

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

水下移动平台网络化协同探测技术发展*

冯西安^{1†} 寇思玮¹ 岳玲²

(1 西北工业大学航海学院 西安 710072)

(2 中国船舶重工集团公司第七〇五研究所 西安 710077)

摘要 在水下网络中心战思想的指引下,无人水下航行器、鱼雷兵器等水下移动平台网络化协同探测是必然的发展趋势。该文研究了协同探测网络拓扑结构、网络节点空时统一的关键问题;针对水声复杂信道给通信组网带来的困难,给出了协同探测网络中时变信道自适应复合调制、信道自适应接入机制和移动通信同步的初步方案;并探讨了协同探测的一些关键问题和应用策略,包括跨平台传感器的信息融合、尺度目标的方位分布特征提取以及鱼雷自导多目标协同跟踪。提供的一些计算机仿真结果初步显示了网络化协同探测的优越性。

关键词 无人水下航行器,鱼雷兵器,水声网络,协同探测

中图法分类号: TN912

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)04-0509-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.006

Development of networked collaborative detection technology for underwater mobile platforms

FENG Xi'an¹ KOU Siwei¹ YUE Ling²

(1 School of Science and Technology, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

(2 China Shipbuilding Industry Corporation the 705th Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract Guided by the theory of underwater network centric warfare (UWNCW), it is an inevitable trend to develop networked cooperative detection for unmanned underwater vehicle (UUV), torpedo weapon and other underwater mobile platforms. This paper researches some key problems about network topology, time synchronization and node self localization in the underwater cooperative detection system. In view of the difficulties of communication network in the complex underwater acoustic channel, it gives some preliminary schemes of the cooperative detection network, including adaptive compound modulation to time-varying channel, adaptive channel access and synchronization of underwater mobile communication. The paper also explores some key problems and application strategies of cooperative detection, such as, cross-platform sensor information fusion, feature extraction of azimuth extension of scale target, and multi-target cooperative tracking. Some computer simulation experiments show the advantage of networked collaborative detection.

Key words Unmanned underwater vehicle, Torpedo weapon, Underwater acoustic network, Cooperative detection

2019-02-12 收稿; 2019-03-28 定稿

*国家自然科学基金项目 (61671378)

作者简介: 冯西安 (1962-), 男, 陕西户县人, 博士, 教授, 研究方向: 水声信号处理。

† 通讯作者 E-mail: fengxa@nwpu.edu.cn

0 引言

在网络中心战新军事思想的影响下,美国海军提出水下网络中心战(Underwater network centric warfare, UWNCW)的概念。相对于传统平台中心战,它是一种全新的作战概念,其核心是利用通信网络把各种武器系统、探测节点和指挥中心链接在一起,实现信息共享,掌握战场态势,提高协同作战能力。目前,美军将UWNCW作为海军装备信息化建设的重要指导思想,制定了许多重大计划,以确保水上、水下的载人/无人平台链接成一体化的作战网络。可以预见,这一思想将使水下作战模式发生翻天覆地的变化,对海军作战思想与装备建设产生深远影响。

水声传感器网络的发展为UWNCW奠定了重要基础。但是,建设水下信息网络可不是容易的事情。由于信息载体的特殊性和水中通信的艰难性,水下平台的信息化步伐严重滞后于空间和水面。迄今为止,在网络中心战的发源地美国,其空军的天穹网、陆军的大地网、海军的力量网(水面战部分)已初见雏形,而力量网的水下部分仍停留在概念阶段,足见水下网络建设的难度。

现在,有关水声网络的研究计划及试验已有公开报道。国际上,美国、欧盟、新加坡等国的研究及应用取得了实质性进展。美国的海网(Seaweb)以及欧盟的研究与开发框架计划(Framework Programmer for Research and Technological Development)和地平线2020计划(Horizon 2020)是目前世界上最具有代表性的水下网络^[1-2]。Seaweb从20世纪90年代开始年度试验,目前已带动了美国的多种网络应用研究计划。

