

# 无线扩频通信系统的调制信号无损传输优化技术

贺秀玲, 苏渤力

(防灾科技学院, 河北 廊坊 065201)

**摘 要:** 在无线扩频通信中, 调制信号传输容易受到多径信道的多途效应影响而产生码间干扰, 导致误码增大、信号传输失真, 对此提出一种基于被动时间反转镜技术的无线扩频通信系统的调制信号传输干扰抑制方法, 实现通信信号的无损传输. 首先构建无线扩频通信的多径信道模型, 采用分数间隔均衡技术进行信道均衡设计, 采用被动时间反转镜方法进行码间干扰抑制和盲源分离, 提高了无线扩频通信系统的调制信号的无损传输能力. 最后通过仿真实验进行性能测试, 结果表明, 采用该方法进行无线扩频通信系统设计, 信道的均衡性能较好, 码间干扰得到有效抑制, 通信误码率低于传统方法.

**关键词:** 无线扩频通信; 调制信号; 码间干扰; 信道均衡; 盲源分离

**中图分类号:** TN911

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2016)12-0147-05

## Optimization of Modulation Signal Lossless Transmission in Wireless Spread Spectrum Communication System

HE Xiu-ling, SU Bo-li

(Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China)

**Abstract:** In wireless spread spectrum communication in the modulation signal transmission is easily affected by the multi-path effect of multipath channel generated intersymbol interference, the error increases, the signal transmission distortion, a modulation signal transmission wireless spread spectrum communication system passive time reversal technique stem interference suppression method based on lossless transmission of communication signals, the first building the multipath channel model of wireless spread spectrum communication, channel equalization design using fractionally spaced equalization technology, the passive time reversal mirror method to suppress intersymbol interference and blind source separation, improve the ability of modulation signal lossless transmission wireless spread spectrum communication system. Finally, through the simulation experiment of performance test results show that by using this method in the design of wireless spread spectrum communication system, channel equalization performance better, intersymbol interference can be effectively suppressed, the communication error rate is lower than the traditional method.

**Key words:** wireless spread spectrum communication; modulation signal; inter symbol interference; channel equalization; blind source separation

### 1 引言

随着无线通信技术的快速发展,对无线通信的准确性和大容量性提出了更高的要求,无线扩频通信作为一种新型的通信技术,具有传输带宽大、保密

性强等优点受到大数据无线传输领域的重视. 采用无线扩频通信技术,结合无线电原理进行通信系统设计,实现对非平稳信号的远距离传输,实现信号的调制和解调,在信号传输过程中,采用调制信号处理方法将文字、语音、图像等信息转换成电信号和光信

号等,利用无线通信信号,实现扩频通信.可见,无线扩频通信在通信领域具有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>.

在无线扩频通信中调制信号传输容易受到多径信道的多途效应影响产生码间干扰,导致误码增大,信号传输失真,因此,需要对无线扩频通信系统中的调制信号进行无损传输优化设计,降低通信的误码率<sup>[3]</sup>.传统方法中,对无线扩频通信中调制信号的无损传输设计方法主要是通过信号干扰滤波和调制解调方面着手,如键控移相算法<sup>[4]</sup>、垂直线列阵空间波束形成方法和基于 BPSK 调制的干扰抑制方法,采用信道均衡设计进行通信信号传输优化,降低无线扩频通信的误比特率<sup>[5]</sup>,取得了一定的研究成果.其中,文献<sup>[6]</sup>中提出一种基于垂直线列阵空间增益调制的无线扩频通信信道频域均衡技术,实现通信的误码抑制和调制解调,经过 BPSK 调制实现无线扩频通信系统的多径干扰分离,抑制了通信过程中的多途效应,但是该方法存在接收信号漂移失真的问题,随着干扰强度的增强,通信传输的失真增大.针对传统方法的弊端,本文提出一种基于被动时间反转镜技术的无线扩频通信系统的调制信号传输干扰抑制方法,实现通信信号的无损传输,首先构建无线扩频通信的多径信道模型,然后进行信道均衡设计和码间干扰抑制设计,最后通过仿真实验进行性能测试,得出有效性结论.

