采用 APD 检测的编码瑞利 BOTDA 系统性能

李永倩,杨润润,张立欣

(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘　要:瑞利布里渊光时域分析系统具有单光源、单端工作、非破坏的优点,为了解决系统信噪比与空间分辨率之间的矛盾,将编码技术应用到瑞利布里渊光时域分析系统中,可以在保持空间分辨率不变的前提下提高系统信噪比。提出了基于雪崩光电二极管检测和 Simplex 编码的瑞利布里渊光时域分析系统,系统中的随机散粒噪声功率和信号功率有关,而热噪声功率主要取决于雪崩光电二极管光电检测器的性能、与信号功率无关。由系统中与两种噪声相关的电流波动的方差和 Simplex 码的编解码规则可得编码系统的均方误差,由此推导了系统信噪比和编码增益公式。随着编码长度的增加,编码增益会逐渐增大并在某一编码长度后趋于稳定,因此系统存在最佳编码长度,最终推导了最佳编码长度公式,并对信噪比和最佳编码长度进行了 MATLAB 仿真。仿真结果表明,在基于 Simplex 码的瑞利布里渊光时域分析系统中,当脉冲基底 1 阶边带产生的瑞利散射光功率为 0.5 mW 时, 随编码长度的增加, 编码增益逐渐增大并趋于稳定值 6.69 dB,系统的最佳编码长度为 63 bit。

关键词: 受激布里渊散射; 分布式光纤传感器; Simplex 编码; 瑞利散射

中图分类号: TN247　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.3788/IRLA201746.0322001

Performance of coding Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis system with APD detector

Li Yongqian, Yang Runrun, Zhang Lixin

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

Abstract: The Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis system has the advantages of single source, single ended operation and non destruction. In order to solve the contradiction between the system signal-to-noise ratio and the spatial resolution, the coding technique was applied to the Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis system and a simplex code Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis sensing system based on the Avalanche Photo Diode detector was presented. The Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis system applied coding technology can improve the signal to noise ratio while maintaining the same spatial resolution. In the system, the random shot noise power was related to signal power, and the thermal noise power that was irrelevant to signal power mainly depended on the performance of the Avalanche Photo Diode detector. By analyzing the variance of current volatility which was relevant to two kinds of noise and Simplex code encoding and decoding

收稿日期:2016-07-10; **修订日期:**2016-08-20

基金项目:河北省自然科学基金(F2014502098);国家自然科学基金(61377088);中央高校基本科研业务费专项资金(2016XS104)

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技术方面的研究。Email:liyq@ncepubd.edu.cn

rules, the mean square error of coding system was obtained, then the signal-to-noise ratio and coding gain formula were deduced. With the increase of coding length, the coding gain was also increased, then stabilized at a stable value, so the system had the optimal coding length. Finally, the optimal coding length formula was deduced. By using MATLAB it is verified that as the coding length increases, the coding gain tends to a stable value of 6.69 dB when the first-order Rayleigh scattering light power is 0.5 mW in the Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis system based on Simplex code, and the optimal code length was 63 bit.

Key words: stimulated Brillouin scattering; distributed fiber sensor; simplex coding; Rayleigh scattering

0 引 言

布里渊光时域分析 (Brillouin Optical Time Domain Analysis,BOTDA)分布式光纤传感系统利用泵浦光和探测光发生的受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering,SBS) 作用对探测光进行放大[1],通过检测探测光获得整条光纤的 SBS 信息,在检测光纤温度和应变方面具有测量精度高、动态范围大等显著优点[2],因此在电力线缆、建筑结构等的监测方面具有广阔的应用前景[3]。在传统的 BOTDA 系统中,需要从光纤两端分别入射探测光和泵浦光[4],结构比较复杂,而瑞利 BOTDA 系统[5]利用微波调制 1阶边带在传感光纤中产生的背向瑞利散射光作为探测光与传感脉冲发生 SBS 作用, 具有单光源、单端工作、非破坏等优点。

