

◇ 研究报告 ◇

# OFDM 水声通信系统中基于中继选择的资源分配算法\*

周桂莉 李有明<sup>†</sup> 付彩梅 余明宸 常生明 王旭芃

(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

**摘要** 针对水声通信中继系统中系统容量和中继选择问题, 本文提出了一种基于中继选择的资源分配算法。首先将每条中继链路的信道增益等效为虚拟直传链路的信道增益, 然后在等功率分配的前提下, 根据信道信息最佳原则, 提出了一种中继选择及资源分配的多用户迭代算法, 以实现每个用户的传输链路进行选择和子载波分配, 最后通过线性迭代注水算法进行功率分配。仿真结果表明, 所提算法在保证目标速率的前提下, 提升了系统容量。

**关键词** 中继选择, 水声通信, 资源分配

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2017)02-0182-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.02.014

## Resource allocation based on relay selection for OFDM underwater acoustic communication system

ZHOU Guili LI Youming FU Caimei YU Mingchen  
CHANG Shengming WANG Xupeng

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract** Focusing on the relay selection and the capacity for underwater acoustic relay communication system, a resource allocation algorithm based on relay selection is proposed in this paper. First, each of the relay-link channel gain is equivalent to virtual direct-link channel gain, then under the equal power allocation assumption, a multi-user iterative algorithm is proposed for relay selection and resource allocation according to the principle of the best channel gain, which can achieve the transmission link selection and subcarrier allocation. Finally, power on each subcarrier is allocated by water-filling algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm can increase the system capacity under the constraint of target rate.

**Key words** Relay selection, Underwater acoustic communication, Resource allocation

2016-05-06 收稿; 2016-08-10 定稿

\*国家自然科学基金(61571250), 宁波市自然科学基金(2015 A610121)

作者简介: 周桂莉(1992-), 女, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 研究方向: 水声通信中的资源分配。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: liyouming@nbu.edu.cn

## 1 引言

近年来,随着海洋开发和国防建设的发展,利用水声通信技术传递信息的需求大大增加,多媒体实时业务要求通信系统逐步从单一的承载话音和低速数据的网络向数据话音图像等多媒体信息的综合传输网演化。然而由于水声信道的可用带宽非常有限,通常在几十至几百千赫兹<sup>[1]</sup>,受界面反射、声线弯曲及随机散射等影响,多途效应和能量损失严重<sup>[2]</sup>,导致现有的地上无线通信技术无法直接使用。因此如何充分利用水声信道资源,在有限的水声信道带宽内实现系统速率最大化<sup>[3]</sup>,是水声通信领域值得关注的一项重要问题。正交频分复用(Orthogonal frequency domain multiplexing, OFDM)技术和协作通信技术在水下通信系统中得到了广泛重视与应用<sup>[4-5]</sup>。OFDM采用多载波调制,将串行高速数据流转换成并行的低速数据流,并在码元中加入保护间隔来减小码间干扰的影响,提高频带利用率。另外由于水声信道中可用带宽会随着传播距离的增加逐渐减小,路径衰落严重,所以在长距离传输时采用中继协作技术能大大提高水声通信的性能<sup>[6-8]</sup>,并能提供更广泛的信号覆盖。因此研究OFDM水声通信系统资源分配过程中的中继选择具有重要的意义。

基于水声通信系统的中继研究引起了学者的高度重视<sup>[9-12]</sup>,在已有的文献中,中继选择方法主要分为两类,一类是根据中继位置的特性来进行选择,其中文献[9]提出了一种在水声网络中基于节点深度的协同路由(CoDBR)方法,利用节点的深度信息来选择中继,只有浅深度的节点才能被选为中继节点进行数据的传输,有效地提高了系统的可靠性和吞吐量。文献[10]针对水声通信感知网络提出了一种协作ARQ(自动重发请求)机制,当目的节点接收到错误的数据包时,通过选择一个到目的节点距离最短的中继节点来要求数据重发,提高了传输的成功率。这两种方法未能充分考虑水声通信环境。而文献[11]在水声无线感知网络下提出了一种基于协作最佳中继分配(CoBRA)标准的中继选择算法,该方法将水声信道的统计信息考虑其中,通过水声信道状况来选择中继,有效提高了传输速率。文献[12]提出了一种在水声通信环境下基于传输时延的自适应中继选择方法,该方法将传输过程中由于声速带来的时延考虑其中,选择一个最小时延的

