

# 基于长延时信道的水下传感器网络中继选择及功率分配优化算法

刘自鑫, 金志刚, 苏毅珊\*, 李云

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

(\* 通信作者电子邮箱 suyishan\_tj@hotmail.com)

**摘要:**针对水下传感器网络(UWSN)中水声信道衰落特性随时间—空间—频率随机变化的特点,在此提出利用中继协作网络获得分集增益从而提高水下网络通信质量的水下协作网络模型。基于该协作模型,提出了一种基于信道增益和信号延时双指标最佳中继评价标准,并提出了基于该标准的最佳中继选择算法与基于最小误比特率准则的功率分配算法。仿真结果表明,相比于传统最佳中继选择算法,传输延时降低约16.7%;相对于等功率分配,该算法在典型场景下使误比特率降低1.81 dB。

**关键词:**水下传感器网络;协作;延时;中继选择;功率分配

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

## Relay selection and power allocation optimization algorithm based on long-delay channel in underwater wireless sensor networks

LIU Zixin\*, JIN Zhigang, SU Yishan, LI Yun

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to deal with the channel fading in Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN) changing randomly in time-space-frequency domain, underwater cooperative communication model with relays was proposed in this paper to improve reliability and obtain diversity gain of the communication system. Based on the new model, a relay selection algorithm for UWSN was proposed. The new relay selection algorithm used new evaluation criteria to select the best relay node by considering two indicators: channel gain and long delay. With the selected relay node, source node and relay nodes could adjust their sending power by the power allocation algorithm which was based on the principle of minimizing the bit error rate. In a typical scenario, by comparing with the traditional relay selecting algorithm and equal power allocation algorithm, the new algorithm reduces the delay by 16.7% and lowers bit error rate by 1.81 dB.

**Key words:** Underwater Wireless Sensor Network (UWSN); cooperation; delay; relay selection; power allocation

## 0 引言

水下传感器网络(Underwater Wireless Sensor Network, UWSN)近年来在海洋数据搜集、污染控制、离岸勘探、灾难预防、辅助导航和战术观察<sup>[1]</sup>等方面的应用越来越广泛,由于电磁波在水下的快衰落特性,所以声波是迄今为止发现的最适宜在水下远距离传播的能量形式。水声信道特性参数随着时—空—频的变化而随机变化,噪声高、带宽窄、传输延时大等不利因素使得水下通信传输误码率高、速率低等问题难以解决。虽然多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术能够通过时空分集提高通信的可靠性<sup>[2]</sup>,但是水下节点由于体积等限制因素不易安装多天线,所以采用中继协作通信方式,使得单天线用户可以通过中继节点的协作发送信息,既解决了信道衰落严重的问题,又能获取分集增益。

在协作通信中,中继节点的选择是一个关键问题。目前无线网络中有不少中继节点选择算法<sup>[3]</sup>,根据不同的目标大致有以下几类:基于信道状态信息的中继节点选择算法,比如

文献[4]中基于信道容量增益,文献[5]提出的基于瞬时信道信息等;基于效用函数的中继节点选择算法,如文献[6]提出三种中继选择方法:最大总效用、最小效用最大化和最大乘积效用;基于协作区域的中继节点选择算法,如文献[7]中基于成对差错概率等。虽然中继选择算法在陆地无线通信中已有很多应用,但是因为水下环境的特殊性和复杂性,需要在原有技术中考虑并加入水下环境特殊性因素。由于声波在水中的速度约为1500 m/s,比陆地无线网络中电磁波的速度低5个数量级,所以水下声通信的传输延时不可忽略,在中继节点选择时也要考虑中继节点协作带来的耗时问题,耗时越小则系统通信效率越高。

## 1 UWSN 中继协作通信系统模型

在协作通信系统中,当引入 $m$ 个中继节点参与协作时,在接收端可以收到 $m+1$ 路信号,对此 $m+1$ 路接收信号进行相干合并带来空间分集增益,增加接收信噪比。为了降低能耗和数据包碰撞,在多个中继节点可用时选择一个最佳中继

