

## 수중 음향 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 클러스터링 메커니즘<sup>1)</sup>

윤필중, 김창화, 김상경  
강릉대학교 컴퓨터공학과  
e-mail:winipc@hanmail.net, {kch, skkim98}@kangnung.ac.kr

### An Energy Efficient Clustering Mechanism in Underwater Acoustic Sensor Networks

Phil-Jung Yun, Changhwa Kim, Sangkyung Kim  
Dept. of Computer Science & Engineering, Kangnung National University

#### 요 약

수중 음향 센서 네트워크는 무선 센서 네트워크의 한 분야로서 활발하게 연구되고 있다. 하지만 무선 센서 네트워크에서의 지상이라는 환경은 수중 음향 센서 네트워크에서의 수중이라는 환경과 많은 차이가 있다. 예를 들어 수중에서는 지상에서 보다 더 많은 통신 에너지를 필요로 하며 현재 단일채널 밖에 사용할 수 없다. 그러므로 수중 음향 센서 네트워크에서 무선 센서 네트워크의 메커니즘을 그대로 사용하기에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 수중 음향 센서 네트워크에서의 에너지 효율적 클러스터링 메커니즘을 제안한다. 제안하는 클러스터링 메커니즘은 단일채널의 수중환경을 대상으로 클러스터 내 통신에서 발생하는 충돌문제를 최소화하여 에너지 효율을 증가시키기 위해 하향식방법을 이용하여 클러스터 헤드 노드를 선정하고 선정된 클러스터 헤드 노드를 중심으로 클러스터 범위를 결정하는 방법을 제시한다.

#### 1. 서론

수중 음향 센서 네트워크(underwater acoustic sensor networks)는 최근 수중환경에 대한 관심이 증가함에 따라 기존 지상에서의 무선 센서 네트워크에 대한 연구를 수중이라는 새로운 환경에 적용하기 위해 연구되고 있다. 하지만 수중과 지상은 환경적으로 많은 차이가 있으며 무선 센서 네트워크에서 연구된 메커니즘들을 그대로 적용하기에는 적합하지 않다.

수중과 지상의 환경적 차이는 통신의 기본이 되는 통신매체의 차이를 발생시킨다. 지상에서는 전파의 감쇄가 작고 음파(acoustic wave)의 감쇄가 크며 반면에 수중에서는 전파의 감쇄가 크고 음파의 감쇄가 작다[1]. 그러므로 수중에서의 음파통신은 통신 속도가 매우 느리고 제한된 대역폭을 가지며 사용할 수 있는 채널 또한 전파 통신에서 보다 제한적이다[2]. 또한 전파통신에서 보다 더 많은 양의 통신 에너지를 필요로 한다[3].

무선 센서 네트워크와 마찬가지로 수중 음향 센서 네트워크의 에너지는 좁게는 각 노드의 생존기간을 넓게는 센서 네트워크 전체의 생존기간을 결정하기 때문에 성능적인 측면에서 가장 중요한 부분을 차지한다. 수중 음향 센서 네트워크에서의 가장 많은 에너지를 필요로 하는 부분은 통신이며 그러므로 통신 부분에서의 에너지 효율을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

통신에서의 에너지 효율을 증가시키기 위해 클러스터링 메커니즘에 대한 연구가 가장 많이 이루어져왔다. 클러스터링 메커니즘은 클러스터 헤드 노드가 클러스터 멤버 노드의 데이터를 병합하는 방법과 클러스터 내부적으로 TDMA 방식을 기반으로 클러스터 헤드 노드가 클러스터 멤버 노드의 스케줄을 조절하는 방법을 사용하여 통신에서의 에너지 효율을 증가시킨다[4].

하지만 클러스터링 메커니즘을 수중 음향 센서 네트워크에 적용하는 데에는 크게 두 가지 문제점이 있다.

