

水声网络动态编码协作通信频率选择与 中继节点位置选择

张 敏^{1,2}, 陈友淦^{1,2}, 金晓婷^{1,2}, 许肖梅^{1,2}

(1. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建厦门 361005;
2. 厦门大学海洋与地球学院, 福建厦门 361102)

摘 要:以含直达路径的典型 3 点中继动态编码协作水声通信系统为例,研究了如何选择最优工作频率与中继节点的位置,以使系统的功耗最小、性能最优的方法。首先给出在一定通信距离情况下的最优工作频率模型,根据得到的最优工作频率来改变中继节点位置,继而得到中继节点的最佳位置。以此为基础,建立通信网络的能量消耗模型,通过最优频率-距离关系近似表达式进行能量消耗的优化,综合工作频率与中继节点位置进行选择。从理论上证明了当中继节点与信源节点和目的节点的距离相等时,工作频率选择该距离条件下的最优工作频率可使系统的功耗最小。计算机仿真实验验证了该理论的正确性。

关键词:水声通信;协作通信;能量优化;频率选择;位置选择

中图分类号:TB567

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2016)02-0120-05

Frequency selection and relay placement for dynamic code cooperative communication in underwater acoustic networks

ZHANG Min^{1,2}, CHEN Yougan^{1,2}, JIN Xiaoting^{1,2}, XU Xiaomei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China)

Abstract: Three nodes-relay cooperative communication systems, including a direct path, are selected to study the problems of choosing the proper frequency and node locations for minimizing energy consumption. The approximate models for this frequency are proposed, when the link lengths are known exactly. The relay placement is investigated in a three nodes-relay cooperative communication system with the optimal frequency. An energy consumption model is established for the networks, and the energy consumption is minimized by the optimal frequency-distance relationship approximate expression. The relay placement and the frequency are optimized for the cooperative underwater acoustic network. We demonstrate that utilizing different frequencies has an impact on the optimal relay placement, and the optimal relay placement is equidistant on the line. The simulation results verified the effectiveness of the proposed model.

Keywords: underwater acoustic communications; cooperative communications; energy efficiency; frequency selection; relay placement

由于协作通信在抗多途衰落、提高通信网络容量等方面的优势,与信道编码相结合并且通过信道编码实现协作通信的编码协作技术受到了研究人员的广泛关注^[1-2]。通过中继节点的协作能有效提高水声通信系统的带宽利用率和通信误码性能^[3]。水声通信节点通常由电池供电,如何降低节点的能耗,提高水下设备的生命周期就尤为重要。

与无线电波信道相比,水声信道有载波频率低、带宽窄、波速小、多途延时大及多普勒频移相对较大等特点^[4-5],其中一个显著特点是信号传输过程中的能量衰减取决于信号的工作频率。对于给定的水下通信距离,存在一个最佳通信频率,能使系统的

能量消耗最小。在水下通信系统中,节点位置的不同布放方法对系统性能有很大的影响^[6]。对于由通信距离分别为 l_1 和 l_2 的链路组成的串联水声网络,文献^[7]研究了其最优工作频率 $f_o(l_1, l_2)$ 如何选择的问题,并进一步拓展到多跳水声网络的最优工作频率选择问题。另外,研究表明^[6],从节点位置对系统能耗影响的角度考虑,针对串行多跳中继系统,即信源节点(source, S)、中继节点(relay, R)、目的节点(destination, D)的分布为一条直线的系统,中继节点 R 与信源节点 S 和目的节点 D 等距时,系统整体的能耗最小、性能最佳。

在上述非协作多跳水声网络模型的基础上,本

收稿日期:2015-07-21

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130121120033);国家自然科学基金资助项目(41476026, 41376040);中央高校基本科研业务费专项资金/厦门大学基础创新科研基金资助项目(20720140506)

第一作者:张敏(1994—),女,本科生,主要研究方向为水声通信技术

通信作者:陈友淦,助理教授,主要研究方向为水声通信及其组网技术,chenyougan@xmu.edu.cn

文拟对一个含直达路径的典型 3 点中继水声协作通信网络的频率选择与中继节点位置选择进行研究。在该系统中,中继节点 R 能协助任意水下 2 点构成的通信系统进行协作通信。本文将通过最优频率-距离关系近似表达式对该系统的能量消耗进行优化。首先选择不同位置参数分别计算理论最优工作频率,然后开展中继节点不同布放位置对系统性能影响的分析,并对工作频率和中继节点布放位置进行综合优化,最终得出适用于 3 点水声动态编码协作通信网络的最优工作方式。

