DSSS/ CDMA 系统窄带干扰抑制技术概述

郭黎利[1] ,殷复莲[1] ,卢满宏[2]
(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 ,黑龙江哈尔滨 150001 ; 2. 北京遥测技术研究所 ,北京 100076)

摘 要: 窄带干扰(NBI ,Narrow-Band Interference) 作为一类常见的共道干扰对扩频系统的影响不容忽视 ,虽然扩频系统本身具备一定的 NBI 对抗能力 ,但有效的 NBI 抑制技术可以显著提高系统性能. 在过去的 30 年中 ,扩频系统 NBI 抑制技术的关注重心由单用户直扩 (DSSS ,Direct Sequence Spread Spectrum) 系统扩展到多用户码分多址 (CDMA , Code-Division Multiple-Access) 系统. 文章从预测技术、变换域技术、码辅助技术的角度对 DSSS 和 CDMA 系统 NBI 抑制技术的研究现状、分类比较以及发展趋势进行了全面概述.

关键词: 直扩系统; 码分多址系统; 窄带干扰抑制; 综述; 预测技术; 变换域技术; 码辅助技术
中图分类号: TN911. 72 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2009) 10-2248-10

Overview on NBI Suppression of DSSS/ CDMA Systems

GUO Li-li[1] , YIN Fu-lian[1] ,LU Man-hong[2]
(1. *College of Information and Communication Engineering , Harbin Engineering University , Harbin , Heilongjiang* 150001 , *China ;*
2. *Beijing Institute of Telemetry . Beijing* 100076 , *China)*

Abstract: As a common co-channel interference overlapping on spread spectrum , the effect of Narrow-Band Interference (NBI) could not be neglectable. Although spread spectrum systems could suppress NBI themselves to a certain extent ,the effective rejection techniques used for NBI suppression would enhance the performance greatly. Over the past 30 years ,the focus of NBI suppression has shifted from the single-user Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) systems to the multi-user Code-Division Multiple-Access (CDMA) systems. From the aspects of prediction ,transform domain and Code-Aided techniques ,this paper provides tutorial overview of current status ,category comparison and development trend on NBI suppression of DSSS and CDMA systems.

Key words: DSSS ; CDMA ; NBI suppression ; summarization ; prediction technique ; transform domain technique ; code-aided technique

1 引言

扩频通信系统处于复杂的电磁环境之中 ,不可避免的受到各类干扰的影响 ,特别是强窄带干扰 (Narrow-Band Interference) . 虽然扩频系统自身具备一定的 NBI 对抗能力 ,但有效的 NBI 抑制技术可以大大提高系统性能. 扩频系统 NBI 抑制技术随着扩频通信的广泛应用而空前发展. 起源于 20 世纪 70 年代的扩频系统 NBI 抑制技术最初仅关注单用户直接序列扩频 (DSSS ,Direct Sequence Spread Spectrum) 系统 ,于 80 年代末期初成体系 , Milstein 将其分为预测/ 估计滤波和频域滤波[1]. 直至 90 年代中期 ,随着多用户码分多址 (CDMA , Code-Division Multiple-Access) 通信研究热潮的到来 ,对 NBI 抑制技术的关注点扩展到了多用户 CDMA 系统 NBI 和多址干扰 (MAI ,Multiple Access Interference) 的联合抑制上 , Poor 和 Rusch 将其分为线性预测、非线性预测和多用户检测三大类[2]. 随后 ,DSSS 和 CDMA 系统 NBI 抑制技术同步发展 ,进入 21 世纪 , Wang 进一步将其总结为预测技术、变换域技术和码辅助技术[3].

结合近 30 年的科研文献 ,文章首先给出 DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制的简介 ;随后分别对 DSSS 和 CDMA 系统 NBI 抑制技术进行综合概述和比较 ,最后对 DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制技术的发展方向做出展望.

2 DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制技术简介

2. 1 DSSS 与 CDMA 系统 NBI 抑制技术属性

由于 DSSS/ CDMA 扩频通信系统的扩频增益受限 ,强功率的 NBI 将对其性能产生较大影响 ,为了提高系统的通信效果 ,需要采取信号处理技术来抑制 NBI. 图 1 给出了 DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制接收框图.

收稿日期 :2008-08-27 ;修回日期 :2009-06-22
基金项目 :高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20050217006)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

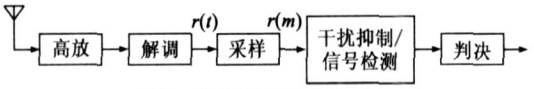


图1　扩频系统接收框图

DSSS 与 CDMA 系统虽然都采取直接序列扩频的方式,但 DSSS 系统为单用户通信、CDMA 系统为多用户通信,这使得二者的接收信号形式和检测目的完全不同. 在忽略白噪声影响的前提下,对于 DSSS 系统,接收信号包括 DSSS 信号、NBI 和白噪声,干扰抑制的目的仅是抑制 NBI,检测有用信息. 而对于 CDMA 系统,接收信号包括 CDMA 系统期望信号、CDMA 系统 MAI、NBI 和白噪声,干扰抑制的目的则是同时抑制 NBI 和 MAI,检测有用信息. 其中 NBI 通常建模为音频干扰,自回归(AR,autoregressive)随机过程或数字 NBI.

2.2　DSSS 与 CDMA 系统 NBI 抑制分类

现存的 DSSS 系统和 CDMA 系统 NBI 抑制技术各自包括 3 大分支:预测技术、变换域技术和码辅助技术. 虽然二者的检测目的不同,但由于 DSSS 与 CDMA 信号都采取直接序列扩频的方式,因此干扰抑制的基本原理和检测流程相同. 图 2 分别给出了预测技术、变换域技术和码辅助技术的干扰抑制/信号检测框图.

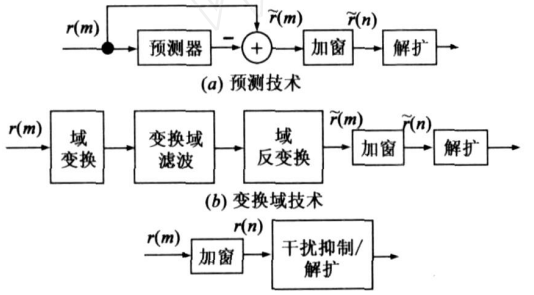


图2　干扰抑制/信号检测框图

预测技术:无论是 DSSS 系统还是 CDMA 系统,预测技术都是利用宽带信号和 NBI 可预测性的差异来再现 NBI,并从接收信号中将其减去从而达到抑制 NBI 的目的,继而再进行后续的解扩.

