

논문 2016-53-6-3

## 수중 센서 네트워크를 위한 채널 특성이 기반의 협력 통신 기법

(Cooperative Communication Scheme Based on channel  
Characteristic for Underwater Sensor Networks)

지용주\*, 최학희\*\*, 이혜민\*\*, 김동성

(Yong-Joo Ji, Hak-Hui Choi, Hye-Min Lee, and Dong-Seong Kim<sup>©</sup>)

## 요약

본 논문은 수중 음파 센서 네트워크의 패킷 전송률을 높이고 에너지 소모량을 줄이기 위한 협력 전송 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 각 노드에서 가상 안테나 배열이라고 부르는 분산 안테나들이 같은 패킷들을 전송하고, 수신노드에서는 수신된 패킷들을 결합하여 패킷 손실률을 낮춘다. 따라서 높은 전송 손실, 전파 지연 및 주위 잡음과 같은 수중 채널의 고유 특성을 고려한 채널 특성이 기반의 협력 전송 기법은 중계노드들을 통한 높은 다이버시티 이득을 제공하여 수중 음파 센서 네트워크의 신뢰성을 향상시킨다. 또한 송신노드에서 채널 상태, 거리 비용, 각 노드 당 남은 에너지를 고려하여 이웃노드들 중에서 목적지와 중계노드를 선택하는 알고리즘을 제안한다. 모의실험 결과는 OPNET Moduler를 통해 제안된 방법의 평균 에너지 소비, 패킷 전달 비율, 응답 시간 측면에서 비-협력 기법 및 SPF(Shortest Path First) 기법보다 향상된 성능을 보여준다.

## Abstract

This paper presents a cooperative transmission scheme for underwater acoustic sensor networks to improve packet transmission rate and reduce energy consumption. Source node transmits duplicated information relayed by distributed antennas called a virtual antenna array. Destination node combines that information to reduce packet error rate. The suggested cooperative scheme enhances the reliability by providing high diversity gains through intermediate relay nodes to overcome the distinct characteristics of the underwater channel, such as high transmission loss, propagation delay, and ambient noises. It is suggested that the algorithm select destinations and potential relays from a set of neighboring nodes that utilize distance cost, the residual energy of each node and local measurement of the channel conditions into calculation. Simulation results show that the proposed scheme reduces average energy consumption, response time, and increases packet delivery ratio compared with the SPF(Shortest Path First) and non-cooperative scheme using OPNET Moduler.

**Keywords :** Underwater acoustic sensor networks(UWASN), cooperative networks, diversity gains, signal-to-noise ratio(SNR), packet delivery ratio.

\* 정회원, 금오공과대학교 IT융복합공학과  
(Department of IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 학생회원, 금오공과대학교 IT융복합공학과  
(Department of IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 정회원, 한국전자통신연구원 지역산업IT연구실  
(Electronics and Telecommunications Research Institute Local Industry IT Laboratory)

<sup>©</sup> Corresponding Author (E-mail : dskim@kumoh.ac.kr)

※ 본 연구는 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (NO. NRF-2015H1C1A1035971).

Received ; September 18, 2015 Revised ; May 19, 2016

Accepted ; June 1, 2016

## I. 서론

무선 센서 네트워크의 기술이 발전함에 따라, 이를 이용하여 인간이 접근하기 어려운 수중 환경에서 필요한 정보를 얻으려는 시도들이 이루어지고 있다<sup>[1~2]</sup>. 그 중 수중 센서 네트워크는 깊은 강이나 바다에 설치되어 수중 자원 탐사, 해저탐사 및 개발, 자연재해 방지 등의 목적으로 이용된다. 물속이라는 특수한 환경 특성으로 인해, 수중 센서 네트워크는 링크의 신뢰성이 낮고, 긴 전파 지연을 가지는 등 많은 한계점들이 있다<sup>[3~4]</sup>. 뿐만 아니라 대역폭이 제한되어있어 한 번에 보낼 수 있는

정보량이 적고, 주변 노이즈와 도플러 편이 현상 등이 패킷 전송률을 낮춘다. 따라서 기존의 무선 네트워크에서 사용하는 프로토콜을 수중 센서 네트워크에 적용할 경우 네트워크의 성능이 저하된다.

