

文章编号:1001-5078(2022)06-0875-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于子波变换的无线网络干扰信号检测研究

王晓惠,冯彩英

(商丘工学院,河南 商丘 476000)

摘要:在冗杂环境下,为有效识别无线网络干扰信号,提出基于子波变换的无线网络干扰信号检测研究。将干扰信号分为单音、多音、调频等类型,利用射线模型描述通信信道损失,确立噪声影响下的干扰信号结构,提取信号时频分布特征;在子波变换过程引入阈值滤波算法,将噪声投影在不同子波空间中,合理设置阈值,计算新的变换系数,实现信号去噪;采用混沌循环谱方法,将干扰信号检测转换为二元假设检验问题,获取二阶时变检测函数,计算决策量,结合门限值完成干扰信号检测。实验结果表明,该方法能够有效过滤噪声,检测出的干扰信号波形与频率与实际情况相符。

关键词:子波变换;无线网络;干扰信号检测;混沌循环谱;阈值去噪

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.013

Research on interference signal detection based on wavelet transform in wireless communication network

WANG Xiao-hui, FENG Cai-ying

(Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In order to effectively identify the interference signal of wireless communication network in the cluttered environment, the detection of interference signal of wireless communication network based on wavelet transform is proposed in this paper. The interference signal is divided into single tone, multi tone, frequency modulation and other types. The ray model is used to describe the loss of communication channel, establish the interference signal structure under the influence of noise, and extract the time-frequency distribution characteristics of signal. Threshold filtering algorithm is introduced in the wavelet transform process. Noise is projected into different wavelet spaces, the threshold is reasonably set and the new transformation coefficient is calculated to achieve signal denoising. The chaotic cyclic spectrum method is used to transform the interference signal detection into a binary hypothesis testing problem. The second-order time-varying detection function is obtained, and the decision quantity is calculated. Combined with the threshold value, the interference signal detection is completed. The experimental results show that the proposed method can effectively filter the noise, and the detected interference signal waveform and frequency are consistent with the actual situation.

Keywords: wavelet transform; wireless communication network; interference signal detection; chaos cycle spectrum; threshold denoising

基金项目:河南省学科专业建设资助项目(No. 教办政法[2022]162号)资助。

作者简介:王晓惠(1988-),女,硕士,讲师,研究方向为信号处理电路与系统。E-mail: djiaxianply@163.com

收稿日期:2021-08-13

1 引言

计算机技术的不断发展使无线网络逐渐发展为新兴传感网络,在家居、医疗等领域得到广泛应用。无线通信是完成信息传输的重要方式,但由于电磁环境的复杂性与网络自身的脆弱性,使其经常受到各类噪声与人为干扰信号影响。导致正常信号被淹没,降低信息传输能力,提高通信误码率。若能准确检测出干扰信号,便有助于及时采取合理措施,避免干扰,减少对通信质量的破坏。传统干扰信号检测方法是利用人工进行特征提取,数据预处理任务量较大,无法保证特征完全被获取,可能丢失有价值的信息。

为解决上述问题,文献[1]提出一种应用形态学自适应门限的干扰信号检测算法。估计信号谱线的功率谱大小,采用形态学方法对其做预处理;结合信号功率谱分布状况确定门限值,达到门限自适应目的,为检测不同信号类型提供参考。文献[2]利用模糊聚类方法完成干扰信号检测。针对干扰信号在时域与频域等维度构建参数特征集合,将决策树算法与模糊均值聚类相结合,确定决策树节点分支数量,降低算法复杂度;利用信息增益方法建立模糊聚类决策树,通过此决策树完成干扰信号自动检测。

但上述两种算法没有对无线网络中的其他噪声进行处理,而是直接实现干扰信号检测。这会导致干扰信号的某些细节特征被噪声覆盖,影响检测效果。为解决这一问题,本文基于子波变换对无线网络中的干扰信号进行检测。建立不同干扰信号的数学模型与信道模型,获取噪声影响下干扰信号时频分布特征,利用在子波变换下噪声与信号的不同特征,实现噪声去除,提高干扰信号检测效果。

