



格雷互补序列在分布式温度传感系统中的应用

孙秀斌¹, 霍晓练²

(1.北京市公安局 北京 100740; 2.北京北邮国安宽带网络技术有限公司 北京 100082)

摘要:针对传统分布式温度传感系统的信噪比差问题,提出了利用格雷互补相关序列代替传统单脉冲实现的方案。理论分析表明,采用该技术能有效提高信噪比。最后利用 MATLAB 进行了仿真验证。

关键词:信噪比;格雷互补序列;相关

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.02.017

Golay Complementary Sequence in the Application of Distributed Temperature Sensing System

Sun Xiubin¹, Huo Xiaolian²

(1. Beijing Municipal Public Security Bureau, Beijing 100740, China;

2. BUPT-Guonan Broadband Network Technology Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The value of signal noise ratio (SNR) is very low in conventional OTDR. The employed Golay complementary sequence was proposed instead of single pulse to solve that problem. By theoretical analysis and simulation demonstration, it was verified that this method could effectively increase the SNR.

Key words: SNR, Golay complementary sequence, correlation

1 概述

温度检测技术在未来智能电网、长距离油气管线安全监控、重要设施的安全监控等领域具有重大的应用需求,分布式光纤传感器凭借其本征防爆、无源和长距离等特点,地位日益上升^[1]。分布式光纤传感器利用光时域反射(optical time domain reflectometer, OTDR)的基本原理,探测光脉冲的瑞利散射、布里渊散射或者拉曼后向散射,利用光频率或者强度与温度的物理关系,获得温度沿整条光纤的分布式信息^[2]。其中,分布式拉曼传感技术可以提供较高的温度分辨率,是目前主流的温度传感手段。但在分布式拉曼光纤温度传感器中,后向拉曼散射光很弱,尤其是反斯托克斯光(anti-Stokes)(-60 dB)难以探测。解决该问题的方法包括:提高平均次数,进而提高信噪比,或者增加

输入脉冲的能量。为了获得较高的信噪比,通常需要较复杂的信号处理电路及脉冲功率较高的 LD 光源系统。参考文献[3]提出了一种采用 S 码代替传统单脉冲 OTDR 的方法,首先传送 M 组长度为 M 的脉冲串,接收到响应后形成一个矩阵,通过对矩阵进行分析,解调出 OTDR 曲线,该方法测量时间长,编码和解码复杂。参考文献[4]利用格雷码理想的非循环自相关特性,提出采用格雷码进行长距离 OTDR 测量的方法。

在分布式拉曼温度传感系统中,由于接收的信号微弱,而且要求测量时间短,采用编码替代传统单脉冲的方案,可以降低发射脉冲功率,并减少测量时间。本文提出了基于格雷编码的长距离拉曼温度传感技术,其基本理论为:将传统的分布式拉曼系统中的单脉冲替换为特定的格雷互补编码序列,通过自相关求和有效地还原温度的分布

式信息,在平均次数相同的前提下,可以大幅提高信噪比,而且不需要复杂的信号处理电路及脉冲功率较高的 LD 光源,可以保持原本的空间分辨率。

2 格雷互补相关序列原理

格雷互补相关序列是两个序列分别自相关之后的和,是一个冲击函数。假设有序列对 A_k, B_k , 长度均为 L , 并满足式(1)的关系,那么这两个序列为格雷互补序列。

$$A_k \oplus A_k + B_k \oplus B_k = 2L\delta_k \quad (1)$$

其中,当 $k=0$ 时, $\delta_k=1$; 当 $k \neq 0$ 时, $\delta_k=0$ 。

将两个离散序列 u_i, v_i 进行相关,可用式(2)表示:

$$C_k = \sum_{i=0}^{L-1} u_i v_{i+k}, k \in [0, L] \quad (2)$$

产生互补相关序列的规则为:先确定两个序列的第一位,然后按照式(3)逐次递推:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} AOB \\ AOB \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \bar{B} 是 B 的补码, O 没有实际意义,只为增强可读性,继续递推,可以得到:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} AOB \\ AOB \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} AOB & O & (AOB) \\ (AOB) & O & (AOB) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(5)给出一个例子:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