1 系统模型

1.1 动态编码协作系统

考虑一个含直达路径的典型 3 点水声中继协作通信系统,其由水下信源节点 S 、水下目的节点 D 和水面附近的中继节点 R 组成^[8],如图 1 所示。

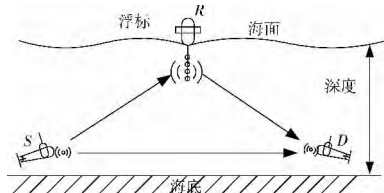


图 1 3 点水声协作通信系统基本构架

中继节点 R 布放在信源节点 S 和目的节点 D 之间,可布放水听器接收阵列,提高信源节点 S 到目的节点 D 的传输性能。

假设每个水下节点都采用正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 调制技术^[8],连续的 OFDM 符号之间采取必要的保护间隔,确保 $S-R-D$ 与 $S-D$ 2 条路径可实现同步通信^[8]。若 OFDM 调制的子载波数目为 K ,令 s_u 表示长度为 $K \times 1$ 的向量(节点 u 中 OFDM 调制后的数据), z_u 表示目的节点中经过必要的多普勒补偿和 FFT 运算后^[12]的频域测量量,则从节点 u 到目的节点的系统输入输出关系为

$$z_u = s_u H_u + w_u. \quad (1)$$

式中: H_u 表示大小为 $K \times K$ 的信道矩阵; w_u 表示接收端长度为 $K \times 1$ 的环境噪声。当信道为准静止信道时, H_u 中只含对角线元素,否则,存在载波间干扰 (inter-carrier-interference, ICI),且 H_u 中的非对角线元素为非零元素。

动态编码协作工作机制可描述如下。中继节点 R 的工作分为监听阶段和协作传输阶段 2 个阶段。设每次通信信源节点 S 发送 N_{bl} 个数据符号块(bl 为 block 的缩写,代表总的的数据符号块),其中包括 N_{in} 个信息数据符号块(in 为 information 的缩写,代表信息数据符号块)和 $(N_{bl} - N_{in})$ 个校验数据符号块。当中继节点 R 处于监听阶段时,中继节点 R 接收来自信源节点 S 的数据符号块,并对累积的 OFDM 数

据符号块进行解码,中继节点 R 接收到 N_{in} 个信息数据符号块时开始尝试解码(解码可能成功,也可能失败,视 $S-R$ 链路的信道状况而定),且解码时间为一个数据符号块的持续时间长度。假设中继节点 R 在收到 N_{li} ($N_{in} \leq N_{li} < N_{bl}$) 个数据符号块后才能成功解码,同时考虑一个数据符号块的解码延迟时间,则中继节点 R 从 $(N_{li} + 2)$ 个数据符号块开始转为协作传输阶段,开始向目的节点 D 发送数据,直到第 N_{bl} 个数据符号块发送结束。协作传输阶段,中继节点 R 的动态编码协作模式可采用重复冗余 (repetition redundancy, RR) 协作,或额外冗余 (extra redundancy, ER) 协作^[8]。为简易起见,中继节点采用 RR 协作模式,具体详见文献^[8]。

1.2 系统能量消耗模型

接收端水下信号信噪比 SNR 一般可由被动声呐方程表示为

$$SNR = SL - TL - NL + DI \geq DT. \quad (2)$$

式中:DT 是检测门限,通常设定为 3 dB^[9];DI 是接收器指向性指数,设定为 0 dB,即为全指向性接收器;NL 是环境噪声级,通常包括湍流噪声、航运噪声、海面噪声与热噪声,可用 Wenz 模型计算;TL 是由于水声信道造成的传播损失,表示声波传播一定距离以后声强度的衰减变化^[10];SL 是声源级,用于描述发射信号的强弱,其定义为^[11]

$$SL = 10 \lg \frac{I_r}{I_0}, \quad (3)$$

式中: I_r 是距离声源 1 m 处的声音强度; I_0 是参考声强,通常取均方根声压为 $1 \mu\text{Pa}$ 的平面波的声强,约为 $0.67 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$ 。从式(3)可得到 I_r 的计算公式为

