

APD 检测 Golay 编码 BOTDR 系统的建模分析与优化设计

李永倩, 王文平, 李晓娟, 范寒柏

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 针对传统单脉冲布里渊光时域反射系统信号微弱、性能提升受限的问题, 提出了一种雪崩光电二极管(APD)检测器本地外差检测的格雷(Golay)编码布里渊光时域反射系统。分析了 Golay 码应用于该系统的编解码原理及系统外差检测原理, 讨论了光纤受激布里渊散射阈值对编码系统平均入纤功率的限制, 推导了系统信噪比的数学表达式, 研究系统信噪比与 APD 倍增因子、编码长度的关系, 分别得到了 APD 最佳倍增因子和系统最佳编码长度的表达式。MATLAB 仿真结果表明, 选用带宽为 500 MHz 的 APD 光电检测器和峰值功率 50 mW、脉冲宽度 100 ns 的入纤脉冲时, 系统 APD 倍增因子和编码长度均存在最佳值, 系统最佳编码长度的确定不仅依赖于系统的散粒噪声和热噪声功率, 还由光纤受激布里渊散射阈值共同决定。经优化计算得, 该系统的 APD 最佳倍增因子为 5, 最佳编码长度为 128 位时, 在 25 km 光纤末端的系统信噪比比传统单脉冲系统提高了 26.42 dB, 温度和应变分辨率分别达到了 1.60 °C 和 35.48。

关键词: 布里渊散射; 外差检测; Golay 编码; APD 最佳倍增因子; 最佳编码长度

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1122002

Modeling analysis and optimization design of a Golay coding Brillouin Optical Time Domain Reflectometer system with APD detector

Li Yongqian, Wang Wenping, Li Xiaojuan, Fan Hanbai

(Department of Electronic and Communication Engineering,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Considering that for traditional single-pulse Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) system, Brillouin signal is weak and the performance improvement is limited, a Golay pulse coding BOTDR system with Avalanche Photo Diode (APD) detector and local-heterodyne detection was proposed. The coding and decoding principle of Golay code in applying to the system and the principle of local-heterodyne detection were analyzed. The restriction of Stimulated Brillouin Scattering threshold in optical fiber on the coding length of the system was discussed. The mathematical expression of signal-to-noise ratio was deduced and the relationship of signal-to-noise ratio with APD multiplication factor and coding length was studied. The expressions of the optimal multiplication factor of APD and the optimal coding length were obtained, respectively. The MATLAB simulation results show that the optimal

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377088); 河北省自然科学基金(F2014502098, F2015502059); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS77)

作者简介: 李永倩(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光通信与光传感方面的研究。Email: liyq@ncepu.edu.cn

value of APD multiplication factor and the optimum coding length exist for this specific system with a bandwidth of the APD detector of 500 MHz, and the peak power and pulse width of 50 mW and 100 ns. The determination of optimum coding length of the system depends on not only the shot noise and thermal noise power, but also the Stimulated Brillouin Scattering threshold of optical fiber. With the APD optimal multiplication factor of 5 and the optimal coding length of 128 bits, the signal-to-noise ratio at the end of 25 km ending fiber increased by 26.42 dB compared to that of traditional single-pulse system, and temperature and strain resolution of 1.60 °C and 35.48 are achieved, respectively.

Key words: Brillouin scattering; heterodyne detection; Golay code; optimal multiplication factor of APD; optimal coding length

0 引言

基于自发布里渊散射的光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)凭借其单端测量、可监测断点、装置简单、实际工程应用方便等优点,可实现温度和应变的同时测量,因而受到广泛的关注^[1-3]。但传统单脉冲系统中自发散射信号十分微弱,检测难度大,性能提升有限,为了提高系统传感性能,通常采用增加探测光脉冲宽度或者对信号进行叠加平均的方法。但是增加探测光脉冲的宽度将会降低系统的空间分辨率,增加叠加平均次数则会延长信号测量的时间。使用适当的编码脉冲作为探测信号能在保证空间分辨率的同时提高入射信号的功率,因此脉冲编码技术受到广大学者的关注和研究^[4-6]。

