

水声网络通信性能分析

李宇 黄海宁

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要: 该文根据水声信道传播特性及水声网络结构特征,建立了基于水声网络的通信性能分析模型,并仿真分析了对等网络和汇聚网络两种水声网络结构的通信性能与节点间距、网络规模、工作繁忙度以及发射功率等因素的联系,结果表明通过适当的网络设置和协议设计能够优化网络的通信性能,并且存在使通信带宽效率最优的水声网络节点间距。该文的研究成果对水声网络应用具有指导意义。

关键词: 水声网络, 水声通信, 信道容量, 带宽效率

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1564-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00888

Performance Analysis on Communication of Underwater Acoustic Networks

Li Yu Huang Hai-ning

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A performance analytic model for underwater acoustic networks is presented in this paper. This model is established by the characteristic of underwater channel propagation and networking. Numerical simulation results indicate that the bandwidth efficiency of peer-to-peer network and centralized network both are relative with network scale, the workload of node, interval between nodes and transmitted power. The appropriated networking and protocol design can improve the communication performance of underwater acoustic networks, achieve optimum nodes' interval for bandwidth efficiency. Research results in this paper can be use to guide application for underwater acoustic networks.

Key words: Underwater acoustic networks; Underwater acoustic communication; Channel capacity; Bandwidth efficiency

1 引言

近年来,随着水声通信技术与应用的日臻成熟,通过水下通信机的声互连,使水下设备组织成网,成为未来水声通信发展的重要方向。水声网络可以广泛用于海洋环境监控、资源勘探、水下导航、以及近海防御等领域,使原来孤立的测量或探测设备能够相互联系与配合,从而提升整个系统的性能与效率^[1]。

有别于点对点通信链路,水声网络中节点间的通信链路除了受水声信道(噪声、多途等)的影响之外,还受网络中其它节点通信串扰的影响^[2-4]。因此,水声网络通信性能(如信道容量等),不仅受限于信道自身,而且与整个网络的运行状况和节点的

分布也有密切的关系^[5,6]。本文将通过构建水声网络性能分析模型,比较了对等网络和聚集网络两种结构的水声网络的通信性能,分析网络节点间距、网络规模、工作繁忙度以及发射功率等因素对网络通信性能的影响,并讨论优化网络通信性能的设计思路。

本文按如下结构组织:第2节将构建水声网络性能分析模型,并给出分析函数;第3节将通过数值仿真讨论两种网络结构下,网络通信性能与影响因素之间的关系;最后将给出全文的结论。

2 系统分析

2.1 信号模型

总体而言,水声网络可以分为两类:一类是汇聚网络,即网络具有一个汇聚节点,地理上分散的其它节点所发送的信息,经过多级中继传送最终集中于汇聚节点。这类网络中各节点的工作负荷是不相同的,且越接近汇聚节点的节点因为承担的中继

2009-06-19 收到, 2010-02-04 改回

国家 863 计划项目(2006AA09Z117)和国家自然科学基金项目(60672118, 10904160)资助课题

通信作者: 李宇 ly@mail.ioa.ac.cn

任务越多所以工作负荷越大。另一类是对等网络, 即网络没有汇聚节点, 而各节点地位均等, 承担的工作负荷相同。为不失一般性, 本文所构建的分析模型将兼顾两类网络的特点。

对于任何一个水声网络而言, 网络中任意一个节点在接收通信信息时, 所得到的信号通常包含 3 部分: (1)通信信息的信号; (2)网络中其它节点的相互通信所产生的干扰; (3)环境噪声。后两部分的干扰将影响前一部份信息的重建。因此, 若假设水下声传感器网络的节点数目为 $Q=N+2$, 则当 t 时刻第 i 个节点接收到第 j 个节点所放送的信息时, 节点 i 所接收的信号可以写为

$$x_i(t) = \sqrt{P_j/h_{i,j}}s_j(t + \tau_{i,j}) + \sum_{k=1}^N c_{i,k}^t \sqrt{P_k/h_{i,k}}s_k(t + \tau_{i,k}) + n(t) \quad (1)$$

