

基于 MIMO 分集和复用折衷的水下传感器网络节能算法

王建平^{1,2}, 王全蕊^{1,2}, 朱凤杰¹, 陈伟², 韩亚峰¹

(1 河南科技学院 信息工程学院, 河南 新乡 453003; 2 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 提出了一种权衡分集和复用 MIMO 技术的水下传感器网络节能算法, 设计了水下传感器网络信号传播模型, 实现了 MIMO 复用和分集折衷的节能方案. 基于 MATLAB 进行了算法的仿真实验, 对比了此算法和 MIMO 全分集、MIMO 全复用算法的性能. 结果表明, 提出的算法在保证传输可靠性的基础上实现了节点能耗降低, 延长了水下传感器网络的生存时间, 提高了传输速率、降低了误码率.

关键词: 水下传感器网络; MIMO 全分集; MIMO 全复用; MIMO 复用和分集折衷

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)03-0136-05

An Energy-Efficient Algorithm Based on the Tradeoff Diversity and Multiplexing of MIMO for Underwater Sensor Networks(UWSNs)

WANG Jian-ping^{1,2}, WANG Quan-rui^{1,2}, ZHU Feng-jie¹,
CHEN Wei², HAN Ya-feng¹

(1 School of Information Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;

2 School of Information Engineer, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, we propose an energy-efficient algorithm for which weighs the diversity and multiplexing of MIMO technology. We design the signal propagation model of UWSNs, and realize an energy-efficient solution based on the tradeoff between multiplexing and diversity of MIMO. Finally, we conduct the simulation experiment by MATLAB, then compare the performance of three algorithms, which are MIMO full diversity, MIMO full multiplexing and MIMO based on the tradeoff diversity and multiplexing. The simulation results show that the proposed algorithm in guarantee the transmission reliability on the basis of reducing the energy consumption, and prolong the survival time, enhance the transmission rate and reduce the bit error rate of UWSNs.

Key words: underwater Sensor Networks; MIMO full diversity; MIMO full multiplexing; MIMO based on tradeoff diversity and multiplexing

1 引言

水下传感器网络(Underwater Sensor Networks, UWSNs)是由具有声学通信与计算能力的传感器节点构成的水下监测网络系统. 在水下传感器网络中, 由于射频信号的衰减等问题极其严重, 为此通常采用超声波进行水声通信.

当前比较典型的水声通信载波频率是 10~40

KHz, 传输速率大约为 1 500 m/s^[1]. 和无线传感器网络相比, 水下传感器网络的数据延迟更大, 节点部署更加困难, 数据误码率极高. 由于水声信道的带宽极其有限, 对可靠高速的水下传感器网络提出了新的要求^[2].

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)是一种改善无线通信性能的技术, 它采用多天线技术, 使信号通过发射端与接收端的多个天线发送和接收.

收稿日期: 2016-06-03; **修回日期:** 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371525); 企业横向委托项目(水下传感器网络协作 MIMO 部署方法及节点试制研究); 河南省新乡市科技发展计划项目(14GY23); 2014 年国家级大学生创新训练项目(201410467008)

通过 MIMO 技术,可以在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下,成倍提高系统的信道容量,同时降低信号干扰^[3].研究表明,水下 MIMO 技术是可行的,可以极大地降低水下通信干扰,提高通信质量^[4]. MIMO 技术可以利用水声信道的复杂散射特,从而获得更高的信道容量增益,实现高速水声通信.

2 研究现状

Gaultier Real^[5]等人提出在浅水环境下采用极高频实现 MIMO 水下通信的信道估计方法,实现水下传感器 MIMO 通信信道的估计过程. Li-Chung Kuo^[6]等人提出了 MIMO 水下传感器网络分布式 MAC 协议的设计过程,测试表明,该协议实现了信道利用率的提高.