2 无线通信干扰信号模型

2.1 干扰信号类型划分

无线通信过程中的干扰信号主要包括压制式^[3]与欺骗式^[4]等,其中后者比较难生成。因此本文对如下几种经典压制式干扰信号进行详细分析,确定它们的时域表达式。

(1) 单音干扰

实质上属于正弦信号,描述时域的公式如下:

$$J(t) = A \exp(j(2\pi f_c t + \phi)) \quad (1)$$

式中, A 表示干扰幅度; f_c 属于干扰频率; ϕ 是原始

相位。

(2) 多音干扰

包括很多单音干扰,时域表达式如下:

$$J(t) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(j(2\pi f_m t + \phi_m)) \quad (2)$$

式中, A_m , f_m 与 ϕ_m 表示多音干扰的第 m 个音调具有的幅度、频率以及原始相位^[5]。

(3) 调频干扰

调频干扰的频率和调制电压 $\xi(t)$ 之间存在线性关系,表述时域的公式如下:

$$J(t) = A \exp\left(j\left(2\pi f_c t + k_{f_m} \int_0^t \xi(t') dt'\right)\right) \quad (3)$$

公式, k_{f_m} 属于调频系数; $\xi(t')$ 是平均值等于零且方差是 σ_n^2 的高斯噪声。

(4) 扫频干扰

扫频干扰的信号频率与时间因素之间存在线性关系,时域公式如下:

$$J(t) = A \exp(j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \phi)) \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

式中, f_0 表示初始频率; k 代表扫频速度。

(5) 脉冲干扰

脉冲干扰的时域描述式如下:

$$J(t) = \begin{cases} p(t), & 0 < t \leq \tau \\ 0, & \tau < t < T_p \end{cases} \quad (5)$$

公式中, τ 代表脉冲连续时长; T_p 描述周期, $p(t)$ 满足高斯分布。

2.2 无线通信信道模型

无线通信网络信道具有多元组织特征,覆盖范围较广,系统结构复杂。由于介质会大量吸收电磁波信息且在波阵面中进行扩展,所以通信信道比较复杂。本文先利用传播损失^[6]表示通信时出现的能量损失,建立通信信道模型。传播损失包括扩展与衰减损失两种,通过射线模型对传播损失进行表示,表达式如下:

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

式中, TL 代表信道中传播损失,属于传播因子。由此获得噪声干扰下信道中电磁波的吸收系数 α 和频率 f 二者存在的经验公式:

$$\alpha = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003 \quad (7)$$

通过上述公式获取吸收系数和频率之间存在的联系,描述了噪声影响下无线通信信道的具体状况。

2.3 干扰信号模型

为研究无线通信网络中干扰信号的检测方法,需先假定干扰信号来自于调零天线,通过构建干扰信号模型,完成特征提取。若通信系统阵列是 $N + 1$ 阵元组成的均匀阵线,采取单元散射混响统计方式完成包络统计,以球面扩展形式抵达界面,同时将旋转角当作核心变量,确立如下噪声影响下的干扰信号结构:

$$x(n) = s(n) + v(n) = \omega_{k-1}^{(i)} \frac{P(y_k | X_k^{(i)}, Y_{k-1})P(x_k^{(i)} | X_{k-1}^{(i)}, Y_{k-1})}{q(x_k^{(i)})} \quad (8)$$

式中, $s(n)$ 代表噪声影响下干扰信号的实信号; $v(n)$ 为噪声分量; ω 描述干扰信号高阶累积量展现出来的频谱特性^[7]。对上述干扰信号模型做时频分析,获取去特征向量,确定干扰信号时频特性分布状况:

$$B^2 = \frac{4\pi}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} (v - v_m)^2 |X(v)|^2 dv \quad (9)$$

$$T^2 = \frac{4\pi}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_m)^2 |X(t)|^2 dt \quad (10)$$

式中, $X(t)$ 为干扰信号时域特性; E_x 代表信号能量; v 描述原始状态矢量。结合以上研究,建立干扰信号的解析模型:

$$z_i = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (11)$$

式中, z_i 代表捕捉数据; $x(t)$ 为干扰信号实部特征分量; $\theta(t)$ 描述高频分量。将此作为基础对干扰信号检测算法进行研究,为信号检测提供精准的信息输入基础。

3 基于子波变换的干扰信号检测

3.1 子波变换过程分析

假设 $f'(x') \in L(R^2)$, 则 $f'(x')$ 具有的子波变换形式为:

$$W_a x'(t') = x'(t') \cdot \psi_a = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \psi \frac{t' - \tau}{a} d\tau \quad (12)$$

