

引用格式: SONG Peng, TAN Yumei, LI Xuehua, et al. Research on Power-line Interference Removal Method of Ultraviolet Communication Signal Based on Wavelet Transform[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0706002

宋鹏,谭玉梅,李学华,等. 基于小波变换的紫外光通信信号工频干扰去除方法研究[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0706002

基于小波变换的紫外光通信信号工频干扰去除方法研究

宋鹏¹, 谭玉梅¹, 李学华², 郭华¹, 张利剑¹

(1 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

(2 成都信息工程大学 电子工程学院, 成都 610225)

摘 要: 在无线紫外光通信系统中, 日光灯等会对系统产生工频干扰, 干扰会以正弦波形式叠加到经光电倍增管接收的有用信号上, 并对后续的抽样判决产生影响。首先分析了小波变换去除工频干扰噪声的原理, 给出了基于接收信号波形计算信噪比的方法, 并基于该方法对小波变换的去工频性能进行了分析, 最后讨论了小波去除工频干扰时最优小波基的选取问题。频谱分析表明, 小波变换可有效消除 100 Hz 和 200 Hz 的工频干扰, 当小波基选为 sym40 时小波去除工频干扰的性能最好, 去噪后信噪比为 12.22 dB。

关键词: 紫外光通信; 工频干扰; 信噪比; 小波变换; 小波基

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215007.0706002

Research on Power-line Interference Removal Method of Ultraviolet Communication Signal Based on Wavelet Transform

SONG Peng¹, TAN Yumei¹, LI Xuehua², GUO Hua¹, ZHANG Lijian¹

(1 School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(2 School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In the wireless ultraviolet communication system, fluorescent lamp can cause power-line interference to the system. The interference can be superimposed on the useful signal received by the photomultiplier tube in the form of a sine wave, which have a bad influence on the subsequent sampling decision stage. Firstly, this article analyzes the principle of wavelet transform to remove power-line interference noise, and gives a method to calculate the signal-to-noise ratio based on the received signal waveform. Secondly, the performance of wavelet transform to eliminate power-line interference is analyzed based on this signal-to-noise ratio calculation method. Finally, the problem of selecting the optimal wavelet basis in the process of the wavelet transform to remove power-line interference is discussed. The spectrum analysis shows that wavelet transform can effectively eliminate power-line interference of 100 Hz and 200 Hz, when the wavelet basis is sym40, the best performance in removing power-line interference is achieved, and the signal-to-noise ratio is 12.22 dB after denoising.

Key words: Ultraviolet communication; Power-line interference; Signal-to-noise ratio; Wavelet transform; Wavelet basis

OCIS Codes: 060.4510; 260.7190; 060.2605

基金项目: 国家自然科学基金(No.61971345), 西安市科技局科技创新引导工程(No.GXYD7.15), 陕西省教育厅专项科研计划(No.19JK0361)

第一作者: 宋鹏(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线光通信技术。Email: pengsong916@126.com

收稿日期: 2020-12-08; 录用日期: 2021-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

紫外光通信(Ultraviolet Communication, UVC)是一种新型的无线光通信方式^[1-2]。200~280 nm 日盲波段的紫外光(Ultraviolet, UV)被用作信息传输的载体。信息利用大气分子、气溶胶粒子以及灰尘颗粒对UV的散射作用进行传输,可以实现非直视(Non-Line-of-Sight, NLOS)无线光通信^[3]。UVC具有保密性好、抗干扰能力强、可全天候工作等优点,在隐蔽通信领域具有广阔的应用前景^[4-6]。

UVC系统是散射信道,噪声会对有用信号造成严重干扰,为了改善UVC系统性能,已有学者对接收端降噪问题进行了研究。SHAW G A等^[7]研究了直视(Line-of-Sight, LOS)和NLOS无线UV链路中的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)和误码率,并提出了一种UVC系统SNR估算方法。LUO Pengfei等^[8]基于蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法研究了UVC信道中的背景噪声。2012年,GUPTA A等^[9]开发了一种多输入多输出接收器系统来抑制散粒噪声。2013年,CHOW C W等采用曼彻斯特编码来抑制LED无线光通信系统中的光学背景噪声^[10]。2015年,赵太飞等^[11]提出了一种适用于NLOS UV通信的SNR估计方法,并据此来估计信道容量。同年,强若馨等^[12]研究了脉冲响应序列之间相互串扰对通信速率的影响。2019年,为了分析信道容量,宋鹏等^[13]采用量子极限法研究了NLOS非共面紫外光系统的信噪比。目前,UVC系统接收端的信噪比通常是利用量子极限信噪比公式计算,但与实验测量结果相比,该方法误差较大。

