

文章编号:1001-9081(2008)07-1828-03

水下声无线传感器网络通信性能研究

王彪^{1,2}, 李宇², 黄海宁², 薛山花²

(1. 西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院 声学研究所, 北京 100080)

(wangbiao@mails.gucas.ac.cn)

摘要:在基于水下网络节点均匀分布的前提下, 通过结合传输衰减和射线模型仿真水下通信信道, 推导出水下传感器网络路由中端到端平均误码率(BER)和网络节点分布密度之间的关系式。并且通过 Monte Carlo 仿真方法, 单跳链路之间采用 MFSK 通信方式, 仿真了网络通信性能与节点分布密度的关系。通过仿真结果, 可以预测水下网络在特定网络拓扑结构中网络整体的通信能力; 而且能够在预先给定要达到的网络通信能力的约束下, 得到最优的网络分布密度; 这将为水下网络节点布放的同时衡量网络通信性能提供很好的参考价值。

关键词:传感器网络; 水声信道; 传输衰减; 射线模型; 误码率

中图分类号: TN919.72 **文献标志码:** A

Study of communication performance in underwater acoustic sensor networks

WANG Biao^{1,2}, LI Yu², HUANG Hai-ning², XUE Shan-hua²

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Institute of Acoustic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the study on the relation between the communication performance and node distributed density in Underwater Sensor Networks (USN) was presented. The method combined the models of transmitting loss and ray of underwater acoustics to deduce the relationship between communication performance and node distributed density in USN. Moreover, the conclusion was simulated by Monte Carlo methods. By the result of simulation, the communication ability of underwater network can be forecasted on the given node deployment, furthermore the optimum net density will be found with the constraint of the given communication ability of underwater network, which affords benefit for the topology and node deployment based on the communication performance in underwater sensor networks.

Key words: sensor network; underwater acoustic communication; transmitting loss; ray model; Bit Error Ratio (BER)

0 引言

随着世界各国对海洋资源及环境的重视和海军事业的发展, 水下无线传感器网络吸引了学者的研究兴趣, 是现在各国学者关注并研究的课题^[1]。最早提出水下声学网络应用概念的是 1993 年美国提出的自主海洋采样网(AOSN), 美国自 1998 年开始了称为海网(Seaweb)的年度实验, 意在验证水下声学网络的概念, 自 20 世纪 90 年代中期至今, 陆地无线传感器网络迅速发展, 水下无线传感器网络概念应用而生, 是由大量的具有无线通信与计算及信息获取节点构成, 且具有自组织分布式的水下网络系统; 其是陆上传感器网络概念向海洋应用的延伸。然而, 由于水介质的特殊性和复杂性, 水下传感器网络与陆上无线传感器网络相比具有许多特点和挑战^[2], 比如水声信道的时一空一频随机多径特性导致的高误码、高衰减; 水下节点的能量有限等都直接影响着水下网络的性能。目前世界上还没有出现水下声传感器网络成形系统, 发展远滞后于陆上传感器网络, 陆上无线传感器网络技术不能直接应用于水下网络, 因此目前各国主要针对支撑水下传感器网络的各种技术展开研究, 如文献[3]提出了一种基于能量有效的适合于水下网络的 UWAN-MAC 接入协议, 文献[4]提出

了基于网格表征的水下网络的拓扑结构。水下传感器网络研究方兴未艾, 它将为未来水下传感器网络实验平台的搭建奠定坚实的理论基础。

在水下传感器网络中, 水下声波的传播具有绝对的优势, 所以水下传感器网络采用声载波通信来完成节点之间的信息共享和组网功能。所以网络的连通性能与网络节点分布是考核水下无线传感器网络的重要指标。文献[5]通过麦克风与声通信模块相结合研究了水下传感器节点的布放对网络层通信协议的影响。与上述方法不同, 本文从物理层出发, 结合水下特殊环境, 考虑水下声信道的多途效应和传输衰减特性, 以单链路通信性能为基础, 研究分析水下节点均匀分布的网络分布密度与水下网络整体通信能力之间的关系。