현재 여러 수중 무선 센서 네트워크의 한계점들과 그에 대한 해결방안들이 연구되어지고 있다. 여러 한계점들 가운데 낮은 전송률을 개선하기 위한 여러 방법이 제안되었다<sup>[4]</sup>. 그 중 공간 다이버시티 이득을 개선해 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 증가시키기 위한 효율적인 방법으로 다중 입력 다중 출력(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)기술이 있다<sup>[5]</sup>. 하지만 이 방법은 각각의 노드마다 별도의 하드웨어를 설치해야하므로 비용이 높고 시스템이 복잡해진다. 또한 별도의 하드웨어로 인한 에너지 소비로 네트워크 지속시간이 단축된다. 이런 문제점들을 해결하면서 MIMO와 유사한 효과를 얻기 위해 다중 협력 노드들을 활용하는 방법이 연구되었다<sup>[6~9]</sup>.

본 논문에서는 기존에 적용 되어진 협력 통신 기법에 수중 음파 센서 네트워크의 열악한 환경을 고려하여 각 노드간의 연결성과 신뢰성을 증계노드를 이용한 향상된 방법으로 제안하고자 한다. 또한 수중 채널의 환경적 특성들과 협력 통신기법의 장·단점들을 고려한 목적지와 증계노드의 최적화 선택 기법을 통해 전송지연을 줄이는 동시에 각 노드의 에너지 소모량도 감소시키는 방법을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II 장에서 수중 음파 채널의 구체적인 특징을 소개하며, 수신 노드와 증계노드들의 선택 알고리즘이 III장에서 소개된다. 모의실험과 성능 평가는 IV장에서 소개되고 마지막 V장에 결론 및 향후 연구에 대해 논의한다.

## II. 수중 음파 채널 환경

### 1. 감쇠량과 전파 지연

수중 환경에서 음파의 전파 속도는 평균적으로  $c = 1500[m/s]$ 을 가진다. 분산 손실과 흡수 손실은 큰 감쇠를 야기해 수중 통신 채널에 영향을 준다. 주파수가  $f[kHz]$ 일 때 송신 노드에서 수신 노드까지 거리  $l[km]$ 와 분산 계수  $k$ 을 이용해 식 (1)의 감쇠  $A(l, f)$ 를 계산 한다<sup>[10]</sup>.

$$A(l, f) = l^k a(f)^l, \quad (1)$$

$k$ 는 분산 요소로 네트워크의 분포 형태가 원통형이면 1, 구형이면 2로 설정하며 본 논문에서는 정육면체로 분포되어 1.5로 설정한다<sup>[11]</sup>. 흡수 계수  $a(f)$ 는 Thorp이 제안한 공식으로 표현 될 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$10\log a(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003[dB/km], \quad (2)$$

### 2. 수중 음파 노이즈 모델

식 (3)~(6)과 같이 해류( $N_t$ ), 해상 활동( $N_s$ ), 파도( $N_w$ ) 그리고 수온( $N_{th}$ )과 같은 요인들은 수중 통신에 많은 영향을 준다<sup>[11]</sup>.

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log f \quad (3)$$

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f - 30\log(f + 0.03) \quad (4)$$

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \quad (5)$$

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f, \quad (6)$$

해상 활동 요인  $s$ 는 0에서 1의 범위를 가지고  $w$ 는 파도의 속도로  $m/s$ 의 단위를 가진다. 따라서 수중 통신에 영향을 미치는 주위 노이즈의 합은 식 (7)과 같다.

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f). \quad (7)$$

### 3. 수중 음파 노이즈 모델

식 (8)는 전송 신호가 대역폭  $B[Hz]$ 와 파워  $P[W]$ 를 가질 때, 총 노이즈  $N[W/Hz]$ 를 이용해 수신노드에서 SNR를 계산했다. 신호의 크기는 파워  $P[W]$ 로 표현할 수 있으며, 신호는 수중 환경에서 식 (1)과 (3)에 의해 식 (8)의 분자와 같이 표현된다. 노이즈의 크기는 식 (7)에 의해 식 (8)의 분모와 같이 표현된다. 또한 식 (8)의  $B[Hz]$ 는 무한한 대역폭이 아닌  $B[Hz]$ 의 대역폭을 사용할 때 얻어지는 전송률의 상한 값을 나타내기 때문에 SNR은 다음 식으로 도출된다.

