

基于能量和地理信息的水下传感器 网络协作传输技术研究

万智萍, 王 凤

(中山大学新华学院 信息科学系, 广州 510520)

摘 要: 研究了一种适用于水下传感器网络的基于能量预测的分布式数据协作通信技术。针对水下复杂的监测环境、水下无线通信以及网络拓扑等动态特性,建立了一种基于 H_∞ 的节点能量预测算法,由能量和地理信息建立的二维表进行中继选择并建立了一种分布式数据协作传输技术。该技术根据水下传感器节点间无线链路的广播特性,根据 H_∞ 滤波器预测得到的节点剩余能量及其地理位置建立二维表,据此选择最优者作为协作节点,根据无线链路质量自适应选择放大重传和解码重传机制。数学分析表明, H_∞ 滤波器对节点剩余能量的预测精度较高,而且该协作传输技术能够在有效地延长水下传感器网络生命周期的同时显著提高网络的资源利用率和系统吞吐率。

关键词: 水下传感器网络; H_∞ 滤波器; 协作分集; 中继选择

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)07-2597-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.053

Research of cooperative transmission technology based on energy prediction and geographic information for underwater acoustic sensor networks

WAN Zhi-ping, WANG Feng

(Dept. of Information Science, Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China)

Abstract: This paper researched a mobile distributed cooperative data transmission technology based on H_∞ filter energy prediction algorithm for underwater acoustic sensor network. Aiming at the complex underwater monitoring environment, underwater wireless communication and the network topology and the dynamic characteristics, it put forward the H_∞ for node energy prediction algorithm based on energy of two-dimensional table, relay selection and the establishment of a distributed data collaboration transmission technology. The technique, according to the underwater wireless sensor nodes in wireless link broadcast properties, the H_∞ filter to predict the residual energy of nodes and its geographical location, established two-dimensional table. The technique selected the best as cooperative node, and adaptively chose amplifying retransmission and decoding retransmission mechanism according to the radio link quality. Mathematical analysis shows that, the H_∞ filter on the residual energy of nodes has higher forecast accuracy, and the cooperative transmission technology can effectively extend the underwater sensor network life cycle and improve the utilization of network resources and system throughput.

Key words: underwater sensor networks; H_∞ filter; cooperative diversity; relay node selection

随着水下移动通信和传感技术的发展^[1,2],如何为水下传感器网络数据传输提供高速率、高可靠性和高资源利用率的传输技术成为国内外工业界和学术界研究的热点之一^[3,4]。

文献[5]提出了一种自适应移动传感器多目标定位跟踪算法;Alippi等人^[6]针对水环境监测设计了一种具有鲁棒性的自适应无线传感器网络框架;文献[7]在水声网络中建立了一种具有多输入多输出的分布式媒体访问控制策略;Moayeri等人^[8]综述了水下网络的节点定位和跟踪技术;Kaneda^[9]分析了地震和海啸等水下环境的先进网络系统。但是,文献[5,6]忽略了根据 H_∞ 滤波器进行水下传感器节点能量的预测,文献[7~9]对水下传感器网络数据传输时的协作传输未作深入研究,且未根据节点剩余能量并进行实时有效的中继选择。

因此针对已有的研究成果的不足,提出了一种适用于水下通信的无线传感器网络分布式多中继协作传输机制。该技术采用 H_∞ 滤波器预测水下传感器节点剩余能量并结合地理位

置信息建立二维表,据此选择能量和地理位置折中最优的候选节点作为协作节点,进行分布式数据转发或发送,同时根据水下无线链路质量自适应选择放大重传(amplify and forward, AF)技术和编码重传(decode and forward, DF)技术,进一步提高水下无线传感器网络资源利用率,同时为系统有效吞吐率和能效提供有效保障。

1 基于 H_∞ 滤波器的分布式中继选择

1.1 基于 H_∞ 滤波器的传感器节点能量预测

针对水下传感器网络所处的水下复杂而且恶劣的环境的噪声干扰,一维随机线性系统为

$$ex = P_u \times xdt + (Y_1 d\beta(t) + Y_2 d\varphi(t))x^\gamma + Y_3 \xi dt \quad (1)$$