2011年,梁浩等人在 BOTDR 系统中使用峰值功率为 0.4 mW 的哈达玛序列探测脉冲光,在光纤长度为 31 km 时得到了 50 m 的空间分辨率,该系统的最大动态范围可达 53.5 km^[7],同年针对 Golay 码解码失真的问题,提出了基于二次采样的互相关解码方法,使用 512 位的 Golay 编码在 20 km 光纤末端获得 2 m 的空间分辨率^[8]。2014 年,郝蕴琦等人将 simplex 脉冲编码及数字相干检测技术运用到 BOTDR 系统中,使用 31 位的 simplex 编码后信噪比增强了 3.5 dB,在 4 m 空间分辨率下频率波动误差为 14.01 MHz,小于传统单脉冲叠加平均 310 次的情况^[9]。同年,熊玉华等人将 Golay 编码用于直接检测的传统 BOTDR 系统中,分析了系统的信噪比和编码增益,提出了系统存在最佳码长的观点^[10]。尽管上述学者对采用不同编码技术的 BOTDR 系统和传统单脉冲系统做了对比,验证了脉冲编码技术能

有效提升系统性能,但没有考虑光纤受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)阈值对系统编码长度的限制问题,没有从理论上具体分析外差检测脉冲编码 BOTDR 中的编解码过程,也没有建立起系统信噪比、温度和应变分辨率与各影响因素之间的数学模型。

文中针对传统单脉冲 BOTDR 系统信号微弱、性能提升受限的问题,提出了一种雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)检测器本地外差检测的 Golay 编码 BOTDR 系统,分析了 Golay 互补序列编解码原理及系统外差检测原理,讨论了光纤 SBS 阈值对系统编码长度的限制问题,推导了系统信噪比的数学表达式,研究了信噪比与 APD 倍增因子、编码长度的关系,分别得到了 APD 最佳倍增因子与系统最佳编码长度的表达式。

1 编码 BOTDR 系统理论分析

1.1 APD 输出信号

设 Golay 互补序列 $U=(u_0, u_1, \dots, u_{L-1})$, $W=(w_0, w_1, \dots, w_{L-1})$ 。由于 Golay 码为双极性码,而传感光纤只能传输单极性的脉冲信号,因此需要将 U 、 W 按照一定的偏置规律分解成单极性码 U_1 、 U_2 和 W_1 、 W_2 ,取偏置常数为 1/2,则:

$$\begin{cases} U_1=1/2(U+|U|) \\ U_2=1/2(|U|-U) \end{cases}, \begin{cases} W_1=1/2(W+|W|) \\ W_2=1/2(|W|-W) \end{cases} \quad (1)$$

假设 $U_1=(u_0^1, u_1^1, \dots, u_{L-1}^1)$, $U_2=(u_0^2, u_1^2, \dots, u_{L-1}^2)$,同理, $W_1=(w_0^1, w_1^1, \dots, w_{L-1}^1)$, $W_2=(w_0^2, w_1^2, \dots, w_{L-1}^2)$ 。则由公式(1)可知:

$$U=U_1-U_2, W=W_1-W_2 \quad (2)$$

由码型发生器(Code Generator, CG)产生一定

长度的 Golay 码驱动电光调制器 (Electro-Optic Modulator, EOM)产生公式(1)的四组光脉冲信号入射进光纤, 每一个编码脉冲在光纤中都会发生背向布里渊散射, 散射信号与激光器发出的本地参考光在光电检测器中进行外差检测。则 BOTDR 系统第一组编码 U_1 在 t 时刻的光场总和为:

$$E_{U_1}(t) = \left\{ \begin{aligned} &E_L \cos(\omega_0 t + \varphi_L) + \sum_{n=1}^{L-1} u_n E_{BS} \cos[(\omega_0 - \omega_{BS})(t - nT_b) + \varphi_{BS}] \\ &+ \sum_{n=1}^{L-1} u_n E_{BAS} \cos[(\omega_0 + \omega_{BAS})(t - nT_b) + \varphi_{BAS}] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: E_L 、 ω_0 和 φ_L 分别表示本振光幅值、频率和相位; E_{BS} 、 ω_{BS} 和 φ_{BS} 分别表示布里渊斯托克斯 (Stokes) 光的幅值、布里渊频移角频率和相位; E_{BAS} 、 ω_{BAS} 和 φ_{BAS} 分别表示反斯托克斯 (Anti-Stokes) 光的幅值、布里渊频移角频率和相位; T_b 是编码脉冲一个比特位占用的时间。

接收端 APD 光电检测器对本振光、Stokes 光和 Anti-Stokes 光进行本地外差检测, 输出光电流可以表示为:

$$i(t)_{u_1} = RME_{U_1}^2(t) = i_L(t) + i_{BS}(t) + i_{BAS}(t) + i_{LBS}(t) + i_{LBAS}(t) + i_{BSBAS}(t) \quad (4)$$

