

基于 G-Simplex 编码的 BOTDR 信号处理模型研究

刘文哲¹ 张燕君^{1,2} 付兴虎^{1,2*} 毕卫红^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 针对布里渊光时域反射(BOTDR)光纤传感系统对传感距离和信号检测的要求,提出了一种基于 Golay 编码和 Simplex 编码的混合 G-Simplex 编码技术,并混合使用 G-Simplex 编码与叠加平均算法对 BOTDR 信号进行了处理。结果表明,该方法在保证系统空间分辨率的情况下,采用一定的编码长度提高了系统的信噪比,增加传感距离;在去噪效果相同的情况下,可以增强脉冲响应强度,大幅度减少平均叠加次数,降低弱信号检测的难度。

关键词 信号处理; 布里渊散射; Golay 编码; Simplex 编码; 信噪比

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.090601

A Model Research of BOTDR Signal Processing Based on G-Simplex Coding

Liu Wenzhe¹ Zhang Yanjun^{1,2} Fu Xinghu^{1,2} Bi Weihong^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract According to the requirements of the sensing distance and signal detection for the Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) sensing system, a hybrid G-Simplex coding technology is proposed based on Simplex code and Golay code. The BOTDR signal is processed by combining the G-Simplex coding with the average superposition algorithm. The results demonstrate that this method can keep the space resolution. The signal-to-noise ratio and sensing distance is improved by using a certain code length. Moreover, with the same denoising effect, the intensity of impulse response can be improved and the superposition times can be largely decreased, which reduce the difficulty of weak signal detection.

Key words signal processing; Brillouin scattering; Golay code; Simplex code; signal to noise ratio

OCIS codes 060.2300; 070.1170; 200.3050; 070.4790

1 引言

随着人们对布里渊光时域反射(BOTDR)光纤传感技术的研究越来越深入,其空间分辨率、测量精度等性能取得了显著的提高^[1-2],但 BOTDR 传感系统中的后向布里渊散射光非常微弱,比探测光约小 50dB,同时,进入光电探测器的传感信号随着传感距离的增大而不断减弱^[3],更易淹没于噪声环境,系统的信噪比(SNR)大大降低,传感距离也不断缩减。

传统的 BOTDR 光纤传感去噪技术多采用以同步相关检测为基础的叠加平均技术^[4],该技术可以提高信号信噪比,但增加了信号的处理时间,降低了系统的响应速度;对于增加发射功率的方法,由于激光器功率有限,只能通过增加脉冲宽度来提高入射信号的功率,可是降低了系统的空间分辨率;使用适当的脉冲编码技术既能增加发射信号的能量又不降低空间分辨率^[5],但目前使用 Simplex 脉冲编码提高的信噪比相对较

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61205068)、中国博士后科学基金(2013M541200)、河北省自然科学基金(F2014203125)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划项目

作者简介: 刘文哲(1990—),男,硕士研究生,主要从事光传感、光电检测与信号处理等方面的研究。

E-mail: yifenzhong1920@163.com

导师简介: 张燕君(1973—),女,博士,教授,主要从事光传感、光电检测与信号处理等方面的研究。

E-mail: yjzhang@ysu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

低,并且随着编码长度的增加信噪比的提高量也趋于平缓,光纤传感距离的提高量有限,脉冲响应强度保持不变。

为此,本文提出了一种基于 Golay 编码和 Simplex 编码的混合 G-Simplex 编码技术,并将其去叠加平均混合使用,该方法不仅在保证系统空间分辨率的条件下用一定的编码长度大幅度提高了系统的传感距离,而且在增强脉冲响应强度的同时降低了叠加平均方法的次数。

2 基本原理

高性能的 BOTDR 光纤传感要求具有较好的传感距离和空间分辨率,编码方法因其特有的优势可以在保证空间分辨率的情况下提高系统的信噪比从而增加传感距离。下面分别介绍用于 BOTDR 系统的 G-Simplex 混合编码原理及其信噪比。

