

冯永新 刘芳 潘高峰 © 著

直接序列 扩频信号 同步新机理

ZHIJIE XULIE
KUOPIN XINHAO
TONGBU XINJILI



YZLI0890119254



国防工业出版社
National Defense Industry Press

直接序列扩频信号 同步新机理

冯永新 刘芳 潘高峰 著



YZLI0890119254

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书着重阐述直接序列扩频信号同步新机理,内容包括直接序列扩频同步机理、长周期伪码信号快速捕获、裂谱信号高效捕获、相关多峰信号跟踪方法研究、多模信号可重构同步方案设计等。不仅解决了因为伪码及载频不确定度大而引发的同步速度慢、精度差等问题,而且解决了因为频谱分裂、相关多峰而引发的主峰相位估计误差大的问题。

本书主要读者对象为导航制导、卫星通信等相关领域的研究人员、专业技术人员、高校教师和研究生等。

图书在版编目(CIP)数据

直接序列扩频信号同步新机理/冯永新,刘芳,潘高峰著. —北京:国防工业出版社,2011.11

ISBN 978-7-118-07763-6

I. ①直… II. ①冯… ②刘… ③潘… III. ①扩频信号 IV. ①TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217858 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)

鑫马印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7% 字数 260 千字

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

扩频通信技术自源于军事抗干扰通信发展至今,由于其在保密、抗噪、隐蔽、抗干扰、高精度测量等方面具有不可比拟的优势,已广泛应用于蜂窝移动通信、卫星移动通信、无线数据通信、遥测、监控、预警等领域。扩频通信按其扩频方式不同,可以划分为直接序列扩频(Direct Sequence Spreading Spectrum, DSSS)、跳频扩频(Frequency Hopping, FH)、跳时扩频(Time Hopping, TH)和线性调频(Chirp Modulation, CM)。其中,直接序列扩频技术的应用更为显著,随着直接序列扩频技术的深入发展、推广和应用,使其在卫星导航、移动通信、军事预警、电力、交通等领域获得了显著的社会和经济效益。

直接序列扩频通信机理是发送方将数据信息通过相应处理调制到所需频带上发射,接收方则通过对应逆处理提取原始基带数据信息。然而,对于接收方而言,解决人为及环境所造成的不确定度是提取或恢复有效基带数据信息的关键所在,例如,接收方通常要解决伪码相位误差及载频误差,解决此不确定度的过程被称为同步。显然,对于陆地、海洋和空间的广大用户,只要拥有信号同步的能力,也就可以达到相应的预测、侦察、对抗、导航、通信、测量等目的。由此可见,同步是扩频通信的关键技术,也是研究的重点和难点。

为此,针对现有同步方法和技术的不足,在国家自然科学基金“直接序列扩频通信技术的同步新机理研究”(No. 60802031)和国家863以及辽宁省高校创新团队系列计划课题的支持下,进行了相关理论和技术的深入研究。在此基础上,完成研究成果汇总、撰写本书,从而为相关领域的研究工作提出新方法和新思想。

研究工作中,要感谢课题组所在的辽宁省“信息网络与信息对抗技术”省级重点实验室和辽宁省“通信与网络技术”省级工程中心所提供的研究平台和条件,研究成果中,要感谢课题组所在的辽宁省高校“信息网络与信息对抗”创新团队的积极协作。本书的撰写工作,除了作者外,还得到了团队成员黄迎春、滕振宇、钱博、赵运弢、田明浩、隋涛、刘猛、周帆、姜月秋、张德育、张文波、田野、谭小波、刘庆利、吴瑞睿等的大力支持。

本书所提出的关键技术、算法、策略、方案等,可以为直接序列扩频系统的同步技术发展提供重要的理论支持和技术保障,也将为新型接收终端的研制与应用提供关键技术支持,并在相应技术领域发挥至关重要的作用。

著 者

2011 年 8 月 1 日

前 言

“同步”作为直接序列扩频信号接收处理的核心,一直以来是研究重点和焦点。为保证扩频信号具有更高的扩频增益、更强的抗模仿和抗欺骗能力,不断推出的新型扩频伪码及相关新体制和新技术,即:新的长周期或非周期伪码信号,具有裂谱及相关多峰特性的伪码信号,高速及频率共享等多模特性伪码信号等等,在提高包含通信、导航、侦察、探测等应用系统性能和自适应性的同时,更为如何实现高效的信号同步接收,即信号捕获和跟踪环路的正确性、时效性、复杂度等提出了挑战。