式中: R 为 APD 光电检测器的响应度; M 为 APD 的倍增因子; $i_L(t)$ 、 $i_{BS}(t)$ 和 $i_{BAS}(t)$ 分别为本振光、Stokes 光和 Anti-Stokes 光电流; $i_{LBS}(t)$ 、 $i_{LBAS}(t)$ 和 $i_{BSBAS}(t)$ 分别为二者的交叉电流项。由于 APD 检测器具有带通滤波特性, 滤除外差信号中的直流项、和频项及倍频项后, 输出光电流信号为:

$$i(t)_{u_1} = \sum_{n=1}^{L-1} 2u_n E_{BS} \cos[(\omega_{BS}(t - nT_b) + \varphi_n)] \quad (5)$$

式中: φ_n 为 U_1 编码第 n 位编码脉冲产生的布里渊散射相位差。

当 U_2 编码的光脉冲耦合进入传感光纤时, 分析过程与以上方法类似, APD 输出信号电流为:

$$i(t)_{u_2} = \sum_{n=0}^{L-1} 2u_n E_{BS} \cos[(\omega_{BS}(t - nT_b) + \varphi_n)] \quad (6)$$

因此, 有

$$i(t)_u = i(t)_{u_1} - i(t)_{u_2} = \sum_{n=1}^{L-1} 2u_n E_{BS} \cos[(\omega_{BS}(t - nT_b) + \varphi_n)] - \sum_{n=0}^{L-1} u_n S(t - nT_b) \quad (7)$$

其中, $S(t - nT_b) = 2RME_L E_{BS} \cos[(\omega_{BS}(t - nT_b) + \varphi_n)]$ 。

解码时, 双极性格雷互补序列 U 为:

$$U(t) = \sum_{m=0}^{L-1} u_m X_{T_c}(t - mT_b) \quad (8)$$

其中

$$X_{T_c}(t - mT_b) = \begin{cases} 1 & mT_b < t < mT_b + T_c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_c 为传感脉冲宽度。

则 U 解码后的输出信号为:

$$D_U(t) = i(t)_u * U(t) = \sum_{n=1}^{L-1} u_n S(t - nT_b) * \sum_{m=0}^{L-1} u_m X_{T_c}(t - mT_b) = \sum_{m=1}^{L-1} u_m \sum_{j=0}^{L-1-j} u_m u_{m+j} S(t + jT_b) + \sum_{j=-L+1}^{-1} \sum_{m=0}^{L-1+j} u_{m-j} u_m S(t + jT_b) \quad (10)$$

双极性码 W 编解码的过程与 U 类似, 则 W 最终解码后的输出信号为:

$$D_W(t) = i(t)_w * W(t) = \sum_{m=0}^{L-1} w_m w_m S(t) + \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1-j} w_m w_{m+j} S(t + jT_b) + \sum_{j=-L+1}^{-1} \sum_{m=0}^{L-1+j} w_{m-j} w_m S(t + jT_b) \quad (11)$$

则

$$D_U(t) + D_W(t) = \sum_{m=0}^{L-1} (u_m u_m + w_m w_m) * S(t) + \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1-j} (u_m u_{m+j} + w_m w_{m+j}) S(t + jT_b) + \sum_{j=-L+1}^{-1} \sum_{m=0}^{L-1+j} (u_{m-j} u_m + w_{m-j} w_m) S(t + jT_b) \quad (12)$$

由 Golay 码的频域特性

$$\sum_{m=0}^{L-1+j} (u_m u_{m+j} + w_m w_{m+j}) = 0, \quad \sum_{m=0}^{L-1+j} (u_{m-j} u_m + w_{m-j} w_m) = 0 \quad (13)$$

可得:

$$D_U(t) + D_W(t) = \sum_{m=0}^{L-1} (u_m u_m + w_m w_m) S(t) = 2LS(t) = 4LRME_L E_{BS} \cos[\omega_{BS}(t) + \varphi_n] \quad (14)$$

则 APD 输出的光电流均方值为:

$$\langle i^2(t) \rangle_c = \langle 16R^2 L^2 M^2 [\sqrt{P_{BS}(t) P_L(t)} \cos(\omega_{BS} t + \varphi_n(t))]^2 \rangle = 8R^2 L^2 M^2 P_{BS} P_L \quad (15)$$