2.1 混合编码技术

G-Simplex 混合码是在 Golay 编码和 Simplex 编码的基础上产生的。其中 Golay 码是以长度相等的两种元素构成的序列。这一对序列中的一个序列,在某一种分割下相同元素的对数,与另一个序列在相同的分割条件下不同元素的对数相等^[6],将互补序列的两种不同元素定义为“1”和“-1”,由于在光纤中只能传输正的光脉冲,因此需要通过偏置的方法^[7]达到传送正脉冲的效果。即把原来定义的 Golay 互补序列 A_k 、 B_k 分别分解成 U_k 、 \bar{U}_k 和 W_k 、 \bar{W}_k 。

$$U_k = \begin{cases} 1 & A_k = 1 \\ 0 & A_k = -1 \end{cases} \quad \bar{U}_k = \begin{cases} 1 & A_k = -1 \\ 0 & A_k = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

$$W_k = \begin{cases} 1 & B_k = 1 \\ 0 & B_k = -1 \end{cases} \quad \bar{W}_k = \begin{cases} 1 & B_k = -1 \\ 0 & B_k = 1 \end{cases}. \quad (2)$$

S 矩阵是一个由“0”和“1”组成的单极性矩阵,它的每一行编码叫做 Simplex 编码, S 矩阵可由 Hadamard 矩阵转换而来,矩阵中每个行向量都具有正交的关系^[8]。 n 阶 Hadamard 具有如下特性:

$$H \cdot H^T = nI_n, \quad (3)$$

式中 I_n 为 $n \times n$ 的单位矩阵。由于光功率只能为正值,所以光系统中的信号具有单极性,无法将 Hadamard 序列编码技术运用到光系统中。为了解决这个难题,通过研究提出把 Hadamard 矩阵通过运算变成只含有“1”和“0”两种元素的单极性矩阵即 S 矩阵,去除 Hadamard 矩阵的第一行与第一列,并将矩阵中的元素“+1”改“0”,将“-1”改为“1”,得到的新矩阵便是所需的 S 矩阵^[9]。

设 Simplex 编码的码长为 L , Golay 编码的码长为 N , G-Simplex 编码将上述 Simplex 编码作为内码, Golay 码作为外码,即将 Simplex 编码作为 Golay 编码的输入产生的,它分别替代序列 U_k 、 \bar{U}_k 和 W_k 、 \bar{W}_k 中的“1”,这样每位 Golay 编码由 L^2 个码元构成, Golay 码中的“0”同样为 L^2 个“0”码元。依据此规律,每组 Golay 编码与 Simplex 编码相结合可以产生 $N \times L^2$ 个 G-S 复合码,由于 G-S 复合码的基础为 Golay 编码,因此最终形成 4 组复合码。

依据复合码的规则对脉冲光进行编码,同时,设定编码脉冲与单脉冲保持理论脉宽值 10ns,得到 4 组 G-Simplex 脉冲编码序列,将脉冲光注入到传感光纤,脉冲光在传输时会产生后向的布里渊散射,并反射回光纤始端,进而探测到 4 组响应信号 $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$, 如图 1 所示。与单脉冲光的系统响应信号 $S_0(t)$ 相比,使用编码技术得到的信号 $S'_0(t)$ 具有更高的信噪比,但编码脉冲的重复周期也会随之增加。最后通过解码操作就可以得到与单脉冲光工作方式等效的响应函数。相比与单脉冲的系统响应 $S_0(t)$, 通过编解码获得的信号信噪比更高^[10]。

在图 1 中, G-S 混合编码的解码首先将得到的信号 $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$ 进行 Golay 码的解码,得到脉冲响应 Z_k , 系统的最终响应是内码编码脉冲的 $2N$ 倍,基于互相关序列 Golay 编码和 Simplex 编码的 BOTDR 系统,编码脉冲在传感光纤中传输时,每位码元都后向散射回一个脉冲响应,传感系统采集到的最终响应为多个独立脉冲响应的叠加,所以系统的空间分辨率保持不变^[11]。 X_k, Y_k 为