1 单链路信道模型

由于电磁波在水下的衰减很快, 因此水下传感器网络单链路通信一般采用声载波通信方式, 在信号传输过程中, 由于水声信道的复杂, 导致发送和接收的信号存在大延时、多途, 信号衰落等现象严重。不能简单地将路上无线电通信的理论用于水下通信。本文结合水下声通信的特点, 在考虑单跳通信能力时充分结合了水声传播原理对信号波形及信号能量带

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2008-04-05。

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA09Z117); 国家自然科学基金资助项目(60672118)。

作者简介: 王彪(1980-), 男, 甘肃张掖人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 水声信号处理、水下传感器网络; 李宇(1977-), 男, 贵州贵阳人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向: 声纳信号处理、水下传感器网络; 黄海宁(1969-), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向: 水声信号处理、水声工程; 薛山花(1975-), 女, 山东阳谷人, 助理研究员, 主要研究方向: 水下目标分类、阵列信号处理。

来的影响从而导致水下无线传感器网络通信能力的下降,故在文中采用以下两个模型:传输衰减模型和基于射线模型来模拟水下声信道对网络单链路的无线连接带来的通信能力的影响:

1.1 传输衰减模型

水声信道在信号传输过程中对信号最大的影响是存在依据海洋环境的不同带来的传输衰减,引起声强在介质中传播衰减的原因主要可分为以下两个方面:1)扩展损失。是声波波面在传播过程中不断扩展而引起的声强衰减。2)吸收损失。是由于介质粘滞、热传导以及其他弛豫过程引起的声强衰减^[4]。可以把扩展引起地损失写成:

$$TL = n \cdot 10 \lg r \tag{1}$$

根据不同的传播条件, n 的取值不同。 r 为传播距离;吸收及扩散引起的传播衰减可以表示为:

$$TL = n \cdot 10 \lg r + \alpha r \tag{2}$$

α 也称衰减系数,则有 Thorp 给出了淡水吸收系数随频率变化的经验公式:

$$\alpha = \frac{0.102f^2}{1+f^2} + \frac{40.7f^2}{4100+f^2} \tag{3}$$

根据不同的声波频率及水声环境,可使用不同的经验公式来计算海水吸收系数。图 1 所示为特定的海域环境下,通过上述模型绘制的水下不同深度的声传播衰减随传播距离的变化。

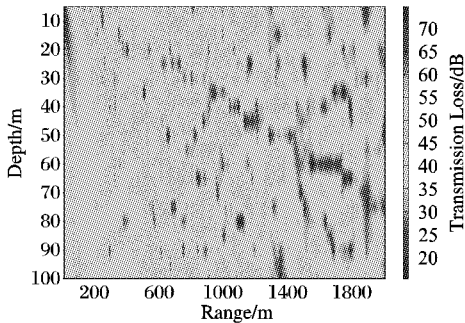


图 1 传输衰减图

1.2 射线模型

水下信道存在严重的散射和反射,故多途现象是水下信道的典型特点。射线模型在水声信道仿真中发展较早,具有数学形式简单、物理意义清晰等特点,是一种很实用的方法。采用牛顿迭代求解声线跨度方程的方法,求取各本征声线的参数。与折线法和连续路径法相比,具有搜索速度快,结算准确等特点。故在本此仿真中采用射线模型仿真水下声信道的多途现象^[6-7]。

射线模型描述的声场是由声线来完成声能量的传递。接收点的声场是所有到达声线的叠加的结果。相应于每一条声线均有一定的到达时间和相位,每条声线管携带的能量守恒,所以声线强度随声线管的截面积的变化而变化。射线理论有两个基本的方程,一是程函方程,用来描述声线的行走规律;一是强度方程,用来确定单根声线的强度。在分层的海洋介质中,声线声场的表达式为:

$$\psi(x, z) = A(x, z) e^{j\varphi(x, z)} \tag{4}$$

其中:

$$\varphi(x, z) = ik_0 x + ik \int_0^z \sqrt{n^2(z) - \zeta^2} dz \tag{5}$$

$$A(x, z) = \sqrt{\frac{W \cos \theta_0}{X \left(\frac{\partial x}{\partial \theta} \right)_{\theta_0} \sin \theta_z}} \tag{6}$$