1.2 APD 输出噪声

BOTDR 系统外差检测中的噪声主要包括外界输入 APD 的噪声、APD 本身产生的散粒噪声、热噪声和由自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制 (Cross-phase Modulation, XPM)、四波混频(Four Wave Mixing, FWM)产生的非线性效应噪声。其中传感脉冲宽度内的功率梯度决定了 SPM 和 XPM, 若实际传感系统中选用性能良好的 EOM, 即边沿上升时间远小于传感脉冲宽度时, 可获得较理想的矩形脉冲, 从而可以抑制 SPM 和 XPM; 同时 SPM 和 XPM 决定了 FWM 产生时相互作用的光波是否满足相位匹配条件, 当 SPM 和 XPM 被抑制时, FWM 也可忽略不计^[1]。也就是说, 当码型发生器驱动上述性能良好的 EOM 时, 产生的由 Golay 码编码的光脉冲信号为边沿陡峭、峰值平坦的矩形脉冲, 则上述非线性效应噪声可忽略不计。外界输入的噪声通常比较小, APD 本身产生的散粒噪声和热噪声是影响接收机灵敏度的主要噪声源。因此在考虑系统噪声时, 只考虑散粒噪声和热噪声两种, 并且假设都为高斯噪声。

将散粒噪声和热噪声等效为与信号并联的电流噪声, 则 APD 输出噪声电流方差为:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = qRM^2 F(P_L + 2P_{BS})B + (4kT/R_L)B \quad (16)$$

式中: σ_s^2 和 σ_T^2 分别为传统单脉冲系统的散粒噪声和热噪声电流方差; q 为电荷电量; $F=M^x$ 为超量噪声因子; x 为超量噪声指数; P_L 为本振光功率; $P_{BS}(z) = P_0 S \alpha_B \nu(Tc/2) \exp(-2\alpha z)$ 为布里渊散射信号功率; B 为检测器带宽; k 为波尔兹曼常数; T 为材料的热力学温度; R_L 为负载阻抗。由于 $P_L \gg P_{BS}$, 实际应用时可忽略 P_{BS} 对噪声的影响。

当经过 U_1 、 U_2 编码的光信号耦合进入传感光纤时, 系统噪声电流方差分别为:

$$\sigma_{u_1}^2 = qRM^2 F \sum_{n=0}^{L-1} u_n^2 P_L B + (4kT/R_L)B \quad (17)$$

$$\sigma_{u_2}^2 = qRM^2 F \sum_{n=0}^{L-1} u_n^2 P_L B + (4kT/R_L)B \quad (18)$$

则

$$\sigma_U^2 = \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{u_2}^2 = qRM^2 F \sum_{n=0}^{L-1} (u_n^1 + u_n^2) P_L B + (8kT/R_L)B = qRLM^2 FP_L B + (8kT/R_L)B \quad (19)$$

解码后的输出噪声电流信号为:

$$\sigma_{DU}^2 = \sum_{m=0}^{L-1} u_m qRLM^2 FP_L B + \sum_{m=0}^{L-1} u_m (8kT/R_L)B = qRL^2 M^2 FP_L B + (8kT/R_L)B \quad (20)$$

同理, W_1 、 W_2 编解码的分析过程与上述过程类似, 故:

$$\sigma_{Dw}^2 = qRL^2 M^2 FP_L B + (8kT/R_L)B \quad (21)$$

则最终系统噪声电流方差为:

$$\sigma_D^2 = \sigma_{DU}^2 + \sigma_{Dw}^2 = 2qRL^2 M^2 FP_L B + (16kT/R_L)B \quad (22)$$

1.3 APD 最佳倍增因子和系统最佳编码长度

传统单脉冲和 Golay 编码 BOTDR 系统信噪比 SNR 和 SNR_c 分别表示为:

$$SNR = \frac{i^2(t)}{\sigma_D^2} = \frac{2R^2 M^2 P_{BS} P_L}{qRM^{2+x} P_L B + (4kT/R_L)B} \quad (23)$$

$$SNR_c = \frac{i_c^2(t)}{\sigma_D^2} = \frac{8R^2 L^2 M^2 P_{BS} P_L}{2qRL^2 M^{2+x} P_L B + (16kT/R_L)B} \quad (24)$$

式中: $i^2(t)$ 和 $i_c^2(t)$ 分别为传统单脉冲和编码系统 APD 输出信号光电流均方值; σ^2 和 σ_D^2 分别为相应系统噪声功率。

将公式(24)对 M 求导, 并令 $SNR'_c = 0$, 可得该系统 APD 最佳倍增因子的表达式为:

$$M_{opt} = \left(\frac{16kT}{xqRLR_L R_L} \right)^{\frac{1}{2+x}} \quad (25)$$

由公式(23)和(24)可得系统编码增益为:

$$\text{Gain} = \frac{SNR_c}{SNR} = \frac{\frac{8R^2 L^2 M^2 P_{BS} P_L}{2qRL^2 M^{2+x} P_L B + (16kT/R_L)B}}{\frac{2R^2 M^2 P_{BS} P_L}{qRM^{2+x} P_L B + (4kT/R_L)B}} = \frac{8R^2 M^2 P_{BS} P_L / 2R^2 M^2 P_{BS} P_L}{2\sigma_s^2 + 4\sigma_T^2/L} \cdot \frac{2(\sigma_s^2 + \sigma_T^2)}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \frac{2(\sigma_s^2 + \sigma_T^2)}{\sigma_s^2 + 2\sigma_T^2/L} \quad (26)$$

