

直扩信号 PN 码盲估计方法研究综述

盛世强^a, 杨文革^b

(装备学院 a. 研究生管理大队; b. 光电装备系, 北京 101416)

摘要:对直接序列扩频信号的 PN 码盲估计方法进行了深入分析,重点介绍了基于信号特征分析估计方法、基于特征多项式估计方法和基于相关运算估计方法,介绍了各种方法的来源、理论基础和发展历程,分析了各自的优缺点,提出了直扩信号 PN 码盲估计研究领域的进一步发展方向。

关键词:直扩信号;PN 码;盲估计;特征分析

本文引用格式:盛世强,杨文革.直扩信号 PN 码盲估计方法研究综述[J].兵器装备工程学报,2017(8):140-146.

Citation format:SHENG Shiqiang, YANG Wenge. Study of PN Code Blind Estimation for Direct Sequence Spread Spectrum Signal[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(8):140-146.

中图分类号:TN911

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)08-0140-07

Study of PN Code Blind Estimation for Direct Sequence Spread Spectrum Signal

SHENG Shiqiang^a, YANG Wenge^b

(a. Department of Graduate Management; b. Department of Optical and Electronic Equipment, Academy of Equipment, Beijing101416, China)

Abstract: The method of PN code blind estimation for direct sequence spread spectrum (DS-SS) signal were analyzed. Three kinds of PN code blind estimation method for DS-SS signal were introduced, including the method based on eigen analysis of signal, the method based on characteristic polynomials of PN code and the method based on correlation operation. Based on the brief introduction of each algorithm's source, theoretical foundation and development process, the advantages and disadvantages of these algorithms are compared, and the development direction of PN code blind estimation research for DS-SS signal is also forecast.

Key words: direct sequence spread spectrum signal; PN code; blind estimation; eigen analysis

直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DS-SS)技术是扩频通信中最主要的一种扩频技术,因其良好的隐蔽性、抗干扰能力和码分多址(CDMA)特性而被广泛地应用于GPS、北斗卫星导航系统、航天测控、JTIDS、移动通信等军事和民用通信领域^[1-2]。在通信对抗领域的研究中,为了实现非合作 DS-SS 信号的侦察、干扰和破译,必须获知截获 DS-SS 信号的 PN 码。

作为 DS-SS 信号参数估计研究的一部分,PN 码盲估计

研究需要以码速率、PN 码周期等参数估计研究的成果支撑。从 20 世纪 90 年代中期至今,DS-SS 信号 PN 码盲估计问题受到了国内外学者的广泛关注,目前主要的 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法包括基于特征分析估计方法、基于特征多项式估计方法和基于相关运算估计方法 3 类,本文在总结前人研究的基础上,介绍上述方法的来源、理论基础和发展历程,讨论各自的优缺点,展望 DS-SS 信号 PN 码盲估计研究领域的进一步发展方向。

收稿日期:2017-02-25;修回日期:2017-04-30

作者简介:盛世强(1993—),男,硕士研究生,主要从事信息科学与控制工程研究。

1 DS-SS 信号分类及其模型

DS-SS 技术是用待传输的信息码与高速率的 PN 码波形相乘实现频谱扩展。根据 PN 码周期与信息码宽的关系,DS-SS 信号分为短码(Short Code, SC) DS-SS 信号和长码(Long Code, LC) DS-SS 信号,SC-DS-SS 信号 PN 码周期等于信息码宽,而 LC-DS-SS 信号 PN 码周期大于信息码宽。

基于以上定义及分析,DS-SS 信号的盲处理研究中,SC-DS-SS 基带信号可以表示为

$$s(t) = A \sum_{m=0}^{\infty} d(t - mT_s - t_0) \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(t - kT_s) \quad (1)$$

$$h(t) = \sum_{i=0}^{P-1} c(i)p(t - iT_c) \quad (2)$$

其中, A 表示信号幅度; $d(t)$ 表示信息码(均值为 0 的均匀分布); t_0 表示失步时间; T_s 表示信息码宽; $\{c(i) = \pm 1, i = 0, 1, \dots, P-1\}$ 表示 PN 码,其中 P 是 PN 码长度; $h(t)$ 表示一个完整周期的 PN 码与信道和接收设备响应的卷积; $p(t)$ 表示发射机滤波器与信道响应、接收机滤波器的卷积,在理想信道中, $p(t)$ 表示支撑区域为 $[0, T_c]$ 的矩形函数; T_c 表示码片周期。

类似地,接收机输出的 LC-DS-SS 基带信号可以表示为

$$s(t) = A \sum_{m=0}^{\infty} d(t - mT_s - t_0) \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(t - kT_0) \quad (3)$$

