

责任编辑：胡晓鸥 xohu@ndip.cn
责任校对：钱辉玲
封面设计：王晓军 xjwang@ndip.cn

通信中盲信号处理 理论与技术 (下册)

Theory and Technology on
Blind Signal Processing of
Communication



总定价：186.00 元 (上、下册)

通信中盲信号处理 理论与技术 (下册)

Theory and Technology on Blind Signal
Processing of Communication

郑 辉 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面介绍了经典的盲信号处理技术基础,以及盲信号处理的最新理论和技术,具体包括:盲信噪比估计和盲信道均衡技术,盲信号参数分析、系统分析和网络分析等盲信号分析技术;低截获概率信号和隐藏信号盲检测技术,各种条件下的盲信源分离理论和技术,基于信号结构和数据压缩的盲信源恢复技术,基于信号特征和不平衡类别的盲信息辨识技术等。

本书适合从事盲信号处理方向的研究生、工程师、学者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信中盲信号处理理论与技术:全2册/郑辉编著. --北京:国防工业出版社,2013.4

ISBN 978-7-118-08688-1

I. ①通… II. ①郑… III. ①盲信号处理-研究 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第077414号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 26 字数 468 千字

2013年4月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价186.00元(全2册)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

盲信号处理重点实验室是我国专门从事盲信号处理理论与技术研究的科研机构,该重点实验室运行十年来,在盲信号处理技术领域开展了全面而深入的探索性研究工作,通信中盲信号处理是其中重要的研究方向之一。为纪念盲信号处理重点实验室运行十周年,总结十年来该重点实验室的研究成果,特编写本书。

本书在介绍经典的盲信号处理技术的基础上,着重总结了十年来盲信号处理重点实验室的研究成果,全面地介绍了盲信号处理的最新理论和技术。

本书共分七篇十五章。

第一篇概述(第1章),首先介绍了盲信号处理的基本概念、准则和方法,阐述了盲信号处理的技术体系构成,为全书提供了一个纲要性的介绍;同时以介绍盲信号处理方法为脉络,介绍了盲信号处理技术中常用的基础理论和方法,如高阶统计、最大似然估计、自适应处理等。

第二篇盲信道估计技术(第2~3章),主要介绍盲信噪比估计和盲信道均衡。在介绍经典的盲信道估计理论和技术的基础上,重点总结介绍了许华、李明博士等在高阶调制信号中盲信噪比估计中的工作,樊龙飞、许华、赵艳博士等分别在高阶调制信号盲均衡、时短突发信号盲均衡和宽带信号盲均衡方面所做的工作。

第三篇盲信号分析技术(第4~6章),主要介绍盲信号参数分析、盲信号系统分析和盲信号网络分析。在介绍传统的盲信号参数分析和盲信号系统分析的理论和技术的基础上,着重总结介绍了邓月华高工,陈越新、徐正国、焦程波博士等分别在盲信号网络分析中对网络拓扑、协议与特征分析技术,陆佩忠博士等分别在盲信号参数统计分析和容错分析理论与技术等方面的工作。

第四篇盲信号检测技术(第7~8章),限于篇幅本篇不再介绍一般性的信号检测技术,着重介绍低截获概率信号(LPI)和隐藏信号的盲检测。总结介绍了李明、罗胜恩博士等分别在盲突发信号检测、盲跳频信号检测,廖灿辉、万坚博士等在盲混合信号检测方面的工作。

第五篇盲信源分离技术(第9~11章),主要介绍正定条件、欠定条件和单

通道条件下的盲信源分离的理论和技術。本章主要参考了朱中梁院士编著的《无线电混合信号盲源分离理论与技术》，在介绍了经典的正定条件下盲信源分离理论和技術的基础上，着重总结了涂世龙、廖灿辉、陈绍贺、万坚博士等分别在欠定和单通道条件下盲信源分离方面的工作。