**收稿日期:**2014-01-08;**修回日期:**2014-02-21。 **基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61162003);青海省科技计划项目(2012-ZR-2989);海南省应用技术与开发专项项目(ZDXM2014086)。

**作者简介:**刘自鑫(1989-),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向:水下无线传感器网络、协作通信;金志刚(1972-),男,上海人,教授、博士生导师,主要研究方向:传感器网络、网络安全、图像处理;苏毅珊(1985-),男,广西南宁人,博士研究生,主要研究方向:水下无线传感器网络、通信协议;李云(1978-),女,广西南宁人,博士研究生,主要研究方向:水下传感器网络、认知网络。

节点参与协作。尽管合并的信号只有两个,但是选择一个最佳中继节点相当于在分集合并时采用了选择合并,如果中继节点的数量为  $m$ ,目的节点最终获得的分集增益应该是  $m+1$ ,因此中继节点越多,性能改善越大<sup>[8]</sup>。

UWSN 协作通信系统模型如图 1 所示,  $S$  为源节点,  $D$  为目的节点,  $1 \sim m$  为可选中继节点。参数定义及设置如表 1 所示。

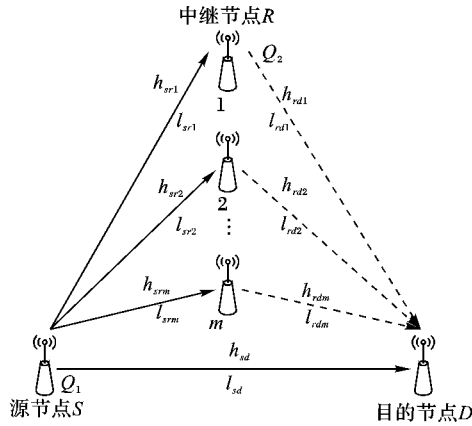


图1 UWSN 协作通信系统模型

表1 系统参数定义及设置

参数	定义
$m$	可选中继节点个数
$Q_1, Q_2$	源节点, 中继节点发送功率
$h_{sri}$	源节点到第 $i$ 个中继节点信道衰落系数
$l_{sri}$	源节点到第 $i$ 个中继节点的距离
$h_{rdi}$	第 $i$ 个中继节点到目的节点信道衰落系数
$l_{rdi}$	第 $i$ 个中继节点到目的节点的距离
$h_{sd}$	源节点到目的节点间的信道衰落系数
$l_{sd}$	源节点到目的节点间的距离

## 2 基于信道和延时的中继选择及功率分配

### 2.1 基于信道和延时综合指标的最佳中继选择算法

针对水下环境长传输延时的特殊性,提出把信道状态信息和传输延时联合做指标的最佳中继选择算法,这种中继节点的选择由中继节点信道特性和中继节点相对于目的节点的位置共同决定。

#### 2.1.1 算法原理

首先考虑信道条件对最佳中继选择的影响。中继节点信道性能评估标准用源—中继、中继—目的间信道的瞬时功率增益的调和平均数归一化表示,第  $i$  个中继节点的信道性能衡量标准是

$$\varphi_{meuni} = m_H(H_{rdi}, H_{sri}) = \frac{2H_{rdi}H_{sri}}{H_{rdi} + H_{sri}} \quad (1)$$

信道增益调和平均数  $\varphi_{meuni}$  反映了中继节点信道特性,该值越大,信道性能越好。为了综合评估标准的制定,对其进行归一化,  $\psi_i = \varphi_{meuni}/H_0$ ,  $H_0$  是系统设定的信道增益归一化标准值。

其次在 UWSN 中传输延时不能忽略。中继协作过程分两个阶段,第一阶段源节点向目的节点和中继节点发送信息,第二阶段中继节点向目的节点发送信息,所以在目的节点处对信息进行合并需等待时长即为第二阶段所耗费的传输延时