对比公式(16)和(22)可知, 当 APD 倍增因子不变时, 系统散粒噪声功率成分随编码长度的平方线性增长, 热噪声功率成分与编码长度成正比, 也就是说, 随着编码长度的增加散粒噪声功率的增长速度将远远超过热噪声功率, 此时系统编码增益将保持恒

定值,因此系统存在一个最佳的编码长度。由公式(26)可知,当散粒噪声功率远超过热噪声功率时,热噪声可以忽略不计,系统可获得的最大编码增益为:

$$\text{Gain}_{\max} = \frac{2(\sigma_s^2 + \sigma_T^2)}{\sigma_s^2} \quad (27)$$

此时,系统最佳码长的值取决于散粒噪声功率和热噪声功率的比值,当 $\sigma_s^2 \gg 2\sigma_T^2/L$, 即 $L \gg 2\sigma_T^2/\sigma_s^2$ 时,系统编码增益达到最大值。假设当散粒噪声功率为热噪声功率的 100 倍时,热噪声可忽略不计,则最佳编码长度的表达式可表示为:

$$L_{\text{opt}} = \frac{800kT}{qRM^{2+x} P_L R_L} \quad (28)$$

2 系统性能建模分析与计算

2.1 脉冲编码BOTDR 系统

基于 EOM 外调制和 APD 外差检测的 Golay 编码 BOTDR 传感系统如图 1 所示,系统采用单频窄线宽 DFB 激光器,光源发出的连续光经耦合器 1 输

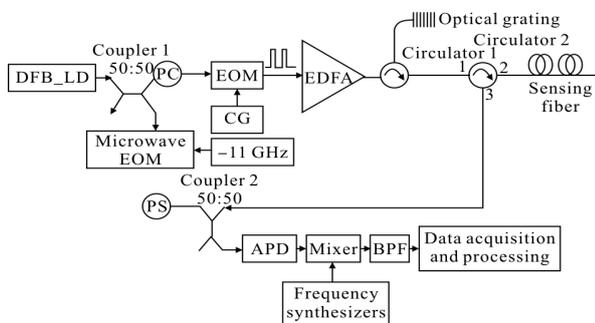


图 1 基于 EOM 外调制和 APD 外差检测的 Golay 编码 BOTDR 传感系统

Fig.1 Golay pulse coding BOTDR sensing system based on EOM external modulation and APD local-heterodyne detection

出分为两路光,其中一路光由微波电光调制器(Microwave EOM)调制产生本地移频参考光,通过调整微波频率使其与布里渊散射光的差频处在 APD 带宽范围内;另一路光经偏振控制器(Polarization Controller, PC)后进入 EOM,由 CG 产生所需长度的 Golay 码驱动 EOM 产生相应的光脉冲信号,经 EDFA 放大后由光纤光栅 1 滤除放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission,

ASE)噪声进入传感光纤,散射信号经环行器 2 和耦合器 2 在 APD 中与本地移频参考光进行外差检测。APD 输出只包含布里渊频移信号与约 11 GHz 微波信号的差频信号,其他分量均被滤除。用数据采集及处理模块对信号进行分析处理,通过分析电信号频谱得到布里渊散射信号的频移和强度。

2.2 SBS 阈值

为了提高系统性能和实现高精度高空间分辨率传感,通常希望在不发生 SBS 的前提下尽可能大地注入入纤光功率。传统单脉冲 BOTDR 系统的探测脉冲一般采用窄脉冲,峰值功率受限,可以不考虑 SBS 效应问题。但使用 Golay 编码的 BOTDR 系统平均入纤功率得到大幅度提高,当其平均入纤功率达到 SBS 阈值时,背向散射光功率急剧增加,前向传输光出现饱和,从而发生 SBS 效应,系统性能恶化甚至无法工作,所以必须考虑 SBS 阈值对入纤功率的限制。使用传统窄谱 DFB 激光器时光纤的 SBS 阈值计算模型为^[12]:

$$P_{cr} \approx \frac{21A_{\text{eff}}}{\chi_{\text{SBS}} g_B L_{\text{eff}}} \quad (29)$$