变换域技术:同样,无论是 DSSS 系统还是 CDMA 系统,都是将接收信号变换到其它域,根据宽带信号和 NBI 在不同域的特征差异,将以 NBI 为主的信号屏蔽掉,再将处理信号反变换后进行后续的解扩.

码辅助技术:码辅助技术利用信号和 NBI 的码特征,也就自相关特性,从而根据不同准则达到最优干扰抑制. 干扰抑制/信号检测结构与预测技术和变换域技术有所不同,其干扰抑制和解扩同时完成.

3　DSSS 系统 NBI 抑制技术

随着 DSSS 通信应用的日益广泛,自 20 世纪 70 年代开始,DSSS 系统 NBI 抑制技术逐步发展并完善. DSSS 系统 NBI 抑制技术的关键是消除或消弱 NBI,其包括 3 大类:预测技术、变换域技术和码辅助技术.

3.1　预测技术

预测技术是最早发展起来的 NBI 抑制技术之一,也是整个 NBI 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,都成为了其它各类 NBI 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、判决反馈(DF,Decision Feedback)技术和非线性预测技术.

3.1.1　线性预测技术线性预测技术利用了宽带信号和 NBI 的谱特性,最优的先验条件是所有信号均满足高斯平稳假设,可分为固定线性预测技术和自适应线性预测技术.

(1) 固定线性预测技术

最早的预测模型是固定的线性预测,始于 20 世纪 70 年代末期,基于抽头延迟线的有限冲激响应滤波. 这一时期发展了两种著名的接收结构,横向结构和插值结构,如图 3 所示. 横向结构仅利用了历史样值对当前样值进行预测,而插值结构不仅利用了历史样值,同时利用了未来样值对当前样值进行预测,插值结构以系统复杂度的提升为代价可以得到比横向结构更优的性能. 这两种接收结构为 NBI 抑制理论奠定了基础.

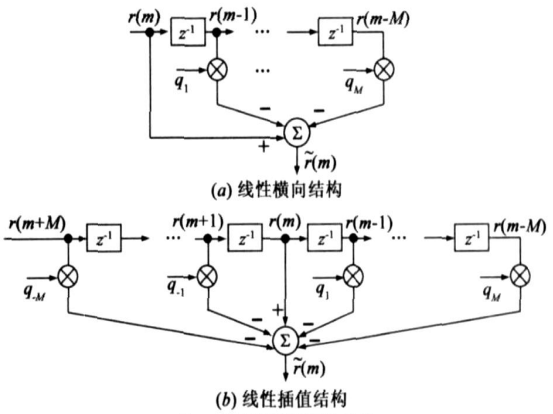


图3　线性预测滤波结构

基于以上两种基本结构,对线性预测技术的理论分析和改进高潮一直持续到 80 年代末期,主要包含 3 个方向. 从调制方式的角度,在分析 BPSK 扩频系统的基础上分析了 QPSK 扩频系统[4],并得出二者性能相近的结论,这也成为后续不再重复研究 QPSK 调制方式的依据. 从 NBI 类型的角度,分析了对音频干扰或 AR 随机过程的抑制性能[5,6]. 从性能分析的角度,一类是系统信噪比改善程度的研究[6],另一类是系统平均误码率的测定[5]. 后两个方向作为判定 NBI 抑制性能的重要准则,一直延续至今.

除了基于抽头延迟线的有限冲激响应滤波,90 年代,线性预测领域还提出了基于干扰状态空间的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Kalman 滤波. Kalman 滤波是在接收信号服从高斯分布条件下的最优线性预测[7],NBI 可以建模为 AR 随机过程.

(2) 自适应线性预测技术

固定的线性预测技术通常假设已知 NBI 统计信息,但在实际操作中,信息的全部特征很难获取,因此以固定线性预测技术为基础发展了具有更大发展空间的自适应线性预测技术.

自适应线性预测技术的雏形为横向滤波结构,基于最小均方(MSE)准则的线性最小均方(LMS)算法,该算法可以通过更新权向量得到 Wiener-Hopf 的最优方程解. 随之,针对 LMS 横向结构收敛速度慢等不可克服的缺陷,发展了具有快速收敛性能、更小稳态误差的格型滤波结构. 自 LMS 横向结构及格型结构提出以来至 90 年代中期,从提高系统稳定性、减小失调误差等角度对自适应 LMS 线性预测技术的改进方案不断完善[8].

80 年代末期,自适应线性预测领域提出了另一种基于横向结构的算法,即满足最小二乘(LS)准则的递归最小二乘(RLS)算法. 基于 LS 准则的横向滤波结构较 MSE 准则的横向滤波结构可以得到 4-5dB 的 SNR 改善. 与 MSE 自适应线性预测技术类似,LS 自适应线性预测技术相继发展了性能更好的最小二乘格型(LSL)及 LSL 插值结构. LSL 和 LSL 插值结构存在的显著缺点是结构复杂,不易工程实现,由此发展了一系列可以降低系统复杂度,同时具有快速收敛性能、保持或提高原系统稳态性能的改进结构[9].

基于 MSE 和 LS 准则的自适应线性预测技术多用于抑制音频干扰,对于 AR 随机过程,自适应 Kalman 滤波可以达到干扰抑制的目的[10].

3.1.2 DF 技术

作为预测技术的重要分支,DF 技术自 20 世纪 80 年代中期被提出,采用判决反馈结构,可以在没有期望信号存在的情况下对噪声和干扰进行白化处理. DF 技术结构简单,即在滤波器的输出端进行判决得到期望信号副本,再从接收信号中将其减去得到噪声干扰信号,后续便可针对噪声和干扰进行白化滤波.

DF 技术具有重要的实际应用价值,率先应用于自适应 LMS 线性预测. DF 模型与无反馈的情况相比较,达到相当性能仅需较少的滤波阶数,但随着处理增益的增加,将逐渐接近无反馈的情况[11].

但是 DF 技术具有自身的技术缺陷,即无法克服误判,且当误判情况出现时将引发性能的迅速下降,因此,对 DF 技术的研究热潮仅持续到 90 年代中期. 其间,最重要的改进方向是双边横向 DF 结构的提出,双边横向 DF 结构较单边横向 DF 结构具有更好的误码率性能[12].

3.1.3 非线性预测技术

(1) 非线性 ACM 技术

线性预测技术只有在所有信号均满足高斯平稳假设的前提下才是最优的,但由于二进制 DSSS 信号的高度非高斯特性,即使 NBI 和环境噪声是高斯的,完成预测的最优滤波器也需要是非线性的. 20 世纪 90 年代初,Vijanyan 利用近似条件均值(ACM)滤波的概念提出了非线性滤波,如图 4 所示. 如果将自适应 DF 预测器定义为线性和硬判决反馈预测器的组合,那么非线性预测器可视为线性和软判决反馈预测器的组合. 非线性滤波技术主要用于 AR 随机过程的抑制,较线性滤波器具有明显的性能优势[13].