(不计中继节点对信息处理的时间)。则目的节点等待时间为  $\Delta t_i = l_{rdi}/v$ ,  $v$  为水下声波速度。等待时间越短,则单次通信耗时越短,系统整体通信效率越高。对该等待时间进行归一化,  $\tau_i = \Delta t_i/T_0$ ,  $T_0$  是系统设定的等待时间归一化标准值。

表2 中继选择算法参数定义及设置

参数	定义	公式
$X$	数据包	包含节点发送时间
$h$	信道衰落系数	$h = a(f)^{\frac{1}{1000}}$
$\alpha$	信道衰落指数	
$H$	信道增益	$H = hl^{-\alpha}$
$m_H(x, y)$	调和平均数	$m_H(x, y) = 2xy/(x + y)$

在 UWSN 中提出综合考虑上述两种因素的中继选择综合评估标准  $R_{besti} = \psi_i - \tau_i$ , 中继节点信道增益越大越好,等待时间越小越好,故  $R_{besti}$  越大越好,通过计算各个中继节点综合评估值并对比,选择综合评估值最大的中继节点作为最佳中继节点。

#### 2.1.2 算法流程

1) 所有中继节点向源、目的节点发送  $X$ , 源节点向目的节点发送  $X$ ,  $X$  含发送时间  $t_1$ , 假设时间同步, 接收节点在  $t_2$  接收  $X$ , 基于波达时间 (Time of Arriving, ToA)<sup>[9]</sup> 测距方法计算节点间距  $l = v(t_2 - t_1)$  并反馈给发送节点。

2) 中继节点根据通信频率求解信道吸收系数  $a(f)$ , 求解经验公式<sup>[10]</sup> 为

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

3) 各中继节点计算其到源、目的节点信道增益  $H_{sri}$ 、 $H_{rdi}$  并反馈给源节点。

4) 源节点计算各中继节点  $\varphi_{meuni}$  并归一化。

5) 各中继将  $l_{rdi}$  反馈给源节点, 源节点计算各中继转发信息传输延时  $\Delta t_i = l_{rdi}/v$  并归一化。

6) 源节点根据 3)、4) 步结果计算各中继对应  $R_{besti}$  并排序, 选择  $R_{besti}$  最大的中继作为最佳中继。

### 2.2 基于最佳中继的功率分配优化算法

选择最佳中继节点之后, 如何分配源节点和中继节点的功率才能使接收性能最好? 功率分配优化就是在总功率约束的条件下, 根据源—中继、中继—目的、源—目的节点之间的信道状况分配源节点和中继节点的功率, 使得最终目的节点接收差错率最小, 即在条件  $Q = Q_1 + Q_2$  下, 使误符号率最小<sup>[8]</sup>。

表3 功率分配优化算法参数定义

参数	定义
$Q$	总发送功率
$x$	源节点发送信息
$n_{sd}, n_{sr}, n_{rd}$	源—目的, 源—中继, 中继—目的信道噪声
$\delta_0^2$	信道加性噪声方差
$\delta_{sd}^2$	源—目的间信道增益统计方差
$\delta_{sr}^2, \delta_{rd}^2$	源—中继, 中继—目的信道增益统计方差

采用选择性译码转发 (Decode-Forward, DF) 中继方式。首先, 源节点向目的节点和中继节点广播信息, 目的节点和中

继节点接收到的信号分别为:

$$y_{sd} = \sqrt{Q_1 H_{sd}} x + n_{sd} \quad (3)$$

$$y_{sr} = \sqrt{Q_1 H_{sr}} x + n_{sr} \quad (4)$$

若中继能正确译码,则以功率  $Q_2$  将译码信号转发给目的端,若源—中继节点间信道严重衰落导致中继不能正确译码,则中继不发或保持空闲,即中继实际发送功率有两种可能,