本书在分析直接序列扩频信号同步技术的研究现状及发展趋势的基础上,应新特性信号的应用需求,进行直接序列扩频信号同步新机理的研究,全书分为6章。

第1章“绪论”,阐述了本书撰写的背景及意义和直接序列扩频信号新机理的现状、发展与研究的思路和方法。

第2章“直接序列扩频与同步理论”。首先,介绍了直接序列扩频系统及直接序列扩频信号机理,并给出了直接序列扩频系统的同步需求及方法;其次,例举了同类典型的直接序列扩频应用系统;最后,从长周期性、裂谱性、多峰性、多模性展开了直接序列扩频信号新特性分析。

第3章“长周期伪码信号快速捕获机理”。首先,分析了长周期伪码信号的机理及特性,研究了捕获判决门限,并对XFAST捕获算法、均值捕获算法进行了深入研究;其次,应高精度、快速度等处理需求,提出了时频融合捕获算法、频域并行捕获算法、时频优化捕获算法;最后,从处理复杂度、捕获时间、捕获精度等角度着手展开直接捕获算法的效能分析,并进行了仿真分析。

第4章“裂谱信号捕获机理”。首先,分析了裂谱信号机理及特性;其次,开展了全频带、单频带、主瓣叠加的优选频带、主瓣选优的优选频带等捕获算法的研究;最后,基于复杂度、捕获时间、虚警与漏警等方面进行了效能分析,并进行了仿真分析。

第5章“相关多峰信号跟踪机理”。首先,分析了相关多峰信号机理及特性;其次,重点开展了超前滞后跟踪技术、主峰检测跟踪技术、相位精度提升跟踪技术的研究。通过多峰去除处理、变采样率处理以及精度提升处理等手段,实现对主峰的跟踪;最后,从复杂度、跟踪精度、检测概率角度着手进行效能分析,并进行了仿真分析。

第6章“多模信号可重构同步机理”。首先,从系统多模信号需求出发,分析了新体制信号特性;其次,通过自适应检测技术缩小同步接收输入的不确定度,并考虑处理速度、处理精度、资源利用率、处理复杂度等因素,进行重构驱动、重构规化、重构实现,进一步形成具有合理性、高效性、可重构性的多模信号可重构同步总体控制策略;最后,以典型系统为例,进行了相应的实例仿真。

本书对于相关专业领域的研究人员、工程技术人员、高校教师 and 研究生等,具有较高的参考价值。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

2011年8月1日

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究的背景、意义与目的	1
1.2	研究的现状、进展与趋势	3
1.3	研究的思路、方法与创新	6
第 2 章	直接序列扩频与同步理论	9
2.1	直接序列扩频系统组成与原理	9
2.2	直接序列扩频信号	11
2.2.1	扩频伪随机序列	11
2.2.2	载波调制方式	14
2.2.3	功率谱与相关性	15
2.3	直接序列扩频系统的同步	17
2.3.1	信号捕获	18
2.3.2	信号跟踪	22
2.4	直接序列扩频系统性能评价	24
2.4.1	系统的射频带宽	24
2.4.2	系统的扩频增益	25
2.4.3	系统的抗干扰容限	26
2.5	扩频通信应用系统	28
2.5.1	卫星通信	29
2.5.2	移动通信	31
2.5.3	导航定位	32
2.5.4	其他应用	32
2.6	直接序列扩频信号新特性	33
2.6.1	扩频伪码长周期性	33

2.6.2	扩频信号裂谱性	34
2.6.3	扩频信号多峰性	36
2.6.4	扩频信号多模性	38
2.7	小结	39
	参考文献	39
第3章	长周期伪码信号快速捕获机理	41
3.1	长周期伪码信号机理及特性	41
3.2	捕获判决	44
3.2.1	判决门限	44
3.2.2	绝对能量判决	44
3.2.3	比例峰值判决	45
3.3	辅助引导捕获	46
3.4	循环相关技术	47
3.4.1	循环相关理论	47
3.4.2	循环相关捕获	49
3.5	直接捕获技术	52
3.5.1	XFAST 捕获算法	52
3.5.2	均值捕获算法	54
3.5.3	时频融合捕获算法	56
3.5.4	频域并行捕获算法	59
3.5.5	时频优化捕获算法	63
3.6	直接捕获算法效能分析	71
3.6.1	复杂度	71
3.6.2	捕获时间	73
3.6.3	捕获精度	75
3.7	仿真与分析	78
3.7.1	XFAST 捕获算法仿真与分析	78
3.7.2	均值捕获算法仿真与分析	79
3.7.3	时频融合捕获算法仿真与分析	80
3.7.4	频域并行捕获算法仿真与分析	82