由于瑞利 BOTDA 系统检测的是背向瑞利散射光,随着传感距离的增加瑞利散射光不断减小,最终导致检测困难, 因此需要采取措施提高系统的信噪比。提高系统信噪比常采用增加入纤功率的方法[6],并可通过增加光脉冲宽度的方式来实现, 但脉冲宽度的增加会降低系统的空间分辨率[7]。因此,Soto M A 等在拉曼放大的 BOTDA 系统中采用 Simplex (简称 S)编码技术[8],在 120 km 的传感光纤上实现了 1.3 ℃的温度分辨率和 26 $\mu\varepsilon$ 的应变分辨率。在光纤传感系统中采用 S 编解码技术,系统的编码增益约为 $(L+1)/(2\sqrt{L})$[9](L 为编码长度),由于在实际的基于 S 编码的分布式光纤传感系统中存在热噪声和随机散粒噪声等噪声,其中热噪声只与光电检测器有关,不受检测信号大小的影响, 而随机散粒噪声与信号大小有关, 通过 S 编解码后两者的大小会存在不同变化,这将影响系统的信噪比和编码增益,因此分析两种噪声对编码系统的影响以得到最佳编码长度是必要的[10]。

针对瑞利 BOTDA 系统信噪比与空间分辨率相互矛盾的问题,文中在系统中引入 S 编码技术,分析瑞利 BOTDA 系统中的 SBS 作用机理, 给出发生 SBS 作用之后含整条光纤信息的背向瑞利散射光功率的数学表达式; 分析基于雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode,APD) 检测的 S 码瑞利 BOTDA 传感系统在编解码过程中热噪声和随机散粒噪声对系统性能的影响,推导系统信噪比、编码增益和最佳编码长度的表达式,并利用 MATLAB 进行仿真验证。

1 理论分析

1.1 瑞利BOTDA 系统原理

瑞利 BOTDA 系统原理如图 1 所示, 由电光调制器(Electro Optic Modulator,EOM)产生的微波调制脉冲基底 1 阶边带信号在光纤始端入射到光纤中产生瑞利散射光。在光纤始端入射的脉冲光通过光纤介质的电致伸缩效应产生相干弹性声波场, 从而形成一个运动的折射率光栅,由于多普勒效应,散射光频率下移形成斯托克斯散射光。由于微波调制脉冲基底 1 阶边带产生的瑞利散射光与脉冲泵浦光相差

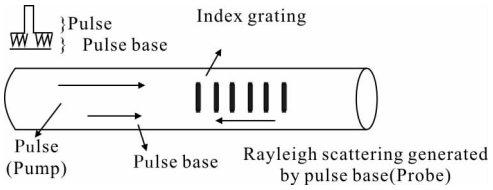

图 1 瑞利 BOTDA 系统原理

Fig.1 Principle of Rayleigh BOTDA system

布里渊频移 v_B，在经过与脉冲泵浦光 SBS 作用后会携带沿光纤分布的温度和应变信息，因此，检测瑞利散射光即可获取沿整条传感光纤分布的温度或应变信息[11]。

假设在光纤 z 处微波调制脉冲基底的 1 阶边带产生的瑞利散射光功率为[12]：

$$P_{\mathrm{cwz}}(z)=\frac{\alpha_s S}{2\alpha}P_{\mathrm{base}(0)}[\exp(-\alpha z)-\exp(-\alpha(2l-z)] \tag{1}$$

式中：$P_{\mathrm{base}(0)}$为微波调制脉冲基底 1 阶边带的功率；α 为光纤衰减系数；α_s 为瑞利散射系数；S 为后向瑞利散射光捕捉系数；l 为传感光纤长度。

布里渊增益 $G(t,\Delta v)$定义为：

$$G(t,\Delta v)=\exp\left[\int_{v_g t/2}^{\Delta z+v_g t/2} g_B(\xi,\Delta v)P_p(\xi,\Delta v)\mathrm{d}\xi\right] \tag{2}$$

式中：t 为时间；Δv 为瑞利散射光与脉冲泵浦光的光频差；v_g 为群速度；Δz 为空间分辨率；$g_B(\xi,\Delta v)$和 $P_p(\xi,\Delta v)\mathrm{d}\xi$ 分别为光纤上位置 ξ 处的布里渊增益系数和脉冲光功率。

在检测端获得的发生 SBS 后的瑞利散射光功率 $P_{\mathrm{cw}}(t,\Delta v)$为：

$$P_{\mathrm{cw}}(t,\Delta v)=P_{\mathrm{cwz}}(z)\exp(-\alpha z)\cdot G(t,\Delta v)=\frac{\alpha_s S}{2\alpha}P_{\mathrm{base}(0)}[\exp(-2\alpha z)-\exp(-2\alpha l)]\cdot G(t,\Delta v) \tag{3}$$

