

# 信号检测算法的迭代式串接增强策略

陆成刚

(浙江工业大学理学院 杭州 310023)

**摘要** 提升信号检测算法的精度和可靠性往往通过算法内部的增强设计或外接一个第三方的预处理和后处理模块来实现。本文通过对检测率和虚警比定量关系的研究,提出了一种增强信号检测算法精度和可靠性的迭代式串接策略。该策略可以在已知算法上叠加一个前处理或后处理模块以提升检测精度和稳定性,并以心电复波信号检测和频移键控信号检测为例说明了这种策略的应用。本文的主要亮点在于:(1)通过考察检测率和虚警比之间的定量关系,揭示了检测率和虚警比之间隐含的间接矛盾(定律 1);(2)提出克服该矛盾的充分条件(定律 2),即本文提出的增强算法执行能力的叠加策略;(3)将该策略用于指导信号检测算法的设计并配有实证。

**关键词** 检测率,虚警比,心电复波检测,频移键控音检测

中图法分类号 TN911.72 文献标识码 A

## Tandem Policy Based on Signal Detection Algorithms

LU Cheng-gang

(Department of Mathematics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** Through enhanced designing or adding 3<sup>rd</sup> party module, the accuracy rate and reliability rate of signal detection can be improved. One algorithms concatenation theory for enhancing signal detection is provided within research of the quantitative relation between positive alarming rate(PAR) and false alarming ratio(FAR). The policy can guide developers to design post-processing or pre-processing algorithm which is connected with already-known algorithms in tandem. Two usage samples on QRS complex detection in ECG digital processing and Tone Detection in FSK are discussed with application of this policy. Three highlights in this research: 1) Consideration of the quantitative relation between PAR and FAR disclosing the indirect contradictory hidden in PAR and FAR(Theorem 1); 2) Putting forward one sufficient condition to solve the contradictory(Theorem 2) —the theory of enhancing signal detection; 3) Two application cases being attached to verify how to apply this theory.

**Keywords** Positive alarming rate(PAR), False alarming ratio(FAR), QRS complex detection, FSK tone detection

### 1 引言

在数字信号处理方面的文献中,信号事件的检测率和虚警比一直是评估检测算法的首要依据。但这两者之间的定量关系则鲜有文献做探讨,有些文献只讨论了关于使用动态阈值等自适应信号处理方法来保持恒定虚警率<sup>[1,2]</sup>。本文至少在以下角度与这些文献有差异:(1)在通用概念上考虑,尽可能不拘泥于某个特定信号处理领域;(2)着眼于在降低虚警比情况下提升检测率,而非仅仅保持恒虚警率。

### 2 理论分析

在信号检测领域,算法的执行能力的评价是由检测率(Positive Alarming Rate, PAR)和虚警比(False Alarming Ratio, FAR)来表征的,它们是衡量算法精度和可靠性的重要指标。在信号检测相关文献中,一般测量算法的检测率和虚警比的方法为:首先建立一个完备、数量足够的信号样本数据库,然后对信号样本基于检测的事件进行人工标注,最后通过

算法运行结果进行检测率和虚警比的计算。

假设创建的数据库样本总数目为  $T$ ,人工标注是信号事件  $E$  的样本数目为  $S$ ,算法检测出的事件样本总数为  $CS$ ,其中实际是信号事件  $E$  的数目为  $CS(E)$ ,而不是信号事件  $E$  的样本数目为  $CS(\bar{E})$ ,显然

$$CS = CS(E) + CS(\bar{E})$$

于是信号事件  $E$  的检测率  $D_r$  为  $\frac{CS(E)}{S}$ ,虚警比  $F_r$  为

$\frac{CS(\bar{E})}{CS}$ ,那么

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{CS(E)}{S} = \frac{CS}{S} \cdot \frac{CS(E)}{CS} \\ &= \frac{CS}{S} \cdot \left( \frac{CS - CS(\bar{E})}{CS} \right) \\ &= \frac{CS}{S} \cdot \left( 1 - \frac{CS(\bar{E})}{CS} \right) = \frac{CS}{S} \cdot (1 - F_r) \end{aligned}$$

即

$$D_r = \frac{CS}{S} \cdot (1 - F_r) \tag{1}$$

本文受浙江省重点科技专项重大工业项目(2013C01045),浙江省教育厅基金项目(Y201121787)资助。

陆成刚(1973-),男,博士,讲师,主要研究方向为信号处理、应用数学, E-mail: luedge@163.com。

式(1)表征了检测率和虚警比之间的定量关系。算法设计时的迭代式开发的处理方式:首先基于目前的检测率和虚警比,重点考虑不变更当前执行版本的实现细节,以叠加独立逻辑模块的形式来提高精度和可靠性。