水声网络为无人水下航行器(Unmanned underwater vehicle, UUV)、鱼雷兵器等水下移动平台协同探测应用提供了条件。目前,我国从事水声技术研究的科研院所、高校按照水下协同探测应用给出了一些水声网络的构想^[3-5],但研究才刚刚起步。因此,跟踪水下网络中心战的学术前沿,促进网络化协同探测发展具有特别重要的意义。

1 探测网络的拓扑结构及初始化问题

水声组网主要包括拓扑结构设计、网络初始化、水声通信。除此,组网还包括节点硬件设计、协议栈

结构、网络容量、可靠性、能量损耗等,是一个复杂的理论和工程问题。

1.1 网络拓扑结构

拓扑结构可分为集中式网络和分布式对等网络两大类^[6]。集中式网络的节点经过中心节点连接,并通过中心节点接入指挥平台或其他网络。中心节点非常重要,一旦失效将导致整个网络瘫痪,一般说来,集中式网络的覆盖范围比较有限。分布式网络的每个节点权限平等,根据路由方式可分为点到点连接和邻近点连接。点到点连接是完全连接的对等网络,网络中任意两个节点都提供连接,因此路由需求少。然而当节点分散区域很大时,必须使用较大的通信发射功率,大功率发射会产生远近效应。邻近点连接即邻近节点直接连接,较远的节点之间通过路由进行中继连接,其特点是发射功率小,对路由需求大。

在水下移动平台的网络化建设中,应根据应用需求,参考基本的网络拓扑类型,设计合理网络结构。

1.2 节点时间同步

节点时间同步和自定位一起构成网络初始化过程。通过初始化实现网络拓扑的空时统一,由布放初期的无序状态变为节点位置已知、时间对准的有序状态。

时间同步就是消除网络中各节点的时钟误差,使全网节点时钟保持一致。在无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSNs)中,时间同步的基本模型包括单程报文传递模型、双向报文交换模型和广播参考报文模型,这些模型已演化出多种时间同步算法。近年来,人们开始研究时间同步与自定位联合求解的方法,在自定位的同时完成时间同步过程,缩短网络初始化时间^[7-8]。由于水声信道传播的大延迟和不确定性,水下节点的时间对准是一个极具挑战性的难题。

水下平台执行任务时,长时间游弋需要时间同步。双向报文交换属于收发双向成对(Pair-wise)同步机制,通过节点间的双向报文交换,达到收发两个节点的成对同步。时间偏差估计不受传递延迟影响,精度较高,适合于有较大信道传播延迟的水声网络同步。在报文发送、接入、传输误差均为高斯分布时,采用双向报文交换模型, j 、 k 两个节点对 i 节点

的同步仿真结果如图1所示。仿真结果达到较高的精度。

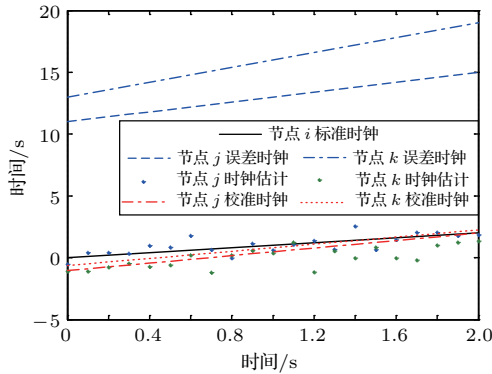


图1 双向报文交换模型的同步仿真结果

Fig. 1 Simulation of bidirectional message exchange model

1.3 节点自定位

节点自定位就是确定节点在整个网络中的位置。与陆地上WSNs不同,水下网络面临着特殊的问题。水下网络难以使用GPS/北斗信号,无锚节点可用,使得现在广泛研究的高精度时延差(Time difference of arrival, TDOA)^[9]、到达角(Angle of arrival, AOA)^[10]、接收信号强度指示信息(Received signal strength indicator, RSSI)^[11]等估计理论及信标(Beacon)定位方式不能直接在水下网络中应用。水声节点定位常以节点自身为中心,通过水声通信,由自定位算法确定邻居节点的相对位置,纳入自己的局部坐标系中。水声信道的复杂性给网络定位增加了困难。另外,水声节点受洋流影响会产生漂移,增加了节点定位的难度。目前,人们已注意到这一研究方向,并着手研究^[12]。