$$SNR(l, f) = \frac{P/A(l, f)}{N(f)B}, \quad (8)$$

또한 노이즈가 다음 식 (9)과 같은 가우시안 분포와 채널을 따른다고 가정한다<sup>[12]</sup>.

$$P(f) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

이때  $\mu$ 는 도수분포의 중심을 가리키는 평균치이며  $\sigma$ 는 정규분포의 표준편차를 나타낸다. 일부 가간섭성을 가지는 시간동안 채널은 안정적으로 유지된다. 이때, 무한한 대역폭을 가진 가우시안 채널 용량은 Shannon-Hartley 이론을 따르는 통신 채널을 이용해 성공적으로 전송할 수 있는 정보량의 상한 값을 나타낸다.

$$C(f, l) = B \log_2 \left( 1 + \frac{P/A(l, f)}{N(f)B} \right) [\text{bits/s}], \quad (10)$$

식 (10)는 주파수와 거리에 따른 채널 용량을 나타낸다. 각각 노드의 전송률이  $R[\text{bits/s}]$ 이라고 가정할 때, 채널 용량이 전송률 보다 크거나 같으면 신호는 페이딩 채널에서도 성공적으로 전송된다.

$$C(f, l) \geq R, \quad (11)$$

식 (11)은 수신노드에서 신호를 수신할 때 허용 가능한 신호의 범위를 나타낸다. 이를 이용해 복잡한 코딩과 디코딩 과정에서 쉽게 무선 시스템의 링크 효율 근사치를 계산할 수 있다.

### III. 수중 음파 협력 전송

#### 1. 수신노드와 중계지

협력 통신 기법은 전송자로부터 두 개 이상의 같은 신호들을 받아 합성하여 페이딩을 감소시킨다. 공간 다이버시티를 이용한 협력 통신 기법은 링크 용량을 향상시키고 처리량을 높이며, 공간 및 채널 재사용에 의한 낮은 간섭효과를 가진다. 본 논문에서는 <그림 1>에서 보는 것과 같이 설명의 명료성을 위하여 하나의 송신노드와 수신노드 그리고 두 개의 중계 노드들을 가진 협력 전송 기법을 사용하며, 이 모델은 임의의 개수의 릴레이 노드로 이루어진 시스템으로 확장될 수 있다<sup>[13-15]</sup>. 송신노드에서 보낸 신호들은 여러 중계노드를 거치며 각 채널의 영향( $h$ )을 받게 된다.

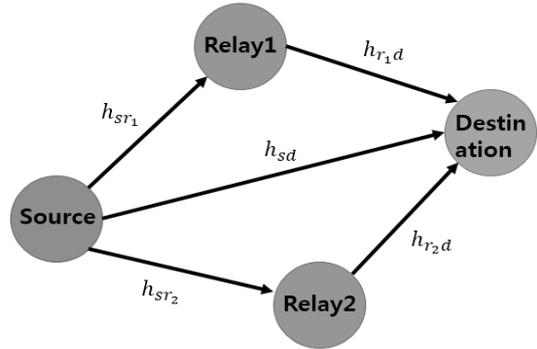


그림 1. 수중 센서 네트워크의 협력 전송 기법의 예  
Fig. 1. The example of cooperative transmission scheme in UWASN.

수신노드가 사전에 정의된다는 가정 하에 협력 전송은 통신에 적합한 중계노드들을 찾는다. 하지만 잠재적 중계노드들에서 만기된 타이머를 기반으로 하는 방법은 수중 링크에서 지연을 상승시키기 때문에 맞지 않다<sup>[13]</sup>. 이런 문제점을 보완하기 위해 수중에서 분산 방식으로 협력 전송하는 방법을 사용한다. 몇 홉을 경유해 수신노드에 도달하는 메시지를 전송하기 위해, 송신노드는 일정 범위에서  $n$ 개의 이웃노드들을 가진다고 가정한다. 수신노드로 신호를 전달하는데 있어 가장 신뢰할 수 있는 경로를 결정하기 위해 송신노드는 채널 상태를 확인한 후 이웃노드 중에서 최적의 경로를 위한 중계노드들을 택한다.

#### 가. 이웃노드의 목록 구축

수신노드는 모든 센서 노드들로부터 주기적으로 광고패킷(ADvertising packet, ADV)을 보내 이웃노드 목록을 업데이트하며, 각각의 노드에서 수신노드까지의 홉 수를 기록한다. 송신노드는 이 기록에 근거하여 중계노드를 정해 경로를 설정하고 수신노드로 패킷을 전송한다. 그 후, 광고패킷은 노드들의 연결 상태를 확인하고 네트워크 상태는 안정된다<sup>[7]</sup>.