定律 1 迭代式设计模式下,提高算法检测率必然导致虚警比下限值的增加,即  $\inf(F_r)$  随着  $D_r$  的增加而增加。

证明:假设数据库固定,即  $S$  不变, $D_r$  随着  $CS(E)$  的增加而提高,由于叠加模块独立于当前版本,是在当前版本执行完毕后进行的,故  $CS(\bar{E})$  是不减少的,于是  $CS$  增加,那么  $\frac{CS}{S}$  也增加。

由于

$$D_r = \frac{CS}{S} \cdot (1 - F_r) \leq 1$$

得到

$$\left(1 - \frac{1}{\frac{CS}{S}}\right) \leq F_r$$

即

$$\inf(F_r) \geq \left(1 - \frac{1}{\frac{CS}{S}}\right)$$

所以  $\inf(F_r)$  下限值随  $\frac{CS}{S}$  的增加而增加。

定律 1 虽然并不能说明提高检测率  $D_r$  必然直接导致虚警比的上升,却隐含了虚警比上升的风险,因为其下限值提高了。事实上很多算法为了提高检测率在内部做参数调节时往往会导致虚警率上升,使检测率和虚警比之间存在着难以两全的矛盾[3]。

信号检测主要是通过信号提取的特征是否满足预设的逻辑条件来进行,本文把特征相应的预设条件设为  $A$ ,如果信号事件  $E$  是  $A$  的必要条件,即  $A \Rightarrow E$ ,则以  $A$  作为事件  $E$  的检测算法得到的虚警比必为 0(否则说明不是事件  $E$  的也误报为事件  $E$ ,则事件  $E$  不是  $A$  的必要条件);反之,如果  $A$  和  $E$  互相独立、不相关,则以  $A$  作为事件  $E$  的检测算法得到的虚警比必为 100%。由此作出这样的假设是合理的,即

$$1 - F_r = p(E|A) \quad (2)$$

其中, $p(E|A)$ 为通过  $A$  作出事件  $E$  判断的条件概率,它事实上度量了算法  $A$  检测事件  $E$  的充分性程度。结合  $F_r$  定义,得到

$$p(E|A) = \frac{CS(E)}{CS} \quad (3)$$

在算法  $A$  的基础上,构造后续独立模块  $A'$ ,对数据库的  $T-CS$  数目剩余样本继续进行检测,则下面定律 2 揭示了提高检测率、降低虚警比的充分条件。

定律 2 迭代式设计模式下,如果  $p(E|A) < p(E|A')$ ,则后续处理算法  $A'$  使得检测率  $D_r$  上升、虚警比  $F_r$  下降。

证明:假设  $A'$  产生的事件  $E$  的检测数目为  $\Delta CS$ ,其中实际是事件  $E$  的数目为  $\Delta CS(E)$ ,不是事件  $E$  的数目为  $\Delta CS(\bar{E})$ ,从而

$$\Delta CS = \Delta CS(E) + \Delta CS(\bar{E})$$

于是

$$D_r = \frac{CS(E) + \Delta CS(E)}{S} \geq \frac{CS(E)}{S}$$

检测率上升;另外由  $p(E|A) < p(E|A')$ ,得到

$$\frac{CS(E)}{CS} < \frac{\Delta CS(E)}{\Delta CS}$$

再得到

$$\frac{CS(\bar{E})}{CS} > \frac{\Delta CS(\bar{E})}{\Delta CS}$$

所以

$$CS(\bar{E}) \cdot \Delta CS > CS \cdot \Delta CS(\bar{E})$$

所以

$$CS(\bar{E}) \cdot \Delta CS + CS(\bar{E}) \cdot CS > CS \cdot \Delta CS(\bar{E}) + CS(\bar{E}) \cdot CS$$

所以

$$\frac{CS(\bar{E})}{CS} > \frac{\Delta CS(\bar{E}) + CS(\bar{E})}{\Delta CS + CS}$$

即虚警比下降。

事实上为了增强算法的实时处理能力, $A'$ 在  $A$  之后作为后处理并非必须等到所有样本处理完毕,完全可以逐样本在  $A$  之后处理。 $A'$ 也可以在  $A$  之前作为预处理。

定律 2 虽然给出了一个提升算法执行能力的充分条件,但是却不具备实际的可操作性,可以基于定律 2 结合各个信号处理领域的专门知识进行  $A'$  的设计,下面就心电和音频信号处理的专门领域举例分析。