第六篇盲信源恢复技术(第12~13章)，主要介绍基于信号结构和数据压缩的盲信源恢复。在总结群路信号盲信源恢复技术的研究成果的同时，着重总结介绍了陈越新、李立忠博士、赵艳秋高工和李丛鹤硕士等在数据压缩信号盲信源恢复理论和技術方面的工作，以及涂世龙博士在传输编码结构信号盲源恢复方面的工作。

第七篇盲信息辨识技术(第14~15章)，主要介绍信号特征的盲信息辨识和不平衡类别的盲信息辨识。在介绍盲信息辨识的经典技术的基础上，着重总结了黄渊凌博士等在通信信号特征盲信息辨识技术，燕继坤博士等在不平衡类别盲信息辨识方面的工作。

由此可知，本书是盲信号处理重点实验室众多科研人员十年探索、十年创新的结晶。朱中梁院士和叶尚福院士在盲信号处理的研究中起到了领军和指引作用。朱中梁院士带领团队在盲信号分析、盲信源分离等领域做了大量基础理论研究，为盲信号处理开辟了研究方向。叶尚福院士带领团队在盲信号检测等领域做出了探索性的工作，奠定了盲信号处理的技術基础。

盲信号处理是信号处理领域的一个崭新的研究方向，引起了国内外学术界的高度关注。由于许多盲信号处理的研究方向还处于探索研究阶段，本书为读者呈献的仅仅是当前的认识水平和研究成果，其中一些结论性意见也只是研究者的实践总结和理论概括，主要目的是引起同行的关注和共同研究交流。

本书由郑辉同志负责统编，涂世龙负责第一篇校审，李明、乔良负责第二篇校审，邓月华、徐正国负责第三篇校审，乔良、李明负责第四篇校审，陈绍贺、廖灿辉负责第五篇校审，陈越新负责第六篇校审，燕继坤、黄渊凌负责第七篇校审。

本书得到了盲信号处理重点实验室李鹏、赵艳、孙正波、万坚、陈晓春、刘国才等领导的积极支持和指导，实验室许多科研人员给予了无私的帮助，在此表示衷心感谢。

郑辉

2012年11月

于盲信号处理国防重点实验室

目 录

(下册)

第四篇 盲信号检测技术

第7章 盲突发信号检测技术	327
7.1 盲突发信号检测概述	327
7.2 盲突发信号检测技术	328
7.2.1 盲突发信号能量检测方法	328
7.2.2 基于多分辨分析的盲突发信号检测	330
7.2.3 盲突发信号参数检测	335
7.3 盲跳频信号检测	345
7.3.1 盲跳频信号检测的一般方法	346
7.3.2 单序列盲跳频信号检测算法	354
7.3.3 多序列盲跳频信号检测算法	369
第8章 盲隐藏信号检测技术	381
8.1 盲隐藏信号检测概述	381
8.2 盲扩频信号检测	381
8.2.1 直接序列扩频信号的低检测性特点	381
8.2.2 盲扩频信号检测技术	383
8.3 盲混合信号检测	398
8.3.1 盲对称混合信号检测	399
8.3.2 基于累积量和似然特征结合的盲对称混合信号检测	405
8.3.3 基于累积量和谱线特征结合的盲对称混合信号检测	414
8.3.4 基于信噪比估计的盲非对称混合信号检测	418
8.3.5 基于时频域特征结合的盲非对称混合信号检测	422
参考文献	431