一个节点应答定位的方案如图2所示,主要包括定位信号发射、应答、信号接收与处理。以节点A作为参考坐标系,采用TDOA信号处理对节点B进行高精度时延、方位估计。采用波形分集同时完成

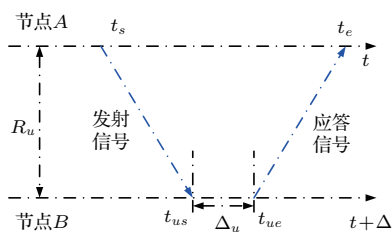


图2 节点应答定位的方案

Fig. 2 A network node location scheme

多个节点的定位处理。方案避免了一些网络定位方法依赖于信道传播时延、时钟同步的问题。

2 水声网络通信的困难与方案

水声平台网络通信的三个关键问题是物理层的高速通信、链路层的信道复用接入、移动平台通信同步。水声信号大衰减、大延时、多普勒效应、多径效应等干扰因素以及水下平台移动给水声通信带来严峻的挑战。

总的来说,在复杂的时变、空变信道中,拟采用信道自适应复合调制、自适应信道接入和大多普勒容限的同步信号。

2.1 时变信道中的自适应复合调制

水声信道是时变信道,随机起伏十分明显。另外,水下移动平台间的通信方式繁多、距离可变,对通信系统的技术要求不尽相同。当传输参数信息时,通信数据量小,但可靠性要求高;传输信号波形时,数据多,但对可靠性要求稍低。移动平台与母艇之间交换信息有下行通信和上行通信,下行通信传达指挥命令,上行通信传输目标探测信息,数据率、可靠性要求不同。

为了保障在各种信道条件下均能达到预期的通信性能,调制系统宜采用自适应技术,以便实现对时变声信道的适应性和容忍性。在信道实时估计的基础上自适应地切换调制方式和选择调制参数,实现通信信号与水声信道的最佳匹配,充分利用信道容量,提高传输速率^[13]。

当水声信道为慢变信道时,可采用有内嵌数字锁相环判决反馈均衡器(Decision feedback equalization- phase locked loop, DFE-PLL)的相干调制方式^[14];水声信道为快变信道时,宜采用非相干频移键控(Frequency-shift keying, FSK)调制方式。系统有多种数据率,依据信道性能,自适应选取其中之一进行传输,保障在各种信道条件下均能达到预期的数据率。

2.2 衰落信道中的自适应接入

在大延迟水声信道中,多用户系统宜采用非竞争的信道复用方式,如时分多址(Time division multiple access, TDMA)、频分多址(Frequency division multiple access, FDMA)和码分多址(Code division multiple access, CDMA)等。

TDMA和FDMA的资源利用率不高,在分配好的时隙或频谱中,一个用户未使用的子载波不能给其他用户使用,而是白白浪费。CDMA用户都占用相同带宽和频率,但其中的扩频以降低速率来换取可靠性,难以满足高速信息传输要求。正交频分多址接入(Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)的频谱利用率高,对信道鲁棒性强,成为高速水声通信网络的重要技术。多用户多

载波系统普遍存在子载波深度衰落问题,因此,可基于信道特性进行子载波的自适应资源优化。自适应OFDMA已成为一个重要的研究方向^[15-16]。

一个水声自适应OFDMA方案如图3所示。方案包括三个信息交互过程:数据/指令发送与接收、资源分配信息通知、信道状态信息反馈,这三个信息交互过程涉及水声信道自适应接入的三个重要方面。