其中: W 是单位立体角辐射功率, θ_0 为声源处声线的掠射角, θ_z 为任意深度 z 处的掠射角。设发射端的信号是 $g(x)$, 则 $g_i(x - \tau_i)$ 为计算得到的任一条声线, τ_i 为该声线到达接收点的延时, N 为声线的数目,则最终到达接收端的信号 $f(x)$ 可表示为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N g_i(x - \tau_i) \tag{7}$$

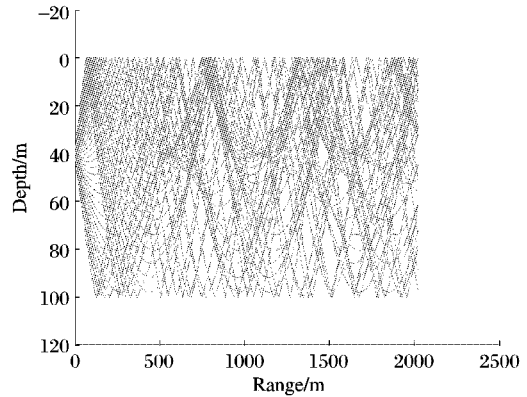


图 2 射线模型搜索的声线图

2 网络模型及平均误码率

水下无线传感器网络系统受很多因素的影响,是一个比较大和复杂的系统,难以建立准确的模型。为了研究的方便,不失一般性,本文对模型做了一些简单假设,该仿真结果就是在这个模型下完成的。网络的拓扑如图 3 所示,网络中的节点是均匀分布的,都服从密度为 D 的均匀分布^[8],节点之间的距离为 d_s 。在单链路通信中采用非相干通信 M-ary FSK^[9-10],因为该方式在信号的检测端仅仅依据的是传输码信号的能量,而不考虑相位信息,对复杂的水声信道表现了比相干方式更强的适应能力。其单跳通信的流程如图 4 所示,信号经过调制后,由水声信道传输,采用上述水声通信模型很好的模拟水下声信道对信号的影响,对接收到的信号进行相应的解调检波得到发送的信息,由于水声信道的影响,在接收端得到的信息和发端相比不是完全相同,存在错误的译码,该误码率称为单跳链路的误码率,用 p_L 表示。

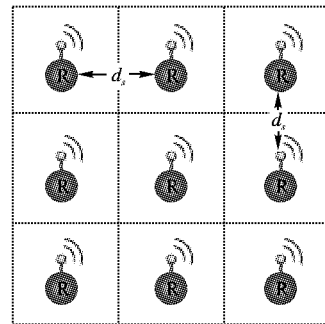


图 3 水下网络拓扑示意

基于上述网络系统的假设,定义节点分布密度为:

$$D = N/A \tag{8}$$

其中: N 为节点数目, A 为网络覆盖面积即图中虚线覆盖的面积。

$$d_s^2 \times N = A \Rightarrow d_s = \sqrt{A/N} = \frac{1}{\sqrt{N/A}} = \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (9)$$

设 p_L 为节点单跳链路的误码率。假定源节点与目的节点之间的中间节点完全复制接收到信号,且中间链路中没有突发性的错误发生,则报文经过 n 跳到达目的节点后的误码率为:

$$P_b^{(n)} = 1 - (1 - p_L)^n \quad (10)$$

根据无线自组织网络路由协议的分析可知,节点之间最大的通信路由的跳数为遍历所有除自身以外的其他节点,即:

$$n_h^{\max} = N - 1 \quad (11)$$

采用仿真统计的方法对网络的路由协议分析得知,节点互相之间的通信路由的跳数服从 $[1, n_h^{\max}]$ 的均匀分布,则通信路由的平均连接跳数为:

$$\bar{n}_h = \left[\frac{N}{2} \right] \quad (12)$$

其中 $[\cdot]$ 为取不大于所操作数的最大整数。将 (12) 代入 (10) 得到报文经过 n 跳到达目的节点后的平均误码率为:

$$\bar{P}_b = \bar{P}_b^{\bar{n}_h} = 1 - (1 - p_L)^{\bar{n}_h} \quad (13)$$

3 Monte Carlo 仿真及分析

文献[10]对采用 MFSK 调制方式进行了水下声通信研究,其通信频段在 15 kHz ~ 19 kHz,该实验结果表明在水下通信中采用该调制方式可以获得较好的通信质量,故本文中单链路也采用该调制方式,但是它仅仅针对点对点通信展开讨论,本文将该结果进行了扩展,在采用 MFSK 调制的基础上,考虑了水下信道传播模型,并研究了水下传感器网络通信性能与节点分布之间的关系,得到更加有意义的结果。

依上节对单链路信道模型和网络模型理论为基础,对水下网络的平均通信性能与节点分布密度之间的关系进行仿真实验。网络中各个节点之间的单链通信采用图 4 所示流程,多途信道和传输衰减很好地模拟了水下声信道对通信信号的影响,使得模型假设尽可能的逼近真实环境,对未来水下网络节点布局提供更加有利参考。在仿真实验中,假设水下传感器节点均匀分布在水深为 0 ~ 100 m 的淡水环境中,传感器节点之间的最大距离为 2000 m,通信信号频段为 15 kHz ~ 25 kHz。假设传播形式为球面波,故 $n = 2$, 传播衰减系数采用式(3)中的经验公式。在信号的多途仿真中,信号存在的多径数设为 $N = 150$ 。依据声场计算工具可以分别仿真不同的传播模型,如图 1 与图 2 所示。图 1 为节点处于不同的环境下其信号的传输衰减,单位为 dB,以伪彩色形式绘出, x 轴表示水深 0 ~ 100 m, y 轴代表传输距离 0 ~ 2000 m,反映了节点水下声信道对单跳链路信号能量的衰减随接收深度和距离的变化关系。图 2 是在基于射线模型的假设下,绘出的声线图,水下环境参数与传输衰减模型中的环境参数一致,发射节点处于水深 40 m,图中绘出的声线图 150 条,每一条声线图可以看成信号的不同的传输路径,可以明显从图 2 中看出水面与水底对信号具有很强的反射作用。在图 1 和图 2 的仿真参数基础之上,利用水下节点均匀分布的网络模型,采用 Monte Carlo 仿真方法,对不同节点分布密度下的水下声传感器网络的连接性能做了仿真实验,单次 Monte Carlo 仿真采用 500 次,考虑实际工作中需要节点职守时间长,故仿真中采用发射信号