$\tilde{Q}_2 = Q_2$  或  $\tilde{Q}_2 = 0$ , 则目的节点接收中继转发信号为

$$y_{rd} = \sqrt{\tilde{Q}_2 H_{rd}} x + n_{rd} \quad (5)$$

目的节点从源节点和中继节点处接收到信号  $x$  的两个副本,信号合并方式有三种:选择式合并、等增益合并和最大比合并<sup>[11]</sup>,其中最大化总信噪比的最优方法是最大比合并(Maximal-Ratio Combining, MRC),MRC 输出信噪比等于所有分支信噪比的和。假设  $x$  平均能量为 1,则 MRC 输出信噪比为

$$\gamma = \frac{Q_1 H_{sd} + \tilde{Q}_2 H_{rd}}{\delta_0^2} \quad (6)$$

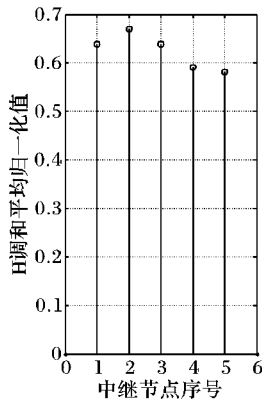
由文献[12]知道,M-PSK 的误比特率为

$$P_{ber}(\gamma) = \int_0^{(M-1)\pi/M} \frac{1}{\pi} \exp\left(-\frac{C_1 \gamma}{\sin^2 \beta}\right) d\beta \quad (7)$$

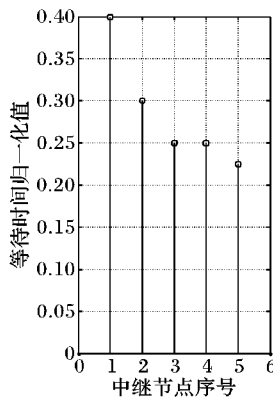
其中  $C_1 = \sin^2(\pi/M)$ , 则中继译码错误的概率为  $P_{ber}\left(\frac{Q_1 H_{sr}}{\delta_0^2}\right)$ ,考虑  $\tilde{Q}_2 = Q_2$  或  $\tilde{Q}_2 = 0$  两种情形,误比特率基于条件概率的计算公式为

$$P_{ber} = P_{ber}\left(\frac{Q_1 H_{sr}}{\delta_0^2}\right) \times P_{ber}(\gamma) |_{\tilde{Q}_2=0} + \left[1 - P_{ber}\left(\frac{Q_1 H_{sr}}{\delta_0^2}\right)\right] \times P_{ber}(\gamma) |_{\tilde{Q}_2=Q_2} \quad (8)$$

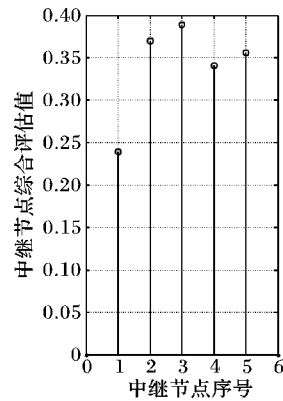
当  $Q_1/\delta_0^2$  和  $Q_2/\delta_0^2$  足够大时<sup>[13]</sup>,采用 M-PSK 调制的系统误比特率(Bit Error Rate, BER)可以近似为



(a) 各中继节点信道增益调和平均数归一化值



(b) 目的节点等待时间归一化值



(c) 中继节点信道综合评估值对比

图2 各中继节点信道增益、延时、综合评估值对比

从图2(a)可以看出,第2个中继节点的信道增益最大,信道特性最好;图2(b)显示第1、2个中继节点的传输延时比其他中继节点传输延时高很多,降低整体通信效率;从图2(c)可知第3个中继节点的综合评估值最高,即第3个中继节点在信道性能和传输延时两个因素上取得了最佳平衡。

