

# 基于协作 MIMO 的 UWSN 三维动态分簇路由算法研究

梁平元<sup>1</sup> 李 杰<sup>1</sup> 彭 娇<sup>1</sup> 王 会<sup>2</sup>

(湖南人文科技学院信息学院 湖南 娄底 417000)<sup>1</sup> (娄底职业技术学院 湖南 娄底 417000)<sup>2</sup>

**摘 要** 为解决基于协作的多输入多输出(Multi-input Multi-output, MIMO)同构水下无线传感器网络(Underwater Wireless Sensor Networks, UWSN)的能量节省和能耗均衡的问题,建立了多跳分布式 UWSN 三维系统模型。文中弥补了 DCREDIT 选择算法能量空间分布不均的不足,通过引入能量门限和距离算法,提出了一种基于能量和距离的带门限水下动态分簇路由算法(Underwater Dynamic Clustering Routing Algorithm Based on Energy and Distance with Thresholds, UDCREDIT),同时定量分析了能耗均衡性对网络寿命的影响并确定了门限的取值方法等。通过仿真分析验证了 UDCREDIT 算法的合理性和有效性。相比 DCREDIT 选择算法,所提算法的能耗降低了约 6.81%,均衡性提高了约 7.98%,有效延长了网络的使用寿命。

**关键词** 水下无线传感器网络,水声通信,多跳传输,协作多输入多输出,三维动态分簇路由算法

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Research on 3D Dynamic Clustering Routing Algorithm Based on Cooperative MIMO for UWSN

LIANG Ping-yuan<sup>1</sup> LI Jie<sup>1</sup> PENG Jiao<sup>1</sup> WANG Hui<sup>2</sup>

(Information Institute, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi, Hunan 417000, China)<sup>1</sup>

(Loudi Vocational and Technical College, Loudi, Hunan 417000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to solve the problem of energy saving and energy balance in homogeneous underwater wireless sensor networks(UWSN) based on cooperative multi-input multi-output(MIMO), a multi-hop distributed UWSN three-dimensional system model was built in this paper. By introducing energy threshold and distance algorithm, the insufficiency of energy spatial distribution in the DCREDIT selection algorithm was improved and an underwater dynamic clustering routing algorithm based on Energy and Distance with Thresholds(UDCREDIT) was proposed. At the same time, the influence of energy balance on the service life of the network were quantitatively analyzed and the threshold value method was determined. Finally, the reasonableness and validity of the new UDCREDIT algorithm were verified by simulation analysis. And compared with the DCREDIT selection algorithm, the energy consumption is reduced by about 6.81%, and the balance is improved by about 7.98%, which effectively prolongs the service life of the network.

**Keywords** Underwater wireless sensor networks, Underwater acoustic communication, Multi-hop transmission, Cooperative multi-input multi-output, Three-dimensional dynamic clustering routing algorithm

## 1 引言

水下无线传感器网络被广泛用于海水污染监测、海洋灾害预警、水下武器防御、船舶导航、水产养殖等许多方面,并随着水域探索的不断深入和陆地可用资源的有限, UWSN 受到越来越多的关注<sup>[1-6]</sup>。然而,由于水域环境的固有特性,如传播损失严重、噪声干扰、多径衰减和多普勒频散严重、可用频率低、带宽有限、误码率高、延迟大、时延动态性高、三维部署困难、难以定位、成本高等,因此陆地无线传感网络(Terrestrial Wireless Sensor Networks, TWSN)中常用的电磁波及大多数协议难以直接应用于水下环境,空中电磁波虽然传输容

量大,传播速度快,但在水下会迅速衰减,难以适用于长距离传输,而声波衰减相对缓慢,通常可达数公里,因此 UWSN 常使用水声通信<sup>[1-2,7-8]</sup>。成千上万的无线传感器节点时常被随机部署在如此不利的环境中,由电池供电,能量有限,要想充电或大面积更换电池是不切实际的<sup>[1-6]</sup>。因此高效可靠地利用能量在 UWSN 设计中非常重要,它直接关系到网络的实际使用寿命。多输入多输出技术,可以有效地利用多径效应抑制衰减,提高系统容量和频谱利用率,而且在系统容量一定时,可以利用 MIMO 技术减少功率消耗<sup>[1,3,6]</sup>。然而,无线传感器节点的尺寸有限,难以在低功耗的节点上形成物理声呐阵列,幸运的是,单声呐传感器节点同样可以利用协作方式构

本文受国家自然科学基金(61173018)、湖南省教育厅优秀青年项目(11B102)、湖南省研究生科研创新项目(CX2017B777)资助。

梁平元(1972—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为无线通信与光通信技术;李 杰(1989—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络, E-mail: xxxylj\_0828@163.com(通信作者);彭 娇(1993—),女,硕士生,主要研究方向为网络应用;王 会(1983—),女,硕士,主要研究方向为计算机信息化与农业智能化。

成虚拟声呐阵列,而且在考虑电路能耗的情况下,采用协作 MIMO( Cooperative MIMO, CMIMO)技术在单跳距离大于一定值时,相对于传统单输入单输出(Single-input Single-output, SISO)技术的耗能更少<sup>[3,6]</sup>。可见,协作 MIMO 技术适合于中远距离的大规模监控。

