势^[11,12]。由于相干技术必须保证序列自相关和的边带为零,因此要求单位脉冲宽度与系统采样时间间隔相等。但是多数情况下,由于信号处理的需要,BOTDR 系统的采样时间间隔小于编码中单位脉冲的宽度,在直接互相关解码过程中会使得不同时刻的信号叠加,产生滤波效应,造成信号失真,降低系统的空间分辨率和测量精度。为了充分发挥互相关序列脉冲在提高 BOTDR 系统性能中的优势,本文通过分析直接互相关解码对 BOTDR 系统空间分辨率的影响,提出一种基于重采样的互相关解码方法,并从理论上和实验上证明该方法可以用于避免解码信号的失真,保证系统的高分辨率。

2 基于互相关序列编码脉冲光的 BOTDR 原理

相关序列是两个或多个由“−1”和“1”组成的序列组,且它们自相关函数的和为 δ 函数(即单位冲击函数)的整数倍,可表示为

$$\sum_{i=1}^N [P_i(t) \otimes P_i(t)] = C\delta(t), \quad (1)$$

式中 \otimes 为相关运算符号, $P_i(t)$ 为脉冲序列, N 为序列的个数, C 为大于 1 小于 $N \times L$ 的常数, L 为序列长度, δ 函数表示为

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & (t = 0) \\ 0, & (t \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

由于光脉冲只能为单极性,因此将互补序列组中的每个序列 $P_i(t)$ 用两个单极性序列 $P_i^+(t)$ 与 $P_i^-(t)$ 的差表示,即

$$P_i(t) = P_i^+(t) - P_i^-(t), \quad (3)$$

式中各序列的元素有对应关系为

$$P_i^+(t) = \begin{cases} 0, & [P_i(t)] = 0 \\ 1, & [P_i(t)] = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$P_i^-(t) = \begin{cases} 0, & [P_i(t)] = 1 \\ 1, & [P_i(t)] = 0 \end{cases}$$

由于 BOTDR 系统是基于自发布里渊效应的传感系统,当探测光功率较低,不出现其他非线性效应的情况下,它可近似为线性系统。假设单脉冲在光纤中的布里渊散射信号为 $\eta(t)$,则序列 $P_i(t)$ 在光纤中所产生的布里渊散射信号 $\psi_i(t)$ 为

$$\psi_i(t) = \eta(t) * P_i^+(t) - \eta(t) * P_i^-(t) = \mu(t) * P_i(t), \quad (5)$$

式中 $*$ 为卷积符号。解码时将 $\psi_i(t)$ 与序列 $P_i(t)$ 做互相关再累加,则有

$$\sum_{i=1}^N [\psi_i(t) \otimes P_i(t)] = \sum_{i=0}^N [\eta(t) * P_i(t) \otimes P_i(t)] = \eta(t) * \left[\sum_{i=0}^N P_i(t) \otimes P_i(t) \right] = \eta(t) * [C\delta(t)] = C\eta(t), \quad (6)$$

式中 C 为大于 1 的常数。可见,通过互相关解码,可以将单脉冲信号在光纤中的散射信号还原,并且被测布里渊散射信号得到了 C 倍增强。通过对布里渊频谱上每个频点获得的时域信号进行编、解码处理,可以得到光纤中布里渊频谱的分布,再根据布里渊频移与温度和应力的线性关系,可以获得光纤中温度和应力的分布情况。

3 直接互相关解码对 BOTDR 系统空间分辨率的影响

由于进行互相关解码处理的是系统采样得到的离散数据。由采样定理可知,信号采样频率必须大于信号最高频率的 2 倍,才能无失真地恢复原始连续信号。另外由于数据处理的需要,很多情况下也需要系统采样率大于信号的频率^[13,14]。此时,信号采样时间间隔 Δt 小于探测脉冲宽度 τ 。当矩形脉冲宽度 $\tau = M\Delta t$ (其中 M 为大于 1 的整数) 时,则采集得到的离散函数为

