Design of Optical Soliton Pulse Communication Transmission Method under Wave Perturbation*

WANG Cong[1*], WANG Shuai[2]
(1.School of Mechatronics Engineering and Intelligent Manufacturing, Zhengzhou Vocational University Information and Technology, Zhengzhou He'nan 450008, China;
2.School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou He'nan 450001, China)

Abstract: Random jitter in optical field propagation will affect the dispersion expansion, nonlinear distortion and transmission distance mismatch of optical soliton pulse communication transmission. In order to ensure the transmission reliability of optical soliton pulse communication, the transmission method of optical soliton pulse communication is designed considering fluctuation perturbation. According to the refractive index and nonlinear phase shift of optical fiber, the frequencies of the front and back ends of the pulse are obtained, and the abnormal dispersion region of optical soliton pulse is confirmed. In the abnormal dispersion region, the nonlinear interference of optical pulse propagation in optical fiber is filtered according to the dispersion coefficient, and the optical pulse compensation loss equation is established according to the optical pulse compensation loss in time-frequency varying signals. Combined with the variation of amplitude loss of pulsed light field, the optical soliton pulse transmission signal is processed to offset the distortion and interference caused by fluctuation perturbation. The experimental results show that the design method can effectively suppress the distortion and interference caused by fluctuation perturbation and improve the communication transmission signal under the same chirp, peak amplitude and intensity half width.

Key words: optical soliton pulse; communication transmission characteristics; frequency chirp; optical fiber nonlinearity
EEACC: 6260 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.037

波动微扰下光孤子脉冲通信传输方法设计*

王 聪[1*], 王 帅[2]
(1.郑州信息科技职业学院机电工程与智能制造学院, 河南 郑州 450008; 2.郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 光场传播中的随机抖动, 会对光孤子脉冲通信传输造成色散扩展、非线性失真、传输距离失配等影响。为了确保光孤子脉冲通信传输可靠性, 在考虑波动微扰下设计光孤子脉冲通信传输方法。根据光纤折射率和非线性相移获取脉冲前端和后端的频率, 确认光孤子脉冲产生展宽和失真现象的反常色散区。在反常色散区内, 考虑介质折射率非线性的特点, 依据色散系数过滤光纤中光脉冲传播的非线性干扰, 根据时频变化信号中的光学脉冲补偿损失建立光学脉冲补偿损失方程。结合脉冲光场振幅损失变分处理光孤子脉冲传输信号, 抵消波动微扰引起的失真和干扰。实验结果表明, 在啁啾、峰值振幅、强度半宽相同的情况下, 设计方法能够有效抑制波动微扰引起的失真和干扰, 提高通信传输信号。

关键词: 光孤子脉冲; 通信传输特性; 频率啁啾; 光纤非线性;
中图分类号: TN914.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0962-05

光孤子通信技术是通过强脉冲信号对光纤进行非线性压缩补偿[1], 使其稳定地进行高速光孤子信号传输, 它的传输速率是线性光纤系统的 2~3 倍, 通信距离可以达到几万公里, 适用于光纤多路传输, 是新一代高速、长距离光通信技术的理想之选[2]。当多路传输通道数目增多, 传输速率增大时, 信号的宽度会变得更窄, 直至采用飞秒级的光脉冲传输[3]。飞秒强光脉冲通过光纤时, 受到高阶色散和高阶非线性的影响, 会发生色散红移[4], 而光孤子脉冲则会因脉冲内拉曼自泵产生孤子自频偏斜, 这两种情况使 Gordon-Haus 效应变得更强烈, 使时间抖动增加, 从而影响到光孤子通信的性能, 同时通道间产生串扰, 制约了波分复用技术的推广[5]。因此, 高阶效应波动对通信传输性能的影响研究是当前的一个热门课题。

元志安等[6]考虑了水下激光雷达在水中的吸收与散射, 使用副载波调制技术提高水下探测性能和信噪比, 利用蒙特卡罗法改进副载波调制脉冲激光雷达的水下传播模式。但是, 该方法易受电磁辐射信号干扰, 限制了通信距离。宋鹏等[7]在分析非