1.2 单脉冲瑞利 BOTDA 系统信噪比

由 1.1 的分析可知，单脉冲光 $P(t)$经瑞利BOTDA 系统获得的不含噪声的理想信号为 $P_{\mathrm{cw}}(t,\Delta v)$，则经 APD 光电检测器产生的光电流为 $I(t)=MRP_{\mathrm{cw}}(t,\Delta v)$，$M$、$R$ 分别为 APD 的倍增因子和响应度。单脉冲瑞利 BOTDA 系统经 APD 光电检测器检测的含噪声的光电流为：

$$I_{\mathrm{sts}}(t)=I(t)+e_{\mathrm{th}}(t)+e_{\mathrm{sh}}(t) \tag{4}$$

式中：$e_{\mathrm{th}}(t)$和 $e_{\mathrm{sh}}(t)$分别为系统经 APD 检测到的与热噪声和随机散粒噪声相关的电流波动。由于热噪声和随机散粒噪声都是不相关的零均值随机噪声，则 $e_{\mathrm{th}}(t)$和 $e_{\mathrm{sh}}(t)$的方差分别为 $\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)=4kTB/R_L$ 和 $\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)=2qBMF(M)I(t)$，其中，$k$ 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，R_L 和 B 分别为光电检测器的负载电阻和有效噪声带宽，q 为电子电荷，$F(M)$为 APD 的过剩噪声系数。

为了便于分析，文中平均次数和编码长度均取 L，单脉冲瑞利 BOTDA 系统未平均时和经 L 次累加平均后的理论信噪比可以分别表示为[12]：

$$SNR_0=\sqrt{\frac{I^2(t)}{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)+\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}} \tag{5}$$

$$SNR_1=\sqrt{\frac{I^2(t)}{\frac{1}{L}\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)+\frac{1}{L}\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}} \tag{6}$$

1.3 S 码瑞利 BOTDA 系统信噪比

由参考文献[13]可知，基于 APD 检测的 S 码瑞利 BOTDA 系统的光电流可以表示为：

$$\begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_i(t) \\ \vdots \\ I_L(t) \end{bmatrix}=S\begin{bmatrix} I(t) \\ \vdots \\ I(t-(i-1)\tau) \\ \vdots \\ I(t-(L-1)\tau) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_{1\mathrm{sh}}(t) \\ \vdots \\ e_{i\mathrm{sh}}(t) \\ \vdots \\ e_{L\mathrm{sh}}(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_{1\mathrm{th}}(t) \\ \vdots \\ e_{i\mathrm{th}}(t) \\ \vdots \\ e_{L\mathrm{th}}(t) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：τ 为单脉冲光 $P(t)$的脉冲宽度；$I(t-\tau),\cdots,I(t-(i-1)\tau),\cdots,I(t-(L-1)\tau)$为经$(i-1)\tau$(其中 $i=1,2,\cdots,L$) 时延后系统输出的一系列新的检测电流；S 为 L 阶 S矩阵；$e_{i\mathrm{th}}(t)$和 $e_{i\mathrm{sh}}(t)$分别为系统每输入一组编码后 APD 检测到的与热噪声和随机散粒噪声相关的电流波动。将得到的光电流乘以 S 矩阵的逆矩阵，可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \hat{I}(t) \\ \vdots \\ \hat{I}(t-(i-1)\tau) \\ \vdots \\ \hat{I}(t-(L-1)\tau) \end{bmatrix}=S^{-1}\begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_i(t) \\ \vdots \\ I_L(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I(t) \\ \vdots \\ I(t-(i-1)\tau) \\ \vdots \\ I(t-(L-1)\tau) \end{bmatrix}+S^{-1}\begin{bmatrix} e_{1\mathrm{sh}}(t) \\ \vdots \\ e_{i\mathrm{sh}}(t) \\ \vdots \\ e_{L\mathrm{sh}}(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_{1\mathrm{th}}(t) \\ \vdots \\ e_{i\mathrm{th}}(t) \\ \vdots \\ e_{L\mathrm{th}}(t) \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\hat{I}(t-(i-1)\tau)$为 $I(t-(i-1)\tau)$的估计值。将公式(8)中左边矩阵各行进行移位并累加平均，可得系统最终的响应光电流为：

$$I'(t)=\frac{1}{L}\left[\hat{I}(t)+\cdots+\hat{I}(t-(i-1)\tau+(i-1)\tau)+\cdots+\hat{I}(t-(L-1)\tau+(L-1)\tau))\right]=$$

$$I(t)+\frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}S_{j,k}^{-1}e_{k\mathrm{sh}}(t+(j-1)\tau)+$$
$$\frac{2}{L(L+1)}\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}T_{j,k}e_{k\mathrm{th}}(t+(j-1)\tau) \tag{9}$$