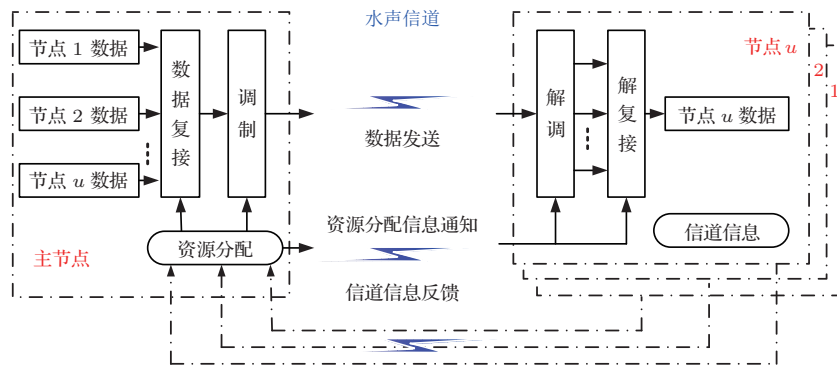


图3 水声自适应OFDMA方案

Fig. 3 An underwater acoustic adaptive OFDMA scheme

2.3 移动平台的水声通信同步

水声信道的时变性和低声速决定了水声移动通信是一种高动态条件下的无线通信技术。对于水下平台运动时产生的多普勒衰落,可采用对同步前缀和后缀信号作相关处理的同步方案,同时完成通信信号检测、载波同步和帧同步。在该方案的数据帧结构中,每帧由大多普勒容限的线性调频(Linear frequency modulation, LFM)信号、保护间隔和信息码元组成,末帧末尾再增加一个LFM信号。利用双LFM信号匹配滤波峰值位置对于多普勒的敏感性实现压缩系数或多普勒频率的高精度估计,利用单个LFM信号的匹配滤波器峰值对多普勒效应的容忍性估计同步头位置,并进一步由压缩系数估计对同步头位置校正。

3 水下协同探测及应用的一些探讨

3.1 跨平台传感器的信息融合

一般来说,协同探测包括传感器部署、传感器调度策略及传感器信息融合,信息融合是协同探测的核心。使用融合后的数据对目标检测、识别与跟踪,可以综合、全面地得到目标的多维度信息,提升目标探测性能^[17-18]。

现在,传感器信息融合已经拥有比较完善的框架结构以及有效算法,但是将该理论应用于实际尚存在一些基本问题有待解决^[19]。在许多实际应用中,传感器数量多、跨平台安装,从而构成的传感器数据具有多维性、异构性、非完备性、不确定性等特点。

一个水下协同探测系统除了包括UUV、鱼雷、潜艇等移动节点外,还可能包括声呐浮标、潜标等固定节点,其融合探测属于多维异构传感器的融合问题。需要结合具体应用中的量测数据差异特点抽象出统一的表示模型,达到探测信息的表征及融合。多维异构传感器信息融合是融合探测的挑战性问题,而证据理论则是表征不确定、非完备、大差异性信息的重要理论,因此是信息融合的研究热点^[20-21]。

一个舷侧阵与拖曳阵数据融合处理的仿真结果如图4所示。两个阵列的阵元数都为20,相距20 m平行布阵。目标辐射噪声滤波后的频带为3 kHz~10 kHz。采用子带分解波束形成对两个阵列进行空间谱估计,并采用空间谱融合算法得到融合后的优化空间谱。两个阵列数据融合后,波束主瓣变窄,分辨率优于孔径较小的舷侧阵。

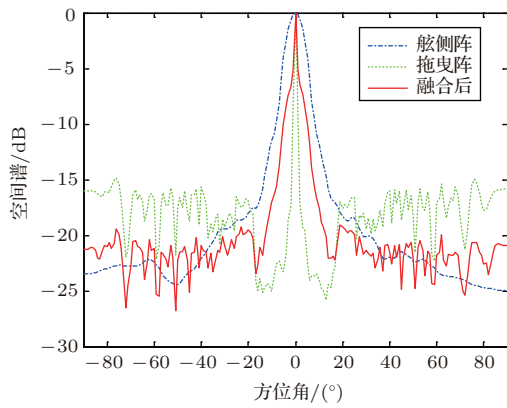


图4 融合前后的空间谱估计比较

Fig. 4 Comparison of spatial spectrum estimation before and after fusion

3.2 尺度目标的方位分布特征提取

在水下主动和被动目标识别问题研究中,国内外研究人员作了长期不懈的努力,揭示了多种目标特征,主要有回波展度、能谱、线谱、尺度、反射系数、极点、时频谱、子波系数以及Mel频率倒谱系数(Mel frequency cepstral coefficients, MFCC)等,对于水下目标识别具有重要意义。但是,随着水声对抗技术及目标隐身的不断发展,目标识别的应用环境已变得十分复杂,需要研究目标的本质不变特征及特征提取方法。