针对水下情况,已有许多 UWSN 路由协议被提出来。基于深度的路由(Depth-Based Routing, DBR)协议<sup>[7]</sup>主要根据节点自身和上一跳的深度信息来决定是否转发数据,端到端延迟短,数据传输高,能耗高且对节点密度依赖很高。基于矢量的转发(Vector-Based Forwarding, VBF)协议<sup>[8]</sup>中每个节点事先知道自己和目的节点的位置,建立源节点到目的节点的固定矢量管道,由 VBF 自适应算法估计邻域密度并转发分组,端到端延迟低,稀疏网效率高,能耗大且对管道半径敏感。基于深度的多跳路由(Depth-Based Multi-hop Routing, DBMR)协议<sup>[9]</sup>,改进了 DBR 协议,其主要区别在于路由发现和转发策略,通过交互带有深度信息的广播包和转发率的反馈包来选择最优下一跳,减少了数据包冲突和冗余能耗,但只考虑最优下一跳无法确保全局最优。基于矢量的逐跳转发(Hop-by-Hop VBF, HH-VBF)协议<sup>[10]</sup>,在 VBF 的基础上采用逐跳虚拟管道,增加了管道的动态性,引入冗余反馈技术,移动鲁棒性增强,局部改善了稀疏网络的投递成功率,但能耗大且采用固定功率不适合非均匀网络。基于深度的深度加权转发区划路由(Weighting Depth and Forwarding Area Division DBR, WDFAD-DBR)协议<sup>[11]</sup>,采用两跳深度差加权和设置数据包占用时间并进行区域划分来选择转发节点,更进一步地减少了 DBR 中的接收端数据包冲突和冗余能耗,提高了稀疏网络中的传输可靠性和移动鲁棒性,但未考虑信道条件和大量数据传输的情况,能量消耗较大且不均衡。基于矢量的自适应逐跳转发(Adaptive HH-VBF, AHH-VBF)协议<sup>[12]</sup>,在 HH-VBF 基础上增加管道半径自适应调整功能提高投递成功率,采用交互控制机制自适应调整功率来改善不均匀网络的能量消耗,用当前节点到目的节点的距离,代替到上一跳转发节点的距离,改进满意因子和占用时间的计算方式以缩短时延,很依赖于三维定位功能,能量消耗大而不均衡。动态分簇(Dynamic Cluster-Based, DCB)协议<sup>[13]</sup>的主要思想是导游节点通过活塞控制浮力产生垂直运动来保持通信,并采用动态寻址的方式就近选择节点建立簇链完成数据采集功能,然后传递到水面汇聚节点,传递成功率高,移动鲁棒性强,时延较短能耗较少且均衡,但是它依赖于汇聚节点和导游节点的密度,对导游节点的性能要求高、负载能耗大、速度成本受限,因此易成为瓶颈。多径路由(Multi-Path Routing, MPR)协议<sup>[14]</sup>,通过交互获取两跳传播时延信息,选择两跳传播延迟较短、没有中继与中间节点冲突且距目的节点最近的中间节点和多条子路径来传输数据,时延较短,移动鲁棒性强,投递成功率高,但需要定位功能,能耗较大,不适合稀疏网络。虽然这些算法皆取得了一定性能优势,但是这些算法的能量消耗大,不适合大规模组网,且未考虑跨层协作 MIMO 中能量和距离皆受限(具体分析请见第 3 节)的特点,因此整体性能较差,不利于延长网络的使用寿命。

基于上述问题,本文提出了一种基于能量和距离的带门

限水下动态分簇路由算法,改进了梁平元等提出的 DCREDIT 选择算法<sup>[3]</sup>能耗空间分布不均的缺点,算法采用多跳中继和协作 MIMO 技术,并基于过滤选择和随机竞争思想,是一种按需驱动、可靠连接的动态分簇路由算法。UDCREDIT 算法的主要创新点有:1)针对水下三维环境,采用协作水声通信技术设计了多跳分布式 UWSN 三维系统模型;2)给出了门限值的确定方法,并对能量均衡性做了定量分析等;3)增加了距离算法并配比权重重新定义了随机竞争窗口,提高了节点分布式选择的均衡性等。最后,通过仿真分析验证了该算法的合理性和有效性。

## 2 UWSN 三维系统模型与能量传播模型

### 2.1 UWSN 三维系统模型

多跳分布式 UWSN 三维系统模型如图 1 所示。其中,CH(Cluster Head)为簇首,位于簇的中心,通常每个簇都有一个 CH。CN(Cooperative Nodes)为 CH 周围的协作节点,并与 CH 一起完成数据的协作 MIMO 通信。GN(General Nodes)是未参与协作 MIMO 通信的普通节点。MN(Monitor Nodes)为感知到事件发生的监测节点,可以根据自身状态确定为 CH 或 CN。BCSI 为信道状态信息(Channel State Information, CSI)未达标的坏节点。SN(Sink Nodes)为水面中心的汇聚节点,可通过无线电与陆地基站、水面舰艇或卫星中继等通信。

在一次数据采集周期中,感知到随机事件的 MN 采集融合数据,经多跳以协作 MIMO 方式将数据传递给水面 SN,并传递给观察者。假定 SN 成功接收数据后总能完成水上通信(水上通信已有非常成熟的无线通信技术),因此这里主要讨论水下情况,并做如下假设<sup>[3,5]</sup>:

1)所有节点(除 SN 外)都是同构的,并随机均匀地部署在水下三维区域,由锚或气囊固定以避免随水流移动而离开监测区域<sup>[15]</sup>,配备水声调制解调器,能融合数据,具有唯一标识(ID);

2)在已知 CSI、误码率和时延动态性要求的情况下,可以把传输距离看作是近似值;

3)SN 由浮标固定在水面中心,能量不受限,物理上具有多根天线(位于水上部分),且具备多个声呐(位于水下部分),并能处理复杂的接入和路由算法,能够根据 CH 的 ID 和导频进行路由选择,选择时延代价最小的路径,从而确定由哪些节点组织协作 MIMO 通信。

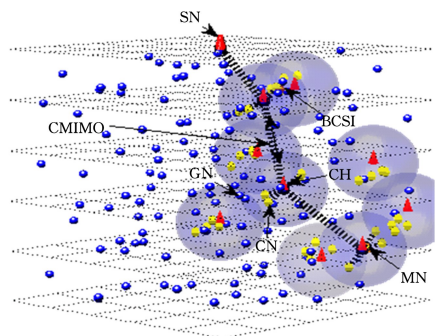


图1 多跳分布式 UWSN 三维系统模型

## 2.2 水声信道能量传播模型

水声信道是一个带宽有限、环境干扰严重的时空及频率易变的随机信道。环境噪声通常包括湍流噪声、航运噪声、海面噪声与热噪声,依次可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} N_t(f) = 17 - 30\log(f) \\ N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0.03) \\ N_w(f) = 50 + 7.5\sqrt{\omega} + 20\log(f) - 40\log(f + 0.4) \\ N_{th}(f) = -15 + 20\log(f) \end{cases}$$

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (1)$$

环境噪声单位为 dB re  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ ;  $s$  为船舶活动因子,取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\omega$  为风速,单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。以声波为数据传输媒介,当数据传输距离为  $d$  时,传输功率衰减为<sup>[15]</sup>:

$$A(d, f) = d^k a^d = d^k 10^{dk(f)/10} \quad (2)$$

其中,  $k$  为能量扩散因子(取值 1 表示浅水柱形波扩散,取 2 表示深水球面波扩散,水声信道近似平坦瑞利衰落,因此实际情况中  $k$  常取 1.5),  $f$  为声波频率,单位为  $\text{kHz}$ ,能量吸收系数  $\alpha(f)$  是  $a$  的分贝形式,单位为  $\text{dB}/\text{km}$ ,可根据 Thorp 模型得到<sup>[15-16]</sup>:

$$\alpha(f) = \begin{cases} \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003, f \geq 0.4 \\ \frac{0.11f^2}{1+f^2} + 0.11f^2 + 0.002, f < 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