式中: A_{eff} 为光纤有效纤芯面积; χ_{SBS} 为偏振因子; g_B 为布里渊增益; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L_e)]/\alpha$ 为光纤的有效作用长度; α 为光纤衰减系数; L_e 是传感光纤长度。当传感光纤长度 $L_e = 25$ km 时,由上式可得 SBS 阈值 $P_{cr} \approx 2.12$ mW。

Golay 编码系统的平均入纤功率:

$$\bar{P} = \frac{P_0 T_c n}{LT_c + 2L_e/v_e} \quad (30)$$

式中: P_0 为入射脉冲的峰值功率; T_c 为传感脉冲的宽度; n 为 Golay 码序列中脉冲的个数; L 为编码长度; v_e 表示光纤中的声速。假设 Golay 互补序列中‘1’和‘-1’的个数相同,则式中 $n=L/2$ 。取脉冲峰值功率为 $P_0 = 50$ mW,入纤探测光脉冲宽度为 $T_c = 100$ ns,若使系统可正常工作,需令 $\bar{P} \leq P_{cr}$,可得 $L \leq 229$,即系统可允许的最大编码长度 $L_{\max} = 128$ 位。

3 系统性能仿真

为了计算系统信噪比,假设传感光纤长度为 25 km,APD 光电检测器带宽为 500 MHz,入纤脉冲峰值功率为 50 mW,探测光脉冲宽度为 100 ns,并

且控制本地移频参考光功率,避免 APD 达到饱和状态,其余参数如表 1 所示。文中采用叠加平均的方法来减小散粒噪声和热噪声对系统信噪比的影响,选取叠加平均次数 2^{15} ,可提高信噪比 45.15 dB。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value
q/C	1.6022×10^{-19}	x	0.5	S	1.8×10^{-3}
α_0/m	1.1550×10^{-6}	R_i/Ω	50	$c/m \cdot s^{-1}$	3.0×10^8
$K/J \cdot K^{-1}$	1.38×10^{-23}	$R/A \cdot W^{-1}$	1	n	1.4652

3.1 APD 最佳倍增因子

编码长度分别为 8 位、16 位时,系统信噪比与 APD 倍增因子的关系如图 2 所示。由图可知,编码长度越长,系统可达到的最佳信噪比越大,然而当 APD 倍增因子增大到一定值时,两者趋于一致,此时系统编码长度增加也不会提高信噪比,这与传统结论相矛盾;当编码长度固定时,随着 APD 倍增因子的增大,系统信噪比呈现出先急速上升,到达最高点后又非常缓慢下降的趋势。这是因为当编码长度固定时随着倍增因子 M 值的增加,APD 输出信号光电流均方值 $i^2(t)$ 增大, σ_s^2 也随之增加,而 σ_r^2 不随 M 的增大而变化。对于 InGaAsAPD 光电探测器, x 一般取 0.5~0.7 之间,所以 σ_s^2 随 M 的增长率将高于 $i^2(t)$ 随 M 的增长率,从而该系统存在一个最佳的 APD 倍增因子使系统信噪比达到最佳值。

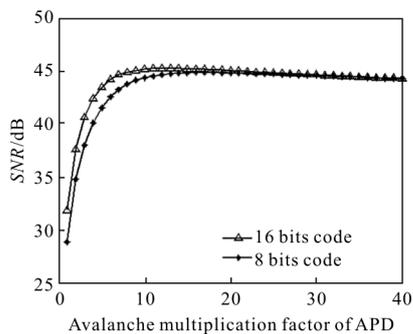


图 2 信噪比与 APD 倍增因子的关系

Fig.2 SNR versus multiplication factor of APD

由公式(25)可知,在保证系统本振光功率及其他参数不变时,APD 最佳倍增因子只与编码长度有关,两者的关系如图 3 所示。由图可见,随着编码长度的增加,APD 最佳倍增因子的值呈现出先

急速减小后缓慢下降的趋势。这是因为 APD 光电检测器的性能与入射光功率有关,由于其较大的内部增益,更适合用于小信号的检测。但当系统编码长度增加时,注入光电检测器的光功率增大,最佳倍增因子 M 的值将会减小,当 M 值减小到一定程度时,将会引起光电流的畸变,由上文分析可知,系统受 SBS 影响可允许的最大编码长度为 128 位,由图 3 小图可看出,当编码长度小于 128 位时,最佳倍增因子的值大于 5,此时可忽略光电流畸变带来的影响。