3.7.5	时频优化捕获算法仿真与分析	84
3.8	小结	90
	参考文献	90
第4章	裂谱信号捕获机理	92
4.1	裂谱信号机理及特性	92
4.2	全频带捕获技术	101
4.3	单频带捕获技术	102
4.4	优选频带捕获技术	104
4.4.1	算法的提出	104
4.4.2	主瓣叠加捕获算法	116
4.4.3	主瓣选优捕获算法	119
4.5	捕获算法效能分析	122
4.5.1	复杂度	122
4.5.2	捕获时间	122
4.5.3	虚警与漏警	124
4.6	仿真与分析	126
4.6.1	全频带捕获算法仿真与分析	126
4.6.2	单频带捕获算法仿真与分析	128
4.6.3	主瓣叠加捕获算法仿真与分析	130
4.6.4	主瓣选优捕获算法仿真与分析	133
4.7	小结	135
	参考文献	136
第5章	相关多峰信号跟踪机理	138
5.1	相关多峰信号机理及特性	138
5.2	超前滞后跟踪技术	141
5.2.1	NELP 伪码跟踪算法	142
5.2.2	VNELP 伪码跟踪算法	146
5.3	主峰检测跟踪技术	148
5.3.1	无偏相关主峰检测算法	148
5.3.2	偏移正交互相关主峰检测算法	151

5.3.3	频域提取主峰检测算法	156
5.4	相位精度提升跟踪技术	162
5.4.1	三点二次插值算法	164
5.4.2	三次样条插值算法	164
5.5	跟踪算法效能分析	166
5.5.1	复杂度	166
5.5.2	跟踪精度	166
5.5.3	检测概率	167
5.6	仿真与分析	168
5.6.1	主峰检测跟踪技术	168
5.6.2	相位精度提升跟踪技术	173
5.7	小结	177
	参考文献	177
第6章	多模信号可重构同步机理	180
6.1	系统多模信号需求	180
6.2	自适应检测技术	183
6.2.1	信噪比检测方法	183
6.2.2	载波频率检测方法	185
6.2.3	伪码及基带参数检测方法	187
6.3	多模同步控制技术	191
6.3.1	重构驱动	192
6.3.2	重构规划	193
6.3.3	重构实现	197
6.4	实例仿真与分析	198
6.4.1	多模信号仿真与分析	198
6.4.2	检测技术仿真与分析	200
6.4.3	多模信号同步仿真与分析	206
6.5	小结	219
	参考文献	220

第1章 绪 论

1.1 研究的背景、意义与目的

扩频接收技术的研究最早出现在 20 世纪 70 年代中后期,以美国为主导。由于扩频通信在提高信号接收质量、抗干扰、保密性、增加系统容量等方面都有突出的优点,因而,扩频通信迅速地在民用、商用通信领域普及开来。

扩频通信技术从产生至今,一直以独特的抗干扰性、抗噪声性、抗多径衰落能力、低功率谱特性和良好的保密性而受到日益关注。按其扩频方式的不同,可以划分直接序列扩频、跳频扩频、跳时扩频和线性调频 4 种方式。其中 DSSS 的研究最为深入,在移动通信、卫星导航、信号侦察与探测等军事和民用领域也最为广泛。直接序列扩频通信的基本原理是将要发送的信息用扩频伪码序列扩展到很宽的频带上发射,在接收端用与发射端相同的伪随机序列码对接收到的扩频信号进行相关处理,恢复出原来的传输信息,从而达到通信的目的。

为了实现直接序列扩频信号的正确接收,对接收端的伪码及载波相关处理所构成的捕获与跟踪环节尤为重要。可以说,直接序列扩频信号的高效同步环路的机理研究是关键,更是难点。

针对直接序列扩频信号而言,为保证扩频信号具有更高的扩频增益、更强的抗模仿和抗欺骗能力,不断推出新型扩频伪码,例如新一代卫星导航信号中的 P 码、Y 码、M 码等。可以说主导了伪码产生与应用的新特性要求,即:

- (1) 伪码应具有长周期或无周期特性;
- (2) 提高可用性而采用的频谱分裂、相关多峰值特性信号;
- (3) 考虑与现有系统与通信频率共用及提高性能采用的多模信号。