첫 번째로 클러스터링 메커니즘 자체에 해결해야할 문제점이 아직 많이 남아있다는 점이다. 지금까지 연구된 클러스터링 메커니즘에서는 아직 클러스터 헤드 노드 선정과 클러스터 범위 선정 그리고 클러스터 간 통신 방법에 대해 명확하게 제시되지 않았다.

두 번째로 클러스터링 메커니즘은 지상 환경을 기반으로 무선 센서 네트워크에서 연구되어 왔다는 점이다. 실제로 클러스터링 메커니즘은 수중 환경을 고려하지 않고 연구되었다. 예를 들어 통신에서의 충돌을 줄이기 위해 다중채널을 사용하는 방법들은 현재 단일채널을 사용하는 수중 음향 센서 네트워크에서는 사용할 수 없다.

본 논문에서는 수중환경을 고려한 수중 음향 센서 네트워크에서의 클러스터링 메커니즘을 제안한다. 제안하는 클러스터링 메커니즘은 하향식(Top-down)방법을 이용하여 클러스터 헤드 노드를 선정하는 방안과 클러스터 내 통신에서의 충돌을 감소시키기 위한 클러스터 범위 선정 방법 그리고 클러스터 간 통신방법에 대해 제시한다.

1) 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 2008년도 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2008-C1090-0801-0044)

본 논문의 2절에서는 클러스터링 메커니즘에 대한 관련 연구를 살펴보고 3절에서는 기존의 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜의 문제점에 대해 설명하고 4절에서는 클러스터 구성방법에 대해 기술하며 마지막으로 제안한 클러스터링 메커니즘에 대해 검토하고 결론과 향후 연구 과제를 기술한다.

## 2. 관련연구

에너지 효율을 위한 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 무선 센서 네트워크에서 많은 연구가 이루어졌으며 대표적으로는 LEACH[5]와 HEED[6]가 있다.

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 클러스터 헤드 노드를 돌아가며 선출하는 방법을 이용하여 네트워크 노드간의 에너지 소모를 균등하게 하며 그로 인해서 네트워크 생존시간을 최대화 하기위한 방안으로 제안되었다. 클러스터 헤드 노드 선정 알고리즘은 기본적으로 각 주기마다 확률적인 방법에 의해 새로운 클러스터 헤드 노드를 선출하는 방식을 따른다. 클러스터 헤드 노드는 식(1)과 같은 확률함수에 의해 결정된다.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)} : C_i(t) = 1 \\ 0 : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

LEACH의 경우 네트워크 생존시간을 증가시킬 수는 있지만 모든 노드가 싱크 노드와 통신 가능하여야 하며 클러스터가 균일하게 분포하여야 하고 각 라운드마다 각 노드에서의 소비 에너지가 동일하여야 한다. 하지만 현실적으로 위의 조건들을 충족시키기는 매우 어렵다.

HEED(Hybrid, Energy-Efficient, Distributed clustering approach)는 개별 노드에서의 분산 처리 방법을 이용한 클러스터 헤드 노드 선정방법을 제안한다. 클러스터 헤드 노드의 선정은 국부 데이터만을 이용하여 이루어져야 하며 클러스터링을 위해 전송되는 데이터양이 적어야 할 뿐만 아니라 일정 시간 내에 동작이 완료되어야 한다. 클러스터 헤드 노드 선정은 식(2)와 같은 확률함수에 의해 결정된다.

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (2)$$

HEED의 경우 클러스터의 크기에 관계없이 일정 시간 내에 알고리즘이 종료되며 이웃 노드의 위치를 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 하지만 클러스터 헤드 노드의 선출 과정에서 동기화가 필요하며 클러스터 헤드 노드 선출 방법을 제외하고는 대체적으로 LEACH의 방법을 따르기 때문에 현실적으로 적용하기가 어렵다.

## 3. 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜의 문제점

현재 연구된 클러스터 기반 라우팅 알고리즘을 수중 음향 센서 네트워크에 적용하는데 다음과 같은 문제점을 갖는다.