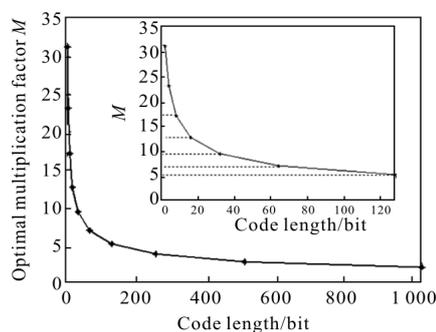


图 3 APD 最佳倍增因子与编码长度的关系

Fig.3 Optimal multiplication factor of APD versus code length

3.2 最佳编码长度

图 4 给出了 APD 倍增因子固定时,系统编码增益与编码长度的关系。由图可见,随着编码长度的增加,系统编码增益迅速提高,然后缓慢增加到最高值后保持一个常量,并且当编码长度固定时,随着 APD 倍增因子的增加,编码增益逐渐降低,这也进一步说明了系统存在最佳的 APD 倍增因子和编码长度。

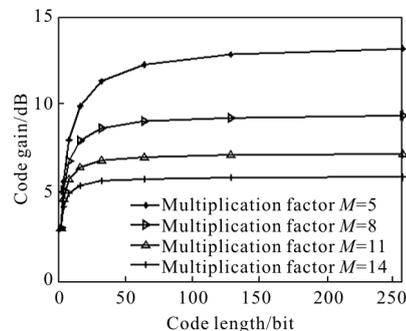


图 4 编码增益与编码长度的关系

Fig.4 Code gain versus code length

将公式(25)代入公式(24)可得,当 APD 倍增因子取最佳值时,系统信噪比随编码长度的改变的变

化情况如图 5 所示, 由图可知, 随着编码长度的增加, 系统信噪比与编码长度呈现出非线性增长的趋势, 并且增加的趋势逐渐变慢。对于文中提出的编码 BOTDR 系统, 由于 SBS 阈值限制的最大编码长度为 128 位, 所以最佳编码长度为 128 位, 此时对应的最佳 APD 倍增因子为 5, 在保持叠加平均次数不变时, 25 km 光纤末端系统信噪比达到 46.39 dB。

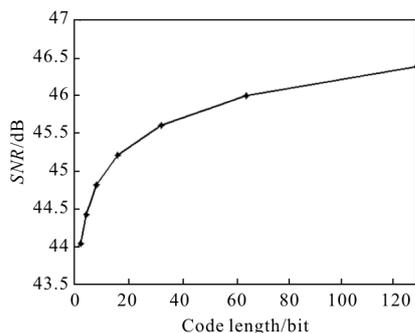
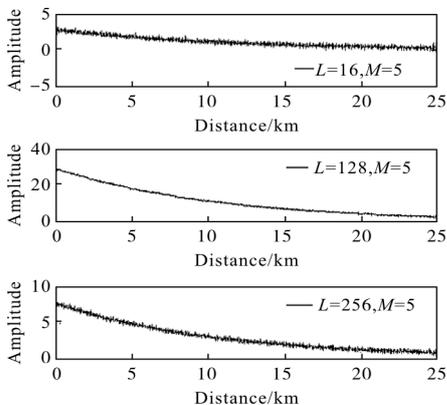


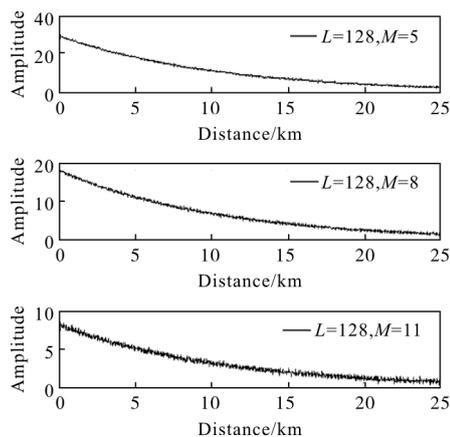
图 5 系统信噪比与编码长度的关系
Fig.5 SNR versus code length

3.3 仿真效果对比

图 6(a)、(b)给出了 Golay 编码 BOTDR 系统的时域输出信号对比。图 6(a)为 APD 倍增因子固定为 5 时, 改变编码长度得到的输出信号对比图。由图可以明显看出当编码长度为 128 位时, 系统输出信号幅值最大, 并且信噪比改善更明显。图 6(b)为编码长度 L 固定为 128 位时, 改变 APD 倍增因子得到的输出信号对比图。由图可见, 当 APD 倍增因子 M 为 5 时, 系统时域输出信号更强, 噪声干扰较少, M 值越大噪声越明显。这也验证了文中的结论。