基于信道状态信息选择最佳中继节点的传统方法选择第2个中继节点,基于信道和延时综合指标的方法选择第3个中继节点作为最佳中继节点,相比于前者,后者信道增益调和

$$P_{ber} \approx \frac{\delta_0^4}{C_1^2 Q_1 \delta_{sd}^2} \left( \frac{C_2^2}{Q_1 \delta_{sr}^2} + \frac{C_3}{Q_2 \delta_{rd}^2} \right) \quad (9)$$

其中,  $C_2 = \frac{M-1}{2M} + \frac{\sin \frac{2\pi}{M}}{4\pi}$ ,  $C_3 = \frac{3(M-1)}{8M} + \frac{\sin \frac{2\pi}{M}}{4\pi} - \frac{\sin \frac{4\pi}{M}}{32\pi}$ 。

将  $Q_2 = Q - Q_1$  代入式(9),对  $Q_1$  求导并令导数为0,误比特率最小时最佳功率分配比为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{C_3^2 \delta_{sr}^2 + 8C_2^2 C_3 \delta_{rd}^2}}{2C_3 \delta_{sr}} \quad (10)$$

可见,功率分配取决于源—中继、中继—目的间信道条件,而与源—目的间的信道条件无关。

### 3 实验结果与分析

网络模型如图1所示,假设信道为独立同分布的瑞利平坦衰落信道,使用 Matlab 仿真软件。

#### 3.1 基于信道和延时综合指标的最佳中继选择实验

设定  $l_{sd} = 1$  km, 参考 AquaComm modem 频率范围 16 kHz ~ 30 kHz 和 S2C R 12/24 modem 频率范围 13 kHz ~ 24 kHz,设定载波频率  $f = 20$  kHz,  $H_0$  设定为距离  $l = 0.3$  km 时的信道增益,  $T_0$  设定为  $l = 2$  km 时的传输延时,共有 5 个可选中继节点,水下声速  $v = 1500$  m/s,  $\alpha$  一般取 1.5,各中继节点到源节点和目的节点的距离设置如下。

表4 各中继节点到源、目的节点距离 km

中继节点序号	$l_{sr}$	$l_{rd}$	中继节点序号	$l_{sr}$	$l_{rd}$
1	0.5	0.8	4	1.0	0.50
2	0.6	0.6	5	1.3	0.45
3	0.8	0.5			

计算各中继节点信道增益调和平均数归一化值和目的节点等待中继信息的时间归一化值,以及本文提出的各中继节点信道综合评估值,分别如图2(a)、(b)、(c)所示。

平均数仅减小了 4.5537%,但是传输延时减小了 16.6667%。基于节点位置选择最佳中继的方法选择延时最小的第5个中继节点,第3个中继节点与之对比,虽然传输延时归一化值增加了 0.025,但是信道增益调和平均数归一化值却增长了 0.0579,所以第3个中继节点的综合性能是最优的。