Lifeng Cai^[7]等人提出基于主动时反的水声 MIMO 通信方法,结合信道量化和信道编码方法,采用时反来减少水下 MIMO 通信的剩余码间干扰和交叉干扰. Li-Chung Kuo^[8]等人提出了基于 MIMO-ODFM 技术的水下传感器网络跨层路由协议,设计了水声 MIMO-ODFM 收发机模型,分析了复用和分集技术.

综上所述,水下传感器网络 MIMO 技术的相关研究已经取得一定的研究成果.本文提出了一种权衡分集和复用 MIMO 技术的水下传感器网络节能算法.设计了水下传感器网络信号传播模型,实现了 MIMO 复用和分集折衷的节能算法.通过仿真实验验证了算法的性能.实验结果表明,本文提出的算法在保证传输可靠性的基础上实现了节点能耗降低,延长了整个网络的生存时间,同时实现了传输速率、误码率等水下传感器网络的性能提升.

3 系统模型

3D 水下传感器网络中,节点被部署在水下不同深度,通过超声波将监测信号传输给水面基站.

3.1 水下传感器网络 MIMO 系统建模

假设在一个水下传感器网络中,每个节点有 M_T 个发射天线和 M_R 个接收天线(水听器).当一个节点发送信息到另一个节点时,它的数据被分割成 M_T 个子载波,每个子载波通过一个发射天线传输.所有 M_T 个发射天线使用一个可用的子载波范围 $(f_1, \dots, f_n)$ 同时传输子载波到接收器,每个子载波的带宽为 Δf ,假设在每个 OFDM 子载波内信道是静态的,则接收端收到的信息如式(1)所示:

$$y(f_k) = \sqrt{P(f_k)}XA(l, f_k) + n(f_k) \quad (1)$$

式中, f_k 表示第 k 个子载波的中心频率, $y(f_k) = [y_1(f_k)y_2(f_k)\dots y_{M_R}(f_k)]$ 表示接收信号矩阵, $y_n(f_k) (1 \leq n \leq M_R)$ 是接收天线 n 接收到的信号. $X = [x_1x_2\dots x_{M_T}]$ 表示发送信号矩阵, $x_m (1 \leq m \leq M_T)$ 表示第 m 个发射天线发送的信号. $n(f_k) = [n_1(f_k)n_2(f_k)\dots n_{M_R}(f_k)]$ 表示的是噪声矩阵,其元素可以用高斯随机变量进行建模.

$A(l, f_k) = \{a_{m,n}(l, f_k): 1 \leq m \leq M_T, 1 \leq n \leq M_R\}$ 表示信道矩阵,其元素 $a_{m,n}(l, f_k)$ 表示从发射天线 $m (1 \leq m \leq M_T)$ 到接收天线 $n (1 \leq n \leq M_R)$ 的信道衰落系数.假设信道矩阵在接收端可知,但在发送端未知,则发射信号向量 $\mathbf{X}$ 假设满足电量限制 $\sum_{m=1}^{M_T} |x_m|^2 = 1$, 即在第 k 个子载波上的发送功率是 $P(f_k)$, 无论有多少个发射天线被部署在发送节点上.

3.2 复用和分集权衡

MIMO 是一种增加水下传感器网络数据传输速率的方法,在该方法中多个发射天线采用相同的频率同时可以传输不相关的数据流,增加频谱效率称为复用增益.在接收端,接收机可以通过相关解调器滤除其他信息实现数据流的解调.

水下传感器网络采用 MIMO 技术,可以同时复用在复用增益和分集增益两方面受益.但是,这两种增益不能同时实现最优,它们之间存在折衷,复用增益的增加以牺牲分集增益为代价,同样,分集增益的增加也会导致复用增益的下降.在 RF 中,对于任何针对复用增益 r ,最大的分集增益 d 如式(2)所示.

$$d = (M_T - r)(M_R - r) \quad (2)$$

在此, d 取决于发送端和接收端天线的数量 M_T 和 M_R .