$$\eta(k) = \eta_0(k) * \sum_{j=0}^{M-1} \delta(k+j), \quad (7)$$

式中 $\eta_0(k)$ 为系统的单位冲击响应。此时,若对信号进行编码,则编码序列中的每一位对应 M 个采样时间间隔,因此序列中每个单元由 M 个‘1’或‘0’表示,即原始位数为 N 的序列,经上述细分后的位数为 $M \times L$, L 为原始序列长度。图 1 是“1011”经过细分后的得到的序列。假设第 i 个序列脉冲在系统中的得到的采样信号为 $\psi_i(k)$,则有

$$\psi_i(k) = \eta_0(k) * P_i(k). \quad (8)$$

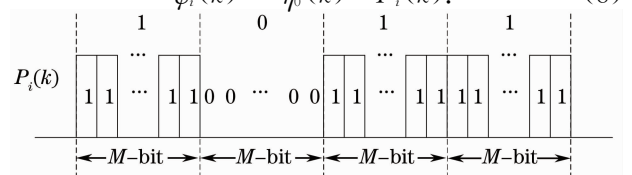


图 1 进入光纤的脉冲序列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of input coded pulse

用序列 $P_i(k)$ 与其在光纤中得到的采样信号直接进行互相关并累加得到

$$\begin{aligned}\eta'(t) &= \sum_{i=1}^N \psi_i(k) \otimes P_i(k) = \\ &= \sum_{i=1}^N [\eta_0(k) * P_i(k)] \otimes P_i(k) = \\ &= \eta_0(k) * \sum_{i=1}^N [P_i(k) \otimes P_i(k)], \quad (9)\end{aligned}$$

式中 $M \times L$ 位的序列 $\{P_i(k)\}$ 自相关函数累加的结果是中心在 $k = 0$, 峰值为 $L \times M \times N$, 宽度为 $2M$ 的离散三角函数, 其归一化的结果如图 2 所示。可见, 只有当 $M = 1$, 即采样时间间隔与脉冲宽度相同时, $P_i(k)$ 自相关函数和为 δ 函数, 可以还原出以相同时间间隔采集的单个脉冲在系统中响应的离散信号。当 $M > 1$ 时, 得到的解码结果 $\eta'(k)$ 与宽度为 $M\tau$ 的单个脉冲得到的结果 $\eta(k)$ [见 (7) 式] 不是线性关系, 即不同时刻的信号发生了混叠, 从而造成待测布里渊信号 $\eta(k)$ 的失真, 进而造成 BOTDR 系统空间分辨率与测量精度的降低。

假设一个线性系统的单位冲击响应为一个宽度 $10\Delta t$ 、时延 $20\Delta t$ 的理想矩形信号, 图 3(a), (b) 分别为该信号的时域表示 $\eta_0(k)$ 和频域表示 $F_\eta(f)$ 。系统的输入信号为一个宽度 $\tau = 20\Delta t$ 的理想矩形脉冲 (若采样间隔为 Δt , 则该信号包含细分单元数 $M =$

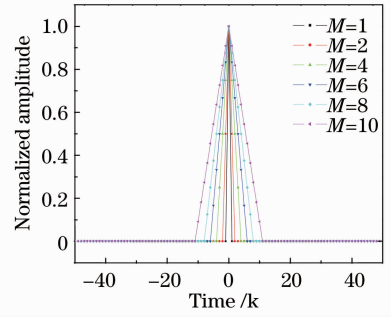


图 2 不同 M 值条件下互补序列自相关函数的和
Fig. 2 Sum of the auto-correction function of correction sequences with different M value

20), 图 3(c), (d) 分别为该输入信号的时域表示 $R_M(k)$ 和频域表示 $F_R(f)$ 。可以通过时域卷积 $\eta_0(k) * R_M(k)$ 获得该系统的时域输出信号, 如图 3(e) 中虚线所示。由图可知, 宽度 $\tau = 20\Delta t$ 的脉冲在该系统中的时域响应为一个上升沿为 $10\Delta t$, 半峰全宽 $20\Delta t$ 的梯形信号。根据时域卷积定理, 可知该响应信号的频域函数为系统冲击响应和输入信号频谱的乘积, 即 $F_\eta(f) \cdot F_R(f)$, 如图 3(f) 中实线所示, 该信号主瓣的半峰全宽为 $0.055(\Delta t)^{-1}$ 。当输入信号为单位脉冲宽度为 $20\Delta t$ 的 8 位 Golay 互补序列时, 其每个脉冲单元为一个理想矩形脉冲信号。采用直接互相关的方法进行解码后, 得到时域信号如图 3(e) 中实线所示。由图可知, 所得结果的半峰

