

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.09.010

一种适用于超宽带脉冲信号检测的改进 CUSUM 算法^{*}

宋晓鸥^{**}

(西安武警工程大学 信息工程系,西安 710086)

摘 要:将最快检测技术应用于超宽带脉冲信号检测中,具体采用改进的 CUSUM(Cumulative Sum)算法来检测超宽带脉冲信号。首先分析了经过多径信道衰减后的超宽带脉冲信号概率分布特性,进一步提出了适用于超宽带脉冲信号检测的改进 CUSUM 算法。理论分析和仿真证明了所提改进算法性能优越且实现复杂度低。该算法克服了块检测算法的信噪比门限效应,且具有最优的检测延迟性能,相同虚警限制下其检测性能明显优于能量检测算法。

关键词:超宽带脉冲;最快检测;累积和算法;多径信道;检测延迟概率

中图分类号:TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)09-1169-06

An Improved CUSUM Algorithm for UWB Pulse Signal Detection

SONG Xiao-ou

(Department of Information Engineering, Xi'an Armed Police Engineering University, Xi'an 710086, China)

Abstract: Quickest detection technology or exactly the improved Cumulative Sum(CUSUM) is applied to ultra-wide band(UWB) signal detection. First, the UWB pulse signal distribution after multi-path fading channel is analyzed. Then an improved CUSUM algorithm adaptive to UWB pulse signal detection is proposed. Both theoretical analysis and simulations prove that the improved algorithm conquers the SNR wall phenomenon, with small detection delay and low realization complexity. Under the same false alarm constraint, the detection performance of proposed algorithm is much better than that of energy detection.

Key words: ultra-wide band (UWB) pulse; quickest detection; cumulative sum (CUSUM) algorithm; multi-path fading channel; detection delay probability

1 引 言

超宽带脉冲无线电(Ultra-Wideband Impulse Radio, UWB-IR)技术^[1]采用短时脉冲信号传递信息,由于短时脉冲信号频带宽、功率谱密度低、时域分辨率高,因此超宽带脉冲无线电可以与现有无线电系统共用频带来提高频带利用率,并且具备很强的抗多径衰落能力。为了充分发挥超宽带脉冲无线电的优势,需要复杂度低、实用性强的超宽带脉冲信号检测技术予以支持。现有的超宽带脉冲信号检测技术

可以分为相关检测和非相关检测两大类^[2]。相关检测算法主要有基于 RAKE 接收的信号检测算法^[3]和基于发送参考(Transmit Reference, TR)的信号检测算法^[4]。但 RAKE 接收机需要极高的采样频率、准确的信道估计和大量的多径支路才能在一定的时间范围内累积足够的信号能量,这在实际应用中是很难实现的。发送参考(Transmit Reference, TR)属于自相关检测技术,其一定程度降低了对采样频率和信道估计的要求,但在实际电路设计中很难实现模拟脉冲波形的延迟和存储,因此基于发送参考(Transmit Reference, TR)的信号检测算法性能在实际应用

^{*} 收稿日期:2013-03-29;修回日期:2013-06-07 Received date:2013-03-29;Revised date:2013-06-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(6110128)

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No.6110128)