4 权衡复用和分集的 MIMO 节能算法

假设一个多跳的水下传感器网络中,每个节点配备了 n 个收发天线,每个节点均可以编码比特流,通过 n 个并行的独立数据流传输数据包.假设空时编码的集合为 $C = [C_1, C_2, \dots, C_n]$, n 表示传输模式空间大小.每个传输模式可关联到一个复用增益 r 和一个分集增益 d ,随着传输速率的增加,复用增益增加.随着分集增益的增加,系统的误码率降低.

4.1 影响节点电量消耗的主要因素

本文提出的权衡复用和分集的 MIMO 节能算法要求在满足整个水下传感器网络服务质量(QoS)

的基础上,实现能耗的最小化.能耗的最小化可以延长传感器节点的生存时间.影响节点电量消耗的主要因素如下.

(1) 发送端 i 和接收端 j 之间的距离 l_{ij}

当发送端和接收端之间的传输距离很远时,需要一个较高的发射功率.然而,较远的传输距离可以减少到达 Sink 节点的跳数,减少整个网络的总电量消耗.

(2) 最小通信链路速率 $C^{\min}$

最小通信链路速率和整个水下传感器网络的实际应用相关.不同的应用需求,其对应的最小链路速率 $C^{\min}$ 也不相同. $C^{\min}$ 对电量的影响十分明显,要达到一个高的链路速率需要较高的电量消耗.因此,当需要的链路速率较高时,需要选择离发送端较近的节点作为下一跳.

(3) 复用增益和分集增益

复用增益 r 指的是采用多个天线单元将信息分割传输,其可以更高的复用增益率达到更高的链路速率,以牺牲可靠性或电量消耗为代价;分集增益 d 指的是采用多个天线单元实现信息的冗余传输.更高的分集增益实现更高的可靠性,它可以在给定的发送端和接收端距离内减少电量的消耗,或者增加对于给定的电量消耗增加收发端的距离.

(4) 子载波 f_k 和子载波干扰 $I_j(f_k)$

不同的子载波 f_k 具有不同的传播和干扰特性,因此,不同的子载波对整个水下传感器网络的性能影响较大,可以选择传输性能更好的子载波来提高通信性能,减少电量消耗.用 $I_j(f_k)$ 表示在接收端 j 观察到的子载波 f_k 的干扰.显然,更高的传输功率需要克服更高层次的干扰.

假设节点 i 发送数据包到节点 j , $P_i^{\max}$ 表示节点 i 的最大发射功率.每个子载波在节点 j 的干扰 $I_j(f_k)$ 通过节点 j 周期性的侦听. E_{elec} 表示单位电荷.假设发送一个比特和接收一个比特的电量是相同的,每个子载波的发射功率是 $P_{ij}(f_k)$,数据速率是 r_b ,则链路的容量如式(3):

$$r_b = \sum_{k=1}^N \Delta f \cdot \log_2 \left[1 + \frac{P_{ij}(f_k)}{A(l_{ij}, f_k) [I_j(f_k) + N(f_k)]} \right] \quad (3)$$

在此, l_{ij} 表示发送端和接收端之间的距离.因此,从节点 i 到节点 j 传输一个比特的电量 E_{ij} 如式(4):

$$E_{ij} = 2 \times E_{\text{elec}} + \frac{\sum_{k=1}^N P_{ij}(f_k)}{r \cdot r_b} \quad (4)$$

在此, r 表示复用增益.

提出的算法允许每个节点分布式的选择最优的下一跳,在每个子载波和传输模式设计的最优的发射功率以实现最小化的电能消耗为目标.

4.2 算法设计

我们仅给出对延迟具备较强容忍特征的算法约束条件.

(1) 节点的发射功率不能超过最大的发射功率,即式(5):

$$\sum_{k=1}^N P_{ij}(f_k) \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

(2) 链路速率 C 应该高于依赖于应用的阈值 $C^{\min}$,即式(6):

$$\sum_{k=1}^N \Delta f \cdot r \cdot \log_2 \left[1 + \frac{P_{ij}(f_k)}{A(l_{ij}, f_k) [I_j(f_k) + N(f_k)]} \right] \geq C^{\min} \quad (6)$$

根据式(6)可知,链路速率 C 随着复用增益的增加而增加.然而,对于给定目标的包错误率,更高的复用增益需要更高的发射功率,随着相关分集增益的降低.