一个固定 BPSK 调制系统的总功率消耗为:

$$P = (1 + \varphi)P_{\text{out}} + P_c \quad (4)$$

协作 MIMO 传输过程中,考虑信道估计产生的影响,总的传输功率可表示为<sup>[3]</sup>:

$$P_{\text{out}} = \bar{E}_b^{\text{mimo}} R_b \rho A(d, f) \quad (5)$$

设  $P_{cr}$ ,  $P_c$  分别表示发送端和接收端总的电路功率(后文中的  $P_{cr}^{\text{mimo}} = P_{cr}$ ),除功率放大器以外其他电路的总功耗表示为<sup>[3,5,17]</sup>(这里适用各种传输模式):

$$P_c \approx N_t P_{cr} + N_r P_{cr} \quad (6)$$

$\varphi = \xi/\eta - 1$ ,  $\eta$  是漏极效率,  $\xi$  是峰均比,对于 MQAM 调制,

$\xi = 3(\sqrt{M} - 1)/(\sqrt{M} + 1)$ ,数据调制比特数为  $b = \log_2 M$ 。数据附加  $pN_t$  个导频时的有效发射率  $\rho = (F - pN_t)/F$ ,  $p$  为每个声呐发射数据附加的导频,  $N_t$ ,  $N_r$  分别为发送端和接收端的总声呐数,数据块大小  $F = \text{floor}(T_c R_s)$ ,  $\text{floor}(\cdot)$  为下取整函数,比特速率  $R_b = bR_s$ ,相关衰落时间  $T_c = 3/(4f_m \sqrt{\pi})$ ,最大多普勒频移  $f_m = v/\lambda$ ,相对移动速度为  $v$ ,载波波长为  $\lambda$ 。在给定误比特率时,协作 MIMO 传输每比特的平均能量为<sup>[3]</sup>:

$$\bar{E}_b^{\text{mimo}} = \gamma_b N_t N_{th}(f) \|H\|^{-2} = 2\gamma_b N_t N_{th}(f) / \chi_{2N_t N_r}^2 \quad (7)$$

采用 BPSK 时传输每比特数据的平均能耗为<sup>[3]</sup>:

$$\bar{E}_b^{\text{siso}} = N_{th}(f) ((1 - 2\bar{P}_b)^{-2} - 1)^{-1} \quad (8)$$

其中,  $\gamma_b$  为接收端信噪比,对于 BPSK 调制而言<sup>[3]</sup>,  $\gamma_b = [Q^{-1}(\bar{P}_b)]^2/2$ ,  $Q^{-1}(\bar{P}_b)$  表示误码率对  $Q(x)$  的反函数。  $\bar{P}_b$  为平均误码率,  $H$  是与收发端总声呐数相关的信道矩阵,  $\chi_{2N_t N_r}^2$  是自由度为  $2N_t N_r$  的卡方随机变量。考虑导频影响且忽略协作 MIMO 与 MIMO 间内部传输能耗的差异,协作 MIMO 发送

每比特数据所消耗的总能量可由式(4)~式(6)以及  $E_{bt} = P/R_b$  得到:

$$E_{bt}^{\text{mimo}} = ((1 + \varphi)\bar{E}_b^{\text{mimo}} R_b \rho A(d, f) + P_c^{\text{mimo}}) / \rho R_b \quad (9)$$

同理,不考虑信道估计, SISO 传输每比特的能耗为:

$$E_{bt}^{\text{siso}} = ((1 + \varphi)\bar{E}_b^{\text{siso}} R_b A(d, f) + P_c^{\text{siso}}) / R_b \quad (10)$$

## 3 能量分析

### 3.1 传输距离对能量节省的影响

当簇内短传输 (Intracluster Short Transmission, IST) 距离很小(一般取值  $1 \sim 2 \text{m}$ ),而簇间长传输 (Intercluster Long Transmission, ILT) 超过一定值时, MIMO 或协作 MIMO 系统相对 SISO 系统更节省能量<sup>[3]</sup>。而在多跳分布式 UWSN 三维系统模型中,要使每一跳采用协作 MIMO 传输都相对采用 SISO 传输节省能量,为简单起见,若每一轮总传输  $L$  比特数据量时,考虑到簇内 IST 能耗 (IST 为平均等间距  $d_m$  的 SISO 传输),对第  $j$  跳进行定量分析<sup>[3]</sup>:

$$LE_{bt}^{\text{siso}} \geq L(E_{d_m}^{\text{siso}} + E_{bt}^{\text{mimo}}) + \sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^s E_{d_m}^{\text{siso}} \quad (11)$$

其中,不等式左部分代表总传输  $L$  比特数据第  $j$  跳 SISO 传输模式消耗的总能量,右部分表示协作 MIMO 消耗的总能量,只有左部分不小于右部分时,即在同一跳传输距离上协作 MIMO 消耗的能量更少时,其会更节能,取等号时表示临界条件。  $L_i^s$  是接收端 CH 接收到第  $i$  个 CN 的空时编码比特数,与星座尺寸有关。  $L \cdot E_{d_m}^{\text{siso}}$  为协作 MIMO 发送端内部的 IST 能耗,  $\sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^s E_{d_m}^{\text{siso}}$  为协作 MIMO 接收端内部的 IST 能耗。令  $C = (1 + \varphi)\bar{E}_b^{\text{siso}} R_b$ ,将式(9)和式(10)代入式(11),则有:

$$\frac{(1 - \frac{\bar{E}_b^{\text{mimo}}}{\bar{E}_b^{\text{siso}}})CA(d_j, f) + P_c^{\text{siso}} - \frac{P_c^{\text{mimo}}}{\rho}}{CA(d_m, f) + P_c^{\text{siso}}} \geq 1 + \frac{\sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^s}{L} \quad (12)$$