在紫外光通信系统中,日光灯和氙气灯等会对接收信号造成工频干扰。为了滤除UVC系统中的工频噪声,可以使用的技术主要有:卡尔曼滤波器^[14]、自适应滤波器^[15]、自适应算法^[16]、盲源分离^[17]、神经网络^[18]、FFT滤波、经验模态分解^[19]和小波变换。基于滤波器组的降噪适用于统计特性稳定的信号。采用神经网络需要提取信号和噪声的统计模型,然后丢弃与噪声相对应的维度来去除噪声。傅立叶变换可以实现频谱分析,但没有时域信息。小波变换(Wavelet Transform, WT)由于其多分辨率,低熵和解相关性被广泛应用于工频干扰去除^[20-21]。

本文首先分析了小波变换去除工频干扰的原理,给出了基于接收信号波形计算信噪比的方法,随后选用不同小波基对叠加工频干扰噪声的紫外光信号进行降噪处理,并对不同小波基的降噪性能进行了分析。

1 紫外光接收信号工频干扰去除原理

1.1 接收信号模型

假设接收到的UV信号 $f(n)$ 被工频干扰噪声 $x(n)$ 污染,则接收信号模型可以表示为

$$s(n)=f(n)+x(n) \quad (1)$$

式中, $x(n)$ 为工频干扰噪声, n 为信号长度。

因此,为了最大限度得到有用信号,需要对接收信号进行日光灯工频噪声的去除,本文考虑采用小波变换算法对工频噪声进行去除。

1.2 小波变换去工频原理

小波变换是一种数学工具,在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率,可用于信号分析。小波序列可以通过母小波函数 $\psi(t)$ 的伸缩和平移得到,小波序列 $\psi_{a,b}(t)$ 的定义为^[22]

$$\psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中, a 和 b 分别是尺度和平移参数。尺度和平移参数基于2的幂选取,分析将变得更加高效、准确。在这种情况下,小波基函数可以表示为^[22]

$$\psi_{j,k}(n)=2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^{-j}n-k) \quad (3)$$

离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)可以使用有限长度序列和离散小波基之间的一组内积来进行数学描述,并且由每个内积产生小波变换系数。因此,DWT可以表示为

$$\text{DWT}(j,k)=\sum_{n=1}^N s(n)\cdot\psi_{j,k}^*(n) \quad (4)$$

式中, $DWT(j, k)$ 是离散小波变换系数,上标*表示复共轭。

基于离散小波变换的去工频过程如图1所示。从图1可以看出,工频干扰去除过程主要包括以下三个步骤:

- 1)UV信号的小波分解:选择一个小波基函数并确定分解层次 N 对紫外光接收信号进行分解;
- 2)提取工频分量:提取紫外光信号中包含的工频分量的小波系数并进行重构;
- 3)去除工频信号:利用接收信号减去工频分量的重构信号,便可得到去除工频干扰后的紫外光信号。

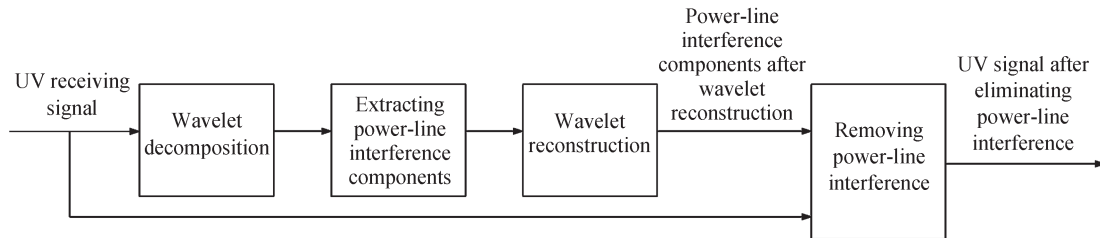


图1 小波变换去除工频干扰过程

Fig. 1 The process of removing power-line interference based on wavelet transform

1.3 紫外光接收信号信噪比计算方法

为了更好地评估紫外光接收信号工频干扰的去除效果,提出了一种新的SNR计算方法并将其作为判定去噪性能优劣的标准。基于实验接收到的UV信号波形,分别计算有用信号和噪声信号的功率,进而根据信噪比的定义计算接收信号的SNR。去除工频干扰后信号的SNR越大,恢复的信号就越平整,保留的有用信号的幅值就越大,信号进行抽样判决时的准确率也会越高。