其中: $\beta(t)$ 和 $\varphi(t)$ 记录水下传感器节点能量的递归过程; ξ 为水下无线链路噪声干扰参考值,且大于零并趋近于无穷大。

收稿日期: 2011-09-16; 修回日期: 2011-10-20

作者简介: 万智萍(1980-),男,湖北鄂州人,讲师,硕士,主要研究方向为无线传感网络、嵌入式系统(wzp888_0@126.com);王凤(1984-),女,河北石家庄人,讲师,硕士,主要研究方向为嵌入式技术、电子技术。

在式(1)所示线性系统中,根据 H_∞ 滤波器的滤波原理,根据式(2)可以求得水下传感器节点实时剩余能量的状态。观测和更新过程。

$$\begin{cases} P_{-u_i} = \tilde{a}P_{-u_j} + \tilde{b}T \\ Q_{-u_j} = \varphi(\tilde{a}\tilde{c})P_{-u_i} + C \\ K_j = \tilde{c}P_{-u_i} + Q_{-u_j} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\tilde{a}$ 记录能量测量过程; $\tilde{b}$ 记录水下无线链路噪声干扰过程; $\tilde{c}$ 记录水下传感器节点能量更新过程,且在如式(1)所示的一维随机线性系统中, $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$ 和 $\tilde{c}$ 都采用常系数矩阵表示。 P_{-u_i} 表示能量状态向量; T 表示过程噪声; P_{-u_i} 和 T 都属于 R^m ; C 记录能量测量噪声干扰情况; Q_{-u_j} 记录对能量测量值实施更新过程; K_j 记录对测量值更新后的预测过程; $\varphi(\tilde{a}\tilde{c})$ 记录预测后下一步能量观测过程。

根据以上描述,可以求得最优预测解为

$$\min_i \max_{m,n} K \quad (3)$$

其中: K 记录度量过程。

因此,基于 H_∞ 滤波器的滤波能量预测过程为

$$\begin{aligned} Y_0 &= E(P_{-u_0}P_{-u_0}^T) \\ Y_j &= (F - X_k\tilde{S}_j^T\tilde{S}_j)\Pi_j P_{-u} \\ Y_{j+1} &= \tilde{a} \sum_{j=1}^N \tilde{a}^T \\ P_{-u_j} &= \tilde{a}Q_{-j-1} + Y_j - \tilde{a}X_{k-1}\tilde{S}_j^T \end{aligned} \quad (4)$$

其中: F 、 $\tilde{S}_j$ 和 Y_j 用于记录 H_∞ 滤波器的滤波中间过渡阶段情况。

因此,结合式(3)(4)可以得到水下传感器节点实时能量预测模型为

$$P_{-u_{j+1}} = \tilde{b}P_{-u_j}X_{k-1}\tilde{S}_j^T \quad (5)$$

1.2 预测性能分析

采用 NS-2 仿真工具得到水下传感器节点剩余能量统计值,与采用 MATLAB 工具实现的 H_∞ 滤波器预测算法求解得到的能量预测值进行分析与比较,如图 1 所示。实验参数见表 1。

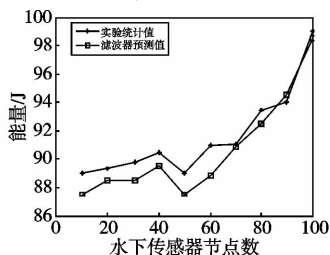


图1 不同移动速度下能量预测结果对比

图 1 给出了随着水下传感器网络规模的变化,节点能量统计值与预测值对比结果。在水下传感器节点数小于 70 时,因水下传感器网络以自组织方式建立网络拓扑广播大量消息,节点通过协作方式进行数据转发的概率较大,因此能量消耗较大。当水下传感器节点数大于 70 后,水下传感器节点作为待选中继节点处于睡眠状态的概率较大,因此剩余能量明显高于小规模水下传感器网络。从图 1 中可以看出, H_∞ 滤波器在小规模网络中,预测值与实际值之间存在一定的误差,但仍处于可接受的范围之内,而对于大规模网络预测精度明显高于小规模网络。

