



研究与开发

一种水声协作通信网络顽健功率分配算法

李鑫滨, 张玲梅, 韩松, 黄志鹏, 刘志新

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对水声协作通信网络中节点生存时间短、信道状态信息不确定、通信服务质量差等问题, 提出一种考虑剩余能量的顽健功率分配算法。首先, 在目标函数中考虑了节点的剩余能量, 使节点的发射功率与剩余能量成正比关系变化, 从而平衡节点能耗, 延长生存时间。其次, 将不确定性引入目标函数, 提高了对抗水下环境不确定性的能力。同时, 还考虑了最小的通信容量需求, 确保通信服务质量。仿真结果证明了提出的算法延长了生存时间, 优化了系统性能。

关键词: 水声通信; 协作通信; 功率分配; 生存时间

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019008

A robust power allocation algorithm for underwater acoustic cooperative communication network

LI Xinbin, ZHANG Lingmei, HAN Song, HUANG Zhipeng, LIU Zhixin

Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: In consideration of the issues of the survival time of node, the uncertainty of channel state information and the poor quality of the service in underwater acoustic cooperative communication network, a robust power allocation algorithm was proposed. Firstly, the residual energy of node was considered in the optimization function, and the change of transmitted power was proportional to the remaining energy, thereby balancing the energy consumption and increasing the survival time of the nodes. Secondly, the uncertainty was further introduced into the optimization function to improve the ability of against uncertainty in underwater. At the same time, in order to make sure that the quality of the service, the minimum communication capacity requirements were considered in the optimization function. The simulation results show that the proposed algorithm not only extends the survival time of node, but also improves the performance of system.

Key words: underwater communication, cooperative communication, power allocation, survival time

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571387, No.61873224)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571387, No.61873224)

1 引言

随着海洋工业的不断发展,水声通信技术在海洋环境检测、海洋数据收集以及目标追踪等海洋应用中发挥着越来越重要的作用^[1]。由于水下环境存在路径衰落严重、带宽受限等问题,用户和目标节点间直接通信往往比较困难,而协作通信技术可通过中继节点来增加用户容量,对于提高链路的数据传输质量、传输距离等具有重要意义^[2]。考虑到水下节点是无源供电的,如果个别节点的能量耗尽后死亡,将直接影响整个水声协作通信网络的生存时间和服务质量。因此,在能量有限的水声协作通信网络中设计合理的功率分配策略,可有效地达到降低网络能耗、节约网络成本、延长节点生存时间和优化系统性能的目的^[3]。

功率分配问题在 RF (radio frequency, 无线电频率) 中得到广泛的研究。参考文献[4]提出一种低复杂度的功率分配算法,该算法在保证用户服务质量的前提下,最大化链路的吞吐量。参考文献[5]针对放大转发 (amplify-and-forward, AF) 协作通信网络,提出顽健迭代的功率分配算法使系统效益最大化。参考文献[6]针对三阶段的中继网络框架,提出使链路中断概率最小的功率分配算法。参考文献[7]针对多输入多输出多用户网络中继模型,提出一种快速的功率分配算法来优化系统整体性能。但是由于海洋环境的复杂性,针对水下协作通信网络的 RF 功率分配方法不能直接应用于水声通信网络。因此,研究人员分别从不同的角度提出资源分配方案来优化水下协作通信网络。参考文献[8]从信道遍历性和容量上界最大的角度,提出了一种联合充电时隙资源和通信时隙资源的分配方案,提高了系统的可达遍历性和容量上界,进而提高了系统的吞吐量及工作效率。参考文献[9]从优化输入功率的功率谱密度的角度,利用 LGRC (linear Gaussian relay channel,

线性高斯中继信道) 模型,增加了水声协作通信网络的传输容量。参考文献[10]从优化分配功率的角度,针对水声协作通信模型,提出一种基于最小误比特率的功率分配算法,降低了网络的传输延时和误比特率,提高了通信质量。参考文献[11]从联合中继选择和功率分配的角度,针对水声协作通信网络,提出一种满足用户服务质量的算法,有效降低了能耗。参考文献[12]从联合中继选择和功率分配的角度,针对水声 AF 中继通信网络模型,最小化接收节点的中断概率,提高了网络通信服务质量和系统性能。但是上述方法进行功率分配时均未考虑节点剩余能量的影响。如果不考虑节点的剩余能量,各个节点可能会一直以最大的功率发射,导致能量消耗过快,节点生存时间缩短,从而直接影响节点和整个网络的生存时间和服务质量。