如多卫星导航信号的共用、移动通信与中距离导航信号的并存等等。

显然,现有的直接序列扩频信号的同步方法已不能满足需要,尤其是随着新型加密信号的发展对同步处理效能也提出了新的要求和挑战。尽管现阶段,针对传统串行逐位方法,进行了扩频长周期伪码的捕获同步方法的改进研究,但是捕获速度的提高不应仅局限于依靠大规模集成电路的并行方式以及以牺牲捕获与跟踪精度为代价的 FFT 的改进;更应针对伪码所具有的时频域特性本质着手加以解决。例如针对长周期伪码,可以考虑从降低搜索不确定度来实施;针对裂谱信号,可以考虑从其频谱边带特性加以应对;针对相关多峰信号,可以考虑从主峰检测及相位精度提升角度加以着手等等;同时针对伪码的相关度约束,做好具有一定自适应的多普勒(以下称为 Doppler)补偿的辅助,并进一步降低虚警与漏警。

另外,随着扩频通信的发展,对直接序列扩频信号单用途的接收处理已经不能满足需要,提出了自适应集成与信号多模态接收的要求。为此,我们更应从研究具有不同频率、调制方式及多伪码扩频的直接序列扩频信号的自适应检测技术与高效同步技术入手,进行具有可重构能力的多模态同步机理的研究。

综上,针对直接序列扩频通信技术的发展,特别是现有信号同步技术的不足以及伪码特性与系统应用的需求,提出进行基于直接序列扩频信号同步新机理的研究,核心为长周期伪码信号快速捕获、裂谱信号高效捕获、相关多峰信号高精跟踪以及自适应、可重构的多模同步。

1.2 研究的现状、进展与趋势

1. 研究现状

近几年来,世界各国对扩频技术的研究与应用已达到高潮,尤其是对直接序列扩频技术的研究及应用,相继扩频通信的核心技术,即同步处理技术的研究也就成为必然,而且也越来越受到各军事强国的重视,同时从以军用为主转变为军民两用的趋势也相应的推动各国在民用上的应用需求,因此各国也都相继开展相应的研究。

为实现直接序列扩频信号的正确接收,同时为实现对信号的最大增益解扩,信号接收端的同步处理技术,即有效的信号捕获与跟踪技术已成为国内外研究的重点及难点。虽然可以通过高精度的原子钟、A/D、大规模的集成电路等硬件设施来实现高效的同步处理,但是,考虑高精度设备的稳定性、兼容性、复杂度及成本等问题,对其同步处理的核心研究还主要围绕高效同步处理软件算法而展开。在众多国家中,俄罗斯和美国对扩频信号同步的研究是较为深入的,成果也较为显著。

现阶段针对长周期伪码信号的捕获通常采用相关方法,为提高计算速度,又通常基于快速傅里叶变换(以下称为FFT)方法。在该研究领域,先后提出了许多码的捕获算法,如扩展复制重叠捕获算法XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique),在此基础上的序列块搜索算法等。后来又有对FFT循环相关的多种方案进行了研究。其中,较为有效的长码直接捕获算法有XFAST捕获算法和均值捕获算法,虽然两种算法有助于长周期信号的快速直接捕获,可以提高信号直接捕获的效率及扩大一次搜索范围,但是考虑Doppler频移较大的情况,尤其是随着新特性信号的出现,现有的算法在捕获相关度及时效性上已不能满足需要。因而又相继提出了一些长周期伪码的捕获算法,如基于相关器的捕获算法,其采用的是滑动相关的方法,在伪码搜索范围较

大情况下,捕获效率会较低;一种改进的基于 FFT 的捕获算法,通过多通道并行处理,提高搜索范围,改进了捕获性能,但是针对伪码所需高采样率处理的特性,其单纯的循环相关处理已不能满足高效需求;一种提高载波捕获性能的方法,其基于时域补偿的方法缩小载波 Doppler 误差,但是在处理 Doppler 补偿次数较多情况下,采用时域处理会影响其处理速度,为此,结合信号独有的特性,进行基于长周期伪码信号的高效直接捕获方法的研究为本书研究的重点之一。

由于新特性信号的出现,对其信号捕获方法的研究就引起了国内外的重视,尤其是扩频伪码进行了副载波调制,引发了频谱的分裂,因此对裂谱信号捕获方法的研究就引起了相关领域的重视。如一种基于 BOC 信号的捕获方案,采用的是滑动相关的方法,处理速度相对较差;一种对 BOC(2,2)信号的捕获方法和 BOC(1,1)信号的捕获方法,两者都是采用循环相关及边带处理的方法来提高效率,但都是适用于 BOC(n, n)族,对于其它族不适用。因此,对其裂谱信号的同步捕获方法的研究势在必行,同时也是本书研究的重点之一。