$$X_k = (U_k \otimes h_k - \bar{U}_k \otimes h_k) \cdot A_k, \quad (4)$$

$$Y_k = (W_k \otimes h_k - \bar{W}_k \otimes h_k) \cdot B_k, \quad (5)$$

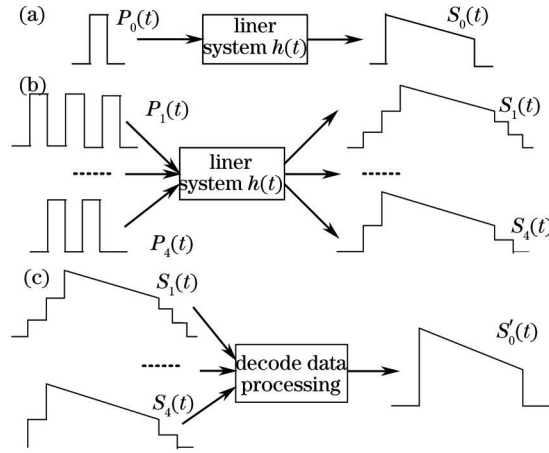


图1 脉冲编码示意图。(a) 单脉冲响应; (b) 脉冲编码响应; (c) 解码操作

Fig.1 Pulse coding scheme. (a) Single pulse response; (b) pulse coding response; (c) decoding operation

式中 \otimes 表示卷积, $A_k = U_k - \bar{U}_k$, $B_k = W_k - \bar{W}_k$, h_k 为输入内码脉冲响应。将上述相关结果求和, 即可获得传感的检测结果^[12]。脉冲响应 Z_k 为

$$Z_k = X_k + Y_k = (U_k \otimes h_k - \bar{U}_k \otimes h_k) \cdot A_k + (W_k \otimes h_k - \bar{W}_k \otimes h_k) \cdot B_k = A_k \cdot A_k \otimes h_k + B_k \cdot B_k \otimes h_k = (A_k \cdot A_k + B_k \cdot B_k) \otimes h_k = 2N\delta_k \otimes h_k. \quad (6)$$

然后对得到的脉冲响应进行 Simplex 编码的解码, 将脉冲响应转换为 $n \times n$ 矩阵 η , 其中 n 为 S 矩阵的阶数, 矩阵 η 包含散射功率和其所携带的噪声 $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, \dots , $e_n(t)$, 为了得到所需的散射功率, 可利用 S 矩阵的逆矩阵对得到的 n 组散射功率曲线进行解码, 解码运算过程如下:

$$\begin{bmatrix} \Phi_1(t) \\ \Phi_2(t) \\ \Phi_3(t) \\ \vdots \\ \Phi_n(t) \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \eta_3(t) \\ \vdots \\ \eta_n(t) \end{bmatrix} = S^{-1} \left[S \begin{bmatrix} \Psi_1(t) \\ \Psi_2(t) \\ \Psi_3(t) \\ \vdots \\ \Psi_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} \Psi_1(t) \\ \Psi_2(t) \\ \Psi_3(t) \\ \vdots \\ \Psi_n(t) \end{bmatrix} + S^{-1} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\Psi_i(t)$ 为单脉冲经传感系统得到的散射光功率曲线, $\Phi_i(t)$ 为解码后的散射光功率曲线, 由于 $\Psi_i(t)$ 是 $\Psi_1(t)$ 经时移所得, 通过它们之间的时移关系, 将 $\Phi_i(t)$ 反向时移后叠加平均, 即可得到原始光功率曲线 $\Psi_1(t)$, Simplex 编码后的空间分辨率等于单脉冲 BOTDR 系统的空间分辨率:

$$\frac{1}{n} \{ \Phi_1(t) + \Phi_2(t + \tau) + \Phi_3(t + 2\tau) + \dots + \Phi_n[t + (n-1)\tau] \} = \Psi_1(t) + \frac{2}{n+1} F[e(t)], \quad (8)$$

式中 τ 为单位时移, $F[e(t)]$ 由 (7) 式中最后一部分得到, 它是包含 $n \times n$ 个 $e(t)$ 及其延时函数的多项式, 此时即可得到编码后的噪声的均方差为

$$E \left\{ \left[\frac{\Phi_1(t) + \Phi_2(t + \tau) + \dots + \Phi_n[t + (n-1)\tau]}{n} - \Psi_1(t) \right]^2 \right\} = \frac{1}{n^2} \left(\frac{2}{n+1} \right)^2 E \{ F^2[e(t)] \}. \quad (9)$$