此外,信道状态信息 (channel state information, CSI) 对于资源分配方法的设计也非常重要,而在复杂多变的水下环境中,显得尤为重要。已经有许多学者致力于这方面的研究。如参考文献[13],针对 RF 网络中的多输入多输出系统,提出一种低复杂度的稀疏信道估计方法,大大降低了算法的复杂度。而目前所研究的水下无线信道场景主要分两类:水下稀疏无线信道场景^[14-16]和水下非稀疏无线信道场景^[17]。其中针对水下稀疏信道参数估计问题,参考文献[14]提出了一种压缩感知正交匹配追踪算法,能以较低的复杂度估计信道。参考文献[16]针对多尺度多滞后的水声信道模型中的稀疏信道参数估计问题,提出了一种改进的粒子群算法对信道的多普勒尺度参数、时延参数、振幅参数进行估计,并且表现出了较高的估计精度。针对水下非稀疏无线信道场景,参考文献[17]基于最小二乘原理联合估计信道和脉冲干扰,并在实验中取得了良好的估计效果。然而由于水声信道复杂多变,真实的水声 CSI 仍具有一定的不确定性,这种不确定性会使基于确定性



CSI 资源分配方案的性能产生负面影响, 因此针对 CSI 不确定情况设计功率分配算法更具有实际意义。本文针对水声协作通信网络提出一种考虑剩余能量的顽健功率分配 (considering residual energy of robust power allocation, CreRPA) 算法。首先, 在目标函数中加入了节点的剩余能量, 以剩余能量百分比的倒数作为功率的价格因子, 即剩余能量多的节点, 单位功率成本小, 发射功率大; 剩余能量小的节点, 单位功率成本高, 发射功率小, 从而达到节省能耗、降低网络成本、延长节点生存时间和增加网络总体信道容量的目的。其次, 在目标函数中考虑了 CSI 的不确定性, 提高了网络对抗复杂多变的水下环境的能力。最后, 为了确保通信服务质量, 在目标函数中加入最低信道容量的需求, 以提高通信服务质量。

2 系统模型

本文主要针对多用户、单中继的水声协作通信网络模型, 网络模型如图 1 所示, 该网络模型包含 N 个用户节点 S 、1 个中继节点 R 、1 个目的节点 D 。其中, 用户节点 S 和目的节点 D 进行通信, 中继节点 R 辅助用户节点转发信息, 目的节点收到信息后再把信息发送给水面基站。假设用户节点和目的节点之间为单信道通信, 通信方式为非直接通信, 且信道间无相互干扰。

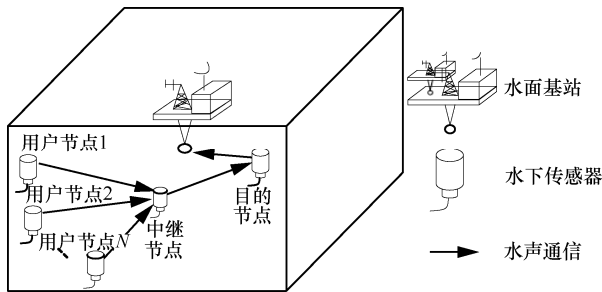


图1 水声协作通信网络模型

2.1 中继模型

本文传输过程采用 AF 模型, 即中继节点 R 将从用户节点 $S_i (i=1, 2, \dots, N)$ 接收的信息直接进行放大

转发, 目的节点 D 接收来自用户节点 S_i 的信号。协作传输过程分为 2 个阶段, 在第 1 阶段中, 用户节点 S_i 发送信息给中继节点, 中继节点 R 接收的信号为:

$$y_{i,r} = \sqrt{p_{i,sr}} g_{i,sr} x_{i,r} + n_1, 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

其中, $x_{i,r}$ 为用户节点 S_i 发送的信息, $g_{i,sr}$ 为用户节点 S_i 到中继节点的实际信道增益, $p_{i,sr}$ 为用户节点 S_i 的发射功率, n_1 表示第 1 阶段的加性高斯白噪声。在第 2 阶段中, 中继节点 R 接收到用户节点 S_i 的信号 $y_{i,r}$ 放大并转发到目的节点 D , 目的节点 D 接收的信号可以表示为:

$$y_{i,d} = \sqrt{p_{i,rd}} g_{i,rd} y_{i,r} + n_2, 1 \leq i \leq N \quad (2)$$

其中, $p_{i,rd}$ 为中继节点的发射功率, $g_{i,rd}$ 表示中继节点到目的节点的实际信道增益, n_2 第 2 阶段的加性高斯白噪声。此处假设 $n_1 = n_2 = n_0$ 。 n_0 是高斯白噪声常数。

2.2 水下环境的信道增益模型

在水声通信网络中, 信道增益模型 g 表示为^[18]:

$$g = \frac{1}{A_0 l^k a(f)^l} \quad (3)$$

其中, A_0 是归一化系数, l 表示 2 个节点间的距离 (单位为 km), 传播系数 $k=1.5$, f 为载波频率 (单位为 kHz)。 $a(f)$ 为海水的吸收系数, 其求解经验计算式为:

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

进一步, 本文考虑水下通信环境 CSI 的不确定性, 将信道增益的实际值看作估计值与不确定项的和, 如式 (5) 所示:

$$g = \bar{g} + \Delta g \quad (5)$$

其中, g 和 $\bar{g}$ 分别为实际值和估计值, Δg 为不确定项。假设不确定项随估计值呈线性变化, 即 $\Delta g = \theta \bar{g}$, 且 θ 服从均值为 σ 的均匀分布。描述这