式中：T 为 S^{-1} 矩阵的正规化矩阵，$T=(L+1)S^{-1}/2$。

由于 $e_{i\mathrm{th}}(t)$ 只与光电检测器有关，其方差仍为 $\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)=4kTB/R_L$。由 1.2 节分析可知，单脉冲瑞利BOTDA 系统的随机散粒噪声的方差为 $\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)=2qBMF(M)I(t)$，则 $e_{i\mathrm{sh}}(t)$ 的方差 $\sigma_{i\mathrm{sh}}^2(t)$ 为：

$$\begin{bmatrix}\sigma_{1\mathrm{sh}}^2(t)\\ \vdots\\ \sigma_{i\mathrm{sh}}^2(t)\\ \vdots\\ \sigma_{L\mathrm{sh}}^2(t)\end{bmatrix}=2qBMF(M)S\begin{bmatrix}I(t)\\ \vdots\\ I(t-(i-1)\tau)\\ \vdots\\ I(t-(L-1)\tau)\end{bmatrix} \tag{10}$$

公式(10)忽略了 APD 暗电流的影响。由于 $e_{i\mathrm{th}}(t)$ 和 $e_{i\mathrm{sh}}(t)$ 均为不相关的零均值随机噪声，即：

$$E\{e_{i\mathrm{th}}(t+\zeta)\}=0,E\{e_{i\mathrm{sh}}(t+\zeta)\}=0$$
$$E\{e_{i\mathrm{th}}^2(t+\zeta)\}=\sigma_{\mathrm{th}}^2,E\{e_{i\mathrm{sh}}^2(t+\zeta)\}=\sigma_{i\mathrm{sh}}^2(t+\zeta)$$
$$E\{e_{i\mathrm{th}}(t)e_{i\mathrm{th}}(t+\zeta)\}=0(\zeta\neq 0),E\{e_{i\mathrm{sh}}(t)e_{i\mathrm{sh}}(t+\zeta)\}=0(\zeta\neq 0)$$
$$E\{e_{i\mathrm{th}}(t)e_{j\mathrm{th}}(t+\zeta)\}=0(i\neq j),E\{e_{i\mathrm{sh}}(t)e_{j\mathrm{sh}}(t+\zeta)\}=0(i\neq j)$$
$$E\{e_{i\mathrm{th}}(t)e_{j\mathrm{sh}}(t+\zeta)\}=0 \tag{11}$$

故有 $I'(t)$ 的均方误差为：

$$E\{(I'(t)-I(t))^2\}=$$
$$\frac{1}{L^2}E\left\{\left(\begin{array}{l}\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}S_{j,k}^{-1}e_{k\mathrm{sh}}(t+(j-1)\tau)+\\ \frac{2}{L+1}\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}T_{j,k}e_{k\mathrm{th}}(t+(j-1)\tau)\end{array}\right)^2\right\}=$$
$$\frac{1}{L^2}E\left\{\left(\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}S_{j,k}^{-1}e_{k\mathrm{sh}}(t+(j-1)\tau)\right)^2\right\}+$$
$$\frac{4}{L^2(L+1)^2}E\left\{\left(\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}T_{j,k}e_{k\mathrm{th}}(t+(j-1)\tau)\right)^2\right\}=$$
$$\frac{1}{L^2}\left\{\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}S_{j,k}^{-1}\sigma_{k\mathrm{sh}}^2(t+(j-1)\tau)\right\}+$$
$$\frac{4}{L^2(L+1)^2}\left\{L^2\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)\right\}=$$
$$\frac{1}{L^2}\left\{2qBMF(M)\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{L}S_{j,k}^{-1}\sum_{n=1}^{L}S_{k,n}I(t+(j-1)\tau+(n-1)\tau\right\}+$$
$$\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}=\frac{1}{L^2}\{2qBMF(M)I(t)L\})+\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}=$$
$$\frac{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)}{L}+\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2} \tag{12}$$