#### 3.2 基于最佳中继的功率分配比实验

首先研究误比特率和功率分配比的关系。即使渐进最优

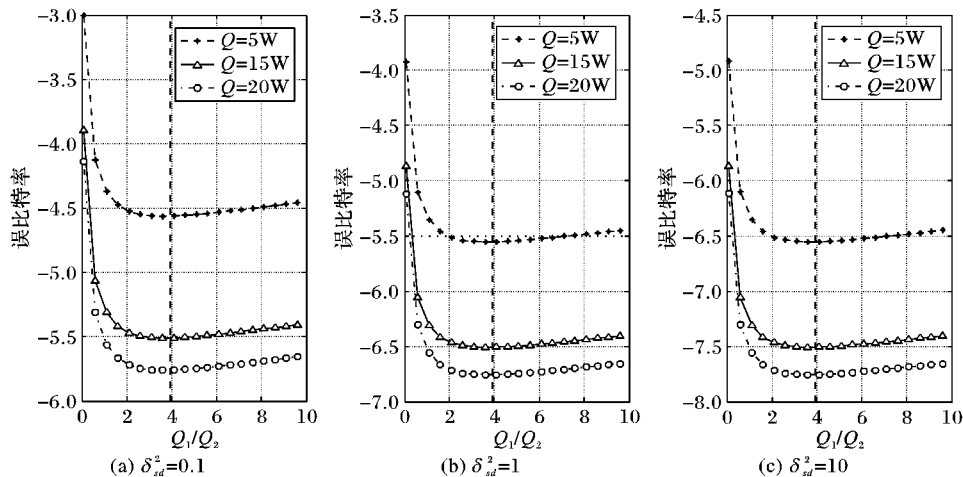
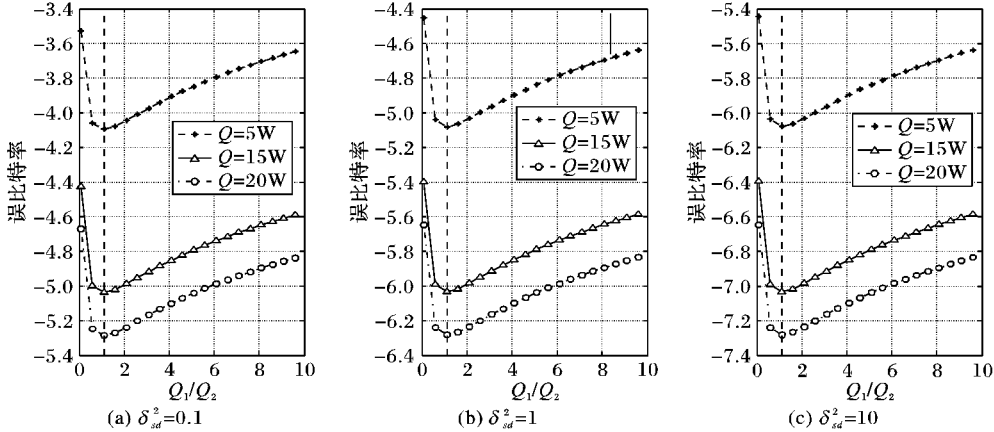
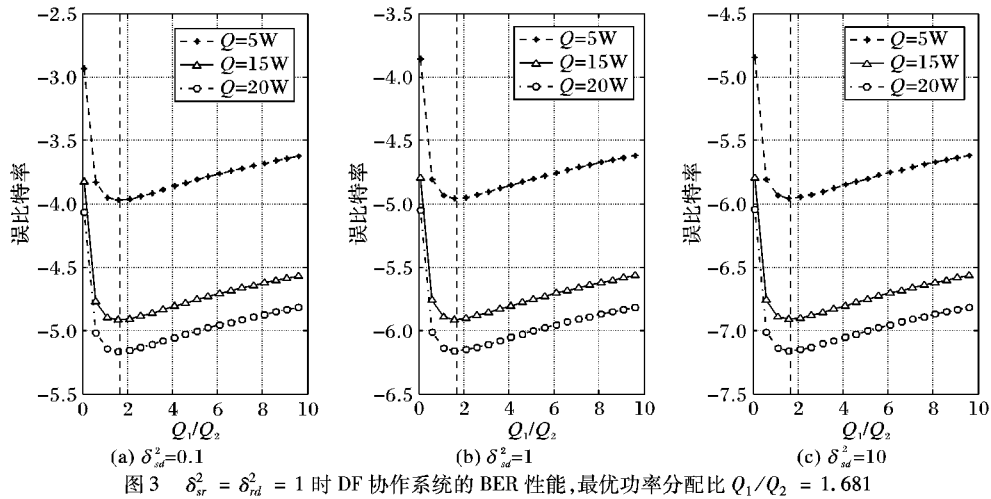
功率分配是在高信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 下确定的, 它也为实际中的 SNR 场景提供了一个很好的解决方法。对采用 QPSK 调制的 DF 协作系统在不同衰落场景下, 本文将 BER 作为  $Q_1/Q_2$  的函数画在图中。