项目来源: 教育部中国高校产学研创新基金-北创助教项目(2021BCF03003)
收稿日期: 2023-07-12 **修改日期**: 2023-09-26

直视式紫外光通信的基础上中,引入大气辐射半径和密度参数,实现通信信息传输。但是,该方法存在紫外光通信信号易衰减问题,降低了光信号质量。Khater 等[8]提出超短光孤子脉冲波多向量研究,利用非线性分数阶 Lakshmanan-Porsezian-Daniel 方程建立双折射光纤脉冲动力学模型,通过非奇异核分数阶导数转化光纤波脉冲特征,完成双折射光纤波脉冲传输。但是,该方法存在衍射问题。Eid 等[9]对不同孤子脉冲阶数对光纤通信性能影响进行研究,利用孤子技术补偿色散并平衡非线性效应,根据最大电功率幅值对孤子进行电滤波,获取随时间变化的孤子脉冲阶数,完成光纤通信性能研究。但是,该方法存在光损耗,影响通信信号传输的准确性。

基于此,本文在考虑高阶微扰的情况下,设计光孤子脉冲通信传输方法。计算脉冲频率,确认反常色散区。考虑光纤中光脉冲电磁辐射信号受到的非线性干扰,建立光学脉冲补偿损失方程,以降低光损耗。对光孤子脉冲传输信号进行变分处理,抵消脉冲波动引起的信号失真,保证光信号质量,提升通信信号传输效果。

1　光孤子脉冲通信传输方法设计

1.1　确认反常色散区

光孤子的形成与光纤的非线性效应密切相关。光纤中的非线性效应是由光场和光纤之间的相互作用产生的。光场强度高时光纤的各项性能指标会呈现非线性变化,但在光场强度极小的情况下,光纤的折射率 n 并没有随着光强而变化,只随光场线性变化。在强光场中,光纤折射率表达式为:

$$n=n_0+n_2|E(t)|^2 \tag{1}$$

式中:E 表示光场幅度,t 表示光脉冲传输时间,n_0 表示线性折射率,n_2 表示非线性折射率系数。普通单模光纤 $n_2\approx2.0\times10^{-20}\,\mathrm{m^2/W}$,其对光强度的依赖性会直接影响光的自相位调制效率[10],从而造成光场在传输过程中的相位偏移。假设光脉冲的传播距离是 L,光脉冲的自相位调制引起的非线性相移为:

$$\phi_{NL}=n_2k_0L|E|^2 \tag{2}$$

式中:k_0 是线性波数[11]。在光纤中传输时,每个光脉冲都会产生不同的相位偏移,不断生成新的频率成分,也就是产生频率线性调频,自相位调制(Self-Phase Modulation,SPM)引起的频率啁啾为[12]:

$$\delta\omega(t)=-\frac{\partial\phi_{NL}}{\partial t} \tag{3}$$

脉冲前端的频率啁啾有红移,后端有蓝移,即脉冲前端的频率降低,后端的频率增大,这样,脉冲的后缘就会比前缘更快,脉宽就会缩小。在群速度色散(Group Velocity Dispersion,GVD)和 SPM 的共同作用下,GVD 与 SPM 在反常色散区几乎是相互抵消的[13],二者结合使光脉冲不失真,从而形成了一个光孤子。在反常色散区,光纤的非线性效应使光脉冲宽度和色散宽度很难保持不变,光纤信号会发生失真,产生光孤子现象,据此确认反常色散区。

1.2　建立光学脉冲补偿损失方程

通过确认反常色散区,在色散区内构建非线性干扰过滤方程,滤出干扰。需要考虑光纤的色散对光脉冲传播的影响。在反常色散区,色散系数为负值。当光脉冲频率增加时,色散项的影响会减小,从而使光脉冲的传播速度变快。在光脉冲穿过光纤时,将 GVD 及 SPM 的效应也纳入麦克斯韦方程,建立光纤中光脉冲传播非线性干扰过滤方程[14]。采用一种简单、直观的方法,建立光纤中光脉冲传播的非线性干扰过滤方程:

$$E(z,t)=\mathrm{Re}\{A(z,t)\exp[\mathrm{i}(k_0z-\omega_0t)]\} \tag{4}$$

式中:ω_0 描述的是载波或信号的中心频率,$A(z,t)$ 描述的是脉冲的幅度,z 是传播距离,t 是传播时间,i 是虚数单位。SiO_2 光纤是典型的克尔型非线性光介质,考虑了介质折射率非线性的特点,波数 k 表达式为:

$$k=\frac{\omega}{c}[n_0(k,\omega)+\delta\omega(t)n_2(k,\omega)|E|^2] \tag{5}$$

式中:c 为光速,n_2 通常与频率相关,与三阶非线性电极化系数有关[15]。在非线性光学和群速色散的情况下,对 k 在 k_0、ω_0 和 $|E|^2=0$ 进行泰勒级数展开[16],得到公式:

$$k-k_0=\frac{\partial k}{\partial\omega}(\omega-\omega_0)+\frac{1}{2}\frac{\partial^2k}{\partial\omega^2}(\omega-\omega_0)^2+\cdots+\left.\frac{\partial k}{\partial|E|}\right|_{|E|^2}+\cdots \tag{6}$$

假设入射光场为准单色,采用慢变包络法[17]得出 $A(z,t)$ 所满足的方程为:

$$\mathrm{i}\gamma|A|^2A=\frac{\partial A}{\partial z}+\beta_1\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\mathrm{i}}{2}\beta_2\frac{\partial^2A}{\partial t^2}+\frac{\alpha}{2}A \tag{7}$$

式中:α 是光纤的损耗系数。β_1、β_2、γ 分别为:

$$\beta_1=\left.\frac{\partial k}{\partial\omega}\right|_{\omega_0},\quad \beta_2=\left.\frac{\partial^2k}{\partial\omega^2}\right|_{\omega_0},\quad \gamma=\frac{1}{2}\frac{\omega_0n_2}{c} \tag{8}$$

通过损失补偿,固定光孤子脉冲的形状和相位,增强信号的抗干扰性能,保证后期传输的准确性。

1.3　光孤子脉冲传输信号变分

基于光孤子脉冲损失补偿结果,固定光孤子脉冲的传输相位,通过变分处理优化传输信号质量。

假设脉冲振幅与基态脉冲振幅相近,光孤子脉冲传输信号的变分处理结果为:

$$R(U,U^*)=E(z,t)'\frac{\phi(U,U^*)\tau}{\delta U^* L_0} \tag{9}$$

式中:$E(z,t)'$表示方程(7)的右方。L_0 描述的是光孤子脉冲变分处理的拉格朗日密度,U^* 描述的是基态脉冲振幅 U 的共轭复数,δ 为通信过程中复杂约束项,τ 为脉冲振幅约束参数,ϕ 为滤波系数,表示为:

$$\tau=B(Z)(Z-T_0(Z)) \tag{10}$$

$$\phi=-f(\tau)K(A-T_0(Z))^2+\theta \tag{11}$$

式中:$f(\tau)=\exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right)$,$Z$、$B$、$K$、$T_0$ 和 θ 是脉冲的标准化幅度、标准化的脉宽倒数、标准化的角频移、标准化的时序抖动均方根和标准化的相位。通过传输信号变分抵消脉冲波动引起的失真,完成脉冲波动下光孤子脉冲通信传输优化。

2 实验分析

为了明确本文方法下光孤子脉冲通信传输特性的变化,进行实验分析。在某光纤通信系统中,使用光孤子脉冲作为信息传输的载体,引入色散、非线性等高阶微扰,研究应用设计方法后的光孤子脉冲传输特性。

应用 Thorlabs TLS0015 激光器、Thorlabs MZM2001 光调制器、Newport 818P-100-26 光探测器等设备。初始自相位调制下,激光器产生的激光波长为 1 550 nm、功率为 10 mW,使用激光器产生光脉冲并通过光调制器生成光孤子脉冲,根据光孤子脉冲传输信号变分调整激光器参数,啁啾参量为 1.5,峰值振幅为 1,1/e 强度的半宽为 2 fs。系统发射和接收高斯脉冲的示意图如图 1 所示。

在实际应用中,光信号需要在不同距离下传输,而不同距离可能引起传输特性的变化,如衰减、色散、非线性等问题。在光纤中传输高斯脉冲,引入设计方法获取不同距离下的飞秒光脉冲传输信号,验证设计方法的波动微扰抑制效果。