## 2 信道模型及调制信号分析

### 2.1 无线扩频通信系统的信道模型

为了实现无线扩频通信系统中的调制信号无损传输和信道均衡设计,需要首先进行无线扩频通信通信系统的信道模型构建,假设无线扩频通信信道中的冲击响应为  $h(n)$ ,时延扩展的统计平均为  $n(n)$ ,输入的调制信号为  $y(n)$ ,信道均衡系统输出信号为  $\tilde{x}(n)$ ,以离散多径情况为例,得到扩频通信信道接收信号为

$$x(t) = \text{Re}\{a_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} s_l(t - \tau_n(t))e^{-j2\pi f_c t}\} \quad (1)$$

可见,接收信号为时变信号,过对无线扩频通信信道中传输的多径信号进行时间反转镜(Time Reversal Mirror, TRM)重组,得到通信信道的频域特性可描述为

$$c(\tau, t) = \sum_n a_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (2)$$

式中,  $a_n(t)$  是第  $n$  条路径的传播损失,  $\tau_n(t)$  为第  $n$  条路径的信道衰减系数,  $f_c$  为调制频率,  $s_l(t)$  为调制信号的噪声分量.由于扩频码序列所占的带宽

远大于所传信息的最小带宽,通过信号瞬时频率和时间的自适应均衡处理,得到无线扩频通信系统的多径信道的脉冲响应为

$$R(t) = \frac{\sqrt{WT}}{WT} \sin[\pi WT(1 - \frac{|\tau|}{T})] \cos(2\pi f_0 \tau) \quad (3)$$

式中,  $WT$  为起始频率一定的情况下的信道输出增益.设频带的扩展的扫频带宽为  $W$ ,线性调频信号的时间长度为  $T$ ,则有:

$$\beta = \frac{W}{T} \quad (4)$$

在扩频通信系统中,对接收信号作拷贝相关,接收机的带宽为  $W$ ,在采样时间间隔  $T_s$  内进行信号的连续检测,得到在通信信道中的回波模型为

$$f_i = f_0 + \beta t \quad (5)$$

式中,  $\beta$  为检测到的峰值位置.在不造成混淆的情况下,测量信道的时变特性,扩频通信信道模型可以描述为

$$TL = n \cdot 10 \lg r + \alpha r \quad (6)$$

式中,  $TL$  为无线扩频通信通信信道传播损失(dB),  $r$  为信道结构随时间的变化的衰减因子,  $n$  为码元个数.

在上述通信信道模型构建的基础上,采用窄带滤波器对输入扩频通信系统的信号进行滤波和盲源分离,结合自适应算法进行码间干扰抑制<sup>[7-9]</sup>,实现扩频通信的优化,总体设计结构框图如图 1 所示.

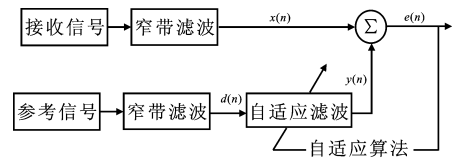


图 1 扩频通信系统的结构模型

### 2.2 调制信号的多径特性测量及信号分析

通过对无线扩频通信信道模型构建,进行信号分析实现调制信号的无损传输设计,采用多径特性测量方法进行调制信号分析,假设每条多径信道的调制信号传输的冲激响应表达式为

$$h(\tau_i, t) = \sum_{i=1}^{N_m} a_i(t) e^{j\theta_i} \delta(t - \tau_i(t)) \quad (7)$$

式中,  $a_i(t)$  为无线扩频通信各路径的归一化幅度,  $\tau_i(t)$  为多径分量的时间延迟,  $N_m$  为通信信道路径的条数.将要发送的调制信号用伪随机(PN)序列编码进行信道扩展和盲分离,各个路径到达接收机的传播衰减一致的情况下,采用 QAM 调制进行,初

始码元为  $C_0 = C_{N/2} = 0, C_{N-n} = C_n^*, n = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ , 直接序列扩频信号的部分传输序列为

$$\begin{cases} H_0: x'(t) = w(t) \\ H_1: \sqrt{E}s'(t) + w(t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq T \quad (8)$$