(3) 数据包的平均传输次数 $\hat{N}_{ij}^{TX}$ 和包错误率 PER_{ij} 设定

发送端 i 发送数据包的平均传输次数如式(7)所示.

$$\hat{N}_{ij}^{TX} = \frac{1}{1 - PER_{ij}} \quad (7)$$

在此, PER_{ij} 表示链路 (l, j) 上的包错误率. PER_{ij} 是在每个子载波上发送功率和在节点 j 干扰的一个函数. PER_{ij} 随着分集增益的增加而减少,它可以表示为.

$$PER_{ij} = \Phi \left(\left[\frac{P_{ij}(f_k)}{A(l_{ij}, f_k) [I_j(f_k) + N(f_k)]} \right]^{-d} \right) \quad (8)$$

(4) 到达 Sink 节点的下一跳个数 $\hat{N}_{ij}^{hop}$

当节点 j 被选择作为下一跳时,从节点 i 到 Sink 节点的下一跳个数描述如式(9)所示.

$$\hat{N}_{ij}^{hop} = \max \left(\frac{l_{is}}{l_{ij} > l_{is}}, 1 \right) \quad (9)$$

在此, $\langle l_{ij} \rangle_{is}$ 表示 l_{ij} 连接 i 和 S 的链路投影.定义 S_i 作为积极推进集,它由比 i 节点更临近 Sink 节点 s 的节点构成,即 $j \in S_i$ if $l_{js} < l_{is}$. 下一跳 i 应该从 S_i 选择以避免产生路由环路.

相关算法伪码如下:

Init $i, j, P_i^{\max}, C^{\min}, M$ // 初始化系统参数

Find $j^* \in S_i, M^*, [P_{ij}^* \cdot (f_k)]$
if($\sum_{k=1}^N P_{ij}(f_k) \leq P_i^{\max}$)
step($P_{ij}(f_k)$) $\rightarrow P_i^{\max}$ // 通过迭代将发
射功率从 0 增加到 $P_i^{\max}$
if($\sum_{k=1}^N \Delta f \cdot r \cdot \log_2[1 + \frac{P_{ij}(f_k)}{A(l_{ij}, f_k)[I_j(f_k) + N(f_k)]}] \geq C^{\min}$)
 $E_{ij} \downarrow$ and $\hat{N}_{ij}^{TX} \uparrow$
 $E_{\text{total}} = \min(E_{ij}, \hat{N}_{ij}^{TX}, \hat{N}_{\text{hop}_{ij}})$;

5 仿真实验

我们基于 MATLAB 进行了该节能算法的仿真分析过程. 为了进行 MIMO 复用和分集折衷算法的性能对比, 对比了 MIMO 全分集技术和 MIMO 全复用技术等二种技术的性能参数, 主要比较了不同传输速率、误码率、中继节点数量、链路距离等对算法能耗的影响.

仿真试验中, 设置最大的发送功率 $P^{\max} = 10$ W, 数据包大小为 200 Bytes. 定义水下传感器节点的初始电量为 1 000 J, 数据包的间隔到达时间为 5 s, 最大重传次数为 4, 端到端的包错误率阈值为 0.05, 延迟阈值为 8 s, 队列的大小为 10 kB. 假设所有的节点被随机的部署在一个体积为 1 500 m $\times$ 1 500 m $\times$ 1 500 m 的 3D 浅水环境下, 发送端源节点的数量为 5, 水面基站的数量为 2.

图 1(a)和(b)分别列出了链路速率为 50 kb/s 和 200 kb/s 时, 3 种算法的平均电量消耗和中继节点数量之间的对应关系.

