

突发通信中的自适应门限信号检测方法

吴玉成 陈宁 高珊
(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘要: 该文针对分组突发通信中的信号检测问题, 利用信号相关前后功率之比构建判决统计量, 实现自适应门限信号检测。在判决门限中加入微小偏移量, 避免实际应用中存在的虚警毛刺现象。在门限判决时加入滑动比较窗口, 解决了检测精度不高的问题。理论分析和仿真结果表明, 改进方案可以很好地实现信号的自适应门限检测。

关键词: 信号检测; 自适应门限; 突发通信

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2896-03

Adaptive Threshold Signal Detection Method for Burst Communication

Wu Yu-cheng Chen Ning Gao Shan

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An adaptive threshold signal detection method based on the ration of signal power and correlation signal power for packet burst communication systems is studied. To avoid false alarm burrs in practical application, feeble offset is added in decision threshold. To raise the detection precision, a slipped compare window is introduced when executing decision. Theory analysis and simulation results show that the improved scheme can archive nice adaptive threshold signal detection performances.

Key words: Signal detection; Adaptive threshold; Burst communication

1 引言

在分组突发通信中, 接收端通过对附加在有效数据前的前导序列的捕获实现对突发信号的检测, 有的系统还需要利用前导序列进行位定时的初始捕获。突发信号检测性能对整体通信有至关重要的影响。在无线通信系统中, 接收信号的功率会随着传输距离变化, 还会受到衰落的影响。由于接收信号电平是未知和时变的, 如果使用固定门限检测方案的话, 往往不能获得良好的检测性能, 使得检测概率减小或者虚警概率增加, 特别是虚警概率增加往往给通信系统带来严重的不利影响。同时干扰的功率未知以及干扰功率变化都会影响到检测性能。这些情况要求采用自适应捕获方法。自适应门限检测技术来源于直接序列扩频中自适应门限捕获技术^[1,2], 特别是恒虚警概率的自适应捕获方法^[2]在实际中得到广泛应用。信号检测实现的是对突发信号的检测, 文献^[3]利用有无传输信号时的功率变化实现信号的检测, 但只能检测到整个数据帧到来与否, 不是对已知引导码的检测, 且检测精度不高。文献^[4]基于最大似然估计(ML)准则, 通过对噪声功率的估计, 提出了一种有效的分组数据检测的自适应门限控制方法。文献^[5]通过信号功率的估计构造自适应门限实现PN码的自适应捕获。我们研究发现, 文献^[4,5]的方法在实

际应用中会存在虚警毛刺和检测精度不高的问题。本文利用相关前后信号功率之比构造自适应门限的信号检测算法, 并对实际应用中的存在虚警毛刺和检测精度不高的问题进行改进。

2 固定门限的相关检测

考虑系统采用 $\pi/4$ -DQPSK 调制方式, 收端采用零中频接收机结构, N 倍过采样, 采样周期 T_s 。图 1 为固定门限的信号相关检测原理框图。

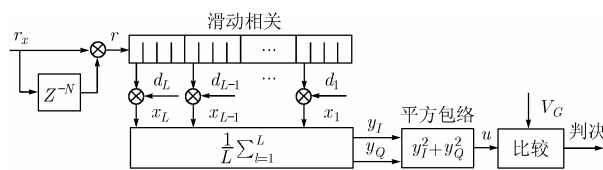


图 1 固定门限相关检测算法框图

为保证相关检测的顺利进行, 必须将前导伪随机序列从已调数据流中剥离出来, 因此需要对输入信号进行解差分处理。算法的滑动相关可采用数字匹配滤波器^[6]来实现。移位寄存器中存放的数据流在系统采样时钟的作用下向右移动, L 位样点与本地参考码序列对应位相乘、并累加求和, 然后取出其平方包络与固定门限值 V_G 比较, 判决是否检测到信号。

2006-12-07 收到, 2007-07-13 改回
国家自然科学基金(60672097), 重庆市教委项目(KJ060619)资助课题

假设用于信号检测的前导伪随机码在同相正交支路上是相同的, 如图 1 示均为 d_1 、 d_2 、 \dots 、 d_L , L 为随机序列的长度, 则各乘法器输出的各同相和正交分量 x_I 、 x_Q 是相互独立的高斯随机变量。令其数学期望 $E(x_I) = E(x_Q) = m$, 方差 $\text{var}(x_I) = \text{var}(x_Q) = \sigma^2$ 。由此, 可得累加器的输出 y_I 、 y_Q 分别为 $\{x_I\}$ 、 $\{x_Q\}$ 的样本均值, 于是 y_I 、 $y_Q \sim N(m, \sigma^2/L)$ 。