式(3)中: $T_0 = PT_c$ 表示 PN 码周期。

LC-DS-SS 信号与 SC-DS-SS 信号相比,在信号结构上有较大不同,PN 码周期内存在信息码的跳变,改变了信号的周期相关特性。

2 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法

DS-SS 信号 PN 码盲估计研究是 DS-SS 信号盲处理的最后同时也是最重要的一环,它是在前端 DS-SS 信号检测以及载频、码速率、PN 码周期等一系列参数估计的基础上完成的,所以严格来说,DS-SS 信号 PN 码估计是“半盲”估计。对于上述 DS-SS 信号检测和参数估计问题,已经有大量文献,目前也逐渐趋于成熟,这里不再赘述,本文主要讨论已知上述参数前提下的非合作 DS-SS 信号 PN 码盲估计问题。

国内外 DS-SS 信号 PN 码盲估计研究大约开始于 20 世纪 90 年代中期,前十年主要研究对象为 SC-DS-SS 信号,形成了一系列比较成熟的 PN 码盲估计方法,在此基础上,一些学者逐渐开始研究 LC-DS-SS 信号 PN 码盲估计问题,从目前已发表的国内外成果来看,侧重于将 LC-DS-SS 信号 PN 码盲估计问题转化为 SC-DS-SS 信号进行研究,不是理论方法上的革新。本文主要从方法角度讨论 DS-SS 信号 PN 码盲估计问题。

目前,DS-SS 信号 PN 码盲估计方法主要包括基于特征分析估计方法、基于特征多项式估计方法和基于相关运算估计方法 3 类。

2.1 基于特征分析估计方法

基于特征分析估计方法本质上是随机信号条件下的高斯极大似然估计,即信息码元序列假定服从高斯分布条件下的极大似然估计。通过对 DS-SS 信号进行特征分析,实现样本协方差矩阵由 PN 码张成的信号子空间和噪声空间分离,通过提取信号子空间的特征向量实现 PN 码估计。

提取特征向量的基本途径是矩阵特征值分解或奇异值分解,但这种方式需要对批量数据进行处理,跟踪环境变化的能力不强,难以满足实时性处理的需要,所以,投影逼近子空间和 PCA 神经网络被用于实现特征向量的快速提取。实际上,这两种方式都是对协方差矩阵的主分量分析,而主分量分析和特征分析的理论基础是一致的,只是表现为同一个问题的不同侧面。

综上所述,基于特征分析估计方法因特征向量提取方式的不同又分为特征值分解、投影逼近子空间和神经网络 3 种方法。

2.1.1 特征值分解估计方法

1997 年,Agée 等^[3]提出了主模解扩算法,在 DS-SS 信号频率信道化接收的前提下,通过提取协方差矩阵最大特征值对应的特征向量估计 PN 码,这是最早的基于特征分析估计 DS-SS 信号 PN 码的文献。但是作者忽略了信号采样时刻与信息码元起始时刻不同步的情况,针对这一问题,Burel G 等^[4]系统证明了非同步 DS-SS 信号的 PN 码与信号协方差矩阵特征向量间的关系,并通过特征值分解提取主、次特征向量,从而恢复出完整周期的 PN 码,在 DS-SS 信号 PN 码盲估计研究进程中具有里程碑式的意义。但 PN 码片段估计时存在相位模糊问题,导致无法恢复正确的完整周期的 PN 码,对 DS-SS 信号的破译困难。

针对上述问题,文献[5]提出首先通过协方差矩阵的 F 范数实现 DS-SS 信号的盲同步,然后仅通过最大特征值对应的主特征向量估计 PN 码,从而避免 PN 码片段拼接错误,但该方法十分依赖于同步的精度。与这种间接处理方式不同,张花国等^[6]在特征分析法的基础上提出将分段窗口宽度加倍,重新求取信号协方差矩阵,证明了其最大特征值对应的特征向量即为补零后的 PN 码,取得了不错的效果。该方法不存在同步点估计误差,但窗口宽度的加倍意味着计算复杂度的指数性增长。

矩阵的奇异值分解和其协方差矩阵的特征值分解是等价的,沈斌^[7]、董冬^[8]、任啸天^[9]等人对接收信号矩阵进行了奇异值分解,在非同步情况下通过左奇异向量得到了 PN 码的估计,同时利用右奇异向量得到原始信息码的估计。在此基础上,文献[10]和文献[11]针对未知频偏下的情形做了研究。

基于相同的理论基础,张花国、魏平^[12]对非合作下的 QPSK-DS-SS 信号的 PN 码进行估计,将其等效为两路 BPSK-DS-SS 信号,利用 PN 码的恒模特性消除了尺度模糊问题,完成了 PN 码的估计。高红兴等^[13]对 WCDMA 上行链路信号 OVFSF(正交可变扩频因子)码进行了估计。颜丽娟等^[14]将