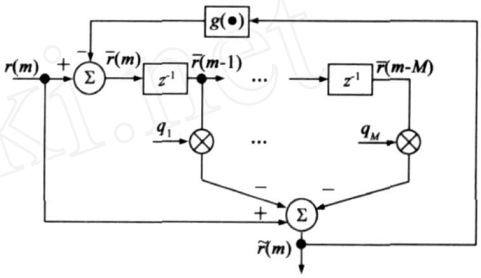


图4 非线性预测滤波结构

非线性 ACM 滤波的状态预测值作为过去估计的线性组合获得,而该估计根据预测误差的非线性函数(双曲正切函数)来修正,利用同样的方法修正自适应线性预测技术便形成了自适应非线性 ACM 预测技术. 对自适应非线性预测技术的研究持续至今,主要改进方向为提高系统性能及降低滤波阶数,近年提出的截短 Laguerre 自适应非线性预测结构便达到了高性能、低阶数的要求[14].

(2) 非线性插值技术

在非线性 ACM 滤波的基础上,发展了利用前向和后向预测同时产生估计值的非线性插值滤波. 非线性插值预测既可基于 Kalman 滤波,也可基于 ACM 滤波,多用于对 AR 随机过程的抑制. 由于统计信息已知时,非线性 ACM 技术的滤波性能已经很好,留给内插器的改善空间很小,于是发展了自适应非线性内插技术. 虽然非线性内插技术提供了性能和处理增益的改善,但都是以增加系统复杂度和延长处理延迟为代价的,这一领域将以降低系统复杂度和缩短处理延迟为发展方向[15].

3.2 变换域技术

变换域技术是 DSSS 系统 NBI 抑制的第 2 大体系,应用的变换域包括频域、小波域、时频域和空时域.

(1) 频域变换技术

早在 20 世纪 70 年代中期,利用声表面波(SAW)进

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行傅立叶变换的 DSSS 系统音频干扰抑制技术便被正式提出. 频域变换技术与预测技术的重要相同之处是都可以采取抽头延迟线的方法实现,这也是其在工程实践能够占有绝对优势的最主要原因. 自频域变换技术提出后,得到了广泛迅速的发展,至 90 年代中期趋于成熟. 其中最重要的改进方向有两个,一个是克服频谱泄漏,另一个是解决频域陷波使少量信息产生丢失的问题.

频谱泄漏使频域变换技术对干扰功率、频率、带宽等参数非常敏感,严重影响 NBI 抑制性能. 解决这一缺陷的最初方案是在傅立叶变换前加入矩形窗函数,引入的问题是导致了频域产生过多旁瓣. 为了减少旁瓣,进而发展了非矩形窗函数的使用,出现的新问题是由于需要对数据进行重叠处理以保证准确重构,大大提升了系统计算复杂度. 直至 90 年代初期,Jones 提出了滤波器组方案,该方案不仅可以在不加窗的情况下解决频谱泄漏问题,同时具有快速处理干扰、快速适应干扰统计特性变化的优势. 这也使滤波器组方案成为解决频谱泄漏的重要解决方法[16]. 解决频域陷波使有用信息产生少量丢失的问题是频域变换的另一个重要改进方向,而冗余补偿技术就是解决这一问题的重要方案,可采取频域陷波和编码相结合方式[17].

近些年来,还出现了一些以提高系统性能,降低系统复杂度为目的的新型频域变换技术,例如保存相位信息对幅度进行处理的频域变换技术[18]、基于边带置换算法的频域变换技术[19]等.

(2) 小波变换技术

小波分析是近年来国际上一个非常热门的前沿研究领域,被誉为泛函分析、傅立叶分析、调和分析的完美组合. 20 世纪 90 年代中期,Medley 提出利用小波变换实现 DSSS 系统 NBI 抑制的变换域处理方法. 小波变换利用 DSSS 信号功率谱密度平坦,而 NBI 能量集中于某一频带的特性,将干扰迅速定位,从而实现降噪.

最初提出的小波变换技术利用正交镜像滤波器组构成的二进制子带树型结构实现干扰抑制[20]. 二进制小波不同于连续小波和离散小波,它对尺度参数进行了离散化,而且对时域上的平移量保持连续变换,不破坏信号在时间域上的平移变量,即不破坏被分析的信号,这也是选择二进制小波或小波包进行信号消噪的原因.

随着小波理论的日益发展,多进制小波包变换和复小波包变换是近年发展起来的小波理论的重要分支. 将多进制小波包变换和复小波包变换用于 NBI 抑制则是小波变换技术的一个重要突破[21]. 多进制小波可以克服二进制小波变换压缩数据跳跃度过大,进行多级小波变换时产生误差累计等缺点,而复值小波包变换则具有多方向通道等优点,因此可以得到明显优于二进制小波包变换的性能.

(3) 时频变换技术

时频变换技术是自 90 年代中期兴起并在这一时期迅速发展的变换域 NBI 抑制技术. 自适应时频去噪器是这一时期最重要的学术成果,其最大特点是可以自适应改变子带滤波器组的层次结构,避免对有用信号不必要的分解,降低了系统复杂度. 在此基础上发展的智能自适应时频去噪器可以自动从时域和频域对信号性能进行判定,锁定干扰信号从而进行干扰抑制,较频域变换技术具有更好的 Robust 特性[22].

时频变换技术打破了固定子带滤波器组层次结构无法改变、滤波效率低的劣势,这使它在 NBI 抑制领域占有一席之地. 近些年来对时频变换技术的研究逐步转向对非平稳信号的抑制.

(4) 空时变换技术

空时处理已经在雷达领域得到深入的研究,90 年代开始应用到无线通信领域. 在扩频系统 NBI 抑制方面,并未局限于 DSSS 系统,在 CDMA 系统的 MAI、NBI 以及其他多径干扰、码间干扰的联合抑制上也有广泛应用,因此将在 CDMA 系统 NBI 抑制技术一章中给出这一技术的详细分析.

