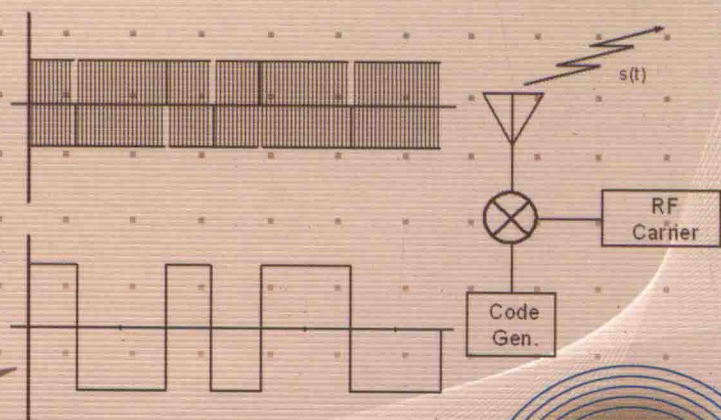


反相对称—扩频通信系统 抗噪声性能研究

*Research on Anti-Noise Performance of Phase-Inversion
Symmetric-Spread Spectrum Communication System*

陈 燕 著

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

反相对称 - 扩频通信系统 抗噪声性能研究

陈燕 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍有关噪声相关性及其应用的基本理论和方法,以及作者在这一领域的最新研究和探索。首先对相邻时隙噪声的相关性进行了研究。在此基础上,提出了一种在时域中利用噪声相关性来抑制噪声的编码方法,并将该方法与扩频通信相结合,设计了反相对称-扩频通信系统,对其抗噪声能力与传统扩频通信系统的抗噪声能力进行了对比分析。最后以 FPGA/VHDL 仿真软件 ISE 为设计平台,采用 VHDL 语言对 PIC-SSC 系统的各个模块进行了编程,实现了各模块的功能。

本书重点讲述作者在噪声相关性及其应用方面的最新研究成果,注重理论分析、实验验证,结构清晰、逻辑性强,适合从事通信及相关专业的研究生和科研人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

反相对称-扩频通信系统抗噪声性能研究/陈燕著. —北京:电子工业出版社,2012.12
ISBN 978-7-121-19072-8

I. ①反… II. ①陈… III. ①扩频通信-通信系统-噪声控制-研究 IV. ①TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 285777 号

责任编辑:张 榕

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:9.5 字数:132.6 千字

印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言



随着移动通信的迅速发展,使无线通信环境日趋恶化,如何进一步提高无线通信系统抗噪声性能,是当前的重要课题。扩频通信(Spread Spectrum Communication, SSC)具有抗噪声能力强、截获率低、码分多址、信号隐蔽、保密和易于组网等许多独特的优点,是现代通信技术发展的一个重要方向。SSC实际上是以牺牲带宽来抑制噪声的,但如何以较少的带宽资源获取较高的抗噪声能力是SSC技术的关键问题。因此不能简单地使用扩展带宽的方法;而需要与其他新技术结合起来进一步提高系统的信噪比,提高通信的可靠性。研究发现,目前无线信道中人为噪声的功率已经远远超过了自然噪声的功率,而人为噪声具有很强的相关性,因此利用噪声的相关性来抑制噪声就成了当前通信领域的研究热点。

首先对相邻时隙噪声的相关性进行了研究:设计了相邻时隙噪声相关系数的测试方法,然后对相邻时隙中自然噪声和人为噪声的相关系数进行了实际测试和对比分析。结果表明:自然噪声和人为噪声都具有不同程度的相关性;人为噪声的相关系数要大于自然噪声的相关系数,即人为噪声的相关性要强于自然噪声的相关性;相邻时隙噪声的相关性与相邻时隙的时延与频带带宽有关,而与频带处于什么位置没有关系;在带宽一定的条件下,人为噪声和自然噪声的相关系数随时延的减小而增大;在时延一定的条件下,相邻时隙噪声的相关系数随带宽的减小而