第五篇 盲信源分离技术

第9章 正定条件下混合信号盲源分离技术	435
9.1 正定条件下混合信号盲源分离概述	435
9.1.1 混合信号盲源分离的模型与定义	435
9.1.2 正定条件下混合信号盲源分离的应用	439
9.2 正定条件下混合信源数估计	440
9.2.1 矩阵分解法	440
9.2.2 基于信息论准则的算法	442
9.2.3 基于盖尔圆准则的算法	444
9.3 独立性准则	449
9.3.1 互信息最小化准则(MMI)	449
9.3.2 信息最大化准则(Infomax)	451
9.3.3 非高斯最大化准则	452
9.4 正定条件下盲源分离算法	453
9.4.1 联合对角化算法(JADE)	454
9.4.2 信息最大化算法(Infomax)	456
9.4.3 等变自适应分解算法(EASI)	458
9.4.4 固定点算法(FastICA)	459
9.5 小结	462
第10章 欠定条件下混合信号盲源分离技术	463
10.1 欠定条件下混合信号盲源分离概述	463
10.2 欠定条件下混合信源数估计	463
10.2.1 基于稀疏性的方法	463
10.2.2 基于空间虚拟延迟抽头的方法	469
10.2.3 基于高阶累积量的方法	473
10.3 典型欠定条件下盲源分离算法	478
10.3.1 基于比率矩阵聚类的欠定盲源分离算法	479
10.3.2 基于检索平均的欠定盲源分离算法	485
10.4 小结	490
第11章 单通道混合信号盲源分离技术	491
11.1 单通道混合信号盲源分离概述	491
11.1.1 单通道盲源分离的模型与定义	491
11.1.2 单通道盲源分离的理论解释	496

11.2 单通道盲源分离的性能界	503
11.2.1 符号估计的性能界——联合界	503
11.2.2 参数估计的性能界——克拉美罗界	509
11.2.3 参数对分离性能的影响	512
11.3 基于粒子滤波的混合信号盲分离	517
11.3.1 粒子滤波算法的基本原理	518
11.3.2 相同符号速率下的盲分离	525
11.3.3 不同符号速率下的盲分离	532
11.3.4 用过采样提高盲分离性能	537
11.4 基于PSP的混合信号盲分离	539
11.4.1 PSP算法的基本原理	540
11.4.2 PSP用于混合信号盲分离	545
11.4.3 PSP盲分离的软输出计算	549
11.4.4 自适应减少留存路径数的PSP盲分离	553
11.4.5 能提供软输出的减路径盲分离	559
11.5 小结	562
参考文献	564

第六篇 盲信源恢复技术

第12章 基于信号结构的盲信源恢复技术	569
12.1 基于信号结构的盲信源恢复技术概述	569
12.2 基于群路信号结构的盲源恢复技术	570
12.2.1 误码对群路信号的影响	570
12.2.2 基于群路信号帧结构的盲信源恢复	575
12.3 基于IP信号结构的盲信源恢复技术	583
12.3.1 基于IPv4协议结构的盲信源恢复模型	584
12.3.2 基于IPv4协议结构的盲信源恢复技术	588
12.4 基于编码信号结构的盲信源恢复技术	590
12.4.1 结合HDLC帧结构的盲信源恢复技术	591
12.4.2 结合扰码结构的盲信源恢复技术	594
第13章 压缩数据的盲信源恢复技术	601
13.1 压缩数据的盲信源恢复概述	601
13.1.1 压缩数据的盲信源恢复技术背景	601
13.1.2 数据压缩方法简述	602

13.2	压缩信源可容错性分析	612
13.2.1	压缩数据可容错的直观理解	612
13.2.2	压缩数据可容错的熵估计	612
13.2.3	压缩信源可容错性的实验结果与分析	614
13.3	压缩信源中的误码传播分析	616
13.3.1	LZ77 算法编译码基本方法	617
13.3.2	LZ77 算法误码传播分析	618
13.3.3	实验结果与讨论	621
13.4	基于特征和内容联合容错的盲信源恢复技术	622
13.4.1	基于特征和内容联合容错算法概述	622
13.4.2	基于特征的容错译码算法	624
13.4.3	前向容错译码算法	624
13.4.4	反馈容错译码算法	632
13.4.5	实验与结果分析	635
	参考文献	639

第七篇 盲信息辨识技术

第 14 章	盲信号特征辨识技术	640
14.1	盲信号特征辨识技术概述	640
14.2	信号指纹特征产生机理	642
14.2.1	辐射源信号指纹的来源	642
14.2.2	正交调制误差	643
14.2.3	频率源的相位噪声	643
14.2.4	功放的非线性误差	645
14.2.5	瞬态响应	647
14.2.6	发射通路等效滤波器	649
14.2.7	其他发射机非理想特性	649
14.3	辐射源指纹特征提取技术	650
14.3.1	指纹特征的一般性要求	650
14.3.2	基于机器学习的特征提取	651
14.3.3	基于参数估计的特征提取	656
14.3.4	基于域变换的特征提取	661
14.3.5	信号指纹特征提取技术小结	666
14.4	模式识别分类器技术	666