3.3　码辅助技术

预测技术和变换域技术不但没有利用到扩频信号的码特征,同时仅应用于音频干扰或 AR 随机过程的抑制. 20 世纪 90 年代初,Rusch 和 Poor 提出了将多用户检测(MUD,Multi-User Detection)思想用于 DSSS 系统数字 NBI 抑制的新方案,可谓是 NBI 抑制领域一个里程碑式的飞跃[23]. 图 5 为基于 MUD 的 NBI 抑制基本原理框图. 将数字 NBI 信号分解成一组互不重叠的虚拟用户,由一个实际的 DSSS 用户和 m 个虚拟用户构成了一个新的虚拟 CDMA 系统. 利用 MUD 技术,将虚拟用户作为多址干扰处理,就达到了数字 NBI 抑制的效果.

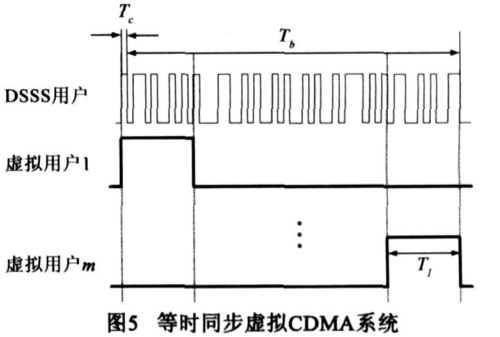


图5　等时同步虚拟CDMA系统

早期基于 MUD 的 NBI 抑制技术包括解相关检测方案和最大似然检测方案. 其中,解相关检测方案较预测技术具有明显的信噪比改善[2]. 此外,最大似然检测方

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

案是一种优化的非线性 NBI 抑制技术,实质上就是一个"洋葱剥皮"检测器. 假设已知所有信号和 NBI 先验知识,利用传统的窄带检测器剥去 NBI,然后再将残余信号用于扩频检测,同样只用于数字 NBI 的抑制[23].

只能够对数字 NBI 进行抑制和需要过多的先验知识成为基于 MUD 的 NBI 抑制技术最大弊端. 经过不到 10 年的发展, Poor 和 Wang 将其发展为 NBI 抑制领域的第 3 大体系,命名为码辅助(Code-aided)技术[24,25],克服了以上弊端. 首先,固定码辅助技术利用期望信号扩频码和 NBI 的二阶统计特性,不仅可以用于抑制数字 NBI,还可以用于抑制音频干扰和 AR 随机过程. 其次,基于 MSE 准则的自适应码辅助技术可以自动跟踪并适应环境变化. 最重要的,基于最小输出能量(MOE)的自适应码辅助技术实现了无需 NBI 先验知识的盲检测.

进入 21 世纪,码辅助技术的发展更为迅速,但研究重心已经偏离单用户 DSSS 系统转向多用户 CDMA 系统,这是由于码辅助技术可以同时抑制 NBI 和 MAI 的重要特征. 有关码辅助技术的进一步发展方向将在下一章节中进行详细介绍.

4 CDMA 系统 NBI 抑制技术

自 20 世纪 90 年代中期以来,大大提升系统容量的 CDMA 通信成为研究热点. 但由于 CDMA 用户的扩频码字不可能完全正交,使得 MAI 不可忽视. 在 NBI 抑制领域,CDMA 系统的关注点是如何抑制 NBI 和 MAI,抑制 NBI 和 MAI 包括两种方式,一种是先抑制 NBI,再通过匹配滤波对抗 MAI(或其它 MAI 抑制技术[26]),另一种则是同时对 NBI 和 MAI 进行联合抑制. 比较这两种方法,前一种的 NBI 抑制过程受到 MAI 影响,无法达到良好的系统性能,而第二种则不存在以上问题.

4.1 预测技术

与 DSSS 系统 NBI 抑制技术类似,CDMA 系统的 NBI 和 MAI 抑制技术同样包括线性预测技术、判决反馈技术和非线性预测技术 3 大类. 但由于以上技术都采取先抑制 NBI、再对抗 MAI 的方式,因此均发展受限.

(1) 线性预测技术

早期对 CDMA 系统 NBI 和 MAI 进行抑制的研究集中在接收结构的改进上,也就是线性预测方案. 这是一种典型的先抑制 NBI、再对抗 MAI 的方式. 首先将混合信号送入线性预测器对强 NBI 进行抑制,此后利用传统的匹配滤波结构对 MAI 进行抑制,在衰落信道中,可以得到两倍的最大比率结合[27]. 线性预测技术的优点是结构简单,存在的典型问题是误码率高,所以对这种结构的研究并不广泛.

(2) DF 技术

在线性预测技术的基础上,发展了 DF 技术. DF 技术虽然并没有改变先抑制 NBI、再匹配滤波对抗 MAI 的本质,但由于硬判决反馈结构在 NBI 抑制环节考虑了 MAI 的影响,因此性能明显优于线性预测技术,文献[28]给出了单边 DF 技术性能优于双边预测技术性能的定性结论. DF 技术的优点是 NBI 和 MAI 的抑制效果较线性预测技术更为显著,存在的主要弊端同 DSSS 系统 DF 抑制技术相同,即判决反馈的准确性将对后续干扰抑制效果产生重要影响,这一弊端也使 DF 技术的继续发展受到了严重限制.

(3) 非线性预测技术

非线性预测技术同样采取了先抑制 NBI、再匹配滤波对抗 MAI 的方式,在 CDMA 系统的 NBI 抑制领域也有一定发展,但却没有在单用户 DSSS 系统中那么成功. 这种结构的优点是性能较线性预测技术和 DF 技术有所提高,这是由于与线性预测技术相比,软判决反馈结构在 NBI 抑制环节考虑了 MAI 的影响,而与 DF 技术相比,软判决反馈结构得到的预测期望信号宽带性更强. 这种结构明显的缺陷是滤波效率随 CDMA 用户数目的增多而降低[2,29],这也是非线性技术在 CDMA 系统的发展没有在 DSSS 系统成功的原因.

4.2 变换域技术

作为 CDMA 系统 NBI 抑制的第 2 大体系,应用的变换域同样包括频域、小波域、时频域和空时域.

(1) 频域变换技术

与线性预测技术相同,早期对频域变换技术的研究集中在接收结构的改进上,将 NBI 和 MAI 的抑制分开进行. 文献[30]给出了 NBI 带宽与 CDMA 带宽比、NBI 中心频率与 CDMA 载波频率偏差、NBI 能量、MAI 用户数目等参量对 NBI 抑制性能影响的全面分析. 其中,频域变换技术滤波性能随 MAI 用户数量的增多而降低,不具备 MAI 抑制能力,故而此后对 CDMA 系统频域变换 NBI 和 MAI 抑制技术的研究并不广泛.