1)  $\delta_{sr}^2 = \delta_{rd}^2 = 1$ , 考虑三种不同的源到目的节点的信道质量: (a)  $\delta_{sd}^2 = 0.1$ , (b)  $\delta_{sd}^2 = 1$ , (c)  $\delta_{sd}^2 = 10$ , 结果如图 3 所示, 最优功率分配比为  $Q_1/Q_2 = 1.681$ 。由图中可见在不同总发射功率  $Q = 5\text{ W}$ 、 $15\text{ W}$ 、 $20\text{ W}$  和不同信道方差  $\delta_{sd}^2$  下,  $Q_1/Q_2 = 1.681$  几乎提供了最优的性能。

2)  $\delta_{sr}^2 = 10$ ,  $\delta_{rd}^2 = 1$ , 考虑三种不同的源到目的节点的信

道质量: (a)  $\delta_{sd}^2 = 0.1$ , (b)  $\delta_{sd}^2 = 1$ , (c)  $\delta_{sd}^2 = 10$ , 结果如图 4 所示, 最优功率分配比为  $Q_1/Q_2 = 1.1039$ 。由图中可见, 在不同总发射功率  $Q = 5\text{ W}$ 、 $15\text{ W}$ 、 $20\text{ W}$  和不同信道方差  $\delta_{sd}^2$  下,  $Q_1/Q_2 = 1.1039$  几乎提供了最优的性能。

3)  $\delta_{sr}^2 = 1$ ,  $\delta_{rd}^2 = 10$ , 考虑三种不同的源到目的节点的信道质量: (a)  $\delta_{sd}^2 = 0.1$ , (b)  $\delta_{sd}^2 = 1$ , (c)  $\delta_{sd}^2 = 10$ , 结果如图 5 所示, 最优功率分配比为  $Q_1/Q_2 = 3.9213$ 。由图中可见, 在不同总发射功率  $Q = 5\text{ W}$ 、 $15\text{ W}$ 、 $20\text{ W}$  和不同信道方差  $\delta_{sd}^2$  下,  $Q_1/Q_2 = 3.9213$  几乎提供了最优的性能。



### 3.3 功率分配优化和等功率分配算法比较实验

假设噪声方差为1,源到目的信道方差归一化为1,考虑两种信道条件:1) $\delta_{sr}^2 = \delta_{rd}^2 = 1$ ;2) $\delta_{sr}^2 = 1, \delta_{rd}^2 = 10$ 。

图6展示了QPSK调制的DF协作系统的仿真结果(对应 $M=4$ )。当 $\delta_{sr}^2 = \delta_{rd}^2 = 1$ 时,最优功率分配的性能比等功率分配的稍好;当 $\delta_{sr}^2 = 1, \delta_{rd}^2 = 10$ 时,最优功率分配比等功率分配性能有1.81 dB的改善。由此得知,信道质量的比值 $\delta_{sr}^2/\delta_{rd}^2$ 变小,最优功率分配的性能会比等功率分配改善更多,最优功率分配相对于等功率分配的优势也愈明显。