#### 나. 채널 상태 수집

<그림 2>는 수신노드와 중계노드를 선택하는 알고리즘을 나타낸다.

송신노드가 전송할 데이터가 있을 때, 송신 요구(Request to Send, RTS)패킷을 중계노드나 수신노드가 될 수 있는 이웃노드들에게 전송한다. 이웃노드들의 에너지 소비를 줄이기 위해 RTS와 송신 준비 완료(Clear to Send, CTS)패킷의 길이는 데이터 패킷의 길이보다 작게 한다. RTS패킷은 송신노드에서 수신노드까지 홉

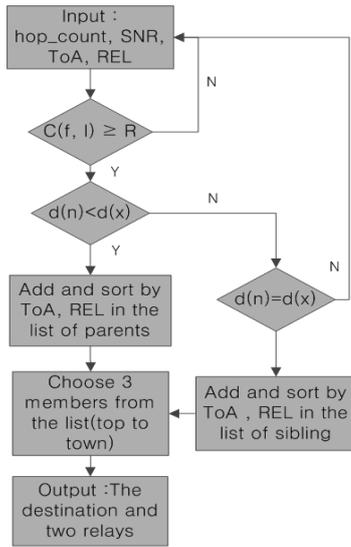


그림 2. 수신노드와 중계노드 선택 기법 순서도  
 Fig. 2. Flow chart of selection scheme about destination and relays.

의 수 정보를 포함한다. 이웃노드들이 RTS패킷을 받으면, 여기에 저장된 송신노드에서 수신노드까지 홉의 수를 자신으로부터 수신노드까지의 홉 수와 비교한다. 수신노드까지 송신노드보다 더 작은 홉 수를 가지는 이웃노드만이 중계노드가 될 기회를 얻어 CTS패킷을 송신노드로 보낸다. 이때 각 노드들의 잔여 에너지 정보 (Residual Energy Level, REL)를 CTS패킷에 넣는다.

(3) 목적지와 중계노드 선택

RTS/CTS메시지 교환 절차 이후, 송신노드는 물리적 거리 값, 도착시간, 그리고 채널 상태 값을 가지는 중계노드 목록을 얻는다. 송신노드는 적절하고 신뢰성이 있는 중계노드들은 선택하기 위해 <그림 2>의 알고리즘을 실행한다. 부모그룹과 형제그룹은 각 노드들에서 수신노드까지의 홉 수가 송신노드에서 수신노드까지의 홉 수  $[d(x)]$ 보다 작거나 같은 이웃노드  $[d(n)]$ 의 집합이다. 각 그룹 안에서 중계노드나 수신노드로 적합한 노드들을 정렬하기 위해 도래시간(Time of Arrival, ToA)과 REL 파라미터를 사용한다. 정렬을 위한 우선순위 선정 값  $(P_i)$ 은 식 (12)와 같다.

$$P_i = \frac{REL_i}{IER} \times \left(1 - \frac{ToA_i}{Limited\ Time}\right), \quad (12)$$

노드  $i$ 의 잔여 에너지 레벨(0-10)을 10인 초기 에너

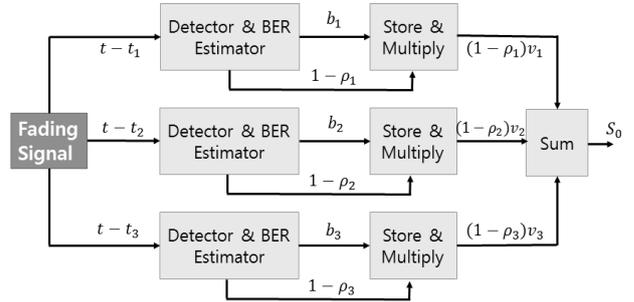


그림 3. 다이버시티 결합 기법의 예  
 Fig. 3. The example of diversity combining scheme.

지 레벨로 나누어 노드에 남은 에너지가 많을수록 패킷 전송에 이용될 수 있도록 하였다. 또한 제한된 시간의 값을 바꿔서 ToA가 우선순위 선정 값에 미치는 영향을 변화시킬 수 있다.