增大。

提出了一种利用噪声相关性来抑制噪声的编码方法,称为时域反相对称方法 (Phase - Inversion Symmetric Method, PISM), 设计了时域 PISM 的仿真模型, 并对此模型的可行性进行了仿真验证; 推导了时域 PISM 的抗带限高斯白噪声的性能; 构造了窄带噪声、梳状噪声和宽带噪声的模型, 并对其噪声的相关系数进行了测试; 在高斯白信道下, 对时域 PISM 抗不同噪声的能力进行了仿真和对比分析。实验表明: 时域 PISM 对带限高斯白噪声有抑制能力, 在解码时积分区间越小, 噪声相关性越大, 对噪声的抑制能力越强, 并且这一规律可以推广到其他噪声形式; 在信息的传输速率和噪声功率一定的条件下, 不同的噪声的相关系数不同, 时域 PISM 对其的抑制能力不同。窄带噪声相关系数最大, 宽带噪声相关系数最小, 时域 PISM 抗窄带噪声的能力最佳, 而抗宽带噪声的能力最差, 与噪声相关系数的分析相对应, 即相关系数越大, PISM 对其的抑制能力越强。

将时域 PISM 与传统的 SSC 系统相结合, 设计了一个新的通信系统——反相对称 - 扩频通信 (PIS-SSC) 系统, 并分别对其在高斯白噪声信道下和多径衰落信道下的抗噪声性能进行了仿真分析; 将 PIS-SSC 系统与传统的 SSC 系统的抗噪声性能进行了对比研究。仿真结果表明: PIS-SSC 系统对不同噪声均有不同程度的抑制能力; 抗噪声能力要优于传统的 SSC 系统。

以 FPGA/VHDL 仿真软件 ISE 为设计平台, 采用 VHDL 语言对 PIS-SSC 系统的各个模块进行了编程, 实现了各模块的功能。主要模块包括 m 序列生成模块、扩频模块、反相对称编码模块、同步模块和解扩模块。此外, 对反相对称解码模块实现电路进行了设计。结果表明, 设计方案正确、可行, 为工程实现提供了基础。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金 (项目号: 60872019) 和山西省青年科技基金 (项目号: 2011021017) 的资助, 在此表示感



谢。在本书写作过程中得到太原理工大学萧宝瑾教授和博士生导师马福昌教授的大力支持与悉心指导，在此深表感谢。本书还借鉴了许多国内外学者的研究成果，在参考文献中均予以列出，在此也谨向他们致以深切的感谢。若有遗漏不全或引用不当之处，敬请批评指正。总之，在课题研究过程中，尽管作者尽了很大努力，但由于水平和时间有限，书中还存在不少不完善之处，敬请各位专家批评指正！

作者

2012年9月

符号说明

G_{PISM}	反相对称法信噪比增益	$(\text{SNR})_{\text{in}}$	输入信噪比
ρ	相关系数	$(\text{SNR})_{\text{out}}$	输出信噪比
SSC	扩频通信	N_+	两路输出噪声功率之和
AWGN	加性高斯白噪声	N_-	两路输出噪声功率之差
PISM	反相对称法	V_+	两路信号的和电压
PIS-SSC	反相对称-扩频通信	V_-	两路信号的差电压
DSSS	直序扩频	V_{rms1}	均方值电压
$s_i(t)$	输入信号	C	信道容量
$s_o(t)$	输出信号	B	信道带宽
$k(t)$	乘性噪声	M	扩频码周期
$n(t)$	加性噪声	c_i	信息码元
$S_n(f)$	高斯白噪声功率谱密度	$r(t)$	信号和噪声的混合波形
$R(\tau)$	自相关函数	f_s	概率密度函数
τ	时延	P_e	系统错判概率
$\delta(\tau)$	单位冲击函数	$\varepsilon(t)$	系统误差
ω_0	中心频率	$h(t)$	冲激响应
$S_{\text{nc}}(f)$	带限高斯白噪声功率谱密度	$\overline{\varepsilon^2(t)}$	系统的均方误差
CH	信道	$H(\omega)$	频域传递函数
N	噪声功率	f_0	载波中心频率
S_i	输入信号功率	A	信号振幅
S_o	输出信号功率	$\varphi_0(t)$	载波初始相位