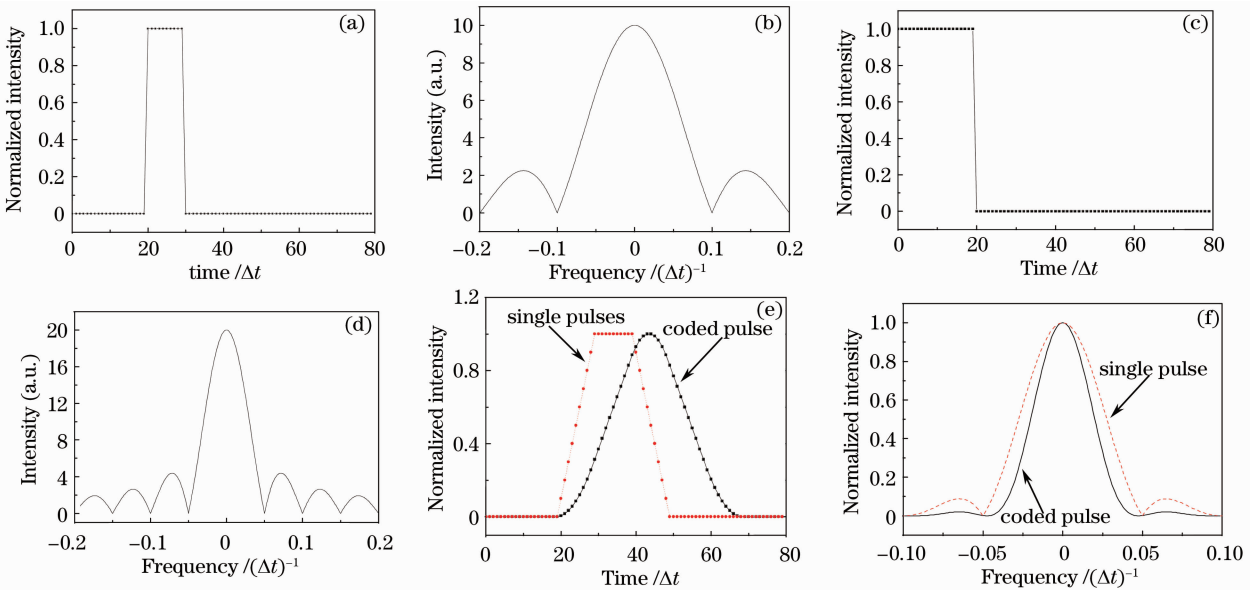


图 3 系统冲击响应的 (a) 时域函数, (b) 频域函数; 理想矩形脉冲信号的 (c) 时域函数, (d) 频域函数; 矩形脉冲及其对应的 8 位 Golay 互补序列在系统中的 (e) 时域响应, (f) 频域响应

Fig. 3 (a) Time domain signal, (b) frequency domain signal of the system impulse response; (c) time domain signal, (d) frequency domain signal of the input ideal rectangle pulse; (e) time response, (f) frequency response of the rectangle signal and its corresponding 8 bit Golay complementary codes with a direct correlation method

全宽为 $50\Delta t$, 并且信号的上升沿和下降沿都变得平滑, 接近高斯形状。其时域响应的主瓣半峰全宽为 $0.04(\Delta t)^{-1}$, 如图 3(f) 中实线所示。可见, 直接互相关解码会导致信号的部分高频分量被滤除, 产生信号失真。综上分析, 可知采用直接互相关的方法, 不能正确还原单个脉冲光在系统中的响应。