式中,  $x'(t)$  和  $s'(t)$  分别为

$$x'(t) = x(t) * h_w(t) \quad (9)$$

$$s'(t) = s(t) * h_w(t) \quad (10)$$

各路径与直达路径之间采用迅速跳频方法进行时延扩展,得到信道扩展的多径分量为

$$x_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} 2(a_n \cos \frac{2\pi kn}{N} - b_n \sin \frac{2\pi kn}{N})k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

如  $S_0(t) = a_0 \delta(t)$  到接收机时,采用自适应均衡调制得到输出的调制信号  $S(t)$  由传输信号的多径脉冲组成,表示为

$$S(t) = a_0 \sum_{i=1}^N a_i \delta(t - \tau_i) e^{j\omega_i t} \quad (12)$$

式中,  $N$  为扩频通信信道的路径个数,  $\tau_i$  和  $a_i$  分别为第  $i$  条无线扩频通信信道的频域衰减扩展系数,  $\omega_i$  为载频数,得到传输路径中的入射信号输出失真误差为

$$e(n) = d(n) - u^T(n)w(n) \quad (13)$$

采用键控移相技术 PSK 进行信道调制<sup>[10]</sup>,获得频域数据信号,扩频通信编码幅度调制的迭代式为

$$f(k+1) = f(k) - \mu \cdot \rho \cdot e_{MDMMA}(k) y^*(k) \quad (14)$$

式中,

$$e_{MDMMA}(k) = z(k) [ |z(k)|^2 - R_{MDMMA}(k) ] \quad (15)$$

式中,  $\rho$  为码元宽度,采用复数系数来准确模拟信道的脉冲响应,无线扩频通信系统接收到的信息码信号  $S_r(t)$  为

$$S_r(t) = S(t) * h(t) + n_s(t) \quad (16)$$

式中,  $n_s(t)$  为有限冲击响应滤波的噪声,当满足:

$$\rho =$$

$$\begin{cases} 1 & \text{sgn}(|z(k)|^2 - R_{MDMMA}(k)) = \text{sgn}(|z(k)|^2 - R) \\ 0 & \text{sgn}(|z(k)|^2 - R_{MDMMA}(k)) \neq \text{sgn}(|z(k)|^2 - R) \end{cases} \quad (17)$$

为了消除  $p(-t)$ ,需要使载波频率不断地跳变,计算无线扩频通信信道的微多径条件的幅度变化,将  $r'(t)$  与调制信号  $p(t)$  作卷积运算:

$$\begin{aligned} r(t) &= r'(t) * p(t) \\ &= S(t) * p(-t) * \delta(t) * p(t) + n(t) \\ &\cong S(t) * \delta(t) + n(t) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $n_i(t) = n_i(t) * p(t)$  为无线扩频通信信道的噪

声干扰项,近似为  $\delta(t)$ . 输出调制信号  $r'(t)$  再与扩频通信信号  $p(t)$  作盲卷积运算,实现对调制信号的被动时间反转镜处理,输出结果  $r(t)$  波形近似于原信息波形  $S(t)$ ,保障了调制信号的无损传输,根据上述设计原理,进行无线扩频通信系统的优化设计.

### 3 算法改进实现

#### 3.1 信道均衡

在上述进行了无线扩频通信系统的信道模型构建和信号分析的基础上,进行通信优化设计,通信信道在多途效应影响下产生码间干扰,导致误码增大,信号传输失真,对此,本文提出一种基于被动时间反转镜技术的无线扩频通信系统的调制信号传输干扰抑制方法,采用分数间隔均衡技术进行信道均衡设计,假设无线扩频通信系统在多途效应下的传输信号为

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} C_n \cdot e^{j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

信道具有快速时变衰落特性,把无线扩频通信的调制信号采用时频分解方法分解为正信号和负信号:

$$x_k^+ = \begin{cases} x_k & x_k \geq 0 \\ 0 & x_k < 0 \end{cases} \quad x_k^- = \begin{cases} x_k & x_k < 0 \\ 0 & x_k \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