在中近距离条件下,水下大型目标是多亮点结构,回波包含了目标的尺度特征^[22-23]。尺度目标的空间方位分布不易被现代化的对抗器材模拟,是水下目标识别及反对抗的有效特征。单平台只从一个位置观测目标,受敌舷角限制,只有在有利敌舷角条件下才能获取方位分布信息。多平台协同能构成较大的拓扑结构,从不同位置观测目标,容易看到尺度目标的整体和全貌,获得目标的方位分布特征。

采用单平台、等边三角形拓扑的三平台、一字型拓扑的三平台观测目标,在观测距离为500 m时,对80 m的尺度目标提取方位扩展信息,几何计算得到方位扩展与敌舷角的关系曲线如图5所示。单平台在目标正横附近的有利敌舷角时,才可获取方位扩展信息,有利敌舷角范围大约为(30°, 150°)和(210°, 330°)。三平台协同时,有利敌舷角范围很大,等边三角形拓扑协同观测时,在任何敌舷角都可有效估计目标尺度。等间隔一字型拓扑的有利敌舷角范围为(14°, 166°)和(196°, 346°),只在目标首尾较小的范围不能估计目标尺度。

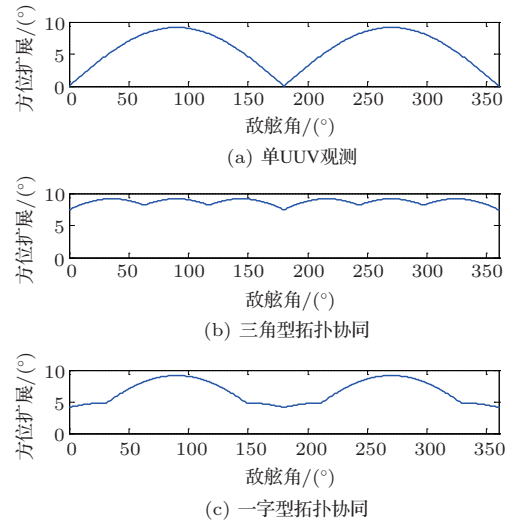


图5 目标方位扩展与敌舷角的关系

Fig. 5 Relationship between azimuth extension and target board angle

3.3 多目标协同跟踪

多目标跟踪是融合探测的重要方面。采用融合后的数据进行定位与跟踪,可以综合、全面地得到目标的多维度信息。多目标跟踪的核心是滤波理论。早期,人们采用有限传感器资源进行目标跟踪,之后利用目标协方差与标准方差之间的差异进行跟踪传感器选择,将单传感器推广到了多传感器协同跟踪领域。从2000年开始,人们分别将扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等理论用到协同探测系统,大大提高了目标跟踪的准确性^[24]。多目标跟踪具有本质的复杂性,数据关联、航迹起始、杂波剔除以及跟踪策略一直是人们十分关注的问题。

水下平台在跟踪目标的各个阶段往往会遇到复杂的多目标环境。协同探测体制扩大了观测范围,多目标特征更加明显。跟踪是一个由远及近的实时、动态过程。在较远的距离,应跟踪多目标方位中心,尽可能将多个目标“聚拢”在传感器探测扇面内,为后续处理创造条件。在距离较近时,则主要考虑识别效果。单平台一般采用优先级排序方法,在对抗环境中,很容易受到优先级较高的诱饵干扰。多平台协同跟踪多目标时,可采用目标分配方法,在目标全部为真时,可同时正确跟踪每个目标,在真假目标都存在的环境中,由于不需要排序避免了假目标干扰。多平台协同跟踪单目标时,设计合理的拓扑结构,可从较宽广的角度观测目标,提高尺度估计性能。