功率为 50 dB,如图 5 所示得到了不同网络分布密度下与所获得的端到端平均误码率的关系,两者呈现反比关系,随着分布节点数目的增加,平均误码率呈下降趋势。



图 4 单跳通信流程

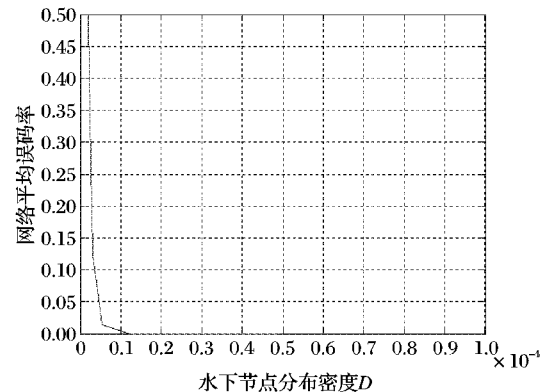


图 5 网络平均误码率随节点分布密度变化曲线

在上述仿真参数环境下,对仿真结果进行分析,可得到一些很有价值的结果。比如在给定了网络的覆盖面积和分布节点数后,则根据上述仿真结果可以预测网络的整体连通性能,例如当节点分布密度为 $D \approx 0.089 \times 10^{-4} m^{-2}$ 时,整个水下传感器网络的平均误码率约为 0.01。而且由图 5 可以看出,当网络分布密度达到一定的数值后,网络平均误码率下降开始趋于平缓,即在一定的区域内,增加水下传感器节点的数目对网络的整体通信性能提升不大,则可以把此时的分布密度作为水下声传感器网络的最优分布密度。如本例中的最优分布密度为 $D_{\text{optimum}} \approx 0.118 \times 10^{-4} m^{-2}$ 。上述分析结果对水下无线传感器网络的总体结构及网络通信能力的测度提供了很好的参考价值。

4 结语

本文在考虑水下声信道特点的同时,结合传输衰减和射线模型,在基于水下节点单链路误码率的基础之上,推导得到了水下无线传感器网络节点分布密度与网络整体通信能力之间的关系。并采用 Monte Carlo 仿真方法,节点之间采用 MFSK 调制方式,对上述关系进行了仿真研究,通过仿真结果可以预测水下特定网络拓扑结构下的网络整体通信能力,并且可以得到在预先给定的网络平均误码率限制条件下的水下传感器节点最优分布密度。此方法对需要考虑网络通信能力的水下无线传感器网络的节点分布提供了有利的依据,并且该仿真方法可以很好地扩展,可以根据不同的环境及网络配置,得到相应的结果。

参考文献:

- [1] 李淑秋,李启虎,张春华. 水下声传感器网络的发展应用[J]. 物理, 2006, 11(35): 945-952. (下转第 1834 页)

组播分组平均时延和时延抖动上,FSMWRR 的性能接近于 PQWRR。

4 结语

针对 ACR 中 IPTV 组播流量控制问题,本文提出了一种基于公平服务多维指针加权轮询调度的策略,通过与

PQWRR 的性能比较,仿真结果表明:在不同业务的带宽分配的公平性方面,FSMWRR 优于 PQWRR;在 IPTV 组播复制输出的平均时延和时延抖动上,FSMWRR 与 PQWRR 的性能相当,因此,在 IPTV 组播复制时,FSMWRR 能够为 IPTV 业务提供较好的时延、时延抖动性能,同时保证了各个业务的带宽分配更为公平。