4 基于重采样的互相关解码方法

由图 2 可知, 只有当 $M = 1$ 时, 序列组自相关函数和为等于 δ 函数, 此时能正确解码获得单个脉冲光的布里渊散射信号。为了利用采样信号获得无失真的被测布里渊散射信号, 需要得到 $M = 1$ 的采样信号, 使得采样时间间隔与脉冲宽度相等。

因此可以对采集到的离散信号 $\phi_i(k)$ 进行一定时延 j ($0 \leq j < M$) 后, 间隔 M 位进行重新采样, 可以得到 M 组重采样信号 $\{\psi_i^j(k)\}$ 为

$$\begin{aligned} \psi_i^j(k) &= \phi_i(k) \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \delta(k - xM - j) = \\ & [\eta_0(t) * P_i(k)] \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \delta(k - xM - j) = \\ & \eta_0(t) * \left[P_i(k) \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \delta(k - xM - j) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

式中 x 为整数。假设

$$P_i^j(k) = P_i(k) \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \delta(k - xM - j), \quad (11)$$

且其对应的由“1”和“0”组成的原始 L 位序列为 $P_i^0(k)$, 根据相关序列的性质, 有

$$\sum_{i=1}^N P_i^j(k) \otimes P_i^0(k) = C \delta(k - j), \quad (11)$$

式中 C 为大于 1 的整数, 于是有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [\psi_i^j(k) \otimes P_i^0(k)] &= \\ \sum_{i=1}^N [\eta_0(k) * P_i^j(k) \otimes P_i^0(k)] &= \\ \eta_0(k) * \sum_{i=1}^N [P_i^j(k) \otimes P_i^0(k)] &= \\ C[\eta_0(k) * \delta(k - j)], \end{aligned} \quad (12)$$

将经过上述变换的序列累加得到

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{M-1} \left\{ \sum_{i=1}^N [\psi_i^j(k) \otimes P_i^0(k)] \right\} &= \\ C \left[\eta_0(k) * \sum_{j=0}^{M-1} \delta(k - j) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

式中等号右边方括号内即为单个脉冲光在光纤中的响应, C 为信号的增益。可见, 通过上述对被测信号

进行重新采样再做互相关的方法, 可以直接获得 C 倍的单个脉冲光在光纤中的响应, 不会造成信号的失真。即使输入脉冲光序列每个单元不是一个理想矩形信号, 可以通过在每次重采样的数据 $\phi_i^j(k)$ 中乘以一个与信号幅度相关的系数, 将系统时域信号无失真地恢复出来。

重采样的互相关解码的数据处理流程图如图 4 所示, 具体过程如下:

1) 将 N 个互相关序列中第 i 个序列 P_i 在光纤中散射信号保存在一维数组 S_i 中 ($i = 0, 1, \dots, N-1$) 其中 S_i 表示 P_i 在系统中响应。定义两个二维数组 R_i 和 D 作为中间变量分别保存重采样的信号及其解码结果。同时定义一个一维数组 Z 用于保存最终解码得到的单个脉冲在光纤中的响应结果。

2) 将数组 S_i 中的元素依次左移 j 位 ($j = 1, 2, \dots, M-1$), 同时将元素 $S_i[j + xM]$ 保存至 $R_i[j][x]$ 中 (x 为正整数, 且 $j + xM$ 小于 S_i 的位数)。求出 R_i 的第 j 行 $R_i[j]$ 与 P_i 互相关函数和, 并保存到数组 D 的第 j 行