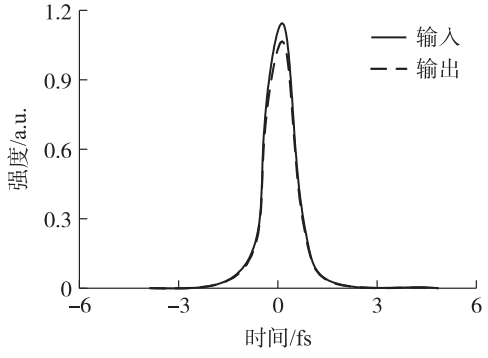


图 1 高斯脉冲曲线

距离为 0.1 km,应用设计方法后的光孤子脉冲传输结果如图 2 所示。

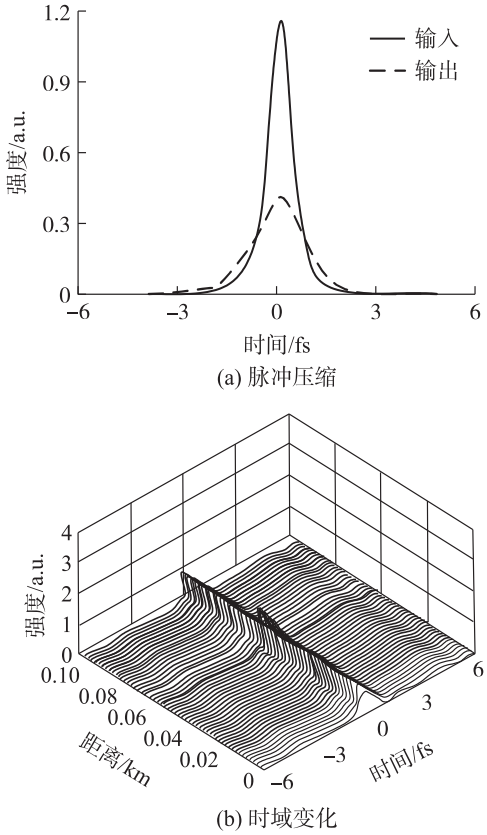
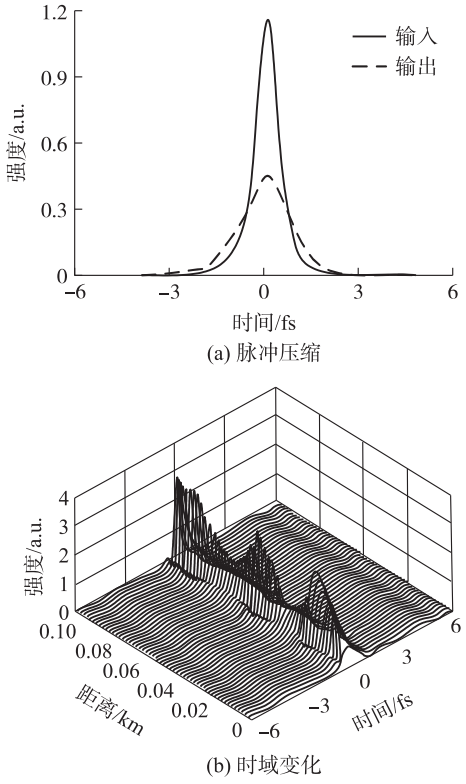


图 2 距离为 0.1 km 时飞秒光脉冲传输

由图 2 可知,在距离为 0.1 km 时,飞秒光脉冲传输过程中,经过设计方法后脉冲压缩输出的强度由 1.1 a.u.下降为 0.32 a.u.,这是因为设计方法建立光纤中光脉冲传播的非线性干扰过滤方程,对非线性效应进行抑制,降低输出脉冲强度。时域整体频率分布保持均匀,高斯脉冲在光纤传输过程中保持处于稳定频谱,未发生严重的扩展或损失。这是因为设计方法通过非线性相移的优化减小了光脉冲的领先相位调制效应和自相位调制效应,以此降低了脉冲的频谱扩展,从而在时域上保持频率成分相对稳定。

距离为 1 km,应用设计方法后的光孤子脉冲传输结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在距离为 1 km 时,飞秒光脉冲传输过程中,经过设计方法后脉冲压缩输出的强度明显降低,为 0.41 a.u.。随着距离的不断增加,波形中心在 0.06 km、0.09 km、0.10 km 处发生偏斜,信号形状发生扭曲。但是,在光纤传输过程中确认光孤子脉冲产生展宽和失真现象的反常色散区,抵消了由于色散导致的脉冲频谱畸变,降低了脉冲波动,使其波动低于 4 a.u.,不会影响远距离通信。