$\varphi_m(t)$	二元序列控制的载波相位	T_d	信息码的码元宽度
G_p	处理增益	M_j	系统的干扰容限
B_e	扩频码带宽	L_{sys}	扩频系统的损耗
B_d	信息信号带宽	$\Lambda(\tau)$	三角脉冲函数
R_e	扩频码的码速率(或称码片速率)	$c_r(t)$	扩频码
R_d	信息码的码速率	$p(t)$	双极性时钟脉冲信号
T_e	扩频码的码元(或称码片)宽度	T	信号周期
		$p'(t)$	单极性时钟脉冲信号

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外相关领域研究进展	2
1.2.1 扩频通信的研究进展	2
1.2.2 反相对称法的研究进展	7
1.3 主要研究目标及内容结构	9
1.4 本章小结	11
第 2 章 反相对称 - 扩频通信系统理论基础	12
2.1 基于噪声相关性的反相对称法原理	12
2.1.1 噪声基本概念	12
2.1.2 噪声相关性理论基础	15
2.1.3 基于噪声相关性的反相对称法基本思想	17
2.1.4 相邻信道噪声相关性研究	19
2.2 扩频通信系统原理	24
2.2.1 扩频通信的理论基础	24
2.2.2 直接序列扩频通信基本原理	32
2.2.3 直接序列扩频通信数学模型	34
2.2.4 直接序列扩频通信系统性能指标	36



2.2.5	直接序列扩频通信系统抗干扰能力分析	38
2.3	本章小结	47
第3章	时域反相对称法抗噪声性能分析	48
3.1	时域反相对称法	48
3.1.1	相邻时隙噪声相关性测试	48
3.1.2	时域反相对称法实现方法	52
3.1.3	时域反相对称法可行性研究	54
3.2	时域反相对称法抗噪声性能理论分析	57
3.3	时域反相对称法抗噪声性能仿真分析	61
3.3.1	噪声信号主要类型及仿真模型	61
3.3.2	抗窄带噪声的性能仿真与分析 ^{[70][71]}	66
3.3.3	抗梳状噪声的性能仿真与分析	67
3.3.4	抗宽带噪声的性能仿真与分析	69
3.3.5	抗不同噪声的性能比较与分析 ^[72]	70
3.4	本章小结	72
第4章	反相对称-扩频通信系统抗噪声性能分析	74
4.1	反相对称-扩频通信系统结构设计	74
4.2	反相对称-扩频通信系统性能分析	76
4.2.1	反相对称-扩频通信系统仿真模型	76
4.2.2	常用扩频码序列性能及生成方法	78
4.2.3	扩频系统常用调制方式	82
4.2.4	扩频码速率对系统误码率的影响	84
4.3	高斯白噪声信道中不同噪声下系统性能分析	87
4.3.1	抗窄带性能仿真及分析 ^[87]	87
4.3.2	抗梳状噪声性能仿真及分析	91



4.3.3 抗宽带噪声性能仿真及分析	94
4.4 多径衰落信道中不同噪声条件下系统性能分析	97
4.4.1 无线信道特性	97
4.4.2 多径衰落信道特性	99
4.4.3 多径衰落信道模型	104
4.4.4 不同时延下系统性能仿真与分析	105
4.5 本章小结	109
第5章 反相对称-扩频通信基带系统设计	110
5.1 发射模块设计与实现	110
5.1.1 扩频码序列设计	110
5.1.2 扩频调制模块设计	113
5.1.3 反相对称编码模块设计	114
5.1.4 发射模块总体仿真实现	115
5.2 接收模块设计与实现	116
5.2.1 接收同步问题	116
5.2.2 匹配滤波器设计	117
5.2.3 反相对称解码模块设计	119
5.2.4 解扩模块设计	122
5.3 本章小结	122
第6章 结论与展望	123
6.1 研究成果和结论	123
6.2 本书创新点	126
6.3 展望	126
图表索引	128
参考文献	132