设 $e_i(t)$ 为随机过程, $E[e_k(t)] = 0$, $E[e_k(t)e_l(t)] = 0$ ($k \neq l$), $E[e_k^2(t)] = \delta_e^2$, 所以 $E\{F^2[e_k(t)]\} = n^2 \delta_e^2$ 。经 n 阶 Simplex 编码调制解调后的信噪比之前提高了 $(n+1)/2$ 倍^[13]。

2.2 系统信噪比

光脉冲信号在光纤中传输时会受到系统噪声的干扰, 设每路光信号注入被测光纤中受到的噪声干扰均方值是 δ^2 。G-Simplex 编码在 BOTDR 系统的应用过程中既需要进行 Golay 解码又需要进行 Simplex 解码, 在叠加平均次数一定的情况下, 使用码长为 N 的 Golay 码的 BOTDR 需要的时间为使用单脉冲时间的 $4/N$ 。在相同的时间内, 使用 Golay 码的 BOTDR 比使用单脉冲的系统多平均 $N/4$ 。从而噪声增强 $\sqrt{N}/2$ 倍, 而信号增强 $N/4$ 倍, 通过对 Golay 编码进行理论分析可知, 使用 Golay 码的光纤传感系统不仅信噪比 Z_c 提高了, 而且信号强度也增强了。

经过 Golay 解码后,系统噪声减小为 σ^2/Z_c^2 。在此基础上,再应用 S 脉冲编码与叠加平均结合处理,系统噪声进一步降低到 $\sigma^2/(Z_c Z_s)^2$ 。因此应用优化的 G-Simplex 混合码的 BOTDR 系统的噪声均方值为:

$$\delta_{G-S}^2 = \delta^2 / (Z_c Z_s)^2. \quad (10)$$

由于注入光纤的信号功率保持不变,而系统噪声减小了,从而系统的信噪比得到了改善。当 Simplex 编码长度与叠加次数相等时,如都为 L ,基于混合编码技术的 BOTDR 系统信噪比相对叠加算法的信噪比增益为:

$$Z_{G-S} = (L+1)\sqrt{N}/4\sqrt{L}. \quad (11)$$

图 2 所示为 Simplex 编码与 Golay 编码的信噪比增益对比以及当 Golay 编码的码长 N 保持 8 和 32 固定不变时,基于 G-Simplex 编码的系统信噪比增益随着 Simplex 编码码长的变化的趋势。

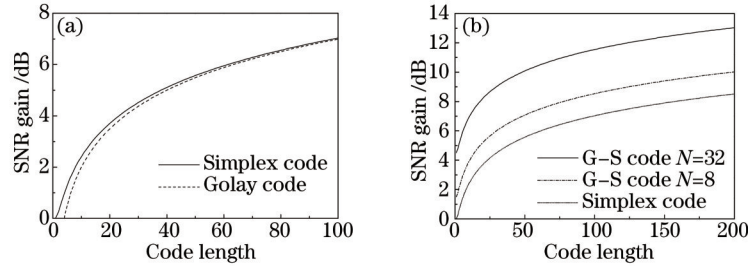


图 2 信噪比增益。(a) Simplex 与 Golay 编码的信噪比增益; (b) G-Simplex 与 Simplex 编码的信噪比增益

Fig.2 SNR gain. (a) Simplex and Golay code SNR gain; (b) G-Simplex and Simplex code SNR gain

由图 2 可知 64 位 Simplex 编码与 32 位 Golay 编码的混合码的信噪比增益为 10.603 dB,而单纯 64 位 Simplex 编码的信噪比增益为 6.0879 dB,可见引入混合码的 BOTDR 系统信噪比增益高于单独使用 Simplex 编码系统获得的信噪比增益,对于光纤损耗系数为 0.2 dB/km 的单模石英光纤,混合编码可增加约 53 km 的传感距离。

随着编码长度的增加, Golay 码与 Simplex 编码对信噪比的提高量都趋于平缓并不是线性增加, Golay 码的编码增益略低于 Simplex 编码,而优化的 G-Simplex 混合编码合理的整合了上述两种简单编码,线性增长系数较大,且混合码增益远高于简单编码获得的信噪比增益,特别在需要较长编码的时候,可以用两个较短长度的混合编码替换,降低了较长编码时对硬件的较高要求,通过提高系统信号的信噪比增加了传感系统的距离。