(2) 小波变换技术

自 20 世纪 90 年代中期以来,小波变换技术用于 CDMA 系统 NBI 抑制与用于 DSSS 系统 NBI 抑制几乎同步发展,但发展方向却有所差异. 在 CDMA 系统中,其中一个发展方向与 DSSS 系统相同,关注点在 NBI 抑制性能的改进上,接收结构采取先 NBI 抑制,后匹配滤波检测信号的方式[31]. 这一发展方向与线性预测技术和频域变换技术相似,在 NBI 抑制环节没有考虑 MAI 的影响. 另一个发展方向是将小波变换与多用户检测技术联合使用[32],小波变换不仅可以抑制 NBI,同时可以对接收信号按用户进行分组,降低多用户检测的用户数目,提高多用户检测的性能. 这种联合处理手段虽然同样采取了先抑制 NBI,后对抗 MAI 的方式,但多用户检测技术的引用却大大提升了系统性能,相信随着小

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

波技术的进一步发展,这一发展方向将进一步完善.

(3)时频变换技术

自时频变换技术提出用于 NBI 抑制领域以来,将其应用于 CDMA 系统的研究比较贫乏,Hong 提出的局部子空间跟踪[33]等处理方法也只是针对 NBI 进行抑制,无法达到 NBI 和 MAI 的联合抑制,在此不做分析.

(4)空时变换技术

对 CDMA 系统空时变换 NBI 抑制技术的研究始于 20 世纪 90 年代中期,采取最优合并方式[34].最优合并空时变换技术不但可以在不增加阵元的前提下增加阵的自由度,同时对 NBI 载频具有 Robust 特性.这一阶段的研究偏重于对 NBI 的抑制,而没有单独关注 MAI.进入 21 世纪,随着空时多用户检测技术的提出,使空时信号处理对 NBI、多径干扰、码间干扰进行抑制的技术优势和多用户检测对 MAI 的抑制效果融为一体[35].这种结构虽然没能逃脱 NBI 和 MAI 抑制分别进行的弊端,却具备其它技术无法实现的多干扰联系抑制的优势.相信随着空时多用户检测技术的深入研究,最优空时多用户检测、线性空时多用户检测以及盲自适应空时多用户检测的相继发展,必将促进 CDMA 系统空时变换 NBI 抑制技术的进一步研究.

4.3　码辅助技术

自 20 世纪 90 年代中期以来,利用信号码特征进行块处理的码辅助技术在 CDMA 系统 NBI 和 MAI 抑制中显得格外出众,不仅可以联合抑制 NBI 和 MAI,同时完成了解扩检测过程,是该领域最有前途的技术之一.在不足 10 年的时间内,码辅助技术广泛发展并趋于成熟.码辅助技术的块处理特性决定了其必定是一种线性技术,可分为需要先验知识的固定码辅助技术和无需先验知识、适应环境变换的(盲)自适应码辅助技术.

(1)固定码辅助技术

固定码辅助技术根据 CDMA 用户和 NBI 的先验相关统计特性构建线性滤波系数,通过线性模型估计信息序列,这种结构研究得最早,也最为成熟.常用的固定码辅助技术包括解相关码辅助技术、迫零(ZF)码辅助技术、最小均方误差(MMSE)码辅助技术和最小输出能量(MMOE)码辅助技术.

解相关技术源于 CDMA 系统的 MAI 和码间干扰(ISI)联合抑制,可以最大限度的消除 MAI,但以热噪声功率的提高为代价.解相关码辅助技术是最早提出用于 CDMA 系统 NBI 和 MAI 联合抑制的码辅助技术之一,与理想预测技术相比,具有明显的性能增益[36].但由于解相关技术一方面仅对数字 NBI 进行抑制,另一方面自适应实现比较困难,故此后并没有得到继续发展,而仅作为基础储备进行研究.

MMSE 技术可以通过选择最佳滤波系数使信号输出均方误差最小,达到 MAI 和白噪声抑制的平衡.MMSE 码辅助技术是另一类最早用于 CDMA 系统 NBI 和 MAI 联合抑制的码辅助技术.与解相关码辅助技术相比,MMSE 码辅助技术不仅可以对数字 NBI 进行抑制,还可以对音频干扰和 AR 随机过程进行抑制[24,25].同时,MMSE 码辅助具有非常大的(盲)自适应改进空间,随后发展的各类盲自适应码辅助技术便都基于此技术.

ZF 码辅助技术和 MMOE 码辅助技术的研究与 MMSE 码辅助技术同步进行.其中 ZF 码辅助技术可以最大限度的消除 NBI,实现 NBI 和 MAI 联合抑制的时变处理[37],但 ZF 码辅助技术的自适应实现同样比较困难,发展空间不大.此外,MMOE 码辅助技术使输出能量最小来实现 NBI 和 MAI 的联合抑制,多用于构建盲自适应干扰抑制模型[25],这也是 MMOE 最重要的贡献,而对其的单独研究则很少见.

(2)(盲)自适应码辅助技术

在已知干扰信号相关统计特性的前提下,线性码辅助技术具有非常优越的性能,但在更多情况下,环境动态变化或干扰信号的统计特性是未知的,因此(盲)自适应码辅助技术的研究是码辅助领域另一非常重要的发展方向.(盲)自适应线性码辅助技术都是基于 MMSE 准则发展起来的.从算法的角度分析,最初发展的 LMS 码辅助技术由于特征值扩散现象严重,因此研究较为广泛的是 RLS 码辅助技术;从是否需要先验知识的角度,从基于需要训练序列的自适应技术很快发展了利用 MMOE 准则的无需训练序列的盲自适应算法[38].

码辅助技术领域,在学术论文献[39]中,Poor 不仅对固定码辅助技术进行了总结,提出了各种改进方案,并且对(盲)自适应 LMS 及 RLS 码辅助技术进行了详细分析.这篇学术论文将码辅助 NBI 抑制技术推向了一个小高峰,同时确立了对多速率 CDMA 系统进行研究的发展方向[40].同时代,李琳从最小误码率的角度分析了各准则(MMSE、MMOE)与最小误码率准则的关系,对码辅助体系起到了完善作用[41].

5　各类 NBI 抑制技术比较

5.1　DSSS 与 CDMA 系统 NBI 抑制技术比较

综上所述,DSSS 与 CDMA 系统 NBI 抑制既有本质区别,又存在密切联系.各类 NBI 抑制技术在不同系统的发展相互借鉴、相互促进,产生的效果也各有不同.以下将分别从技术发展年代及成熟度、技术特点的角度对 DSSS 和 CDMA 系统 NBI 抑制技术进行比较.

