

带内全双工水声通信技术研究现状与展望

赵云江^{1,2,3}, 乔钢^{1,2,3}, 刘淞佐^{1,2,3}, 郑乃华^{1,2,3}, 刘宇飞^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学)工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 近年来,水声通信技术已经被广泛应用于海洋环境观测等方面,但可预见的,在未来发展趋势下,以半双工体制为主的水声通信网络,将会无法满足日益增长的水下信息交互需求。带内全双工水声通信技术可以在相同的通频带内,同时发射和接收通信信号,理论上可将现有的频谱效率提高1倍,在水声信道可用频谱资源严重受限、水下信息交互需求激增的背景下具有极高的研究意义与应用价值。因此,带内全双工水声通信技术已逐渐成为目前水声通信领域的研究热点之一。简要介绍了目前无线电及水声通信背景下的带内全双工技术研究现状,对带内全双工水声通信面临的主要挑战进行了论述,并结合目前现有研究成果与实际工程应用中的难点问题,提出了几种可行的研究方向。

关键词 带内全双工;水声通信;自干扰抵消;水声通信机

中图分类号 O427.9

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)03-0195-11

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.03.006

Research Status and Prospect of In-band Full-duplex Underwater Acoustic Communication Technology

ZHAO Yunjiang^{1,2,3}, QIAO Gang^{1,2,3}, LIU Songzuo^{1,2,3}, ZHENG Naihua^{1,2,3}, LIU Yufei^{1,2,3}

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Ministry of Industry and Information Technology, Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract In recent years, underwater acoustic (UWA) communication technology has been widely used in military marine environment observation. However, it is foreseeable that in the future, the UWA communication network based on half-duplex (HD) system can not meet the growing demand of underwater information interaction. In-band full-duplex (IBFD) UWA communication technology can transmit and receive communication signals in the same passband at the same time, which can double the efficiency theoretically. It has great research significance and application value under the background of severely limited spectrum resources of available UWA channel and rapidly increasing demand for underwater information interaction. Therefore, IBFD-UWA communication technology has gradually become a research hotspot in the field of UWA communication. This paper briefly introduces the current research status of IBFD technology under the background of radio and UWA communication, and discusses the main challenges faced by IBFD-UWA communication. Combined with existing research results and difficult problems in practical engineering application, several feasible research directions are proposed.

Key words in-band full-duplex; underwater acoustic communication; self-interference cancellation; underwater acoustic communication set

0 引言

由于声波是目前能够在水下远距离传播的唯一载体,水下声学(Underwater Acoustic, UWA)技术已成为各国研究机构研究的热点之一。随着“海上丝绸之路”宏伟计划的推进,我国对海洋环境安全保障等方面产生了迫切的需求,具体体现在“丝路”沿线海洋环境观测、港口防务等方面,而上述需求对海洋信息获取与传输能力提出了新的要求。水声通信作为目前已知的唯一一种可靠远程水下无线信息传输技术,可以为上述需求提供解决方案,获得了越来越多的关注、研究与应用探索。

可于不便建设海底监测网的地区投放可回收式坐底潜标、海面浮标,搭载水声通信 Modem,通过水声通信技术完成一定区域的海洋环境信息实时观测,完成区域性要素监测(节点装置内部或外侧装有监测传感器,通过传感器获取数据,并将数据传输至主节点,主节点传递给岸基水听器或水面浮标等信息中继、收集中心)^[1]。还可应用于港口防务,江河入海口水质监测,台风预警(通过海面浮标配合各类传感器采集到的风速等信息)、海上石油平台原油泄漏监测、海底火山预警、海洋生产活动监测等方面^[2]。

但由于水声信道的频谱资源严重受限、多普勒扩展严重、较高的环境噪声等原因^[3],造成了水下通信网络的效率低下、吞吐量受限等问题。可预见的是,水声通信网络性能在未来需求的发展趋势下,将会无法满足日益增长的水下信息交互需求。因此,如何在水声通信带宽严重受限的情况下提高水声通信网络的频谱效率及系统吞吐量,是未来水声通信技术主要的研究方向之一。

无线电通信界为解决不断增加的无线业务需求与日益匮乏的频谱资源之间的矛盾,提出了同频同时全双工(Co-frequency Co-time Full Duplex, CCFD)概念^[4-5],这为提升水声通信网络性能提供了一种新的思路。考虑到带内全双工水声通信公开文献现有命名方式及突出频谱利用率问题,在本文中,统一以IBFD(In-Band Full-Duplex)进行指代。将IBFD技术应用于UWA通信网络节点,可在不

增加通频带范围的条件下,提高了信息交互效率,即减少了通信网络节点端到端之间信息交互的延迟时间;相比于传统的半双工水声通信系统,IBFD-UWA技术可以让通信系统的上、下行链路中增加一项新的可选模式,即可根据网络吞吐需求,灵活切换全双工与半双工模式,增加了网络对信息传输的自适应能力;特别的是,若存在非合作监听单位,当2个节点同时发送同频段信息时,非合作监听单位在极大概率上将接收到两节点发送的叠加信号,这使得非合作监听单位无法对任意节点发射信号进行正确解调,进而在一定程度上保证了通信网络的安全性。