### 3 案例实证

#### 例 1 心电 QRS 检测

通过对 Chesnokov<sup>[4]</sup>发表在 CiC2006 上的基于连续和快速小波变换的心电复波检测方法的模拟,调节降噪滤波参数 Dispersion 阈值导致的 PAR 和 FAR 的变化,显示了两者之间的矛盾,如图 1 所示。

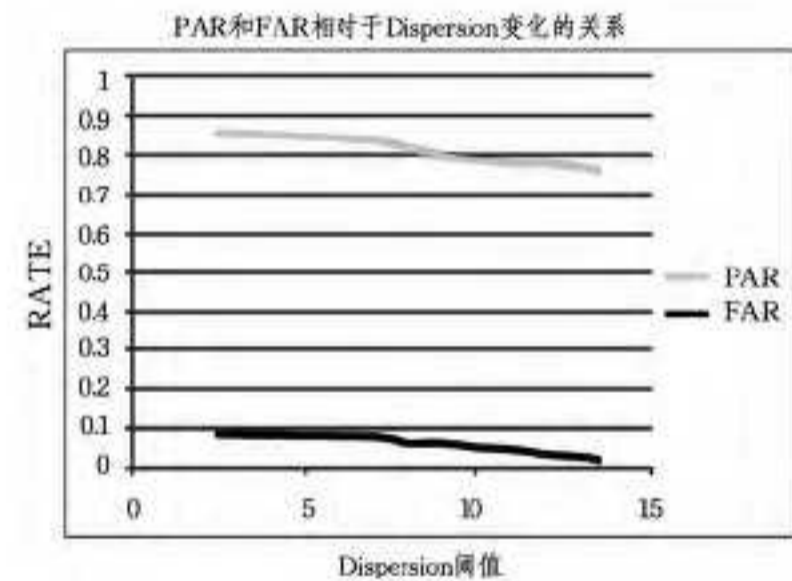


图 1 降噪参数对 PAR 和 FAR 的影响

接一个基于周期间隔的增强后处理  $A'$  可获得更高的 PAR,同时使得 FAR 更小,假设 QRS 波点  $x_n$  是用增强后处理的  $A'$  基于原始 Chesnokov 算法  $A$  的基础之上而确定的,那么下一个点  $x_{n+1}$  如此确认:如果  $(1-\mu)a_n < x_{n+1} - x_n < (1+\tau)a_n$ ,其中,  $a_n = (1-\lambda)a_{n-1} + \lambda(x_n - x_{n-1})$ ,  $0 < \lambda, \mu, \tau < 1$ ,那么  $x_{n+1}$  就确认为 QRS 点。

考察  $A$  和  $A'$  之间的逻辑关系, $A'$  基于  $A$  检测的周期估计使用滑动平均后更为精准的基础上进行判别决策,显然在推断是否为周期点上  $A'$  的充分性强于  $A$ ,因此

$$p(E|A) < p(E|A')$$

所以  $A'$  会降低 FAR。在以 MIT-BIH Database<sup>[5]</sup> 为基础的实验,得到了表 1 的比较结果。

表 1 后处理  $A'$  在 QRS 检测中的性能比较

	检测率	虚警率
Chesnokov(A)	82.9%	0.3%
Chesnokov(A')	92.0%	0.2%

(下转第 333 页)

[23] Oh Shao-chong, et al. Multiobjective optimization of sensor network deployment by a genetic algorithm [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007) . Sept. 2007; 3917-3921

[24] Zhong Jing-hui, Zhang Jun. A multi-objective memetic algorithm for relay node placement in wireless sensor network[C]// Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2011). July 2011; 150-169

[25] 匡林爱, 蔡自兴. 基于遗传算法的无线传感器网络重新部署方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1329-1332

[26] Marks M. A Survey of Multi-Objective Deployment in Wireless Sensor Networks[M]. Journal of telecommunications and information technology, 2010

[27] Lloyd L E, Xue G. Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks [J] . IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(1): 134-138

[28] Hu Xiao-min, Zhang Jun. Ant Routing Optimization Algorithm

for Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks[C]// Proc. IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics. Istanbul, Turkey, Oct. , 2010; 738-744

[29] Larrañaga P, Lozano J A. Estimation of Distribution Algorithms: A new Tool for Evolutionary Computation[M]. Kluwer Academic Publishers, 2002

[30] Hu J, Song J, Zhang M, et al. Topology optimization for urban traffic sensor network[J]. Tsinghua Science & Technology, Apr 2008, 13(2): 229-236

[31] Latiff N M A, Tsimenidis C C, Sharif B S. Energy-aware clustering for wireless sensor networks using particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2007: 1-5

[32] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000(2)

(上接第 325 页)