基于特征分析的 PN 码估计方法进一步应用到到达时间差定位 (TDOA) 中。文献[15]以特征值分解法为核心,提出了一种分布式处理的框架,实际上是对于各独立处理结果进行累加比较以进一步提高估计精度。上述研究针对某种具体应用对象或应用场景,没有对方法本身作技术改进。

上述文献的研究对象主要是 SC-DS-SS 信号,2007 年,张天骢等^[16]将特征分析法推广到 LC-DS-SS 信号的 PN 码估计中,建立的非同步 LC-DS-SS 信号的数学模型和 SC-DS-SS 信号是一致的,但长码调制改变了 PN 码的相关特性,所以性能表现不佳,且由于相位模糊而导致 PN 码片段拼接错误。

针对上述问题,文献[17]提出在 PN 码估计之前通过构建过渡矩阵来消除信息码跳变的影响,但缺乏数学理论支撑,且没有给出明确的矩阵构建方法。徐海源^[18]提出了基于分块矩阵特征值分解的 LC-DS-SS 信号 PN 码估计算法。该算法在建立信号模型时按信息码宽分段,信息码宽可以根据 LC-DS-SS 信号的相关函数二阶矩隐含的符号周期信息估计^[19],在估计出 PN 码的各片段后,利用 m 码和 Gold 码的周期相关特性解决相位模糊问题,从而恢复出正确的 PN 码。在此基础上,文献[20]和文献[21]分别对码分多址和残余频偏下的 LC-DS-SS 信号 PN 码盲估计问题进行了研究。

类似地,王满喜等^[22]针对 PN 码片段估计相位模糊的问题,将估计出的 PN 码看作另一组信息码和原 PN 码调制后的已扩序列,采用基于移位相加特性进行信息码剥离,实现 PN 码估计。Z. Q. Dong 等^[23]在特征值分解法的基础上也提出过一种基于移位相加特性和恒模特性的延时相乘预处理流程,旨在减弱信息码对 PN 码周期特性的影响,两种方法虽然目的不同,但核心思想一致,都仅限于 m 码,实际应用范围有限。

P Y Qui 等^[24]提出用重叠分段特征分解法估计 LC-DS-SS 信号 PN 码,分段长度为信息码元宽度,利用重叠部分来试图解决相位模糊,没有给出分段的长度准则和细节,估计精度表现不佳。

Daneshmand S 等^[25]和周德强,康一丁等^[26]分别利用二阶统计盲辨识 (SOBI) 算法和 FAST-ICA 算法实现了 LC-DS-SS 信号 PN 码估计,侧重于 LC-DS-SS 信号向 SC-DS-SS 信号问题的转化,理论基础仍是 DS-SS 信号特征分析。

总之,在 LC-DS-SS 信号中,因为实质上是多段 SC-DS-SS 信号 PN 码估计,最突出的矛盾在于相位模糊导致 PN 估计片段拼接错误,目前针对 m 码和 Gold 码扩频的 LC-DS-SS 信号,已经有相应解决方法,但对于其他非线性 PN 码扩频 DS-SS 信号,仍待深入研究。

2.1.2 投影逼近子空间估计方法

1995 年德国学者 Yang Bin^[27]首次提出了利用投影逼近的方法迭代跟踪信号子空间,即投影逼近子空间跟踪技术 (Projection Approximation Subspace Tracking, PAST),子空间跟踪的核心思想是计算代价函数 $J(W)$ 的最小值,当 $J(W)$ 达到稳定点后, W 就是对输入信号自相关矩阵特征向量的良好估计,经典的 PAST 算法避免了高复杂度和存储量的特征

值分解计算,适合于 DS-SS 信号 PN 码估计的实时性处理。

张红波,吕明^[28]将压缩投影逼近子空间跟踪 (PASTd) 算法,用于 DS-SS 信号的主特征向量提取,估计出 PN 码,其中利用序贯的方法简化 PAST 技术,从数据向量中减去在该最大特征向量上的投影,次大特征向量就成为更新数据中的主特征向量。重复此过程,可以估计出所有 r 维的特征向量,其迭代收敛准则为递归最小二乘 (RLS) 准则。

后来,文献[29]又在 PASTd 算法的基础上,通过引入一个加权矩阵的最优权重,提出了广义能量函数 (GEF) 算法,它的递归学习过程与 PASTd 算法是一致的,但收敛性优于 PASTd 算法。

张天骢,代少升等^[30]将基于恒模性质的 LMS 算法应用到 DS-SS 信号 PN 码估计中,能够同时分离出 DS-SS 信号的原始信息码和 PN 码。恒模性质用于误差函数的构造,通过对最终收敛解的分析,算法实质依然是通过不断迭代逼近协方差矩阵的特征向量。