式中, $\psi(t')$ 代表母波函数^[8], $\psi_a(t') = \frac{\psi}{a^2}$ 。

为方便计算,在现实中会对尺度 a 做二进制离散处理,二进制子波变换公式如下:

$$W_2^j x'(t') = \frac{1}{2^j} \int_{-\infty}^{+\infty} x'(\tau) \psi \frac{t' - \tau}{2^j} d\tau \quad (13)$$

假设 $\psi(\omega)$ 属于 $\psi(t')$ 的傅里叶变换形式, A 与 B 均为正常数,如果子波 $\psi_2^j(x')$ 符合如下要求:

$$A \leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} \psi(2^{-j\omega})^2 \leq B \quad (14)$$

则会对子波 $R(t')$ 进行重建,确保下述公式成立:

$$x'(t') = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W_2^j x'(t') \cdot R_2^j(t') \quad (15)$$

式中:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} \psi(2^{j\omega}) R(2^{j\omega}) = 1 \quad (16)$$

3.2 基于子波变换的干扰信号去噪

在上述子波变换过程中,信号与噪声会展现出完全不同的两种性质。相关研究中指出了子波变换与信号干扰性的 Lipschitz 指数之间存在的关联:若函数 $f'(t')$ 的指数 $a' > 0$, 此时 $f'(t')$ 的变换系数持续增长;相反如果 $a' < 0$, $f'(t')$ 的变换系数会随尺度的增大呈现递减趋势。通常而言,干扰信号的 Lipschitz 指数 $a' > 0$, 而各类噪声的 Lipschitz 指数 $a' < 0$ 。在无线通信过程中会出现随机扰动现象,通过中心极限理论得出:此种扰动源于高斯白噪声。所以可认定上述构建的含噪干扰信号模型属于初始信号与高斯白噪声的混合。干扰信号与噪声在尺度不同的子波变换过程中体现出的特征相反,同时随着尺度扩大,干扰信号与噪声的子波系数分别呈现出递增与递减趋势。因此,子波变换能够很好地完成信噪分离。

假设 $N(t') : N(0, \sigma^2)$, 则可得出:

$$W_a N(t') = N\left(0, \frac{\sigma^2 \|\psi\|^2}{a'}\right) \quad (17)$$

上述公式指出噪声的子波变换幅度和尺度具有反比关系。当尺度为 2^j 时,噪声变换尺度的最大值密度计算公式如下:

$$ds = \frac{1}{2^j \pi} \frac{\|\psi^{(2)}\|}{\|\psi^{(1)}\|} + \frac{\|\psi^{(1)}\|}{\|\psi\|} \quad (18)$$

式中, $\psi^{(2)}$ 与 $\psi^{(1)}$ 分别代表 $\psi(t')$ 的二阶与一阶导数。

由此可知,对于噪声而言,尺度每扩大一倍,最大值数量缩小到原来的二分之一。与信号干扰点相对的子波变换最大值由于尺度的增大,其幅度也随

之扩大。通过获得子波变换最大值点的幅度变换规律,即可区分噪声的最大值点与干扰信号的最大值点。但只通过此种方式进行去噪存在一定缺陷,因子波变换的性质较为特殊,携带噪声的干扰信号在进行子波变换过程中,噪声的变换系数大多聚集到小尺度中,而干扰信号的变换系数一般在大尺度上汇聚。

为解决以上问题,本文对子波变换的滤波算法进行改进。引入阈值去噪方法,选择恰当阈值 μ_i ,将小于 μ_i 的系数设置为零,并保存大于 μ_i 的子波系数,通过阈值处理后即可获得干扰信号子波系数的估计值。由此可见,阈值与子波变换相结合的去噪方法是在变换系数很大的基础上进行假设的。如果噪声系数大且信号变换系数小,此时使用阈值去噪算法容易将干扰信号当作噪声,提高虚警率。在子波变换过程中,小尺度的噪声系数很有可能比干扰信号子波系数大。因为不能事先掌握信号与噪声的分布状况,故将两种方法相结合,避免了阈值去噪造成的较高虚警率^[9]。

假设长度是 M 的观测序列表示为:

$$X'(j) = S(j) + N'(j) \quad (19)$$

式中, $S(j)$ 代表初始信号序列; $N'(j)$ 表示均值等于零且方差是 σ^2 的噪声。

步骤一:针对观测序列 X' 做子波变换,获取子波系数 D_i ;

步骤二:对于尺度是 $i = 1$ 的变换系数 D_1 ,使用其传播特性完成搜索,获取满足噪声特征的点,同时设置这些点的系数等于 0,其他点的系数不发生变化,此时生成新的系数,依然表示为 D_1 ;