其中 $s_j(t + \tau_{i,j})$ 是该时刻所期望接收的第 j 个节点发送的通信信号, $s_k(t + \tau_{i,k})$ 是该时刻 k 节点到达 i 节点的干扰信号, 其中 k 表示除 i 和 j 节点之外, 网络中其它的任意一个节点。 $\tau_{i,j}, \tau_{i,k}$ 为到达时延。 P_j, P_k 为节点发射功率。 $h_{i,j}, h_{i,k}$ 为信道传播损失, 有

$$h(r_{i,j}) = r_{i,j}^\beta a^{r_{i,j}} \quad (2)$$

其中 $r_{i,j}$ 是两点之间的距离, β 为衰减系数, 一般取 1 到 2; a 为吸收系数, 有

$$a = 10^{\alpha(f)/10} \quad (3)$$

这里有^[7]

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003 \quad (4)$$

α 的单位为 dB/km, f 的单位为 kHz。

另外, 式(1)中的 $c_{i,k}^t$ 为 t 时刻 k 节点对 i 节点的干扰因子, 如果此时 k 节点对干扰有贡献则 $c_{i,k}^t = 1$, 反之 $c_{i,k}^t = 0$ 。

如果假设环境噪声功率为 σ_n^2 , 由式(1)可以得到节点 i 的接收信号/干扰噪声比(SINR_{*i*})等于:

$$\text{SINR}_i = \frac{P_j/h_{i,j}}{\sum_{k=1}^N c_{i,k}^t P_k/h_{i,k} + \sigma_n^2} \quad (5)$$

对于随意网格, 如图 1 所示, 以接收节点 i 为中心, 假设网络中各节点只与邻近节点构成直接的通信链路, 且邻近节点之间的最小距离为 d , 则发送节点 j 到接收节点 i 的距离为 d , 而其它节点到接收节点 i 的距离, 均不小于 d , 可以设 $r_k = n_k d$, 且 $n_k \geq 1$ 。

同时, 若以接收节点为中心, 则网络中干扰节点可以按距离接收节点的远近分为 K 个集合, 且有

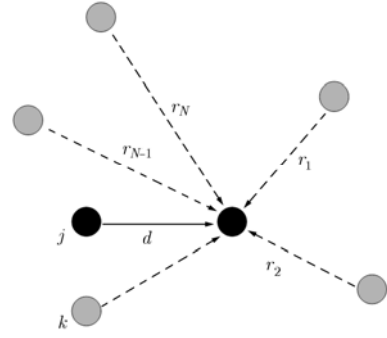


图 1 网络信号模型示意图

$$N = \sum_{k=1}^K N_k \quad (6)$$

其中 N_k 为分布在距离为 r_k 的圆周上的节点数。

若各节点的发射声功率均为 P , 则根据式(2)和式(6)可以得到

$$\begin{aligned} \text{SINR}_i &= \left[\sum_{k=1}^K \gamma_k N_k h_{i,j} / h_{i,k} + \xi_n \right]^{-1} \\ &= \left[\sum_{k=1}^K \gamma_k N_k r_k^{-\beta} a^{(1-n_k)d} + \xi_n \right]^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

这里 $\xi_n = h_{i,j} \sigma_n^2 / P$, γ_k 是节点集合 $\{r_k, N_k\}$ 中起干扰作用节点的比例。

2.2 水声网络通信性能分析模型

根据上节讨论可知, 水声网络节点通信链路的干扰水平, 主要由网络的节点规模、节点的工作状态、工作频率、发射功率以及节点之间的距离等因素决定。其中, 节点有两种工作状态: 一种是通信状态, 一种是休眠状态。由于水声网络是能量限网络, 因此为了尽量地节省能量, 节点在多数时间内都选择处在休眠状态, 而只有节点处在通信状态时才会造成对其它节点的干扰。一般情况下, 对于网络中任意一个节点而言, 可能对其它节点产生干扰的时间取决于节点本身的发射时间。节点发射时间在整个工作时间的比例越大, 即工作繁忙度越大, 对其它节点通信链路的影响也越大。因此, 若假设 λ_k 为节点 k 发射时间 T_k^A 占总工作时间 T 的比率期望值, 即: $\lambda_k = E(T_k^A / T)$ 。则根据统计学原理, 当节点 j 和 i 进行通信时, 节点 k 可能对该通信链路产生干扰的概率等于 λ_k , 即 $p(c_{i,k}^t = 1) = \lambda_k$ 。由于水声通信是半双工的, λ_k 一般不会超过 0.5。