### 例 2 FSK Tone 检测

在对海事通讯中无线接收的键控频移音 (FSK Tone) 检测时, 由于背景噪声的干扰, 传统的基于跟踪 FFT 频谱主峰是否高于一个预定值<sup>[6]</sup>的方法有时会失效。而且阈值的选取对于算法的影响如图 2 所示, PAR 提高导致 FAR 同时升高。

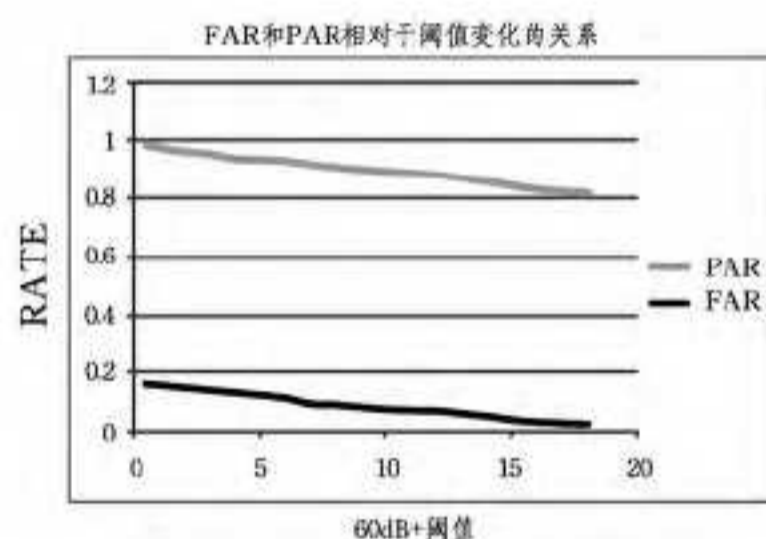


图 2 FSK Tone 检测阈值选取对 PAR 和 FAR 的影响

增加一个前处理方案:

- (1) 在 FFT 域中提取功率谱的包络线;
- (2) 基于包络线计算除最高点以外所有峰的平均值和根方差;
- (3) 如果最高点处的峰值与平均值的差值大于根方差的一半, 那么进入传统的阈值方法流程。

在本例中  $A'$  筛选出满足特殊结构的信号帧进入传统阈值判断流程, 比仅仅使用传统阈值方法  $A$  显然具有更强的信号推断的充分性, 因此有

$$p(E|A) < p(E|A')$$

从而导致在 FAR 尽量小的条件下得到较高的 PAR。实验时创建了一个由无线设备接收超过 300 个小时的 FSK 音的数据库, 并且基于接收机各调整参数和不同的天气情况, 该数据库表现了非常不同的信号噪声比, 以便保证在尽可能严苛的情形下进行算法验证。表 2 列出了实验结果。

表 2 FSK Tone 检测叠加前处理的性能比较

	检测率	虚警率
主峰阈值 ( $A$ )	90.5%	2.3%
主峰阈值 ( $A'$ )	98.0%	0.1%

结束语 本文通过检测率 PAR 和虚警比 FAR 之间的定量关系, 列出了它们之间隐藏的间接矛盾。还讨论了一个在 FAR 尽量小的条件下满足较高的 PAR 的策略, 并且在心电图 QRS 检测和 FSK Tone 检测中得到了验证。顺便指出, 本文的分析框架是建立在算法设计的迭代式开发模式之下的, 即考虑的出发点是基于现有版本如何叠加独立的新处理模块来提升算法的精度和可靠性。

### 参考文献

[1] Amirmehrabi, Hamid, Viswanathan. A New Distributed Constant False Alarm Rate Detector[OL]. <http://opensiuc.lib.siu.edu/ece-articles/37>, 1997

[2] Esfahani S N, Mahdi S. Statistical Models For Constant False Alarm Rate Threshold Estimation in Sound Source Detection System, University of Kentucky Master's Theses [OL]. <http://uknowledge.uky.edu/gradschool-theses/46>, 2010

[3] Jorge A, Basilio M, Torres G A, et al. Detection of Pornographic Digital Images [J]. International Journal of Computers, 2011, 5(2): 298-305

[4] Chesnokov Y C, Nurekh D. Individually Adaptable Automatic QT Detector [J]. Computers in Cardiology, 2006, 33: 337-340

[5] Goldberger A L, Lan A. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet; Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals [J]. Circulation, 2000, 101(23): 215-220

[6] Chan Y-T, Q Ma. Evaluation of various FFT Methods for Single Tone Detection and Frequency Estimation; Engineering Innovation, Voyage of Discovery[C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1997. St. Johns, Nfld, IEEE, 1997, 1: 211-214