中继进行传输,大大降低了系统的误比特率。以上文献中源节点到目的节点的信息传输都是通过中继节点完成的,没有考虑传输模式的选择,而在实际通信过程中传输模式的选择能大大提升水声的系统容量。

针对OFDM水声中继通信系统,本文提出了一种基于中继选择的资源分配算法。首先建立了含传播损失、多径效应及多普勒效应的水声信道模型,然后提出将中继链路的信道增益转换为等效的虚拟直传链路信道增益的方法,基于此结果设计了一种基于中继选择的资源分配算法,通过比较每个子载波上直传链路和虚拟直传链路的信道增益大小,选择一条信道最佳的链路进行传输,实现对每个目的节点传输模式和中继的选择及子载波分配,最后利用迭代注水进行功率分配。仿真结果表明,本文算法在保证目标速率的前提下,能够有效的进行子载波及功率分配,提升系统容量。

## 2 系统模型

本节先建立了OFDM水声信道模型,在此模型的基础上建立了水声中继系统及该系统的资源分配模型。

### 2.1 信道模型

对于OFDM水声通信系统来说,每个子载波上的传播损失和海洋噪声均不相同,且与通信频率及传播距离有关,定义水声信道的路径增益<sup>[13]</sup>为

$$Q(d, f) = A_0^{-1} d^{-sp} (a(f))^{-d}, \quad (1)$$

其中 $d$ 为传输距离, $f$ 为通信频率, $A_0$ 为归一化系数, $d^{-sp}$ 表示扩展损失, $sp$ 为扩展系数,描述了传播的几何特征, $(a(f))^d$ 代表吸收损失, $a(f)$ 可由Thorp<sup>[14]</sup>经验公式给出

$$\begin{aligned} 10 \log a(f) = & 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} \\ & + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003. \end{aligned} \quad (2)$$

针对水声信道的频域选择特性,使用了循环前缀正交频分复用(Cyclic-prefix orthogonal frequency domain multiplexing, CP-OFDM)技术对发送信号进行调制。假设传统的信道传递函数为 $h(f)$ ,其可表示为 $h(f) = \sum_{p=0}^{P-1} a_p e^{-j2\pi(f+f_p)\tau_p}$ ,

其中 $P$ 是信道多径数, $f_p$ 是第 $p$ 条路径上的多

普勒频移,  $a_p$  和  $\tau_p$  分别表示第  $p$  条路径信道响应的幅度和时延。若将路径增益考虑到信道响应中 [15], 水声信道传递函数等效为  $H(f) = \sum_{p=0}^{P-1} \sqrt{Q(d_p, f)} a_p e^{-j2\pi(f+f_p)\tau_p}$ 。假设通信距离为  $d_0$ , 在时延相差不大的条件下, 其可简化为  $H(f) = \sqrt{Q(d_0, f)} \cdot h(f)$ 。对于第  $n$  个子载波  $H_n = \sqrt{Q(d_0, f_n)} \cdot h(f_n)$ ,  $f_n$  表示子载波  $n$  的频率。

图1、图2为子载波数128, 初始频率20 kHz, 通信距离1 km, 多径数为6, 每条路径的时延范围为(0,0.01], 扩展系数为1.5时的水声信道传播特性。从图1~2中可以看出, 不同子载波上的传播损失不同, 低频的子载波路径增益大, 传播损失较小。

