



国防科技图书出版基金

迭代检测 伪码捕获技术

Iterative Detection
Pseudo-code Acquisition Technology



王伟 李欣 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

迭代检测伪码捕获技术

Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Technology

王伟 李欣 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

迭代检测伪码捕获技术/王伟,李欣著. —北京:国防工业出版社,2014.5

ISBN 978-7-118-09316-2

I. ①迭... II. ①王...②李... III. ①扩频通信-信息代码-迭代法-信号检测 IV. ①TN914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第055853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公司
新华书店经售



*

开本 710×1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 262 千字

2014年5月第1版第1次印刷 印数 1—3000 册 定价 76.00 元

(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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

扩频通信技术具有抗干扰能力强、保密性好、抗截获、抗衰落、抗多径干扰、多址能力以及测距精准等一系列优点,因而受到了人们越来越多的重视。目前,在无线通信、卫星导航定位、雷达、水声通信和深空探测等诸多领域,扩频通信技术都得到了较为广泛的应用。同步作为扩频通信理论的一项关键技术,得到越来越多科研人员的关注,特别是在国防领域,随着超长伪码序列的发展和应用,传统方法在同步时间上已经无法满足实时性和复杂度的要求。本书重点介绍一种新的伪码捕获方法,不同于传统意义上的时频域捕获,而是基于迭代译码的思想,是从一种全新的视觉角度来分析伪码捕获问题的方法。

全书共分为6章:第1章介绍扩频通信系统的基础知识和伪随机序列,并着重对传统的捕获跟踪算法进行分析,便于读者理解本书所介绍的迭代检测伪码捕获方法;第2章介绍迭代检测的基础知识,包括概率、信号检测与估值、迭代检测思想的来源和迭代检测的相关知识及应用;第3章介绍因子图理论,包括因子图的基础知识、基于图模型理论的和积算法、最小和算法,最后给出了基于因子图的迭代检测伪码捕获方法;第4章分别以 m 序列和 Gold 码为例详细描述基于迭代检测伪码捕获方法的流程,并对迭代伪码捕获算法的性能进行仿真和分析。第5章针对算法的捕获性能提升和实现复杂度等方面提出相应的优化方法;第6章主要阐述算法的硬件实现,给出基于 FPGA 的硬件实现过程。

本书基于国内外学者的文献资料和作者从事的科研项目成果撰写而成,获得了总装备部国防科技图书出版基金的资助,在此作者谨向关心和支持本书撰写工作的各位专家、同事和同行表示由衷的感谢!

迭代检测伪码捕获技术是从一种新的视角解决长伪码序列捕获问题,涉及的知识比较广泛,作者水平和经验有限,疏失错误在所难免,全书的整体结构和内容安排还不够缜密。以上不当之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 扩频通信系统	1
1.1 概述	1
1.2 扩频通信系统的基础知识	1
1.2.1 扩频通信系统的概念	1
1.2.2 扩频通信系统的基本原理	2
1.2.3 扩频通信系统的类型	4
1.2.4 扩频通信系统的基本参数	5
1.2.5 扩频通信系统的特点	6
1.3 伪随机序列	9
1.3.1 伪随机序列的基本概念	9
1.3.2 m 序列	12
1.3.3 Gold 码	16
1.3.4 其他扩频序列	19
1.4 同步原理	22
1.4.1 同步及其不确定性的来源	22
1.4.2 捕获方法及性能分析	25
1.4.3 跟踪原理及性能分析	38
第 2 章 迭代检测的基础知识	54
2.1 概率的基础知识	54
2.1.1 随机事件与样本空间	54
2.1.2 频率与概率	55
2.1.3 随机变量与随机过程	56
2.1.4 全概率公式、贝叶斯法则和马尔可夫链	57
2.1.5 内在概率、外概率和后验概率	58
2.2 信号检测与估计	59
2.2.1 贝叶斯判决准则	59
2.2.2 复合假设检验	60
2.2.3 MAP - SqD 与 MAP - SyD	61