^{**} 通讯作者:e_miracle@163.com Corresponding author:e_miracle@163.com

中受限。非相关检测算法主要指能量检测^[5],因其实现复杂度低,被广泛应用于超宽带脉冲信号检测中。通常能量检测算法选择的短时能量时间块长是脉冲重复周期的整数倍,以确保在块长范围内可以捕获到尽可能多的超宽带脉冲信号能量,但由于超宽带脉冲信号的占空比非常低,所以块长范围内部分采样值只存在噪声信号,平均信噪比非常低,因此能量检测不适合检测低占空比的超宽带脉冲信号。当多径信道持续时间范围已知的情况下,文献[6]通过选择短时能量块的起止位置,以避免求得的短时能量统计量只包含噪声信号的情况,但是在信号检测阶段我们是无法获知多径信道持续时间范围的。以上所述的检测算法本质上都属于块检测^[7]算法,即根据当前一段时间内接收到的信号计算判决统计量,并在块结尾处与判决门限进行比较得到判决结果,块检测算法存在信噪比门限效应(SNR WALL)^[8],即如果接收信号信噪比低于某一门限值时,块检测算法将失效,这对检测低平均信噪比的超宽带脉冲信号是不利的。另外,采用块检测算法检测超宽带脉冲信号时,无论脉冲信号在块长范围内何处出现,都只能在块结尾处做出判断,无法获得最优的检测延迟性能。为此,本文拟将最快检测的思想^[9]引入超宽带脉冲信号检测中。最快检测本质上属于序列变化点检测技术,通过检测序列的分布变化点来实现异常检测。该技术最早于 1931 年由 Shewhart 提出,在最近几年,此类型研究得到了广泛的关注,应用范围覆盖医学、经济、网络、通信等诸多领域^[9]。已有文献研究了基于最快检测的信号检测算法^[10-11]。根据分布变化点前后对观测序列概率分布参数的掌握情况不同,最快检测将采用不同的检测算法,如 CUSUM 检验、广义似然比检验等。本文首先分析了超宽带脉冲信号经多径信道衰减后的统计分布特性,并进一步采用 CUSUM 算法检测超宽带脉冲信号,提出适用于超宽带脉冲信号检测的改进 CUSUM 算法。

2 信号统计特性分析

信号检测一般描述为区分两种检验假设:

(1)假设 H_0 :接收端无被检测信号存在,只存在噪声信号;

(2)假设 H_1 :接收端同时存在被检测信号和噪声信号。

上述假设的离散时间模型为

$$H_0:r(i) = n(i), \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$H_1:r(i) = s(i) + n(i), \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

其中, $r(i)$ 为接收端信号采样值; $n(i)$ 为方差为 σ^2 的高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布; $s(i)$ 为接收到的待检测信号采样值。应用最快检测技术检测信号时,需要了解信号采样值 $r(i)$ 在不同假设下的分布特性。本文定义:超宽带脉冲信号为 $p(t)$;脉冲持续时间为 T_p ;脉冲重复周期即脉冲帧长为 T_f ,在一帧范围内只存在一个超宽带脉冲。则超宽带脉冲无线电发送的时域信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} p(t - jT_f) \quad (3)$$

经过多径信道后,接收到的超宽带脉冲信号 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = x(t) * h(t) = \sqrt{\epsilon_s} \sum_{k=0}^{\infty} h(t - kT_f - \tau_0) \quad (4)$$

其中, $h(t)$ 是多径信道脉冲信号冲激响应; ϵ_s 是接收信号功率; τ_0 是多径信道的第一径相对于一帧起始位置的时延。为了避免相邻两帧内脉冲信号之间的串扰问题,我们假设脉冲重复周期 T_f 远大于脉冲信道冲激响应持续时间 T_h 。由式(1)和(2)可知,假设 H_0 情况下,接收信号采样值服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布,概率密度函数为

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

假设 H_1 情况下,由于接收端出现了超宽带脉冲信号,接收信号分布发生变化,但由于超宽带脉冲信号是低占空比信号,信道冲激响应持续时间内接收信号既包含超宽带脉冲信号也包含噪声信号,信道冲激响应持续时间外接收信号只包含噪声信号,因此接收信号采样值概率密度函数存在两种可能分布。假设一帧内超宽带脉冲信号采样序列为 $\{s_i, i = 1, 2, 3, \dots, N_h\}$, N_h 为一帧内可以采到的非零超宽带脉冲信号采样值个数,则在信道冲激响应持续时间内,接收信号采样值 $r(i)$ 满足 $N(s_i, \sigma^2)$ 分布,概率密度函数为

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-s_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