나. 다이버시티 결합 기법

중계노드들은 첫 번째 위상에서 송신노드가 보낸 메시지를 디코딩하고 다음 위상에서 전송한다. 수신노드는 각기 다른 시간에 다양한 경로를 통해 여러 복사 패킷들을 수신한다. 이때 수신된 신호들에 SNR를 고려하여 가중치를 적용하는 최대 비율 결합 기술(Maximal Ratio Combining Technology)을 사용한다. 본 논문에서는 수신 노드를 통해 들어온 신호가 불분명한 점을 보완하고자 최대 우도 추정(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 사용하는 BER 측정 모델을 채택한다<sup>[11]</sup>.

<그림 3>은 다이버시티 결합 기법을 나타낸다<sup>[16]</sup>. 이 기법은 세 개의 입력과 하나의 출력을 가지는 다중 입력 단일 출력(Multiple-Input Single-Output, MISO)을 가지며  $t_1, t_2, t_3$ 의 시간에서 세 가지 신호를 하나의 송신노드와 두 개의 중계노드들로부터 받았다고 가정한다. 클러스터는 <그림 3>과 같이 다수의 리시버를 통해 동일 신호를 수신하며, 하나 이상의 Error-Free 리시버가 존재할 경우, Diversity Combining 과정은 생략된다. 만일 모든 리시버가 Error-Free 상태가 아닌 경우, 신호를 합산 및 재정규화(Re-Normalize)하는 Diversity Combining 절차가 수행된다. 위 구조는 불필요한 Diversity Combining 절차를 줄이기 위해, Error-Free 여부의 판단을 선행하도록 설계된다. 수신노드에서 수신된 신호는 바이너리 값  $(b_i)$ 을 얻기 위해 복조되고 디코딩 된다. 검출된  $b_i$ 는 원래의 패킷을 복구하기 위해

각각의 가중 요인( $1 - \rho_i$ )을 곱한다.  $b_i$ 는 곱하기 전에 아래의 논리로 바이어스 값( $v_i$ )으로 변환된다.

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{이진수가 1일 때} \\ -1, & \text{이진수가 0일 때,} \end{cases} \quad (13)$$

출력 값( $b$ )는 0으로 설정된 임계치를 근거한 합( $S_0$ )에 의해 결정된다.

$$S_0 = \sum_{i=1}^3 (1 - \rho_i) a_i \quad (14)$$

$$b = \begin{cases} 1, & S_0 \geq 0 \\ 0, & S_0 < 0, \end{cases} \quad (15)$$

#### IV. 모의 실험

##### 1. 환경 설정

본 논문에서는 OPNET Modeler 16.0을 이용해 제안된 방법의 성능을 분석했다. 모의실험 파라미터는 참고 문헌<sup>[3,9]</sup>에서 참조하였다. 100개의 수중 센서 노드들은 가로, 세로, 높이가  $300 \times 300 \times 300 [m^3]$ 인 부피공간에 배치되었다. 센서 노드들은 주파수를  $30 [kHz]$ 로 쏘아 최대  $100 [m]$ 까지  $10 [kb/s]$ 의 전송 속도로 패킷을 보낸다.

본 문에서는 수중 통신 기법의 특징과 관계된 전파 지연 모델, 전력 모델 그리고 배경 노이즈 모델의 세 단계로 실험한다. 이론적으로 수중 환경에서 음파는 속도, 해류, 염분 그리고 수심과 관계되며 모의실험에서는  $1500 [m/s]$ 로 설정한다. 반면에 전력 모델은 식 (1)과 (2)를 이용해 전송 전력과 경로 손실 그리고 안테나 이득을 고려했다. 또한 식 (4)~(7)에서 해류, 해상 활동, 파도 그리고 수온을 포함한 노이즈 모델을 고려했다. 노이즈에 영향을 주는 해상 활동 요인( $s$ )과 바람의 속력은 각각  $0.2, 5 [ms]$ 로 설정했다<sup>[17]</sup>. 마지막으로 패킷의 사이즈는  $1 [byte]$ 로 설정하고, 패킷의 오류검사를 하지 않는 대신 패킷의 사이즈만큼 전송이 완료 될 때까지 재전송을 시도하도록 한다.

##### 2. 모의실험 결과와 분석

제안된 기법은 평균 에너지 소비, 패킷 전송 비율, 응답 시간의 측면에서 SPF 기법, 비-협력전송 기법과 비교한다.

