

水下传感器网络系统架构与体系结构研究

郑君杰^{1,2} 李延斌³ 尹路⁴ 马金钢¹ 王洪涛¹

(解放军理工大学 南京 211101)¹ (解放军国际关系学院 南京 210039)²

(陆军航空兵学院 北京 100011)³ (61741 部队 北京 100010)⁴

摘要 针对水下传感器网络的现实需求,构建了水下传感器网络的应用场景,提出了高密度水下三维传感器网络的全新概念。结合水下传感器网络的应用,基于陆上传感器网络的体系结构,设计了水下传感器网络的体系结构,对该体系结构各层的功能进行了深入分析。提出一种基于深度信息与能量均衡的水下路由协议,该协议利用节点的深度信息就可以完成数据的有效转发,节点间通信量极少;并设计了协议的算法,提出了空洞处理对策。

关键词 水下传感器网络,系统架构,体系结构,路由协议

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Research of Structure and Architecture for Underwater Sensor Networks

ZHENG Jun-jie^{1,2} LI Yan-bin³ YIN Lu⁴ MA Jin-gang¹ WANG Hong-tao¹

(Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)¹

(Nanjing University of International Relations, Nanjing 210039, China)²

(Army Aviation School, Beijing 100011, China)³ (Troops 61741 of PLA, Beijing 100010, China)⁴

Abstract The requirement objectives of underwater sensor networks(UWSN) was firstly analyzed, then the application scene of UWSN was constructed. Based on the architecture of WSN, a new kind of architecture for UWSN was designed and the function of every layer was explained in detail. In order to overcome the shortcoming of existing research of routing protocol for UWSN, a new routing protocol based on depth and residual energy was designed which does not require full-dimensional location information, instead, it need only local depth information. The routing arithmetic was designed and the solving method for inanition was presented.

Keywords Underwater sensor network, Structure, Architecture, Routing protocol

1 引言

无线传感器网络是由密集型、低成本、随机分布的集成有传感器、数据处理单元和短程无线通信模块的微小节点通过自组织方式构成的网络,借助节点中内置的形式多样的传感器实现对现实世界全方位的监测与控制,是下一代互联网远景规划的重要组成部分。无线传感器网络的自组织性和密集节点提供的容错能力使其不会因为某些节点的异常而导致整个系统的崩溃,非常适合在特殊时刻、特殊环境中快速构建信息基础设施,因此有广阔的应用前景。2003年2月,麻省理工大学主办的非营利性技术评论杂志将传感器网络总结为改变未来世界的十种新兴技术之一^[1]。

由于其成本低、隐蔽性好、灵敏度高、可分布式部署、可覆盖范围大等诸多优点,无线传感器网络出现后不久便受到了各国海洋界和军方的青睐,其研究和应用领域已经扩展到了海洋,如为配合“网络中心战”以及美国海军“近海战场空间优势”概念的提出,1998年美国海军研究局和空海战系统中心开始主持构建了水下无线局域网 Seaweb^[2]。除此之外,近年来日本、英国、澳大利亚、德国等国也一直致力于水下传感器

网络相关技术的研究。

水下传感器网络的重要性也已经引起了我国的高度重视,国家863计划和国家自然科学基金相继资助了水下传感器网络的相关研究。哈尔滨工程大学、西北工业大学航海学院、厦门大学、国家海洋中心、中国科学院声学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、南京邮电大学、中国海洋等单位针对水下传感器网络的系统结构、水下定位、水声通信等研究领域开展了大量基础研究,取得了很大的成果,并有小规模海洋传感器网络投入试验运行^[3-8]。

2 系统架构

2.1 水下节点类型与构造

目前水下传感器网络主要由水底节点、水中悬浮节点、自移动节点和水面转发节点4类组成,每个节点在网络中既是数据的采集者,也是数据的转发者,节点通常包括数据采集、数据处理、数据通信和电源4个基本模块。众所周知,电磁波在水下的衰减很大,难以满足远距离水下通信的要求,声波是唯一一种能在水介质中进行长距离传输的能量形式,因此水声通信是目前最合适的水下组网通信方式。水下节点搭载水

本文受江苏省自然科学基金(SBK2010129, SBK2011124),解放军理工大学气象海洋学院基础理论基金,解放军理工大学预先研究基金(KYQY-ZLXY1205),中国博士后基金(2012M512074)资助。