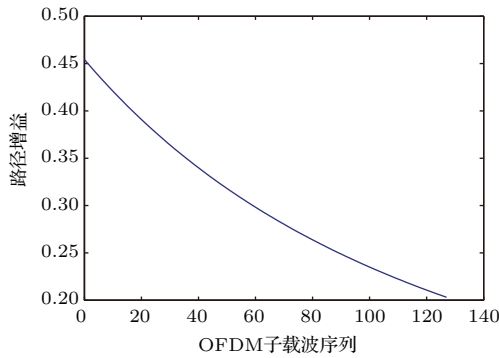
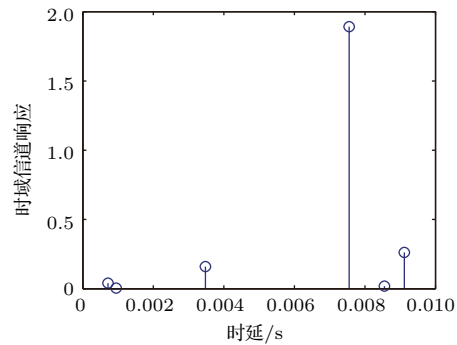


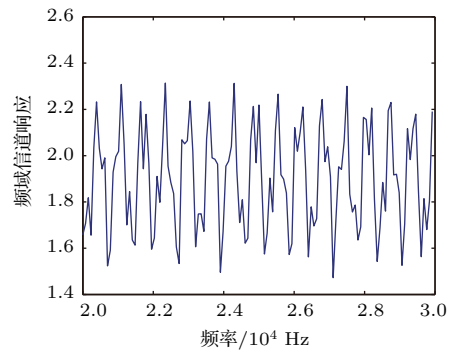
图1 不同子载波的路径增益  
Fig. 1 Path gain between different subcarriers

### 2.2 水声中继资源分配模型

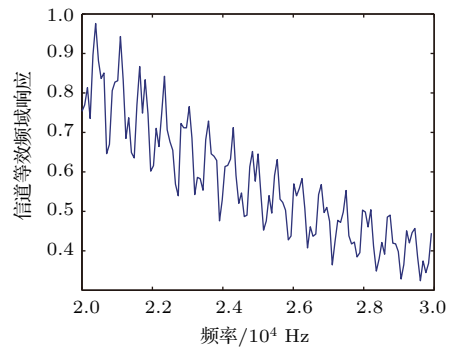
图3是一个基于OFDM水声通信系统的下行链路示意图。假设系统带宽为  $B$ , 中继数目为  $K$ , 目的节点数为  $M$ , 子载波数为  $N$ 。在水深小于100 m的环境中, 所有的子载波具有相同的带宽并且经历独立的频率选择性瑞利衰落 [1]。源节点可以获得完全的信道信息, 并且在一次信息传输过程时间内信道状态不发生改变。源节点可以与目的节点直接通信, 也可以通过中继与目的节点间接通信, 传输模式的选择取决于两种模式的信道增益。当源节点选择与目的节点间接传输时, 通过两个子时隙来完成信息的传输 [16]。中继采用解码转发 (DF) 策略 [17], 与文献 [18] 相同, 中继在第二时隙转发信息时采用与第一时隙相同的子载波, 在接收端目的节点采用最大比合并 (MRC) 接收源节点和中继转发的信号, 为了避免干扰, 一个子载波只能被一个目的节点或中继占用。