1.3.1 实验接收到的紫外光信号的获取

如图2所示,搭建了UVC系统的室外测试平台,发射端使用中心波长为265 nm的UV发光二极管(LED),当该LED点亮时,电流为150 mA,光功率为10 mW;接收端使用Hamamatsu光电倍增管(R7154)。收发装置的几何参数为收发仰角为 30° ,发散角为 15° ,视场角为 40° ,偏转角为 0° 。发射端和接收端之间的距离为10 m。发送端发送一个频率为1.1 kHz,占空比为50%的方波信号,接收到的紫外光信号如图3(a)所示。

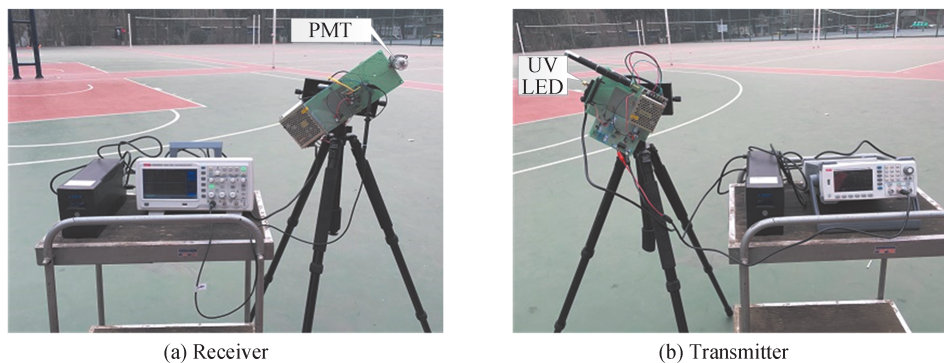


图2 非直视UV通信设备

Fig. 2 NLOS UV communication devices

1.3.2 紫外光接收信号信噪比计算方法

紫外光接收信号信噪比计算示意图如图3所示,具体步骤如下:

步骤1:从实验接收机处采集紫外光信号(此处选择了1 313个采样点)。如图3(a)所示,在接收信号的高、低电平处,噪声清晰可见。

步骤2:计算所获取UV信号的绝对值,如图3(b)所示。然后,计算信号的平均值,该值代表有用信号的电平,在图3(b)中用红线表示。因此,将所得均值求平方再除以负载电阻就可得到有用信号平均功率。