其中,  $A(d_j, f)$  是个乘积指数式超越函数,对其求导可知在  $[0, \text{inf}]$  上其是个非负的单调递增函数,等号成立时即取得能量节省  $d_j$  的下边界  $d_{j\text{min}}$ ,令  $\mu = \sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^s / L$ ,  $\phi = \bar{E}_b^{\text{mimo}} / \bar{E}_b^{\text{siso}}$ ,则取  $d_{j\text{min}}$  时的传输功率衰减为:

$$A(d_{j\text{min}}, f) = \frac{C\rho(1 + \mu)A(d_m, f) + \mu\rho P_c^{\text{siso}} + P_c^{\text{mimo}}}{C\rho(1 - \phi)} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知,第  $j$  跳能量节省主要取决于  $d_j$  和  $d_m$ ,当  $d_m$  增大时,  $d_j$  的下边界  $d_{j\text{min}}$  也将增大。通常假设  $d_m \ll d_j$  来忽略因虚拟声呐阵列和 MIMO 声呐间距离差异而产生的影响<sup>[3]</sup>,在实际过程中,尤其是网络节点部署不够密集时,  $d_m$  的大小往往不可忽略。

### 3.2 负载能量均衡对网络节点寿命的影响

负载能量门限的确定对网络性能会产生很大的影响,最终影响网络的实际使用寿命,若能量状况或 CSI 不佳的节点参与路由过程,不仅会增加无用能量的浪费,而且会破坏网络的可靠性和均衡性。因此,使剩余能量较大的节点优先成为 CH,并为不同角色节点确定合适的能量门限是很有必要的,而门限值设置过大会造成资源的浪费,设置过小会达不到均衡的效果<sup>[6]</sup>。在整个路由过程中,能量的使用基本是以簇为单位的。为了提高网络能量使用的均衡性,应尽可能使簇中每个成员的能量分布状况更为接近,因此假设 CH 和 CN 完成一轮工作的能量消耗皆为  $E^{\text{ch}} = E^{\text{cn}} = E$ ,即要求  $\Delta E =$

$E^{ch} - E^{cn} \rightarrow 0$  来忽略协作 MIMO 与 MIMO 间因 CH 和 CN 功用不同而产生的影响,但在实际过程中,尤其是在网络节点分布不够均匀的网络中,两者的能耗差异是不可忽略的。而在一个分布式簇中,通常有 1 个 CH 和  $n$  个 CN,为确保能量均衡消耗,则应满足:

$$E^{ch} = (1 + \frac{1}{1+n})E \quad (14)$$

当  $n \in [0, \text{inf}]$ ,可知  $E^{ch} \in [E, 2E]$ ,假设初始能量为  $E_0$  的节点持续参与工作能够维持  $R$  轮,则有:

$$R = \frac{E_0}{E} \quad (15)$$

为简单起见,令能量门限因子  $\beta = E^{ch}/E_0$ ,联立式(14)和式(15)并代入上式则有:

$$R = (1 + \frac{1}{1+n})/\beta \quad (16)$$

若有  $\beta_0 = E/E_0$ ,则应有  $\beta \in [\beta_0, 2\beta_0]$ 。

### 3.3 不同传输距离下跳数对能量消耗的影响

假定在一轮数据采集, MN 将  $L$  比特数据经  $M$  跳传递到水面 SN,传递过程是以协作 MIMO 方式进行的。协作 MIMO 系统本质上是个分布式系统,即等效而不等同于集中式 MIMO,因此数据传输能耗不仅要考虑模拟 MIMO 通信时的基本能耗,还应考虑通信两端簇内在 IST 距离内以 SISO 模式传输协调通信的能耗。此外, MN 到附近 CH 为 SISO 传输,无需考虑能量节省,而最后一跳中 SN 物理上具有多声

$$E_{bnt}^{cmimo} = \frac{M[\phi\rho CA(\frac{dis}{M}, f) + P_c^{mimo} + (1+\mu)\rho(CA(d_m, f) + P_c^{siso})]}{\rho R_b} - \frac{\mu[\rho CA(d_m, f) + \rho P_c^{siso} + P_{cr}^{mimo}]}{\rho R_b} \quad (20)$$

从式(19)和式(20)可以看出,  $E_{bnt}^{siso}$  和  $E_{bnt}^{cmimo}$  都是关于跳数  $M$  和路由长度  $dis$  的函数,因此当路由  $dis$  确定时,分别存在最优跳数  $M_{siso}(dis) = \arg \min_M E_{bnt}^{siso}$  和  $M_{cmimo}(dis) = \arg \min_M E_{bnt}^{cmimo}$  使得多跳传输比特能量最少,此时多跳最小能耗可分别由  $\frac{\partial E_{bnt}^{siso}}{\partial M} = 0$  和  $\frac{\partial E_{bnt}^{cmimo}}{\partial M}$  求得。通过分析发现,随着路由长度增加,最优跳数也增加,而同一路由长度时,协作 MIMO 相对传统 SISO 最优跳数来得更早且当跳数低于某一界限时协作 MIMO 传输相对 SISO 传输耗能更少,这也再次证明协作 MIMO 相对传统 SISO 更适合中远距离的大规模通信。因此,当路由长度确定时,对一次路由过程做定量分析,多跳协作 MIMO 相对传统多跳 SISO 节能应满足关系(这里忽略采集、侦听等与路由跳数无直接关系的能耗):

$$E_{bnt}^{siso} \geq E_{bnt}^{cmimo} \quad (21)$$

为简单起见,当一轮总传输数据量为  $L$  时,每一跳 ILT 距离皆以平均等间距  $d_j$  传输,路由直线传输距离  $dis = Md_j$ , IST 距离为平均等间距  $d_m$  的 SISO 传输,且考虑通信两端的 IST 能耗以及 SN 节省的能耗,就有:

$$1 \geq \frac{M((\phi-1)\rho CA(\frac{dis}{M}, f) + (1+\mu)\rho CA(d_m, f))}{\mu\rho(CA(d_m, f) + P_c^{siso})} + \frac{M(P_c^{mimo} - \mu P_{cr}^{mimo} - \rho P_c^{siso})}{\mu\rho(CA(d_m, f) + P_c^{siso})} \quad (22)$$

当等号成立时,即取得能量节省跳数  $M$  的上边界  $M_{\max}$ ,此时令  $M_{\max} = f(dis, d_m, f)$  表示由式(22)取等号简化得到的关系式,当  $d_m$  和  $f$  确定时即可求得路由直线距离为  $dis$  时的多跳协作 MIMO 相对多跳 SISO 的最大节能跳数  $M_{\max}$ 。并

呐,也无需考虑簇内协调能耗。因此,多跳协作 MIMO 传输每比特的能耗为<sup>[3]</sup>:

$$E_{bnt}^{cmimo} = \sum_{j=1}^M E_{jt}^{siso} + \sum_{j=1}^M E_{jt}^{mimo} - \frac{\sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^t P_{cr}^{mimo}}{\rho LR_b} + \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^t E_{tr}^{siso}}{L} \quad (17)$$