Ma Chao^[31-32]、张晓林^[33]等将 SC-DS-SS 信号 PN 码估计中的 PAST 算法推广到 LC-DS-SS 信号中。牟青等^[34]提出将 LC-DS-SS 信号重构成缺失数据模型的 SC-DS-SS 信号,利用交替投影逼近子空间的方法对 LC-DS-SS 信号 PN 码进行估计,研究了未知频偏下的 LC-DS-SS 信号 PN 码盲估计问题^[35]。

总的来说,基于投影逼近子空间的 PN 码估计方法是一种以特征分析为理论基础的快速算法,计算量的减小以牺牲一定精度为代价,这方面研究的焦点在于提高算法收敛的速度和稳定性,步长的设定是关键。

2.1.3 神经网络估计方法

神经网络 (Artificial Neural Networks, ANNs) 是一种模仿动物神经网络行为特征,进行分布式并行信息处理的算法数学模型,也是一个具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统。这种网络依靠系统的复杂程度,通过调整内部大量节点之间相互连接的关系,达到处理信息的目的,该模型具有自学习和自适应的能力。近十几年来,神经网络在通信、信号处理、模式识别、智能控制等领域的应用越来越广泛。

1997 年, F. Dominique 和 J. H. Reed^[36]在 DS-SS 信号特征分析的基础上,利用带约束的 Hebbian 准则,实现了对 DS-SS 信号 PN 码的估计,文中虽然没有提到神经网络的概念,但该方法 and 神经网络算法实际应用上是一致的,因为文中采用的非线性自适应滤波器和突触权值由 Hebbian 类自适应算法约束的单个线性神经元神经网络是等价的,从仿真结果看,估计性能并不理想。

张天骢等^[37]最早引入基于 Hebbian 学习规则的神经网络方法提取 DS-SS 信号的最大主特征向量,实现了已同步下的 DS-SS 信号 PN 码盲估计,在此基础上,文献[38]进一步优化了收敛精度;文献[39]引入了基于 Hebbian 准则的多主分量神经网络,即 Sanger 神经网络,实现了未同步时 DS-SS 信号 PN 码盲估计,以及通过自适应调整步长获取较快的收敛速度。另外,针对 DS-CDMA 的应用场景,文献[40]进一步

引入了多主分量提取的 APEX 神经网络和 LEAP 神经网络。

基于新息准则 (Novel Information Criterion, NIC) 原理, Guo Lin 与 Lv Ming 等^[41]在神经网络估计方法的基础上,进一步提出了 NIC 神经网络估计方法,一定程度上提高了收敛速度及估计精度。但是,该算法性能受初始值和训练参数影响较大。

文献[42]和文献[43]针对 PN 码估计中混沌序列非线性的特点,提出利用非线性弹性反传 (BP) 神经网络估计混沌 PN 码,在训练样本足够大时估计精度较高。与前面几种无监督学习的 PCA 神经网络不同,该神经网络属于有监督学习的神经网络,期望输出和输入都是 DS-SS 信号,根据误差反向传播监督调节网络,所估计的 PN 码是收敛权值。

神经网络如同一个黑盒子,其内部机理是不可见的,不像矩阵分解和 PAST 算法那样脉络清晰。基于现代神经科学和认知科学发展而来的神经网络是一门庞大复杂的学科,但是它在 PN 码估计中的应用是以特征分析为基础的,目的仍然是以牺牲一定精度为代价换取计算量的减小,收敛的速度和精度是该领域一直探索的主题。

2.2 基于特征多项式估计方法

与直接估计 DS-SS 信号 PN 码的方式不同,基于特征多项式估计方法首先求出 PN 码的特征多项式,进而通过特征多项式恢复原始 PN 码,是一种间接的 PN 码盲估计方法。所以,基于特征多项式的 PN 码估计方法仅适用于由线性生成 PN 码扩频调制的 DS-SS 信号。

最早的基于特征多项式的 PN 码估计方法是由 P. C. J. Hill 和 M. E. Ridley^[44]在 2000 年提出的,首先基于梅西算法通过连续 $2n$ 个码字 (n 表示抽头系数) 的数据段求解出 LF-SR 的抽头系数,进而得到 PN 码。最典型的基于特征多项式的 PN 码估计方法是由 E. S. Warner 等^[45]提出的三阶相关法,但三阶相关法仅适用于 m 码,所以, E. R. Adams 等^[46-47]陆续研究了用三阶相关法估计 m 码的特征多项式,应用于 DS-SS 信号的 PN 码估计中。

邱轶修^[48]将三阶相关法用于 LC-DS-SS 信号,提出了延时相乘三阶相关算法及按信息码宽分段的三阶相关算法。赵知劲^[49-51]、Gu X^[52]等人将三阶相关法应用到短码扩频长码加扰的 LC-DS-SS 信号,实现了在接收信号长度不到一个 PN 码周期情形下的盲解扩,同样仅限于 m 码且信噪比要求较高。