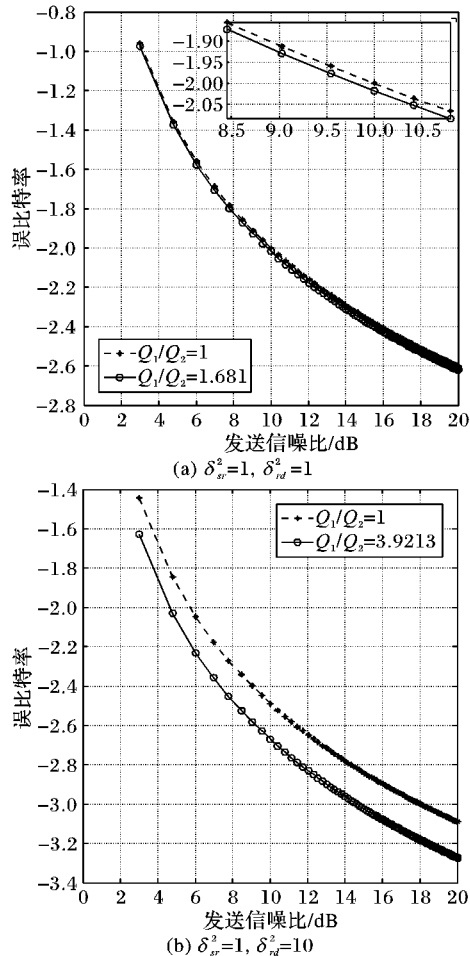


图6 误比特率与发送信噪比的关系图

## 4 结语

针对水下传感器网络信道复杂多变的特点,使用中继协作方式来减小信道衰落对通信质量的影响,针对水下声通信长延时问题,提出了一种新的最佳中继节点选择方法,选择标准包含信道增益和水声通信长延时两个因素,依据此综合指标可有效解决只根据信道条件来选择中继可能带来的长等待时间问题,既保证通信质量又提高通信效率,相比传统最佳中继选择算法,传输延时降低约16.7%。选择最佳中继节点后,依据信道状况对源节点和中继节点进行功率分配,实验证明,和等功率分配算法相比,该算法在典型场景下使网络误比特率降低了1.81 dB,提高系统整体性能。

### 参考文献:

[1] YANG X. Underwater acoustic sensor networks[M]. YAN B, LIU

Z, LUO Y, *et al.* translated. Beijing: National Defence Industry Press, 2012. (YANG X. 水下声传感器网络[M]. 颜冰, 刘忠, 罗亚松, 等. 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.)

[2] LONG C, ZHANG X, WANG H, *et al.* Joint relay selection and power allocation optimization in industrial cognitive radio networks [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(11): 3072 - 3076. (龙承念, 张新华, 王海峰, 等. ICRN 功率分配与中继选择联合优化[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3072 - 3076.)

[3] LI H. Research on the key techniques in wireless cooperative communications[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (李洪星. 无线协作通信中的关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.)

[4] GAO W, WANG W, YUAN G, *et al.* Joint relay selection and power allocation optimization in cooperative communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 68 - 71. (高伟东, 王文博, 袁翔, 等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 68 - 71.)

[5] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communication, 2006, 24(3): 659 - 672.

[6] CHEN Y, CHENG P, QIU P, *et al.* Optimal partner selection strategies in wireless cooperative networks with fixed and variable transmit power[C] // Proceedings of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 4083 - 4087.

[7] LIN Z, ERKIP E, STEFANOV A. Cooperative regions for coded cooperative systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7): 1323 - 1333.

[8] XIE X, LEI W, MA B, *et al.* Cognitive and cooperative wireless communication network[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2012. (谢显中, 雷维嘉, 马彬, 等. 认知与协作无线通信网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.)

[9] TANG C, XIAO G, SUN M. TOA estimation of UWB based on PCA [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(12): 2998 - 3000. (唐春玲, 肖国强, 孙明刚. 基于主成分分析的 UWB 信号的 TOA 估计算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(12): 2998 - 3000.)

[10] BERKHOVSKIKH L, LYSANOV Y. Fundamentals of ocean acoustics[M]. New York: Springer, 1982.

[11] ZHANG Y, MA S. Power allocation and channel capacity for cooperative tri-node[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12): 3151 - 3154. (张愿, 马社祥. 三协作节点的功率分配及其信道容量[J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3151 - 3154.)

[12] SIMON M K, ALOUINI M S. A unified approach to the performance analysis of digital communication over generalized fading channels[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(9): 1860 - 1877.

[13] LIU K R, SADEK A K, SU W, *et al.* Cooperative communications and networking[M]. REN P, LIAO X, GAO Z, *et al.* translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (LIU K R, SADEK A K, SU W, *et al.* 协作通信及网络[M]. 任品毅, 廖学文, 高贞贞, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.)