在 3.1 节已经讨论过第  $j$  跳协作 MIMO 相对 SISO 传输节省能量的情况,这里类似只是给出  $M$  跳总的比特能耗计算方式,协作 MIMO 能耗整体上分 3 个部分: $\sum_{j=1}^M E_{jt}^{siso}$  表示  $M$  跳中各发送端簇内 IST 距离 SISO 传输的总比特能耗, $\sum_{j=1}^M E_{jt}^{mimo} - \sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^t P_{cr}^{mimo} / \rho LR_b$  表示模拟 MIMO 传输过程各簇间 ILT 距离  $M$  跳的总比特能耗, $\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_r-1} L_i^t E_{tr}^{siso} / L$  表示接收端各跳簇内 IST 距离 SISO 传输消耗的总比特能耗。同理,对于多跳 SISO 传输,其  $M$  跳消耗的总比特能耗为:

$$E_{bnt}^{siso} = \sum_{j=1}^M E_{jt}^{siso} - P_{cr}^{siso} / R_b \quad (18)$$

假设考虑每一跳 ILT 距离皆以平均等间距  $d_j$  传输,则总路由距离  $dis = Md_j$ ,簇内 IST 距离皆以平均等间距  $d_m$  传输,则式(17)和式(18)可表述为:

$$E_{bnt}^{siso} = M(CA(\frac{dis}{M}, f) + P_c^{siso}) / R_b \quad (19)$$

存在最优跳数窗口宽度  $M_B(dis) = M_{siso}(dis) - M_{cmimo}(dis)$ 。

## 4 UDCREDIT 算法

在 3D-UWSN 中,路由算法一般由簇的建立和数据稳定传输两个阶段构成。由于前者所占的时延更短,后者是在确定的路径中传递大量数据且技术相对成熟,而不同的分簇方式常会产生不同的覆盖率<sup>[3]</sup>,因此这里主要讨论簇的建立阶段。UDCREDIT 算法也采用了多跳中继和协作 MIMO 技术,并沿用了过滤筛选和随机竞争的思想,是由源节点按需驱动、可靠连接的三维动态分簇路由算法。其基本过程为:当随机事件发生时, MN 即发起数据采集并无方向地过滤一些不合适的 CH、CN 和路径,并随机选择合适的 CH、CN 和路径来建立稳定传输路由以传递数据。该算法既能有效减少和避免冗余数据的冲突和多余能量的浪费,又能有效确保存在足够多(只要存在)节点和路径的参与来互相备用选择以满足其路由建立的可靠性和时延性要求。因此,UDCREDIT 算法主要包括动态分簇算法和协作建簇算法。为了简单起见,这里做如下假设<sup>[3]</sup>:

1) 所有节点(除 SN 能量无限以外)的初始能量均为  $E_0$ ,当前节点剩余能量为  $E_j$ , CH 和 CN 的剩余能量门限分别为  $E_{ch}$  和  $E_{cn}$ ,低于能量门限的节点不能成为 CH 或 CN,所有 GN 有效工作能量阈值为  $E_{th}$ ;

2)  $d_s$  为节点有效通信距离,  $d_j$  为当前节点间的近似距离, IST 和 ILT 距离门限分别为  $d_{lh}$ ,  $d_{sh}$ , 节点实际的传输距离  $d_j$  受剩余能量  $E_j$  影响。

由第 3 节可知,  $E_0 > E_{ch} > E_{cn} > E_{th} > 0$ ,若  $E_{ch}, E_{cn}$  设置过

大,则会造造成资源浪费,设置过小,则会达不到均衡的效果,令  $E_{ch} = 2E$ ,  $E_{cn} = (1 + (1/(1+n))n)E$ ,  $E_{th}$  是 GN 可以正常工作(如侦听、采集融合数据等)的阈值,这里  $E_{ch}$ ,  $E_{cn}$  的设置与传感器实际部署均匀性有关。同时存在,  $d_{th}$  应满足  $d_{jmin} < d_{th} < d_{is}$ , 当  $d_{th}$  减少时节省能量减少,增大时则可供选择为 CH 的节点数减少;  $d_{sh}$  应满足  $0 < d_{sh} < d_m$ ,  $d_m$  为 IST 最大距离,当  $d_{sh}$  增大则能量节省减少,减小则选不到足够多 CSI 较好的 CN; 令  $d_{th} = (d_{is} + d_{jmin})/2$ ,  $d_{sh} = d_m/2$ , 这里  $d_{th}$  与  $d_{sh}$  的设置与传感器实际部署密度有关。

#### 4.1 动态分簇算法

在该算法中,动态过滤选择 CH 与 CH 能量门限和 ILT 距离门限有关,候选的 CH 会通过随机竞争选择出合适的正式 CH 以管理一定区域。CH 在处理数据、协调组织通信和参与簇间长传输等时会消耗很多能量,因此需要满足  $E_{ch}$  才能被选取为 CH,以确保可靠完成一轮工作而不会因为能量缺失而潜在地破坏网络稳定性。同时,采用协作 MIMO 时只有满足 ILT 距离门限  $d_{th}$  时,才能相对于传统 SISO 模式节省更多的能量。此外,CH 满足上述条件时,会基于剩余能量和传输距离设置随机退避时间,根据实际需求来综合地择优 CH。具体步骤如下。

步骤 1 当随机事件发生时,MN 随即检测到并自检剩余能量:1)若  $E_j > E_{ch}$ ,就标记自身为 CH;2)否则就近广播 CH 请求消息(Near CH Request, NCHR)。

步骤 2 MN 附近收到 NCHR 消息的邻居节点随即自检剩余能量:1)若  $E_j > E_{ch}$  且  $0 < d_j < d_{sh}$ ,就成为准 CH 并随机退避一段时间  $T_r$ ;2)否则休眠。

步骤 3 在步骤 2 和步骤 5 中的准 CH 在某个时隙  $t(0 < t \leq T_r)$  内会存在 3 种情况:1)若准 CH 未收到附近的当选 CH 广播消息(Near CH Advertisement Message, NCHAM),则立即发出 NCHAM 信息;2)若收到 1 个 NCHAM 消息,则立即返回归属信息(Belong Message, BM);若收到 2 个及以上 NCHAM 消息,则既不返回 BM,也不发送 NCHAM。