因此采用 L 位 S 码的瑞利 BOTDA 系统的理论信噪比为：

$$SNR_2=\sqrt{\frac{I^2(t)}{\frac{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)}{L}+\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}}} \tag{13}$$

1.4 S 码瑞利BOTDA 系统最佳编码长度

根据参考文献 [10] 中的基于格雷码的分布式光纤传感系统最佳编码长度的分析方法，可推导出采用 L 位 S 码的瑞利 BOTDA 系统的最佳编码长度。首先分析编码增益，根据公式(6)和公式(13)可得采用 L 位 S 码的瑞利 BOTDA 系统的编码增益为：

$$G=\frac{SNR_2}{SNR_1}=\sqrt{\frac{\frac{1}{L}\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)+\frac{1}{L}\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{\frac{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)}{L}+\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}}}=\sqrt{\frac{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)+\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)+\frac{4L\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}}} \tag{14}$$

其次通过讨论公式(14)可得最佳编码长度。当 $\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)>>\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)$ 时，系统的编码增益为 $G\approx 1$，即无增益，编码的效果和使用平均的效果是一样的。当 $\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)<<\frac{4L\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{(L+1)^2}\approx\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{L}$ 时，系统的编码增益为 $G\approx\frac{L+1}{2\sqrt{L}}$，这与参考文献[14]的结论相符。

因此，S 码瑞利 BOTDA 系统的最佳编码长度为：

$$L_{\mathrm{opt}}=\min\left[\frac{4\sigma_{\mathrm{th}}^2(t)}{\sigma_{\mathrm{sh}}^2(t)}\right] \tag{15}$$

2 仿真验证

2.1 编码增益

为了验证信噪比和最佳编码长度公式，假设脉冲峰值功率为 100 mW，微波调制脉冲基底的 1 阶边带的功率为 0.5 mW，即 $P_{\mathrm{base}(0)}=0.5$ mW，光纤长度为 10 km，其余参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Symbol	Value
α/m	4.6×10^{-5}
α_s/m	3.2×10^{-5}
S	1.8×10^{-3}
M	10
R/A·W^{-1}	0.88
k/J·K^{-1}	1.4×10^{-23}
R_L/Ω	50
B/MHz	200
$F(M)$	3

瑞利 BOTDA 系统经 APD 光电检测器检测的含噪声的光电流信号如图 2 所示，噪声的大小由热噪声和随机散粒噪声的方差公式决定，其中黑色波形为未平均的信号，而灰色波形为平均 31 次得到的信号，从图 2 中可以看出采用叠加平均法之后系统的噪声明显减小。在图 2 的含噪声的电流信号中分别取出电流信号和噪声信号，求得信噪比如图 3 所示，

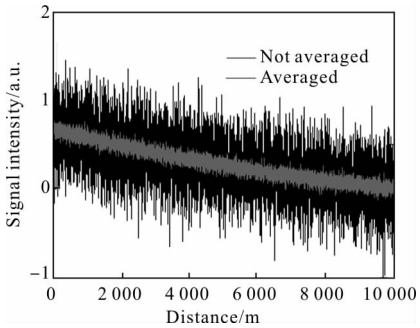

图 2 未平均和平均 31 次的信号对比

Fig.2 Comparison of not averaged and averaged signals for 31 times

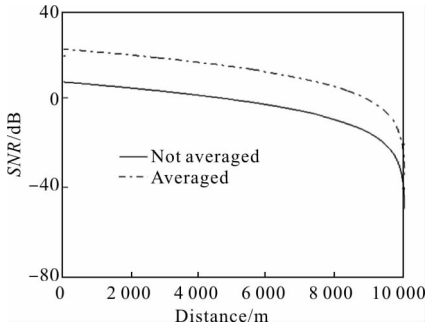

图 3 未平均和平均 31 次的仿真系统信噪比对比

Fig.3 Comparison of not averaged and averaged simulated system SNRs for 31 times

其中实线为未平均时的信噪比，虚线为平均 31 次的信噪比，所得信噪比改善量为 14.88~14.96 dB。根据公式(5)和公式(6)可得平均 31 次相对未平均时系统理论信噪比改善量为 14.91 dB，因此仿真结果与采用叠加平均法的理论值一致。