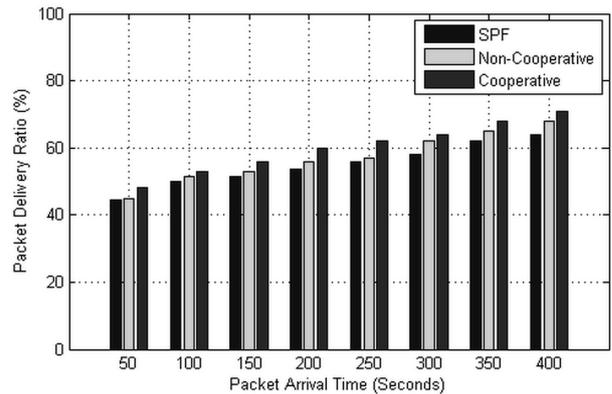


그림 4. 패킷의 도착 시간에 따른 전송률 분석  
Fig. 4. The analysis of packet delivery ratio depending on changes of packet arrival time.

##### 가. 패킷 전송률 분석 결과

<그림 4>는 수신노드에서 수신한 각 패킷의 비트 당 평균 에너지 소비의 분석을 나타낸다. 제안한 기법은 협력 전송 기법이 다른 기법들에 비해 높은 전송률을 얻음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 기법이 수중 채널의 환경을 고려한 데이터 전송을 사용하고, 다이버시티 결합을 통해 통신 이득을 높여 패킷을 성공적으로 전송함으로써 패킷 수신 확률을 높이기 때문이다.

이에 반해 SPF전송 기법의 경우 수중채널에서 발생하는 다양한 노이즈들을 고려하지 않은 채 데이터를 전송하여 다른 전송 기법에 비해 낮은 데이터 전송률을 보인다. 비협력 기법의 경우 수중채널의 노이즈는 고려하지만 다이버시티 기법을 사용하여 통신 이득을 높인 협력 통신 기법에 비해 낮은 데이터 전송률을 보인다.

##### 나. 수신비트 당 평균 에너지 소비 분석 결과

<그림 5>는 수신노드에서 수신한 각 패킷의 비트 당 평균 에너지 소비의 분석을 나타낸다. 모의실험에서의 에너지 소비 모델은 식 (1)과 (2)를 이용해 전송노드와 수신노드의 안테나 이득, 경로손실을 고려하였다. 또한, 무선 전력은  $0.5 [W]$ , 노드의 초기 에너지는  $1000 [J]$ 로 설정하였다.

제안한 기법은 수중채널에서 발생하는 노이즈들을 고려하여 최소한의 재전송으로 통신을 끝내는 반면, SPF전송 기법은 여러 종류의 노이즈에 영향을 받는 수중 채널의 특징을 고려하지 않아 높은 재 전송률을 요구한다. 결과적으로 같은 크기의 데이터를 전송하는데 상대적으로 더 긴 전송시간과 에너지 소비가 발생한다. 그리고 협력 전송 기법은 SPF와 달리 수중채널의 환

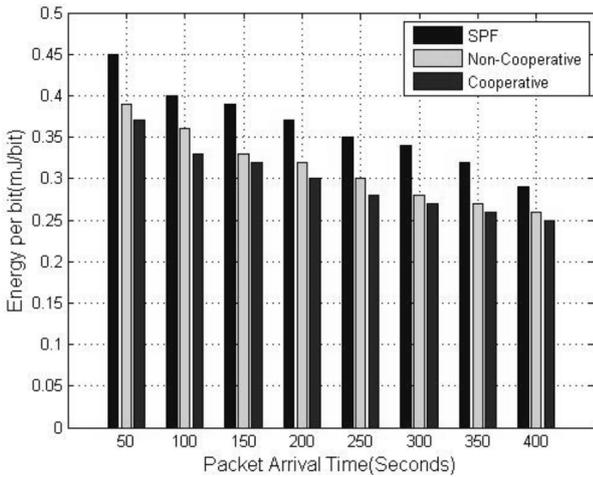


그림 5. 수신노드에서 성공적으로 수신한 비트 당 평균 에너지 분석

Fig. 5. The analysis of average energy per bit successfully received at the sink.