步骤3:从接收信号中减去步骤2中得到的平均值,以获得信号的噪声部分,如图3(c)所示。

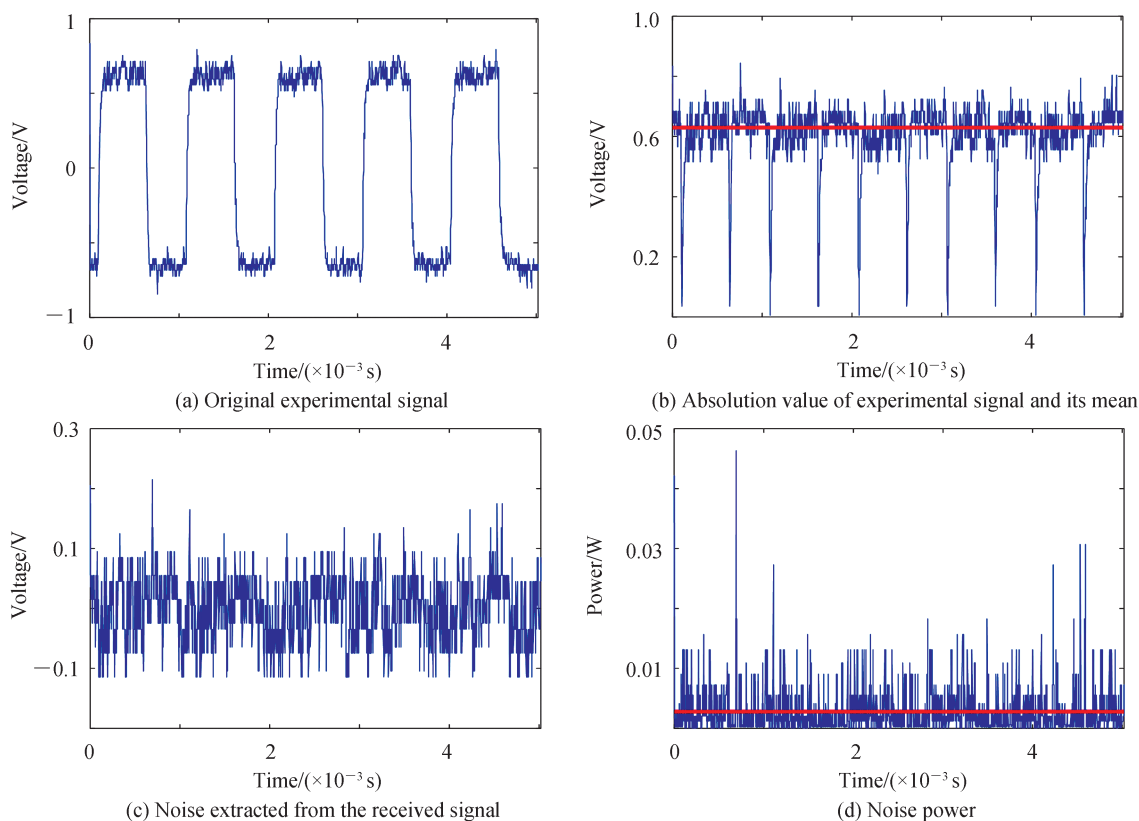


图3 计算紫外光实验信号信噪比
Fig. 3 Calculating SNR of the received UV signal generated from experiments

步骤4:根据图3(c)的噪声部分计算接收信号的噪声功率:首先对噪声求平方,然后将其除以负载电阻,再将所求功率取平均值,以获得噪声平均功率,如图3(d)中红线所示。

步骤5:利用式(5)计算UV接收信号信噪比

$$R_{SN} = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{(\text{mean}|U|)^2}{R}}{\text{mean} \left(\frac{(U - \text{mean}|U|)^2}{R} \right)} \right) \quad (5)$$

式中, U 是紫外光接收信号的电压幅度, $R=100 \text{ k}\Omega$ 。

2 紫外光接收信号的工频去除

2.1 包含工频干扰的紫外光接收信号

实验信号通过图2中的实验装置进行采集,该实验于2019-04-23号晚上7点到9点在西安工程大学的田径场上进行,紫外光通信装置位于田径场的中央,紧邻操场的道路上有氙气路灯。紫外LED发送频率为1.1 kHz,占空比为50%的方波信号。收发仰角为 40° ,通信距离为10 m。具体的实验环境、参数以及收发端几何参数如表1和表2所示。

图4是通信距离为10 m,收发仰角为 40° 时采集的实验信号及其频谱图,从图4(a)可以看出,由于叠加有氙气路灯的工频噪声,接收信号的包络呈现正弦波规律变化,并且从频谱图4(b)可见两种噪声分别在100 Hz和200 Hz处有较大的幅值,这表明噪声信号主要集中于这两个频率点上。表3显示了接收信号的频谱分布情况,由表3可见接收信号是由基波为1125 Hz及对应的谐波频段3 375 Hz、5 650 Hz、7 900 Hz、10 150 Hz构成的方波信号。因此,为了恢复有用信号,需要对该信号进行100 Hz和200 Hz工频干扰的去除,本文采用小波变换算法进行工频干扰的去除。

表1 实验环境和参数
Table 1 Experimental conditions and parameters

Parameter	Value
Experimental temperature/°C	23.2
Relative humidity/%	62
Pressure/hPa	9 577
Wind speed/(m·s ⁻¹)	1
Visibility/km	8
The optical filter efficiency η_f /%	100
The PMT detection quantum efficiency η_d /%	35

表2 收发端几何参数
Table 2 Transceiver geometric parameters

Parameter	Value
Transmitter's elevation angle θ_t /°	40
Half-beam angle Φ_t /°	15
Off-axis angle of transmitter α_t /°	0
Receiver's elevation angle θ_r /°	40
Half field-of-view angle Φ_r /°	40
Off-axis angle of receiver α_r /°	0
Emission power/mW	10
Communication distance d /m	10