첫 번째로 클러스터 헤드 노드의 선정방안이 명확하게 제시되어 있지 않다는 점이다. 현재 클러스터 헤드 노드의 선정문제에는 아직 해결되지 않는 문제로 남아있으며 해당 문제는 NP-complete 문제에 해당한다[7]. 대부분의 클러스터 헤드 노드의 선정 알고리즘들은 확률이나 휴리스틱을 기반으로 작성된다.

두 번째는 클러스터 헤드 노드에 집중되는 부하에 대한 문제이다. 클러스터 헤드 노드에 부하는 클러스터의 범위가 클수록 더 증가하게 된다. 이런 현상은 클러스터 헤드 노드의 변경주기를 단축시키게 되고 주기가 단축됨에 따라 클러스터 재형성에서 발생하는 오버헤드가 증가하게 된다.

세 번째는 각 클러스터 헤드 노드와 싱크 노드와의 통신에 대한 문제이다. 일반적인 클러스터 헤드 노드 선정 알고리즘은 클러스터 헤드 노드가 싱크 노드와 1:1 통신이 가능하다는 것을 전제로 제안되어왔다. 하지만 이러한 조건을 만족시키기는 불가능하다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 클러스터 게이트웨이 노드를 이용한 통신방안들이 제안되고 있지만 이 경우 클러스터 헤드 노드에서부터 게이트웨이 노드까지의 경로에서 많은 부하가 추가적으로 발생된다.

마지막으로는 클러스터 내부통신에서의 클러스터 간 충돌 문제이다. 한 노드가 클러스터 헤드 노드에 통신을 시도 할 때 해당 통신반경 안에 다른 클러스터의 노드가 위치하는 상황이 발생 할 수 있으며 각 클러스터가 서로 다른 TDMA 슬롯을 사용하기 때문에 동기화 문제가 발생하게 된다. 클러스터 헤드 노드가 다른 클러스터 헤드 노드와 인접하게 선정된다면 이러한 클러스터 간 충돌현상은 더욱 증가할 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다중채널을 사용하는 방법들이 제안되고는 있지만 수중 음향 센서 네트워크에서는 현재 단일채널밖에 사용할 수 없다. 그러므로 수중 음향 센서 네트워크에서 이러한 클러스터링 메커니즘을 그대로 사용한다면 통신에서의 충돌현상은 더 증가하게 된다.

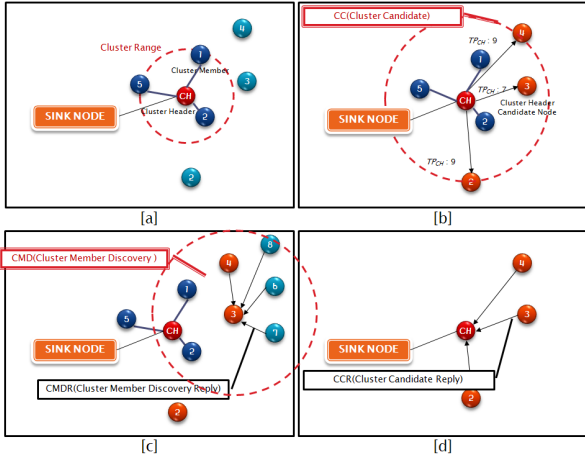
## 4. 클러스터 구성

본 장에서는 클러스터가 구성되는 과정을 설명한다. 클러스터 구성은 초기화, 클러스터 헤드 후보선정, 클러스터 헤드선정, 클러스터 형성의 단계로 수행된다.