不难看出,上述两种方法旨在得到线性生成 PN 码的特征多项式,特征多项式的细微差别体现在最终的 PN 码时可能会被无限放大。如果得到准确的特征多项式,就可以实现零误码率 PN 码估计,所以,这类方法的容错率很低。

2.3 基于相关运算估计方法

基于相关运算估计方法的基本思想是利用 PN 码良好的自相关特性,通过接收 DS-SS 信号的自相关运算或者与信息码字空间的互相关运算实现 PN 码估计,主要通过集平均方法抑制噪声。

最早的基于相关运算的 PN 码估计方法由谈满堂等^[53]在 1995 年提出,在已知 PN 码周期且默认不同信息码元的

PN 码相同的前提下,通过自相关估计信息码,与接收信号进行互相关得到 PN 码。后来,董占奇等人^[54]针对 DS-SS 信号 PN 码估计提出多比特/码片码字联合相关检测法,通过 DS-SS 信号与码字空间的相关运算确定已扩数据序列,然后根据 DS-SS 信号的周期性对已扩序列进行观察分析得到 PN 码,但文中并没有对如何观察分析具体解释。上述文献提到的 PN 码估计方法主要探索了理论上的可行性,在具体实施方面没有更深入探究,对于非同步情况缺乏考虑。

詹亚峰等^[55-56]构造了两个测度函数,一个用于搜索 PN 码在接收信号中的起始位置,另一个用于 PN 码的逐码片 (chip) 估计。测度函数的构造基于相关运算,算法核心思想是数理统计中的区间估计法。仿真结果表明估计的精度不高且依赖于采样点数的多少。Saeed Mehboodi 等^[57]也是采用逐码片估计的思想,通过改进测度函数减少计算量,同时也改善了精度。类似地, Jiang L 等^[58]首先通过信号逐码片延迟做自相关,并通过搜索其最大值估计 PN 码起始点,然后对于同步 DS-SS 信号,根据相关峰值的极性将各信号向量进行叠加以提高信噪比。叠加所得向量即为 PN 码估计值。

针对实际中接收 DS-SS 信号信噪比可能存在起伏的现象,罗明君等^[59]提出首先对信号根据信噪比进行分层,利用信噪比较高的接收信号实现 PN 码周期、失步点等信噪比容限较高的参数的估计,然后通过滑动窗口法 (实际上是周期相关运算) 直接进行盲解扩。基于相同的原理,文献[60-61]对已调制载波而非基带信号的 PN 码估计问题进行了研究。

白娟等^[62]提出基于 K 均值 (K . means) 聚类算法的 LC-DS-SS 信号 PN 码盲估计方法。 K 均值算法实质是传统相关运算。仿真结果表明,该算法计算量小,但是当扩频比较小,即信息符号周期远小于 PN 码周期时,其较低信噪比性能不佳。

上述文献在考虑非同步情况的前提下都提出了详细的估计方法,总的来看,基于相关运算的 PN 码估计方法并没有形成系统研究,与前面两类方法相比,估计精度较低,并且因为通过集平均方法抑制噪声需要足够长 PN 码周期的采样序列,目前的研究多是在理论层面,实际应用较少。

2.4 PN 码盲估计方法性能比较分析

上述 2.1 ~ 2.3 节中,对于基于特征分析估计方法、基于特征多项式估计方法和基于相关运算估计方法这 3 种目前主要的 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法,详细介绍了各自的来源、理论基础和发展历程,并讨论了各自的优缺点。本节将对各方法的性能进行综合分析比较。

估计精度和计算复杂度是评价上述算法性能的主要指标。收敛速度、鲁棒性和适用性也是影响算法综合性能的重要因素。对于 3 种主要 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法的综合性能进行分析比较,如表 1。

实际应用中,估计精度还受到信号结构特征、信号长度等因素的影响,无法得到统一精确的信噪比容限,只能根据理论分析和仿真结果得出相对的估计精度。

可以看出,基于特征分析估计方法在估计精度上有明显优势,且算法不受信号和 PN 码类型限制,其中两种快速算法

的计算复杂度也有效降低,但存在是否收敛的风险。结合 2.1 节的综述,表明该类方法具有明显的研究潜力。基于特征多项式估计方法虽然综合性能表现不尽人意,但其可以应用在接收信号长度小于 PN 码周期的特殊情况下,所以仍需