若设整个网络中起干扰作用的节点集合为 $\Omega = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_K\} = \{\gamma_1 N_1, \gamma_2 N_2, \dots, \gamma_K N_K\}$, 因为各节点之间是相互独立的, 所以对集合 Ω 的 SINR_{*i*} 的发生概率可以写作:

$$p_{\Omega}^{\text{SINR}_i} = \prod_{n \in \Omega} \lambda_n \prod_{m \notin \Omega} (1 - \lambda_m) \quad (8)$$

此时，由式(7)可得对应的 $SINR_i$ 值为

$$SINR_i |_{m \in \Omega} = \left[\sum_{k=1}^K \psi_k n_k^{-\beta} a^{(1-n_k)d} + \xi_n \right]^{-1} \quad (9)$$

这里有两种极限情况，一种是网络中其它节点对链路均未产生干扰，这个情况下由式(7)可得

$$p_{\bar{\phi}}^{SINR_i} = \prod_{n=1}^N (1 - \lambda_n)$$

其中 $\bar{\phi}$ 表示空集合，对应的 $SINR_i$ 值为 $1/\xi_n$ 。

一种是网络中其它节点对链路都有干扰影响，这个情况下有

$$p_{\bar{\phi}}^{SINR_i} = \prod_{n=1}^N \lambda_n$$

其中 $\bar{\phi}$ 表示全集，此时对应的 $SINR_i$ 值为

$$\left[\sum_{k=1}^K N_k n_k^{-\beta} a^{(1-n_k)d} + \xi_n \right]^{-1}$$

为了研究干扰对通信的影响，必须研究低信干比的发生概率，因此需要获得 $SINR_i$ 分布函数。由上分析可以得到 $SINR_i$ 分布函数为

$$F(x) = p(SINR_i \leq x) = \sum_{SINR_i(\Omega) \leq x} p_{\{n_v\}}^{SINR_i} = \sum_{SINR_i(\Omega) \leq x} \prod_{n \in \Omega} \lambda_n \prod_{m \notin \Omega} (1 - \lambda_m) \quad (10)$$

同理，可以得到 $SINR_i$ 的数学期望为

$$E(SINR_i) = \sum_{x=x_0}^{+\infty} x p_x^{SINR_i} \quad (11)$$

其中 $x_0 = \left[\sum_{k=1}^K N_k n_k^{-\beta} a^{(1-n_k)d} + \xi_n \right]^{-1}$ 。

根据式(11)以及香农定理可得水声传感器网络的期望信道容量^[8]：

$$C_i = B \ln[1 + E(SINR_i)] \quad (12)$$

这里， C_i 的单位为 bit/s， B 为信号带宽。

由式(12)可得期望带宽效率：

$$C_B^i = C_i / B \quad (13)$$

这里 C_B^i 的单位为 bit/(s·Hz)。

3 网络数值仿真

3.1 对等网络

首先分析对等网络的情况，在这类网络中节点的地位均等，任意两个节点之间可能直接或者通过中继完成通信，因此可以认为每个节点的工作繁忙度均相同，即有 $\lambda_1 = \dots = \lambda_N = \lambda$ 。若设 N 个节点中有 M 个节点起干扰作用，则式(8)可以简化为