3 BOTDR 信号处理模型

以前期研究的传感模型为基础来验证 G-Simplex 混合编码的性能,并进行数据分析^[14]。如图 3 所示,将连续的光纤等效为 N 个长度为 d 的光纤微元组成,假设探测脉冲经过传感光纤时会在每个微元发生衰减和散射,而后向散射光在经过微元时只发生衰减,不发生反射。光纤模型中每个光纤微元的散射系数为 r ,衰减系数为 d 。

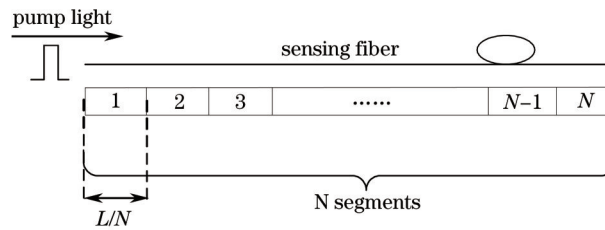


图 3 分布式光纤传感器数学模型示意图

Fig.3 Distributed optical fiber sensing mathematical model diagram

在以上细分模型的基础上对 G-Simplex 编码仿真分析,首先设定发射到光纤中的脉冲探测光强度是 P ,基于上述分析可知,当探测光传输过一段光微元时,产生强度为 $Pr \exp(-d)$ 的反射光,而剩余的透射光强度为 $P(1-r) \exp(-d)$,那么,第 k 段传感光纤微元的反射光在光纤始端接收到的强度为 $Pr(1-r)^{k-1} \exp(-2kd)$,其中微元反射系数为 r ,衰减系数为 d ,同时在探测脉冲传输时加入噪声干扰 n_{wg} 来模拟真实的待测环境,此时,接收到的反射光强为 $Pr(1-r)^{k-1} \exp(-2kd) + n_{wg}$ 。

假设在 70 km 的传感光纤上进行仿真分析,首先在 30 km 光纤处进行温度改变刺激,在此基础上叠加噪声干扰,信噪比为 3.99 dB,信号幅度的量级为毫伏。当不进行任何处理时,获得的散射信号如图 4 所示,此

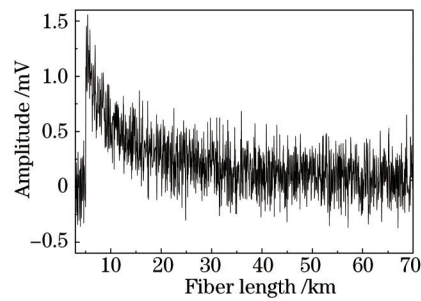


图4 原始信号

Fig.4 Original signal

时温度引起的光强变化淹没在噪声环境中,无法识别。

然后分别将传统的 Simplex 编码与叠加平均应用到传感系统中,并对比其后向散射信号,如图 5 所示。

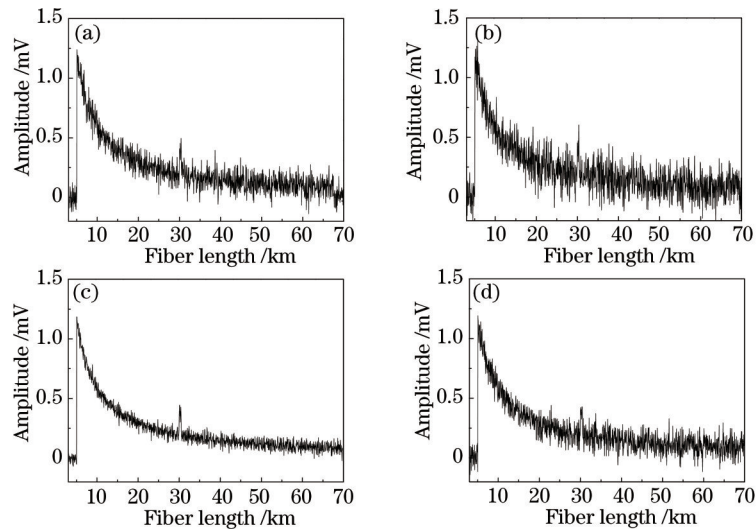


图5 Simplex 编码与叠加平均去噪。(a)7阶 Simplex 编码;(b)7次叠加平均;(c)15阶 Simplex 编码;(d)15次叠加平均

Fig.5 S code and superposition average denoising. (a) 7 order Simplex code; (b)7 times average superposition