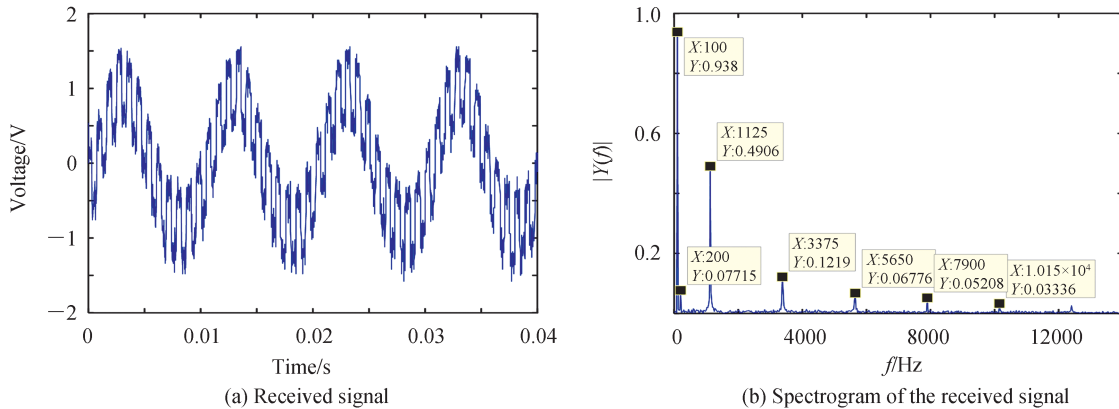


图4 接收信号及其频谱图
Fig. 4 Received signal and its spectrogram

表3 接收信号频谱分布
Table 3 Spectrum distribution of the received signal

	Power-line interference	Power-line interference	1	3	5	7	9
f /Hz	100	200	1 125	3 375	5 625	7 875	10 125

2.2 小波变换去除紫外光接收信号的工频干扰

基于小波变换多尺度分析理论,工频干扰相当于小波域中的低频部分,当分解层次较多时,得到的近似系数会越来越接近于信号的总体变化趋势。因此,从原始信号中减去趋势信号就可以达到去除工频干扰的目的。

小波变换去除工频干扰的原理是先将信号进行7层小波分解,将分解后小波系数进行重构,重构信号如图5(a)所示,图5(b)为重构信号的频谱分布。从图5(b)可以看出重构的第7层近似系数中只包含了100 Hz和200 Hz,即第7层近似系数重构后的信号是由100 Hz和200 Hz的工频干扰噪声叠加形成。因此,可以用

接收信号减去第7层的重构信号,就可以得到滤除工频干扰后的紫外光信号。

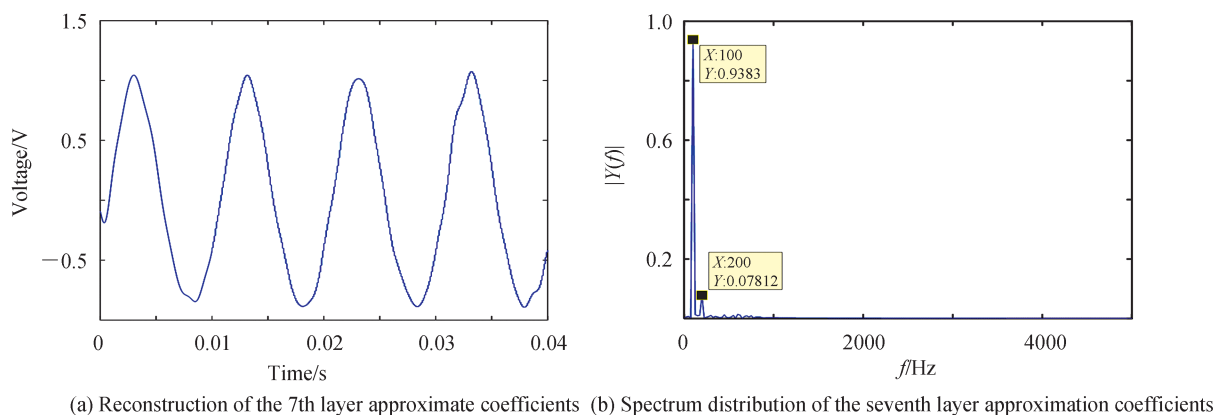


图5 第7层近似系数重构图及其频谱分布

Fig. 5 The 7th layer approximate coefficient reconstruction map and its spectrum distribution

2.2.1 最优小波基选取

小波变换去除工频干扰时,小波基函数选取不同,去工频干扰的效果也不同。因此,小波去除工频干扰时需要进行最优小波基的讨论。选取了4种小波基函数,分别是 $\text{coif}N$ ($N=1, 2, 3, 4, 5$) 小波基函数、 $\text{fk}N$ ($N=4, 6, 8, 14, 18, 22$) 小波基函数、 $\text{db}N$ ($N=8, 11, 16, 17, 18, 20, 24, 40, 43, 44$) 小波基函数和 $\text{sym}N$ ($N=12, 16, 18, 26, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 42, 43, 44$) 小波基函数,对图4(a)所示紫外光带工频干扰的接收信号进行7层小波分解,去除工频干扰后得到的SNR如图6所示。