2.2.4	边缘与联合操作	63
2.3	迭代检测思想来源——Turbo 码	64
2.3.1	信道编译码发展	64
2.3.2	Turbo 码迭代检测的基本原理	66
2.4	迭代检测相关知识和应用	69
2.4.1	迭代检测算法的基本流程	69
2.4.2	最佳迭代接收的条件	71
2.4.3	迭代接收机的性能分析工具	72
2.4.4	迭代检测的应用	73
第 3 章	因子图理论	78
3.1	因子图的基础知识	78
3.1.1	因子图的基本概念	79
3.1.2	因子图的应用	82
3.1.3	因子图中消息传递策略	84
3.2	基于图模型理论的和积算法	85
3.2.1	计算一个边缘函数	86
3.2.2	计算多个边缘函数	86
3.2.3	因子图上和积算法的信息传递	86
3.3	和积运算与最小和算法	87
3.3.1	和积运算	87
3.3.2	最小和算法	88
3.4	基于因子图的迭代检测伪码捕获方法	89
3.4.1	一般译码模型的建立	89
3.4.2	迭代译码算法	92
3.4.3	基于因子图的迭代检测伪码捕获方法	96
第 4 章	迭代检测伪码捕获方法	103
4.1	m 序列迭代检测捕获算法	103
4.1.1	基于和积算法的 m 序列捕获	103
4.1.2	基于最小和算法的 m 序列捕获	108
4.1.3	基于隐藏节点因子图的 m 序列捕获算法	112
4.1.4	m 序列迭代检测捕获算法性能仿真与分析	115
4.2	Gold 码迭代检测捕获算法	119
4.2.1	Gold 码校验关系的确定	119
4.2.2	校验关系分析	122

4.2.3	Gold 码的冗余校验捕获	125
4.2.4	Gold 码的分层校验捕获	127
4.2.5	Gold 码迭代捕获的仿真分析	130
4.3	迭代检测伪码捕获方法的性能分析	134
4.3.1	基于密度进化的收敛性分析	134
4.3.2	基于 EXIT 图的收敛性分析	139
4.3.3	本地码同步方法及其捕获性能分析	144
第 5 章	迭代检测伪码捕获方法的优化	156
5.1	基于迭代软信息的同步误差消除	156
5.1.1	数字平均技术对初始码片信道信息的优化	156
5.1.2	基于最大似然估计的码片定时误差消除	160
5.1.3	基于三阶累积量的码片定时误差消除	162
5.2	迭代检测捕获算法的复杂度分析与改进	167
5.2.1	伪码迭代捕获算法的复杂度分析	167
5.2.2	低存储复杂度迭代译码算法	168
5.2.3	低运算复杂度向量选择算法	170
5.3	多用户 m 序列迭代检测捕获算法	171
5.3.1	多用户联合初始信息进化方法	172
5.3.2	多重迭代捕获算法	174
5.3.3	多用户迭代捕获算法设计	174
第 6 章	迭代检测伪码捕获方法的 FPGA 设计与实现	177
6.1	迭代检测伪码捕获方法的 FPGA 架构	177
6.1.1	算法功能模块的划分	177
6.1.2	位宽设计	180
6.2	控制通路设计	181
6.2.1	主状态机设计	181
6.2.2	信息初始化状态机设计	183
6.2.3	前向递归状态机与后向递归状态机设计	185
6.3	数据通路设计	189
6.3.1	数据采集模块设计	189
6.3.2	计算逻辑模块设计	190
6.3.3	消息存储阵列设计	192
6.4	恢复与判决单元设计	195
6.4.1	捕获判决控制器设计	195

6.4.2 伪码序列恢复模块设计	197
6.4.3 门限判决模块设计	198
6.5 系统联调与测试结果	200
参考文献	203

Contents

Chapter 1 Spread-Spectrum Communication System	1
1.1 Introduction	1
1.2 Basics of Spread-Spectrum Communication System	1
1.2.1 Concepts	1
1.2.2 Fundamental Principles	2
1.2.3 Operation Modes	4
1.2.4 Basic Parameters	5
1.2.5 Characteristics	6
1.3 Pseudo Random Sequence	9
1.3.1 Concepts	9
1.3.2 m Sequence	12
1.3.3 Gold Code	16
1.3.4 Other Spread-Spectrum Sequences	19
1.4 Synchronization Principle	22
1.4.1 Synchronization and Uncertain Sources	22
1.4.2 Acquisition Methods and Performance Analysis	25
1.4.3 Tracking Principle and Performance Analysis	38
Chapter 2 Basics of Iterative Detection	54
2.1 Probability Basics	54
2.1.1 Random Event and Sample Space	54
2.1.2 Frequency and Probability	55
2.1.3 Random Variable and Random Process	56
2.1.4 Total Probability Formula, Bayes Rule and Markov Chain	57
2.1.5 Intrinsic Probability, Extrinsic Probability and Posterior Probability	58
2.2 Signal Detection and Estimation	59
2.2.1 Bayesian Criterion	59
2.2.2 Composite Hypothesis Testing	60