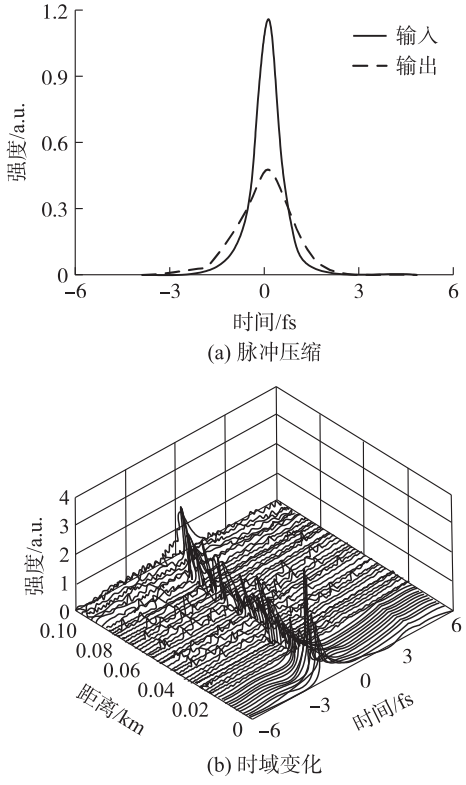
(a) 脉冲压缩

(b) 时域变化

图 3　距离为 1 km 的飞秒光脉冲传输

距离为 2 km,应用设计方法后的光孤子脉冲传输结果如图 4 所示。

由图 4 可知,在距离为 2 km 时,飞秒光脉冲传输过程中,经过设计方法后脉冲压缩输出的强度明显降低,为 0.37 a.u.。但是随着距离的不断增加,波形中心发生偏斜较频繁且信号形状扭曲幅度较大。这可能是由于光信号在大距离传输过程中经历了衰减和损耗,进而引起波形中心的偏离和扭曲。设计方法通过变分处理光孤子脉冲传输信号,优化了光纤传输过程中的通信传输效率,使其即使发生偏斜,脉冲波动也低于 4 a.u.。由此证明,设计方法在光孤子的传播中具有较好的作用。



(a) 脉冲压缩

(b) 时域变化

图 4　距离为 2 km 时的飞秒光脉冲传输

在光纤传输过程中,由于色散效应的存在,不同频率的光信号在光纤中传播速度不同,导致光信号的频谱在传输过程中会发生演化。归一化角频移指的是光信号的相位偏移与其载波频率之间的比值。当归一化角频移随距离的变化非常小或趋于零时,表示光信号频率成分随距离的变化比较平坦,在传输过程中频谱没有明显演化。当归一化角频移随距离的变化较大时,表示光信号频谱在传输过程中发生了明显的演化,部分频率成分被色散所影响。选择所提方法、文献[7]方法和文献[8]方法进行角频移随归一化距离的演化测试,结果如图 5 所示。

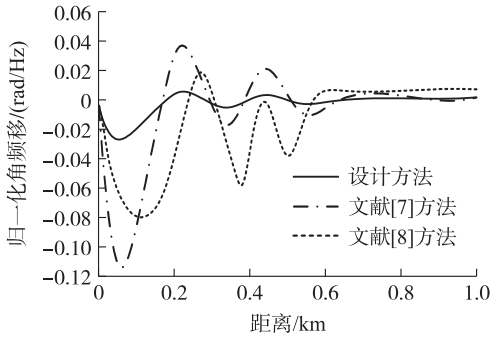


图 5　不同方法的角频移结果

由图 5 可知,不同方法随着传输距离逐渐趋于稳定,文献[7]方法在 0.1 km~0.2 km 时,时域脉冲形状变化较大,波动范围在-0.010~0.04 rad/Hz,这可能是因为随着距离的增加,色散效应导致不同频率的光信号传播速度不一致,造成脉冲形状的扩展。文献[8]方法时域脉冲整体波动较小,波动范围在-0.008 rad/Hz~0.02 rad/Hz,这可能是因为使用了超短光孤子脉冲和非线性分数阶 Lakshmanan-Porsezian-Daniel 方程进行波脉冲传输时,衍射效应对时域脉冲形状产生了一定程度的影响。而设计方法通过固定光孤子脉冲的形状和相位,确保在光纤传输过程中光信号的时频特性相对稳定,使频谱峰值不会发生显著的偏移或变化,波动范围在-0.02 rad/Hz~0.01 rad/Hz。由此证明,设计方法能够最小化色散效应,确保传输的信号保持较好的时频特性和频谱稳定性。