令相关器输入信号与本地参考伪随机码对齐时, 为事件 H_1 ; 反之, 则为事件 H_0 。当 H_0 时发生时, $m = 0$ 。此时门限比较器输入信号 $u = y_I^2 + y_Q^2$ 的概率密度函数为

$$p_u(u | H_0) = \frac{1}{2\sigma^2/L} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma^2/L}\right), u > 0 \quad (1)$$

对于信号检测系统的虚警概率为

$$P_{fC} = \int_{V_C}^{\infty} p_u(u | H_0) du = \exp\left(-\frac{V_C}{2\sigma^2/L}\right) \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 如果绝对门限 V_C 固定, 随着噪声强度(σ)的增加, 虚警概率将增加, 反之将下降, 即虚警概率将随着噪声强度的变化而变化。如果噪声干扰的强度增大几分贝, 虚警概率就会大大增加, 这样即使信噪比很高, 也无法正确检测出信号的起始界。此种情况体现在当噪声强度增大、而信噪比又完全不变的情况下, 为防止虚警, 必须提高固定门限 V_C 的值, 但又很容易造成噪声强度小时检测概率的降低, 严重时检测概率甚至可能为零。由于突发信道的噪声强度是随时间不断变化的, 因此在相关信号检测中, 若采用固定门限, 将很难正确检测出信号的起始界。

为了正确地检测信号起始界, 总是希望无论噪声强度如何变化, 检测系统的虚警概率最好能维持恒定不变, 因此需要采用可行的自适应门限检测算法。

3 自适应门限的相关检测算法

3.1 算法原理图

本文设计的自适应门限的相关检测算法如图 2 所示, 它利用相关前后信号功率估计之比来构造判决统计量, 图中前端处理见本文图 1。

图中 C 为自适应判决门限, 它可使信号检测系统虚警概率保持恒定。

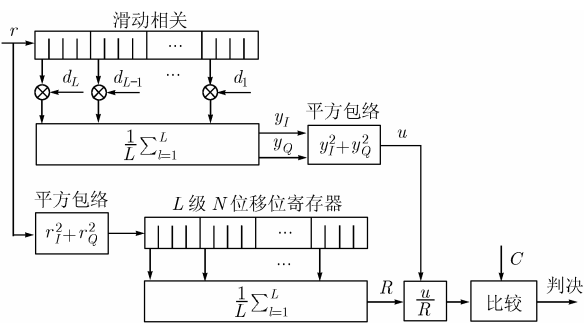


图 2 相关检测算法的原理框图

3.2 算法推导

若令

$$S_I = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(x_{l,I} - \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_{l,I} \right)^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left[r_{l,I}^2 - \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L r_{l,I} \right)^2 \right] \quad (3a)$$

$$S_Q = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(x_{l,Q} - \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_{l,Q} \right)^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left[r_{l,Q}^2 - \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L r_{l,Q} \right)^2 \right] \quad (3b)$$

式中下标 l 表示第 l 路相关器, $1 \leq l \leq L$ 。则 S_I 、 S_Q 分别为 $\{x_I\}$ 、 $\{x_Q\}$ 的样本方差, 由 x_I 、 x_Q 的分布状况知, $S_I/(\sigma^2/L)$ 、 $S_Q/(\sigma^2/L) \sim \chi^2(L-1)$ 。

又令

$$S = S_I + S_Q = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (r_{l,I}^2 + r_{l,Q}^2) - \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_{l,I} \right)^2 - \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_{l,Q} \right)^2 = R - u \quad (4)$$

有 $S/(\sigma^2/L) \sim \chi^2(2L-2)$ 。

图 2 中, 判决统计量 ρ 为

$$\rho = u/R = \eta/(1 + \eta) \quad (5)$$

其中 $\eta = \frac{u/(\sigma^2/L)}{S/(\sigma^2/L)} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$, $\nu_1 = \frac{u}{\sigma^2/L}$, $\nu_2 = \frac{S}{\sigma^2/L}$, ν_1 与 ν_2 相互独立。