1.3 分布式中继选择算法

本节建立基于 H_∞ 滤波器的水下传感器节点能量预测的分布式中继选择算法,具体工作步骤如下:

a) 初始化阶段。根据已有的监测数据为 H_∞ 滤波器的主要参数如 P_{-u} 、 Y_1 和 Y_2 等赋初值。

b) 预测阶段。根据 $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$ 和 $\tilde{c}$ 的监测值结合步骤 a) 中的初值,由式(5)可得到水下传感器节点剩余能量记为 P_{-u_j} 。

c) 更新阶段。在 K 和 $\tilde{S}_j$ 的递归过程中,根据式(2)(4)对滤波器预测滤波过程进行实时更新,为下一轮能量预测提供依据。

d) 建立二维表阶段。根据水下传感器节点的地理位置和由 H_∞ 滤波器预测得到的能量建立二维协作信息表,记为 $X_{k-1}\tilde{S}_j^T$ 。

e) 中继选择阶段。根据步骤 d) 中建立的二维信息表进行分布式中继选择,选中的中继节点记为 Q_{-u_j} 。

f) 循环执行步骤 b) ~ e), 建立基于节点能量的分布式中继节点候选优先表,为上层数据传输提供依据。

2 分布式协作传输技术

在上文分析的基础上,根据实际应用需求设定剩余能量门限值,采用 H_∞ 滤波器预测水下传感器节点剩余能量,结合门限值在二维信息表中选择最优中继节点以及中继协作传输跳数。为了进一步提高水下无线链路资源利用率,该传输技术实时根据链路质量自适应调整编码方式,算法描述如下:

a) 采用自组织方式和基于水上无线浮标基站的方式建立水下传感器网络拓扑。

b) 源节点发起数据通信后,其他节点 $R_{i=1,2,\dots,n}$ 均作为候选中继节点,启动 H_∞ 滤波器预测相邻节点剩余能量,然后向周围节点广播预测值,簇头节点汇聚簇内信息后向簇内所有节点发起地理位置请求信息,据此建立二维信息表。

c) 会晤源节点结合下一跳接收节点的链路质量,如果大于门限值则采用放大重传机制,否则采用编码重传机制;同时,根据二维信息表进行分布式中继选择。

d) 每一个数据发送或转发节点,重复执行步骤 b) 和 c), 建立分布式协作数据通信。

e) 在协作传输过程中,所有节点根据水下环境和水下无线链路质量,根据 1.3 节中的步骤 c) 更新 H_∞ 滤波器,并根据控制中心要求自适应选择放大重传机制和编码重传机制。

f) 在数据发送传感器节点和协作传输过程中的所有中继节点上循环执行步骤 a) ~ e), 直到接收节点收到数据并反馈一个 ACK 或 NACK 给发送节点。

3 实验结果与分析

假设水下传感器网络中,传感器发送节点向传感器接收节点发送数据,经过若干个中继节点 $R_{i=1,2,\dots,n}$ 分布式协作传输。采用 NS-2 和 MATLAB 对本文所提出的基于能量预测的分布式协作传输技术与非协作传输技术和协作传输技术在水下传感器网络系统能效、系统吞吐率等性能进行对比。

实验分析中,在文献[10]中的传感器节点模型基础上,任意选择一个水下传感器节点作为数据发送端,向水上浮标基站发送数据。分别以 10、20、30、40、50、60、70、80、90 和 100 个水下传感器节点为研究对象,分析端到端水下传感器节点之间的数据传输,统计时间 Δt 为 0.5 s 内水下无线信道的系统吞吐率以及能效,其他实验参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	值	参数	值
仿真时间	1000 s	MAC 协议	IEEE 802.16e
单跳射频覆盖范围	150 m	传输层协议	UDP
拓扑大小	600 m × 600 m	路由协议	AODV
数据包	1024 Byte	信道带宽	1 Mbps
		节点移动速度	10 m/s, 20 m/s