(a) 水声时域信道响应



(b) 水声频域信道响应



(c) 水声信道等效频域响应

图2 水声信道特性

Fig. 2 Channel characteristic for underwater acoustic

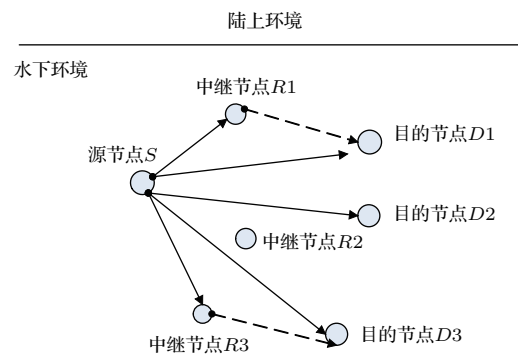


图3 水下通信系统下行链路

Fig. 3 Down link for underwater acoustic system

根据等效的水声信道传递函数,定义源节点 $S$ 到目的节点 $m$ ,源节点 $S$ 到中继 $k$ ,中继 $k$ 到目的节点 $m$ 在子载波 $n$ 上的信道系数分别为 $H_{m,n}^{SD}$ 、 $H_{k,n}^{SR}$ 、 $H_{k,m,n}^{RD}$ ,其中 $H_{m,n}^{SD} = \sqrt{Q(d_m, f_n)} \cdot h(f_n)$ ,  $H_{k,n}^{SR} = \sqrt{Q(d_k, f_n)} \cdot h(f_n)$ ,  $H_{k,m,n}^{RD} = \sqrt{Q(d_{k,m}, f_n)} \cdot h(f_n)$ ,  $d_m$ 、 $d_k$ 、 $d_{k,m}$ 分别表示各个节点之间的距离。 $\sigma_{SD,m,n}^2$ 、 $\sigma_{SD,k,n}^2$ 、 $\sigma_{RD,k,m,n}^2$ 分别表示对应信道上的加性高斯白噪声功率,

其中 $k(k \geq 1)$ 和 $m(m \geq 1)$ 分别表示中继和目的节点序号,则对应信道上的信道增益可以分别表示为: $a_{m,n}^{SD} = |H_{m,n}^{SD}|^2 / \sigma_{SD,m,n}^2$ 、 $a_{k,n}^{SR} = |H_{k,n}^{SR}|^2 / \sigma_{SD,k,n}^2$ 、 $a_{k,m,n}^{RD} = |H_{k,m,n}^{RD}|^2 / \sigma_{RD,k,m,n}^2$ 。同时,定义 $p_{m,n}^S$ 、 $p_{k,m,n}^R$ 分别表示源节点和中继在相应子载波上的发射功率。这样目的节点 $m$ 通过子载波 $n$ 获得的传输速率为

$$R_{k',m,n} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2(1 + a_{m,n}^{SD} p_{m,n}^S), & \text{直传模式, } k' = 0, \\ \frac{1}{2} \min \{ \log_2(1 + a_{k,n}^{SR} p_{m,n}^S), \log_2(1 + a_{m,n}^{SD} p_{m,n}^S + a_{k,m,n}^{RD} p_{k,m,n}^R) \}, & \text{中继模式, } k \geq 1, k' = k. \end{cases} \quad (3)$$

本文的目标是基于中继选择的资源优化分配算法,其数学模型可以表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k'=0}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k',m,n} R_{k',m,n}, \\ \text{s.t.} \quad & \text{A1: } \rho_{k',m,n} \in \{0, 1\}, \forall k', m, n, \\ & \text{A2: } \sum_{k'=0}^K \sum_{m=1}^M \rho_{k',m,n} = 1, \forall n, \\ & \text{A3: } \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{m,n}^S + \sum_{k'=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{k',m,n}^R \leq P_T, \\ & \text{A4: } \sum_{k'=0}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k',m,n} R_{k',m,n} \geq R_m, \forall m, \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中 $\rho_{k',m,n}$ 表示链路选择因子,当 $\rho_{k',m,n} = 1$ 时,源节点与目的节点 $m$ 在子载波 $n$ 上通信,并且当 $k' \geq 1$ 时,源节点与目的节点通过中继间接通信;当 $k' = 0$ 时,源节点与目的节点 $m$ 直接通信。 $R_m(1 \leq m \leq M)$ 表示目的节点 $m$ 的目标速率, $P_T$ 表示系统总功率。约束条件A1为 $\rho_{k',m,n}$ 的取值约束;A2表明一个子载波只能被一个目的节点或一个中继占用;A3是系统总功率约束;A4保证每个目的节点必须达到其目标速率要求。

### 3 资源分配算法

资源优化问题(4)是一个混合整数优化问题,很难得到其最优解。为了降低复杂度,在资源分配之前,本文先将中继链路转换为等效的虚拟直传链路,求出其等效的信道增益,然后通过比较每个子载

波上直传链路的信道增益和各条中继链路的等效信道增益选择传输方式和中继。

从式(3)可以看出,若要使系统容量最大化<sup>[14]</sup>,应该满足 $a_{k,n}^{SR} p_{m,n}^S = a_{m,n}^{SD} p_{m,n}^S + a_{k,m,n}^{RD} p_{k,m,n}^R$ 。