根据式(1), 可得 H_0 时 ν_1 的概率密度函数

$$p_{\nu_1}(\nu_1 | H_0) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\nu_1}{2}\right), \nu_1 > 0 \quad (6)$$

由于 $S/(\sigma^2/L) \sim \chi^2(2L-2)$, 故 ν_2 的概率密度函数为

$$p_{\nu_2}(\nu_2) = \frac{1}{2^{L-1} \Gamma(L-1)} \nu_2^{L-2} \exp\left(-\frac{\nu_2}{2}\right), \nu_2 > 0 \quad (7)$$

综上所述, H_0 时 η 的概率密度函数为

$$p_{\eta}(\eta | H_0) = \int_0^{\infty} p_{\nu_2}(x) p_{\nu_1}(\eta x | H_0) x dx = (L-1)(1 + \eta)^{-L}, \eta > 0 \quad (8)$$

H_0 时 ρ 的概率密度函数为

$$p_{\rho}(\rho | H_0) = (L-1)(1 - \rho)^{L-2}, 0 < \rho < 1 \quad (9)$$

则系统的虚警概率为

$$P_f' = P(\rho \geq C | H_0) = \int_C^1 p_{\rho}(\rho | H_0) d\rho = (1 - C)^{L-1} \quad (10)$$

因此

$$C = 1 - (P_f')^{1/(L-1)} \quad (11)$$

3.3 算法仿真及改进

根据图 2 所示的算法原理框图进行仿真, 并给出不同信道环境下 $(u - RC)$ 的波形曲线, 如图 3 示。当 $u - RC > 0$, 即判决量 ρ 超过门限 C 时, 表明接收信号与本地参考序列一致、系统检测到突发信号的前导码; 反之, 当 $u - RC < 0$, 即判决量小于门限时, 则表明系统未检测该前导码。仿真时, 前导伪随机序列采用 31 位的 m 序列, 送入检测器的数据流由用户数据、噪声、前导序列、用户数据依次构成, 并令算法中 $p_f' = 10^{-4}$, 发送成型以及接收滤波均采用 31 阶的平方根升余弦滚降滤波器实现, 滚降系数 $\alpha = 0.5$, 初始相偏 $\phi = 46.8^\circ$, 其它信道参数的设置见图标。

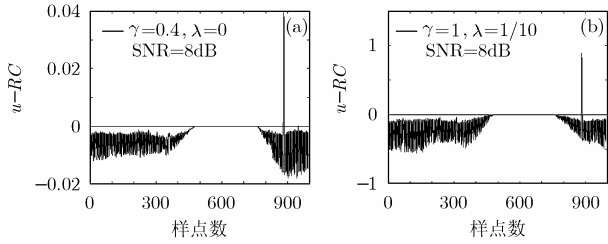


图 3 算法在不同信道环境下($u-RC$)的波形

由上图可见, 相对于固定门限的相关检测算法, 自适应门限的检测算法明显更优, 即便是在信道增益 $\gamma = 0.4$ 、频偏与符号速率之比 $\lambda = 1/10$ 恶劣环境下, 也能完成较好的突发信号检测, 其虚警概率较低, 检测概率较高。

仿真中发现, 算法会出现微小的虚警毛刺以及突发信号起始界判断不够精准等问题, 因此对其进行了改进, 将 $V = RC + \Delta V$ 作为新的自适应门限 (ΔV 为一微小偏移量)。另外, 由于系统采用 4 倍过采样, 则代表接收信号与本地参考序列同步的相关值共有 4 个样点, 并且它们均超过判决门限, 如果根据较小的 3 个样点相关值去判断突发信号的起始界, 会造成判断的不够精准。所以, 系统在门限判决时采用了比较滑动窗口, 用于寻找超过门限的连续几个判决量的峰值, 改进后算法的实现框图如 4 示。