2.2.3	MAP-Sqd and MAP-Syd	61
2.2.4	Marginalization and Combination	63
2.3	Source of Iterative Detection – Turbo Codes	64
2.3.1	Development of Channel Coding and Decoding	64
2.3.2	Basic Principles of Turbo Codes Iterative Detection	66
2.4	Basic and Application of Iterative Detection	69
2.4.1	Standard Process of Iterative Detection Algorithm	69
2.4.2	Optimal Conditions for Iterative Receiver	71
2.4.3	Performance Analysis Tools for Iterative Receiver	72
2.4.4	Applications	73
Chapter 3	Factor Graph Theory	78
3.1	Basics of Factor Graph	78
3.1.1	Concepts	79
3.1.2	Applications	82
3.1.3	Messaging Passing Strategy	84
3.2	Sum-Product Algorithm Based on Graph Model Theory	85
3.2.1	One Marginalization Function Calculation	86
3.2.2	Multiple Marginalization Functions Calculation	86
3.2.3	Sum-Product Algorithm on Factor Graph	86
3.3	Sum-Product Operation and Min-Sum Algorithm	87
3.3.1	Sum-Product Operation	87
3.3.2	Min-Sum Algorithm	88
3.4	Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Method Based on Factor Graph	89
3.4.1	General Modeling of Decoding	89
3.4.2	Iterative Decoding Algorithm	92
3.4.3	Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Method Based on Factor Graph	96
Chapter 4	Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Method	103
4.1	Iterative Detection Acquisition Algorithm for m Sequence	103
4.1.1	m Sequence Acquisition Based on Sum-Product Algorithm	103
4.1.2	m Sequence Acquisition Based on Min-Sum Algorithm	108
4.1.3	m Sequence Acquisition Based on Hidden Nodes Factor Graph ...	112
4.1.4	Simulation and Analysis	115

4.2	Iterative Detection Acquisition Algorithm for Gold Code	119
4.2.1	Determination of Gold Code Verification Relationship	119
4.2.2	Verification Relationship Analysis	122
4.2.3	Redundance Verification Acquisition Algorithm for Gold Code	125
4.2.4	Hierarchical Verification Acquisition Algorithm for Gold Code	127
4.2.5	Simulation and Analysis	130
4.3	Performance Analysis of Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Methods	134
4.3.1	Convergence Analysis Based on Density Evolution	134
4.3.2	Convergence Analysis Based on EXIT Graph	139
4.3.3	Performance Analysis of Local Code Synchronization Method	144
Chapter 5	Optimization of Iterative Detection Acquisition Method	156
5.1	Synchronization Error Elimination Based on Iterative Soft Information	156
5.1.1	Optimized Initial Chip Channel Information Using Digital Averaging Technique	156
5.1.2	Chip Timing Error Elimination Based on Maximum Likelihood Estimation	160
5.1.3	Chip Timing Error Elimination Based on Third-Order Cumulants	162
5.2	Complexity Analysis and Improvement of Iterative Detection Acquisition Algorithm	167
5.2.1	Complexity Analysis of Iterative Detection Acquisition Algorithm ...	167
5.2.2	Low Storage Complexity Iterative Decoding Algorithm	168
5.2.3	Low Computation Complexity Vector Selection Algorithm	170
5.3	Multi-User m Sequence Iterative Detection Acquisition Algorithm	171
5.3.1	Multi-User Joint Initial Information Evolutionary Method	172
5.3.2	Multiple Iterative Acquisition Method	174
5.3.3	Design of Multi-User Iterative Acquisition Algorithm	174
Chapter 6	FPGA Design and Implementation of Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Method	177
6.1	FPGA Architecture of Iterative Detection Pseudo-code Acquisition Method	177
6.1.1	Partitions of Arithmetic Function Modules	177
6.1.2	Bit-Width Design	180
6.2	Control Path	181
6.2.1	The Main State Machine	181