(a) 改变编码长度
(a) Changing coding length



(b) 改变 APD 倍增因子
(b) Changing APD multiplication factor

图 6 编码 BOTDR 系统时域输出信号对比
Fig.6 Comparison of time domain output signal in coding BOTDR system

BOTDR 系统的温度分辨率 δT 和应变分辨率 $\delta \epsilon$ 可以分别表示为^[13]:

$$\delta T = \frac{\delta v_B}{C_{vT}} = \frac{\Delta v_B}{\sqrt{2} C_{vT} (SNR)^{1/4}} \quad (31)$$

$$\delta \epsilon = \frac{\delta v_B}{C_{v\epsilon}} = \frac{\Delta v_B}{\sqrt{2} C_{v\epsilon} (SNR)^{1/4}} \quad (32)$$

式中: Δv_B 为布里渊线宽; C_{vT} 、 $C_{v\epsilon}$ 分别为布里渊频移的温度和应变系数。对于普通单模光纤, $C_{vT} = 1.07 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, $C_{v\epsilon} = 0.048 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。由公式(31)和公式(32)可得, 当 APD 倍增因子为 5, 编码长度为 128 位时, 在 25 km 光纤末端温度和应变分辨率分别达到了 $1.60 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $35.48 \mu\epsilon$ 。

4 结论

针对传统单脉冲 BOTDR 系统信号微弱、性能提升受限的问题, 文中提出一种基于 EOM 外调制和 APD 光电检测器外差检测的 Golay 编码 BOTDR 系统, 分析了 Golay 码应用于 APD 外差检测编码系统的编解码原理及系统外差检测原理, 讨论了光纤 SBS 阈值对编码长度的限制问题, 推导了系统信噪比的数学表达式, 分别得到了 APD 最佳倍增因子和系统最佳编码长度的表达式。MATLAB 仿真结果表明, 系统最佳编码长度的确定, 不仅仅依赖于系统的散粒噪声和热噪声功率, 还由光纤 SBS 阈值共同决定。对于文中所提出的系统, APD 最佳倍增因子

为 5,最佳编码长度为 128 位,此时系统信噪比比传统单脉冲系统提高了 26.42 dB,温度和应变分辨率分别达到了 1.60 °C和 35.48 $\mu\epsilon$ 。文中的研究结果不仅对 Golay 编码外差检测 BOTDR 系统的建模分析和优化设计提供了理论依据和实验指导,而且对其他使用 Golay 编码的分布式传感系统具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] Kee H H, Lees G P, Newson T P. All fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(10): 695–697.
- [2] Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, et al. Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1205007. (in Chinese)
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1205007.
- [3] Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0106003. (in Chinese)
李永倩, 李晓娟, 安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0106003.
- [4] Muanenda Y, Taki M, Nannipieri T, et al. Advanced coding techniques for long-range Raman/BOTDA distributed strain and temperature measurements [J]. *J Lightwave Technol*, 2015, 30(21): 1–9.
- [5] Wan S P, Xiong Y H, He X D. The theoretical analysis and design of coding BOTDR system with APD detector [J]. *IEEE Sens J*, 2014, 14(8): 2626–2632.
- [6] Sun Q, Tu X B, Sun S L, et al. Long-range BOTDA sensor over 50 km distance employing pre-pumped Simplex coding [J]. *J Opt*, 2016, 18(5): 055501.
- [7] Liang Hao. Research of Brillouin distributed optical fiber sensor based on code pulses [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese)
梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [8] Liang Hao, Lu Yuangang, Li Cunlei, et al. Study on decoding method of correlation coded pulses based Brillouin optical time domain reflectometric system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1006002. (in Chinese)
梁浩, 路元刚, 李存磊, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1006002.
- [9] Hao Yunqi, Ye Qing, Pan Zhengqing, et al. Digital coherent detection research on Brillouin optical time domain reflectometry with simplex pulse codes [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(11): 1–4.
- [10] Wan Shengpeng, Xiong Yuhua, He Xingdao. The theoretical analysis and design of coding BOTDR system with APD detector [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2626–2632.
- [11] Lv Lidong, Song Yuejiang, Zhu Fan, et al. Performance limit of a multi-frequency probe based coherent optical time domain reflectometry caused by nonlinear effects [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(4): 040604.
- [12] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489–2494.
- [13] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Simultaneous distributed fiber temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 834–842.