14.4.1 K 最近邻分类器	667
14.4.2 概率神经网络分类器	667
14.4.3 支持向量机	668
14.5 信号特征的盲信息辨识的实验与分析	671
14.5.1 实验条件与方法	671
14.5.2 实验结果统计与分析	672
14.5.3 实验结论	682
第 15 章 不平衡类别的盲信息辨识	684
15.1 不平衡类别盲信息辨识概述	684
15.2 不平衡类别的支持向量机	687
15.2.1 支持向量机原理与应用	688
15.2.2 SVM 应用于不平衡类别的问题	690
15.2.3 反类野点抑制的支持向量机	692
15.2.4 实验结果	694
15.3 不平衡类别的单边抽样 Bagging 算法	698
15.3.1. 综合学习算法介绍	698
15.3.2 不平衡类别对 AdaBoost 综合学习算法的影响	701
15.3.3 不平衡类别学习的关键结论	706
15.3.4 单边 Bagging	708
15.3.5 SSBagging 的性能分析	711
15.4 用属性 Bagging 增强 kNN 的性能	712
15.4.1 ABagging kNN	712
15.4.2 ABagging kNN 的性能分析	714
15.5 可信度投票法及 CAB 算法	717
15.5.1 基于可信度的投票法	718
15.5.2 CAB 算法	721
15.5.3 CAB 算法性能分析	721
15.6 基于单边抽样和可信度投票的属性 Bagging	722
15.6.1 SSCAB	723
15.6.2 SSCAB 的性能分析	723
附录 A 定理 15.3.1 的证明	725
附录 B 定理 15.3.2 的证明	725
附录 C 引理 15.5.1 的证明	726
参考文献	727

第四篇 盲信号检测技术

第7章 盲突发信号检测技术

7.1 盲突发信号检测概述

突发信号检测对于参数约定完整的通信而言并不是一件困难的事情,而在约定参数缺失的条件下,突发信号检测就显示出了其特殊性。例如,当信号突发时域参数约定缺失时,对突发信号能否进行准确检测定位,将会直接影响到后续解调器恢复数据的质量好坏。学术界专门而系统地讨论此类问题的值得参考的文献非常少。参考文献[1]是1998年Eric Brignat和Aarne Mammela在IEEE通信汇刊上提出的一种算法,其基于自适应门限的能量检测法,近几年已经被国内研究者多次使用和改进^[2],其他深入研究此问题的文献很少。但是对盲信号处理而言,对突发信号的盲检测,不仅仅是检测突发信号有无和开始点,往往需要对突发信号的各种参数进行有效的检测,例如,对突发信号的载波参数、时钟参数检测,在突发长度不固定的情况下,对于突发结束的检测等都很重要。特别是在低信噪比的条件下,简单的能量门限的方法已经难以发挥有效作用,因此盲突发信号检测将成为盲信号处理的一个专门的研究方向。

跳频信号是在设计时就有意识地降低信号的可检测性,称为低检测概率信号(LPD)或低截获概率信号(LPI)。从跳频信号的每一跳来看,本质上是一个时频域约定参数均缺失的信号,因此也可以将跳频信号的盲检测归类于盲突发信号检测之中。但是对跳频信号的盲检测,具有其特殊性和应用领域,因此本章就盲跳频信号检测用专门一节进行讨论。