(c) 15 order Simplex code; (d) 15 times average superposition

图 5 分别显示了 7、15 编码长度的 Simplex 编码与对应的不同次数的叠加平均的信号去噪结果,由图可

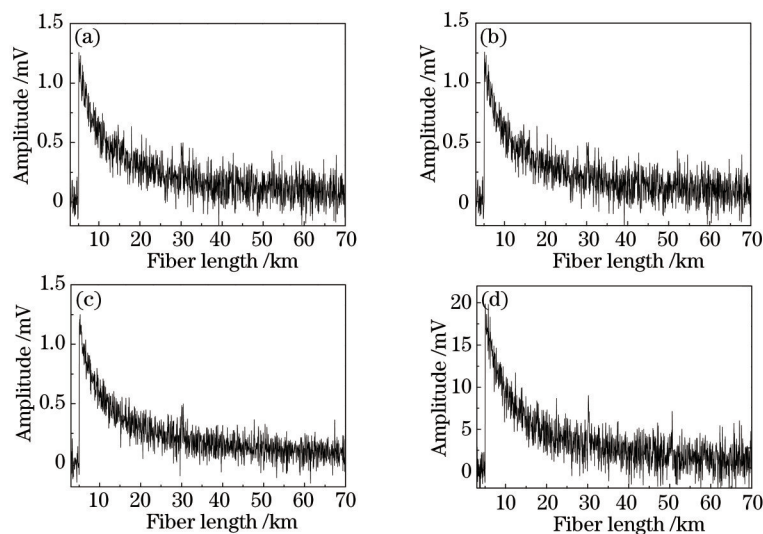


图6 150次叠加与编码。(a)150次叠加;(b)7阶 Simplex 编码与17次叠加平均;(c)15阶 Simplex 编码与3次叠加平均;

(d)8+7位 G-Simplex 编码与1次叠加

Fig.6 150 times superposition and code. (a) 150 times superposition; (b) 17 times superposition with 7 Simplex code;

(c) 3 times superposition with 15 Simplex code; (d) 1 time superposition with 8+7 G-Simplex code

知,随着编码长度的增大,处理后的信号受噪声的影响越来越小,即温度变化引起的突触越来越明显,特别从长度为15的Simplex编码以后,相对于对应叠加平均方法的去噪,Simplex编码具有更有效的去噪效果。

在相同的去噪效果条件下,所采用的Simplex编码技术将比叠加平均方法所用的信号处理时间少很多,时间差伴随着码长的增大也会继续扩大,同时信噪比也不断提高,但脉冲响应的强度并没有变化,编码长度的增加也使得其产生对硬件的要求越来越高。

此时提出了一种G-Simplex编码技术,并结合叠加平均使用,在保持编码优点的同时又用有效的编码长度增加了系统信噪比,编码脉冲序列响应信号的强度也随着Golay码的应用而不断增强,降低了系统微弱信号检测的难度。在信噪比为-12.11dB噪声干扰的情况下,首先设叠加平均次数为150、300、600,得到处理后的信号,然后分别使用Simplex编码和G-Simplex编码对探测光进行编码调制,并在传感光纤始端对接收到的信号解码,并结合叠加平均处理,以使去噪结果与叠加平均相似。