进一步探索,提高估计精度。基于相关估计方法因为算法实现简单而在高信噪比下仍有广泛的应用背景,但缺乏进一步挖掘的潜力。

表1 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法、性能

| 估计方法名称 | 估计精度 | 计算复杂度 (以 SC-DS-SS 信号为例) | 收敛性 | 鲁棒性 | 适用性 |
|-------------|---------|----------------------------|-----------------|-----|-------------------|
| 基于特征分析估计方法 | 特征值分解 | 高 | $O(P^3 + MP^2)$ | — | 较好 |
| | 投影逼近子空间 | 较高 | $O(P + MP^2)$ | 较好 | 较差 |
| | 人工神经网络 | 较高 | $O(aN + b)$ | 较差 | 差 |
| 基于特征多项式估计方法 | 低 | $O(P^3)$ | — | 好 | 仅适用于线性生成 PN 码 |
| 基于相关估计方法 | 较低 | $O(aP^2)$ | — | 较差 | 对 LC-DS-SS 信号适用性差 |

注: P 表示 PN 码长度, M 表示接收信号包含的 PN 码周期数, a, b 表示待定系数

3 进一步研究方向

当前 DS-SS 技术在卫星通信、导航、航天测控等领域广泛应用的大背景下, DS-SS 信号 PN 码盲估计研究至关重要, 针对现有 DS-SS 信号 PN 码估计方法的不足, 结合新技术的发展, 不断改进和提出新的 DS-SS 信号 PN 码估计方法具有实际意义。

1) 基于特征分析和基于相关运算的 DS-SS 信号 PN 码估计方法中都出现了相位模糊问题, 对于 SC-DS-SS 信号, 通过盲同步处理实现信号同步后, 虽然仍有可能得到完全反相的 PN 码, 如果没有 PN 码的其他先验信息辅助判断, 已经是最优的估计结果; 但在 LC-DS-SS 信号 PN 码估计研究中, 尤其是非线性 PN 码扩频时, 相位模糊所造成的 PN 码估计片段拼接错误问题没得到有效解决。

2) LC-DS-SS 信号本身结构比较复杂, 尤其是目前在实际中存在一周期 PN 码调制非整数位信息码的特殊情况, 对于这类 DS-SS 信号 PN 码估计问题, 当前的很多算法并不适合, 普遍估计精度不高。

3) 这几类 DS-SS 信号 PN 码估计方法的估计精度除了受环境信噪比的影响外, 还和接收 DS-SS 信号的长度、PN 码周期、PN 码类型以及信息码宽等信号本身特性有关。基于人工神经网络和投影逼近子空间的 PN 码估计方法的收敛性还受到初始值和步长设定的影响。但目前的 DS-SS 信号 PN 码估计方法性能评估通常只讨论某仿真参数条件下的信噪比容限, 缺少对上述因素的综合考虑。

4) 目前, 关于 DS-SS 信号 PN 码估计方法的研究主要针对理想高斯白噪声 (AWGN) 条件下的基带信号, 然而考虑到实际应用环境中存在的窄带干扰、残余频偏等因素, 以及在接收端对 DS-SS 信号先解扩后解调的处理流程, 所以有必要对 BPSK/QPSK/MSK 等 DS-SS 通信常用调制方式调制的中

频 DS-SS 信号在复杂信道环境下的 PN 码盲估计问题进行深入研究。

4 结论

因为直接序列扩频通信技术在军事和民用通信领域的广泛应用, 所以对于非合作 DS-SS 信号的侦察和破译的研究迫在眉睫, 而其中的核心课题是 PN 码盲估计研究。本文对 DS-SS 信号 PN 码盲估计方法进行了较为详细的总结, 指出了 DS-SS 信号 PN 码盲估计技术的进一步研究方向, 相信通过本文的研究分析能够对 DS-SS 信号 PN 码盲估计研究提供有意义的借鉴。

参考文献:

- [1] 田日才. 扩频通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [2] WARTY C, MATTIGIRI S, YU R, et al. Spreading codes for multiuser estimation in non coherent and non cooperative environments [C]//Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International. IEEE, 2013: 1252-1257.
- [3] AGEE B G, KLEINMAN R J, REED J H. Soft synchronization of direct sequence spread-spectrum signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(11): 1527-1536.
- [4] BUREL G, BOUDER C. Blind estimation of the pseudo-random sequence of a direct sequence spread spectrum signal [C]//Milcom 2000. Century Military Communications Conference Proceedings. IEEE, 2000: 967-970 vol. 2.
- [5] BOUDER C, AZOU S, BUREL G. A robust synchronization procedure for blind estimation of the symbol period and the timing offset in spread spectrum transmissions [C]//IEEE

- Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. IEEE,2002;238 - 241.
- [6] 张花国,李立萍,陈天麒.一种改进的 DS/SS 信号 PN 码估计算法[J].信号处理,2003,19(21):74-77.
- [7] 沈斌,王建新.基于奇异值分解的直扩信号伪码序列及信息序列盲估计方法[J].电子与信息学报,2014,36(9):2098-2103.
- [8] 董冬,王兴亮.基于双信息周期的短码 DS-SS 信号盲解扩[J].现代电子技术,2011,34(16):70-74.
- [9] REN X T,XU H,HUANG Z T,et al. Blind joint information and spreading sequence estimation for short-code DS-SS signal in asynchronous and synchronous systems[J]. Signal, Image and Video Processing,2013,7(6):1183-1194.
- [10] BIN S,JIAXIN W. Estimation for PN Sequence in DS-SS Signals with Unknown Carrier Frequency Offset[C]//2014 International Conference on RSWC,2014.
- [11] ZHANG T,DAI S,ZHANG W,et al. Blind estimation of the PN sequence in lower SNR DS-SS signals with residual carrier[J]. Digital Signal Processing,2012,22(1):106-113.
- [12] 张花国,魏平.基于恒模特性的 QPSK-DS-SS 信号 PN 码估计[J].航空学报,2013,34(6):1389-1396.
- [13] 高洪兴,张天骢,周圣,等.低信噪比 WCDMA 信号扩频码的盲估计方法[J].光通信研究,2012,2012(6):56-59.
- [14] 颜丽娟,高勇.一种基于盲解扩的直扩信号时差估计方法[J].无线电工程,2014,44(1):36-38.
- [15] YU Z,YONG C,YONGXIANG L,et al. A novel parameters estimation and code recovery approach of spread spectrum code based on distributed cooperation under non-collaborative condition[C]//Computer and Communications (IC-CC),2015 IEEE International Conference on. IEEE,2015:270-274.
- [16] 张天骢,周正中,林孝康,等.低信噪比长伪码直扩信号的盲估计方法[J].信号处理,2008,24(3):370-376.
- [17] WENLONG X,YUANPING Z,QINGGONG G,et al. Blind estimation of long-code DSSS signals based on information symbol transition pattern[C]//Signal Processing (ICSP),2016 IEEE 13th International Conference on. IEEE,2016:1161-1164.
- [18] 徐海源.雷达/通信侦察中相位编码信号分析处理技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007:166.
- [19] 牟青,魏平.低信噪比下长码直扩信号的符号宽度估计[J].电子科技大学学报,2011,40(3):352-356.
- [20] NZEZA C N,HIMSCHOOT B,GAUTIER R. Blind long spreading codes DS-SS signal identification in frequency selective channel[C]//Communications (COMM),2012 9th International Conference on. IEEE,2012:357-360.
- [21] ZHANG H,WEI P,MOU Q. A semidefinite relaxation approach to blind despreading of long-code DS-SS signal with carrier frequency offset[J]. IEEE Signal Processing Letters,2013,20(7):705-708.
- [22] 王满喜,李宏,马刘非,等.低信噪比下非周期性直扩信号的盲估计[J].电子科技大学学报,2009,38(2):177-181.
- [23] DONG Z,HU N. A method for the detection of long pseudo-random code DS-SS signals based on the processing of delay-multiply (II)-the estimation of the information symbol period and the pseudo-random code sequence[C]//IEEE International Conference on Communication Technology. IEEE,2008:233-236.
- [24] QUI P Y,HUANG Z T,JIANG W L,et al. Improved blind-spreading sequence estimation algorithm for direct sequence spread spectrum signals[J]. Iet Signal Processing,2008,2(2):139-146.
- [25] DANESHMAND S,AGHAEINIA H,TOHIDIAN M,et al. Blind estimation of signal in periodic long-code DS-SS communications[C]//Sarnoff Symposium,2009. SARNOFF '09. IEEE. 2009:1-6.
- [26] ZHOU D Q,KANG Y D,CHEN W D. Blind Estimation for Spread Spectrum Codes of PLC DS-SS Signals Based on Fast-ICA[J]. Radio Communications Technology,2013.
- [27] YANG B. Projection approximation subspace tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1995,43(1):95-107.
- [28] 张红波,吕明.基于子空间跟踪的扩频码盲估计算法[J].系统工程与电子技术,2006,28(10):1470-1472.
- [29] LU M,ZHOU Y,TANG B. A GEF-based algorithm for blind estimation of PN sequence in lower SNR DS-SS signals[C]//Communications, Circuits and Systems,2008. IC-CCAS 2008. International Conference on. IEEE,2008:930-933.
- [30] 张天骢,代少升,马国宁,等.一种微弱直接序列扩频信号的盲自适应解扩算法[J].信号处理,2010,26(5):719-724.
- [31] MA C,ZHANG L M,WANG J X. Blind Estimation of Long Code DS-SS Signal Based on Subspace Tracking[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications,2014,484:976-981.
- [32] 马超,张立民,林洪文.窄带干扰下基于子空间跟踪的扩频序列估计[J].电子设计工程,2014,22(9):149-152.
- [33] 张晓林,李洪源.非周期直扩信号 PN 码盲估计技术[J].系统工程与电子技术,2012,34(6):1102-1107.
- [34] 牟青,魏平.基于缺失数据模型的长码直扩信号的伪码估计[J].电子学报,2010,38(10):2365-2369.
- [35] 牟青,魏平,MouQing,等.未知频偏下长码直扩信号的盲