经 31 位 S 编解码的瑞利 BOTDA 系统得到的含噪声的信号和未平均的瑞利 BOTDA 系统信号的对比如图 4 所示，其中灰色波形为编解码信号。对比图 2 和图 4 可以看出经编码之后系统的噪声改善效果最明显。与图 3 同理，可得未编码和采用 31 位 S 编码的信噪比对比如图 5 所示，其中实线为未编码的信噪比，虚线为采用 31 位 S 编码的信噪比，所得信噪比改善量为 23.37~24.01 dB。根据公式(5)和公式(13)，可得 31 位 S 编码时相对未平均时系统理论信噪比改善量为 23.53~24.08 dB，因此仿真结果与采用编码的理论值一致。

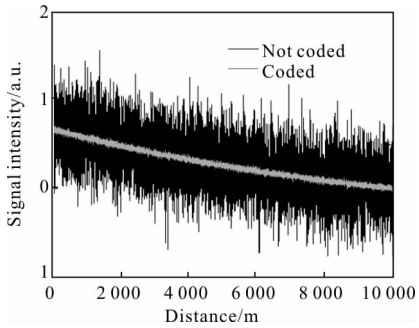

图 4 未编码和 31 位 S 码的信号对比

Fig.4 Comparison of not coded and coded with 31 bits S code signals

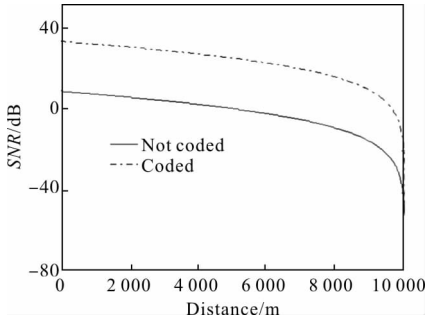

图 5 未编码和 31 位 S 码时的仿真系统信噪比对比

Fig.5 Comparison of not coded and coded with 31 bits S code simulated system SNRs

根据公式 (14) 可得采用 L 位 S 码的瑞利 BOTDA 系统的理论编码增益，其与仿真所得信号的编码增益的对比如图 6 所示，可见二者具有良好的

一致性。由图 2 中平均 31 次、图 4 中采用 31 位 S 编码两者的电流信号中分别取出电流信号和噪声信号，经处理可得到仿真编码增益。

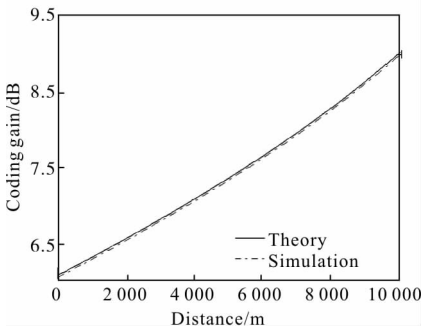

图 6 L 位 S 码时的理论和仿真编码增益

Fig.6 Theoretical and simulated coding gain of L bits S code

2.2 最佳编码长度

由公式(15)可知，基于 S 编码的瑞利 BOTDA 系统的最佳编码长度为 $L_{opt}=\min\left[\frac{4\sigma_{th}^2}{\sigma_{sh}^2}\right]$，由于热噪声的方差为 $\sigma_{th}^2(t)=4kTB/R_L$，其大小与信号无关；随机散粒噪声方差为 $\sigma_{sh}^2=2qBMF(M)I(t)$，其和信号大小成正比，因此 L_{opt} 在 z=0 m 处取得最大值，即 L_{opt}=80。根据公式(14)可得，不同编码位数时编码增益随光纤位置改变的关系曲线如图 7 所示，可以看出编码增益增长的速度随编码长度的增加逐渐降低。在传感光纤后端，这种趋势不明显，原因是随机散粒噪声大小随信号的减小而减小，光纤后端特别是末端处存在 $\sigma_{sh}^2<<\sigma_{th}^2$。

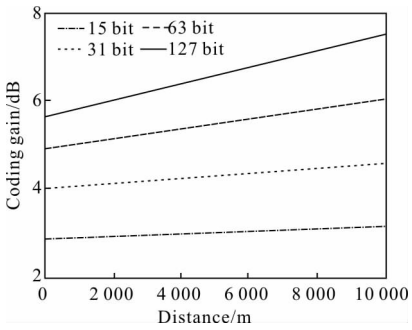

图 7 不同编码位数时随光纤位置改变的编码增益

Fig.7 Coding gain versus fiber location with different coding bits

为了进一步验证最佳编码长度，分析系统在距光纤始端 z=1 m 处不同编码位数时的编码增益。随着编码长度的增加，理论的编码增益和仿真的编码增益如图 8 所示，考虑到系统散粒噪声与信号大小有关，图中给出了不同脉冲基底功率时的关系曲线。首先，在 $P_{base(0)}$=0.5 mW 时，z=1 m 处的理论编码增益和仿真编码增益基本一致；其次，由图中曲线可以看出当编码长度超过 63 bit 时，编码增益的增长速度逐渐减小，最终趋于稳定值 6.69 dB，符合理论分析。