### 4.1 초기화

클러스터 구성 작업에서 사용되는 변수는  $TP_{MAX}$ (Maximum Transmission Power),  $TP_{CH}$ (Cluster Header Transmission Power),  $TP_{CM}$ (Cluster Member Transmission Power)가 있다.  $TP_{MAX}$ ,  $TP_{CH}$ ,  $TP_{CM}$ 는 선

정된 클러스터 헤드 노드에서 먼 곳에 새로운 클러스터 헤드 노드를 선정하고 각 클러스터의 영역을 제한하여 통신에서의 충돌을 줄이기 위해  $TP_{MAX}$ 는 물리계층의 최대 전송과워단계로 초기화하고  $TP_{CH}$ 는  $TP_{MAX}/2 + 1$ 로  $TP_{CM}$ 는 물리계층의  $TP_{MAX}/2$ 로 초기화한다.



(그림 1) 클러스터 헤드 후보 선정

#### 4.2 클러스터 헤드 후보 선정

클러스터 헤드 후보 선정 단계는 클러스터 헤드 후보 노드를 선정하고 클러스터 헤드 노드를 선출하기 위한 필요정보를 수집하는 단계이며 (그림 1)과 같이 수행된다.

선정된 클러스터 헤드 노드는 CC(Cluster Candidate) 메시지를  $TP_{CH}$ 의 파워로 브로드캐스팅 한다. 이때 CC 메시지에는 현재  $TP_{CH}$  파워 값이 포함된다. CC 메시지 전송작업은 통신반경내의 모든 노드가 CC 메시지에 응답하였거나  $TP_{CH}$ 값이 물리계층의 최대전송과워 값과 같아 질 때까지  $TP_{CH}$ 값을 증가시키며 반복된다. CC 메시지를 수신한 노드는 클러스터 헤드 후보 노드가 되며 해당 노드는 선정된 클러스터 헤드 노드로부터 자신이 처음으로 받은 CC 메시지만을 유효하게 처리한다.

선정된 클러스터 헤드 노드가 CC 메시지를 모두 브로드캐스팅 했을 때 해당 메시지를 수신한 각 클러스터 헤드 후보 노드는 CMD(Cluster Member Discovery) 메시지를  $TP_{MAX}$  파워로 브로드캐스트 한다.

CMD 메시지를 받은 일반 노드, 클러스터 헤드 후보 노드는 해당 메시지에 대한 응답으로 CMDR(Cluster Member Discovery Reply) 메시지를 해당 클러스터 헤드 후보 노드로 전송하게 된다. CMDR 메시지는 자신이 클러스터 헤드 후보, 일반 노드인지에 대한 상태정보를 포함한다.

클러스터 헤드 후보가 CMDR 메시지를 수신했을 때 주변 밀집도 변수를 증가시킨다. 또한 CMDR 전송 노드가 클러스터 헤드 후보일 경우 해당 노드 ID를 캐싱한다.

모든 CMDR 메시지의 수신이 종료되었을 때 클러스터 헤드 후보 노드는 자신에게 CC 메시지를 전송한 클러스

터 헤드 노드에 CCR(Cluster Candidate Reply) 메시지를 전송한다. CCR 메시지는 밀집도 변수와 주변의 캐싱한 클러스터 헤드 후보 노드 ID 그리고 자신의 잔여 에너지 량에 대한 정보를 포함한다.

#### 4.3 클러스터 헤드 선정

클러스터 헤드 선정 작업은 선정된 클러스터 헤드 노드가 클러스터 헤드 후보 노드들로부터의 CCR 메시지를 모두 수신 받은 상황에서 이루어진다. 클러스터 헤드 선정 작업은 크게 각 클러스터 헤드 후보의 가중치 연산과정과 클러스터 헤드 후보 간의 중첩여부를 판단하여 클러스터 헤드를 선정하는 방법으로 구성된다.