种参数不确定性的模型较多,例如一般多面体模型、 D 规范模型、椭球模型和列向量模型^[19],其中列向量模型和椭球模型由于具有易于分析的特点,较为常用。本文采用列向量模型来描述这种参数不确定性,将信道增益表示为^[20]:

$$g = \{\bar{g} + \Delta g : |\Delta g| \leq \varepsilon\} \quad (6)$$

其中, $|\cdot|$ 表示绝对运算符,列向量 ε 为不确定项界限,且有 $\varepsilon = |\sigma \bar{g}|$ 。则信息传输第 1 阶段的信道增益为:

$$g_{i, \text{sr}} = \{\bar{g}_{i, \text{sr}} + \Delta g_1 : |\Delta g_1| \leq \varepsilon_1\} \quad (7)$$

其中, ε_1 为第 1 阶段不确定项界限, $\bar{g}_{i, \text{sr}}$ 为第 1 时间段的信道增益估计值,且 $\varepsilon_1 = |\sigma_1 \bar{g}_{i, \text{sr}}|$ 。

第 2 阶段信道增益为:

$$g_{i, \text{rd}} = \{\bar{g}_{i, \text{rd}} + \Delta g_2 : |\Delta g_2| \leq \varepsilon_2\} \quad (8)$$

其中, ε_2 为第 2 阶段不确定项界限, $\bar{g}_{i, \text{rd}}$ 为第 2 时间段的信道增益估计值,且 $\varepsilon_2 = |\sigma_2 \bar{g}_{i, \text{rd}}|$ 。

不失一般性,可以假设 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ 。

最后,用户节点 S_i 的信道容量表达式如式(9)所示^[5]。

$$c_i = w_i \log(1 + f(\text{SNR}_{i, \text{sr}}, \text{SNR}_{i, \text{rd}})) \quad (9)$$

其中, w_i 为带宽, $\text{SNR}_{i, \text{sr}} = \frac{p_{i, \text{sr}} g_{i, \text{sr}}}{n_1}$ 为第 1 阶段信噪比, $\text{SNR}_{i, \text{rd}} = \frac{p_{i, \text{rd}} g_{i, \text{rd}}}{n_2}$ 为第 2 阶段信噪比, f 函数计算式为:

$$f(x, y) = \frac{xy}{x + y + 1} \quad (10)$$

3 模型构建及求解

3.1 模型构建

为了提高水声协作通信网络的服务质量,已有很多工作针对不同的问题展开研究,如针对水下节点能量受限的问题,参考文献[8]通过优化充电时隙和各水下传感器信号传输时隙,提出了一种

时隙资源分配方案,提高了系统的可达遍历性和容量上界;针对 CSI 不确定问题,参考文献[5]利用顽健优化理论,优化节点的发射功率,对抗通信网络的不确定性。而本文综合考虑水下节点能量受限和 CSI 不确定性的问题,建立考虑剩余能量的水声协作通信网络中多节点的顽健功率优化模型,并进行求解。首先,考虑水下节点能量对目标函数的影响。由于水下节点能量受限,在目标函数中加入节点的剩余能量,以节点剩余能量百分比的倒数作为节点自身的价格因数。其次,在水声协作通信网络中,通信服务质量不能忽略,它要求信道容量的实际值必须大于或等于最小的信道容量需求。从而得到优化函数模型如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \max_{p, c_i} \min_g & 1 - e^{-a_i(c_i - c_i^{\min})} - \frac{p_{i, \text{sr}}}{\alpha_{i, \text{sr}}} - \frac{p_{i, \text{rd}}}{\beta} \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^N p_{i, \text{rd}} \leq P_0 \\ & p_{i, \text{rd}} \geq 0, 1 \leq i \leq N \\ & 0 \leq p_{i, \text{sr}} \leq p_i^{\max}, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\alpha_{i, \text{sr}} = \frac{E_{si} - E_i}{E_{si}}$, $\alpha_{i, \text{sr}} \in [0, 1]$ 表示用户节点 i 的剩余能量百分比,其属于节点的本地信息,节点可以通过检测自身电池获得; E_{si} 表示用户节点 i 的总能量, E_i 表示用户节点 i 消耗的能量。
 $\beta = \frac{E_{r0} - E_{2i}}{E_{r0}}$, $\beta \in [0, 1]$ 表示中继节点的剩余能量百分比, E_{r0} 表示中继节点的总能量; E_{2i} 表示中继节点消耗的能量; $c_i^{\min}$ 是用户节点 i 的最小的信道容量需求; c_i 为用户节点 i 的实际信道容量; a_i 为正回报系数; P_0 为中继节点的总功率; $p_i^{\max}$ 表示用户节点 i 的最大发射功率。