在接收的脉冲之间产生信号叠加,引入限幅噪声,进行分数间隔均衡设计,采用自适应均衡技术得到独立衰落信道传输模型为

$$\begin{aligned} \{b'_1, b'_2, \dots, b'_v\} &= \underset{(b'_1, b'_2, \dots, b'_v)}{\operatorname{argmin}} \left( \max_{\sum_{v=1}^V b'_v \cdot x_v < 0, 1 \leq v \leq N} \right. \\ &\quad \left. \left| \sum_{v=1}^V b'_v \cdot x_v \right|^2 \right) \end{aligned} \quad (21)$$

采用适当合并构成总的接收信号得到  $x' = \sum_{v=1}^V b'_v x_v$ ,通过多个独立衰落信道传输进行分数间隔均衡设计,分数间隔均衡采样的幅度满足:

$$\tilde{y}_k^+ = \begin{cases} y_k^+, y_k^+ \geq 0 \\ y_k^+, y_k^+ < 0 \end{cases}, \quad \tilde{y}_k^- = \begin{cases} y_k^-, y_k^- \geq 0 \\ y_k^-, y_k^- < 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $\tilde{y}_k^+$  和  $\tilde{y}_k^-$  具有自相关性,采用相位偏移补偿方法进行幅度衰减抑制,其中,  $\tilde{y}_k^+$  和  $\tilde{y}_k^-$  中加权系数的幅度可以通过波特间隔均衡方法进行信道的失真补偿,若  $\tilde{y}_k^+ < \tilde{y}_k^-$ ,则  $\tilde{y}_k^-$  为信号,  $\tilde{y}_k^+$  为噪声,在有码间干扰的信道进行数据检测,均衡器检测到信号模型为

$$y_k = \begin{cases} -y_k^-, y_k^- > y_k^+ \\ y_k^+, y_k^+ \geq y_k^- \& y_k^- < \gamma \\ y_k^+ + y_k^-, y_k^+ \geq y_k^- \& y_k^- \geq \gamma \end{cases} \quad (23)$$

当  $\tilde{y}_k^- < \gamma$  时视为信道码间干扰所覆盖信息码元数, 当  $\tilde{y}_k^- \geq \gamma$  时称为被动时镜反转补偿信号. 采用  $T/2$  抽头间隔的均衡器对接收信号频谱进行均衡处理, 此时无线扩频通信信道的信道信息功率为

$$P_r = \frac{P_t}{(4\pi)^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2} \left[ 1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos\left(\frac{4\pi h^2}{d\lambda}\right) \right] \quad (24)$$

通过上述分析得知, 采用分数间隔均衡技术进行信道均衡处理, 降低了信道衰减损失, 避免了混叠效应产生的信道畸变.

### 3.2 码间干扰抑制及盲源分离

在进行信道均衡设计的基础上, 为了提高通信信号的无损传输能力, 采用被动时间反转镜方法进行码间干扰抑制和盲源分离, 无线扩频通信系统的被动时间反转镜的过程可以表达为

$$p_{ri}(t) = p(t) * h_i(t) + n_{pi}(t) \quad (25)$$

式中,  $h_i(t)$  表示接收信号频谱  $p(t)$  在传输过程中的冲激响应, 超出奈奎斯特频率以外的干扰信息通过时间镜反转进行干扰抑制, 时间镜反转的传递函数为

$$S_{ri}(t) = S(t) * h'_i(t) + n_{si}(t) \quad (26)$$

式中,  $h'_i(t)$  为通信系统中调制信号接收阵第  $i$  个阵元间的多径扩展冲激响应, 由此可得:

$$\begin{aligned} r'_i(t) &= S_{ri}(t) * p_{ri}(-t) \\ &= S(t) * p(-t) * h'_i(t) * h_i(-t) + n_{1i}(t) \end{aligned} \quad (27)$$

式中,

$$\begin{aligned} n_{1i}(t) &= S(t) * h'_i(t) * n_{pi}(-t) + \\ & n_{si}(t) * p(-t) * h_i(-t) + \\ & n_{si}(t) * n_{pi}(-t) \end{aligned} \quad (28)$$