선정되는 클러스터 헤드 노드는 병합 연산의 효율을 위해 밀집도가 높아야하고 충돌물을 감소시키기 위해 선정된 클러스터 헤드 노드로부터 먼 거리에 위치하여야 하면 높은 에너지를 가져야 한다. 그러므로 각 클러스터 헤드 후보 노드의 가중치는  $CH_{select}$ 로 표현되며 식(3)에 의해 연산된다.

$$CH_{select} = W_D D + W_P P + W_E E \quad (3)$$

식(3)에서 D는 밀집도, P는 선정된 클러스터 헤드 노드로 부터의 거리, E는 잔여 에너지 량을 의미하며 P값의 경우 각 클러스터 헤드 후보 노드가 첫 CC 메시지에서 받은 송신 파워 값을 의미한다. D, P, E는 각각의 최대값이 다르므로 연산 시에는 해당 값들의 편차 값을 0에서 1 사이의 값으로 변환하여 연산한다.  $W_D, W_P, W_E$ 는 각각의 값에 대한 가중치를 의미하며 0에서 1사이의 값으로 정의된다.  $W_D, W_P, W_E$ 의 값은 휴리스틱 방법이나 해당 네트워크에서의 정책에 따라 결정되어진다. 모든 노드들에 대한  $CH_{select}$  값을 연산한 후 각 클러스터 헤드 후보 노드의 노드 ID,  $CH_{select}$  값 그리고 중첩된 헤드 후보 ID를 묶어  $CH_{select}$  테이블을 생성한 후 내림차순으로 정렬한다.

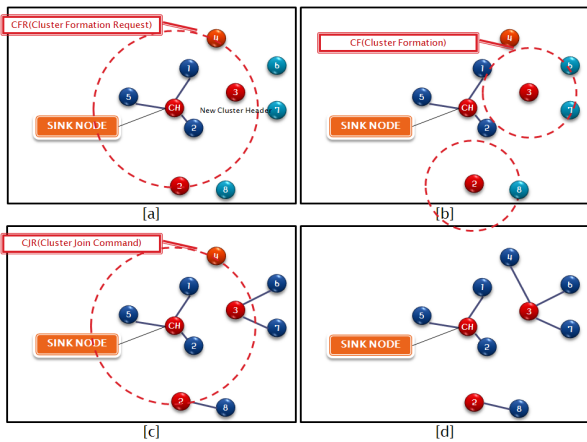
클러스터 헤드 후보 간의 중첩여부를 판단하여 클러스터 헤드를 선정하는 방법은  $CH_{select}$  테이블을 순서대로 탐색하며 높은 가중치 값을 가지는 노드를 클러스터 헤드로 선정하고 해당 연산에 의해 선정되어진 클러스터 헤드 노드와 중첩되는 노드를 클러스터 헤드 선정에서 배제하는 것으로 이루어진다.

<표 1>  $CH_{select}$  테이블

노드 ID	$CH_{SELECT}$	중첩된 ID
1	3	3
2	2	3
3	1.8	1, 2

$CH_{select}$  테이블인 <표 1>에서 먼저 1번 노드가 클러스

터 헤드 선정여부를 판별 받게 되는데 새로 선정된 클러스터 헤드가 존재하지 않으며 그러므로 클러스터 헤드로 선정된다. 해당 연산에서 클러스터 헤드로 선정될 때 해당 노드의 노드 ID와 중첩된 ID 모두 캐싱되게 되며 현재의 경우 1, 3번 ID가 캐싱되게 된다. 2번 노드의 경우 먼저 캐싱된 노드 ID를 확인하게 되는데 현재 캐싱된 노드 ID는 1, 3이므로 2번 노드는 클러스터 헤드로 선정된다. 또한 이미 3번 ID는 캐싱되어 있기 때문에 2번 ID만을 추가로 캐싱하게 된다. 마지막으로 3번 노드의 경우 캐싱된 노드 ID 확인 과정에서 3번 ID가 캐싱되어 있다는 것을 확인하게 되며 이때 새로 선정된 클러스터 헤드와 충돌을 발생시킬 수 있기 때문에 3번 노드는 클러스터 헤드로 선정되지 않는다.



(그림 2) 클러스터 형성

#### 4.4 클러스터 형성

클러스터 형성과정은 클러스터 헤드 선정 작업이 끝난 후 새로 선정된 클러스터 헤드 노드들이 자신의 클러스터를 형성하는 작업이며 (그림 2)와 같은 순서로 실행된다.