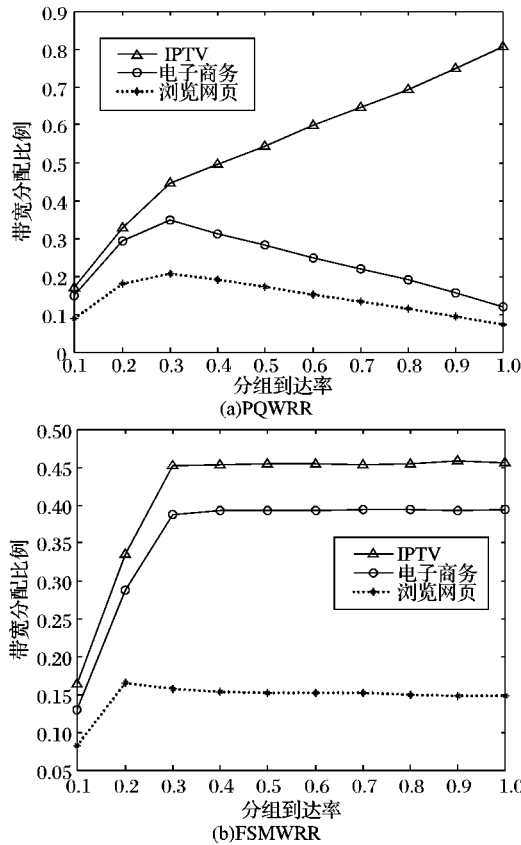


图 4 带宽分配比较

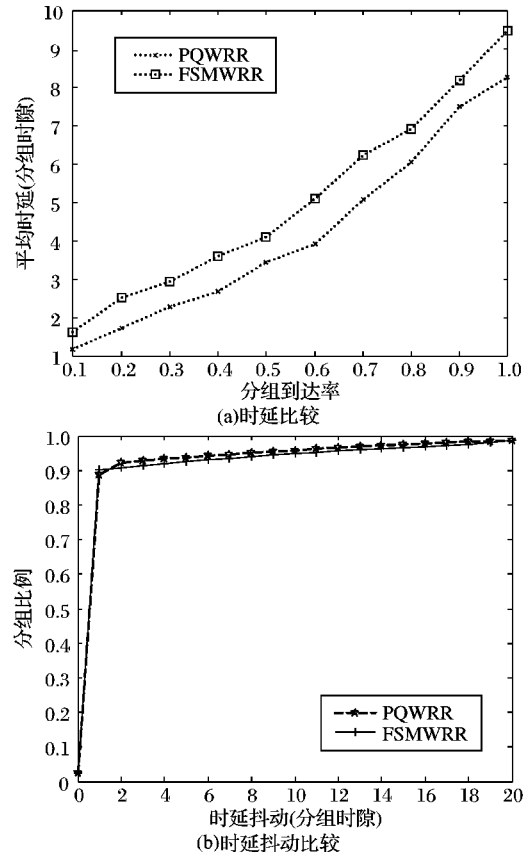


图 5 时延、时延抖动比较

参考文献:

- [1] KATEVENIS M, SIDIROPOULOS S, COURCOUBETIS C. Weighted round-robin cell multiplexing in a general-purpose ATM switch chip [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 9(8): 1265 - 1279.
- [2] MAO J, MOH W M, WEI B. PQWRR scheduling algorithm in supporting of DiffServ[C]//IEEE International Conference on Communications. Helsinki, Finland: IEEE Press, 2001, 3: 679 - 684.
- [3] MAY M, BOLOT J C, JEAN-MARIE A. Simple performance mod-

- els for differentiated services schemes for the Internet [C]// IEEE INFOCOM'99. New York: IEEE Press, 1999: 1385 - 1394.
- [4] SAHU S, TOWSLEY D, KUROSE J. A quantitative study of differentiated services for the Internet [C]// IEEE Globecom'99. [S. l.]: IEEE Press, 1999.
- [5] 应辉,唐小我. 排队论: 基础与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000: 55 - 60.
- [6] 王婷. 大规模接入汇聚路由器复用分复用单元中的流量管理技术及实现[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2007.

(上接第 1830 页)

- [2] HEIDEMANN J, LI Y, SYED A, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking [C]// Processing of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE Press, 2006: 228 - 235.
- [3] MIN K P, RODOPLU V. UWAN-MAC: An energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(3): 710 - 720.
- [4] AITSAADI N, ACHIR N, BOUSSETTA K, *et al.* Differentiated underwater sensor network deployment [C]// Europe OCEANS. Washington, DC, IEEE Press, 2007: 1 - 6.
- [5] JURDAK R, RUZZELLI A G, O' HARE G M P, *et al.* Design considerations for deploying underwater sensor networks [C]// International Conference on Sensor Technologies and Applications. Valencia Spain: IEEE Press, 2007: 227 - 232.

- [6] 洪申. 水声学原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [7] 周延. 水声通信信道射线模型的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [8] DESAI M, ANJUNATH M D. On the connectivity in finite Ad Hoc networks [J]. IEEE Communication Letters, 2002, 6(10): 437 - 439.
- [9] NIKOLAY K. Mobile radio channel modeling in Matlab [J]. Journal of Radio Engineering, 2003, 12(4): 12 - 16.
- [10] YANG W B, YANG T C. High frequency channel characterization for Mary frequency shift keying underwater acoustic communication [J]. Journal of Acoustics Science of America, 2006, 120(5): 2615 - 2626.