- 解扩[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1797-1801.
- [36] DOMINIQUE F, REED J. Simple PN code sequence estimation and synchronisation technique using the constrained Hebbian rule[J]. Electronics Letters, 1997, 33(1): 37-38.
- [37] 张天骢, 周正中, 郭宗祥. 一种 DS/SS 信号 PN 码估计的神经网络方法[J]. 信号处理, 2001, 17(6): 533-537.
- [38] 陆俊, 陆思羽, 刘万洪, 等. 直扩信号 PN 码序列估计的神经网络方法[J]. 无线电工程, 2011, 41(12): 15-17.
- [39] 赵德芳, 张天骢, 侯瑞玲, 等. 通信侦察中基于神经网络的伪码序列估计[J]. 现代防御技术, 2010, 38(6): 85-91.
- [40] 张天骢, 赵军桃, 江晓磊. 基于多主分量神经网络的同步 DS-CDMA 伪码盲估计[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(11): 71-74.
- [41] LIN G, MING L, TANG B. Blind Estimation of Spreading Sequence Based on Neural Network by a Novel Information Criterion [C]//Blind Estimation of Spreading Sequence Based on Neural Network by A Novel Information Criterion. 2008: 78-81.
- [42] 胡进峰, 郭静波. 混沌直扩信号 PN 码盲估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1824-1827.
- [43] 何世彪, 谷诚, 罗冬梅, 等. 利用神经网络盲估计混沌直扩信号扩频序列倡[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 59-63.
- [44] HILL P C J, RIDLEY M E. Blind estimation of direct-sequence spread spectrum m-sequence chip codes [C]//IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. IEEE, 2000: 305-309 vol. 1.
- [45] WARNER E S, MULGREW B, GRANT P M. Triple correlation analysis of m-sequences [J]. Electronics Letters, 1993, 29(20): 1755-1756.
- [46] ADAMS E R, GOUDA M, HILL P C J. Detection and characterisation of DS/SS signals using higher-order correlation [C]//IEEE, International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996(1): 27-31.
- [47] ADAMS E R, HILL P C J. Detection of direct sequence spread spectrum signals using higher-order statistical processing [J]. 1997(5): 3849-3849.
- [48] 邱轶修. 长码直扩信号中的 PN 码估计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 62.
- [49] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷, 等. 非周期长码直扩信号的盲解扩[J]. 信号处理, 2014, 30(5): 511-516.
- [50] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷, 等. 非周期长码直扩信号的伪随机码盲估计[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 23-30.
- [51] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷. 非周期长码直扩信号的长扰码识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1792-1797.
- [52] GU X, ZHAO Z, SHEN L. Blind estimation of pseudo-random codes in periodic long code direct sequence spread spectrum signals [J]. IET Communications, 2016, 10(11): 1273-1281.
- [53] 谈满堂, 朱德君. 谱相关理论用于直接序列扩频信号的检测与估计 [C]//中国电子学会电子对抗分会学术年会论文集, [出版地不详]: [出版社不详], 1995: 53-59.
- [54] 董占奇, 于宏毅, 胡捍英. 直扩信号扩频伪随机序列盲估计分析[J]. 无线电工程, 2005, 35(10): 1-2.
- [55] ZHAN Y, CAO Z, LU J. Spread-spectrum sequence estimation for DS-SS signal in non-cooperative communication systems [J]. Communications, IEE Proceedings-, 2005, 152(4): 476-480.
- [56] 詹亚锋, 曹志刚, 马正新. DS-SS 信号的 PN 码估计[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 169-172.
- [57] MEHBOODI S, JAMSHIDI A, FARHANG M. Two algorithms for spread-spectrum sequence estimation for DS-SS signals in non-cooperative communication systems [C]//Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on. IEEE, 2016: 72-76.
- [58] JIANG L, JI H, LI L. A blind estimation algorithm for PN sequence in DS-SS signals [C]//2006 8th international Conference on Signal Processing. IEEE, 2006.
- [59] 罗名君, 史英春, 张旻. 基于分层处理的短码直扩信号盲解扩算法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(1): 26-30.
- [60] 安金坤, 易克初. 一种基于波形的直扩信号伪随机码估计算法[J]. 信号处理, 2011, 27(10): 1498-1503.
- [61] 叶卓映, 朱琳. 一种新的 MIMO 信道半盲估计算法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2011(12): 79-83.
- [62] 白娟, 张天骢, 余熙. 一种基于 K-means 算法的长码直扩信号伪码序列盲恢复方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4537-4540.

(责任编辑 杨继森)