令 $p_{k',m,n} = p_{m,n}^S + p_{k,m,n}^R$ ,表示系统传输时的发射总功率,则中继传输时的等效信道增益可以表示为

$$a_{k,m,n} = \frac{a_{k,n}^{SR} a_{k,m,n}^{RD}}{a_{k,n}^{SR} + a_{k,m,n}^{RD} - a_{m,n}^{SD}}. \quad (5)$$

用 $a_{k',m,n}$ 表示源节点与目的节点通信时的信道增益,公式(3)可以简化为

$$R_{k',m,n} = \frac{1}{2} \log_2(1 + a_{k',m,n} p_{k',m,n}), \quad (6)$$

其中 $a_{k',m,n} = \max(a_{m,n}^{SD}, a_{k,m,n})$ 。于是将中继问题等效为点对点通信问题,以便接下来的中继选择和资源分配。

#### 3.1 子载波分配和中继选择

首先进行中继选择和子载波分配,为了综合考虑信道的有效利用率和目的节点的目标速率约束条件,从第一个目的节点开始,基于信道增益最优原则为其分配一个最优的子载波,并根据当前目的节点的信道信息选择直接传输或是选择一个最优中继实现转发,直到为每一个目的节点分配一个最优子载波;然后在假设子载波等功率分配条件下,计算每个目的节点的即时速率,计算其与目标速率的差值,找出差值最大的目的节点,继续为该目的节点分配一个最优子载波,按上述过程执行,再将剩余子载波分配给信道增益最好的目的节点,直到所有的子载波被分配完。其分配迭代具体步骤如下:

(1) 初始化, 令  $\Omega_N = \{1, 2, 3, \dots, N\}$  为当前可用的子载波集合;  $\Omega_m = \emptyset$ , ( $0 < m \leq M$ ) 为目的节点  $m$  获得的子载波集合;  $r_m = 0$ , ( $0 < m \leq M$ ) 为目的节点  $m$  获得的即时速率;  $p = P_T/N$  为平均功率。  $N_m = 0$ , ( $1 \leq m \leq M$ ) 为目的节点  $m$  实际分配的子载波个数;  $\Omega_K = \{1, 2, \dots, K\}$  为中继序号集合;  $\Phi_n = \emptyset$ , ( $1 \leq n \leq N$ ) 为子载波  $n$  选择的直传模式和中继序号的集合;

(2) 根据目的节点目标速率进行子载波初次分配, 从大到小依次为每个目的节点分配一个最优子载波和并选择传输模式和中继, 其分配原则为  $(k'', n'') = \arg \max a_{k', m, n} \quad n \in \Omega_N$ ,  $\forall k' \in \Omega_K \cup \{0\}$ , 然后更新  $\Omega_N = \Omega_N - \{n''\}$ ,  $\Omega_m = \Omega_m \cup \{n''\}$ ,  $N_m = N_m + 1$ ,  $\Phi_{n''} = \Phi_{n''} \cup \{k''\}$ ;

(3) 等功率分配条件下, 计算出每个目的节点获得的传输速率为  $R_{k'', m, n''} = (1/2) \log_2(1 + pa_{k'', m, n''})$ ,  $\forall m, n'' \in \Omega_m$ ,  $k'' \in \Phi_{n''}$ , 更新速率  $r_m = r_m + R_{k'', m, n''}$  和  $R_m - r_m$ , 找出满足  $\arg \max(R_m - r_m)$  的目的节点, 继续为目的节点继续分配一个最优子载波和传输模式选择;

(4) 执行步骤(3), 直到所有的目的节点达到其目标速率, 如果剩余子载波未分配完则执行步骤(5);

(5) 将剩余子载波  $n(n \in \Omega_N)$  依次分配给信道增益最好的目的节点并进行传输模式选择, 即  $(k'', m'') = \arg \max a_{k', m, n}$ ,  $\forall k' \in \Omega_K \cup \{0\}$ ,  $1 \leq m \leq M$ , 然后更新  $\Omega_N = \Omega_N - \{n\}$ ,  $\Omega_{m''} = \Omega_{m''} \cup \{n\}$ ,  $N_{m''} = N_{m''} + 1$ ,  $\Phi_n = \Phi_n \cup \{k''\}$ , 重复该步骤直到全部子载波都被分配完毕。