步骤三:各类噪声在不同子波空间上进行投影,计算其新的方差:

$$\sigma_i = \begin{cases} \text{med}(\text{abs}(D_j)); |D_j| > 0 \\ 0; |D_j| = 0 \end{cases} \quad (20)$$

确定如下阈值:

$$\mu_i = \sigma_i (2 \ln M)^{1/2} \quad (21)$$

步骤四:设置阈值去噪的表达式如下:

$$D_{\text{new}} = \begin{cases} \text{sign}(D_i)(|D_i| - \mu_i); |D_i| \geq \mu \\ 0; |D_i| < \mu \end{cases} \quad (22)$$

步骤五:针对全部子波系数使用公式(22)完成阈值处理,获取新的子波变换系数 D_{new} ;

步骤六:完成子波逆变换操作,获取最终去噪后

的干扰信号。

由于尺度的逐渐增大,干扰信号中低频部分会获得很好的去噪效果,这时初始信号中的能量高于噪声能量,若保持尺度一直增加,对信号去除效果不会产生实际意义。为此,本文将取 $1 \leq i \leq 5$ 。

3.3 干扰信号检测

在获得无噪声影响的干扰信号后,将混沌循环谱理论当作依据,判断无线通信网络信号是否出现非零循环频率^[10]标准,若出现则判定其为干扰信号。具体检测方法如下。

如果 $\{y(t')\}_{t'=0}^{T-1}$ 表示有限长的无线通信网络观测信息, $S(t')$ 为干扰信号,将非零循环频率 $M(t'_0)$ 当作标准,对干扰信号检测问题变换成二元假设检验问题,并通过下述公式描述:

$$H_0: y(t') = \frac{n(t') \cdot \{y(t')\}_{t'=0}^{T-1}}{M(t'_0)} \quad (23)$$

式中, $n(t')$ 为平稳噪声。

假定 $\{y(t')\}_{t'=0}^{T-1}$ 中存在干扰信号,通过下述公式表示其二阶时变检测函数:

$$R_y(t', t') = \frac{E\{y(t')y(t'+t')\}}{H_0: y(t')} \{y(t')\}_{t'=0}^{T-1} \quad (24)$$

式中, $y(t'+t')$ 表示窗函数,且 $y(t')$ 可描述频域的平滑宽度; E 为周期函数。

若 β 表示循环频率, $R_y(\beta, \gamma)$ 描述循环谱密度函数,利用某统计量来评估 $R_y(\beta, \gamma)$,同时构建二维行矢量,通过以下公式表示:

$$R_y^{(T)} = [\text{Re}\{R_y(t', t')\} \{\text{Im}R_y(\beta, \gamma)\}] \quad (25)$$

综上所述,计算干扰信号检测的决策量:

$$r_e = \frac{TR_s^{(T)} \sum_R^{-1} R_x^{(T)'}}{R_y(t', t')} \quad (26)$$

式中, \sum_R^{-1} 描述广义逆计算; $R_x^{(T)'}$ 表示 $R_x^{(T)}$ 的转置形式。

$R_x^{(T)'}$ 若满足正态分布, $R_y^{(T)}$ 则满足平均值等于零的渐进正态分布,此时 r_e 满足自由度为 2 的 χ^2 分布。如果利用 p_{fa} 描述虚警率,其计算公式如下:

$$p_{fa} = \frac{\beta \cdot \text{pr}T'H_0 \times \chi^2}{R^{(T)' \cdot p_{fa}}} \quad (27)$$

式中, T' 属于门限,对 χ^2 做中心化处理即可获取该值。利用下述公式即可完成干扰信号检测:

$$\begin{cases} H_0: y(t') = n(t') \cdot r_R \leq \Gamma \cdot p_{fa} \\ H_1: y(t') = \frac{s(t') \cdot n(t') \cdot r_R}{H_0: y(t')} \geq \Gamma \end{cases} \quad (28)$$

4 仿真实验数据分析与研究

此次仿真实验环境为：硬件环境是 GeForce GTX 1080TI, 仿真软件是 Matlab, 其可以生成仿真数据。实验过程中采样频率是 15 MHz, 添加的干扰信号参数如表 1 所示。