由于多径结构较为复杂, 采用干扰抑制方法进行信号的盲源分离, 对接收信号作拷贝相关, 噪声干扰项分离后的信号输出为

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{i=1}^M r'_i(t) * p(t) \\ &= S(t) * p(t) * p(-t) * \sum_{i=1}^M h'_i(t) * \\ & h_i(-t) + \sum_{i=1}^M n_i(t) \end{aligned} \quad (29)$$

式中,  $n_i(t)$  也为噪声干扰项:  $n_i(t) = n_{1i}(t) * p(t)$ . 为了测量信道的时变特性, 对于多径特性的信道来说, 采取  $h_i(t)$  计算  $h'_i(t)$ , 通过被动时间镜反转, 得到  $h'_i(t) * h'_i(-t)$  的主峰相对较高, 输出的接收信号功率谱密度满足:

$$h'_i(t) * h_i(-t) \cong h'_i(t) * h'_i(-t) \cong \delta(t) \quad (30)$$

不同时刻对应的信道多径结构特征响应有

$$p(t) * p(-t) \cong \delta(t) \quad (31)$$

对无线扩频通信系统收、发节点间的信道冲激响应函数进行自适应加权处理, 得:

$$\begin{aligned} r(t) &\cong S(t) * \delta(t) * \sum_{i=1}^M \delta(t) + \sum_{i=1}^M n_i(t) \\ &= MS(t) + \sum_{i=1}^M n_i(t) \end{aligned} \quad (32)$$

通过对信道冲激响应函数的自相关函数进行频域估计, 信号  $S(t)$  经过的时反信道调制后输出的冲

激响应  $\hat{h}(t) = \sum_{i=1}^M h'_i(t) * h_i(-t)$  同  $p(t)$  具有异构性, 其等效反冲激响应函数应为

$$\begin{aligned} H(t) &= \hat{h}(t) * p(t) * p(-t) \\ &= \left( \sum_{i=1}^M h'_i(t) * h_i(-t) \right) * p(t) * p(-t) \end{aligned} \quad (33)$$

由于  $\hat{h}(t)$  与  $p(t) * p(-t)$  近似于  $\delta(t)$  的相干多途信道, 采用被动时间反转镜方法进行码间干扰抑制和盲源分离, 能有效实现对调制信号的无损传输, 降低通信的误码率.

## 4 仿真实验分析

通过仿真实验分析本文方法在改进无线扩频通信网络的通信质量的应用性能, 构建无线扩频通信网络通信系统, 输入的通信信号为频带为 23~25 kHz、时宽为 5 ms 的 LFM 信号, BPSK 调制载波采用频率为 10 kHz 的正弦信号, 多径扩展时间为 170.6 ms, 调制信号  $p(t)$  采用频带为 2~10 kHz、时宽为 4 ms 的线性调频信号, 码间干扰的信噪比为 -10 dB,  $H(t)$  的  $\delta(t)$  相似度为 0.23, 信号自相关频谱密度为 3.23 dB, 根据上述仿真环境和参数设定, 得到无线扩频通信系统输入的调制信号时域波形如图 2 所示.

从图 2 可见, 扩频通信系统输入的调制信号受到多径信道的多途效应影响产生码间干扰, 引起频域混叠, 影响了通信信道的均衡, 采用本文方法进行信道均衡设计和干扰抑制, 得到在进行码间干扰抑制前和抑制后的通信信道的冲激响应脉冲信号如图 3 所示.

从图 3 仿真结果分析可知, 采用本文方法进行码间干扰抑制, 实现对通信调制信号的盲源分离, 提高了信道的均衡性能, 具有较为干净的冲激响应脉冲输出, 实现信号的无损传输, 最后为了对比算法性