图6所示为叠加平均为150次时,不同码长的编码方法与叠加平均对原始信号的去噪效果对比。

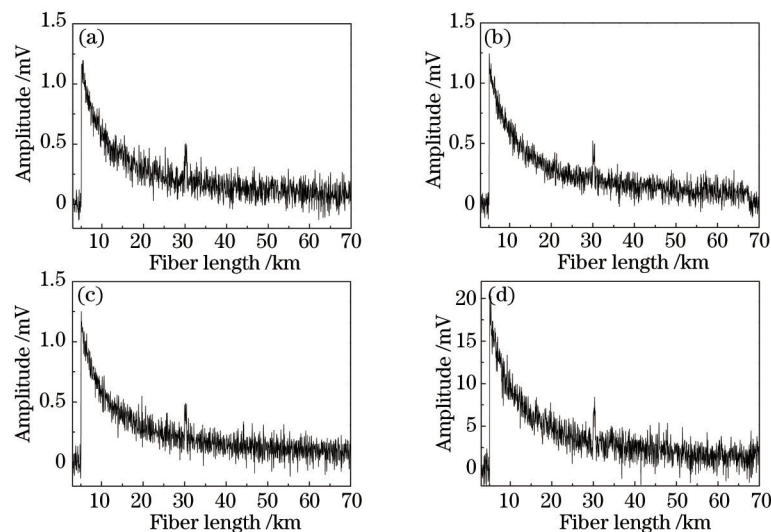


图7 300次叠加与编码。(a) 300次叠加;(b) 7阶 Simplex 编码与 27次叠加平均;(c) 15阶 Simplex 编码与 6次叠加平均;(d) 8+7位 G-Simplex 编码与 3次叠加

Fig.7 300 times superposition and code. (a) 300 times superposition; (b) 27 times superposition with 7 Simplex code; (c) 6 times superposition with 15 Simplex code; (d) 3 times superposition with 8+7 G-Simplex code

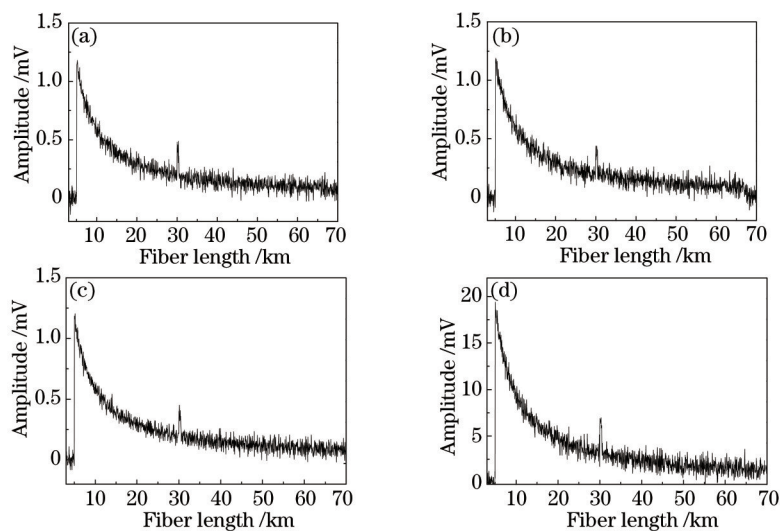


图8 600次叠加与编码。(a) 600次叠加;(b) 7阶 Simplex 编码与 40次叠加平均;(c) 15阶 Simplex 编码与 10次叠加平均;(d) 8+7位 G-Simplex 编码与 6次叠加

Fig.8 600 times superposition and code. (a) 600 times superposition; (b) 40 times superposition with 7 Simplex code; (c) 10 times superposition with 15 Simplex code; (d) 6 times superposition with 8+7 G-Simplex code

图6表明当编码的去噪效果与150次叠加平均去噪相似时,G-Simplex编码所需的不同码型的编码长度相对最短且叠加平均的次数最小,信号强度较Simplex编码与叠加平均得到了很大的提高。图7表示的为当叠加平均为300次时,不同码长的编码方法与叠加平均对原始信号的去噪效果对比。

图8表示的为当叠加平均为600次时,不同码长的编码方法与叠加平均对原始信号的去噪效果对比。

在上述三种条件下,使用Matlab软件进行建模仿真所采集到的不同编码去噪方法与叠加平均所消耗的时间对比结果如表1所示,即模拟脉冲光进入数学传感模型到得到脉冲响应所消耗的处理时间。

表1 去噪方法所用时间

Table 1 Used time of denoising method

Superposition		Hybrid	
Superposition times	<i>t</i> /s	Code length and superposition times	<i>t</i> /s
150	19.54	7+17	13.13
		15+3	6.72
		8+7+1	6.43
300	37.91	7+27	21.28
		15+6	12.45
		8+7+3	11.31
600	65.95	7+40	32.89
		15+10	26.62
		8+7+6	25.34