(1)技术发展年代及成熟度

扩频系统 NBI 抑制技术的研究紧随扩频体制的发

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

展,图 6 给出了 DSSS/ CDMA 系统各类 NBI 抑制技术研究热潮的年代示意图. 扩频系统 NBI 抑制热潮逐步由 DSSS 系统转入 CDMA 系统,各类技术在 DSSS 系统百家争鸣,码辅助技术则在 CDMA 系统一支独秀.

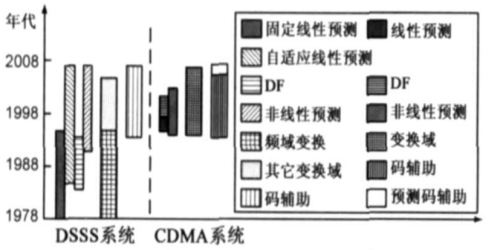


图6 DSSS/CDMA系统各类NBI抑制技术研究热潮年代示意图

20 世纪 50 年代中期 DSSS 体制出现,自 70 年代末开始 DSSS 系统 NBI 抑制技术的研究,广泛发展的技术包括预测技术中的线性预测技术和判决反馈技术,以及变换域技术中的频域变换技术,这些技术在这一阶段趋于成熟.

20 世纪 90 年代中期 CDMA 体制出现,这也进入新技术的高产期,这些新技术与固有技术共同应用于 DSSS 和 CDMA 系统的 NBI 抑制中. 对于 DSSS 系统,新提出的非线性预测技术、其它变换域技术、码辅助技术的应用都比较成功. 对于 CDMA 系统,预测技术和变换域技术的发展或受到限制(如预测技术和频域变换技术),或还不成熟(如小波变换技术和空时变换技术),仅码辅助技术迅速发展并趋于成熟.

(2) 技术特点

预测技术是时域处理技术,利用了宽带信号和 NBI 可预测性的不同. 它能有效抑制 DSSS 系统 NBI. ,而对 CDMA 系统,则随着 MAI 数目的增多而性能降低. 先验条件方面,在固定线性预测技术需已知 NBI 先验统计特性,非线性预测技术还需知道扩频信号一阶概率分布的基础上,均发展了无需先验知识的自适应预测技术.

变换域技术利用了宽带信号和 NBI 不同域的特征差异. 变换域技术同样能有效抑制 DSSS 系统 NBI,而无法联合抑制 CDMA 系统 NBI 和 MAI. 先验条件方面,变换域技术要求 NBI 频谱集中于非常窄的频带之中.

码辅助技术是另一类时域处理技术,利用了扩频信号的码特征和 NBI 的二阶统计特性,较预测技术和变换域技术利用的先验信息最多,抑制效果也最好. 它不仅能有效抑制 DSSS 系统 NBI,同时可以对 CDMA 系统 NBI 和 MAI 进行联合抑制. 发展的盲码辅助技术以系统性能下降为代价可以舍去对统计特性的先验需求.

5.2 DSSS 系统 NBI 抑制技术比较

DSSS 系统的 NBI 抑制技术百家争鸣,以下将分别从 NBI 抑制类型、NBI 抑制性能和系统计算复杂度的角度对各类 NBI 抑制技术进行比较.

(1) NBI 抑制类型

对于预测技术,要求 NBI 具有强预测性,多用于音频干扰和 AR 随机过程,少用于相位跳变的数字 NBI. 特殊的,线性 Kalman 滤波和非线性预测技术多用于 AR 随机过程的抑制. 对于变换域技术,要求 NBI 频谱集中,因此多用于音频干扰. 而码辅助技术不仅可以用于音频干扰和 AR 随机过程的抑制,对数字 NBI 同样有效.

(2) NBI 抑制性能

预测技术和码辅助技术都属于时域处理技术,可以通过不同的准则实现干扰抑制,如信噪比准则等. 虽然不同准则的选取、滤波器阶数、扩频增益大小加之是否采取自适应和盲自适应算法,都使 NBI 抑制性能存在差异,但各类 NBI 抑制技术都存在各自的性能上界. 图 7 分别给出了各类时域处理技术对 AR 随机过程和数字 NBI 进行抑制的性能上界. 图中假设信号发送单位能量;信噪比 SNR = 20dB;J (dB) 表示 NBI 功率,SINR (dB) 表示输出信干噪比. 对于音频干扰,各类 NBI 理论上可以将其完全抑制,这里不单独给出仿真曲线.

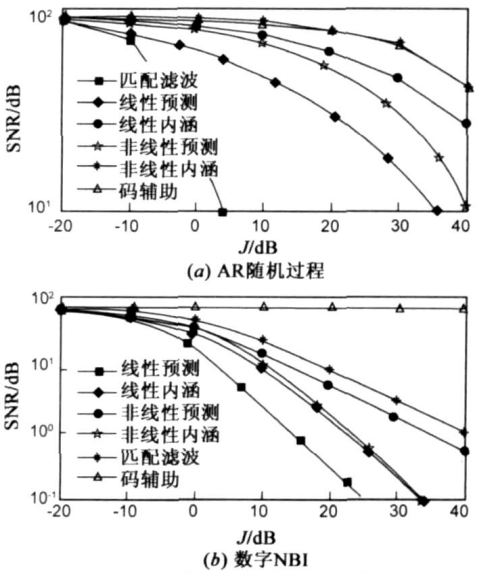


图7 时域处理技术对NBI抑制性能上界比较

变换域技术与时域预测技术不同,并非基于不同准则实现干扰抑制,而是在变换域通过陷波等方法消除干扰、保留有用信息. 变换域滤波器的设计比时域滤波器的设计简单、直接,本质上仅通过对干扰信号相乘和置零即可实现,存在的问题是仅对带宽极窄的音频干扰有效.

(3) 系统计算复杂度及抑制速度

影响系统计算复杂度和抑制速度的因素有许多. 对于预测技术,滤波阶数是影响其计算复杂度的决定性因素,滤波阶数越多,系统计算复杂度越高. 如果系

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统是自适应的,则又与自适应算法密切相关,例如 LMS 算法的计算复杂度与滤波阶数呈线性关系,RLS 算法的计算复杂度与滤波阶数呈平方关系. 自适应系统的抑制速度还与收敛因子等因素密切相关.

相对于预测技术,变换域技术由于存在域变换和域反变换的过程,增加了系统计算复杂度. 但由于不同域变换的复杂度不同,还存在降低计算复杂度的改进方案,因此并不能绝对的说变换域技术的复杂度就高于预测技术. 变换域的自适应算法均采取开环结构,因此整体上的收敛速度快于预测技术.

码辅助技术采取块处理方式,扩频码长是影响其计算复杂度的决定因素. 与预测技术相比,扩频码长普遍远高于预测技术滤波阶数,因此计算复杂度远高于预测技术. 同样,如果码辅助技术是自适应的或盲自适应的,不同算法和收敛因子的计算复杂度和收敛速度也存在很大差异.