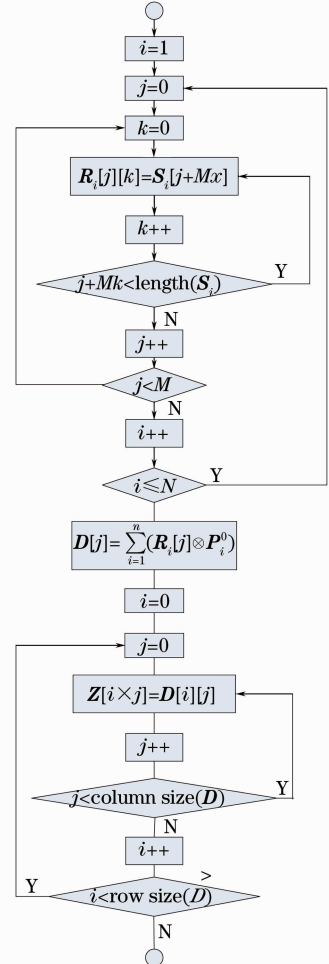


图 4 重采样互相关解码的流程图

Fig. 4 Flow diagram of re-sampling correlation decoding

$D[j]$ 。

3) 将 D 中的元素依据采样时间间隔进行重新排列保存至数组 Z 中, 数组 Z 与 D 中的元素对应关系为 $Z[i \times j] = D[i][j]$ 。

采用该解码方法处理单位脉冲宽度为 $20\Delta t$ 的 Golay 互补序列在图 3(a) 所示的系统中的时域函数, 其结果如图 5 所示。由图中可以看到, 采用重采样的方法可以无失真地恢复系统的时域信号。

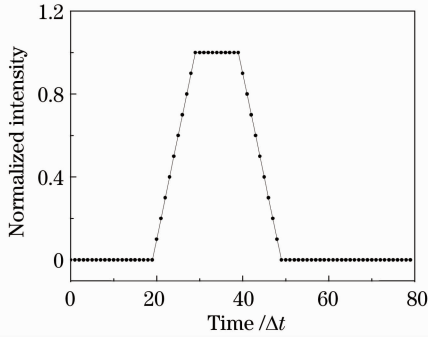


图 5 采用重采样方法的解码结果

Fig. 5 Decode result by using re-sampling method

5 实验结果与分析

实验中, 把长度为 512 bit、单位脉宽为 20 ns 的 Golay 互补相关序列脉冲光输入传感光纤。被测单模光纤(SMF)长度为 20 km, 光纤末端有两段长度 2.3 m 的光纤受到应力, 两段受应力光纤之间的间隔为 2 m。单模光纤在松弛状态下获得的布里渊频移 ν_B 为 10.87 GHz, 两段 2.3 m 光纤所受应力相同, 因此光纤受应力处的布里渊频移相同, 均为 10.90 GHz, 如图 6 所示。

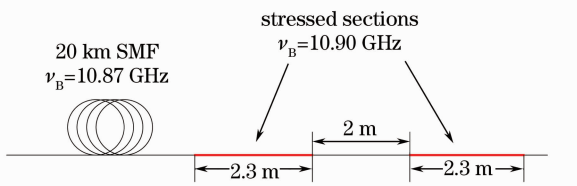


图 6 被测光纤

Fig. 6 Fiber under test

理论上, 20 ns 单位脉冲宽度对应的空间分辨率为 2 m , 在布里渊谱沿光纤长度变化的三维频谱图上, 在布里渊频移量 ν_B 为 10.90 GHz 处, 从光纤上的光功率分布即可准确区分应变不一致的 3 段光纤。用 1 GHz 的采样率采集布里渊时域信号, 单位脉冲宽度与采样时间间隔的比值 $M=20$ 。分别用直接相关的解码方法和基于重采样的相关解码方法对时域信号进行处理, 得到的结果如图 7 所示。

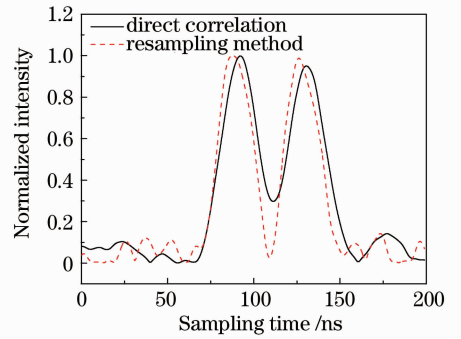


图 7 采用直接相关解码和重采样相关解码方法的实验结果比较

Fig. 7 Comparison of experimental results by using direct correlation and re-sampling correlation decoding method