目前,针对IBFD通信方面的研究主要集中在无线电通信领域^[6],IBFD-UWA通信技术尚处于初始研究阶段,但已有部分学者对无线通信研究结果在水声通信中的适用性展开了研究并取得了一定成果。对于IBFD-UWA通信的研究主要集中于数字干扰抵消与模拟干扰抵消方面,尚未构成完善的理论体系且停留于理论仿真及各域性能的独立实验验证,尚未研制出IBFD-UWA通信工程样机。本文将首先对带内全双工无线电、UWA通信系统研究现状进行介绍。

1 带内全双工通信系统研究现状

在IBFD通信系统应用背景中,由于节点的发射源与接收端位置远小于接收端与期望发射源之间的距离,又由于工作在同样的时间及频带上,导致近端接收端将接收到强自干扰信号。带内全双工水声通信系统需要在强本地干扰信号下,实现对弱期望信号的正确解调,因此,如何对这种强自干扰进行抑制和抵消,是IBFD通信实现过程中需要解决的最关键问题。

在早期研究中,由于受限于算法及硬件性能,无法解决本地强同频干扰问题,IBFD技术在当时被认为是难以实现的。针对IBFD技术的需求最早出现在回声消除等降噪领域,这些需求在一定程度上推动了IBFD技术的发展,一些研究成果也成为了IBFD-UWA通信技术的理论基础。通信技术领域方面,英国布里斯托尔大学(University of

Bristol) 首次提出了为了降低自干扰 (self-interference, SI) 对接收端的影响, 需要从模拟域及数字基带域内进行自干扰消除, 实验结果显示该方法在中心频率 1.8 GHz、带宽 200 kHz 的情况下合计获得了 72 dB 的自干扰抵消效果^[7]。美国斯坦福大学设计了一种单信道全双工无线收发器, 采用了一种新型自干扰抵消技术——天线抵消, 其中包含 2 个发射天线与 1 个接收天线, 两发射天线与接收天线距离相差半波长, 使得干扰信号在接收天线处相互抵消, 实现了近 30 dB 的干扰抵消, 并通过与射频域数字基带自干扰抵消技术相结合, 实现了 60 dB 的自干扰抵消效果^[8]。美国莱斯大学利用实验分别验证了天线分离、模拟域自干扰抵消及数字域自干扰抵消这 3 种干扰抑制及抵消手段的各类组合的效果, 并通过无线通信实验证明了全双工通信的可能性^[9]。该实验基于天线分离方案在 20 cm 的通信距离下实现了 39 dB 的干扰衰减效果, 而在天线分离分别与模拟域、数字域自干扰抵消方案的组合下, 分别实现了 70 dB 及 72 dB 的抵消效果。同时, 在对天线分离、模拟域及数字域自干扰抵消的联合抵消方案的实验中得到了几种组合方案中最佳的 78 dB 干扰抑制效果。

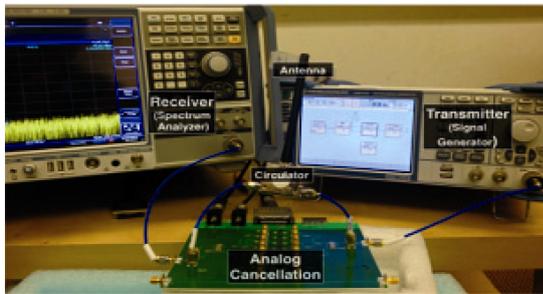


图 1 美国莱斯大学带内全双工原理实验装置
Fig. 1 IBFD experimental device of Rice University

莱斯大学根据实验结果提出若在射频干扰抵消效果足够好的情况下再加入数字基带干扰抵消, 反而会造成残余干扰能量加强, 并对这种情况进行了分析, 得出数字基带干扰抵消中信道估计的重要性。

国内方面, 电子科技大学设计并实现了一种 2×2 全双工 MIMO 无线电演示系统^[10], 其射频域采用多径自适应抵消策略, 各传播链路的自干扰抵

消由四抽头滤波器实现, 可自适应调整衰减、时延及相位, 并通过多维梯度下降搜索算法在射频干扰重构训练阶段实现射频域自干扰抵消最大化, 数字域采用常规办法通过对残余干扰信道估计完成干扰重构并实现抵消。实验结果表明, 该方案在 2.535 GHz 的中心频率、20 MHz 的带宽下实现了 115 dB 的自干扰抵消效果, 其中天线隔离 40 dB, 模拟域自干扰抵消 43 dB, 数字域残余自干扰抵消 32 dB。以上各研究单位学者的研究成果为全双工通信研究领域打下了坚实的理论基础, 指导意义巨大, 影响深远。

目前, 已有多个国家展开了针对 IBFD-UWA 通信技术的研究, 以英国为例, 为了解带内全双工水声通信自干扰特性、充分探索全双工通信系统潜能并实现通信网络物理层性能增强, 英国工程和自然科学研究委员会于 2017-2020 年展开了研究题目为《Full-Duplex For Underwater Acoustic Communications》的项目, 分别资助了英国约克大学与纽卡斯尔大学, 主要研究内容为: 1) 全双工水声通信系统中高效精准的自干扰信号建模与分析; 2) 被动及主动全双工水声通信系统中的自干扰抵消方法; 3) 全双工水声通信网络组网技术研究。研究完毕后由英国阿特拉斯电子公司 (ATLAS Elektronik, UK) 实现科研成果转化, 并将研究成果应用于海底资产维护与环境影响监测, 海洋科学与管理以及国防与国土安全等方面。