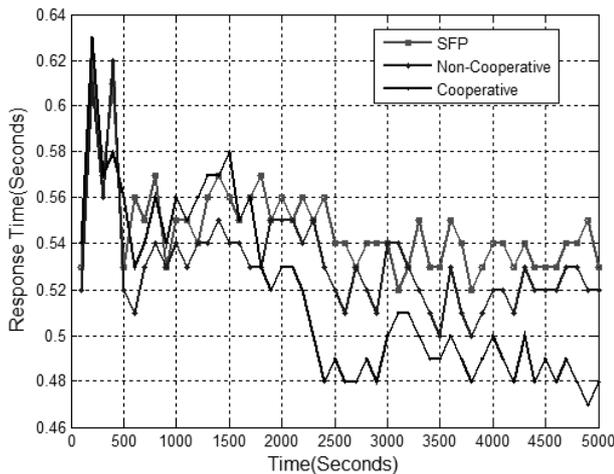


그림 6. 수중 채널에서 세 가지 전송 기법들의 평균 응답 시간 비교

Fig. 6. Comparison for average response time for three transmission schemes in underwater channel.

경을 고려하지만, 데이터 전송에 하나의 경로만을 사용하므로 다이버시티 결합을 사용하는 제안한 기법에 비해 낮은 데이터 전송률을 가진다. 따라서 제안한 기법에 비해 많은 재 전송률을 가지게 되고 이로 인해 같은 데이터를 전송하는데 더 많은 에너지가 필요하게 된다.

다. 응답 시간 분석 결과

수중 채널은 지상 채널에 비해 링크의 질이 낮아 큰 전파 지연을 발생시켜 응답 시간이 느리다. 그러므로 제안한 기법이 기존의 통신 기법 보다 빠른 패킷의 응답시간을 갖는다면 향상된 통신 기법을 제안했다고 볼

수 있다.

<그림 6>에서는 패킷의 도착 시간이 150[s]로 고정되어 있을 때 세 가지 전송 기법의 평균 응답 시간을 나타내었다. 모의실험 결과의 x축은 동작 시간을 나타내며 y축은 패킷의 응답시간을 의미한다. 협력 전송기법은 수중 채널 환경을 고려하고, 다이버시티 결합을 이용하여 패킷의 응답시간을 낮추었다.

SPF전송기법은 수중 채널환경을 고려하지 않고 협력 전송 기법을 사용하지 않으므로 열악한 수중 채널에서 상대적으로 긴 패킷의 응답시간을 가진다. 그리고 비협력 전송 기법의 경우 수중 채널의 환경을 고려하여 SPF전송기법에 비해 빠른 응답속도를 보인다. 하지만 <그림 6>에서 네트워크가 동작하기 시작하고 1700[s] 정도의 시간이 지나면 제안한 기법이 다이버시티 결합 및 협력 통신 기법의 사용으로 인해 상대적으로 더 빠른 패킷의 응답시간을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중 음파 센서 네트워크에서 낮은 채널 품질을 높이기 위해 협력 전송 기법을 제안했다. 이는 다이버시티 결합 기법을 이용해 목적지에서 여러 복사 신호를 결합하여 패킷 에러를 줄이는 기법이다. 또한 목적지로 패킷을 성공적으로 전송하기 위한 방법으로 이웃노드들과의 링크 상태와 거리 비용, 각 노드 당 남은 에너지를 고려하는 중계노드 선택 기법을 제안했다. 또한 모의실험을 통하여 구체적인 중계노드 선택 기법을 이용한 분산 협력 통신 기법을 기존의 통신 기법들과 비교하여 GPS시스템이나 다중의 안테나 배열 없이 평균에너지 소비와 패킷의 응답 시간을 낮추었다.

향후 연구로는 수중 음파 통신 네트워크에 대한 조사를 통해 더욱 최적화된 모델로 개선하고자 한다. 먼저 네트워크의 성능을 향상시키기 위해 채널 코딩 기술을 이용해 협력 통신 기법을 개선시킬 것이다. 또한 Non-Gaussian 분포를 보이는 특수한 수중 환경에서의 가정을 고려할 것이며, 효율적인 전력 할당법과 다른 MAC 계층 프로토콜을 조사해 적용시켜볼 것이다.