表 1 干扰信号参数表

Tab. 1 Interference signal parameters table

干扰类型	参数设置
单音	频点位置为随机分布
多音	音调数量设置为 5 ~ 15 个
调频	调频系数为 0.125 ~ 0.933 Hz/s
扫频	带宽因子为 0.5 ~ 1
脉冲	脉冲持续时间为 0.5 ~ 10.8 s

首先向仿真网络中添加高斯白噪声, 利用本文的子波变换与阈值滤波相结合的算法对无线通信信号中的噪声进行过滤, 过滤效果如下。

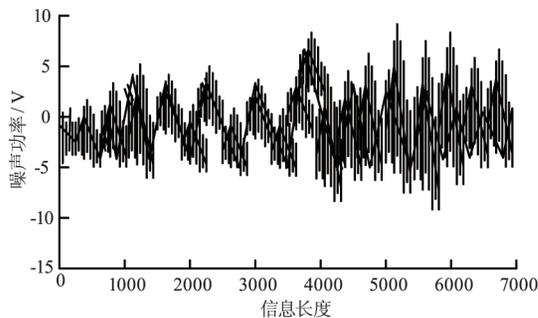


图 1 初始干扰信号波形图

Fig. 1 Initial interference signal waveform

图 2 和图 3 分别展示了初始干扰信号波形与去噪后的干扰信号波形, 从中可以看出, 本文去噪算法能够有效去除通信过程中产生的噪声, 使干扰信号更加明显, 进而提高检测效果。

在信号检测实验中, 信号波形与频率是验证检测算法的重要依据, 分别对 5 种不同干扰信号进行检测, 以其中脉冲干扰为例, 利用本文方法、文献 [1] 与文献 [2] 方法进行检测, 不同方法的检测结果如图 3 所示。

由图 3 能够看出, 本文检测出的干扰信号波形与频率与实际干扰信号存在高度相似性, 而文献 [1] 方法的频率区间与实际频率具有较大差别, 文

献 [2] 方法在检测后期由于噪声干扰等因素无法识别出干扰信号。这说明, 本文的检测方法通过合理设置各类信号门限, 准确检测出干扰信号。

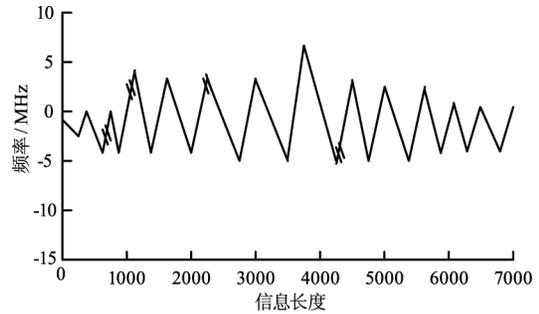
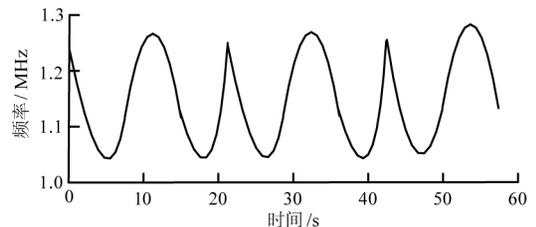
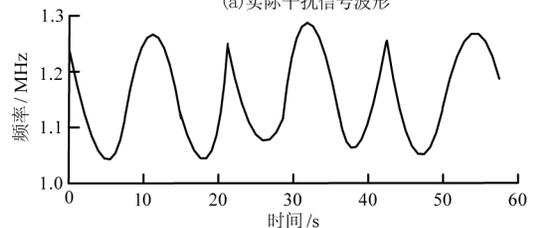


图 2 去噪后的干扰信号波形图

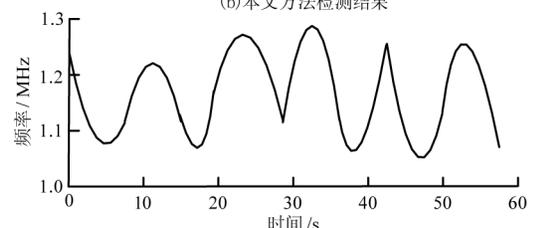
Fig. 2 The waveform of the interference signal after denoising