本人所在科研团队依托原 863 项目研制出世界上首台全双工水声通信机, 在不同频率上使用扩频调制技术和 OFDM 调制技术发送控制包和数据包, 验证了全双工水声通信的可行性^[11]。该通信系统利用分频方案, 并非 CCFD 通信系统, 但该系统的设计为全双工水声通信在被动干扰抑制、模拟干扰抵消方面具有重要的参考价值。于 2019 年, 团队研制出了首台 IBFD-UWA 通信工程样机, 并通过工程样机完成了自干扰信道建模与抵消性能的理论验证^[12]。

后文中将对对现有 IBFD 通信过程中的自干扰抵消关键技术进行总结与提炼, 同时结合水声通信系统特征, 探究技术跨领域应用的适用性, 并探究

其工程实现的可行性,为 IBFD-UWA 通信技术研究提供理论支撑与指导。

2 IBFD 通信系统中的关键技术概括

带内全双工水声通信系统与传统常规水声通信系统不同,常规水声通信系统一般只有 1 个收发合置换能器,以用于半双工模式下发射和接收信号,而带内全双工水声通信系统除发射换能器外,还存在 1 个接收换能器,以保证全双工模式收发信号同时进行。当带内全双工通信系统同时进行收发信号时,近端发射端发射出的信号功率远大于近端接收端所接收的期望信号,这将使得期望信号无法进入到模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)的动态量化范围之内或有效信噪比过低导致无法顺利解调^[13]。因此,为使 IBFD-UWA 通信系统正常工作,需保证期望信号在进入到系统中时,其信噪比至少要高于半双工体制下无误码解调信噪比。但在实际工程应用中,双端对发的发射功率应保持一致,若同时增加双端发射声源级,则本地的自干扰信号功率将进一步增加,提高了所需完成的自干扰抵消量。因此,需在远端期望信号进入到系统前对自干扰信号进行空间上的抑制与模拟域的抵消,以使自干扰能量与期望信号能量差距降低,进而保证远端期望信号可完整进入到 ADC 动态量化范围内。因此,空间上的自干扰抑制与模拟自干扰抵消是需要研究的关键问题。

完成初步抵消后,残余干扰信号与期望信号的混合信号在经过前置放大器的放大后将进入到系统的数字域中。作为自干扰抵消的最后一个步骤,需要将残余干扰分量抵消至背景噪声水平,以保证远端期望信号的解调效果。数字域上的干扰抵消过程主要由 2 部分构成,即残余干扰的信道估计与信号重构。与模拟干扰抵消过程相类似,信道估计用于对完整、残余干扰信号进行信道参数估计,在此基础上通过重构获得残余信号的反相信号来进行模拟、数字域干扰抵消。需要指出的是,在进行干扰抵消时,信道估计的精度将直接影响干扰抵消效果,即高性能干扰抵消必须以高精度信道估计为基础。自干扰信号主要由直达干扰信号、环路干扰信

号和经过海底海面反射的多径干扰信号构成。其中,对自干扰信道的精准估计,对于提升自干扰抵消性能有重要的影响。因此,有必要对发射换能器到接收换能器这一传播过程进行信道建模研究,以充分了解自干扰信号中能量较强的环路自干扰传播信道的特性,为后续各域自适应滤波器参数设置提供理论依据,并提高其他各域干扰抵消性能,因此可引出另一项 IBFD-UWA 通信系统实现过程中的关键技术,即传播域自干扰信道估计与建模技术。

在实现 IBFD-UWA 通信的过程中,上述技术所解决的难点问题不同,同时各域间存在相互制约、相互支撑的复杂关系。从对自干扰信号的抑制、传播与抵消流程的角度上看,可以将整个过程分为 4 种,即空间域自干扰抑制、传播域自干扰信道建模、模拟域自干扰抵消、数字域自干扰抵消。其中,空间域自干扰抑制属被动干扰抑制手段,可进一步提高全双工通信系统对自干扰信号的抑制能力。空间域与传播域在所属空间上属同一范畴,但在传播域上的处理以自干扰信号在传播过程中的信道多途结构建模为主,因此命名为传播域;而空间域干扰抑制主要通过物理隔离、收发指向性与天线极化等技术,属利用空间冗余获得增益效果,因此命名为空间域。为使其意义清晰,特在此进行区分。

结合上述内容,下面将从空间域自干扰抑制、传播域自干扰信道建模、模拟域自干扰抵消、数字域自干扰抵消这 3 个方面对 IBFD 通信系统自干扰抑制与抵消研究现状与实现过程中的难点问题进行分析,为全双工水声通信技术研究提供理论支撑与指导。

3 关键技术研究现状与 IBFD-UWA 实现过程中的难点问题分析

本节将基于上述内容,结合无线电自干扰抵消技术研究现状、水声通信系统特性、实际工程应用情景对实现 IBFD-UWA 通信系统自干扰抑制与抵消过程中的难点问题进行论述。具体包括:1) 空间域自干扰抑制过程;2) 传播域自干扰信道建模过程;3) 模拟域自干扰抵消过程;4) 数字域自干扰抵消过程。

3.1 空间域自干扰抑制研究现状与难点问题分析

空间域自干扰抑制过程可主要分为2种,分别为主动干扰抑制与被动干扰抑制。被动干扰抑制也可称为无源干扰抑制,主要包括:

1) 发射源与接收端物理隔离及天线指向性,如增大干扰传播距离及将发射源与接收端指向不同方向以降低干扰强度;美国莱斯大学针对不同距离下全指向性及多宽度指向性下无线电载频2.4~2.48 GHz范围内的被动干扰抵消效果展开了研究^[14],全指向性发射天线在回波消除房间,50 cm及35 cm下分别获得了27.9 dB及24.5 dB的被动干扰抵消效果;在回波反射房间,获得了27.6 dB及25.1 dB的抵消效果;在发射天线90°波束宽度下(50 cm)获得了额外的17 dB的增益;并给出了被动抑制性能受反射路径数量影响与物理隔离会加强信道的频域选择性衰落的结论。

芬兰阿尔托大学针对中继天线干扰问题进行了实验测量^[15],结果显示紧凑型中继天线在回波消除室内可获得51 dB的被动抑制,而在多途环境中可获得48 dB,其中3 dB的差别来源于多途结构,同时在天线存在指向性且发射天线与接收天线距离5 m时,可以获得近70 dB的抑制性能。

美国阿拉巴马大学在全双工水声通信系统的论证阶段假设采用带有发射指向性的换能器,预计可获得25 dB的抑制增益^[16]。

2) 多源相位控制,通过增设发射端个数并通过反相器,在接收端形成相位相反的自干扰信号,以此在接收端对自干扰信号进行抵消;当干扰信号与期望信号两者之间的相位差 π 时,可认为两信号为反相,如果它们的振幅相等,再将其合并,可对其进行抵消,在接收端形成一个近场零能量域。

美国斯坦福大学采用2个发射天线及1个接收天线,对于波长为 λ 的信号,两发射天线分别被放置于 $d+\lambda/2$ 及 d 的位置上,以此将两发射信号到达接收天线时相差半个波长,以此达到互相抵消的效果,并且在2.4 GHz下使用7英寸的天线进行了实验,实验结果表明,该方法提供了26 dB的隔离度(5 MHz),并且结合噪声抵消和数字干扰抵消后合计完成了60 dB的干扰抵消(20 MHz下46.9 dB,

85 MHz下34.3 dB),但对于信号带宽超过100 MHz的情况,效果不理想^[8]。

3) 耦合网络,发射端与接收端通过特定阻抗网络,降低自干扰信号能量;阿尔托大学提出了一种适用于紧密间距天线的宽带耦合网络^[17],在2.4 GHz载波频率200 MHz带宽下获得了17.6 dB的提高增益,55 MHz带宽下获得了至少30 dB的隔离度,并对整体耦合网络性能和降低的整体效率进行了讨论。

4) 交叉极化处理,通过对发射端与接收端的正交极化处理,减弱收发两端的信号“传递”能量;

土耳其萨班奇大学设计并实现了一种2.4 GHz双极性微带贴片天线^[18],对其进行了隔离性能评估,结果表明该天线可实现40 dB的隔离度,多层天线下可获得60 dB的隔离度。

5) 大衰减传播介质隔离,包括在发射端与接收端间放置传播介质吸收材料、反射材料等,用以加强收发端的隔离强度。

美国诺斯罗普·格鲁曼任务系统公司将发射阵列与接收阵列完全嵌入在金属腔内,并平齐安装在地面上,以减少与附近物体和天线的相互作用,该方法获得了大于49 dB的隔离度^[19]。

一般的,空间干扰抑制都以上述几种技术混合下进行,如文献[14]采用发射接收指向性、交叉极化、射频吸收材料获得了约73.8 dB的合计被动干扰抑制性能,在多途环境下获得了45.9 dB的抑制效果。

对于两发射天线相差半个波长以使得接收天线处的2个干扰互相抵消的方法在无线电宽频带通信中难以适用,但是对于水声通信的单载波通信,有一定的参考价值,但要考虑不同情况下声速的影响,这为设备实现带来了困难。环形干扰抵消器效果良好,但会额外增加全双工水声通信系统的复杂度。而无线电耦合网络为全双工水声通信系统干扰抵消提供了重要的参考价值,在干扰信号成分已知的情况下,可根据声波频率建立声学耦合网络,获得较大被动干扰已知性能,同时降低被动干扰抵消难度,但该方法仅能对直达波进行抑制,由于水声信道更为复杂,且随着设备布置环境改变而改变,

且易受海底与海面的影响,因此可考虑将该技术应用用于直达声波抑制领域。

关于无线电通信系统中的极化问题,可近似看作为发射换能器与接收水听器旁瓣的相互影响,因此无线电中的交叉极化方法有一定借鉴作用,在完全了解发射换能器于接收水听器的发射指向性情况下,可通过布置策略将两者指向性正交化或交叉化,以降低干扰强度(目前已有单声源发射指向性换能器的相关研究成果与成品)。图2及图3所述的全双工水声通信机都利用矢量水听器零点抑制特性降低了接收到的自干扰信号强度。

在水声通信系统中,大衰减传播介质一般由吸声障板构成,障板上不同的孔径对应着不同吸收频率,如何在宽带通信系统中通过吸声障板与优化的布置策略优化实现最大程度的空间域干扰抑制是值得研究的课题。