按上述方法用 MATLAB 仿真产生 128 bit 格雷序列对,如图 1 所示。

将得到的互补序列对 A, B 分别进行自相关,得到图 2。

由图 2 可得,格雷互补序列对各自的自相关函数均存在大量旁瓣,但将两组自相关结果相加后,峰值变为原来的两倍,而所有旁瓣都被完全补偿消失。

3 格雷码在分布式温度传感系统中的应用

当光脉冲信号在光纤中传输时,会发生弹性和非弹性碰撞。弹性碰撞只改变光子的运动方向,并不改变激发光子的波长;发生非弹性碰撞时,光子与分子之间的相互作用存在能量交换,传输新的频域分量,称为斯托克斯(Stokes)光和反斯托克斯光。其中,斯托克斯光与温度无

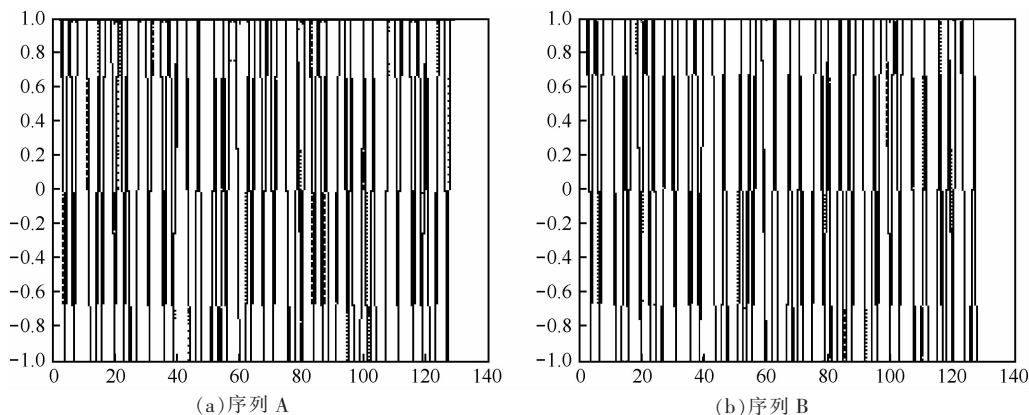


图 1 128 bit 格雷互补序列 A 和 B

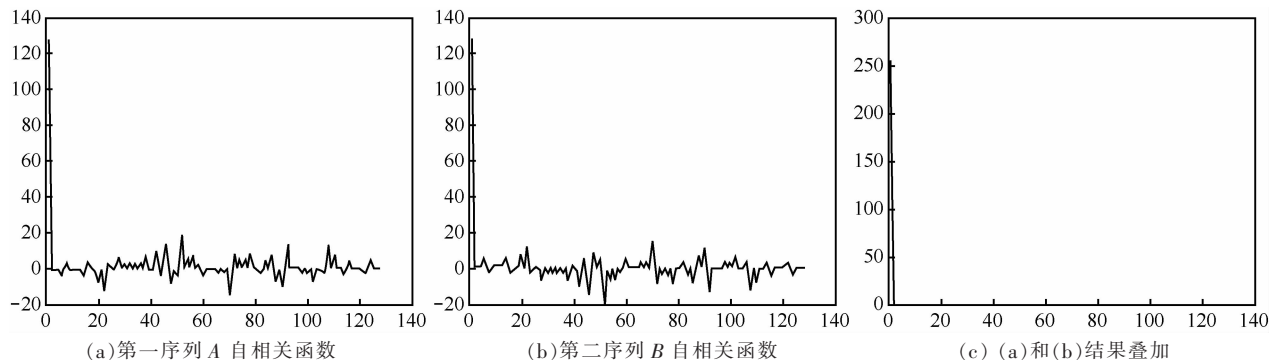


图 2 对 A 和 B 分别进行自相关



关,而反斯托克斯光的强度则随温度变化。二者光强的比值为:

$$R(T) = \frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{v_{as}}{v_s} \right)^4 e^{\frac{-hv_0}{KT}} \quad (6)$$