最后,将代入 CSI 的不确定性模型式(7)和式(8)代入式(11)中,优化函数模型式可转换为:



$$\begin{aligned}
& -a_i(w_i \ln(1 + \frac{(1+\sigma)^2 \bar{g}_{i, sr} \bar{g}_{i, rd} p_{i, sr} p_{i, rd}}{((1+\sigma) \bar{g}_{i, sr} p_{i, sr} + (1+\sigma) \bar{g}_{i, rd} p_{i, rd} + n_0) n_0})) - c_i^{\min}) \\
& \max_{p, c} 1 - e \\
& - \frac{p_{i, sr}}{\alpha_{i, sr}} - \frac{p_{i, rd}}{\beta} \\
& \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N p_{i, rd} \leq P_0 \\
& p_{i, rd} \geq 0, \quad 1 \leq i \leq N \\
& 0 \leq p_{i, sr} \leq p_i^{\max}, \quad 1 \leq i \leq N
\end{aligned} \quad (12)$$

3.2 模型求解

通过采用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 方法进行优化模型的求解。首先, 构造拉格朗日函数如下:

$$\begin{aligned}
L_i = 1 - e & - a_i(w_i \ln(1 + \frac{(1+\sigma)^2 \bar{g}_{i, sr} \bar{g}_{i, rd} p_{i, sr} p_{i, rd}}{((1+\sigma) \bar{g}_{i, sr} p_{i, sr} + (1+\sigma) \bar{g}_{i, rd} p_{i, rd} + n_0) n_0})) - c_i^{\min}) \\
& - \frac{p_{i, sr}}{\alpha_{i, sr}} - \frac{p_{i, rd}}{\beta} + u(\sum_{i=1}^N p_{i, rd} - P_0)
\end{aligned} \quad (13)$$

其中, u 为拉格朗日数乘因子。

令:

$$D(u) = u(\sum_{i=1}^N p_{i, rd} - P_0) \quad (14)$$

然后, 分别对 $p_{i, sr}$ 、 $p_{i, rd}$ 求偏导。

对 $p_{i, sr}$ 求偏导, 得到式 (15):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L_i}{\partial p_{i, sr}} = -e & - a_i(w_i \ln(1 + \frac{ABp_{i, sr} p_{i, rd}}{(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0) n_0})) - c_i^{\min}) \\
& (-a_i w_i) \frac{lbe}{1 + \frac{ABp_{i, sr} p_{i, rd}}{(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0) n_0}} \\
& \frac{n_0(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0)ABp_{i, rd} - A^2 Bp_{i, sr} p_{i, rd} n_0}{n_0^2 (Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0)^2} - \frac{1}{\alpha_{i, sr}}
\end{aligned} \quad (15)$$

其中, $A = (1+\sigma)\bar{g}_{i, sr}$, $B = (1+\sigma)\bar{g}_{i, rd}$ 。

进一步, 在 $a_i w_i = \ln 2$ 的前提下, 由 KKT 条件 $\frac{\partial L_i}{\partial p_{i, sr}} = 0$, 得到用户节点 i 的功率更新式, 如式 (16) 所示。

$$p_{i, sr} = \frac{\sqrt{\frac{n_0(Bp_{i, rd}^2 + p_{i, rd} n_0)}{D}} - (Bp_{i, rd} + n_0)n_0}{A(Bp_{i, rd} + n_0)} \quad (16)$$

其中, $D = \frac{e^{-a_i c_i^{\min}}}{\alpha_{i, sr} a_i w_i \ln e AB}$ 。

对 $p_{i, rd}$ 求偏导, 得到式 (17):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L_i}{\partial p_{i, rd}} = -e & - a_i(w_i \ln(1 + \frac{ABp_{i, sr} p_{i, rd}}{(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0) n_0})) - c_i^{\min}) \\
& (-a_i w_i) \frac{lbe}{1 + \frac{ABp_{i, sr} p_{i, rd}}{(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0) n_0}} \\
& \frac{n_0(Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0)ABp_{i, sr} - AB^2 p_{i, sr} p_{i, rd} n_0}{n_0^2 (Ap_{i, sr} + Bp_{i, rd} + n_0)^2} - \frac{1}{\beta} + u
\end{aligned} \quad (17)$$

同样在 $a_i w_i = \ln 2$ 为前提下, 由 KKT 条件表达式 $\frac{\partial L_i}{\partial p_{i, rd}} = 0$, 获得中继节点功率更新方程如式 (18) 所示。

$$p_{i, rd} = \frac{\sqrt{\frac{n_0(Ap_{i, sr}^2 + p_{i, sr} n_0)}{E}} - (Ap_{i, sr} + n_0)n_0}{B(Ap_{i, sr} + n_0)} \quad (18)$$

其中, $E = \left(\frac{1}{\beta} - u\right) e^{-a_i c_i^{\min}} / a_i w_i \ln e AB$ 。

最后, 对 u 求偏导, 可以获得式 (19):

$$S_u = \frac{\partial D_u}{\partial u} = \sum_{i=1}^N p_{i, rd} - P_0 \quad (19)$$