6.2.2	Information Initialization State Machine	183
6.2.3	Forward And Backward Recursion State Machine	185
6.3	Data Path	189
6.3.1	Data Acquisition Module	189
6.3.2	Computation and Logic Module	190
6.3.3	Information Storage Array	192
6.4	Recovery And Decision units	195
6.4.1	Acquisition Decision Controller	195
6.4.2	Pseudo-code Sequence Recovery Module	197
6.4.3	Threshold Decision Module	198
6.5	Joint Debugging and Test Results	200
References		203

第1章 扩频通信系统

1.1 概 述

通信现代化是人类社会进入信息时代的重要标志。在现代通信系统中遇到的一个重要问题就是干扰问题。随着通信事业的发展,各类通信网的建立,使得有限的频率资源更加“拥挤”,相互之间的干扰更为严重。如何在恶劣的环境条件下,保证通信有效、准确、迅速地进行是摆在当今通信科研人员面前的一个难题。

扩频通信是应用频谱展宽技术,实现加密、选址通信的一门新学科,它是一种具有多功能、抗干扰能力强的通信方式,是传统通信方式的重大突破和飞跃,其优点是传统通信方式无法比拟的。将其用于移动通信系统,不但可以实现 CDMA 移动通信系统,而且能减轻甚至消除由于移动信道多径时延扩展所引起的频率选择性衰落对数字移动通信系统性能的影响。扩频通信之所以得到迅速发展并且自成体系,其基本原因有以下两个方面:一是社会需要,特别是军事上的迫切需要;二是电子器件的发展,尤其是大规模、超大规模集成电路的研制成功,为扩频通信进入实用阶段奠定了物质基础。本章主要介绍了扩频通信系统的基础知识和伪随机序列,并着重对传统的捕获跟踪算法进行了分析,便于读者理解本书所介绍的迭代检测伪码捕获方法。

1.2 扩频通信系统的基础知识

1.2.1 扩频通信系统的概念

扩频通信就是扩展频谱(Spread Spectrum, SS)通信,它最初应用于军事导航和通信系统中。到了第二次世界大战末期,通过扩展频谱的方法达到抗干扰的目的已成为雷达工程师们熟知的概念。在随后的数年中,出于提高通信系统抗干扰性能的需要,扩频技术的研究得以广泛开展,并且出现了许多其他的应用,如降低能量密度、高精度测距、多址接入等。

扩频通信技术是一种信息传输方式,在发送端采用扩频码调制,使信号所占的频带宽度远大于传送信息所需的带宽;在接收端采用相同的扩频码进行相关解扩以恢复所传信息数据。这个定义包括三方面的含义:

1. 信号的频谱被展宽

众所周知,传输任何信息都需要一定的频带,称为信息带宽或基带信号频带宽

度。例如,人类语音的信息带宽为 300 ~ 3400Hz,电视图像信息带宽为 6MHz。在常规通信系统中,为了提高频率利用率,通常都尽量采用带宽大体相当的信号来传输信息,即在无线电通信中射频信号的带宽与所传信息的带宽是相比拟的,一般属于同一个数量级。如用调幅(AM)信号来传送语言信息,其带宽为语言信息带宽的 2 倍,用单边带(SSB)信号来传输,其信号带宽更小;即使是调频(FM)或脉冲编码调制(PCM)信号,其带宽也只是信息带宽的几倍。而扩频系统在传输同样信息信号时所需要的传输带宽远远超过常规通信系统中各种调制方式所要求的带宽,其信号带宽与信息带宽之比则高达 100 ~ 1000,属于宽带通信。

2. 采用扩频码序列调制的方式来展宽信号频谱

由信号理论可知,在时间上有限的信号,其频谱是无限的。信号脉冲越窄,其频谱就越宽。作为工程估算,信号的频带宽度与其脉冲宽度近似成反比。例如,波长为 1 μ s 的脉冲带宽约为 1MHz。因此,如果所传信息被很窄的脉冲序列调制,则可产生很宽频带的信号,这种很窄的脉冲码序列(其码速率很高)可作为扩频码序列。需要说明的是,扩频码序列与所传的信息数据是无关的,也就是说,它与一般的正弦载波信号是相类似的,不影响信息传输的透明性,扩频码序列仅仅起扩展信号频谱的作用。