第 1 章

绪 论



1.1 引言

由于具有实时性、机动性、不受时空限制等特点，移动通信已经发展成为人们日常工作与生活必不可少的通信方式。在移动通信的发展过程中，始终面临着对抗噪声^①的问题。通信与噪声是不可分割的矛盾的两个方面，所有的通信均伴随有噪声。在无线通信中，由于信道的开放性，信息在传播的过程中会加进各种各样的噪声，如大气噪声、多径干扰、工业噪声、其他通信设备的同频噪声、人为噪声等，使得无线通信面临的噪声环境更为恶劣。因此无线通信面临着强噪声的环境。如何提高无线通信系统抗噪声性能，是现代通信系统必须解决的课题^[1]。

在需求的牵引和技术发展的推动下，出现了各种通信技术，主要有：扩频技术、自适应技术、猝发通信技术^[2]、分集技术^[3]、自适应滤波技术等。其中扩频技术具有很强的抗噪声能力而被广泛应用于现代无线通信系统中。

扩频通信 (Spread Spectrum Communication, SSC) 是将基带信号的

① 本文中噪声和干扰统一称为噪声，参见参考文献 [55]



频谱扩展至很宽的频带进行传输,在接收端采用相关解扩的原理,将扩展的频谱恢复到基带信号的频谱,从而抑制传输过程中加入的噪声,以达到可靠通信的目的^[4]。由于采用了伪随机编码作为扩频调制的基本信号,SSC 便具有抗噪声性强、截获率低、码分多址、信号隐蔽、保密和易于组网等许多独特的优点。

SSC 实际上是牺牲带宽来对抗噪声的,然而,带宽资源是有限的。因此要想从根本上解决噪声问题,就不能简单地使用扩展带宽的方法,而需要与其他新技术结合起来进一步提高信噪比,保证通信的可靠性。扩频技术虽然在一定程度上可以降低发射功率,但是面临越来越多的他台干扰,无线信道中总的发射功率依然是增加的趋势。

另一方面,无线信道中的噪声已经由原来的自然噪声为主变成了以人为噪声为主。自然噪声可近似视为 AWGN,其相关性通常是很小的;而人为噪声却具有很强的相关性,显然不能被视为 AWGN。因此利用噪声的相关性来抑制噪声就成了当前通信领域的研究热点。

反相对称法 (Phase-Inversion Symmetric Method, PISM) 就是利用相邻信道噪声的相关性来抑制噪声的一种通信方法,其中相邻信道可以是相邻时隙、频带或空间,也就是说 PISM 可以应用于时域、频域或空域。对带限噪声和相邻信道噪声相关性的研究将是一个新的热点,它将导致信道利用率的进一步提高。

鉴于以上分析,本书将 PISM 与 SSC 相结合,构建一种新的通信模式——反相对称-扩频通信 (PIS-SSC) 系统,对 PIS-SSC 系统的抗噪声性能进行了研究。