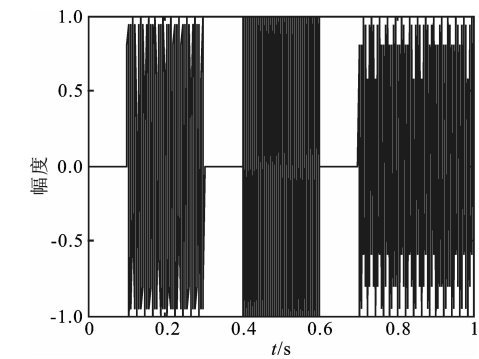
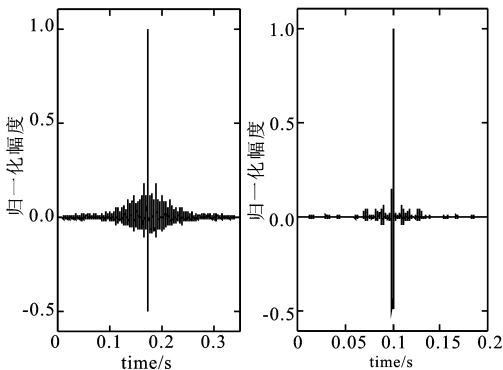


图2 扩频通信系统输入的调制信号时域波形



(a) 干扰抑制前 (b) 干扰抑制后

图3 通信信道的冲激响应脉冲

能,采用不同方法进行1 000次实验取平均值,得到通信调制信号传输的误码率对比结果如图4所示。

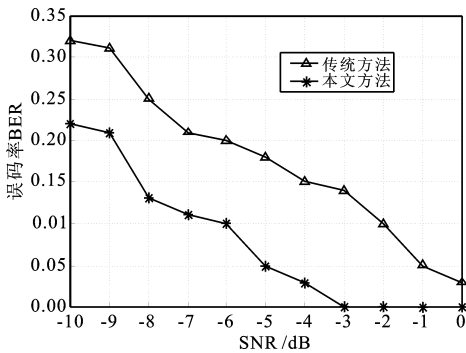


图4 误码率对比结果

对上述仿真结果进行数据整理分析得知,采用本文方法进行无线扩频通信系统设计,可消除多途效应影响下的多径信道码间干扰,使的信道均衡效果近似理想水平,降低通信误码率,实现信号的无损传输。

5 结束语

对无线扩频通信系统中的调制信号进行无损传输优化设计,降低通信的误码率,本文提出一种基于

被动时间反转镜技术的无线扩频通信系统的调制信号传输干扰抑制方法,构建无线扩频通信的多径信道模型,采用分数间隔均衡技术进行信道均衡设计,采用被动时间反转镜方法进行码间干扰抑制和盲源分离,提高无线扩频通信系统的调制信号的无损传输能力。研究表明,采用本文方法进行无线扩频通信系统设计的信道均衡能力较好,码间干扰得到有效抑制,通信误码率低于传统方法,调制信号的无损传输得到有效实现。

参考文献:

[1] 王爱珍,侯成郭,任国风. 直接序列扩频的分层级联随机共振接收算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 934-937,959.

[2] 李啸天,雷菁,刘伟,等. 平坦慢衰落信道下基于 HOS 的 PSK 调制盲信道估计[J]. 通信学报, 2015,36(5): 1-8.

[3] 程德芳,徐小华,于娜. 相干光通信链路外差接收技术研究[J]. 激光杂志,2016,37(2):125-127.

[4] 武为江,蒲涛,朱华涛,等. 基于波长选择开关的 OCD-MA 编解码系统实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1):116-121.

[5] 方水平. 可调 RF 信号光传输系统相位噪声优化设计[J]. 激光技术, 2016, 40(4): 582-585.

[6] 刘家亮,王海燕,姜喆,等. 垂直线阵列结构对 PTRM 阵处理空间增益的影响[J]. 鱼雷技术, 2010,18(4): 263-267.

[7] 郭静波,谭博,蔡雄. 基于反相双峰指数模型的微弱瞬态极低频信号的估计与检测[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(8):1682-1691.

[8] 程艳合,杨文革. 压缩域直扩测控通信信号伪码跟踪方法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 2028-2032.

[9] 范有臣,赵洪利,孙华燕,等. 激光主动成像结合距离选通技术的零时信号测量方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 1-7.

[10] 乔良,辛吉荣,郑辉. 单载波通信系统的迭代频域合成均衡算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1950-1956.

作者简介:

贺秀玲 女,(1975-),副教授.研究方向为通信技术与信息处理. E-mail:licewhet@163.com.

苏渤力 女,(1989-),满族,硕士,助教.研究方向为振动检测,信号处理.