其中, P_0 为中继用户的总功率。

采用梯度下降法对 u 进行更新:

$$u(t+1) = u(t) - \text{step} \times S_u \quad (20)$$

其中, step 为更新步长, 是一个不为 0 的常数。

由式 (16) 可以看出, 用户节点 i 发射功率 $p_{i, sr}$ 与剩余能量百分比 $\alpha_{i, sr}$ 成正比关系。即 $\alpha_{i, sr}$ 越大, 用户节点的发射功率 $p_{i, sr}$ 越大, 能量消耗越快; 随着 $\alpha_{i, sr}$ 的减少, 用户节点发射功率 $p_{i, sr}$ 逐渐减少, 能量消耗逐渐减少。从式 (18) 中可以得出

与式(16)相同的结论。正是在剩余能量多时,能量消耗快,剩余能量小时,能量消耗慢,所以平衡了各个节点的能耗,达到了延长网络生存时间的目的。

3.3 CreRPA 算法流程

根据上述功率求解方法,本文提出一种考虑剩余能量的顽健功率分配算法(CreRPA),该算法的特点是将节点的功率分配成本与节点剩余能量百分比联系起来,并在算法中考虑了顽健性来对抗水下信道的不确定性。CreRPA 算法流程如图2所示。

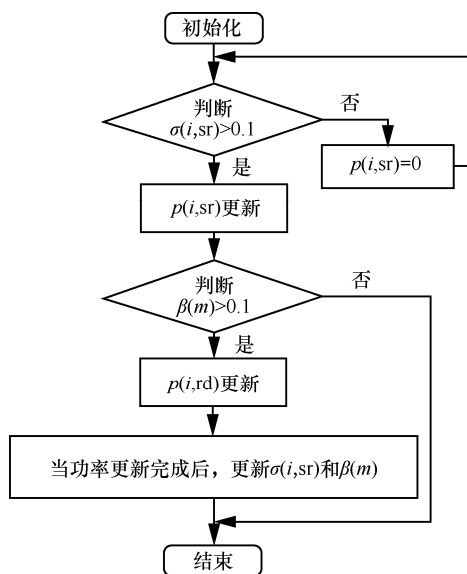


图2 CreRPA 算法流程

在算法初始阶段,先判断剩余能量的值,即判断用户节点的剩余能量百分比 $\alpha_{i, sr}$ 是否大于所要求的能量阈值,若大于能量阈值,用户节点功率按式(16)更新后进行信息传递;反之,用户节点死亡。再判断中继节点的剩余能量百分比 β 是否大于要求的能量阈值,若大于能量阈值,各中继节点功率按式(18)更新后转发信息;反之,算法终止。最后,更新所有节点的剩余能量百分比。重复以上过程,直到剩余能量百分比不能满足要求为止。

算法特点的相关分析如下。

(1) 本文提出的算法可分布式实现。中继节点从与其通信的用户节点处得到用户节点的功率策略,并只优化自身的转发功率,而非优化所有节点的功率策略。就用户节点而言,只需要从中继节点处得到关于自身的转发功率信息即可,而无需知道其他用户的信息便可优化自身的功率策略。因此整个优化过程中的信息传递符合分布式应用的特点。

(2) 本文所提出的算法中的信息交互对网络性能的影响较小。首先,中继节点需要的信息仅为与其通信用户节点的功率信息;其次,对于用户节点而言,其交互的信息仅为与自身有关的转发功率信息。因此,算法实现需要的信道开销较小。

(3) 本文提出的方法针对水声协同通信网络具有较强的适用性。首先,在水声协同通信网络中,CSI 普遍具有一定的不确定性,本文提出的算法利用顽健优化理论克服了此不确定性对网络性能的影响;其次,能量受限是水声协同通信中的普遍问题,本文通过考虑节点剩余能量对功率策略的影响延长了节点生存时间;最后,本文通过考虑各节点的最低通信容量需求,保证了节点的通信质量。

4 仿真分析

本文仿真实验采用 10 个用户节点、1 个中继节点和 1 个目的节点。它们随机分布在 $3 \text{ km} \times 2 \text{ km} \times 0.2 \text{ km}$ 的区域中。用户节点 i 初始发射功率 $p_{i, sr} = 0.1 \text{ W}$, 中继节点初始发射功率 $p_{i, rd} = 0.08 \text{ W}$, 噪声功率 $n_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ W}$ 。载波频率 $f = 20 \text{ kHz}$, 信号带宽为 $w_i = 200 \text{ Hz}$, 用户节点最大发射功率为 $p_{i, sr}^{\max} = 0.1 \text{ W}$ 。假设仿真过程中发射节点一直在进行数据传输,直到节点剩余能量低于 10% 时节点死亡。

图3和图4分别表示用户节点 S_i 和中继节点 R 功率收敛曲线。可以看出,用户节点 S_i 和中继节点 R 在初始阶段都以最大的功率发射。随着算法



的迭代,节点的发射功率波动逐渐减小,在第5次迭代后,得到各个用户中继节点的最佳发射功率,说明了所提算法的有效性。从图3中还可以看出,用户节点 S_1 的发射功率最大,这是因为它离中继节点的距离最远,传输时所需要的功率也就越大;而用户7离中继节点的距离最近,传输时所需要的发射功率也就最小。