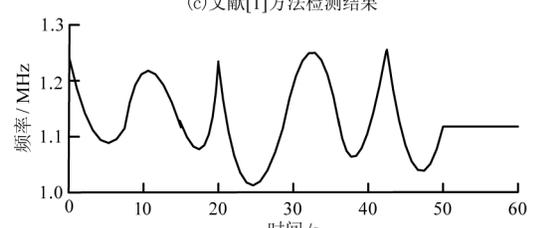
(a) 实际干扰信号波形



(b) 本文方法检测结果



(c) 文献 [1] 方法检测结果



(d) 文献 [2] 方法检测结果

图 3 不同方法的干扰信号检测结果图

Fig. 3 Interference signal detection results of different methods

5 结论

为提高无线通信质量, 便于及时采取抗干扰策略, 提出基于子波变换的干扰信号检测方法。对于五种不同类型的干扰信号模型, 将子波变换与阈值

去噪相结合过滤信道中的噪声,再通过混沌循环谱方式有效检测出通信网络中的干扰信号。仿真实验表明,该方法不需要依赖人工特征提取,减少复杂度,且检测出的干扰信号较为准确。但是本文研究的干扰类型均为压制式,针对其他类型并没有进行深入研究,在更为复杂的信道环境下进行干扰信号检测是未来工作的重点。

参考文献:

- [1] Zhao Xiaodi, Li Fang, Xiong Jun, et al. Adaptive threshold interference detection algorithm using morphology [J]. *Signal Processing*, 2020, 36(4): 593 - 601.
赵肖迪, 李芳, 熊俊, 等. 应用形态学的自适应门限干扰检测算法[J]. *信号处理*, 2020, 36(4): 593 - 601.
- [2] Wei Yuning, Zhang Jindong, Li Yong, et al. Automatic design method of decision tree for radar jamming signal recognition [J]. *Electro-Optics and Control*, 2020, 27(4): 82 - 86.
魏煜宁, 张劲东, 李勇, 等. 雷达干扰信号识别决策树的自动化设计方法[J]. *电光与控制*, 2020, 27(4): 82 - 86.
- [3] Zhao Xiaoming, Li Shiyang, Zhang Yue, et al. Frequency division modulation detection method of hemispherical resonant gyroscope signal suppressing coupling interference [J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2020, 28(1): 94 - 99.
赵小明, 李世杨, 张悦, 等. 抑制耦合干扰的半球谐振陀螺信号分频调制检测方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(1): 94 - 99.
- [4] Zou Peng. Signal transmission quality detection method of ship communication network under strong interference [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(4): 109 - 111.
邹鹏. 强干扰下舰船通信网络信号传输质量检测方法[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(4): 109 - 111.
- [5] Liu Kang, Liu Lu, Yang Chonghai, et al. Interference processing and signal detection algorithm for full-duplex dual-channel relay network [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2020, 42(2): 129 - 136.
刘康, 刘璐, 杨崇海, 等. 全双工双通路中继网络干扰处理与信号检测算法[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2020, 42(2): 129 - 136.
- [6] Pang Tianyang, Li Yonggui, Niu Yingtao, et al. Structural data jamming detection method based on block code [J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(10): 155 - 159.
逢天洋, 李永贵, 牛英滔, 等. 基于分组码的结构性数据干扰检测方法[J]. *计算机工程*, 2019, 45(10): 155 - 159.
- [7] Xie Tian, Gao Shishun, Zhao Haitao, et al. Anti-jamming resource scheduling algorithm for directional wireless communication network based on reinforcement learning [J]. *Journal of Radio Wave Science*, 2020, 35(4): 531 - 541.
谢添, 高士顺, 赵海涛, 等. 基于强化学习的定向无线通信网络抗干扰资源调度算法[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(4): 531 - 541.
- [8] Li Bin. Optimization scheme for high-speed railway wireless communication network based on MEC [J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(11): 88 - 95.
李斌. 基于 MEC 的高速铁路无线通信网络优化方案[J]. *电信科学*, 2019, 35(11): 88 - 95.
- [9] Wang Jinlong, Xu Yuhua, Chen Jin. Intelligent spectrum coordination and confrontation in wireless communication network [J]. *Science in China: Information Science*, 2020, 50(11): 1767 - 1780.
王金龙, 徐煜华, 陈瑾. 无线通信网络智能频谱协同与对抗[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(11): 1767 - 1780.
- [10] Han Cunwu, Tong Wei, Li Mengqi, et al. Overview of power and rate control in wireless communication networks [J]. *High-Tech Communications*, 2019, 29(6): 530 - 538.
韩存武, 童薇, 李梦奇, 等. 无线通信网络的功率和速率控制综述[J]. *高技术通讯*, 2019, 29(6): 530 - 538.