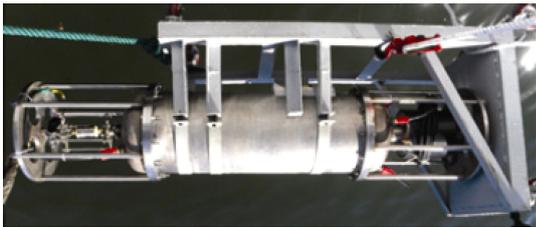


图2 频分全双工UWA通信机
Fig. 2 Frequency division full-duplex UWA communication set



图3 IBFD-UWA通信工程样机
Fig. 3 Prototype of IBFD-UWA communication set

3.2 传播域自干扰信道建模研究现状与难点问题分析

从已公开论文统计及研究经验来看,为了能够达到良好抵消效果(大于60 dB的干扰抵消),需要对相对幅度达到 10^{-3} ~ 10^{-4} 的信道抽头进行精准的估计,这不同于一些常规水声稀疏信道估计方法^[20],因为在稀疏信道估计理论中对于相对幅度极小(小于 10^{-3})的信道抽头会被省略。同时,考

虑到水声信道与无线电信道之间的差异性,本部分研究现状主要以已发表的全双工水声通信自干扰信道模型及测量结果为主。

文献[16]对自干扰信道传播信道及全双工水声通信系统结构进行了简化建模与仿真,并且给出了不同干扰信道抽头个数抵消后的残余干扰仿真结果,在对信道的10个抽头进行抵消后,残余干扰仍然高于接收机的噪声下限。

英国约克大学在 $38\text{ cm} \times 119\text{ cm} \times 42\text{ cm}$ 的塑料水箱中完成了自干扰信道的测量,给出了自干扰信道抽头幅度包络测量结果,该结果表明,在水箱侧壁及水面的影响下干扰信道持续时间大于100 ms^[21]。文献[22]对自干扰信道进行了海试测量,并对不同收发距离下的自干扰信号时长进行了测量,并对多途干扰的到达时延及多途强度进行了建模与拟合,测试结果表明,多途干扰经过200 ms的多次反射和传播后,强度下降近60 dB^[22]。文献[23]采用双声障板与双接收水听器进行辩证实验,研究结果表明近端接收端接收到的自干扰信号近72%的能量来源于自干扰信号的直达分量,因此针对自干扰信号直达部分的信道估计与抵消是极其重要的。

不同于上述研究假设与结论,2019年,本人所在科研团队考虑到在实际应用中,水声通信机壳体对自干扰传播信道的影响,关注于环路自干扰,在频域上对自干扰传播过程进行了有限元仿真,得到了通频带内不同子载波频率声波激励下壳体散射频域稳态解,并计算出相应的传播过程信道冲激响应,研究结果表明了自干扰信道的复杂性^[24]。

然而,上述文献,除科研团队发表的文献[12, 24]外,都对发射端到接收端这一短程信道进行了省略,但在实际应用中,发射换能器到接收换能器这一短程传播信道会受到通信机影响,形成复杂的传播过程。因此,有必要对发射换能器到接收换能器这一传播过程进行信道建模研究,以充分了解自干扰信号中能量较强的环路自干扰传播信道的特性,为后续各域自适应滤波器参数设置提供理论依据,以提高其他各域干扰抵消性能。

3.3 模拟域自干扰抵消研究现状与难点问题分析

常规的模拟干扰抵消方法主要分为如下几类:

1) 时域模拟自干扰抵消技术, 干扰信号由不同时延、不同幅度及不同相位的发射信号构成, 因此根据模拟干扰抵消器的抽头数目可分为单抽头干扰抵消及多抽头干扰抵消;

英国剑桥微软研究院对干扰信号能量进行了测量, 并在 LNA (Low noise preamplifier, 低噪声放大器) 之前通过时域模拟干扰抵消得到了 30 dB 的抵消效果^[25]。但该方法受限于多途环境的复杂度, 当多途成分较多, 且能量较大时, 单抽头干扰抵消性能较差。

美国英特尔公司提出了一种完全闭环的多途干扰抵消技术^[26], 完全在模拟域完成, 系统采用了基于最速下降的迭代估计算法, 来对不同延迟的信号进行相位旋转和幅度调节, 该方法可以在一定程度上抵抗相位噪声, 不需要而外的天线配置, 可应用于宽带信号, 并且其性能与发射链中的射频损耗无关, 实现了 2 GHz 载波频率, 10 MHz 带宽下的模拟干扰抵消, 得到了超过 25 dB 的干扰抵消效果。

2) 频域模拟自干扰抵消技术, 基本架构与时域模拟干扰抵消技术相类似, 但其成分不是衰减器与时延器构成, 其是由可调窄带滤波器、可变衰减器组成, 可以独立改变各子带滤波器的频率、相位相应, 与干扰信号的相应所匹配; 该方法的显著优势是, 独立抽头的模块可以被省略, 所以该方法可以简化模拟干扰抵消电路的复杂度。

3) 数字辅助式模拟干扰抵消方法, 其结构与时域、频域模拟自干扰抵消都不同, 这种技术可应对复杂信道、可具备较多的抽头数量、抽头幅度及时延自适应性。不同于以上 3 种方法, 其对干扰信号的抽头成分的计算和调整是在数字域完成的。与模拟域干扰抵消相比, 数字辅助可以提供对干扰信号中更多抽头的抑制。由数字域控制的延迟和幅度相位, 有效地提高了整体抵消器的灵活性。