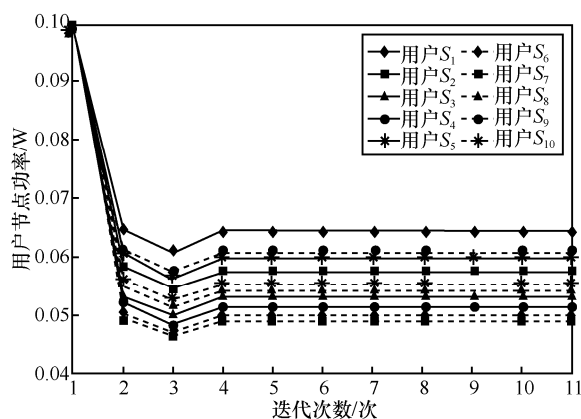


图3 用户节点功率收敛曲线

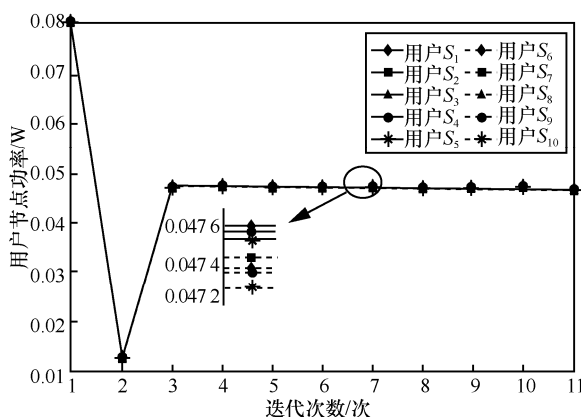


图4 中继节点功率收敛曲线

图5和图6分别表示用户节点 S_i 和中继节点发射功率随各自剩余能量变化曲线,设各节点的初始剩余能量百分比都为100%。可以看出,各节点根据自身的剩余能量百分比调整发射功率。在初始阶段,各个节点剩余能量百分最大,此时,功率成本最低,各个节点发射意愿最大,即发射功率最大;随着算法的进行,剩余能量逐渐减小,单位功率成本逐渐增加,节点发射意愿逐渐减少,

即节点的发射功率逐渐减少。当剩余能量低于10%时节点死亡。

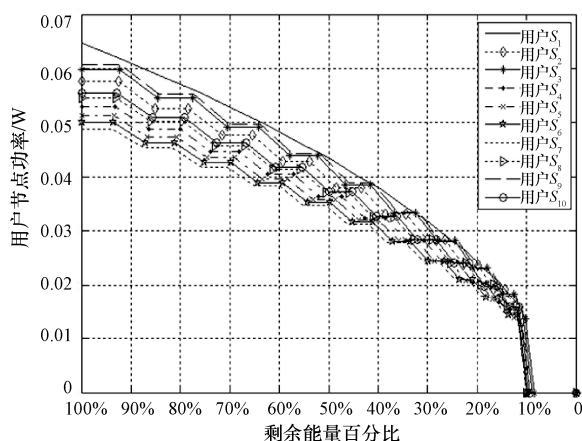


图5 用户功率随剩余能量变化曲线

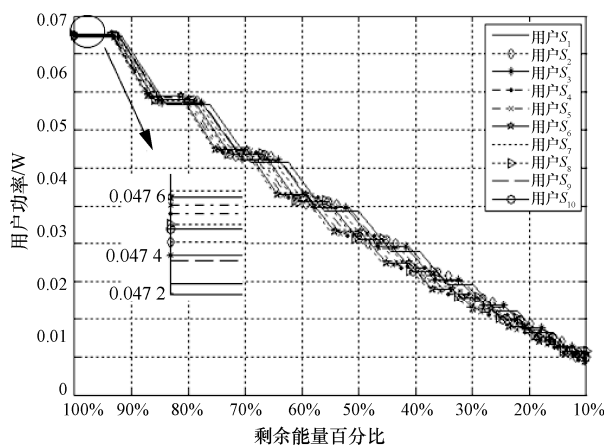


图6 中继功率随剩余能量变化曲线

图7为本文所提算法和没有考虑节点剩余能量算法的SNR对比图,K用户表示考虑节点剩余能量时的用户,W用户表示未考虑节点剩余能量

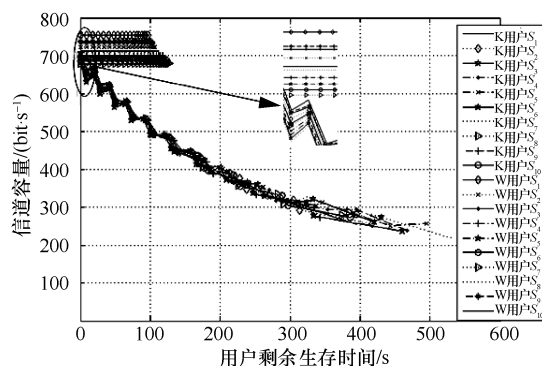


图7 考虑和没有考虑剩余能量的信道容量对比曲线

时的用户。可以看出,随着生存时间的增加,未考虑剩余能量的节点 S_i 获得的信道容量大,数据传输速率快。而本文算法随着生存时间的增加,节点 S_i 的信道容量逐渐下降,但是信道容量总量大约是未考虑剩余能量的 2~3 倍。这说明本文提出的算法在保证通信服务质量的前提下,增加了信道容量总量,延长了节点的生存时间,改善了网络服务质量。