随着直接序列扩频系统的发展与应用,对其跟踪技术的研究也提出精度要求,考虑到新调制技术出现了相关多峰信号,它的主峰斜率比较大,可以得到比 BPSK 信号更好的输出精度,又由于在直接序列扩频系统中,例如导航系统中,其定位精度与信号的自相关函数存在密切关系,接收系统必须要准确地确定信号自相关函数的主峰位置,才能准确定位。因此,对跟踪技术的研究也提出了新的要求,尤其是对主峰的跟踪,近年来国内外也提出了一些相关多峰信号主峰跟踪的方案。例如:Fishman&Betz 算法,通过滤出多峰信号的主瓣,再与本地伪码的主瓣进行相关,从而去除信号多值性。但由于使用了 3 个滤波器,而造成资源很大的浪费;进行改进之后只使用一个滤波器,但是其性能受滤波器性能的影响较大;又设计了称为“bump - jump”的方法,通过当前输出与超前、滞后输出相比较来判定当前输出是否跟踪到最大的峰值,然而该算法

对于边峰少的情况较适用,而且一旦发生错锁,就会需要很长的时间来纠正;后来又出现了 ASPECT (Autocorrelation Side - Peak Cancellation Technique) 技术,除了把接收到的信号与本地信号相关外,还使用了本地伪码与外部信号进行相关,此方法不需要滤波,也不需要边带提取,只须把两个相关函数相减,就可以得到副峰值较小的相关函数,并且通过合适的加权系数可以消除多峰性,但是此方法只适合于 BOC (n, n) 族的信号,对其它族信号并不适用。由此可见,现阶段对相关多峰信号的跟踪方法还并不完善,还处于理论研究阶段,为此,必须展开新的跟踪方法和技术的研究来加以解决和应对,因此本书将对相关多峰信号的高效跟踪方法进行研究。

现阶段国内外对接收系统相关技术的研究,还主要是对单频或双频接收技术的研究,例如对单一卫星导航系统接收终端同步算法及检测技术的研究,对 GPS 及北斗系统信号的辅助应用等,重点是对同步接收中关键技术及方法的研究,然而,对多系统、多频段、多信号的集成多模同步技术的研究还处于初探阶段,因此,本书将对多模信号同步接收策略进行深入研究。

2. 发展趋势

通过综合论证和深入研究,直接序列扩频技术、特别是同步处理技术研究将呈现以下发展趋势,这也正是本书有待研究的重点和关键:

(1) 长/非周期伪码信号直捕策略的改进,从而提高直接捕获效率,主要围绕捕获精度及处理速度展开;

(2) 动态高精度跟踪长/非周期伪码信号的码相位及载波相位,从而提高接收系统的高效能接收;

(3) 基于新特性信号的直接捕获及跟踪技术研究,结合相应处理技术提高同步精度及效率;

(4) 高动态、多通道同步处理策略,以及搜索策略(串行、并行、串/并行)及其分析方法的研究,进一步提高同步处理速度,为工程化实施奠定基础;

(5) 多系统接收终端的研究,完成对不同频段、不同用途信号的同步处理,满足新型接收终端发展的需要;

(6) 基于参量估计和信号检测理论,研究最佳的检测和判决方式,提高检测概率,降低虚警率。

1.3 研究的思路、方法与创新

由于直接序列扩频系统的新发展与新应用,对其相关技术的研究也越来越深入,尤其是对新的信号调制体制、新的军用伪码信号增强型应用、考虑兼容和新需求的民用伪码及新频段增设等信号的改进与变化的研究,以及随新信号的应用而带来的侦测、捕获、跟踪、变换扩频信号方法,即对信号的同步处理方法的研究。

因此,在对信号同步捕获及同步跟踪技术的研究现状及发展趋势的基础上,针对新特性信号机理及特性进行了研究,并重点进行了信号同步机理的研究,在此基础上,从高精度、快速度、低复杂度等角度着手,重点从以下 4 方面展开具有创新性的同步新机理研究。具体研究方案如图 1-1 所示。

1. 长周期伪码信号快速捕获机理

在对长周期伪码信号机理及特性研究的基础上,考虑传输时延、Doppler 频移等因素影响,尤其应高精度、快速度等新要求的提出,针对长周期伪码信号特性,通过时频域处理、分段及均处理、移动序列处理、快速 Doppler 加权估计处理等手段,开展长周期伪码信号快速捕获算法的研究。从复杂度、捕获时间、捕获精度等角度进行效能分析,并进行基于仿真平台进行典型算法的仿真分析。

2. 裂谱信号捕获机理

考虑频谱分裂信号独有特性,采用传统串、并行捕获方案将无法解决其有效捕获的目的。为此,利用其频谱特性,在研究传统全频带、单频带捕获方法的基础上,建立了优选频带捕获方法。同时,从复杂度、捕获时间、虚警与漏警概率角度进行效能分析,并进行基于仿真平台进行典型算法的仿真分析。