芬兰坦佩雷理工大学针对自干扰信号中的非线性失真成分, 首先进行非线性失真建模, 利用 PA 输出通道信号作为参考信号, 构成相同抽头分

量、相位相反的消干扰信号, 在接收端 LNA 之前完成模拟域抵消。利用 3 阶非线性模型, 在 2 120 MHz 载波频率上实现了相比于线性模型下额外近 21 dB 的抵消效果, 在模拟域可以获得超过 35 dB 的抵消效果^[27]。

中国电子科技大学利用非线性模型下的信号代替本地参考信号, 采用两步信道估计算法 (非线性失真模型、传播信道)^[28], 在 7 阶非线性模型下获得了额外超过 20 dB 的模拟干扰抵消增益 (相比于发射端合计完成了 38 dB 的模拟干扰抵消性能)。需要指出的是, 该方法随着发射功率的变化, 抑制性能变化不超 3 dB。

根据现有文献, 可以得出结论, 即数字辅助模拟干扰抵消性能最佳, 但其增加了一定的设备复杂度, 由于全双工水声通信系统存在大时延、幅度衰落相较无线电较慢、信道结构复杂的特性, 所以仅单抽头模拟干扰抵消方法并不适用。同样的, 由于不同深度、不同海洋环境下的多途结构不同, 且易受海面波动、温度等因素的影响, 在如此剧烈的时变、空变的多途结构影响下, 固定式多抽头模拟干扰抵消有着极大的局限性, 即使在有参考信号的基础上, 仍然需要对参考信号进行一定的处理, 以在最大程度上模拟接收端接收到的干扰信号, 从而降低强自干扰。由于发射端信号需要经过功率放大器与换能器才能发出可在水下传播的高功率信号, 并且功率放大器与换能器都具有一定非线性失真, 因此, 除了自干扰信号的传播信道影响外, 还要考虑功率放大器的失真与换能器对不同频率信号的发送电压响应曲线变化, 除此之外还需考虑海面、海底反射信号的影响。

为了能够适用复杂多变的多途信道环境, 数字辅助模拟干扰抵消更适用于 IBFD-UWA 通信系统中。由于适用于低频宽带发射换能器的功放 (特别是 D 类或 T 类功放) 具有较大的非线性失真分量, 同时考虑到全双工水声通信系统近端干扰信道复杂特性, 因此, 有 2 种途径可作参考。

1) 针对非线性失真分量, 采用 PA 通道后续信号作为参考信号 (结合直接耦合方法), 先进行模型估计, 而后在 IBFD-UWA 通信系统中, 对传

播过程中的多途结构进行较为精准的测量,同时以此作为先验知识,以获得更适用于 IBFD-UWA 通信系统、更具效率的模拟干扰抵消效果。其区别在于,进一步地降低了数字辅助过程的复杂度,提高了数字辅助式模拟干扰抵消的调整效率。

2) 可通过含有衰减器的辅助链路获得功放输出信号,引入到数字域内,以求得较为精准的功放非线性模型,在获得非线性失真模型的基础上,对发射信号进行预失真补偿处理,使其通过功放后的非线性失真减弱,再采用功放通道后续信号作为参考信号,可以获得降低了非线性失真影响的模拟干扰抵消效果。

以上 2 种途径的区别在于对非线性失真成分的处理的步骤,及非线性失真成分获取来源。

3.4 数字域自干扰抵消研究现状与难点问题分析

一般地,完成传播域干扰信道建模及模拟自干扰抵消后,绝大部分自干扰信号线性分量已经得到抵消,但其能量仍远大于期望信号。此时,残余信号的成分包括但不限于:直达抵消残余分量、多途抵消残余分量、发射机噪声抵消残余分量及非线性影响残余分量。而针对上述分量,可对数字域自干扰抵消研究内容进行简要分类,即

1) 线性信道模型。

美国斯坦福大学提出了一种利用 LS 算法估计信道的数字自干扰抵消方案,可以得到 20 dB 的抵消效果,实验结果表明该方案可以实现实时自干扰抵消^[29]。

2) 参考信号辅助型。

文献[21]采用 PA 输出通道信号作为参考信号,采用 RLS-DCD (dichotomous coordinate descent) 算法,其收敛速度与经典 RLS 的算法近似,数值稳定且复杂度低,适合设备实现。实验表明,当采用 PA 输出通道信号作为参考信号时,可以获得额外 23 dB 的干扰信号抑制性能,并且指出,除功放外的非线性失真分量对该方法产生了限制作用(前置放大器等)。芬兰坦佩雷理工大学以 PA 输出通道信号作为参考信号,结合非线性信道模型,获得了额外 20 dB 的干扰抑制效果^[30]。

3) 非线性信道模型。

芬兰坦佩雷理工大学提出一种新颖的广泛线

性数字自干扰消除处理办法,利用广泛线性最小二乘参数估计和广泛线性数字抵消,达到最大 58 dB 的数字自干扰抵消效果,显著提高了全双工通信机的性能^[31]。

阿根廷国立南方大学通过预失真处理,使 PA 的非线性特性线性化,使其能够在其省电区域内工作,并具有适度的带外失真,采用 Wiener-Hammerstein 模型来表示 PA 失真及自干扰信号信道,这种方法不需要额外的辅助模拟发射信号来估计 PA 的响应,而采用自干扰信号来进行估计。采用两步式算法,首先通过低峰均比训练序列来估计线性分量,第 2 步识别额外的非线性分量及线性分量^[32]。