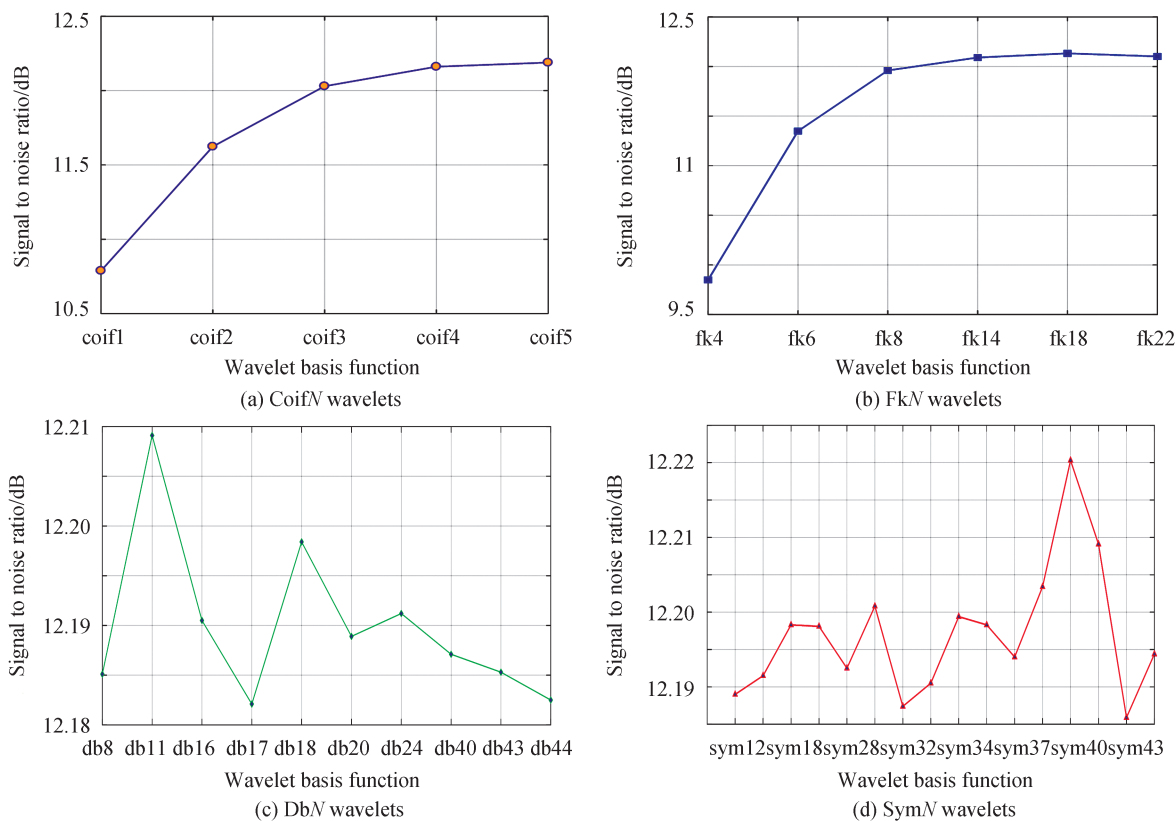


图6 基于不同小波基函数去工频后SNR

Fig. 6 SNR after removing power-line interference based on different wavelet basis functions

基于不同小波基函数去除工频干扰后接收信号的SNR如图6所示。图6(a)是 $\text{coif}N$ 系列小波去工频后的接收信号信噪比,可以看出基于 $\text{coif}5$ 小波基去除工频后得到的信噪比最大,即该小波基的去工频干扰

能力优于其他小波基;图6(b)是fkN系列小波去除工频后信号的信噪比,从图中可以看出,利用fk18小波基处理后的信号可以得到最大的信噪比;图6(c)为dbN系列小波去除工频干扰后信号的信噪比,可以看出,利用db11小波基去除工频干扰后得到了相比于同系列的其他小波基更大的SNR,因此,db11小波基可以更好地去除工频干扰;symN系列小波去除工频干扰后得到的SNR如图6(d)所示,可以看出,sym40相比于同系列的其他小波基能得到更大的SNR。

此外,为了进一步得到去除工频干扰的最佳小波基函数,挑选图6中基于不同小波基去除工频干扰性能最好的小波基再次进行对比,对比结果如图7所示。

图7为基于fk4小波基、sym40小波基、db11小波基和coif5小波基去除工频后得到的SNR。从图7可以看出,不同的小波基函数去除工频干扰的能力不同,当小波基函数为sym40时,去除工频干扰后得到的信号SNR最大,其值为12.22 dB。本文采用sym40小波基对带工频的紫外光信号进行工频干扰的去除。