$$p_M^{SINR_i} = \lambda^M (1 - \lambda)^{N-M} \quad (14)$$

如图 2(a)所示，以正方网格为例，分析图中实线箭头所指接收节点的通信性能，该节点位于网络

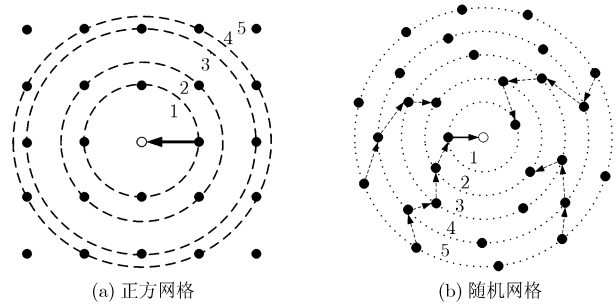


图 2 网络拓扑结构图

的中心位置，即受节点互干扰最严重的位置。假设参数设定如下：网络中节点总数 $Q = 25$ ，节点通信距离 $d = 5$ km，通信频率 $f = 5$ kHz，带宽 $B = 2$ kHz，衰减系数 $\beta = 1.5$ ，吸收系数 $a = 0.3823$ ， $P = 20$ W，噪声级 $NL = 90$ dB。

根据正方网格的拓扑结构，如表 1 所示，网络节点按距离远近可以分为 $K = 5$ 级。

表 1 正方拓扑下节点按距离分布表

k	1	2	3	4	5
r_k	d	$2d$	$\sqrt{2}d$	$\sqrt{5}d$	$2\sqrt{2}d$
N_k	3	4	4	8	4

显然第一级的 3 个邻近节点可能产生的干扰对通信链路的影响最大，如果仅考虑一个邻近节点，由式(9)可得 $SINR_i$ 为 0 dB，而若考虑 3 个邻近节点，则 $SINR_i$ 达到 -4.8 dB。因此，避免邻近节点的干扰，有助于提高网络通信链路的性能。

图 3 分析了在有无邻近节点干扰情况下，信号/噪声干扰比 $SINR_i$ 的概率分布 (λ 分别取 0.05, 0.1, 0.2)。由图可知随着节点工作繁忙度的增加，低 $SINR_i$ 出现的概率不断提高，信道带宽效率也随之降低，例如：出现 $SINR_i$ 低于 0 dB 的概率，在 $\lambda = 0.05$ 时，为 0.15/0.012(有/无邻近干扰)，而当 $\lambda = 0.1, 0.2$ 时，分别增加到 0.33/0.08 和 0.7/0.4，对应的信道带宽效率期望值则由 2.44/2.90(0.05)下降到 1.83/2.26(0.1)和 1.28/1.66(0.2)。

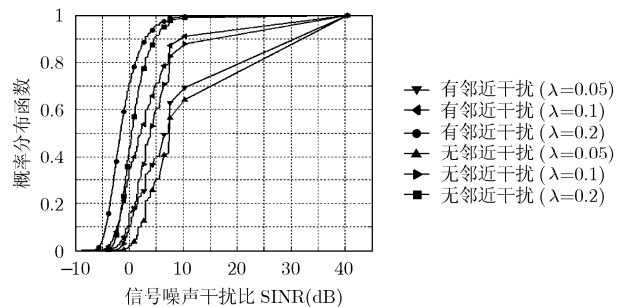


图 3 信号/噪声干扰比的概率分布图

由上节的分析可知,网络的带宽效率受由网络的节点间距、工作繁忙度、发射功率、网络规模等因素影响。图 4(a)至 4(c)分别分析了不考虑邻近节点干扰时,在不同 λ 、发射功率和网络节点数下,信道带宽效率与节点间距之间的关系。由图可知存在使通信性能最优的节点间距,这是因为如果节点间距离较近,则节点互干扰的影响占主导;如果节点间距离较远,则信号传播衰减大,信噪比损失严重。

图 4(a)比较了 $\lambda = 0.05, 0.1, 0.5$ 时带宽效率随节点间距变化的情况(其它参数同上设定),可以看出随着网络工作繁忙度的增加,带宽效率是递减的,而出现最大带宽效率的最优间距则由 28 km 增加到 40 km,因此可以认为对于繁忙的网络,适当地扩大节点之间的距离反而有助于通信性能的提高。图 4(a)中还分析了两种极端情况,一种是网络只受环境噪声的情况,此时带宽效率随节点间距的增加而单调递减,但在间距相同的条件下带宽效率是最高的,因此是网络工作条件最好的情况,只有当 λ 无限接近于零或者整个网络的工作完全时分复用时才可能出现;另一种是不论何时接收节点均受到背景噪声和其它所有节点干扰的共同影响,这是网络最坏的工作情况,仅当 λ 等于 1 时才存在,然而由于水声网络是半双工的, λ 一般不会超过 0.5 因此这种情况实际是不存在的,但是可以以此作为性能极限下界分析网络。另外,由图 4(a)还可以看出当节点间距增加到一定程度(稀疏网络),带宽效率将与网络繁忙度无关。