其中, I_{as} 为反斯托克斯光强, I_s 是斯托克斯光强, 其强度与待测温度无关, 可以作为参考通道; h 是普朗克常量, K 是波尔兹曼常数, v_{as} 、 v_s 和 v_0 分别是反斯托克斯光频、斯托克斯光频和瑞利后向散射光频, T 是当前的待测温度, 通过测量不同空间位置的单点温度, 实现基于拉曼散射的分布式测量。因此测量温度的分布问题便分解为测量 I_{as} 和 I_s 的 OTDR 曲线问题。下面分析通过格雷编码方法求解 OTDR 曲线的原理。

根据式(1)可设计如图3所示的系统。

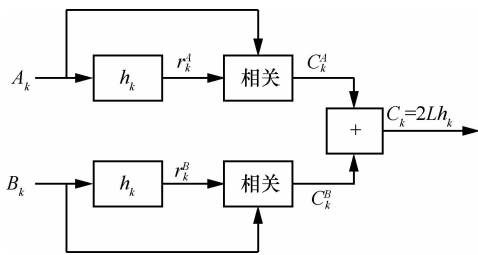


图3 用互补序列得到系统脉冲响应的过程

为了得到系统脉冲响应, 让探针互补序列 A_k 和 B_k 先通过系统, 得到一个输出, 如下:

$$r_k^A = A_k \oplus h_k \quad (7)$$

$$r_k^B = B_k \oplus h_k \quad (8)$$

让它们与各自的原码进行关联, 得到以下结果:

$$C_k^A = A_k \oplus r_k^A \quad (9)$$

$$C_k^B = B_k \oplus r_k^B \quad (10)$$

最后将式(9)和式(10)的两个结果相加, 得到:

$$C_k = C_k^A + C_k^B = 2Lh_k \quad (11)$$

可见, 输出脉冲的大小是单个脉冲输出大小的 $2L$ 倍。

由于光脉冲功率不可能为负数, 因此为了得到双极性的格雷互补序列, 可以采用偏置的方法, 具体步骤如下: 有双极性序列 A_k 和 B_k , 分别看作由两个值 $\pm A_0$ 和 $\pm B_0$ 组成, 可得到单极性序列为:

$$a_k = A_k + A_0 = \begin{cases} 0, & A_k = -A_0 \\ 2A_0, & A_k = A_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$b_k = B_k + B_0 = \begin{cases} 0, & B_k = -B_0 \\ 2B_0, & B_k = B_0 \end{cases} \quad (13)$$

其二进制反码为:

$$\bar{a}_k = A_0 - A_k = \begin{cases} 2A_0, & A_k = -A_0 \\ 0, & A_k = A_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\bar{b}_k = B_0 - B_k = \begin{cases} 2B_0, & B_k = -B_0 \\ 0, & B_k = B_0 \end{cases} \quad (15)$$

于是, 双极性码可以用单极性码表示为:

$$2A_k = a_k - \bar{a}_k \quad (16)$$

$$2B_k = b_k - \bar{b}_k \quad (17)$$

使用基于单极性码 OTDR 的方法为: 首先输入 4 组探针序列 a_k 、 b_k 、 \bar{a}_k 、 \bar{b}_k , 如图4所示。

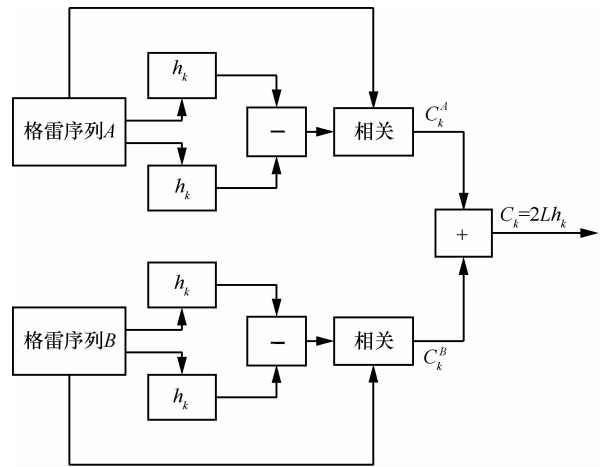


图4 使用单极性码得到脉冲响应的方法

将 a_k 、 \bar{a}_k 信号的响应相减, 得到的结果与原始的双极性码进行相关, 如式(18)所示:

$$C_k^A = [h_k \oplus a_k - h_k \oplus \bar{a}_k] \oplus A_k \quad (18)$$

相似地, 可得到 B 码:

$$C_k^B = [h_k \oplus b_k - h_k \oplus \bar{b}_k] \oplus B_k \quad (19)$$

将这两个相关后的信号相加, 可以得到:

$$C_k = C_k^A + C_k^B = 4LA_0h_k \quad (20)$$

需要通过信号平均的方法进一步提高信噪比; 在以上过程中, 由于加减和相关都是线性的, 所以可以在相关之前或者之后进行平均。最好的办法是在相关之前进行平均, 这样整个过程只进行了两次相关(相关过程比平均过程耗时多很多, 所以相关过程越少越好)。

4 信噪比较

格雷互补序列中的每一个码元都相当于一个独立的脉冲, 整个格雷码的总响应等效于所有单脉冲各自响应的

混乱叠加。使用自相关求和的作用是:按照规律还原对齐这些混乱叠加的信号,等效于对单脉冲响应曲线进行了 L 次平均,并且峰值增大为 L 倍,使得信号增强而噪声在叠加中被平均。显然,上述操作并未影响原本的空间分辨率。

使用格雷互补相关编码的 OTDR 需要的时间为使用单脉冲的 $4/L$,即可得到和单脉冲情况相同的信噪比。换句话说,在相同时间内,使用格雷互补码的 OTDR 比使用单脉冲的 OTDR 多平均 $L/4$ 次,噪声幅度增强 $\sqrt{L}/2$ 倍,而信号幅度增强了 $L/4$ 倍,这样使用格雷互补码的 OTDR 的信噪比提高为 $(L/4)/(\sqrt{L}/2)=\sqrt{L}/2$ 。

5 仿真实验

首先,来自同一根光纤的回波脉冲响应函数 $h_f(t)$ 如式(21)所示:

$$h_f(t)=0.5\alpha vSP \exp(-\alpha vt) \quad (21)$$

其中, f 表示光纤, α 为光纤衰减系数; v 为光脉冲群

速度; S 为背景俘获系数; P 为入射光功率。

为了对比格雷编码与传统单脉冲方案的性能,假设测试长度为 5 km,格雷互补码的长度为 16,累加平均的次数为 10,在 100 m 处有 2 °C 的温度突变,结果如图 5 所示。采用传统的单脉冲方案,温度变化被淹没在噪声中,而采用格雷编码则清晰可辨。