多目标跟踪的仿真结果分别如图6、图7所示。仿真态势中包含一个12 kn速度的真目标、一个4 kn自航式诱饵和一个悬浮式诱饵。单平台采用先跟踪方位中心、后优先级排序的方法。首先跟踪了优先级最高的自航式诱饵,尺度特征判别为假后,转入对次优先级悬浮式诱饵的再搜索,跟踪判别为假后再转入对真目标的再搜索,由于目标逃逸,平台转入目标背后,因尾追时不能正确估计尺度而判别为假目标。其结果是正确识别了2号、3号假目标,但没有正确识别1号真目标。

三平台协同采用先跟踪方位中心,然后通过目标分配分别跟踪三个目标,正确识别出1号真目标和2号、3号诱饵。识别出1号真目标后,结束跟踪任务。识别出2号、3号假目标以后,转入圆环再搜索过程。

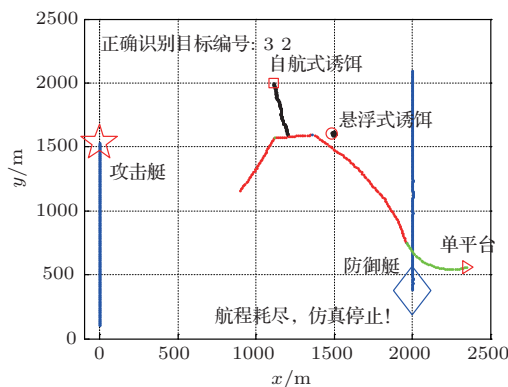


图6 单平台跟踪轨迹

Fig. 6 Single platform's tracking curve

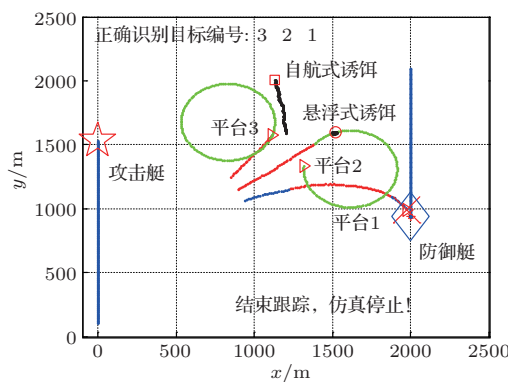


图7 三平台协同跟踪轨迹

Fig. 7 Tracks of the three coordinated platforms

4 结论

本文论述了UUV、鱼雷等水下移动平台网络化协同探测的问题,涉及的内容包括水声网络拓扑、组

网初始化、自适应复合调制、自适应多节点接入、移动平台通信同步、信息融合、尺度目标特征提取及多目标协同跟踪,这些内容是水下网络化协同探测亟待解决的关键问题和重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Rice J A, Green D. Underwater acoustic communications and networks for the US navy's seaweb program[C]. Second International Conference on Sensor Technologies and Application, SENSORCOMM'08, Aug., 2008: 715-722.
- [2] Real-Arce D, Morales T, Barrera C, et al. Smart and networking underwater robots in cooperation meshes: the Swarms Ecsel: H2020 Project[C]. 7th International Workshop on Marine Technology: MARTECH, Oct, 2016: 19.
- [3] 淦华东, 冀邦杰, 周德善, 等. 网络鱼雷概念及关键技术探讨[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(2): 5-8.
Gan Huadong, Ji Bangjie, Zhou Deshan, et al. Discussion on concept and key technology of network torpedo[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(2): 5-8.
- [4] 金晓婷, 陈友淦, 许肖梅. 多跳水声网络动态编码协作通信技术改进研究[J]. 声学技术, 2015, 34(2): 472-474.
Jin Xiaoting, Chen Yougan, Xu Xiaomei. Research on improved dynamic coded cooperation for multi-hop underwater acoustic networks[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(2): 472-474.
- [5] 张庆国, 王健培, 崔国平, 等. 基于座底式水声网络节点的跟踪测试技术研究[J]. 声学技术, 2016, 35(3): 193-197.
Zhang Guoqing, Wang Jianpei, Cui Guoping, et al. Research on tracking and testing technology based on bottom-seated underwater acoustic network nodes[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(3): 193-197.
- [6] 李淑秋, 李启虎, 张春华. 水下声学传感器网络的发展和应[用]. 物理, 2006, 35(11): 945-952.
Li Shuqiu, Li Qihu, Zhang Chunhua. Development and applications of underwater acoustic sensor network[J]. Physics, 2006, 35(11): 945-952.
- [7] Liu B, Chen H, Zhong Z, et al. Asymmetrical round trip based synchronization-free localization in large-scale underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3532-3542.
- [8] Liu J, Wang Z, Cui J, et al. A joint time synchronization and localization design for mobile underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(3): 530-543.
- [9] Yan Y, Wang H, Shen X, et al. TDOA-based source collaborative localization via semidefinite relaxation in sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015: 1-16.