图 4(b)比较了不同输出声功率的情况($P = 20, 40, 100$ W, 其它参数同上设定, $\lambda = 0.05$),可以看出当节点间距较近(密集网络)时,由于网络受限于节点互干扰,增加信号的发射功率并不能提高带宽效率;随着节点间距的增大,使得互干扰影响减弱,增大发射功率可以有效地提高带宽效率,而且出现最大带宽效率的最优间距也由 28 km 增加到

35 km。

图 4(c)比较了不同网络节点数的情况($Q = 25, 49, 81$, 其它参数同上设定, $\lambda = 0.05, P = 20$ W),分别对应 $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ 的正方网格,如果不考虑邻近节点干扰,实际起干扰作用的节点分别为 20, 44, 76。由图可知在对等网络中网络规模对带宽效率的影响并不大,虽然节点数分别扩大了近 2 倍和 4 倍,但是带宽效率分布差别不大,其最优节点间距均为 28 km,带宽效率峰值相差不到 0.1,这是因为在节点密度不变的条件下所增加的节点向外扩展,对位于中心的通信链路的影响趋弱。

3.2 汇聚网络

在汇聚网络中,越接近汇聚节点越繁忙。如图 2(b)所示,若以随机网络为例,按距离汇聚点的远近分为 K 级,且每级节点到汇聚节点的距离满足 $r_k = kd$, 这里 d 表示节点之间的最短距离,而 $\lambda_k = (K - k + 1)\lambda$, 这里 λ 表示最外层节点的工作繁忙度。本节中将分析图 2(b)中汇聚节点的通信性能,仍然不考虑邻近干扰问题。

若设 $K=6$, 各级节点数分别为 $[2, 4, 6, 8, 10, 12]$, λ 取 0.05, 其它参数同 3.1 节设定,图 5 比较了汇聚网络结构与对等网络结构的区别,由带宽效率分布可以看出:与相同节点分布但 λ 分别取 0.05 和 0.3 的对等网络 1 和对等网络 2 相比,聚集网络的性能居于两者之间,同时由于节点的繁忙度由远及近是递增的,聚集网络性能更接近于更繁忙的对等网络 2。

图 6(a)和 6(b)分别比较了不同频率和网络节点数的情况下,信道带宽效率与节点间距之间的关系。

由图 6(a)可以看出频率因素对带宽效率分布的影响较大,由 5 kHz 到 20 kHz(其它参数同上设定),最优节点间距由 36 km 缩小到 6 km,同时峰值带宽效率由 2.3 提高到 3.3。究其原因主要是因为水声信道对不同频率传播的影响不同,因此中高频水声网络更适于节点密集而数据率较高的应用,低频水

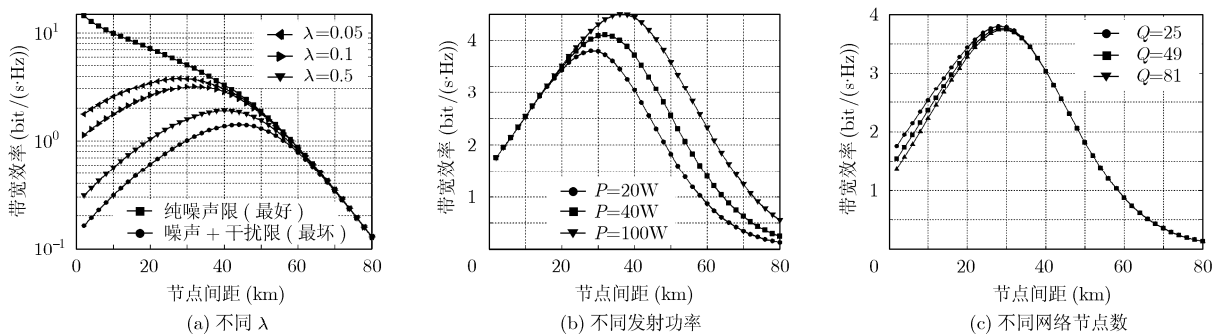


图 4 信道带宽效率与节点间距的关系图(对等网络)