### 3.2 功率分配

在中继选择和子载波分配完之后, 计算每个目的节点所需的功率  $P_m = pN_m$ , 原资源优化模型(4)中离散二进制整数变量可以消除, 并可以简化为对于每个目的节点  $m$  的功率优化分配模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{n \in \Omega_m} \sum_{k \in \Phi_n} \frac{1}{2} \log_2(1 + a_{k', m, n} p_{k', m, n}), \\ \text{s.t. B1:} \quad & \sum_{n \in \Omega_m} \sum_{k \in \Phi_n} p_{k', m, n} \leq P_m. \end{aligned} \quad (7)$$

传统的 OFDM 水声通信系统将总发射功率平均分配到各个子载波上, 由于传播特性对功率分配的影响, 每个子载波上分配的功率可以不同, 本文运用系统容量最大化准则下的注水算法<sup>[19]</sup>来进行功

率分配, 即对式(7)进行拉格朗日乘法求解得到

$$p_{k', m, n} = \max \left( 0, \lambda - \frac{1}{a_{k', m, n}} \right), \quad (8)$$

其中  $\lambda$  为注水线, 与限制条件 B1 有关。

## 4 仿真结果与分析

为了验证所提算法的性能, 仿真环境如下: 水深为 30 m, 假设水温, 盐度等水文环境在浅海中基本保持不变, 系统带宽为 10 kHz, 子载波的起始频率为 20 kHz, 频率间隔为 39.0625 Hz, 子载波数为 256, 中继数为 3, 目的节点数为 6, 中继节点随机放置在目的节点和源节点之间。采用本文所提水声信道模型, 扩展系数分别为 1.5 和 2, 多径数为 6, 每条路径的时延范围为 (0, 0.01], 根据 Wenz 谱级曲线, 设置噪声谱级为 -8 dB, 最大多普勒频移为 1 Hz, 信道特性如图 1 所示。重点比较了如下算法: 算法 1 通过中继节点到目的节点的距离来选择中继<sup>[10]</sup>, 算法 2 根据水声信道的统计信息来选择中继<sup>[11]</sup>, 以及本文算法。为了获得比较稳定可靠的仿真结果, 该仿真结果为 5000 次蒙特卡罗仿真取平均得到。

图 4 和图 5 为信噪比为 5 dB 时, 不同扩展系数下系统容量随传输距离的变化曲线。从图 4~5 中可以看出在不同的扩展系数下, 系统容量都随着传输距离的增大而减小, 并且扩展系数越大, 系统容量越大。对于一个固定的传输距离, 采用本文算法时系统的总容量最大, 算法 2 次之, 算法 1 最小。因为算法 2 也将水声环境考虑其中, 只是在进行中继选择时没有考虑传输模式的选择, 消耗了部分功率, 降低了系统容量, 而算法 1 只是通过中继节点到目的节点的距离来选择中继, 而没有考虑源节点到中继节点的链路情况, 所以大大减小了系统容量。仿真结

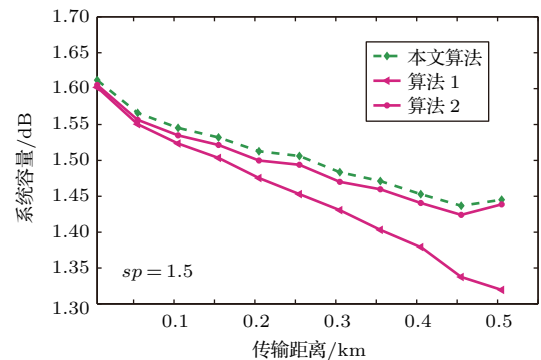


图 4 扩展系数为 1.5 时不同传输距离下的系统容量  
Fig. 4 System capacity in different transmission distance when  $sp = 1.5$