在信道冲激响应持续时间外,接收信号采样值 $r(i)$ 满足 $N(0, \sigma^2)$ 分布,概率密度函数为

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

但在检测阶段我们无法预知信道冲激响应的幅值和起止位置,因此无法准确判断 H_1 假设下接收信号采样值的概率密度函数,但可以用概率的形式表示如下:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_h} \frac{1}{N_f} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-s_i)^2}{2\sigma^2}} + (1 - \frac{N_h}{N_f}) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

其中, N_f 为一帧内采样点个数。根据中心极限定理^[7],式(8)所示的概率密度函数可以用高斯分布近似,实际应用中通过曲线拟合的方法得到近似结果。当 $p(t)$ 为高斯单脉冲,脉冲宽度为 3 ns,选择的信道为快衰落的 IEEE UWB 信道模型中的 LOS 情形(所谓快衰落信道是指每帧内信道是随机生成,帧与帧之间的信道冲激响应相互独立),超宽带脉冲占空比为 1/100,平均信噪比为 -8 dB 时, H_1 假设下 $r(t)$ 概率分布函数 $f_1(x)$ 的拟合曲线如 1 所示。

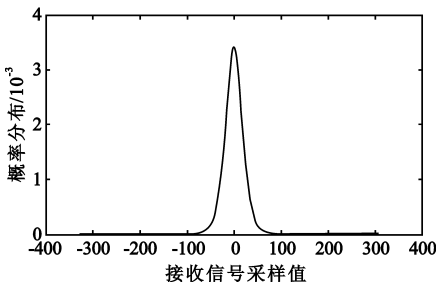


图 1 H_1 假设下 $r(t)$ 概率分布函数拟合曲线
Fig.1 Fitting curve of $r(t)$ probability distribution function under the hypothesis H_1

由图 1 可知,超宽带脉冲信号经过多径信道衰落后近似服从高斯分布,和信号出现前的白噪声分布相比,其均值仍为零,只是方差发生了正向漂移。

3 算法性能指标

通常来说,超宽带脉冲无线电信号是与其他无线电信号共用频带的,因此,其可能对其他通信系统造成的干扰必须限定在某一范围内,这就意味着在任一给定频率上的空中接口都必须有一个最大允许功率,这个功率的值一般由辐射掩蔽(emission mask)来确定。由辐射掩蔽设定的功率极限值是相对于有效辐射功率而言的,即某一频率范围内的有效全向辐射功率(EIPR),它等于发射机的最大可用功率 P_{TX} (即发射机能够提供给天线的最大功率)和发射天线增益 G_{AT} 的乘积:

$$EIPR = P_{TX} G_{AT} \quad (9)$$

式(9)定义的功率是平均功率。在二进制 UWB-IR 系统中,平均功率要在比特间隔 T_b 内进行计算。假设单个脉冲的能量为 E_p ,脉冲重复周期(帧周期)为 T_f ,一比特信息由 N_s 帧发射,即 $T_b = N_s T_f$,则代表一个比特信息的所有脉冲总能量为 $N_s E_p$,此时平均功率 P_{av} 表示为

$$P_{av} = \frac{N_s E_p}{T_b} = \frac{N_s E_p}{N_s T_f} = \frac{E_p}{T_f} \quad (10)$$

因此在考虑超宽带脉冲信号检测问题时,以脉冲重复周期内的平均信噪比作为衡量标准是非常有意义的。在不考虑信道衰减的情况下,平均信噪比定义如下:

$$SNR = \frac{P_{av}}{N_0} = \frac{E_p}{T_f N_0} \quad (11)$$

常规检测算法一般采用一定时间范围内的虚警概率和检测概率作为性能指标,但不同的算法在相同的时间范围内具有相同的虚警概率和检测概率,只能说明它们具有相同的正确检测和错误检测的概率,而其虚警或检测所经历的平均时间长度可能是不同的,因此这种性能指标并未充分体现检测算法的灵敏度性能。本文为了充分考虑算法的灵敏度性能,采用虚警平均运行长度和检测平均运行长度作为算法性能指标,具体定义如下:

(1)虚警平均运行长度 $\bar{T}_0$: H_0 假设下,检测算法平均运行 $\bar{T}_0$ 时间(本文为采样点数),概率近似为 1 的产生一次虚警,如图 2 所示;

(2)检测平均运行长度 $\bar{T}_1$: H_1 假设下,检测出信号出现的时刻 t 和信号实际出现时刻 τ 之间的平均时间间隔(本文为采样点数),下文简称为检测延迟,如图 2 所示。

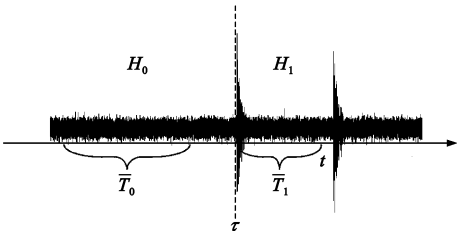


图 2 虚警平均运行长度和检测延迟
Fig.2 False alarm average run length and detection delay

4 基于 CUSUM 的超宽带脉冲信号检测算法

信号分布已知的情况下,则最快检测技术采用

CUSUM 算法检测超宽带脉冲信号,具体步骤如下。

步骤一:顺序观测信号采样值 $\{r(i)\}, i = 1, 2, 3, \cdots$ 。求信号采样值的对数似然比,

$$l[r(i)] = \ln \left\{ \frac{f_1(r(i))}{f_0(r(i))} \right\} \tag{12}$$

以式(12)作为观测统计量。

步骤二:采用迭代的方法对观测统计量进行整合和累加,求出每个采样时刻的判决统计量,

$$\begin{cases} Z_i = \{Z_{i-1} + l[r(i)]\}^+ \\ Z_0 = 0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, \cdots \tag{13}$$

式中, $\{Z_{i-1} + l[r(i)]\}^+ = \max\{Z_{i-1} + l[r(i)], 0\}$ 。

信号出现前后对数似然比均值可以表示为

$$E_{f_0}\{l[x]\} = \int f_0(x) \ln \left\{ \frac{f_1(x)}{f_0(x)} \right\} dx = -D(f_0 \| f_1) \leq 0 \tag{14}$$

$$E_{f_1}\{l[x]\} = \int f_1(x) \ln \left\{ \frac{f_1(x)}{f_0(x)} \right\} dx = D(f_1 \| f_0) \geq 0 \tag{15}$$

其中, $D(f_1 \| f_0)$ 和 $D(f_0 \| f_1)$ 为 Kullback-Leibler 交叉熵,是对两个假设分布之间的信息量差异的定向度量。由式(14)、(15)可知,在超宽带脉冲信号出现前,对数似然比均值为负,出现后对数似然比均值为正,因此信号出现后经过一段时间的观测统计量累加,判决统计量会汇集成一个较明显的正向位移反映在控制图上。

步骤三:将判决统计量和判决门限进行比较,进而得到检测终止时刻 t 为

$$t = \inf\{i: Z_i > h\} \tag{16}$$

其中, h 为判决门限。CUSUM 算法的平均运行长度存在理论界^[10],

$$\bar{T}_1 \leq \frac{h + \zeta}{D(f_1 \| f_0)} \tag{17}$$

$$\bar{T}_0 \geq e^h \tag{18}$$

其中:

$$\zeta = \frac{\int_{c_1}^{\infty} l^2(x) f_1(x) dx + \int_{-\infty}^{-c_1} l^2(x) f_0(x) dx}{D(f_1 \| f_0)} \tag{19}$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{\left(\sum_{n=1}^N B_n\right) \sigma^2}{\sum_{n=1}^N B_n - \sigma^2} \lg \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^N B_n - \sigma^2}{\sigma^2}\right)} \tag{20}$$