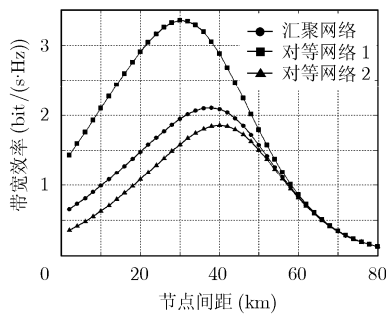
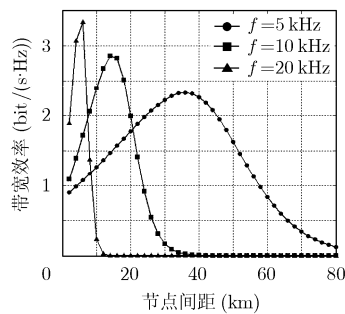
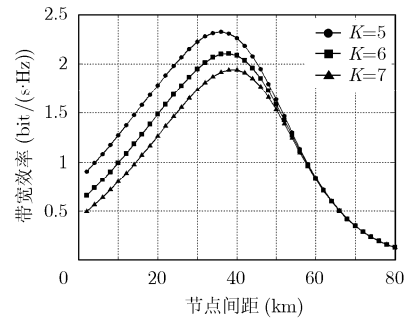


图5 汇聚网络与对等网络的带宽效率对比图



(a) 不同频率



(b) 不同网络节点数

图6 信道带宽效率与节点间距的关系图(汇聚网络)

声网络适于节点稀疏而数据率不高的应用。

图6(b)比较了不同节点数的性能分布,对应节点级数5,6,7节点总数分别达到30,42,56。可以看出与图4(c)对等网络情况不同,汇聚网络的节点规模对通信性能的影响较为明显,这是因为虽然增加的节点分布在网络外围,但是它导致由远及近的各节点的工作繁忙度增加,所以对位于中心的通信性能影响较明显。

4 结束语

通过上述分析与讨论,可以发现水声网络的通信性能主要受网络的节点规模、节点的工作状态、工作频率、发射功率以及节点之间的距离等因素的影响。通过本文所得到的性能分析模型,根据不同的应用需求,可以进行有针对性的水声网络优化设计和协议改造。因此,对构建高性能水声网络具有指导意义。

参考文献

- [1] Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 103-116.
- [2] Stojanovic M. Design and capacity analysis of cellular-type underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(2): 171-181.
- [3] Lucani D, Medard M, and Stojanovic M. On the relationship

between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel, in Proc. IEEE Oceans'08 Conference, Kobe, Japan, April 2008, 2: 1-6.

- [4] Gupta P and Kumar P. R. The capacity of wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [5] 李宇, 黄海宁, 李淑秋, 张春华. 能量有效的水下声传感器网络研究[J]. *声学及电子工程*, 2007, 增刊, 49-51.
- Li Yu, Huang Hai-ning, Li Shu-qiu, and Zhang Chun-hua. Search on energy efficiency about underwater acoustic sensor network[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2007, Suppl. 49-51.
- [6] Radosevic A, Proakis J, and Stojanovic M. Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels, in Proc. IEEE Oceans'09 Conference, Bremen, Germany, May, 2009, 3: 1-8.
- [7] Berkhovskikh L and Lysanov Y. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. New York: Springer, Third Edition, 2002, 1: 10-12.
- [8] Proakis J G and Salehi M. Digital Communication[M]. Boston: McGraw-Hill, Fifth Edition, 2008, 5: 354-366.

李宇: 男, 1977年生, 副研究员, 博士, 研究方向为水声信号处理。

黄海宁: 男, 1969年生, 研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理。