对于协作传输技术与基于能量和地理信息的分布式协作传输技术采用 MATLAB 实现,分析时水下无线信道为 Nakagami-m 模型,调制采用 FPSK 方式。

不同水下传感器节点数下,基于能量预测的分布式协作传输技术与非协作传输、协作传输在系统吞吐率和系统能效性能上的对比结果如图 2 所示。可以看出,随着水下传感器网络规模的增大,三种传输技术的有效吞吐率逐渐增大,而且采用协作传输之后可以显著提高水下传感器网络的系统吞吐率和能效。特别地,采用 H_∞ 滤波器预测节点剩余能量为中继选择提供了可靠实时的依据,而且根据水下无线链路质量自适应地选择 AF 和 DF 机制,进一步提高了系统的有效吞吐率和能效。图 3 给出了在 1000 s 实验过程中,统计得到的非协作传输技术与 MATLAB 分析得到的协作传输技术和基于能量预测的分布式协作传输技术的性能对比。综合对比图 2 和 3 发现,基于 H_∞ 滤波器能量预测的分布式协作方式可以充分利用水下无线链路带宽、能量等资源,根据实时能量情况选择最佳候选节点作为中继节点采用协作方式转发或发送数据,系统获得了高有效吞吐率和能效的良好性能,非常适用于水下环境中的传感器网络的无线数据通信。

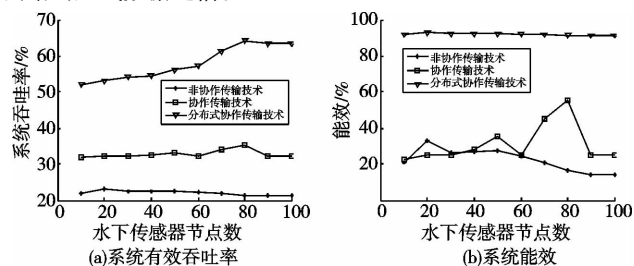


图2 不同网络规模下三种传输技术性能对比

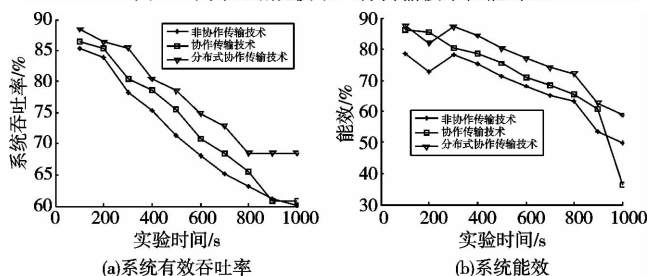


图3 三种传输技术随时间的性能对比

4 结束语

针对水下传感器网络的拓扑结构、无线链路信道等动态特性以及带宽、能量受限等特点,研究了一种可以有效提高数据

传输效率的适用于水下通信的无线传感器网络的数据传输方式。该技术采用 H_∞ 滤波器预测水下传感器节点的能量结合地理位置信息构建二维信息表,据此建立一种合理的中继选择机制,同时根据当前水下链路质量自适应调整 AF 和 DF 机制。NS-2 仿真实验和 MATLAB 数学分析表明,该分布式协作传输技术在系统吞吐率、资源利用率和网络生存周期等方面均具有良好的性能。

参考文献:

- [1] SAYEED A, ESTRIN D, POTTIE G. *et al.* Guest editorial self-organizing distributed collaborative sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(4): 689-692.
- [2] KODATI P, HINKLE J, WINN A. Microautonomous robotic ostracii form (MARCO): hydrodynamics, design, and fabrication[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2008, 24(1): 105-117.
- [3] TEYMORIAN A Y, CHENG Wei, MA Li-ran. 3D underwater sensor network localization[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2009, 8(12): 1610-1621.
- [4] LIU Bin, CHEN Hong-yang, ZHONG Zi-guo. Asymmetrical round trip based synchronization-free localization in large-scale underwater sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3532-3542.
- [5] ZHAN Peng-cheng, CASBEER D W, SWINDLEHURST A L. Adaptive mobile sensor positioning for multi-static target tracking[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 120-132.
- [6] ALIPPI C, CAMPLANI R, GALPERTI C. *et al.* A robust, adaptive, solar-powered WSN framework for aquatic environmental monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(1): 45-55.
- [7] KUO Li-chung, MELODIA T. Distributed medium access control strategies for MIMO underwater acoustic networking[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2523-2533.
- [8] MOAYERI N, MAPAR J, TOMPKINS S. *et al.* Emerging opportunities for localization and tracking[J]. *Wireless Communications*, 2011, 18(2): 8-9.
- [9] KANEDA Y. Advanced ocean floor network system for mega thrust earthquakes and tsunamis[C]//Proc of IEEE Symposium and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [10] ALVAREZ A. Volumetric reconstruction of oceanographic fields estimated from remote sensing and in situ observations from autonomous underwater vehicles of opportunity[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(1): 12-24.