郑君杰(1977-),男,博士,讲师,主要研究方向为水下传感器网络, E-mail: oldwolf0411@126.com。

声换能器,水面转发节点搭载水声换能器和无线通信设备,水下节点间、水下节点与水面转发节点间使用水声通信技术进行数据传输,水面转发节点通过无线方式与陆地控制中心间进行数据传输。

其中水底节点布放于水底,布放后不再移动;水中悬浮节点依靠水面浮力装置或者锚系的方式悬浮在海水中,其位置受洋流等外力扰动会有较大幅度改变,但其稳定后所在的水平面基本不变;自移动节点具有水下自主移动能力,能够按照预先设定的指令进行位移,如可借鉴 ARGO 浮标,设计沉浮系统使其可以在水下上升或者下潜,安装动力装置可使其可以在水平运动;水面转发节点可以使用锚系的方式固定,也可以在有需求的时候临时采用空投或者行船的方式布放。

上述 4 种类型的水下传感器网络节点和 AUV、水面观测仪器、海床基观测平台等各类海洋观测仪器将构成全方位的海洋环境立体观测探测系统。

2.2 水下三维传感器网络的需求分析

可以预见水下传感器网络将在我国海洋探测、环境保护、水下安保、反潜等民用和军事领域发挥越来越重要的作用,在这些应用领域水下传感器网络需要满足如下需求:

①具有自组织能力。传感器网络的重要特征之一是自我组织、自我愈合。水下传感器网络的应用环境极为恶劣,传感器节点会受到海浪、海风等各类外力影响而发生位置迁移,甚至可能遭受毁坏,而单个节点的失效可能导致整个网络的不可用,且节点基本上无回收修理的可能,所以自愈合、自组织能力是水下传感器网络必备的要素。

②能保证数据的可靠传输。海洋环境中采用水声通信方式,这与无线电波在空中传播有显著的不同。在水下水声信号的衰减比较大,通信信道带宽低,多径效应严重,时延较高且动态变化,导致水声通信的传输误码率较高,因此需要在传感器网络的设计中考虑数据的可靠传输。

③具有异构组网能力。海洋环境监测中仅仅依靠水下传感器网络的节点难以获得全面的监测数据,这就要求网络具有异构能力,可以有效扩展而不需要进行系统架构的改动,可以方便地与其它探测仪器如水面传感器、海床基平台、AUV 等相结合,构成一个更大的立体观测系统,只需将外接设备加装相应的模块即可。

④能够长时间水下自持。水下传感器网络节点目前只能使用电池进行供电,且由于水下节点基本上是一次性使用,无法维修更新,单个节点能量耗尽可能会导致整个网络的失效,因此节省能量是其面临的首要问题。水下传感器网络的绝大部分能量消耗于通信传输环节,换能器在发射时的功率远超接收与静默时的功率,需要设计节能的工作机制与网络传输协议。

2.3 应用场景

目前国内外现有水下传感器网络的应用研究主要存在水下节点密度过低、节点间距过大等问题,如美军 Seaweb 网络目前仅有 17 个节点在运行,这就带来如下几个问题:第一,海洋监测等实际应用要求获得高分辨率、大尺度的水下环境信息,低密度的水下节点分布显然无法满足这样的需求,仅仅起到转发的作用;第二,过低的节点密度无法满足网络自我愈合的需求,个别关键节点失效后没有备用节点代替;第三,水声通信是目前也是将来唯一有效的水下网络通信手段,但是声

波在水下的传播速度只有每秒 1500 米,远远低于陆上无线电波的传播速度。因此陆上无线通信不需要考虑的问题如延时等在水下通信中必须要加以重视,需要重新设计新的网络协议,特别是路由协议。

针对上述不足,笔者提出高密度水下三维传感器网络的全新概念,其核心思想是水下传感器网络由大量体积微小、价格低廉、搭载微型水声通信模块的节点组成,节点水下密度较大,间距小于 100 米,以利于减少传输延时带来的不利影响,进而减少网络传输协议的复杂性。这些节点无锚悬浮在水下各个深度构成水下三维网络,用于执行各种水下任务,如海洋环境监测、灾害预警等。