在 NBI 抑制技术的选取过程中,需要综合考虑 NBI 类型、系统性能、计算复杂度和抑制速度等因素.

5.3　CDMA 系统 NBI 抑制技术比较

CDMA 系统中各类抑制技术适用的 NBI 类型,NBI 抑制性能以及系统计算复杂度与 DSSS 系统相似,这里不再讨论. 码辅助技术具备 MAI 抑制能力的特点使得它在 CDMA 系统 NBI 和 MAI 联合抑制领域处于一支独秀的地位,表 1 给出了在 MAI 功率变化情况下的码辅助技术输出信干噪比[3]. 其中信噪比 SNR = 20dB;NBI 功率 J = 10dB. 由表可知,输出信干噪比对 MAI 功率的变化不敏感,即码辅助技术可以有效抑制 MAI. 对于其它类型的干扰,结论相同.

表 1　MAI 变化情况的码辅助抑制技术输出信干噪比

J(dB) / 用户数	- 20	- 10	0	10	20
3	19.22	19.22	19.22	19.22	19.22
6	17.7	17.7	17.7	17.7	17.32

6　有意义的未来研究方向

DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制技术已经经历了 30 年的发展,伴着扩频通信广泛的应用前景,必将继续完善.

系统方面:目前已经进入了 CDMA 系统广泛应用的时期,虽然 DSSS 通信形式依然存在,但随着无线信道频谱的日益紧张,必将逐步被可以频谱共用的 CDMA 通信方式所取代. 未来扩频系统的 NBI 抑制技术发展方向也必将是 CDMA 系统的 NBI 和 MAI 联合抑制.

性能方面:寻找性能更优的抑制技术一直是扩频系统 NBI 抑制的发展方向. 2007 年,Ho 首次提出了将预测技术和码辅助技术相结合的新思想,用于 CDMA 系统的 NBI 和 MAI 联合抑制,这种预测码辅助技术结合了预测技术和码辅助技术的优点,性能甚至优于目前占据性能上界最佳值的码辅助技术. Ho 同时提出了基于线性预测和判决反馈的盲自适应 LMS-LMS 算法,改善了盲码辅助技术特征值扩散的问题. 但这一技术刚刚提出,还很不完善,其它预测技术(例如非线性预测技术)和准则(例如 MOE,RLS)的改进空间很大[42].

7　总结

结合近 30 年的科研文献,文章分别对 DSSS 和 CDMA 系统 NBI 抑制技术进行概述并做出比较,同时对有意义的未来的发展方向做出展望. 相信文章的分析会为 DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制技术的选取提供有益的参考,同时,随着各国科研人员的不懈努力,DSSS/ CDMA 系统 NBI 抑制技术必定得到进一步发展和完善.

参考文献:

[1] MILSTEIN L B. Interference rejection techniques in spread spectrum communication[J]. Proc IEEE, 1988, 76(6): 657 - 671.

[2] POOR H V, RUSCH L A. Narrowband interference suppression in spread spectrum CDMA[J]. IEEE Pers Commun. 1994, 1(3): 14 - 27.

[3] WANG Xiao-dong, POOR H V. 无线通信系统-信号接收与处理的高级技术[M]. 郑宝玉, 等, 译. 北京:电子工业出版社, 2005. 289 - 334.

[4] WANG Y C, MILSTEIN L B. Rejection of multiple narrowband interference in both BPSK and QPSK DS spread-spectrum systems[J]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(2): 195 - 204.

[5] IL TIS R A, MISTEIN L B. Performance analysis of narrowband interference rejection techniques in DS spread-spectrum systems[J]. IEEE Trans Commun, 1984, 32(11): 1169 - 1177.

[6] MASRY E. Closed-form analytical results for the rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum systems-Part II: Linear interpolation filters[J]. IEEE Trans Commun, 1985, 33(1): 10 - 19.

[7] KOZMINCHUK B W, SHEIKH A U H. Kalman filter-based architecture for interference excision[J]. IEEE Trans Commun, 1995, 43(2): 574 - 580.

[8] KALIDAS P, PRABHU K M M. Improved LMS adaptive algorithm for narrowband interference suppression in direct sequence spread spectrum[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1995, 31(3): 1198 - 1201.

[9] SUN Zhi-guo, GUO Li-li. An improved LSL interpolator to suppress narrow-band interference for direct-sequence spread-spectrum systems[A]. 1st International Conference on Communications and Networking in China, ChinaCom '06[C]. NJ: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2007. 1 - 4.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[10] XU Guang-hui, HU Guang-rui. New Kalman filtering algorithm for narrowband interference suppression in spread spectrum systems[J]. Journal of Shanghai University, 1995, 9(5): 425 - 428.

[11] SHAH B, SAULNIER G J. Adaptive jammer suppression using decision feedback in a spread-spectrum receiver[A]. MILCOM 88: 21st Century Military Communications [C]. NJ: IEEE Piscataway, 1988. 989 - 995.

[12] DUKIC M L, DOBROSAVLIEVIC Z S, STOJANOVIC Z D, et al. Rejection of narrowband interference in DS spread spectrum systems using two-stage decision feedback filters[A]. Proceedings of the 1994 IEEE 3rd International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications [C]. NJ: IEEE Piscataway, 1994. 526 - 529.

[13] 王坤杰,周祖成,姚彦. 直扩通信中非线性窄带干扰抑制滤波器的性能分析[J]. 电子学报, 1998, 26(2): 77 - 79.
WANG Cheng-kun, ZHOU Zu-cheng, YAO Yan. Performance analysis of nonlinear narrow-band interference rejection filters in DS-SS systems[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(2): 77 - 79. (in Chinese)

[14] 黄高勇,张家树. 一种抑制直扩通信窄带干扰的新型非线性自适应预测滤波器[J]. 电子与信息学报. 2007, 29(6): 1328 - 1331.
Huang Gao-yong, Zhang Jia-shu. Novel nonlinear adaptive prediction filter for narrowband interference suppression in DS-SS communication[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(6): 1328 - 1331. (in Chinese)

[15] YUAN J T, LEE J N. Narrow-band interference rejection in DS/CDMA systems using adaptive (QRD-LSL)-based nonlinear ACM interpolators[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2003, 52(2): 374 - 379.

[16] JONES W W, JONES K R. Narrowband interference suppression using filter-bank analysis/synthesis techniques[A]. MILCOM '92-Communications-Fusing Command, Control and Intelligence[C]. New York: IEEE, 1992. 898 - 902.