3. 在接收端用相关解调(或相干解调)来解扩

正如在一般的窄带通信中,已调信号在接收端都要进行解调来恢复发送端所传的信息一样,在扩频通信中,接收端用与发送端完全相同的扩频码序列,与接收到的扩频信号进行相关解扩,恢复所传信息。

这种在发送端把窄带信息扩展成宽带信号,而在接收端又将其解扩成窄带信息的处理过程,会带来一系列好处。

1.2.2 扩频通信系统的基本原理

1. 香农公式

“信息论”的奠基人香农(C. E. Shannon)指出“在高斯白噪声干扰情况下,在平均功率受限的信道上,实现有效和可靠通信的最佳信号乃是白噪声形成的传递信号”,并给出了著名的香农公式,即

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (1-1)$$

式中: C 为信息容量,相当于信息传输率(b/s); B 为信道带宽(Hz); S/N 为信号的信噪比。

香农公式的本意是在给定信号功率和白噪声功率 N 的情况下,只要采用某种编码系统,就能以任意小的差错概率,以接近于 C 的传输速率来传送信息。但从式(1-1)还可以进一步看出:在信道容量不变的前提下,可以用加大系统带宽为代价来降低信噪比的要求,即带宽与信噪比具有互换关系。也就是说,增加带宽可以

在较低信噪比的情况下用相同的信息传输速率,以任意小的出错概率来传输信息,甚至在信号被噪声淹没的情况下,只要信号带宽足够大,也能保证可靠通信。因此,如果用高速率的扩频码将待传信息的带宽扩展成原来的几百倍甚至上千倍,就可以提高通信系统的工作能力,保证系统在低信噪比和强干扰条件下仍然能够安全可靠的工作。这就是扩展频谱通信的基本思想。

2. 潜在的抗干扰理论

根据柯捷里尼可夫在“潜在抗干扰性理论”中得到的信息传输差错概率公式为

$$p = f_u\left(\frac{E_s}{n_0}\right) \quad (1-2)$$

式中: p 为差错概率; f_u 表示函数关系; E_s 为信号能量; n_0 为噪声功率密度。

变换式(1-2),设信号带宽为 B_s ,信号功率为 P ,信息带宽为 B_d ,信息持续时间为 T_d ,噪声功率为 N

$$\begin{cases} B_d = \frac{1}{T_d} \\ P = \frac{E_s}{T_d} \\ N = B_s n_0 \end{cases} \quad (1-3)$$

把式(1-3)代入式(1-2),得

$$p = f_u\left(\frac{E_s}{n_0}\right) = f_u\left(\frac{PT_d}{N}B_s\right) = f_u\left(\frac{P}{N} \frac{B_s}{B_d}\right) \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,差错概率 p 是输入信号与噪声功率比(P/N)和信号带宽与信息带宽比(B_s/B_d)两者乘积的函数。也就是说,对于输入一定带宽 B_d 的信息,信噪比(S/N)与信号带宽 B_s 可以互换,指出了使用增加信号带宽 B_s 的方法可以换取 S/N 的好处。

3. 扩频通信系统的模型

1) 扩频通信系统的数学模型

扩频通信系统可以认为是扩频和解扩的变换对,其数学模型如图 1.1 所示。要传输的信号 $s(t)$ 经过扩频变换,将频带较窄的信号 $s(t)$ 扩展到很宽的频带 B_s 上去,发射的信号为 $s_s(s(t))$ 。扩频信号通过信道后,叠加噪声 $n(t)$ 和干扰信号 $J(t)$,送入解扩器的输入端。对解扩器而言,其解扩过程正好是扩频过程的逆过程,从而有:对信号 $s_s^{-1}[\cdot]$ 的处理,还原出 $s(t)$,即 $s_s^{-1}[s_s(s(t))]=s(t)$,而对噪声 $n(t)$ 和干扰信号 $J(t)$,有 $s_s^{-1}[n(t)]=n(t)'$ 和 $s_s^{-1}[J(t)]=J(t)'$,即将 $n(t)$ 和 $J(t)$ 扩展。这样,噪声和干扰只有在 $s(t)$ 的频带 $[f_a, f_b]$ 内时才能通过, $[f_a, f_b]$ 相对于 B_s 来讲要小得多,所以,噪声和干扰得到很大程度的抑制,提高了系统的输出信噪比或信干比。