图 8 为 2 种算法下各发射节点剩余能量随节点生存时间的变化情况。可以看出,本文算法比未考虑剩余能量的算法生存时间要长很多。这是因为不考虑剩余能量时,节点一直以最大的功率发射,节点 S_i 的剩余能量随节点生存时间的变化为一条衰减的直线,所以节点能量消耗快,生存时间缩短。而本文提出的算法,用户节点 S_i 的发射功率与剩余能量成正比,所以降低了能耗,延长了节点生存时间。在表 1 中列出了具体的生存时间对比。

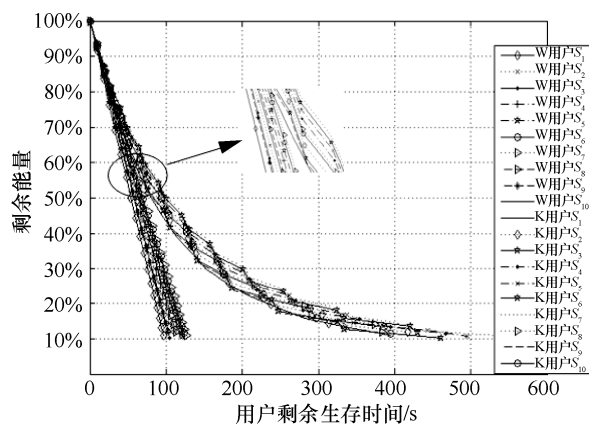


图 8 考虑剩余能量和没有考虑剩余能量的生存时间对比曲线

从表 1 中可以看出用户在两种情况下的用户生存时长(单位为 s),考虑剩余能量的生存时间大约是没有考虑的 3.4~4.5 倍,从而验证了算法的有效性。

图 9 基于信道增益的不确定性,对顽健性(R)和非顽健性(NR)算法的 SNR 做了对比,以此来表示信道不确定性对系统性能带来的影响。

表 1 考虑剩余能量和不考虑剩余能量的生存时间的比较

用户节点	生存时间/s	
	未考虑剩余能量	本文算法(考虑剩余能量)
1	96.6	395.1
2	107.2	417.7
3	104.9	461.1
4	117.3	467.6
5	121.8	495.3
6	123.5	430
7	127.8	532.3
8	112.7	383.7
9	101.4	342.9
10	111.8	394.8

可以看出,随着 σ 的增加,顽健性算法的信道容量也是增加的,但非顽健性的算法保持不变。这是因为随着 σ 的增加,信道不确定性也增加,为了克服这种波动,基于顽健性的算法可能需要消耗更多的能量,所以采取比较保守的策略,但是非顽健性的算法不需要考虑这种能耗。

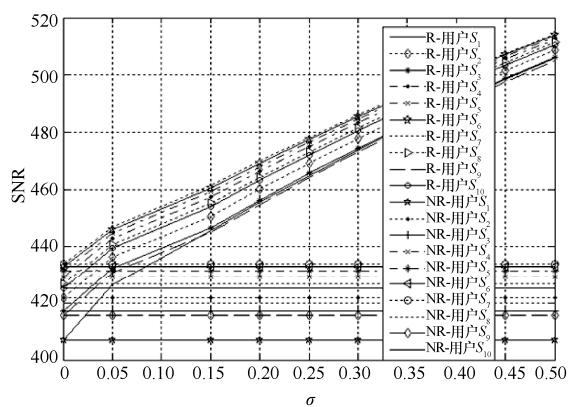


图 9 顽健性和非顽健性信道容量的比较

5 结束语

本文提出一种水声协作通信网络顽健功率分配算法,即在无法获得准确的信道信息情况下,通过在目标函数中加入剩余能量,并且使节点功率变化和剩余能量变化的趋势相一致,从而达到平衡网络节点能耗的目的。实验仿真



也表明, 所提出的算法能够有效地延长网络节点的生存时间, 并提高系统的整体性能。在未来的工作中, 将会考虑多种通信场景, 如多中继通信, 进一步将设计合适的中继选择方案, 以提高系统性能。

参考文献:

- [1] HEIDEMANN J, YE W, WILLS J, et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking[C]//Wireless Communications & Networking Conference April 3-6, 2006, Las Vegas, USA. Piscataway: IEEE Press, 2006(1): 228-235.
- [2] HAN Z, SUN Y L, SHI H. Cooperative transmission for underwater acoustic communications[C]//IEEE International Conference on Communications, May 19-23, 2008, Beijing, China. Piscataway: IEEE Press, 2008: 2028-2032.
- [3] HAN S, LI X, YAN L, et al. Game-based hierarchical multi-armed bandit learning algorithm for joint channel and power allocation in underwater acoustic communication networks[J]. *Neurocomputing*, 2018(289c): 166-179.
- [4] 赵季红, 何强, 曲桦, 等. 蜂窝网络中全双工 D2D 通信功率控制[J]. *电信科学*, 2017, 33(3): 1-7.
ZHAO J H, HE Q, QU H, et al. Power control for full-duplex D2D communications underlaying cellular networks[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(3): 1-7.
- [5] LIU Z, YUAN H, LI H, et al. Robust power control for amplify-and-forward relaying scheme[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(2): 263-266.
- [6] LIU L, HUA C, CHEN C, et al. Power allocation for virtual MIMO-based three-stage relaying in wireless ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(12): 6528-6541.
- [7] YU Y, HUA Y. Power allocation for a MIMO relay system with multiple-antenna users[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(5): 2823-2835.
- [8] 曹欢欢, 宋康, 李春国, 等. 无线充电的水声通信系统资源分配方案[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(5): 923-927.
CAO H H, SONG K, LI C G, et al. Resource allocation scheme of wireless charging for underwater acoustic communication system[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(5): 923-927.
- [9] CHOUDHURI C, MITRA U. Capacity bounds and power allocation for underwater acoustic relay channels with ISI[C]//ACM International Workshop on UnderWater Networks, Nov 3, 2009, Berkeley, USA. New York: ACM Press, 2009: 6.
- [10] 刘自鑫, 金志刚, 苏毅珊, 等. 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[J]. *计算机应用*, 2014, 34(7): 1951-1955.
LIU Z X, JIN Z G, SU Y S, et al. Relay selection and power allocation optimization algorithm based on long delay channel for underwater sensor network[J]. *Computer Application*, 2014, 34(7): 1951-1955.
- [11] WANG P, ZHANG X, SONG M. Power-efficient resource allocation for QoS provisioning in underwater MIMO-OFDM acoustic cooperative wireless networks[C]//GLOBECOM Workshops, Dec 9-13, 2013, Atlanta GA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4674-4678.
- [12] LIU L, HUA C, CHEN C, et al. Semi distributed relay selection and power allocation for outage minimization in cooperative relaying networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 295-305.
- [13] 方昕, 刘云驹, 曹海燕, 等. 大规模 MIMO 系统中低复杂度的稀疏信道估计[J]. *电信科学*, 2016, 32(5): 89-95.
FANG X, LIU Y J, CAO H Y, et al. Low-complexity sparse channel estimation for massive MIMO systems[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(5): 89-95.
- [14] LI C, SONG K, YANG L. Low computational complexity design over sparse channel estimator in underwater acoustic OFDM communication system[J]. *IET Communications*, 2017, 11(7): 1143-1151.
- [15] PANAYIRCI E, SENOL H, UYSAL M, et al. Sparse channel estimation and equalization for OFDM-based underwater cooperative systems with amplify-and-forward relaying[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(1): 214-228.
- [16] ZHANG X, SONG K, LI C, et al. Parameter estimation for multi-scale multi-lag underwater acoustic channels based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 4808-4820.
- [17] CHEN P, RONG Y, NORDHOLM S, et al. Joint channel and impulsive noise estimation in underwater acoustic OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(11): 10567-10571.
- [18] CHENG X, CAO R, QU F, et al. Relay-aided cooperative underwater acoustic communications: selective relaying[C]//OCEANS, May 21-24, 2012, Yeosu, Korea. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [19] YANG K, WU Y, HUANG J, et al. Distributed robust optimization for communication networks[C]//The 27th Conference on Computer Communications, May 2, 2008, Phoenix, USA. Pis-

cataway: IEEE Press, 2008: 1157-1165.

- [20] ZHU K, HOSSAIN E, ANPALAGAN A. Downlink power control in two-tier cellular OFDMA networks under uncertainties: a robust stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 520-535.

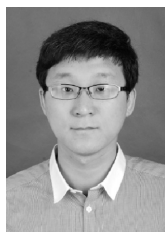
[作者简介]



李鑫滨 (1969—)，男，博士，燕山大学计算机控制工程河北省重点实验室教授、博士生导师，主要研究方向为水声通信网络优化、多机器人控制与优化、水下目标定位追踪算法研究。



张玲梅 (1993—)，女，燕山大学计算机控制工程河北省重点实验室硕士生，主要研究方向为水声通信网络资源分配。



韩松 (1989—)，男，燕山大学计算机控制工程河北省重点实验室博士生，主要研究方向为水声通信网络资源分配。



黄志鹏 (1994—)，男，燕山大学计算机控制工程河北省重点实验室硕士生，主要研究方向为水声协作通信网络资源分配。



刘志新 (1976—)，男，博士，燕山大学计算机控制工程河北省重点实验室教授，主要研究为无线网络资源分配。