根据系统给定的虚警平均运行长度的限制,由式(18)计算检测门限 h ,式(17)进一步给出了检测平均运行长度的范围。当 h 足够大时,

$$\bar{T}_1 \approx \frac{h}{D(f_1 \| f_0)} \tag{21}$$

5 改进 CUSUM 算法

假设:调制脉冲为高斯单脉冲,脉冲宽度为 3 ns;脉冲帧周期为 300 ns;超宽带脉冲占空比 $k = 1/100$;选择的信道为 IEEE UWB 信道模型中的 LOS 情形。当 $SNR = -10$ dB 时,假设主用户信号在第 90 000 个采样点处出现,上一节描述的基于 CUSUM 的超宽带脉冲信号检测算法中观测信号的时域波形和信号出现前后判决统计量变化趋势如图 3 所示。

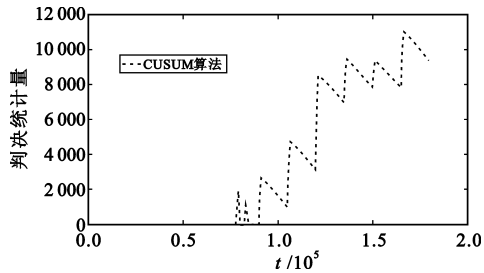


图 3 判决统计量的变化趋势
Fig.3 Determine statistic changing trend

如图 3 所示,判决统计量在 UWB 信道冲激响应持续时间内上升趋势明显,但在 UWB 信道冲激响应持续时间外,判决统计量并未继续上升而出现微弱下降趋势,低信噪比情况下,在 UWB 信道冲激响应持续时间外,判决统计量的下降趋势将更加明显。主用信号出现后判决统计量的下降趋势将降低判决统计量的上升速度,进而延长了判决统计量超越判决门限的时间,即增大检测延迟。观察发现当主用户信号出现后,信道冲激响应持续时间内对数似然比值多为正数,信道冲激响应持续时间外出现小于零的对数似然比值,这些小于零的观测统计量值导致了判决统计量出现下降的趋势,因此论文考虑采用加滑动预处理窗的方式来对观测统计量进行预处理,减小主用户信号出现后观测统计量小于零的个数,以减缓信道冲激响应持续时间外判决统计量的下降趋势,改进算法具体步骤如下。

步骤一:顺序观测信号采样值 $\{r(i)\}, i = 1, 2, 3, \cdots$ 。求信号采样值的对数似然比,如式(12)所示。

步骤二:将对数似然比值送入滑动预处理窗,进行预处理,预处理方式如下所述。

如图 4 所示,滑动预处理窗对连续的 K 个对数似然比值进行预处理,如果 l_{i+K-1} 为大于零的值,则预处理窗不对观测统计量做任何处理,直接进行判

决统计量迭代工作;如果 l_{i+K-1} 为小于零的值,若观察预处理窗内的连续 K 个对数似然比值 $l_i, l_{i+1}, l_{i+2}, \dots, l_{i+K-1}$ 中有大于或等于零的值等于 K/N 个 (N 为能整除 k 的正整数),则将小于零的对数似然比值 l_{i+K-1} 置零后再进行判决统计量迭代计算。

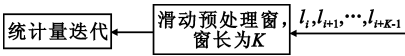


图 4 加滑动预处理窗
Fig.4 Slipping preprocessing window

步骤三:假设滑动预处理窗输出的观测统计量结果为 $\{l'_i\}, i = 1, 2, 3, \dots$, 计算判决统计量 Z'_{UWB} ,

$$\begin{cases} Z'_i = \{Z'_{i-1} + l'_i\}^+, & i = 1, 2, 3, \dots \\ Z'_0 = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\{Z'_{i-1} + l'_i\}^+ = \max\{Z'_{i-1} + l'_i, 0\}$ 。记录当前时刻 i 的判决统计量结果。