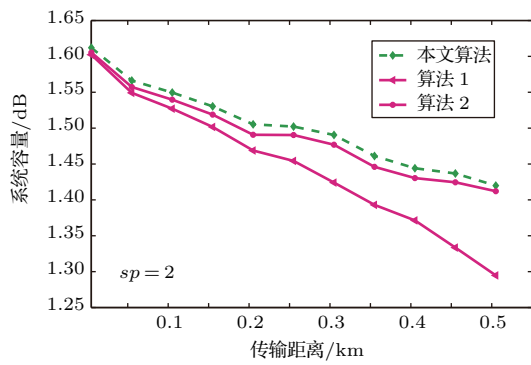


图5 扩展系数为2时不同传输距离下的系统容量  
Fig. 5 System capacity in different transmission distance when  $sp = 2$

果表明,本文提出的中继选择算法在信噪比为5 dB时随传输距离的增加性能优于其它两种中继选择算法。

图6和图7为传输距离为100 m时,不同扩展系数下系统容量随信噪比的变化曲线。从图6~7中可以看出,在不同扩展系数下,随着信噪比的增加,系统的发射功率不断增加,系统容量不断增大,而且采用本文算法的系统容量曲线始终在最上方,获得的系统容量最大。对于一个固定的系统容量,本文算法所需的信噪比比算法1约低5 dB,比算法2约低3.5 dB。因此,在传输距离为100 m时,与其它两种算法相比,本文算法随信噪比的增加可以获得更大的系统容量。

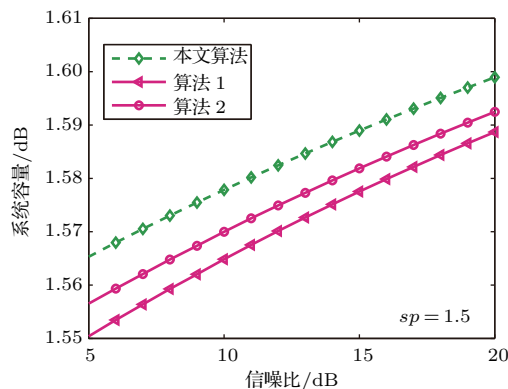


图6 扩展系数为1.5时不同信噪比下的系统容量  
Fig. 6 System capacity in different SNR when  $sp = 1.5$

复杂度分析: 如果想对原问题进行最优的中继和子载波分配需要采用穷举搜索法,为NP难问题。本文采用分步的方式,主要运算过程及复杂度包括:第1部分是等效信道增益求解,其复杂度为

$O(KMN)$ ;第2部分为中继选择及子载波分配,其复杂度为 $O(KMN + (N - M)(2M + KMN))$ ;第3部分为功率的优化分配,其运算量为 $O(MN)$ ,因此总的计算复杂度为近似为 $O(KMN^2)$ 。而算法一和算法二也采用分步计算的方法,其复杂度分别为 $O(2KMN + (N - M)(2M + KMN) + MN)$ 和 $O(KMN + (N - M)(2M + KMN) + 2MN)$ ,近似为 $O(KMN^2)$ ,与本文提出的算法复杂度相近。

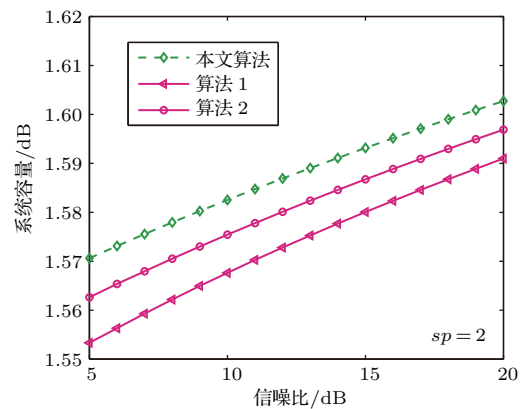


图7 扩展系数为2时不同信噪比下的系统容量  
Fig. 7 System capacity in different SNR when  $sp = 2$

## 5 结论

本文提出了一种OFDM水声通信系统中基于中继选择的资源分配算法。该算法将中继链路的信道增益转化为等效的虚拟直传链路的信道增益,首先通过比较每条中继链路的等效信道增益与直传链路的信道增益选择传输模式及中继,然后在假设等功率分配的前提下,根据目的节点信道信息完成中继选择和子载波分配,最后通过线性迭代注水算法进行功率分配。本文算法以较低的复杂度进行了有效的传输模式选择及中继选择,实现了在满足目标速率的情况下使得系统容量最大化。