结合上述应用分析,我们构建了水下传感器网络的水下应用场景。在实际应用中,笔者认为水下节点由于成本的原因其密度将远低于陆上传感器网络,因此节点在水下无需分簇,可有效减少通信量。由于水下传感器节点采集到的数据最终要被转发到水面转发节点,因此只需考虑数据的向上传输。为解决数据转发方向的不确定性,可以设置多个水面转发节点,显然只要探测数据向上到达任意一个水面转发节点就都可以被转发到陆地控制中心,由此可以大大减少通信量,简化路由协议,如图 1 所示。水面转发节点可以采用短波、卫星、流星余迹等多种通信技术传回探测数据。我国北斗卫星定位系统的终端具有低速率数据传输功能,完全可以满足海洋探测信息的传输^[9],另外在沿海岸 200 公里以内有蜂窝移动通信信号的海域可以使用 CDMA 和 GPRS 终端进行数据转发,技术可靠,成本低廉。

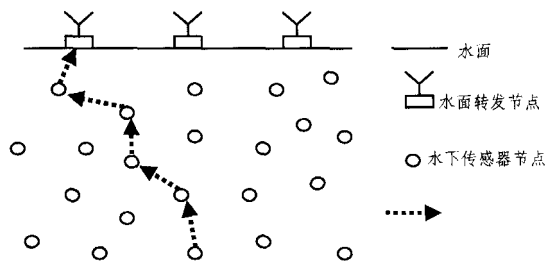


图 1 高密度水下传感器网络应用场景

3 水下传感器网络体系结构设计

当前学术界较为认同的传感器网络协议通常由物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层组成,其每层功能与互联网结构的对应层相似。除此之外,传感器体系结构中还应配以能量管理、移动管理、定位技术等功能模块。目前学术界对水下传感器网络的分层主要有两种划分方法,一种是划分为 3 层结构:物理层、数据链路层和网络层^[10];另一种是划分为 5 层结构,其是在 3 层结构上再加上运输层和网络层^[11]。

本文结合水下传感器网络的任务需求,借鉴陆上传感器网络的体系结构,设计了水下传感器网络的体系结构。水下传感器网络的主要目的是数据获取和区域监视,节点的处理能力都非常有限,数据最终要通过水面转发节点发送到陆地上的控制中心,由控制中心完成数据的处理与各种应用,因此运输层和应用层的功能如数据流的传输控制、应用等可以弱化,并交由节点的硬件和控制中心来完成。新的体系结构如图 2 所示,各层功能分别如下。

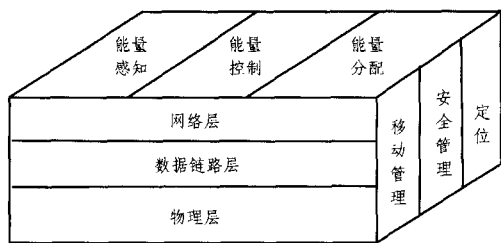


图2 水下传感器网络体系结构

1. 物理层。物理层的主要任务是透明传送二进制的比特流,功能包括信道的区分与选择、水声信号的监测、调制和解调等。由于水下通信环境极为恶劣,使得传输链路上的每带宽容量很低,因此物理层的设计目标是以相对低的能量消耗获得较大的链路容量。目前在水声通信中正交频分复用引起了广泛关注,为了获得较高的性能,相干通信是近年来的研究热点,多载波相移键控是一种综合的调制方式,可以显著提高通信系统的数据传输速率,提高接收信噪比,降低误码率。

2. 数据链路层。数据链路层负责在两个相邻节点间无差错地传送数据帧,以实现媒体访问和差错控制,协调节点对通信媒体的访问,减少相邻节点广播时的冲突,保证传感器网络内点到点和点到多点的连接。设计目标是使每个水下节点都尽可能公平、有效地分享带宽资源,同时使占用的时延尽可能小,消耗的能量尽可能少。

3. 网络层。网络层的任务是选择合适的路由信息,确定和分发源节点和目的节点之间的路由搜索和维护信息。水下传感器网络的节点能量极其有限且只能一次性使用,通信带宽也极为有限,因此路由协议的设计好坏对网络生存时间有很大影响。

该体系结构顶部包含了能量感知、能量控制和能量分配3个切面。(1)能量感知面,负责感知节点当前的剩余能量,该功能通过硬件实现,可随时实现剩余能量的监控;(2)能量控制面,负责对当前拓扑进行调整和修复,其执行可以是定期或触发式;(3)能量分配面,根据节点的剩余能量通过相应算法决定该节点是否参加数据转发。