步骤四:将判决统计量和判决门限进行比较,进而得到检测终止时刻,如式(16)所示。

6 实验仿真

本节通过仿真分析基于改进 CUSUM 算法的超宽带脉冲信号检测算法的性能,并与能量检测算法进行对比。仿真参数选择如下: $s(t)$ 为高斯单脉冲,脉冲宽度为 3 ns,脉冲帧周期为 300 ns,超宽带脉冲占空比为 1/100;根据理论分析需要,将采样频率设为 $50 \times 10^9 \text{ Hz}^{[2]}$;选择的信道为 IEEE UWB 信道模型中的 LOS 情形。考虑以 10 000 个采样点作为检测延迟的上界,对比相同虚警限制下能量检测算法和基于改进 CUSUM 算法的超宽带脉冲信号检测算法(图中简称改进 CUSUM 算法)的检测概率随信噪比变化趋势。改进 CUSUM 算法的虚警平均运行长度 $\bar{T}_0$ 和能量检测算法的虚警概率 p_0 之间的关系如下:

$$1 - (1 - p_0)^{\bar{T}_0} \approx 1 \quad (23)$$

假设改进 CUSUM 算法虚警平均运行长度下界为 9 000,根据式(18)求得检测门限为 9.105,根据式(23)得对应能量检测的虚警概率是 1/1 000。假设改进算法中滑动预处理窗长为 $K = 6\ 000$ (采样点数),如图 4 所示,如果 l_{i+K-1} 为小于零的值, $l_i, l_{i+1}, l_{i+2}, \dots, l_{i+K-1}$ 中若有大于或等于 $K/2 = 3\ 000$ 个值为大于或等于零的值,则将小于零的对数似然比值 l_{i+K-1} 置零后再进行判决统计量迭代计算,改进 CUSUM 算法和基本 CUSUM 算法判决统计量对比如图 5 所示。

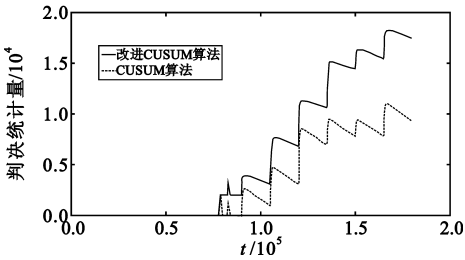


图 5 判决统计量对比
Fig.5 Determine statistic comparison

如图 5 所示,与 CUSUM 算法相比,改进算法判决统计量在信道冲激响应持续时间外下降速度变得缓慢,即先存在一段平稳期后再开始下降,这样判决统计量将以更快的速度超越判决门限。

改进的 CUSUM 算法和能量检测算法检测概率性能对比如图 6 所示。改进 CUSUM 算法并未丢弃判决时刻之前的观测信息,而是将每个采样点的观测统计量进行整合累加,因此克服了块检测的信噪比门限效应,能量检测算法在 $SNR = 0 \text{ dB}$ 时可以实现有效检测,而改进 CUSUM 算法在 $SNR = -10 \text{ dB}$ 时便可实现可靠检测。