$$I_r = 10^{SL/10} \cdot I_0. \quad (4)$$

浅海中要使距离声源 1 m 处的声强达到 I_r ,在接收机方向上所需的传输功率为

$$P = 2\pi h I_r. \quad (5)$$

式中: P 的单位是 W; h 表示海域深度, m。

假设 1 个节点发送的数据包为 N ,传输一个数据包所需的时间为 T_0 (单位为 s),则该节点发送数据所消耗的能量 E_{TS} (单位为 J) 的表达式为

$$E_{TS} = N \cdot T_0 \cdot P. \quad (6)$$

对于中继节点来说,除了发送信息的能量消耗外,节点能量消耗还包括接收数据包所消耗的能量。当节点接收 N 个数据包信息时,消耗的能量可表示为

$$E_{RE} = N \cdot E_{RE_0}. \quad (7)$$

式中 E_{RE_0} 是节点接收一个数据包所消耗的能量。对于一般商用水听器接收一个数据包所消耗能量的典型值为发送一个数据包所消耗能量 E_{T_0} 的 $1/5$ ^[11],即

$$E_{RE_0} = \frac{1}{5} T_0 P = \frac{1}{5} E_{T_0}. \quad (8)$$

对于 3 点协作水声网络系统来说,系统整体的

能量消耗包括信源节点 S 的能量消耗 E_S 、中继节点 R 的能量消耗 E_R 和目的节点 D 的能量消耗 E_D ，则系统总能量消耗可表示为

$$E = E_S + E_R + E_D. \quad (9)$$

式中： $E_S = E_{TS,S}$ ； $E_R = E_{TS,R} + E_{RE,R}$ ； $E_D = E_{RE,D}$ 。

2 工作频率选择与中继节点位置优化

2.1 工作频率选择

水声信道的传播损失随频率的升高而急剧增高，成为限制工作频率上限的主要原因，最优工作频率与工作距离的经验公式^[6,10]为

$$f_{opt}(l) = \left(\frac{200}{l}\right)^{2/3}. \quad (10)$$

式中： l 为工作距离，km； f_{opt} 为最优工作频率，kHz。最优工作频率与通信距离的关系如图 2 所示：

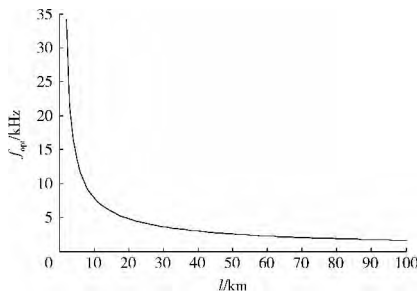


图 2 最优工作频率与通信距离关系

文献[7]将该关系应用到不存在节点协作的多跳系统模型中，得到在 N 跳模型中适用的最佳工作频率模型计算公式为

$$\hat{f}_0(l_N) = \frac{\sum_{n=1}^N l_n^{\gamma(l_n)} f_0(l_n)}{\sum_{n=1}^N l_n^{\gamma(l_n)}}. \quad (11)$$

式中： l_N 表示 N 跳模型的总距离， $\gamma(l_n)$ 为修正参数，用来修正 $f_0(l_n)$ ，使得式(11)符合实际情况。该修正参数与每一跳的传输距离 l_n 有关，可通过大量仿真，并对仿真获得的数据进行最小二乘估计得到。参考文献[7]给出一种统计结果为

$$\begin{aligned} \gamma(l) &= 2.4818 \quad l \in [0, 1) \\ \gamma(l) &= 3.0305 \quad l \in [1, 10) \\ \gamma(l) &= 3.9613 \quad l \in [10, 100] \end{aligned} \quad (12)$$

在此基础上，可将式(11)表示的多链路模型的最优工作频率公式拓展应用到 3 点动态编码协作通信模型。类似地，可得到其最优工作频率为

$$\hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD}) = \frac{l_{SD}^{\gamma(l_{SD})} f_0(l_{SD}) + l_{SR}^{\gamma(l_{SR})} f_0(l_{SR}) + l_{RD}^{\gamma(l_{RD})} f_0(l_{RD})}{l_{SD}^{\gamma(l_{SD})} + l_{SR}^{\gamma(l_{SR})} + l_{RD}^{\gamma(l_{RD})}}. \quad (13)$$

同样地， $\gamma(l_{SD})$ 、 $\gamma(l_{SR})$ 和 $\gamma(l_{RD})$ 为对应的修正参数，用以修正 $f_0(l_{SD})$ 、 $f_0(l_{SR})$ 和 $f_0(l_{RD})$ 项，使得式(13)符合实际情况。且在浅海中，从拓扑结构看，