- [10] Xu J, He J, Zhang Y, et al. Distance-based maximum likelihood estimation method for sensor localization in wireless sensor networks[C]. 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2016), Jan., 2016: 1884-1888.

- [11] Luo Q, Peng Y, Li J, et al. RSSI-based localization through uncertain data mapping for wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 3155–3162.
- [12] Gao J, Shen X, Mei H, et al. A range-angle based self-localization scheme for MUANs[C]. In *Proc. of IEEE OCEANS 2017*, Aberdeen, United Kingdom, 2017.
- [13] Mani S. Adaptive modulation technique for underwater acoustic channels[D]. Arizona: Arizona State University, 2008.
- [14] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G. Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1994, 19(1): 100–111.
- [15] Cheon J, Cho H. A delay-tolerant OFDMA-based MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]. 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2011.
- [16] 乔钢, 刘淞佐, 刘奇佩. 水声通信网络协议、仿真与试验综述[J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25(2): 151–160.
Qiao Gang, Liu Songzuo, Liu Qipei. Review of protocols, simulation and experimentation for underwater acoustic communication network[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(2): 151–160.
- [17] Reda B, Didier C, Thanh-Long N, et al. Multi-sensor information fusion: combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 100: 302–316.
- [18] Bosman H H, Iacca G, Tejada A, et al. Spatial anomaly detection in sensor networks using neighborhood information[J]. *Information Fusion*, 2017, 33: 41–56.
- [19] Raffaele G, Parastoo A, Hassan G, et al. Multi-sensor fusion in body sensor networks: State-of-the-art and research challenges[J]. *Information Fusion*, 2017, 35: 68–80.
- [20] 杨永旭, 高自凡, 朱辉, 等. 一种基于决策距离测量与D-S证据理论结合的多源冲突证据信息融合算法[J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2018, 32(6): 62–67.
Yang Yongxu, Gao Zifan, Zhu Hui, et al. An information fusion algorithm for multi-source conflict evidence based on decision distance measurement and D-S evidence theory[J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science(Nature Science)*, 2018, 32(6): 62–67.
- [21] Geng H, Liang Y, Liu Y, et al. Bias estimation for asynchronous multi-rate multi-sensor fusion with unknown inputs[J]. *Information Fusion*, 2018, 39: 139–153.
- [22] Brill D, Gaunaud G, Wertman W, et al. Backscattering of sound pulse by elastics body underwater[J]. *Applied Acoustics*, 1991, 33(2): 87–107.
- [23] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型[J]. *声学学报*, 1994, 19(2): 92–100.
Tang Weilin. High light model of echoes from sonar targets[J]. *Acta Acustica*, 1994, 19(2): 92–100.
- [24] Elfallah A, Zatezalo A, Mahler R, et al. Dynamic sensor management of dispersed and disparate sensors for tracking resident space objects[C]. *The International Society for Optical Engineering*, 2008: 6968.