步骤 4 发出 NCHAM 消息的 CH 存在两种情况:1)在下一个  $T_r(i=0,1,2,\dots,7)$  随机时间内继续退避,若在某个时隙收到自身 BM 信息,就标识自身为 CH;2)若一直退避直到  $i=7$  时还未收到自身 BM 消息,就标识自身为孤立 CH。

步骤 5 当选 CH 发送远端 CH 请求(Far CH Request, FCHR),收到 FCHR 请求消息的周围节点:1)若  $d_{th} < d_j < d_{is}$  且  $E_j > E_{ch}$ ,则是准 CH 并随机退避一段时间  $T_r$ ;2)否则休眠。

步骤 6 返回步骤 3,以此类推,动态地建立路由直到找到 SN 为止。

其中,NCHR 为近端 CH 请求消息,用于 MN 不满足 CH 条件时就近广播寻找合适的 CH。NCHAM 为近端 CH 广播消息,表示当选 CH 宣告自身满足成为 CH 的条件。BM 为归属信息,表示已有其他节点宣告成为 CH 放弃成为 CH,并不在广播 NCHAM。孤立 CH 表示周围不存在其他节点与之竞争成为 CH。FCHR 为远端 CH 请求,表示从远处寻找合适的 CH,以建立新的簇。SN 若收到 NCHR 或 FCHR 就立即发出 SNAM(SN Advertisement Message),邻居节点若收到 SNAM 则不在竞争成为 CH。

$T_r$  是随机退避时间,根据 IEEE802.11 二进制指数退避

机制<sup>[3,5]</sup>修改而成: $T_r = 2^i \text{Rand} \cdot CW(i=0,1,2,\dots,7)$ ,这里  $\text{Rand}$  为均匀分布在  $(0,1]$  的随机变量,CW 为动态竞争窗口,  $CW = \alpha(E_o - E_j)/E_j + (1-\alpha)(d_{is} - d_j)/d_j$ ,  $\alpha$  为能量权重因子且  $\alpha \in (0,1)$ ,根据实际需求来确定协调能量算法和距离算法的权重关系。在给定权重  $\alpha$  时:当距离确定而剩余能量较大时, $T_r$  的统计平均较小,表示此时剩余能量较大的节点优先成为 CH;同理,当 ILT 距离较大时, $T_r$  的统计平均也较小,则覆盖性较好的节点优先成为 CH。此外,所有节点都有球形水声换能器,可以无方向地广播消息,因此在一个簇的周围会存在多个 CH,它们处于簇的中心,而收到 NCHAM 的节点就不再成为 CH,避免了冗余数据包冲突以及多余能量消耗,同时多个 CH 可以互相协助以便覆盖较大的范围而有足够多足够好的路径可供 SN 选择,来提高网络的均衡性和可靠性。最后,SN 周围的 CH 会找到它,然后 SN 会根据收到的路由信息,选择时延代价最小的簇间路由来完成 MN 和 SN 间的数据通信。

#### 4.2 协作建簇算法

该算法采用以簇为中心的握手机制,在 IST 距离内 CH 应找到足够多满足 CN 能量要求(要参与 ILT 传输等)而 CSI 较好的 CN 来建立协作簇以完成协作数据通信。具体步骤如下:

步骤 1 当选 CH 就近广播 CN 请求消息(CN Request Message, CNRM),周围收到 CNRM 消息的 GN 会自检并作出决策:1)若  $d < d_{sh}$  且  $E_j > E_{cn}$ ,则为候选 CN,反馈应答消息(Acknowledge, ACK)和导频给 CH;2)否则放弃成为准 CN。

步骤 2 CH 根据收到的 ACK 和导频,进行信道估计来选择 CSI 较好的准 CN,并反馈确认消息 CNACK(CN Acknowledge)给被选中的准 CN,使之成为正式 CN,没有收到 CNACK 消息的准 CN 将休眠。

其中,CNRM 为 CN 请求消息,在 CH 附近寻找合适的 CN。ACK 为准 CN 的应答信息,表示 GN 满足准 CN 条件,成为 CN。CNACK 则表示 CH 确认选出合适的 CN 并使其成为正式的 CN。此外,在簇间路由确定后的数据通信中,CH 将按照 TDMA(Time Division Multiple Access)方式以  $N_r \times N_r$  空时编码<sup>[3-4]</sup>进行数据传输,其空时编码算法将根据 CN 的个数来确定。由于节点随机分布,并非总能保证 CH 能从其附近找到足够的 CN,簇首交换算法(Clustering CH Exchange Method, CCEM)<sup>[3,6]</sup>就会被启动来与附近节点进行角色交换。

## 5 仿真分析

实验采用 MATLAB R2016a 平台,仿真分析 UDCREDIT 算法以验证该算法的合理性和有效性。

### 5.1 仿真环境和参数设置

UWSN 同一般 WSN 一样是可以无限延伸的网络结构,那么无线传感器节点部署的区域大小没有限制,这里传感器节点采用随机均匀部署,密度足够大。为简单起见,这里的协作 MIMO 传输统一使用  $2 \times 2$  Alamouti 空时编码,也就是只要确保节点部署密度满足发送端和接收端有一个 CN 参与协作传输过程的要求即可。这样,协作 MIMO 传输过程就可以理解为点到点通信,传输中每比特总能量消耗就只与参与协作传输的 CH 和 CN 的数量有关。仿真中使用的参数如表 1

(这里所有实验均采用相同参数,除非另有说明)所列。

表1 仿真参数列表

参数	取值
能量扩散因子 $k$	1.5
声波频率 $f/\text{kHz}$	37.6
除功放外单点发送电路功率/W	1
误码率 $\overline{p_b}$	$10^{-3}$
漏板效率 $\eta$	0.35
传输速率 $R_b/\text{kbps}$	100
单点接收电路功率/W	1
传输总比特数 $L/\text{kbit}$	10

## 5.2 UDCREDIT 算法的合理性

对于协作 MIMO 和传统 SISO 传输,考虑其传输功率和内部电路功率,当导频  $p=0, 10, 20, 30$  时,它们每比特能耗的对数曲线如图 2 所示。可以看出,ILT 距离超过 14 m 时协作 MIMO 相对传统 SISO 会更节能。随着 ILT 的增加,SISO 每比特能耗增加得非常迅速,而协作 MIMO 每比特能耗虽有增加但极为缓慢,并且在信道估计中增加导频头对协作 MIMO 的影响很小,导频从 0 变化到 30,每比特能耗增加不超过  $5 \times 10^{-6} \text{ J}$ ,但增加导频头有利于选择 CSI 更好的 CN 来参与协作通信,从而更大程度地节省能量并获得更好的网络性能<sup>[3]</sup>。