1.2 国内外相关领域研究进展

1.2.1 扩频通信的研究进展

扩频技术的研究可以追溯到 20 世纪 20 年代,此期间诞生的雷达



(Radio Detection And Ranging, RADAR) 系统, 利用回波证明了电离层的存在, 其发射频谱宽度大于回波频谱宽度, 具备了 SSC 系统的基本特征, 是扩频技术的雏形阶段。到 20 世纪 40 年代, 美国好莱坞女演员赫蒂 (Hedy K. Markey) 第一个提出利用跳频技术来实现抗噪声通信系统的构想。迪罗萨 (Derosa) 和罗戈夫 (Rogoff) 于 1949 年完成了世界上第一个直接序列扩频系统, 并成功运用在新泽西州和加利福尼亚州之间的通信线路上。到了 20 世纪 50 年代, 美国麻省理工学院成功研制出了 NOMAC (Noise Modulation and Correlation System) 系统, 成为 SSC 研究发展的开端, 20 世纪 80 年代初被应用于民用通信领域, 目前已广泛应用于军事通信、空间通信、卫星侦察、导弹制导、蜂窝电话、无绳电话、微波通信、无线数据通信、遥测、监控、报警等方面。当前的 CDMA 蜂窝移动电话就是采用扩频技术来提高通信容量和通信质量的。

从国内来看, 近年来由于民用通信特别是陆地移动通信的迅速发展, 有关 SSC 的研究也在不断深入。各大高校及一些科研机构都在进行这方面的工作, 如天津大学、清华大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、南京邮电大学都在积极开展 SSC 的研究。

扩频通信根据其扩频方式的不同, 可以分为直接序列扩频通信 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)、跳频扩频通信 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 和跳时扩频通信 (Time Hopping Spread Spectrum, THSS) 等。目前, 最有代表性的是直接序列扩频。它相对于跳频和跳时方式来说, 实现频谱扩展方便、应用范围广, 是最典型的一种扩频技术。

DSSS 的原理是利用扩频码的相关性在解扩时把不相关的噪声信号能量扩散, 把相关的有用信号的能量聚集。如果噪声太强, 会超出系统的噪声容限, 系统将无法正常工作。因此, 引发了采用其他技术来增强 DSSS 系统抗噪声能力的研究热潮。目前 DSSS 常采用的抗噪声技术有以下几种^{[5][6]}。



1. 窄带噪声技术研究^{[7][8]}

窄带噪声技术的研究始于 20 世纪 70 年代末期。目前,有效的窄带噪声技术的研究及开发运用仍是众多学者研究的热门课题。

扩频信号具有很宽的带宽,较强的窄带信号噪声就容易被识别和估计,这样可以在扩频通信接收机的射频部分或接收机的中频部分或基带部分加入自适应滤波器抑制噪声。噪声抑制技术的理论基础是利用有用信号和噪声信号特性的差异来检测和消除噪声。其实现方法很多,从简单的信号处理技术到一些最先进的处理方法,已经建立了丰富的方法论体系。

目前,窄带噪声抑制技术主要有以下三种:

1) 时域预测技术^[9]

时域预测技术是利用窄带噪声的相关性强而扩频信号的相关性弱的机理来实现对窄带噪声的抑制,是最早发展起来的窄带噪声抑制技术之一,也是整个窄带噪声抑制领域的基石,其发展的基本结构、基本算法、研究的主要性能指标都成为了其他各类窄带噪声抑制技术改进的基础。该领域已有的技术可以分为线性预测技术、非线性预测技术^[10]和判决反馈 (Decision Feedback, DF) 技术^{[11][12]}。

线性预测技术是利用宽带信号和窄带噪声信号的谱特性来实现对窄带噪声的抑制,可以分为固定线性预测技术^[13]和自适应线性预测技术^{[14][15]}。非线性预测技术包括非线性 ACM 技术^[16]和非线性插值技术^[17]。

时域预测最大的缺点是该算法需要一个收敛过程,很难应用于动态噪声环境,特别是对那些以随机方式进出信道的窄带噪声,决定了时域预测算法只适用于慢变化噪声的情况,很难应用于动态噪声环境。

2) 变换域技术^[18]