## 参 考 文 献

- [1] LE A M, KIM D S. Joint channel and power allocation for underwater cognitive acoustic networks[C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications, IEEE, 2014.
- [2] 李轩,王磊,孙长瑜. 基于正交频分复用的水声自适应通信系统性能仿真研究[J]. 应用声学, 2011, 30(1): 1-12.  
LI Xuan, WANG Lei, SUN Changyu. On performance of adaptive acoustic communication based on orthogonal

- frequency division multiplex[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 30(1): 1–12.
- [3] 罗亚松, 许江湖, 胡洪宁, 等. 正交频分复用传输速率最大化自适应水声通信算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(12): 2872–2876.
- LUO Yasong, XU Jianghu, HU Hongning, et al. Research on self-adjusting OFDM underwater acoustic communication algorithm for transmission rate maximization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(12): 2872–2876.
- [4] RADOSEVIC A, AHMED R, DUMAN T M, et al. Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2014, 39(2): 357–370.
- [5] CHEN Y, WANG Z, WAN L, et al. OFDM-modulated dynamic coded cooperation in underwater acoustic channels[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2015, 40(1): 159–168.
- [6] STOJANOVIC M. Capacity of a relay acoustic channel[C]//*Oceans*, 2007: 1–7.
- [7] CAO R, QU F Z, YANG L Q. Asynchronous amplify-and-forward relay communications for underwater acoustic networks [J]. *IET Communications*, 2016, 10(6): 677–684.
- [8] ZHANG Y, CHEN Y, ZHOU S, et al. Dynamic node cooperation in an underwater data collection network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4127–4136.
- [9] NASIR H, JAVAID N, ASHRAF H, et al. CoDBR: Cooperative depth based routing for underwater wireless sensor networks[C]//*Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*. IEEE, 2014: 52–57.
- [10] LEE J W, JIN Y C, CHO H S. A cooperative ARQ scheme in underwater acoustic sensor networks[C]. *Oceans*, 2010 IEEE-Sydney, 2010: 1–5.
- [11] LUO Y, PU L, PENG Z, et al. Effective relay selection for underwater cooperative acoustic networks[C]//*IEEE, International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. IEEE Computer Society, 2013: 104–112.
- [12] GAO C, LIU Z, CAO B, et al. Relay selection scheme based on propagation delay for cooperative underwater acoustic network[C]// *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, 2013: 677–682.
- [13] STOJANOVIC M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel[J]. *Acm Sigmobile Mobile Computing & Communications Review*, 2006, 11(4): 41–47.
- [14] VANDENDORPE L, DURAN R T, LOUVEAUX J, et al. Power allocation for OFDM transmission with DF relaying[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, May, 2008: 3795–3800.
- [15] POLPRASERT C, RITCEY J A, STOJANOVIC M. Capacity of OFDM systems over fading underwater acoustic channels[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2011, 36(4): 514–524.
- [16] WANG P, ZHANG X. Energy-efficient relay selection for QoS provisioning in MIMO-based underwater acoustic cooperative wireless sensor networks[C]// *Information Sciences and Systems*, 2013: 1–6.
- [17] NOURI H, UYSAL M, PANAYIRCI E. Information theoretical performance analysis and optimisation of cooperative underwater acoustic communication systems[J]. *Iet Communications*, 2016, 10(7): 812–823.
- [18] ZHANG X X, SHEN X S, XIE L L. Joint subcarrier and power allocation for cooperative communications in lte-advanced networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 658–668.
- [19] AVAL Y M, WILSON S K, STOJANOVIC M. On the achievable rate of a class of acoustic channels and practical power allocation strategies for OFDM systems[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2015, 40(4): 785–795.