体系结构右侧面有3个纵向切面,分别完成移动管理、安全管理和定位功能。(1)移动管理面,负责发现并注册各个节点的移动状况,修复受损的拓扑结构,触发路由的调整和优化进程;(2)安全管理面,主要负责应对网络层上对路由机制的恶意攻击,采用接入认证方式发现和识别入侵节点并报警,拒绝入侵节点的错误数据,提高数据的可靠性;(3)定位面负责提供自身和邻居节点的位置信息,服务于拓扑控制、路由等,目前在水下主要使用相应算法结算位置信息。

4 基于深度信息的路由机制

现有的水下传感器网络路由协议研究仍属于地理路由协议,如VBF及其改进等^[12]。尽管地理路由协议效率较高,代价小,但是其前提是需要知道各个水下节点的三维位置信息,这也是一个巨大的研究挑战,迄今仍无突破性的进展,同时定位算法需要各个节点定期交换路由信息,此方法带来的巨大的通信量是水下传感器网络无法承受的。

在实际的水下组网应用当中,水下传感器节点采集到的数据最终要被转发到水面转发节点。如图1所示,我们注意到随着数据的转发,其所经过的转发节点的深度将越来越小,直至到达水面,相比于水下三维位置信息,水下传感器节点深度信息的获取极为简单,只需要在节点上安装价格低廉的深

度传感器即可。基于此原理,在第2节提出的高密度水下传感器网络的基础上,提出一种基于水下深度信息的路由协议,该协议的基本思想是数据包同时存储有转发节点的深度信息并且随着每一跳进行更新。当节点接收到数据后,将其携带的深度信息与自身的深度进行对比,如果其来自更深节点,则结合自身剩余能量的多少来决定是否转发该数据,否则将其抛弃,以此类推,辅以相应的转发策略,直至将数据转发到水面转发节点。和现有水下传感器网络路由协议相比,该方法不需要节点知道其自身以及其它节点的三维位置信息,因此节点间信息交换量极少,可以显著减少通信量,能有效应对网络拓扑的动态变化,进而达到节省能量延长网络生存时间的目的。

该协议数据包转发算法的基本原理可以通过图3来进行说明。

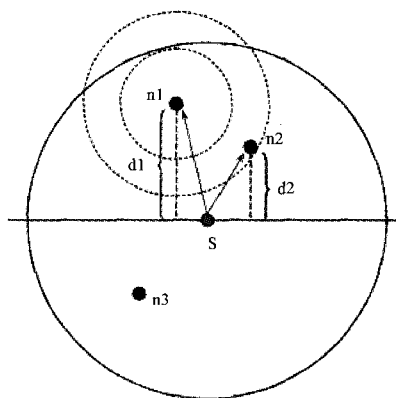


图3 路由算法基本原理示意图

图中红色节点S为数据源节点,蓝色的 n_1 , n_2 和黑色的 n_3 都为一跳范围内的邻居节点, d_1 代表 n_1 距S平面的垂直距离, d_2 代表 n_2 距S平面的垂直距离。最外圈实线大圆代表S的转发半径,位于该半径内的节点都能收到其发出的数据。 n_3 的深度大于S,因此被禁止参与数据转发。显然 n_1 的深度最浅,距离水面最近,因此 n_1 是最理想的下一条节点,而 n_2 的转发需要被禁止。

水下数据转发不可避免会遇到空洞,以图4为例,蓝色节点收到数据后向上没有转发节点,其上部区域定义为空洞。在此情况下需要重构路由。有两种策略可以解决:一是将数据退回上一个节点再执行路由算法,如果仍然遇到空洞,则再退回更上一个节点继续执行该算法,直到数据被顺利转发;二是将数据直接转发到其通信范围内的其它更深节点再执行转发算法,直至将数据送到水面。