变换域技术是利用信号和噪声在变换域中差异信息实现的噪声抑制



技术,是 DSSS 系统窄带噪声抑制的第二大体系,应用的变换域包括频域^[19]、时频域^[20]、小波域^{[21][22]}和空时域^[23]。

变换域技术是一种开环结构的方法,被认为是一种极具潜力的抗噪声策略,在时域很复杂的滤波过程可以在频域通过简单的相乘来完成,而且时域无法实现的理想的滤波器传递函数,如矩形滤波器等,也可以很方便地在频域实现。其抑制噪声的速度较快,而且非常适用于抑制强窄带噪声,在扩频通信领域,变换域处理技术可以有效地抑制噪声并改善系统性能。

3) 码辅助技术^[24]

码辅助技术是利用感兴趣信号的扩展码和窄带噪声的二阶统计量实现噪声抑制。当扩频系统与现有通信系统共享频谱资源时,窄带通信系统对扩频系统的影响被视为窄带噪声。这类噪声不适合被建模成音频或自回归干扰模型。20 世纪 90 年代初, Rusch 和 Poor 提出了将多用户检测 (Multi-User Detection, MUD) 思想用于 DSSS 系统数字窄带噪声抑制的新方案,称为码辅助技术 (Code-aided techniques)^[25],是窄带噪声抑制领域一个里程碑式的飞跃。目前,码辅助技术主要有基于线性码的辅助技术^[26]及基于最大似然码的辅助技术^[27]。

总之,各种窄带噪声抑制技术在性能和复杂度上各不相同,适用于不同的环境和系统,可以不同程度地改善系统的抗噪声性能。时域预测和变换域技术均利用了扩频信号和窄带噪声两者的频谱特性,码辅助技术则应用了更多的统计信息。总的来说,利用的信息越多,抑制噪声效果越明显,但相应的算法也越复杂。随着通信技术的发展,抗噪声技术将逐步走向实用化,具有高性能价格比,适合实际环境的抗噪声技术将成为研究的重点。

2. 混合扩频系统研究

近几年,在传统扩频方式的基础上出现了一种混合扩频通信方



式——二维扩频。直扩/跳频（DS/FH）混合扩频是一种较为流行的综合扩频技术^{[28][29][30]}。DS/FH 系统是时间域扩频和频率域扩频的串联，将直接序列扩频与跳频技术相结合，提高抗噪声能力。一方面，由于 DS 方式有很高的处理增益，对噪声信号（如宽带噪声、单频噪声）进行频谱扩展使其大部分的功率被接收机的中频带通滤波器所滤除；另一方面，由于 FH 的载波频率是跳变的，当跳变的频率数足够多、跳频带宽足够宽时，可以躲开噪声信号（如部分频带噪声、单频噪声），这样 DS/FH 系统具有更高的处理增益。但这是以增加设备复杂性为代价取得的，不利于硬件实现。

二次扩频也是一种新的混合扩频方法^[31]。所谓二次扩频，就是在时域用一组扩频码的基础上，用另一组扩频码再扩频一次，两组扩频的码字在长度上可以相同，也可以不同。由于二次扩频系统采用了两组扩频码，其处理增益为两组扩频处理增益的乘积；另外因为使用了两组扩频码，充分利用了两组扩频码的特性，使整个通信系统较传统的扩频系统具有更大的处理增益，这样就增强了二次扩频抗噪声的能力。但这种方法实质上，仍然是通过单纯的扩展频谱来提高处理增益的，也增加了系统复杂性。

3. 自适应天线抑制噪声技术^{[32][33][34]}

自适应天线抑制噪声技术是通过自适应波束形成技术将天线在噪声源方向的增益置为零或接近零，从而实现对干扰的抑制。

自适应天线调零技术具有以下特点：

（1）具有良好的空间辨别能力。在实际应用中，噪声信号和有用信号的来波方向一般不同，这种空间特征的差异，其他抗噪声技术以及传统天线很难加以充分利用，而自适应天线调零技术则可以突破传统天线的波束概念，无论噪声源是否处于主瓣内，都能够自适应地将方向图零点调到噪声信号的来源方向，从而抑制噪声信号。