2.2.2 工频干扰去除效果分析

为了进一步验证小波变换算法对紫外光信号工频干扰的去除效果,现对sym40小波基处理后的紫外光实验数据从时域及频域进行对比分析,结果如图8所示。

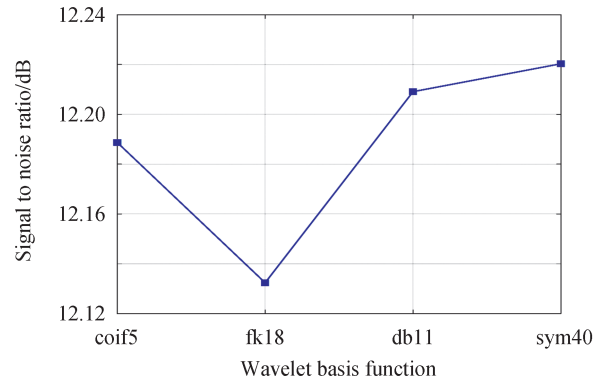


图7 不同小波基去除工频干扰后的SNR

Fig. 7 SNR after removing power-line interference under different wavelet bases

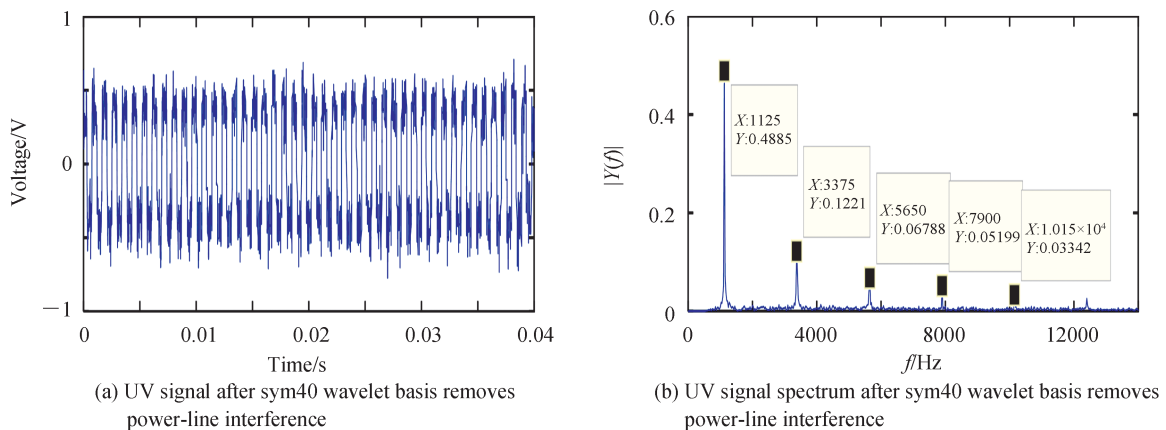


图8 Sym40小波基去除工频干扰后的紫外光信号及其频谱

Fig. 8 UV signal and its spectrum after power-line interference is removed by sym40 wavelet basis

由图8(a)可以看出,利用sym40小波去除工频干扰后能得到较为平整的有用信号,从时域图可见信号整体正弦规律波动趋势几乎消失。从频谱图8(b)可以看出接收信号中的工频成份(100 Hz和200 Hz)均被消除,即经过小波变换处理后代表工频噪声频率与该频率附近及其倍频等混合干扰信号的频率均得到了很好的去除,且对有用信号频率点基本没有伤害,只剩下方波信号的基频(1 125 Hz)及对应的谐波频段(3 375 Hz、5 650 Hz、7 900 Hz、10 150 Hz),方波信号的谐波频率值不完全对应,是由分辨率低引起的误差。由此可见,小波变换算法可有效滤除紫外光接收信号中的工频干扰。

3 结论

本文提出了一种基于紫外光接收信号波形计算信噪比的新方法,并采用小波变换算法对紫外光接收信号进行工频干扰的消除,通过提出的信噪比计算方法对工频噪声的消除效果进行了评价,同时对小波去噪中最优小波基的选取进行了讨论。结果表明:小波变换可以有效地去除工频干扰噪声,当小波基为sym40