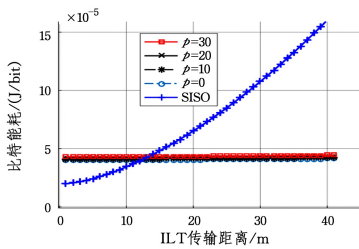


图2 协作 MIMO 与传统 SISO 每比特能量消耗

令  $L_i^s = L = 10 \text{ kbit}$  (后文的参数设置与此类似),图 3 给出了不同导频时 IST 平均距离  $d_m$  与 ILT 节能下边界距离  $d_{j\min}$  之间的关系。由此可见,当  $d_m$  在 50 m 内时, $d_{j\min}$  近乎以 0.5 的斜率随  $d_m$  变化, $d_m$  对  $d_{j\min}$  的影响较大。取  $p=10$ ,在考虑电路能耗和 IST 能耗时,令  $\Delta E$  为协作 MIMO 相对 SISO 节省的比特能量,那么 IST 距离  $d_m$ 、ILT 距离  $d_j$  和  $\Delta E$  之间的关系如图 4 所示。

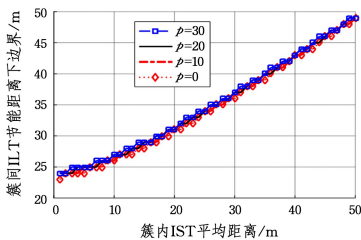


图3  $d_m$  与  $d_{j\min}$  的关系

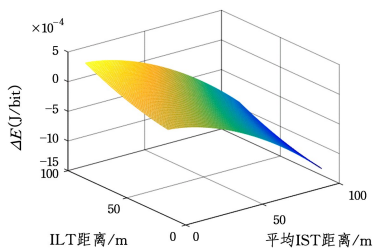


图4  $d_m$ 、 $d_j$  和  $\Delta E$  的关系

图中以平面 ( $\Delta E=0$ ) 为临界,平面以上为协作 MIMO 传输相对 SISO 节省的比特能量,其下为相对多消耗的比特能量。当  $d_m$  一定时, $d_j$  越大,协作 MIMO 节能就越多;当  $d_j$  一定时, $d_m$  越小,协作 MIMO 节能就越多,因此,在节点部署密度允许的情况下,协作 MIMO 传输应该尽可能减少  $d_m$ ,同时在发射功率等可达到的范围内,应尽可能增大  $d_j$  以节省更多能量。

根据第 3.2 节的假设和分析,在保证网络均衡性条件下,能量门限因子与网络节点持续运行轮数关系如图 5 所示。由此可见,若  $\beta$  越大,网络节点寿命  $R$  则越短,若  $\beta$  越小,网络节点寿命  $R$  则越长。若取 CN 数(这里取最大数) $n=4$ ,根据第 4 节中的分析, $E_{ch} = 2E$ ,  $E_{cn} = 1.8E$ 。图 5 中,给定初始能量  $E_0$ ,节点一轮平均消耗能量为  $E$ ,此时  $\beta_0 = E/E_0 = 0.1$ ,那么  $\beta \in [0.1, 0.2)$ ,则 CN 可以持续稳定地工作 10 轮,而 CH 也可以持续稳定地工作 9 轮。在  $E$  一定时, $E_0$  越大,则  $\beta_0$  越小又有利于延长网络寿命;同理,当  $E_0$  一定时, $E$  越小,则  $\beta_0$  也越小,网络中节点可以持续工作更长时间。若  $\beta_0 \rightarrow 0$ ,则  $2\beta_0 \rightarrow 0$ ,且  $E_{cn} \rightarrow 0$  同时  $E_{ch} \rightarrow 0$ ,那么可取得的能量门限因子  $\beta \rightarrow 0$ ,则  $R \rightarrow +\infty$ ,CN 和 CH 都可以更为持久的运行。令  $\beta=0.1$  时,网络节点寿命与协作节点数量的关系如图 6 所示。可见,当 CN 参与个数越多,网络平均寿命越长。由此可见,若  $\beta$  一定时, $n$  越大则  $R$  越大;同理,若  $n$  一定时,则  $\beta$  越小  $R$  也越大。因此,在初始能量一定并确保网络均衡性允许的条件下,应尽可能减少每轮节点能量的消耗以获得更小的  $\beta$  取值,以延长网络平均寿命,同时条件许可的情况下应尽可能地增加 CN 个数亦可获得更长的网络寿命。

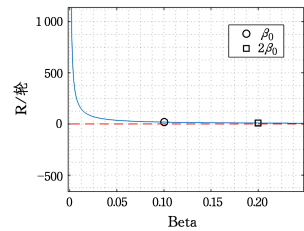


图5  $R$  与  $\beta$  的关系

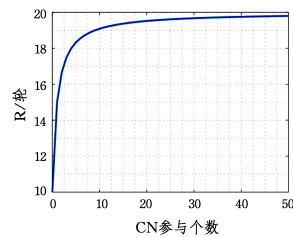


图6  $n$  与  $R$  的关系

在考虑 IST 能耗、电路功耗以及 SN 节省的能耗时,假设每跳 ILT 传输都是平均等间距的  $d_j = \frac{dis}{M}$ ,IST 距离为平均等间距的  $d_m$ ,一定路由长度下跳数与每比特能耗的关系如图 7 所示。由此可见,协作 MIMO 和传统 SISO 都存在最优跳数且随路由长度增加而增加,如在路由长度为 600 m、1200 m 和 1800 m 时,协作 MIMO 的最优跳数依次为 1 跳、2 跳、3 跳,而同时是 600 m 的 SISO 传输其最优跳数是 36 跳(其余为 72 跳、108 跳,为了图形清晰,这部分图略)。同时,协作 MIMO 相对 SISO 存在最大节能跳数且随总距离增大而增大,通常位于两者的最优跳数之间(即处在协作 MIMO 的最优跳数之后同时