按基于单极性码的 OTDR 进行仿真,仿真结果如图 6 所示,仿真结果叠加如图 7 所示。

最终得到的脉冲响应如图 8(a)所示。

与图 8(b)比较可见,本来淹没在噪声中的故障点凸显出来,噪声得到了抑制,信噪比得到了提高。

6 结束语

本文通过对格雷互补相关序列的原理进行分析以及仿真实验,验证了该序列可以替代传统分布式温度传感系统中的单脉冲,并能够在不影响空间分辨率的前提下将信

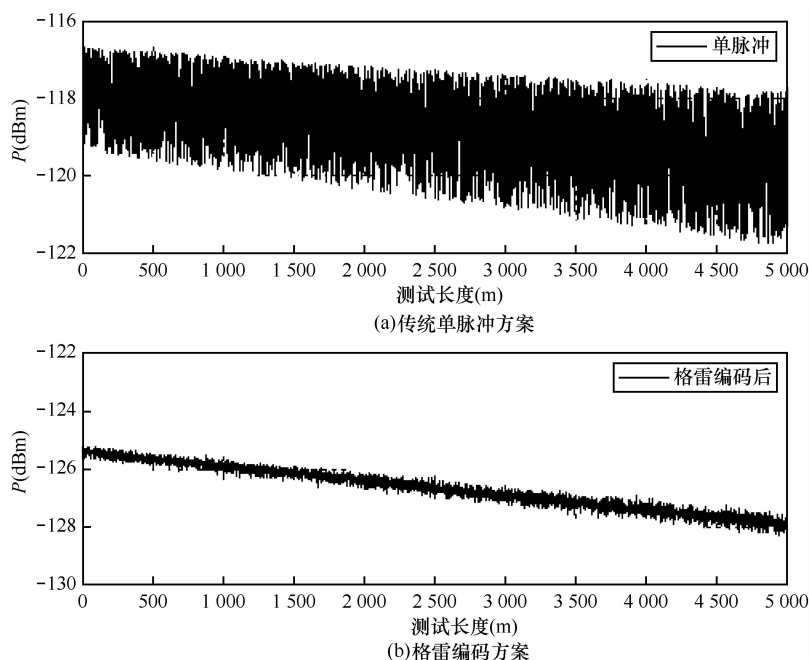


图 5 脉冲响应曲线

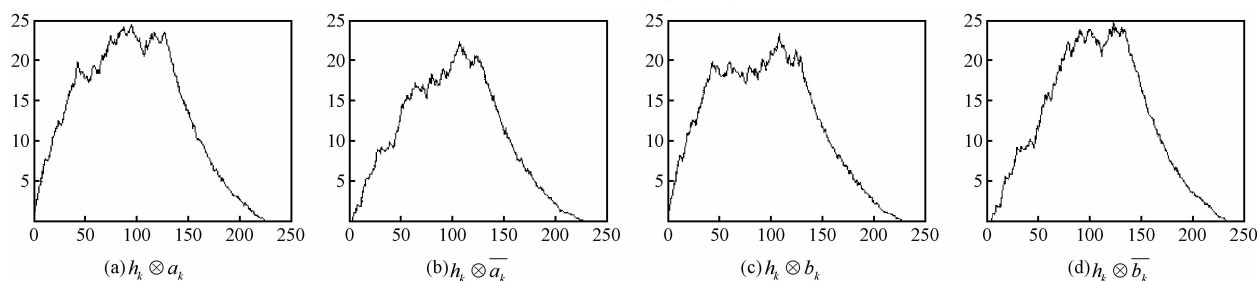


图 6 单极性码的 OTDR 仿真结果

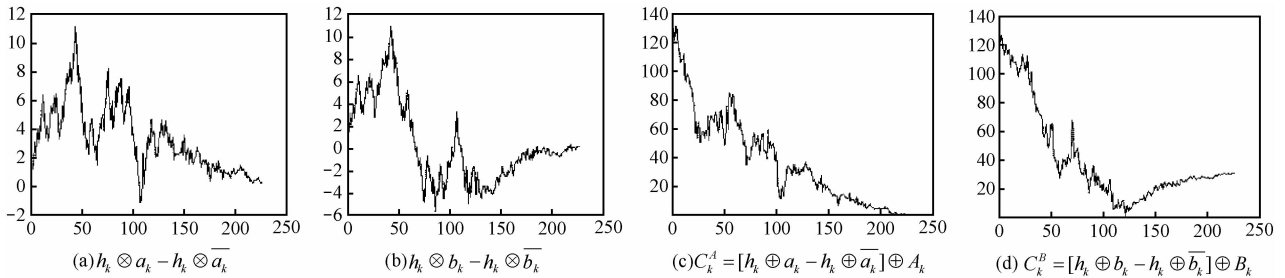


图7 仿真结果叠加

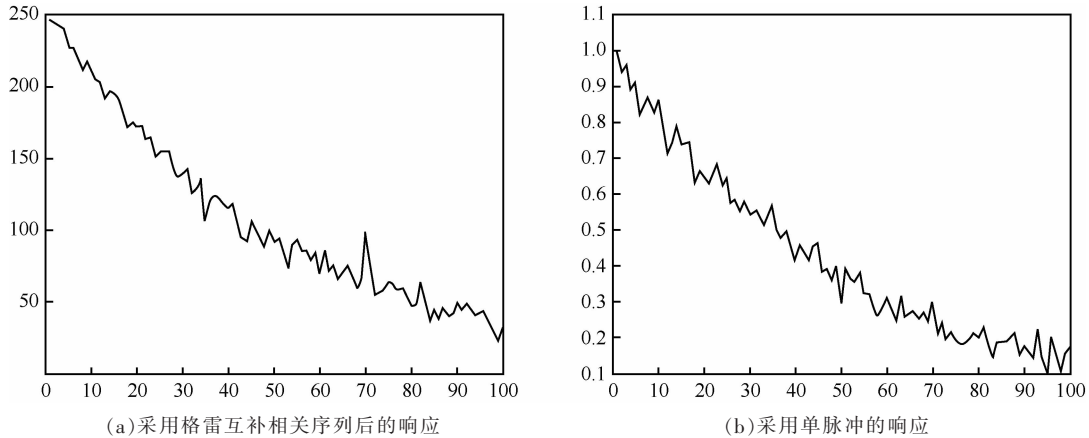


图8 最终得到的脉冲响应对比

噪比提高 $\sqrt{L}/2$ 。该方法最大的优点在于不需要复杂的信号处理电路及脉冲功率较高的LD光源系统,即可快速地测量温度分布,具有广泛的应用前景。采用脉冲编码方法在实现上需要解决的主要问题是対大功率激光器进行连续脉冲调制时带来的调制线性度和热不稳定。

参考文献

- 1 Zou L, Bao X, Wan Y, *et al.* Coherent probe-pump-based Brillouin sensor for centimeter-crack detection. *Optics Letters*

30, 2005, 30(4):370~372

- 2 Personick S D. Photon probe, an optical fiber time domain reflectometer. *Bell System Technical Journal*, 1977 (56): 355~366
- 3 Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 15(7)
- 4 Nazarathy M, Newton S A, Giffard R P, *et al.* Real-time long-range complementary correlation optical time domain reflectometer. *Journal of Lightwave Technology*, 1989(LT-7):24~38

(收稿日期:2013-01-10)

(上接第99页)

- 8 Lee J M, Wang H N, Seo W H, *et al.* QoS-guaranteed transmission mode selection for efficient resource utilization in multi-hop cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(10): 3697~3701
- 9 Nadarajah S, Kotz S. On the product and ratio of gamma and weibull random variables. *Econometric Theory*, 2006, 22(2): 338~344
- 10 Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series, and products. San Diego: Academic Press, 2007
- 11 Zheng L Z, Tse D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(5): 1073~1096
- 12 Krantz S G. A handbook of real variables with applications to differential equations and Fourier analysis. Boston: Birkhauser Inc, 2003

[作者简介]

闫盛楠,女,博士,燕山大学讲师,主要研究方向为认知无线电、协作通信技术。

孙洁娣,女,博士,燕山大学副教授,主要研究方向为通信信号处理。

(收稿日期:2012-11-20)