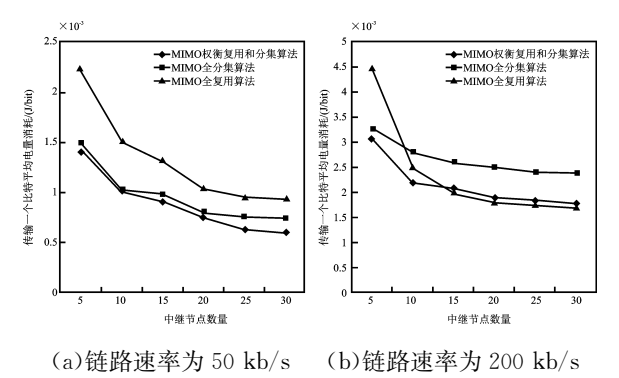


图 1 平均电量消耗和中继节点数量对应关系

可以看到, 随着链路速率的增加, 三种算法对应的平均电量消耗量都在逐步增加. 低速环境下, 随着中继节点选择的逐步稳定, 三种算法的平均耗电量均趋于平缓, 而在起始阶段, 节点的平均耗电量变化较大. 相对看来, 在低速环境下, MIMO 全复用算法的能耗最大, 而 MIMO 复用和分集折衷算法的能耗

相对最小. 在高速环境下, 当中继节点处于 15 左右时, MIMO 全复用算法的性能达到最好, 而在其他情况下, MIMO 复用和分集折衷算法的性能仍然是最好的, 而 MIMO 分集技术的电量消耗变化浮动相对较小. 这正好验证了本文算法的性能, 全分集技术使用冗余发送方式, 其电量消耗较大, 而复用技术关注的是传输速率, 由此 MIMO 复用和分集折衷算法正好实现了这两种技术的折衷, 节省了电量消耗, 延长了水下传感器网络的生存时间.

图 2 分别列出了三种算法的误码率对比情况, 可以看到随着传输距离的增加, 整个水下传感器网络的误码率增加, 在三种算法中, MIMO 全分集算法的误码率最小, 而 MIMO 全复用技术的误码率相对最大. 本文算法的误码率和 MIMO 全分集算法的误码率基本上相当.

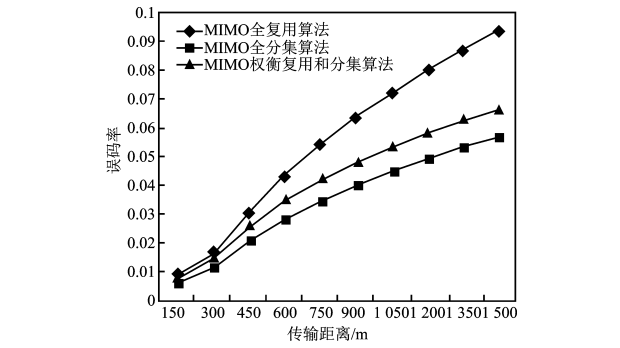


图 2 三种算法误码率对比

我们列出频率为 32 kHz 时三种算法的信号衰减对比情况. 如图 3 所示, MIMO 全复用的信号衰减相对最为严重, 本文算法和 MIMO 全分集技术的信号衰减基本相当.

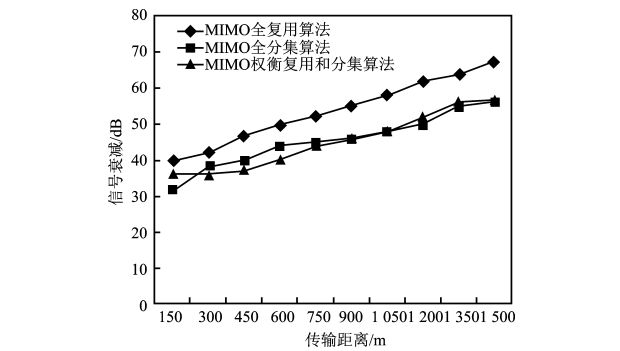


图 3 算法的信号衰减对比

此外, 由于在水下传感器网络中, 一个给定区域总的中继节点数量很小时, 发送端选择其下一跳的机会就会很小. 通常, 一个发送端仅选择到接收器距离较大的节点作为其下一跳. 由于 MIMO 全复用总