[17] DHERTY J F, STARK H. Direct-sequence spread spectrum narrowband interference rejection using property restoration [J]. IEEE Trans Commun, 1996, 44(9): 1197 - 1204.

[18] SUN Yong-jun, TIAN Bin, SU Xin, et al. Blind narrowband interference suppression in DS/CDMA systems[A]. 2006 8th International Conference on Signal Processing[C]. New York: IEEE, 2006. 31-34.

[19] 张晓琳,郭黎利. 直扩通信中窄带干扰抑制的边带相关置换算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 86 - 88.
ZHANG Xiaolin, GUO Li-li. Narrow-band interference suppression in DSSS by side correlation replacement algorithm [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(1): 86-88. (in Chinese)

[20] MEDLEY M J, SAULNIER G J, DAS P K. The application of wavelet-domain adaptive filtering to spread spectrum communicaition[A]. Wavelet Applications II[C]. USA: SPIE-Int Soc Opt Eng, 1995. 233 - 247.

[21] JIANG Ming-yan, YUAN Dong-feng, XU Guo-ping. Suppression of narrowband interference in DSSS systems based on CM MWPT and CWPT[A]. MAPE2005: IEEE 2005 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wiereless Communications [C]. NJ: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2005. 1594 - 1597.

[22] TAZEBA Y M V, AKANSU A N. A smart time-frequency exciser for spread spectrum communications[A]. Proceedings of the 1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Proceeding [C]. NJ: IEEE Piscataway, 1995. 1209 - 1212.

[23] RUSCH L A, POOR H V. Multiuser detection techniques for narrowband interference suppression in spread spectrum communications[J]. IEEE Trans Commun, 1995, 43(2): 1725 - 1737.

[24] POOR H V, WANG Xiaodong. Code-aided interference suppression for DS/CDMA communications-Part I: Interference suppression capability[J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45(9): 1101 - 1111.

[25] POOR H V, WANG Xiaodong. Code-aided interference suppression in DS/CDMA communications-II: Parallel blind adaptive implementations[J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45(9): 1112 - 1122.

[26] 孔政敏,朱光喜. 基于多用户反馈的判决反馈均衡器的研究[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1854 - 1858.
KONG Zheng-min, ZHU Guang-xi. Study of multiuser feedback-based decision equalizer [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1854 - 1858. (in Chinese)

[27] WANG Jiang-zhou, MILSTEIN L B. CDMA overlay situations for microcellular mobile communications[J]. IEEE Trans Commun, 1995, 43(2): 603 - 614.

[28] CHO Y, LEE J H. Performance of narrowband interference suppression filters in a direct sequence code division multiple access system[A]. Proceeding of the 1996 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications [C]. MA: IEEE, 1996. 169 - 173.

[29] POOR H V. Active interference suppression in CDMA overlay systems[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2001, 19(1): 4 - 20.

[30] MATSUDA T, HARA S, MORINAGA N. Theoretical analysis of distortion due to notch filtering in DS-CDMA systems[J]. IEEE Int Symp Spread Spectrum Tech Appl, 1998, 1: 145 - 149.

[31] MASZCZYK S. Detection and reduction of narrowband interference from CDMA signals[A]. Proceeding of 16th International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Wroclw: Nat Inst Telecommun, 2002. 261 - 264.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[32] HOU Wen-sheng, CHEN B. Adaptive narrow-band interference rejection in DWMT-CDMA communications [A]. Proceedings of 1992 2nd Workshop on Signal Processing Advances in Wireless [C]. Piscataway: IEEE, 1999. 158 - 161.

[33] HONG S H, LEE B G. Time-frequency localized subspace tracking for narrowband interference suppression of DS/CDMA systems [J]. Electron Lett, 1999, 35(13): 1063 - 1064.

[34] SHAD A, HAIMOVICH A M. Performance of space-time receiver architectures for CDMA overlay of narrowband waveforms for personal communication systems [A]. Proceedings of ICC '97-International Conference on Communications [C]. NJ: IEEE, 1997. 314 - 318.

[35] ZHENG Zi-wei, ZHU Yi-sheng. Space-time soft receiver for coded DS-CDMA in time-selective Gaussian and non-Gaussian channels [A]. 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications [C]. NJ: IEEE Piscataway, 2002. 1247 - 1251.

[36] RUSCH L A, POOR H V. Narrowband interference suppression in CDMA spread spectrum communications [J]. IEEE Trans Commun, 1994, 42(2): 1969 - 1979.

[37] LOPS M, TULINO A M. Simmultaneous suppression of multiaccess and narrow-band interference in asynchronous CDMA networks [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2000, 49(5): 1705 - 1718.

[38] 杨坚, 奚宏生, 吴春旭, 等. 基于自调整器的 CDMA 系统盲自适应干扰抑制 [J]. 电子学报, 2004, 32(10): 1617 - 1620.
YANG Jian, XI Hong-sheng, WU Chun-xu, et al. Blind adaptive interference suppression for CDMA systems based on self-tuning regulator [J]. Acta Electronic Sinica, 2004, 32(10): 1617 - 1620. (in Chinese)

[39] BUZZI S, LOPS M, POOR H V. Code-aided interference suppression for DS/CDMA overlay systems [J]. Proc IEEE, 2002, 90(3): 394 - 435.

[40] YANG Lie-liang, ZHANG Li-chun. Zero-forcing and minimum mean-square error multiuser detection in generalized multicarrier DS-CDMA systems for radio [J]. Eurasip J Wireless Comun Networking, 2008, 1(14): 1-13. 李琳, 周文辉, 谭述森. 扩频系统中最小误码率意义下的最优干扰抑制技术 [J]. 电子学报, 2005, 33(1): 32 - 37.
LI Lin, ZHOU Wen-hui, TAN Shu-sen. Optimal interference suppression technique in the MBER sense for spread spectrum systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 32 - 37. (in Chinese)

[41] HO K C, LU Xiao-ning, MEHTA V. Adaptive blind narrow-band interference cancellation for multi-user detection [J]. IEEE Trans Wirel Commun, 2007, 6(3): 1024 - 1033.

作者简介:



郭黎利　男, 1955 年 4 月出生于黑龙江省哈尔滨市, 教授, 博士生导师. 现为哈尔滨工程大学信息与通信工程学院院长, 从事现代通信系统理论与技术、通信信号处理的研究工作.
E-mail: guolili@hrbeu.edu.cn



殷复莲　女, 1982 年 5 月出生于吉林省蛟河市. 现为哈尔滨工程大学信息与通信工程学院在读博士研究生, 从事宽带系统干扰抑制的研究工作.
E-mail: yinfulian0502@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net