相对于传输距离而言，海域深度可忽略，故存在 $l_{SD} \approx l_{SR} + l_{RD}$ 。

该模型满足下面 2 个性质：

- 1) $f_0(l_{SD}, 0, l_{RD}) = f_0(l_{SD}, 0, l_{SD}) = f_0(l_{SD})$ ；
- 2) $f_0(l_{SD}, l_{SR}, 0) = f_0(l_{SD}, l_{SD}, 0) = f_0(l_{SD})$ 。

因此，可认为式(13)适用于 3 点动态编码协作通信模型。

设信源节点 S 与目的节点 D 的距离 l_{SD} 固定为 1 km，此时取 $\gamma(l_{SD}) = 3.0305$ 、 $\gamma(l_{SR}) = \gamma(l_{RD}) = 2.4818$ 。信源节点 S 到中继节点 R 的距离 l_{SR} 选择在 0.25、0.50 和 0.75 km 等 3 个位置，可得到 3 个不同位置分布的通信系统，通过式(12)和式(13)可计算得出每个系统的理论最优频率 f_{01} 、 f_{02} 、 f_{03} 分别为

$$f_{01} = 37.62 \text{ kHz}; \quad (14)$$

$$f_{02} = 39.50 \text{ kHz}; \quad (15)$$

$$f_{03} = 37.62 \text{ kHz}. \quad (16)$$

2.2 中继节点位置选择

由于中继节点 R 的不同布放位置，将决定中继节点何时从监听阶段转换到协作传输阶段。下面讨论不同布放位置对系统性能的影响。

在自由空间中，无线通讯系统的节点布放遵循中继节点位置在信源节点和目的节点正中间时系统的功耗最小的规律，水声通信系统同样遵循该规律^[2]。即当 $l_{SR} = l_{RD}$ 时，对于任意的工作频率 f ，系统的能量消耗都要小于中继节点位于其他位置时的能量消耗。也就是说，若定义一个通信距离为 l 、工作频率为 f 的 2 点通信系统，其发送功率为 $p(l, f)$ ，那么对于 3 点协作通信系统，可以证明，对任意的工作频率 f ，都有

$$\begin{aligned} p(l_{SD}, f) + p(l_{SR}, f) + p(l_{RD}, f) &\geq \\ p(l_{SD}, f) + 2p\left(\frac{l_{SD}}{2}, f\right). \end{aligned} \quad (17)$$

2.3 频率与中继节点位置的综合优化

本文综合考虑频率与中继节点位置，以得出使系统功耗最小的方案，即对于给定的节点间距离 (l_{SD}, l_{SR}) ，选择最优工作频率 $\hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD})$ 。为了使系统整体功耗最小，应使 (l_{SD}, l_{SR}) 满足

$$l_{SD} = 2l_{SR}. \quad (18)$$

证明：

$$\begin{aligned} p(l_{SD}, f) + p(l_{SR}, f) + p(l_{RD}, f) &\geq \\ p(l_{SD}, f) + 2p\left(\frac{l_{SD}}{2}, f\right) &\geq \\ p(l_{SD}, \hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD})) + 2p\left(\frac{l_{SD}}{2}, \hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD})\right). \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可知：

- 1) $p(l_{SD}, f) + p(l_{SR}, f) + p(l_{RD}, f) \geq p(l_{SD}, f) + 2p\left(\frac{l_{SD}}{2}, f\right)$ 表示，当中继节点 R 位于信源节点 S 和目的节点 D 的正中间时，即 $l_{SD} = 2l_{SR}$ 时，系统的功

耗是在相同条件下最小的;

2) $p(l_{SD}, f) + p(l_{SR}, f) + p(l_{RD}, f) \geq p(l_{SD}, \hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD})) + 2p\left(\frac{l_{SD}}{2}, \hat{f}_0(l_{SD}, l_{SR}, l_{RD})\right)$ 表示, 当满足 $l_{SD} = 2l_{SR}$ 时, 工作频率选取式(13)计算得出的最优工作频率可以使得系统的功耗达到最小。

3 仿真分析与讨论

3.1 仿真条件

仿真所采用的 OFDM 调制参数设置与文献 [12]类似, 其中载波数目 $K=1\ 024$ 。假设多途水声信道由 50 个随机变量的途数组成, 且信道为准静止信道, 即在每个 OFDM 符号持续时间内, 信道参数保持不变。