是选择全复用增益来传输数据包。所以,如果发射器不增加发送功率的话,它的分集增益很小,数据包误码率就会很高。因此,当区域内总的中继节点数量很少时,MIMO 全复用算法就会消耗更多的电量。

6 结束语

MIMO 全复用算法具有更多选择下一跳的机会,可以选择临近它的节点作为它的下一跳,并以此减少发射功率。和 MIMO 全分集相比,它具有更高的复用增益。相反的,UMIMO 全分集可以在发送端和接收端之间的较大距离内选择它的下一跳,和 MIMO 全复用相比,它具有较高的分集增益,这样可以减少包错误率。

本文提出权衡复用和分集的 MIMO 算法实现了分集和复用的折衷,实现了分集增益和复用增益的权衡。在保证了传输可靠性的基础上实现了节点能耗降低,延长了整个网络的生存时间,同时实现了传输速率、误码率等水下传感器网络的性能提升。

参考文献:

[1] 郭瑛, 张震. 大规模水下传感器网络时间同步研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1498-1503.

[2] 夏娜, 郑语晨, 杜华争, 等. 刚性驱动水下传感器节点自组织布置[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 494-505.

[3] 赵旦峰, 王杨, 廖希, 等. 级联编码的 MIMO-OFDM 水声通信系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1171-1176.

[4] Kilfoyle D B, Preisig J C, Baggeroer A B. Spatial modulation experiments in the underwater acoustic channel[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 406-415.

[5] Gaultier Real, Pierre-Philippe Beaujean, Pierre-Jean Bouvet. A channel model and estimation technique for MIMO underwater acoustic communications in ports and very shallow waters at very high frequencies[C]// OCEANS 2011. Waikoloa; IEEE, 2001: 1-9.

[6] Kuo Li-Chung. Distributed medium access control strategies for MIMO underwater acoustic networking [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2523-2533.

[7] Cai Lifeng , Pan Xiang , Wen X U, et al. Underwater acoustic MIMO communication based on active time reversal[C]//Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics. Shanghai; IEEE, 2009: 45-48.

[8] Kuo Li-Chung, Tommaso Melodia. Cross-layer routing on MIMO-OFDM underwater acoustic links[C]// IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). IEEE, 2012: 227-235.

作者简介:

王建平 男, (1981-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为水下传感器网络、SDN 架构设计.

陈伟(通讯作者) 男, (1964-), 教授, 博士生导师. 研究方向为无线传感器网络、认知无线电、软件无线电技术.

E-mail: greatchen@whut.edu.cn.

(上接第 135 页)

[4] Shang M S, Chen G X, Dai S X, et al. Interest-driven model for human dDynamics[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(4): 48701-48703.

[5] 刘建粉, 史永昌. 基于用户兴趣分类优化的聚类模型仿真[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(5): 171-174.

[6] 罗卫国. 基于用户交互行为的建模方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[7] 符丁, 李明江, 黎路. 基于价值驱动的人类行为动力学实证研究和建模[J]. 电子科技大学学报, 2015, 17(5): 652-656.

[8] Hou L, Xue P, Qiang G, et al. Memory effect of the online user preference[R]. Scientific Reports, 2014.

[9] 赵飞飞. 网络口碑与微博用户忠诚度的关系研究[D].

大连: 大连理工大学, 2013.

[10] Jo H H, Perotti J I, Kaski K, et al. Correlated bursts and the role of memory range[J]. Physical Review E, 2015(5): 2-9.

[11] Karsai M, Kaski K, Barabási A L, et al. Universal features of correlated bursty behaviour[J]. Scientific Reports, 2011, 2(5): 539-539.

作者简介:

李凯凯 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为复杂网络.

E-mail: 18734922510@163.com.

宋礼鹏 男, (1975-), 副教授, 博士生导师. 研究方向为复杂网络与网络安全、大数据.