REFERENCES

[1] P. T. A. Quang, D.-S. Kim, "Throughput-Aware Routing for Industrial Sensor Networks: Application to ISA100.11a," IEEE Trans. on

- Industrial Informatics, Vol. 10, no. 1, pp. 351-363, 2014.
- [2] P. T. A. Quang, D.-S. Kim, "Enhancing Real-time delivery of Gradient Routing for Industrial Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol. 8, No. 1, pp. 61-68, 2012.
- [3] D. Pompili and I. Akyildiz, "Overview of Networking Protocols for Underwater Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, no. 1, pp. 97-102, Jan 2009.
- [4] Y. Luo, L. Pu, M. Zuba, Z. Peng and J. H. Cui, "Challenges and Opportunities of Underwater Cognitive Acoustic Networks," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, Vol. 2, no. 2, pp. 198-211, June 2014.
- [5] Cho, Y, Kim, J, Yang, W, Kang, C, "MIMO: Channel Capacity," Wiley-IEEE Press, pp. 263-280, 2010.
- [6] Tran Nhon and D. S. Kim, "Real-time message scheduling for ISA100.11a networks", *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 37, pp. 73-79, Jan 2015.
- [7] J. Laneman, D. Tse, and G. Womell, "Cooperative diversity in Wireless Networks: Efficiency Protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions*, Vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec 2004.
- [8] C. W. Ahn and I-H. Lee, "Wireless cooperative communication: A Survey," *The 5th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, pp. 78:1-78:6, Feb 2011.
- [9] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, "A Simple Cooperative Diversity Method Based on network path selection," *IEEE Journal on Selected Area in Communication*, Vol. 24, no. 3, pp. 659-672, March 2006.
- [10] R. J. Urick, R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound for Engineers*, McGrawHill, pp. 35-88, 1967.
- [11] A. Stefanov and M. Stojanovic, "Design and Performance Analysis of Underwater Acoustic Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 29, no. 10, pp. 2012-2021, Dec 2011.
- [12] D. R. Gimlin, M. S. Keener and J. F. Lawrence, "Maximum Likelihood Stacking in White Gaussian Noise with Unknown Variances," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-20, no. 1, pp. 91-98, Jan 1982.
- [13] M. Rahmati and T. M. Duman, "Achieving Delay Diversity in Asynchronous Underwater Acoustic (UWA) Cooperative Communication Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, no. 3, pp. 1367-1379, March 2014.
- [14] M. Rahmati and T. M. Duman, "Achieving Delay Diversity in Asynchronous Underwater Acoustic (UWA) Cooperative Communication Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, no. 3, pp. 1367-1379, March 2014.
- [15] S. Al-Dharrab, M. Uysal and T. M. Duman, "Cooperative underwater acoustic communications [Accepted From Open Call]," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, no. 7, pp. 146-153, July 2013.
- [16] M. U. Ilyas, "Analytical and Quantitative Characterization of Wireless Sensor Networks," Michigan State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, pp. 1-221, 2009.
- [17] J. Xu, K. Li, G. Min, K. Lin, and W. Qu, "Energy-Efficient Tree-based Multipath Power Control for Underwater Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol 23, no. 11, pp. 2107-2116, Nov 2012.

저 자 소 개



지 용 주(정회원)  
 1998년 건국대학교 정보경영학과 석사졸업.  
 2012년 3월~현재 금오공과대학교 IT융복합공학과 박사과정.  
 <주관심분야: IoT 플랫폼, 클라우드 컴퓨팅>



김 동 성(정회원)  
 1992년 한양대학교 전자공학과 학사졸업.  
 2003년 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학부 박사졸업.  
 2004년 Cornell 대학교 ECE 박사후 연구원.  
 2004년 3월~현재 금오공대 전자공학부 정교수.  
 2014년 6월~현재 미래창조과학부 지원 ICT융합 특성화 연구센터 센터장.  
 <주관심분야: 국방/산업용 제어 통신망, 실시간 임베디드 시스템>



최 학 희(학생회원)  
 2016년 금오공과대학교 전자공학부 학사졸업.  
 2016년 3월~현재 금오공과대학교 IT융복합공학과 석사과정.  
 <주관심분야: 네트워크 프로그래밍>



이 혜 민(정회원)  
 2014년 금오공과대학교 전자공학부 학사졸업.  
 2016년 금오공과대학교 IT융복합공학과 석사졸업.  
 2016년 2월~현재 한국전자통신연구원 지역산업IT연구실.  
 <주관심분야: 네트워크 프로그래밍, 유무선통신, 머신러닝>