本人所在科研团队于 2018 年提出了一种异步 IBFD-UWA 系统的数字自干扰抵消算法^[33],实验证明基于 OP-RLS 算法的数字自干扰抵消技术可以有效消除由功放引起的非线性失真,提高水下网络频谱效率。同年,本团队提出一种具有稀疏约束的 ML 算法来实现稀疏自干扰信道的数字干扰抵消^[34],文献中对该方法进行仿真和实验验证,得到最大 43 dB 的数字自干扰抵消效果,较 LS 算法相比收敛更快、抵消效果更好。

4) 接收数字波束形成技术。

美国哥伦比亚大学提出了一种适用于 MIMO 系统 (2*2) 的数字波束形成技术,该技术同样适用于全双工通信领域^[35]。此外还提出了一种频率平移的任意空间滤波技术^[36],可以在基带产生任意空间频率响应,为后续的模数转换器提供保护防止饱和现象的发生。

根据现有文献,可以得出结论,即数字干扰抵消需考虑 PA 非线性失真、残余分量信道建模、相位噪声、量化噪声等问题。在 IBFD-UWA 通信系统中,还需考虑其他器件如前置放大器等因素的非线性成分。因此,如果想最大程度提高数字干扰抵消效果,需考虑以上所有因素在内,减少限制项。

从“模拟+数字”干扰抵消的整体上看,部分参考文献指出,若模拟干扰抵消效果过好,会导致数字干扰抵消性能的下降,分析可知,这种结果是 2 个方面原因造成的: 1) 残余信号的能量已经过低,导致信道估计结果不准确; 2) 残余信号与参

考信号已存在较大差异, 出现匹配失真现象, 以参考信号进行残余干扰信号信道建模无法得到精准的信道估计结果。因此, 在模拟域干扰抵消的基础上, 且保证期望信号解调所需信噪比的情况下, 如何保证残余带内干扰信道估计的准确性, 进而提高数字域干扰抵消性能, 是需要解决的关键问题。

4 IBFD-UWA 通信技术研究展望

虽然无线全双工通信技术对全双工水声通信技术具有极高的参考价值 and 借鉴作用, 但由于水声通信系统与无线电通信系统在载波频率、信道复杂度、设备器件影响等方面存在较大差别, 如相位噪声影响极其有限, 自干扰信道特征不同, 无法采用天线干扰抵消等。同时, 由于水声信道存在时变效应, 特别是海面起伏等因素的影响下, 需对自干扰信道进行重新估计以保证干扰抵消性能。

在此, 基于上述研究现状与难点问题分析, 对 IBFD-UWA 通信技术研究发展进行展望, 提出部分研究方向:

1) IBFD-UWA 通信机壳体设计与接收端布放策略, 通过对壳体结构等参数的设计以实现最佳的环路自干扰抑制, 以降低后续模拟域、数字域自干扰抵消压力;

2) 结合声场特性与吸声材料, 最大化的实现发射端与近端接收端的隔离;

3) 以接收阵列为基础, 结合波束成形技术, 实现对干扰信号强度的抑制与远端期望信号信噪比的增强;

4) 进一步研究功率放大器、前置放大器、衰减器、减法器对模拟域自干扰抵消的影响, 以研究结果为基础, 进一步克服硬件性能限制的影响实现高效模拟自干扰抵消;

5) 研究浅海环境快速时变信道下的数字域自干扰抵消算法, 提高自适应滤波器权值系数跟踪速度;

6) 紧密贴合硬件条件与限制, 平衡模拟域与数字域间的关系, 并进一步结合实际工程应用场景下的信道特征, 以在实际环境中获得最佳的自干扰抵消性能。

5 结束语

IBFD-UWA 通信技术可显著提高频谱利用率, 并可大幅提高水声通信与网络性能, 该项技术在军用及民用领域都具备着广阔的发展前景与极高的应用价值。而目前, 公开的报道及文献中尚未出现可实现公里级 IBFD-UWA 通信的工程样机与技术, 因此 IBFD-UWA 通信技术尚不具备实际应用的条件, 但在研究过程中的一些成果可应用于连续干扰消除、多径干扰抵消等方面。

在最终实现 IBFD-UWA 通信的道路上仍将存在诸多本文未提及之难题, 但以目前发展情况来看, 未来几年内必将实现公里级 IBFD-UWA 通信, 而其在工程上的应用, 将为水下信息传输网络性能带来飞跃的提升。

参考文献

- [1] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370 (1958): 158-175.
- [2] FELEMBAN E, SHAIKH F K, QURESHI U M, et al. Under-water sensor network applications: A comprehensive survey[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11 (11): 1-14.
- [3] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization[J]. IEEE communications magazine, 2009, 47 (1): 84-89.
- [4] LI Y, SUN L, ZHAO C, et al. A digital self-interference cancellation algorithm based on spectral estimation in co-time co-frequency full duplex system[C]//2015 10th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). US: IEEE, 2015.
- [5] RADUNOVIC B, GUNAWARDENA D, KEY P, et al. Rethinking indoor wireless mesh design: Low power, low frequency, full-duplex[C]//2010 Fifth IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. US: IEEE, 2010.
- [6] KOLODZIEJ K E, PERRY B T, HERD J S. In-band full-duplex technology: techniques and systems