当采用直接相关的方式进行解码时, 两段受应力光纤之间长度为 2 m 且处于松弛状态的光纤布里渊功率没有回到零值附近, 不能判断出此段光纤的长度。这是因为当 $M=20$ 时, 采用直接互相关的方法使得在该无应变光纤的时域信号与前后两段有应变光纤的时域信号进行了叠加, 从而产生误差。而且第二段应变光纤处的功率比第一段应变光纤处的功率低 5% , 与实验设定的两端光纤所受应力相同的情况不符合, 对布里渊功率的测量存在误差, 影响了最终的温度与应变测量精度。而采用重采样相关解码所获得的信号如图 7 中虚线所示。由图可见在两段受应力光纤位置处测得的峰值功率相同, 且 3 dB 宽度为 23 ns , 中间间隔时间为 20 ns 。根据公式 $v\Delta t$, 可以计算出三段光纤的长度分别为 2.3 , 2 和 2.3 m , 其中 v 为光在光纤中的速度, Δt 为时间。在光纤其它位置测得的功率为 0 , 说明光纤其他位置没有发生应变。该测量结果与光纤的应变状况相一致。

6 结 论

详细分析了直接互相关解码对 BOTDR 系统空间分辨率的影响。针对直接互相关造成的解码信号失真的问题, 提出了一种基于重采样的互相关解码方法, 并从理论上证明了该方法的可行性。实验中采用单位脉冲宽度为 20 ns 的 512 bit Golay 互补序列脉冲对 20 km 光纤进行探测, 在光纤末端获得了 2 m 的空间分辨率。实验结果证明了该方法可以避免由于采样时间间隔和序列单位脉冲宽度不匹配造成的信号失真, 是一种有效的和可靠的序列脉冲 BOTDR 信号解码方法。该方法有望通过结合如暗

脉冲等技术^[15],使得 BOTDR 系统在更长距离范围内实现低于米量级的空间分辨率。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xuping, Lu Yuangang, Wang Feng *et al.*. Development of fully-distributed fiber sensors based on Brillouin scattering [J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 54~61
- 2 Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197~201
董玉明, 张旭苹, 路元刚 等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题 [J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 197~201
- 3 T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(5): 107~108
- 4 T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda. Thermal effects of Brillouin gain spectra in single mode fiber[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(10): 718~720
- 5 H. Li, D. Li, G. Song. Recent applications of fiber optic sensor to health monitoring in civil engineering [J]. *Engineering Structures*, 2004, **26**(11): 1647~1657
- 6 Zhang Xuping, Wang Feng, Lu Yuangang. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 14~20
张旭苹, 王 峰, 路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(11): 14~20
- 7 K. Komatsu, K. Fujihashi, M. Okutsu. Application of optical sensing technology to the civil engineering field with optical fiber strain measurement device (BOTDR) [C]. *SPIE*, 2002, **4920**: 352~361
- 8 M. D. Jones. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7): 822~824
- 9 Hao Liang, Wenhai Li, Nicolas Linze *et al.*. High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1503~1505
- 10 M. A. Soto, G. Bolognini, F. D. Pasquale. Analysis of optical pulse coding in spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensors [J]. *Opt. Express*, 2007, **16**(23): 19097~19111
- 11 S. Z. Budisin. Efficient pulse compressor for Golay complementary sequences [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(3): 219~220
- 12 Yuangang Lu, Hao Liang, Xuping Zhang *et al.*. Brillouin optical time domain reflectometry based on Hadamard sequence probe pulse [C]. ICOCN2010, Nanjing, 2010
- 13 W. Li, X. Bao, Y. Li *et al.*. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21616~21625
- 14 Wang Feng, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Improvement of spatial resolution for strain measurement with Brillouin optical time-domain reflectometer by fitting method based on equivalent optical pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 43~49
王 峰, 张旭苹, 路元刚 等. 提高布里渊光时域反射应变仪测量空间分辨力的等效脉冲光拟合法 [J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 43~49
- 15 A. W. Brown, B. Colpitts, K. Brown. Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20 mm spatial resolution [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 381~386