7.2 盲突发信号检测技术

7.2.1 盲突发信号能量检测方法

盲突发信号检测从实现方式上讲,既可以在时域上实现,又可以在频域上实现。时域方法可以考虑常用的短时能量法、短时自相关法、高阶累积量法等,频域法可以考虑幅度谱法和循环谱相关法等。考虑到高阶累积量和频域尤其是循环谱需要数据量很大才能显示出较好的效果,因此对短时突发信号而言,在实际应用时,往往仍然是采用能量法及相关检测算法。如果考虑到是否具有突发信号的先验知识,如独特码等,盲突发信号检测又可分为全盲检测和导频辅助的突发检测,导频辅助的突发检测多数情况下都可以大大提高突发检测的精确度,这时一般采用相关检测的方法来进行,检测性能和导频长度有关,低信噪比往往较为容易得到不错的检测结果。

本节重点研究无导频序列的盲突发信号检测方法。首先给出常用的能量检测法和参考文献[1]的自适应能量检测法,并分析其优缺点。针对无先验知识突发长度不固定条件下突发信号间隔较小的特殊情况,提出了一种基于多分辨分析的突发信号起止检测算法,仿真结果表明,该算法对这类信号的检测性能优异,复杂度也不高。

1. 常规能量检测法

设 $r(m) m=1, 2, \dots$ 表示一实信号序列, $w(m) m=1, 2, \dots, N$, 是长度为 N 的窗函数, 则信号在第 n 点的短时平均能量 P_n 为

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=n-(N-1)}^n [w(m)r(m) \cdot w^*(m)r^*(m)] = \frac{1}{N} \sum_{m=n-(N-1)}^n |w(m)r(m)|^2 \quad (7.2.1)$$

在信噪比一定的前提下,信号和噪声的能量和总是高于噪声的能量。通过设置一个能量门限来区分信号和噪声,大于这个门限就认为是信号,小于这个门限就认为是噪声。如果将门限设置得较高,那么就可能发生漏检,丢失信号;如果将门限设置得较低,就有可能发生虚检,错误地将噪声判成信号。所以如何设置合适的门限是能量检测中的关键。能量算法简单、计算量小、检测速度快,但对信噪比较敏感,在信噪比低时性能就有所恶化。

利用短时线性能量方法的检测效果主要取决于窗口长度 N 。当 N 与突发保护间隔成一定的比例关系时,短时信号能量法能很好的反应信号波形,达到相对

较好的检测效果。

因此,对于中高信噪比、突发长度比较规律且有一定长度的保护间隔的情况,这种能量检测法往往能够取得不错的性能。当然,前提是信号的信噪比已经得到预估计,式(7.2.1)中判决门限可以较好地确定。

在实际的信号中,由于延迟等原因的存在,各突发信号间的保护时间不尽相同。为了要达到较好的检测效果,那么窗口 N 值应该是一个变动的值,检测的门限也要随之变动,然而,在实际的处理中这个是不太容易实现的,而且这种检测算法受干扰信号的影响很大,从而导致检测性能的下降。

2. 自适应门限能量检测法

自适应门限能量检测法核心思想:实际信道噪声功率是时变的,能量法判决门限值如果是固定值会影响检测性能,因此门限也应该是变化的^[1],如图 7.2.1 所示。

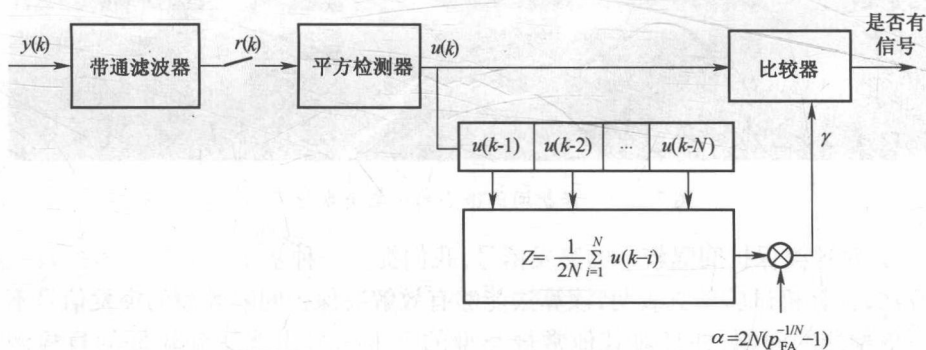


图 7.2.1 自适应门限能量检测法

该算法利用噪声功率的极大似然估计值来修改检测门限,当存储器存储满时,噪声的极大似然估计为

$$\sigma_{\text{ML}}^2 = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N u(k) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N |r(k)|^2 \quad (7.2.2)$$