分析仿真结果及表1中数据可知,在保证不同编码的去噪效果与叠加平均相同的情况下,模拟信号处理叠加平均的次数随着码长的增加而不断减少,并且所提出的G-Simplex编码可以在保证空间分辨率的条件下,用两个较短的编码长度实现较长Simplex编码达到的去噪效果,所需叠加平均的次数最少,微弱信号的响应强度也得到了不断增大,降低了系统对微弱信号检测的难度。

4 结 论

采用基于Golay编码和Simplex编码的混合G-Simplex编码技术,不仅在保证空间分辨率不变的情况下用一定的编码长度提高了系统的传感距离,而且可以在增强脉冲响应强度的同时降低叠加平均的次数。例如32+64的G-Simplex混合码在光纤损耗系数为0.2 dB/km的单模石英光纤中可增加约53 km的传感距离。当BOTDR传感系统对传感距离和信号检测强度要求较高时,使用较长的简单编码增加了系统对硬件的要求,传感距离的提高量也趋于平缓,而叠加平均算法的去噪效果是建立在叠加次数的基础上的,检测信号强度也保持不变。所提出的G-Simplex编码技术恰好弥补了传感距离与信号检测强度上的不足之处,降低了叠加次数,为今后组建远程传感系统提供了理论模型。

参 考 文 献

- 1 Feng Wang, Weiwei Zhan, Xuping Zhang, *et al.*. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3663-3667.
- 2 Yuguo Yao, Yuangang Lu, Xuping Zhang, *et al.*. Reducing trade-off between spatial resolution and frequency accuracy in BOTDR using Cohen's class signal processing method[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(15): 1337-1339.
- 3 Zhao Lijuan, Lü Anqiang, Zhang Jisheng. Performance analysis of a simultaneously sensing measurement Brillouin temperature and strain sensor[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2009, (1): 25-28,36.
赵雨娟, 吕安强, 张吉生. 光纤布里渊温度和应变同时传感系统性能分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009, (1): 25-28,36.
- 4 Li Xingrong, Li Yongqian, Zhang Shuo. The Labview implement of synchronization overlapping average algorithm to suppress noise[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(4): 73-76.
李星蓉, 李永倩, 张 硕. 同步叠加平均算法抑制噪声的Labview实现[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(4): 73-76.
- 5 Jonghan Park, Gabriele Bolognini, Duckey Lee, *et al.*. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(17): 1879-1881.

- 6 Martin P Mienkina, ClausStefan Friedrich, Nils C Gerhardt, *et al.*. Experimental evaluation of photoacoustic coded excitation using unipolar Golay codes[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(7): 1583–1593.
- 7 Chechou Shen, Chi Wu, Junkai Peng. Supplementary Golay pair for range side lobe suppression in dual-frequency tissue harmonic imaging[J]. Ultrasonics, 2015, 56: 477–486.
- 8 Marcelo A Soto, Gabriele Bolognini, Fabrizio Di Pasquale. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120 km distance employing optical preamplification[J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 232–234.
- 9 Duckey Lee, Hosung Yoon, Pilhan Kim, *et al.*. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on simplex codes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 322–328.
- 10 Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Raman distributed optical fiber sensor with Simplex coding optical external modulation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1462–1466.
宋牟平, 鲍 翀, 叶险峰. 采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1462–1466.
- 11 Yunqi Hao, Qing Ye, Zhengqing Pan, *et al.*. Effects of modulated pulse format on spontaneous Brillouin scattering spectrum and BOTDR sensing system[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46: 37–41.
- 12 Hamed Azamia, Javier Escuderoa, Ali Darzib, *et al.*. Extracellular spike detection from multiple electrode array using novel intelligent filter and ensemble fuzzy decision making[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2015, 239: 129–138.
- 13 Gabriele Bolognina, Arthur Hartogb. Raman-based fibre sensors: trends and applications[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 678–688.
- 14 Li Da, Zhang Yanjun, Fu Xinghu, *et al.*. A fast signal processing method based on Simplex code in BOTDR system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(1): 29–35.
李 达, 张燕君, 付兴虎, 等. BOTDR 系统应用 Simplex 编码的信号快速处理方法[J]. 光电工程, 2014, 41(1): 29–35.

栏目编辑: 韩 峰