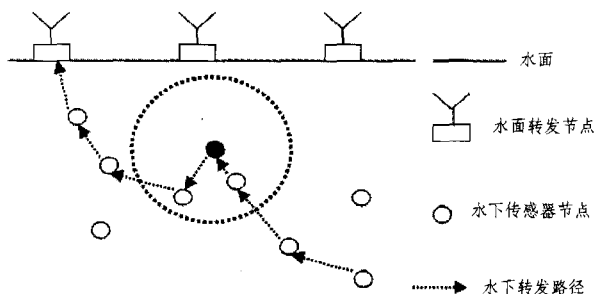


图4 空洞示意图

结束语 水下传感器网络在组网方式、通信模式、系统架构、体系结构等方面与陆上传感器网络具有很大差异,也有别于传统意义上的自组织网络,因此水下传感器网络的系统

架构和体系结构必须赋予新的内涵和外延,以适应需求的变化。本文以海洋环境探测的实际应用为主线进行需求分析,设计了系统架构,提出了高密度水下传感器网络的概念。在现有研究的基础上提出了一种新的水下传感器网络体系结构,对各层和各模块功能进行了详细阐述。设计了一种新的路由机制,该机制简单易行,能量有效,可以有效节省节点能量,延长网络生存时间。

参考文献

[1] <http://www.globalfuture.com/mit-trends2003.htm>
 [2] Rice J. Enabling Undersea FORCEnet with Seaweb Acoustic Networks[C]//Biennial Review 2003,SSC San Diego TD 3155. December 2003;174-180
 [3] 李彦,罗续业.海洋监测传感器网络概念与应用探讨[J].海洋技术,2006,25(4):34-38
 [4] Zheng Jun-Jie. A Effective Submarine Detection Technology: Underwater Sensor Networks[C]//2011 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security. 2011(12):417-421
 [5] 郑君杰,姚春富.基于水下传感器网络的海洋探测系统关键技术

研究[J].国际关系学院学报,2011(10)
 [6] 金军,纵芳,梁妙元,等.水下传感器网络路由协议研究[J].电信科学,2012,28(2):123-125
 [7] 朱昌平,等.水声通信[M].北京:电子工业出版社,2009:270-275
 [8] 郭忠文,罗汉江.水下无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2010,47(3):377-389
 [9] 雷昌有,蒋英.北斗卫星通信在水情自动测报系统中的研究与应用[J].水利水电快报,2005(21):26-28
 [10] 朱昌平,等.水声通信[M].北京:电子工业出版社,2009:280-281
 [11] 刘林峰,刘业.面向海洋场景的无线传感器网络体系结构模型研究[J].计算机科学,2010,37(10):744-77
 [12] Xie P, Cui J H, Lao L. VBF: Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks[C]//UbiNet-TRD5-03. Connecticut: University of Connecticut, Computer Science and Engineering, 2006
 [13] Nicolaou N C, See A G, Xie P, et al. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks[C]//Proc of IEEE OCEANS 2007. Piscataway, NJ: IEEE, 2007

(上接第 231 页)

```

MAC Management Message, RNG-RSP (5)
MAC Management Message Type: 5
Reserved: 0
Ranging status: success (3)
TLV type: 4
TLV length: 1
TLV value: Ranging status (0x03)
Ranging status: success (3)
POWER Level Adjust (1 byte(s))
TLV type: 2
TLV length: 1
TLV value: Power Level Adjust (1 byte(s)) (0xf7)
Power Level Adjust: -2.25 dB
CRC: 0x178c0750
    
```