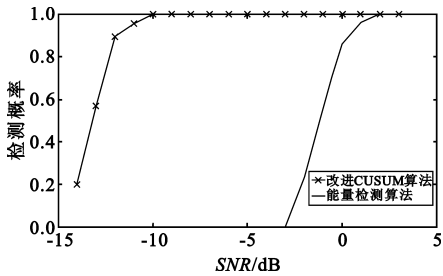


图 6 检测概率性能对比
Fig.6 Detection probability performance comparison

$SNR = 0 \text{ dB}$ 时,算法检测延迟概率分布如图 7 所示。由图 7 可知,改进 CUSUM 算法的平均检测延迟明显小于能量检测算法。

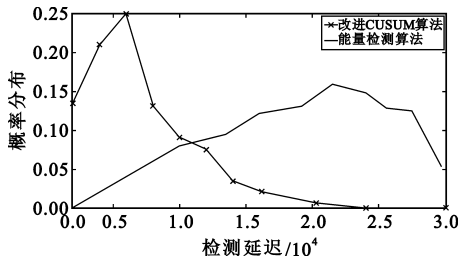


图 7 检测延迟概率分布
Fig.7 Detection delay probability distribution

7 结 论

本文将最快检测技术应用于超宽带脉冲无线电信号检测过程中。通过理论分析和实验拟合证明了超宽带脉冲信号经过多径衰落信道后近似服从高斯分布,和白噪声信号相比,其均值不变,只是方差发生正向漂移。在已知分布变化点前后信号分布的基础上,采用 CUSUM 算法检测超宽带脉冲信号,并针对 UWB 信道下 CUSUM 算法中存在判决统计量在信道冲激响应持续时间外出现下降趋势进的现象,采用加滑动预处理窗的方式,提出了一种改进的 CUSUM 算法,以缩短检测延迟。本文理论分析和实验仿真证明基于改进 CUSUM 算法的超宽带脉冲信号检测算法克服了块检测算法的信噪比门限效应,并且检测延迟性能优越,其检测性能明显优于能量检测算法。

参考文献:

- [1] Yang L Q, Giannakis G B. Ultra-Wideband Communications- An Idea Whose Time Has Come[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(6): 26 – 54.
- [2] Wang Feng, Tian Zhi, Sadler B M. Weighted Energy Detection for Noncoherent Ultra-Wideband Receiver Design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 710 – 720.
- [3] Ahmadian Z, Lampe L. Robust pre-equalization for pre-rake UWB systems with spectral mask constraints[C]//Proceeding of 2012 IEEE Global Communications Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2012: 4060 – 4064.
- [4] Nguyen H V, Tran M H. Synchronization algorithm and FP-GA implementation for Transmit-Reference UWB receiver [C]//Proceeding of 2012 IEEE Conference on Communications and Electronics. Hue: IEEE, 2012: 506 – 511.

- [5] Cheng X, Vanhaverbeke F, Guan Y L, et al. Blind combining for weighted energy detection of UWB signals[J]. Electronics Letters, 2011, 47(1): 55 – 57.
- [6] Sahin M E, Guvenc I, Arslan H. Optimization of Energy Detector Receivers for UWB Systems[C]//Proceeding of 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference. Stockholm: IEEE, 2005: 1386 – 1390.
- [7] Proakis J G. 统计信号处理算法[M]. 汤俊, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 250 – 267.
Proakis J G. Statistic Signal Processing Algorithm[M]. Translated by TANG Jun. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 250 – 267. (in Chinese)
- [8] Mariani A, Giorgetti A, Chiani M. SNR wall for energy detection with Noise power Estimation[C]//Proceeding of 2011 International Conference on Communications. Kyoto: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [9] Poor H V, Hadjiladis O. Quickest Detection[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [10] Lai Lifeng, Fan Yijia, Poor H V. Quickest Detection in Cognitive Radio: A Sequential Change Detection Framework [C] // Proceeding of 2008 GLOBECOM. New Orleans: IEEE, 2008: 1 – 6.
- [11] Li H, Li C, Dai H. Quickest spectrum sensing in cognitive radio[C]//Proceedings of 2008 IEEE Conference on Information Science and Systems. Princeton, NJ: IEEE, 2008: 203 – 208.

作者简介:



宋晓鸥(1984—),女,辽宁抚顺人,2012年于空军工程大学获博士学位,现为讲师,主要从事超宽带通信、通信信号处理、认知无线电、Wireless UWB 等方面研究。

SONG Xiao-ou was born in Fushun, Liaoning Province, in 1984. She received the Ph.D. degree from Air Force Engineering University in 2012. She is now a lecturer. Her research concerns UWB communication, communication signal processing, and cognitive radio.

Email: e_miracle@163.com