式中: N 为存储器的长度,也是用来估计噪声功率的采样点数。在恒定的虚警概率为 p_{FA} 时,可得到判决门限

$$\gamma = 2N(p_{\text{FA}}^{-1/N} - 1)\sigma_{\text{ML}}^2 \quad (7.2.3)$$

此算法的检测性能与存储器长度 N 和虚警概率有关系。增大 N 和减小虚警概率,都可以改善检测性能。

与固定门限的算法相比,自适应门限算法通过不断地估计噪声功率来改变

检测门限,在一定的程度上能够适应信道的变化,从而降低了错误检测概率,并且信噪比越高效果越好。但随着信噪比的降低,该检测器性能逐渐恶化。

7.2.2 基于多分辨分析的盲突发信号检测

上述能量检测方法在中高信噪比下一般具有不错的效果,然而当相邻突发之间的保护间隔较小的时候(如几个符号),很容易发生误判而将这两个突发判别为同一帧的信号。在正常通信时由于严格的网络定时同步和一一对应的收发关系,收发双方对各种突发的类型是清楚的,因而这种情况是不存在的。但是在盲信号处理时,往往将全部通信用户的信息和各种类型的突发信号都接收,因而不可避免地可能会出现这类情况,如图 7.2.2 所示。



图 7.2.2 保护间隔很小的一类突发信号

针对这类保护间隔较小的突发信号,我们提出一种基于多分辨分析的盲检测算法,计算机试验仿真表明,该算法能够有效解决保护间隔较短的突发信号不能有效检测的问题,并且对其他常规类型的突发信号也能达到较好的盲检测效果。

1. 基于小波的多分辨分析

多分辨分析就是在不同的尺度、不同的分辨率下研究信号。在某分辨率下难以检测的信号特征,有可能在另一分辨率下得以检测。从频率的观点看,信号多分辨分解相当于信号多频道分解^[3]。下面首先简要概括基于小波多分辨分析的原理。

假定多分辨分析 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 中 $\{\varphi(x-k)\}_{k \in Z}$ 是标准正交的,对应的小波基函数为 $\psi \in L^2(R)$ 。由于 $\{\psi_{j,k}\}_{j,k \in Z}$ 构成了 $L^2(R)$ 的一组标准正交基,因而对任给的能量有限信号 $f(x) \in L^2(R)$,都可以用 $\{\psi_{j,k}\}_{j,k \in Z}$ 来进行分析。

于是得到 $f(x)$ 的尺度函数展开表示

$$f(x) = \sum_{k \in Z} c_{J,k} \varphi_{J,k} \quad (7.2.4)$$

式中: $c_{J,k} = \langle f(x), \varphi_{J,k}(x) \rangle$ 。

由多分辨分析知

$$V_J = W_{J-1} \oplus V_{J-1} = \cdots = W_{J-1} \oplus W_{J-2} \oplus \cdots \oplus W_{J-M} \oplus V_{J-M}$$

故得到 $f(x)$ 的小波函数展开表示

$$f(x) = \sum_{J-M \leq j < J} \sum_{k \in Z} d_{j,k} \psi_{j,k} + \sum_{k \in Z} c_{J-M,k} \varphi_{J-M,k} \quad (7.2.5)$$

式中: $d_{j,k} = \langle f(x), \psi_{j,k}(x) \rangle$ 。令

$$g_j(x) = \sum_{k \in Z} d_{j,k} \psi_{j,k} \in W_j$$

$$f_j(x) = \sum_{k \in Z} c_{j,k} \varphi_{j,k} \in V_j$$

则式 (7.2.5) 又可写为

$$f(x) = \sum_{J-M \leq j < J} g_j + f_{J-M} \quad (7.2.6)$$

它将 $f(x)$ 用在不同分辨层的函数叠加来表示, 其各层系数之间的关系可以由 Mallat 的分解与重构算法来表示。本书只是采用了其中的分解算法。

将双尺度方程和小波方程写成下列形式:

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_n \varphi(2x - n) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_n g_n \varphi(2x - n) \end{cases} \quad (7.2.7)$$

其中, a_n 与 h_n, g_n 的关系为

$$\begin{cases} \varphi_{j,k} = \sum_n h_n \varphi_{j+1, 2k+n} \\ \psi_{j,k} = \sum_n g_n \varphi_{j+1, 2k+n} \end{cases} \quad (7.2.8)$$

由于 $c_{j,k} = \langle f, \varphi_{j,k} \rangle, d_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle$, 因此根据式 (7.2.8) 有下列系数之间的关系式:

$$\begin{cases} c_{j,k} = \sum_n \bar{h}_{n-2k} c_{j+1,n} \\ d_{j,k} = \sum_n \bar{g}_{n-2k} c_{j+1,n} \end{cases} \quad (7.2.9)$$

这个由 $\{c_{j+1,k}\}_{k \in Z}$ 计算 $\{c_{j,k}\}_{k \in Z} \setminus \{d_{j,k}\}_{k \in Z}$ 的算法称为 Mallat 分解算法。可以把 Mallat 分解表示成滤波器组的形式, 低通滤波器 H 和高通滤波器 G 分别为

$$\begin{cases} (Ha)_k = \sum_n \bar{h}_{k-n} a_n \\ (Ga)_k = \sum_n \bar{g}_{k-n} a_n \quad \forall a = (a_k) \in l^2 \end{cases} \quad (7.2.10)$$

于是对于某离散信号,得到其多级多分辨信号分解的系统框图,如图 7.2.3 所示。其中 C^N 就是信号经过 N 次分解的低频部分,具有很高的时间分辨率,可以很好地反映突发信号的包络。

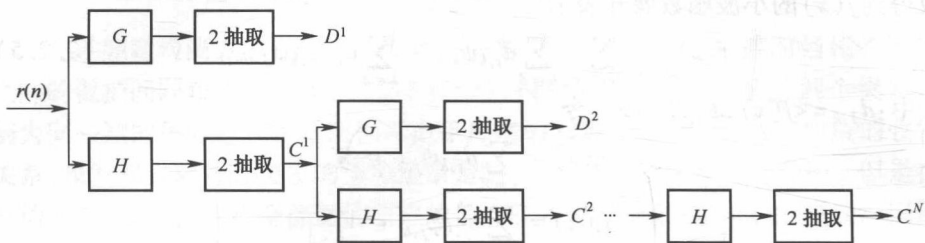


图 7.2.3 多层多分辨信号分解的系统框图

在实际应用中,往往对小波函数提出紧支撑性、对称性、平滑性和消失矩等要求。然而,仅有 Haar 小波是目前所知的具有紧支撑性、对称性的实值正交小波。因此选用 Haar 小波函数,其具体形式为

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7.2.11)$$

设低频系数 C^N 的长度为 M ,可以证明^[4],Mallat 算法的运算量为 $O(M)$,优于快速傅里叶变换的运算量 $O(M \lg 2M)$ 。因此,采用 Mallat 分解算法进行突发检测将具有较好的时效性。

2. 突发检测流程

基于上面的多分辨分析 Mallat 多层分解原理,给出如图 7.2.4 所示的突发信号检测流程。

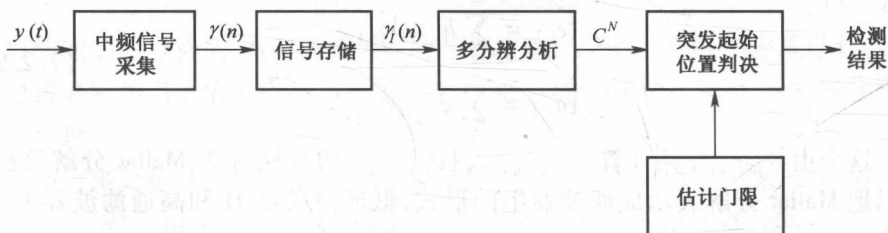


图 7.2.4 基于多分辨分析的突发信号检测流程

首先对输入突发信号 $y(t)$ 进行采集得到 $r(n)$,在进行多分辨多解之前预先存储一定长度的信号 $r_I(n)$ (I 为存储的突发包数目),接着对信号 $r_I(n)$ 进行