图 16 RNG_RSP 消息

```

Message Notice ipc message process, type 1
Message Debug ipcMsgProcess, type 1
MAC-HQ Debug SrvHo::Timer T205 MD NBR ADV timeout for sector=0
MAC-HQ Info SrvHo module: trigger to send MCR NBR ADV, but active nbr he doesn't exist!!
DSP CORE2 Info Sym/1 Code detected Num 1, code=10, timing=3, power=-40, status=-2.25 FN=8
DSP CORE2 Info LMR print: gsmExpectedPwrH:431, uscarrelPwr:460,LMR print END FN:7013c
MAC-CTRLSIG Info Rev Initial Ranging Code#Frame 0x81a3 (SectorId=0 Code=10 Status=3
MAC-INITENF Info Succeed to send OMA Msg RNG_RSP to SS(FrameNbr=0x81a3,SectorId=0,CID=0)
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to start timer TProcRngRsp.
MAC-INITENF Debug Succeed to process the initial ranging code indication with code idx 7 and
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to send CDMA Allocation request!
MAC-CTRLSIG Notice Receive msg SIG_RNG_REQ successfully,frm 0x00091ad.
MAC-CTRLSIG Notice Msg SIG_RNG_REQ has been forwarded to BsInitEntry successfully.
MAC-CFSCtrl Info Rev OMA Msg RNG_REQ from SS(FrameNbr=0x81ad,SectorId=0,CID=0)
MAC-INITENF Debug Enter init_ProcMgtMsg with CID 0 and type#1.
MAC-INITENF Info BsInitEntry:Succeed to parse RNG_REQ message(Mac Addr=0x64:4b:c3:60:9:23 and
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to allocate BCID=1 for Ms(Mac Addr=0x64:4b:c3:60:9:
MAC-CFSCtrl Notice Bs entry , info as following: Bcid(1) and sector(0) and Mac (0x64:4b:c3
MAC-INITENF Debug Succeed to send MSG_MS_ENTER_LEAVE_LMD to ME! [000081ad]
MAC-HQ Info BsInitEntry: This Ms(mac address=0x64:4b:c3:60:9:23 and bcid=1) enters network
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to generate the RNG_RSP message(Msg Addr=0x64:4b:c3:60:9:23)
MAC-INITENF Info Succeed to send OMA Msg RNG_RSP to SS(FrameNbr=0x81ad,SectorId=0,MacAdd=2
MAC-INITENF Debug Succeed to send SS_ENTRYSTART_LMD to ME for BCID 1
MAC-INITENF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer T9(bcid=1).
MAC-INITENF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer SS_ULSH_LMD for SS with BCID 1.
MAC-INITENF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer ErrorStat(bcid=1).
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to process the management message!
DSP CORE2 Info Sym2 Code detected Num 1, code=39, timing=0(to MAC:0), power=-10, status:3
MAC-CTRLSIG Info BsCtrlSignal receives msg SIG_SBC_REQ successfully,frm 0x0081c0.
MAC-CTRLSIG Notice Msg SIG_SBC_REQ has been forwarded to BsInitEntry successfully.
MAC-CFSCtrl Info Rev OMA Msg SBC_REQ from SS(FrameNbr=0x81c0,SectorId=0,CID=1)
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to get an related entry in RCV_SSStatusTable
MAC-INITENF Debug Enter init_ProcMgtMsg with CID 1 and type#6.
MAC-INITENF Debug SIG_SBC_REQ message of 76 bytes has been generated!
MAC-INITENF Info Succeed to send OMA Msg SBC_RSP to SS(FrameNbr=0x81c0,SectorId=0,CID=1)
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to cancel timer T9(bcid=1)!
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to start timer T17 upon reception of SIG_SBC_REQ(bcid
MAC-INITENF Debug BsInitEntry: Succeed to configure default Service Flow for the SS with BC
MAC-INITENF Debug BsInitEntry:Succeed to process the management message!
DSP CORE2 Info Sym2 Code detected Num 2, code=36, timing=0(to MAC:0), power=-23, status:3
MAC-CTRLSIG Notice BsCtrlSignal receives msg SIG_REQ_REQ successfully,frm 0x0081d3.
    
```

图 17 BS、SS 交互消息

从图 17 中可看到 SS 接入后进行初始测距和周期测距的交互信息,其与 IEEE802.16e 标准相一致,由此验证了测距功能的正确性。

结束语 针对 802.16e 通信协议的上行链路,本文分析了 IEEE802.16e 标准中测距技术原理,包括测距码的产生、发送、以及检测等;给出了上行基站测距码的检测处理的各个功能单元的具体实现算法流程,如测距码、功率检测和时延估计的设计流程。最后,利用 DSP 完成了上行测距处理的实现。

参考文献

[1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems[S]. May 2009, 29
 [2] Mahmoud H A, Arslan H, Ozdemir M K. Initial Ranging for WiMAX (802.16e) OFDMA [C]// Military Communications Conference, MILCOM 2006. IEEE, Washington DC, 2006: 1-7
 [3] Lin Yung-chuan, Su Szu-lin, Wang Hsin-chih. A Low Complexity Method of Initial Ranging for IEEE802.16e OFDMA Systems[C]// Advanced Communication Technology, ICACT 2009. 11th International Conference, Gangwon-Do, South Korea, 2009: 1137-1141
 [4] Lee D H, Morikawa H. Performance Analysis of Ranging Process in IEEE802.16e OFDMA Systems[C]// Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. WiMOB 2007. Third IEEE International Conference, White Plains, NY, 2007: 16
 [5] 李焕华.正交频分复用系统的测距技术研究[D].广州:华南理工大学,2010