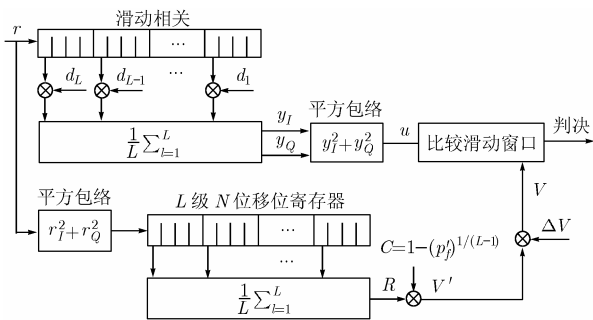
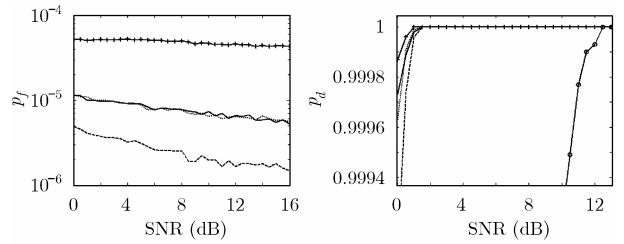


图 4 改进算法实现框图

图 5 是改进后检测算法的性能仿真曲线, 给出了其虚警及检测概率随 SNR 变化的情况。除图中标识的参数外, 其余仿真条件均和图 3 一致, 参数 $p_f' = 10^{-4}$, 门限比较滑动窗口长度 $L_w = 9$ 。除图 5 所示数据外, 仿真时若令 $\gamma = 0.5$ 、 $\lambda = 1/1000$ 、 $\Delta V = 0.05$, 则所得虚警概率在 $SNR \in [0, 16]$ dB 范围内均是小于 10^{-8} 的。另外, 当 $\gamma = 1$ 、 $\lambda = 1/1000$ 、 $\Delta V = 0.1$ 、 $SNR = 0$ dB 时, 算法检测概率为 0.99908; 而当 $\gamma = 0.5$ 、 $\lambda = 1/1000$ 、 $\Delta V = 0.05$ 、 $SNR = 0$ dB 时, 检测概率则为 0.54149。

由上述仿真结果可知, 信道频偏只要不是太大(比如低于数据速率的 1/100), 其对算法性能的影响便可忽略, 即改进算法对频偏的容忍度也是较大的。当信道增益 γ 降低时, 算



(a) 虚警概率与信噪比的关系曲线 (b) 检测概率与信噪比的关系曲线

图 5 改进算法的性能曲线

法虚警及检测概率也随之减小, 这是由于 γ 减小导致了噪声与信号强度的降低, 使得算法相关平方包络值整体减小。而当自适应门限中的固定量 ΔV 增大时, 算法虚警及检测概率也明显减小。

4 结束语

本文研究了时分突发通信中的信号检测自适应门限问题, 利用传输信号中已知引导码实现信号检测。为实现自适应门限信号检测, 利用相关前后信号功率之比构建自适应检测算法, 针对实际应用中存在的信号检测精度不高的现象, 加入滑动检测窗口, 提高了检测概率。仿真表明, 设计方案可以很好的实现信号的自适应门限检测。

参考文献

- [1] 薛巍, 向敬成, 周治中. 一种 PN 码捕获的门限自适应估计方法. 电子学报, 2003, 31(12): 1870-1873.
- [2] 张颖光, 廖桂生, 张林让. 一种新的具有恒虚警概率的 PN 码自适应盲捕获方法. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 855-859.
- [3] John Terry and Juha Heiskala. OFDM wireless LANs: A theoretical and practical guide. Indianapolis, Ind.: Sams Publishing, 2002: 32-43.
- [4] Brigant E and Mammela A. Adaptive threshold control scheme for packet acquisition. *IEEE Trans. on Commun.*, 1998, 46(12): 1580-1582.
- [5] Choi Kwonhue, Cheun Kyungwhoon, and Jung Taejin. Adaptive PN code acquisition using instantaneous power-scaled detection threshold under rayleigh fading and pulsed gaussian noise jamming. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(8): 1232-1235.
- [6] Wu Yucheng, Xu Taihuo, and Feng Mo. Frame synchronization in turbo decoder based on DMF. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies, Shanghai, China, May 2004, Vol.2: 401-404.

吴玉成: 男, 1971 年生, 博士后, 副研究员, 主要从事通信信号处理、软件无线电技术研究工作。
 陈宁: 男, 1978 年生, 硕士生, 从事通信信号处理研究。
 高珊: 女, 1982 年生, 硕士生, 从事通信信号处理研究。