位于 SISO 传输的最优跳数之前), 这里分别是 13 跳、27 跳和 42 跳, 而且相对 SISO 传输的最优跳数间隔窗口宽度也随路由长度或最大节能跳数增大而增大, 如 35 跳、70 跳、105 跳。同样的条件假设下, 平均等间距跳数  $M$ 、路由长度  $dis$  和平均每比特能耗  $E_b$  的关系如图 8 所示。图 8 中(这里忽略了侦听、采集融合数据等与路由无直接关系的能耗), 实线部分表示 SISO 传输一轮消耗的每比特能量, 而虚线部分表示协作 MIMO 一轮消耗的比特能耗。由此可见, 一定跳数时, 路由长度越长(距离较短时主要是无法发挥出其优势所在, 故耗能相对 SISO 较多), 协作 MIMO 越节能; 路由长度一定时, 跳数越少(当跳数较多时, 需要频繁切换, 增加了除发射功率放大器以外的电路能耗, 因而耗能相对增加), 协作 MIMO 也越节能。因此, 在考虑网络的节能均衡性条件等许可下, 选择跳数较少或距离较大的传输对协作 MIMO 传输更为有利。综上所述, 此文提出的 UDCREDT 算法是合理的。

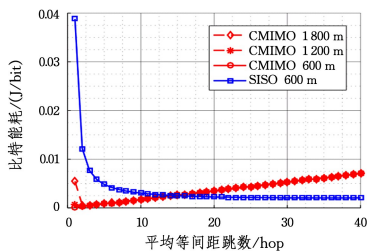


图 7 比特能耗随平均等距跳数关系

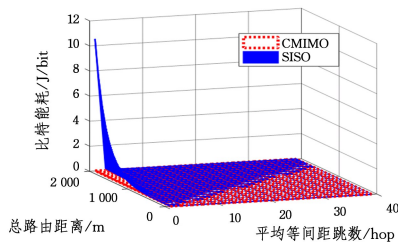


图 8  $M$ ,  $dis$  和  $E_b$  的关系

### 5.3 UDCREDT 算法的有效性

仿真实验中, 所有普通节点 GN 随机均匀部署在  $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ m}^3$  立体区域中, SN 部署在水面中心,  $d_m = 80 \text{ m}$ ,  $d_{is} = 500 \text{ m}$ ,  $d_{th} = \frac{(d_{is} + d_{jmin})}{2}$ ,  $d_{sh} = \frac{d_m}{2}$ , 且 IST 距离均匀分布在  $(0, d_m]$ , 而 ILT 距离均匀分布在  $(d_{jmin}, d_{is}]$ 。

在 800 次数据采集周期中, 每次总能耗的对数曲线如图 9、图 10 所示。由图 9 和图 10 可知, UDCREDT 算法(取  $\alpha = 0.5$ )所采用的带门限协作 MIMO 系统无论是相对于传统 SISO 系统和还是相对于无门限的协作 MIMO 系统而言, 明显更节能, UDCREDT 算法耗能大致波动在  $1 \times 10^{-7}$  量级上, 平均比特能耗比另外两种模式至少低出一个量级。

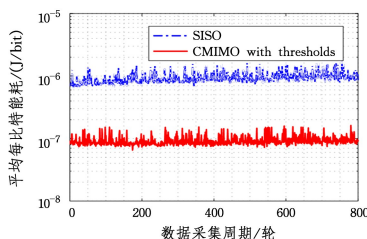


图 9 数据采集周期中每比特能耗的关系

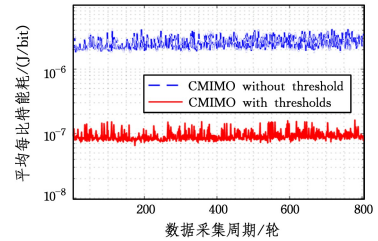


图 10 有无门限时每比特总能耗比较

为了能清晰呈现出距离门限、能量门限和能量权重因子  $\alpha$  等对算法性能影响的差异, 这里对 3 种算法以每周轮(这里一周轮等于 900 轮)取样, 取平均值进行比较分析, 它们的比特能耗随运行周期的关系如图 11 所示。显然, 3 种算法的能耗整体上都工作在约  $1 \times 10^{-7}$  的量级上, 而且不仅节能, 能耗还相对均衡, 但其实际效果尤其是分布均衡性却有很大差异。从图 11 可以看出, 随着网络的运行, 3 种算法的比特能耗大体上稍有所提高, 这主要是由于随着网络运行节点数量、均衡性、密度减少的缘故。但在约 6 周轮之前的部分 DCREDT 选择算法和 UDCREDT 算法的比特能耗基本都比新算法(即仅采用能量门限和距离算法的动态分簇路由算法)低, 而之后 DCREDT 选择算法的平均比特能耗却比另外两种算法高, 而 UDCREDT 算法的平均比特能耗大致都很低且比其他两种情况算法低。之所以会出现这种现象, 主要是由于刚开始运行时, 节点密度较大且均衡性较好, DCREDT 选择算法的能耗低且节能均衡性较好, 因此运行能耗较新算法低, 然而之后就不如新算法了, 因为 DCREDT 选择算法虽节能均衡, 但存在分布不均的缺点, 所以易出现中心“热区”问题, 即在 SN 附近易形成空洞而后劲不足, 其死亡分布均衡性较差, 运行状况从而变差; 新算法后期会更好更稳定, 原因是它解决了这种典型的多跳式的中心“热区”问题, 其能量消耗较稳定且覆盖分布均衡性较好, 后期不必做出太大的调整也能平稳地运行, 但易出现边缘“热区”问题, 从一开始新算法的能耗就会较大; 而 UDCREDT 算法综合了上述两者的优势又有效地弥补了其缺陷, 因而无论从节能均衡性还是分布均衡性上都更优, 其能耗较低且比较均衡稳定。此外, 这里依次给出 DCREDT 选择算法、新算法和 UDCREDT 算法 3 种算法(见图 11)运行的平均比特能耗和均衡性的情况以做说明: 每比特能耗的平均值依次为  $1.0706 \times 10^{-7}$  (100%),  $1.0636 \times 10^{-7}$  (99.35%),  $9.9770 \times 10^{-8}$  (93.19%), 标准差依次为  $7.3455 \times 10^{-8}$  (100%),  $7.2162 \times 10^{-8}$  (101.79%),  $6.8026 \times 10^{-8}$  (107.98%) (标准差在这里反映了每轮偏离平均比特能耗的波动情况, 即稳定均衡性, 标准差越少, 能耗均衡性就越好), 因此说明了上述分析情况是真实有效的, 从而可知提出的 UDCREDT 算法是有效的。

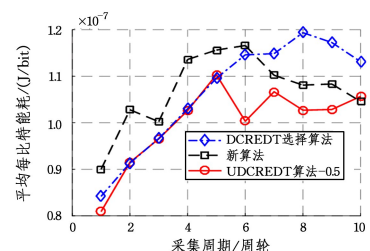


图 11 3 种算法运行中比特能耗比较分析