- survey[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67 (7): 3025-3041.
- [7] CHEN S, BEACH M A, MCGEEHAN J P. Division-free duplex for wireless applications[J]. Electronics Letters, 1998, 34 (2): 147-148.
- [8] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication [C]// Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking. US: IEEE, 2010.
- [9] DUARTE M, SABHARWAL A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results[C]//Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on. US: IEEE, 2010.
- [10] ZHANG Z, SHEN Y, SHAO S, et al. Full duplex 2×2 MIMO radios[C]//2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). US: IEEE, 2014.
- [11] QIAO G, LIU S, SUN Z, et al. Full-duplex, multi-user and parameter reconfigurable underwater acoustic communication modem[C]//2013 OCEANS-San Diego. US: IEEE, 2013.
- [12] ZHAO Y, QIAO G, LIU S, et al. Self-interference channel modeling for in-band full-duplex underwater acoustic modem[J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107687.
- [13] DUARTE M, DICK C, SABHARWAL A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11 (12): 4296-4307.
- [14] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A, Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (2): 680-694.
- [15] HANEDA K, KAHRA E, WYNE S, et al. Measurement of loop-back interference channels for outdoor-to-indoor full-duplex radio relays[C]//Proceedings of the fourth European Conference on Antennas and Propagation. US: IEEE, 2010.
- [16] LI L, SONG A, CIMINI L J, et al. Interference cancellation in in-band full-duplex underwater acoustic systems[C]//Oceans 2015-MTS/IEEE. Washington : IEEE, 2015.
- [17] VENKATASUBRAMANIAN S N, LI L, LEHTOVUORI A, et al. Impact of using resistive elements for wideband isolation improvement[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 65 (1): 52-62.
- [18] NAWAZ H, TEKIN I. Three dual polarized 2.4 GHz microstrip patch antennas for active antenna and in-band full duplex applications[C]//2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). US: IEEE, 2016.
- [19] CACCIOLA R, HOLZMAN E, CARPENTER L, et al. Impact of transmit interference on receive sensitivity in a bi-static active array system[C]//2016 IEEE International Symposium on Phased Array System and Technology (PAST). US: IEEE, 2016.
- [20] STOJANOVIC M. OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation [C]//2008 IEEE International Conference on Acoustics , Speech and Signal Processing. US: IEEE, 2008.
- [21] SHEN L, HENSON B, ZAKHAROV Y, et al. Digital Self-Interference Cancellation for Full-Duplex Underwater Acoustic Systems[J]. Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019. 67 (1): 192-196.
- [22] JEBUR B A, HEALY C T, TSIMENIDIS C C, et al. In-band full-duplex interference for underwater acoustic communication systems[C]//OCEANS 2019-Marseille. Marseille: IEEE, 2019.
- [23] TOWLIAT M, GUO Z, CIMINI L J, et al. Self-interference channel characterization in underwater acoustic in-band full-duplex communications using OFDM[J]. arXiv preprint arXiv, 2005, 10933, 2020.
- [24] QIAO G, ZHAO Y, LIU S, et al. The effect of acoustic-shell coupling on near-end self-interference signal of in-band full-duplex underwater acoustic communication modem[C]//2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). US: IEEE, 2020.
- [25] RADUNOVIC B, GUANWARDENA D, KEY P, et al. Rethinking indoor wireless mesh design: Low power, low frequency , full-duplex[C]//2010 5th IEEE Workshop Wireless Mesh Network. US: IEEE, 2010.
- [26] CHOI Y S , SHIRANI-MEHR H. Simultaneous Transmission and Reception: Algorithm, Design and System Level Performance[J]. IEEE Transactions on

- Wireless Communications, 2013, 12(12): 5992-6010.
- [27] KIAYANI A, ANTTILA L, VALKAMA M. Active RF cancellation of nonlinear TX leakage in FDD transceivers[C]//2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). US: IEEE, 2016.
- [28] LIU Y, QUAN X, PAN W, et al. Digitally assisted analog interference cancellation for in-band full-duplex radios[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(5): 1079-1082.
- [29] JAIN M, CHOI J I, KIM T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[C]//Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking. US: IEEE, 2011.
- [30] ANTTILA L, KORPI D, SYRJÄLÄ V, et al. Cancellation of power amplifier induced nonlinear self-interference in full-duplex transceivers[C]//2013 Asilomar conference on signals, systems and computers. US: IEEE, 2013.
- [31] KORPI D, ANTTILA L, SYRJALA V, et al. Widely linear digital self-interference cancellation in direct-conversion full-duplex transceiver[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9): 1674-1687.
- [32] GREGORIO F H, GONZÁLEZ G J, COUSSEAU J, et al. Predistortion for power amplifier linearization in full-duplex transceivers without extra RF chain[C]//2017 IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Process. (ICASSP). US: IEEE, 2017.
- [33] QIAO G, GAN S, LIU S, et al. Digital self-interference cancellation for asynchronous in-band full-duplex underwater acoustic communication[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1700.
- [34] QIAO G, GAN S, LIU S, et al. Self-Interference channel estimation algorithm based on maximum-likelihood estimator in in-band full-duplex underwater acoustic communication system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 62324-62334.
- [35] KRISHNASWAMY H, ZHANG L. Analog and RF interference mitigation for integrated MIMO receiver arrays[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 561-575.
- [36] ZHANG L, KRISHNASWAMY H. Arbitrary analog/RF spatial filtering for digital MIMO receiver arrays[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(12): 3392-3404.

(责任编辑: 李晓东)