随着 $P_{base(0)}$的增加，$\sigma_{sh}^2(t)$也相应增加，因此最佳编码长度 L_{opt} 将会不断减小。图 8 中显示了在 $P_{base(0)}$ 增加的过程中，z=1 m 处的编码增益不断减小，L_{opt} 也不断减小，符合理论分析。

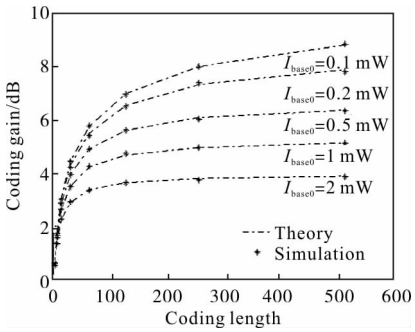

图 8 L 位S码时在 z=1 m 处的理论和仿真编码增益

Fig.8 Theoretical and simulated coding gain of L bits S code at z=1 m

3 结 论

针对系统信噪比和空间分辨率相互矛盾的问题，提出了基于 APD 检测的编码瑞利 BOTDA 系统。利用系统中与热噪声和随机散粒噪声相关的电流波动方差的表达式，推导了信噪比和最佳编码长度表达式；分析了微波调制脉冲基底 1 阶边带的功率 $P_{base(0)}$=0.5 mW 时，系统信噪比的改善量，并利用 MATLAB 进行了仿真验证。结果表明，在基于 Simplex 码的瑞利布里渊光时域分析系统中，当 $P_{base(0)}$=0.5 mW 时，随编码长度的增加，编码增益逐渐增大并趋于稳定值 6.69 dB，系统的最佳编码长度为 63 bit；随着 $P_{base(0)}$的增加，最佳编码长度不断减小。文中的研究结论不但为 S 码瑞利 BOTDA 系统设计提供理论依据和实验指导，而且对采用 S 码的 BOTDR、BOTDA 等分布式光纤传感系统研究具有重要参考价值。

参考文献：

[1] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement

of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. ***J Lightwave Technol***, 1989, 7(8): 1170-1176.

[2] Alasia D, Gonzalez H M, Abrardi L, et al. Detrimental effect of modulation instability on distributed optical fiber sensors using stimulated Brillouin scattering[C]//SPIE, 2005, 5855(1): 587-590.

[3] 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.

[4] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. ***J Lightwave Technol***, 1995, 19(7): 1296-1302.

[5] Cui Q, Pamukcu S, Lin A, et al. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA [J]. ***IEEE Sens J***, 2011, 11(2): 399-403.

[6] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. ***Opt Lett***, 2010, 35(2): 259-261.

[7] Minardo A, Coscetta A, Zeni L, et al. High-spatial resolution DPP-BOTDA by real-time balanced detection[J]. ***IEEE Photon Technol Lett***, 2014, 26(12): 1251-1254.

[8] Soto M A, Taki M, Bolognini G, et al. Simplex-coded BOTDA sensor over 120-km SMF with 1-m spatial resolution assisted by optimized bidirectional Raman amplification [J]. ***IEEE Photon Technol Lett***, 2012, 24(20): 1823-1826.

[9] Duckey L, Hosung Y, Kim Y N, et al. Analysis and experimental demonstration of simplex coding technique for SNR enhancement of OTDR[J]. ***J Lightwave Technol***, 2004, 13(7): 7803-8722.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Wang Hu. Research on the key technology of Rayleigh BOTDA system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese)

[13] Duckey L, Hosung Y, Pilhan K, et al. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on Simplex codes[J]. ***J Lightwave Technol***, 2006, 24(1): 322-328.

[14] Taki M, Muanenda Y S, Toccafondo I, et al. Optimized hybrid Raman/Fast-BOTDA sensor for temperature and strain measurementsin large infrastructures [J]. ***IEEE Sens J***, 2014, 14(12): 4297-4303.