时,小波变换去工频后得到的SNR最大,并且有用信号得到了较好的保留。

参考文献

- [1] WU Menglong, HAN Dahai, ZHANG Xiang, et al. Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [2] WANG Guanchu, WANG Kun, GONG Chen, et al. A 1Mbps real-time NLOS UV Scattering communication system with receiver diversity over 1km[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-13.
- [3] SONG Peng, SONG Fei, LI Yunhong, et al. Inter-link multi-user interference in non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0906001.
宋鹏,宋菲,李云红,等.非直视紫外光通信组网多用户干扰问题[J].*光子学报*, 2016, 45(9): 0906001.
- [4] SONG Peng, TAN Yumei, GENG Xiaojun, et al. Noise reduction on received signals in wireless ultraviolet communications using wavelet transform[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 131626-131635.
- [5] ZENG Zhaoquan, ZHANG Huihui, DONG Yuhan, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 19(1): 204-238.
- [6] DROST R J, SADLER B M. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29(8): 084006.
- [7] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J, et al. Recent progress in short range ultraviolet communication[J]. *SPIE*, 2005, 5796: 214-225.
- [8] LUO Pengfei, ZHANG Min, HAN Dahai, et al. Performance analysis of short-range NLOS UV communication system using Monte Carlo simulation based on measured channel parameters[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23489-23501.
- [9] GUPTA A, BRANDT-PEARCE M. Receiver design for shot noise limited MIMO FSO/UV communication systems [C]. *Globecom Workshops*, IEEE, 2012: 1183-1187.
- [10] CHOW C W, YE H C H, LIU Y F, et al. Mitigation of optical background noise in light-emitting diode (LED) optical wireless communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(1): 7900307.
- [11] ZHAO Taifei, JIN Dan, SONG Peng. Channel capacity estimation and analysis of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 152-159.
赵太飞,金丹,宋鹏.无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析[J].*中国激光*, 2015, 42(6): 152-159.
- [12] QIANG Ruoxin, ZHAO Shanghong, LIU Yun. Influence of pulse broadening on bit error rate of ultraviolet communication [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(5): 559-563.
强若馨,赵尚弘,刘韵.脉冲展宽对紫外光通信误码率的影响[J].*红外与激光*, 2015, 45(5): 559-563.
- [13] SONG Peng, SU Caixia, ZHAO Taifei, et al. Channel capacity analysis of non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry based on traversing tiny unit method[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(5): 144-152.
宋鹏,苏彩霞,赵太飞,等.基于遍历微小单元法非直视非共面紫外光通信信道容量分析[J].*通信学报*, 2019, 40(5): 144-152.
- [14] HAJIMOLAHOSEINI H, TABAN M R, SOLTANIANZADEH H, et al. Extended Kalman filter frequency tracker for nonstationary harmonic signals[J]. *Measurement*, 2012, 45(1): 126-132.
- [15] GU Liangling, ZHOU Nanquan, WU Haotian, et al. Application of interference canceller in bioelectricity signal disposing [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 814-819.
- [16] COSTA M H, TAVARES M C. Removing harmonic power line interference from biopotential signals in low cost acquisition systems[J]. *Computers in Biology & Medicine*, 2009, 39(6): 519-526.
- [17] LIN Y D, HSU C Y, CHEN H Y, et al. Efficient block-wise independent component analysis with optimal learning rate [J]. *Neurocomputing*, 2013, 117: 22-32.
- [18] POUNGPONSRI S, YU Xiaohua. An adaptive filtering approach for electrocardiogram (ECG) signal noise reduction using neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2013, 117: 206-213.
- [19] SUCHETHA M, KUMARAVEL N. Empirical mode decomposition based filtering techniques for power line interference reduction in electrocardiogram using various adaptive structures and subtraction methods[J]. *Biomedical Signal Processing & Control*, 2013, 8(6): 575-585.
- [20] YADAV S K, SINHA R, BORA P K, et al. Electrocardiogram signal denoising using non-local wavelet transform domain filtering[J]. *IET Signal Processing*, 2015, 9(1): 88-96.
- [21] SINGH B N, TIWARI A K. Optimal selection of wavelet basis function applied to ECG signal denoising [J]. *Digital Signal Processing*, 2006, 16(3): 275-287.
- [22] ALYASSERI Z A A, KHADER A T, AL-BETAR M A, et al. EEG feature extraction for person identification using wavelet decomposition and multi-objective flower pollination algorithm[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 76007-76024.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.61971345), Science and Technology Innovation Guidance Project of Xi'an Science and Technology Bureau (No.GXYD7.15), Special Scientific Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No.19JK0361)