3 结论

为实现光孤子脉冲无色散、无失真、远距离传输,需要分析高阶波动微扰对光孤子脉冲通信传输特性的影响。本文基于光孤子的产生模式,明确产生展宽和失真现象的反常色散区,建立光学脉冲补偿损失方程,变分处理光孤子脉冲传输信号。实验结果证明,设计方法在不同飞秒光脉冲传输过程中,均具有较好的抗干扰性且角频移效果较优。

参考文献:

[1] 郑也,倪庆乐,张琳,等. 受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J]. 中国激光,2021,48(7):32-39.

[2] 史圣达,张巧芬. 基于色散渐减光纤环镜中脉冲对传输特性研究[J]. 光通信研究,2020(4):12-16,47.

[3] 任波,佘彦超,徐小凤,等. 高阶效应下对称三量子点系统中光孤子稳定性研究[J]. 物理学报,2021,70(22):97-104.

[4] 井晨睿,王朝晖,亓协兴,等. 飞秒激光脉冲在混合气体介质中传输特性研究[J]. 激光与红外,2022,52(10):1456-1460.

[5] 姜楠,李晓英,牛春晖,等. 大气湍流对激光空间传输特性影响的实验研究[J]. 激光技术,2022,46(5):708-712.

[6] 元志安,王玲,许可,等. 副载波调制脉冲激光雷达水下传输特性研究[J]. 红外与激光工程,2020,49(S2):175-182.

[7] 宋鹏,蔡媛敏,耿晓军,等. 基于粒子谱分布的无线紫外光通信散射传输特性研究[J]. 光谱学与光谱分析,2022,42(3):970-977.

[8] Khater M M A. Multi-Vector with Nonlocal and Non-Singular Kernel Ultrashort Optical Solitons Pulses Waves in Birefringent Fibers[J]. Chaos,Solitons & Fractals,2023,167(1):113098.

[9] Eid M M A,Mohammed A E N A,Rashed A N Z. Different Soliton Pulse Order Effects on the Fiber Communication Systems Performance Evaluation[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2021, 23(3):1485-1492.

[10] 杜传报,毛从光,崔志同,等. 无线通信系统电磁脉冲传导防护组件设计与有效性试验验证[J]. 强激光与粒子束,2021,33(9):73-80.

[11] 刘增华,冯雪健,任捷,等. 基于频率-波数分析的激光Lamb 波传播特性试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(22):70-78.

[12] 何沛南,何明友. 室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性分析与模拟[J]. 光通信技术,2020,44(7):11-14.

[13] 王天枢,张莹,于策,等. 非线性光谱展宽载波的湍流信道高速传输特性[J]. 通信学报,2021,42(1):172-177.

[14] 林鹏,王天枢,马万卓,等. 2.07 μm 光纤激光在弱湍流条件下的传输特性研究[J]. 光电工程,2020,47(3):72-78.

[15] 武丽,海洁. 光纤通信网络入侵干扰信号定位检测仿真[J]. 计算机仿真,2020,37(3):435-439.

[16] 王惠琴,杨顺信,李亚婷,等. 适合于大气激光通信的双空间调制[J]. 光学精密工程,2020,28(3):565-572.

[17] 朱四华,胡昊,刘锡国. 无线光通信编码调制的联合迭代停止方法[J]. 武汉理工大学学报,2021,43(9):56-62.

[18] 李春东,卞振宇,高源,等. 基于 SAW 抗干扰传输的无线传感器网络温测方法[J]. 压电与声光,2020,42(4):471-476.

王 聪(1983—),男,汉族,河南方城人,硕士,讲师,研究方向:电子通信,jjjeee2223@163.com;

王 帅(1984—),男,汉族,河南孟州人,博士,讲师,研究方向:光信息技术。