선정된 클러스터 헤드는 클러스터 헤드 선정 작업에서 새로 선정된 클러스터 헤드 노드들에게 CFR(Cluster Formation Request) 메시지를 보낸다. CFR 메시지를 받은 새로 선정된 클러스터 헤드 노드들은  $TP_{MAX}$ 값과  $TP_{CM}$ 값을 초기화하고  $TP_{CM}$  파워로 CF(Cluster Formation) 메시지를 보내 클러스터를 형성한다. 클러스터 형성 작업이 끝난 후 선정된 클러스터 헤더는  $TP_{CH}$  파워로 클러스터에 소속되지 않은 노드들에게 가까운 클러스터에 가입하라는 CJR(Cluster Join Command) 메시지를 보내게 된다. 해당 메시지를 받은 소속되지 않은 노드는 가장 가까운 클러스터에 소속되는 작업을 수행한다. 해당 작업해서 새로 소속되는 클러스터 멤버까지의 통신파워 값이  $TP_{CM}$ 값 보다 크다면  $TP_{CM}$ 값을 새로 소속되는 클러스터 멤버까지의 통신파워 값으로 갱신한다. 클러스터 내에서의 통신은  $TP_{CM}$  파워로 이루어지며 클러스터 간 통신 즉 클러스터 헤드 노드 간 통신은  $TP_{CH}$  파워로 이루어지게 된다.

#### 5. 검토 및 결론

본 논문에서는 하향식방법으로 클러스터 헤드 노드 및 클러스터 범위를 선정하는 방법을 통해 클러스터 내 통신에서의 충돌문제를 최소화하여 수중 음향 센서 네트워크에서의 에너지 효율을 증가시키는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 클러스터링 메커니즘의 장점은 크게 세 가지로 분류 할 수 있다.

첫 번째로 제안된 하향식의 클러스터 헤드 노드 선정 방법은 기존 클러스터 헤드 노드 선정 방법에서처럼 NP-complete 문제를 발생시키지 않는다. 즉 실제 수중 음향 센서 네트워크에 구현 및 적용이 가능한 방법을 이용한다.

두 번째로 선정된 클러스터 헤드 노드들은 주변의 헤드 노드들과 1:1 통신이 가능하며 클러스터 헤드 노드는 클러스터 헤드 노드들 간의 네트워킹을 통해 싱크노드와 실제적인 통신이 가능하다.

마지막으로 클러스터 헤드 노드의 선정 시 헤드 노드들 간의 거리를 멀게 선정하고 클러스터 영역을 제한하는 방법을 통해서 클러스터 내 통신에서 다른 클러스터 노드들과의 충돌확률을 줄일 수 있다.

향후 연구 과제는 본 논문에서 제안한 클러스터링 메커니즘을 구현하여 성능을 평가하고 실제 수중 음향 센서 네트워크에 적용하는 것이다.

#### 참고문헌

- [1] M. Stojanovic, "Acoustic(underwater) communications", in: J.G. Proakis(Ed.), Encyclopedia of Telecommunications, Wiley, New York, 2003.
- [2] L.Freitag, M. Stojanovic, "Acoustic communications for regional undersea observatories", in: *Proceedings of Oceanology International*, London, UK, March 2002.
- [3] Ian F.Akyildiz, Dario Pompili, and Tommaso Melodia. "State-of-the-Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks". *International Workshop on Underwater Network, MobiCom* 2006. 7-16
- [4] N. Vljajic, D. Xia, "Wireless Sensor Networks: To Cluster or Not To Cluster?", *International Symposium on a World of Wireless*, 2006.
- [5] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Oct 2002.
- [6] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy Efficient Approach", *IEEE INFOCOM 2004*, Mar 2004.
- [7] A. Bogdanov, E. Maneva and S. Riesenfeld, "Power-aware Base Station Positioning for Sensor Networks", *HICSS*, Jan 2000.