动态编码协作参数为 $N_{bl} = 20$ 、 $N_{in} = 10$ 和 $10 \leq N_{li} < 20$ 。假设采用能获得信道容量的信道编码码字, 则可用信道的互信息 (mutual information, MI) 计算中断概率 (outage probability) 来评估接收端能否正确解出一个数据包。当互信息小于信息速率 r 时发生中断, 即中断概率为

$$p_r^{out} = \Pr\{MI < r\} = \Pr\left\{\frac{1}{K} \sum_{k=-K/2}^{K/2-1} \log_2(1 + |H[k]|^2 \cdot E_s/N_0) < r\right\}. \quad (20)$$

仿真中, 设信息速率 r 为 0.5 比特/符号; 信源节点 S 与目的节点 D 位于水深 50 m 处, 2 者之间的通信距离为 1 km, 中继节点 R 位于 2 者之间, 可近似看作 3 者处于一条直线, 即 $l_{SD} \approx l_{SR} + l_{RD}$ 。分别对在 $l_{SR} = 0.25, 0.50, 0.75$ km 等 3 个不同位置的系统进行仿真分析。

3.2 仿真结果讨论

当修正参数分别取 $\gamma(l_{SD}) = 3.030\ 5$ 、 $\gamma(l_{SR}) = \gamma(l_{RD}) = 2.481\ 8$ 时, 可计算得到不同布置位置系统的理论最优工作频率值, 即式(14)一式(16)所表示的值。3 个不同位置的系统的中断概率随信源节点 S 发射声源级变化的情况如图 3 所示。

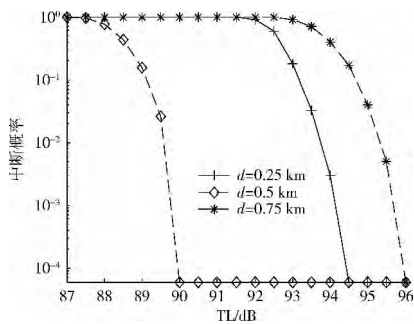


图 3 中断概率与声源级的关系

由图 3 可见, 当中继节点位于 S 和 D 正中间时, 系统的性能最好。以图 3 为基础, 取中断概率等于 10^{-2} 时作为性能参照指标, 通过式(2)确定相应目的

节点的信噪比 SNR, 可获得该中断概率参数条件下的最优工作频率。

通过仿真实验得到的 3 个不同位置系统的信源节点 S 的声源级与系统工作频率的关系如图 4 所示。

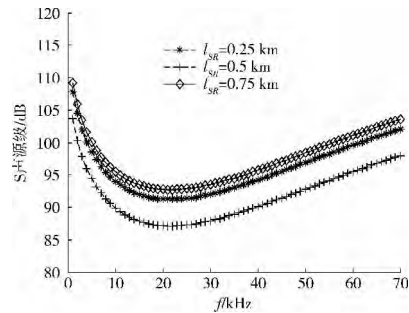


图 4 信源节点 S 声源级与频率的关系

由图 4 可见, $l_{SR} = 0.50$ km 时, 信源节点 S 所需的发射声源级最小, 且低频时声源级随工作频率的增大而降低, 最小值出现在 20 kHz 左右, 然后随着工作频率的增大而增大, 这是因为在高频时, 传播损失和背景噪声会随着频率的增大而不断增大。为了保持系统的性能, 信源节点的声源级需随之增长, 以保持接收端的信噪比大于其检测门限。

中继节点 R 发射声源级随工作频率的变化关系如图 5 所示。

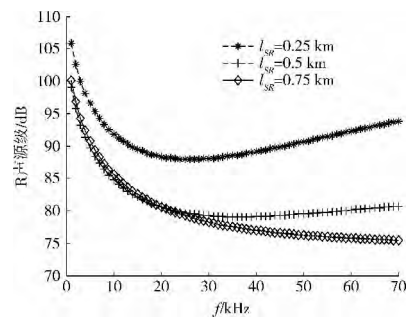


图 5 中继节点 R 声源级与频率的关系

由图 5 可见, 当 $l_{SR} = 0.75$ km 时, R 的发射声源级小于另外 2 个位置系统的发射声源级。由于中继节点 R 的不同布置位置将决定中继节点何时从监听阶段切换到协作传输阶段, 而中继节点的发送功率还需由中继节点 R 到目的节点 D 的距离 l_{RD} 决定, l_{RD} 越小, 中继节点 R 所需的发射功率越小, 其发射声源级也就越小。当 $l_{SR} = 0.25, 0.50$ km 时, 发射功率随频率增大先减、后增, 这是因为在高频时传播损失和背景噪声会增大, 要求发射声源级也相应变大; 而当 $l_{SR} = 0.75$ km 时, 由于 l_{RD} 的距离过小, 只有频率足够高时发射声源级才会随之增大。