Mallat 多分辨分解,得到第 N 层分解结果 C^N ,然后根据输入的估计门限值进行突发信号起止位置的判决,最终得到突发检测的输出结果。图 7.2.5 给出了突发信号第 N 层分解得到的低频分量和检测判决结果示意图(图中虚线)

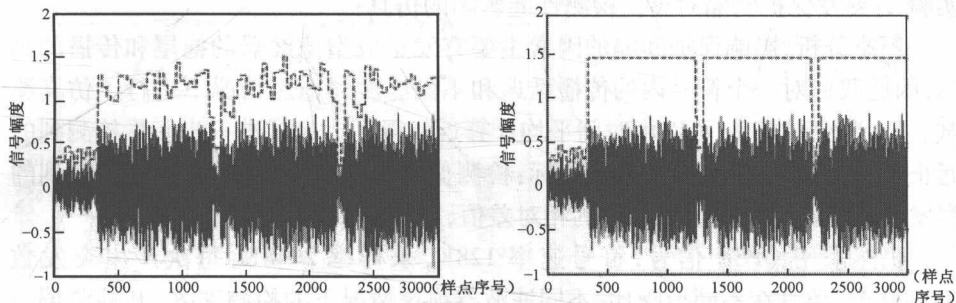


图 7.2.5 多层分解的低频分量(a)和检测判决结果(b)示意图

3. 实验仿真与分析

实验 1:对于分解层数 N 的分析:

采用卫星通信常用的 QPSK 信号,符号速率 128KBd,采样率 2048kHz,每次产生突发数 100000 个,每个突发包符号长度在 $\{200, 500, 1000\}$ 中随机选取,两个相邻突发保护间隔的符号长度在 $\{3, 5, 7, 9\}$ 中随机选取。蒙特卡罗仿真 100 次,分析分解层数对最终检测性能的影响,如图 7.2.6 所示,其中图 7.2.6(a)、(b)分别给出了检测概率和虚警概率与信噪比的关系。

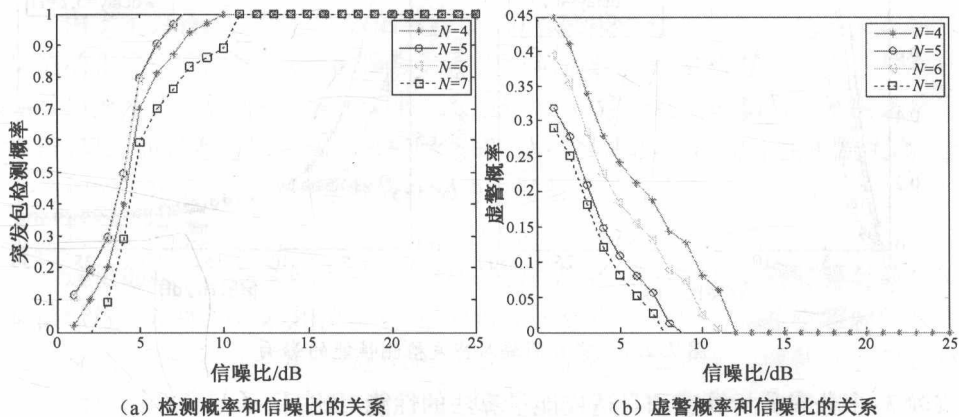


图 7.2.6 Mallat 分解层数对检测性能的影响

由图可见, $N=5$ 和 $N=6$ 时检测概率相当,而 $N=4$ 和 $N=7$ 的检测概率要差一些,而 $N=7$ 的虚警概率最小, $N=5$ 次之, $N=6$ 和 $N=4$ 虚警概率偏大。这种现