3 个不同位置系统的能量消耗与工作频率之间的关系如图 6 所示。

由图 6 可见, 在系统中断概率为 10^{-2} 的性能指标时, 3 个不同位置的系统的能量消耗随频率的变化趋

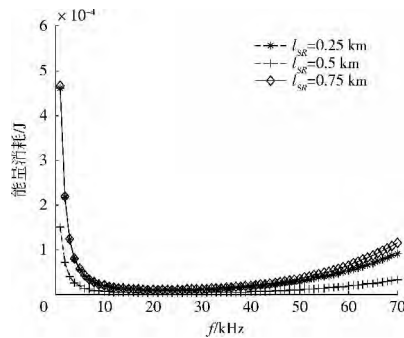


图 6 系统能量消耗与频率的关系

势大致相同,均为先减、后增,最小值出现在 20~30 kHz。3 种情况下, $l_{SR} = 0.75$ km 时系统的能量消耗最大, $l_{SR} = 0.50$ km 时系统的能量消耗最小,这是因为当中继节点 R 最靠近信源节点 S 时,虽然可以尽快地切换到协作传输阶段,但是中继节点 R 离目的节点 D 最远,协作性能受到影响;而当中继节点 R 离信源节点 S 最远时,协作性能可以最大化,但是开始进行协作的时间可能被推迟。因此,当中继节点 R 位于正中间时,能比较好地折衷,性能最优。

在信源节点 S 与目的节点 D 之间的距离为 1 km 的条件下,仿真得到的最佳工作频率为 20~30 kHz,与通过式(13)计算得到的理论值相比明显偏小,主要原因有:1) 与所选取的系统中断概率参照指标的不同值有关,因为会引入不同的 SNR 值代入式(2)进行计算;2) 说明式(13)模型的修正参数 $\gamma(l_{SD}) = 3.0305$ 、 $\gamma(l_{SR}) = \gamma(l_{RD}) = 2.4818$,还需结合水声信道条件再做进一步修正,具体地可结合大量的水声信道统计数据,通过最小二乘法估计得到。

4 结 论

工作频率是影响水声信号传输的一个重要参数,本文以 3 点动态编码协作水声通信系统为例,建立能量消耗模型,通过理论推导和仿真实验,研究了工作频率和中继节点位置的优化问题,以确保系统整体性能最佳、功耗最小。研究表明,当中继节点位于传输距离的中点位置时,取该距离条件下的最优工作频率可使系统的功耗最小。另外,本文所提出的工作频率和中继节点位置选择模型的修正参数,需结合水声信道条件进一步优化,在下一步的工作中,将对此进行讨论。

致谢:本文部分前期工作是本文作者之一访问美国康涅狄格大学 Zhou Shengli 教授课题组期间进行的,特此致谢。

[参考文献] (References)

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Co-operative diversity in wireless networks; efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] HUNTER T E, SANAYEI S, NOSRATINIA A. Outage analysis of coded cooperation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 375-391.
- [3] STOJANOVIC M. Capacity of a relay acoustic channel [C] // Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2007. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2007: 1-7.
- [4] 冉茂华, 黄建国, 付辉敬. 基于 OFDM 水声通信中基于压缩感知的稀疏信道估计[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1157-1161.
RAN Maohua, HUANG Jianguo, FU Huijing. Sparse channel estimation based on compressive sensing for OFDM underwater acoustic communication [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(5): 1157-1161. (in Chinese)
- [5] 夏梦璐. 浅海起伏环境中模型-数据结合水声信道均衡技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
XIA Menglu. Model-data fused acoustic channel equalization under fluctuating shallow water environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [6] STOJANOVIC M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, 2007, 11(4): 34-43.
- [7] CLEMENT K. Frequency selection and relay placement for energy efficiency in underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2): 331-342.
- [8] CHEN Yougan, WANG Zhaohui, WAN Lei, et al. OFDM modulated dynamic coded cooperation in underwater acoustic channels [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(1): 159-168.
- [9] ROBERT J U. Principles of underwater sound [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983: 47-68.
- [10] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993: 59-72.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principles of underwater acoustic [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993: 59-72. (in Chinese)
- [11] GARCIN F, MANSHAEI M H, HUBAUX J P. Cooperation in underwater sensor networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Game Theory for Networks 2009. Istanbul, Turkey: IEEE, 2009: 540-548.
- [12] LI Baosheng, ZHOU Shengli, STOJANOVIC M, et al. Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(2): 198-209.