

수중 음향 센서 네트워크에서 비직교 다중 접속을 위한 다차원 노드 페어링 기법

천진용¹, 조호신^{2*}

¹국방기술진흥연구소, ²경북대학교 IT대학 전자공학부

A Multi-Dimensional Node Pairing Scheme for NOMA in Underwater Acoustic Sensor Networks

Jinyong Cheon¹, Ho-Shin Cho^{2*}

¹Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement

²School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

요약 최근 해양 수중 산업의 발전으로 수중 센서 네트워크(UWASN: Underwater Acoustic Sensor Network)에 대한 관심이 증대되고 있다. 수중 센서 네트워크를 효율적으로 운용하기 위해서는 노드 간 전송 충돌을 방지하고 통신 자원을 효율적으로 공유할 수 있는 매체 접속 제어(MAC: Medium Access Control) 프로토콜을 적용하는 것이 매우 중요하다. 하지만 수중 채널은 지상 무선 통신 환경과 달리 좁은 대역폭, 긴 전파 지연 시간, 낮은 전송률 등의 특성을 가지므로 지상 환경에서 개발된 비직교 다중 접속(NOMA: Non Orthogonal Multiple Access)의 노드 페어링 기법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 수중 채널의 특수성을 고려한 수중 음향 센서 네트워크에서의 비직교 다중 접속 다차원 노드 페어링 기법을 제안한다. 기존의 기법들은 노드 페어링 시 채널 품질만을 고려하였다. 기존 기법과 달리 제안 기법에서는 채널 품질 뿐 아니라 노드 간 공평성, 트래픽 부하, 패킷의 나이를 추가로 고려하여 최적의 노드 쌍(node-pair)을 찾는다. 추가적으로, 송신 노드는 실제 경로 손실 대신 노드 쌍 가능 노드 목록(PNL: Pairable Nodes List)을 활용함으로써 노드 페어링 시의 계산 복잡도를 줄인다. 시뮬레이션 결과에 따르면 공평성 요소까지 고려한 제안 기법이 기존 기법 대비 최대 23.8% 전송률 증가, 28% 지연 시간 감소, 공평성은 최대 5.7% 향상됨을 확인할 수 있었다.

Abstract The interest in underwater acoustic sensor networks (UWASNs), along with the rapid development of underwater industries, has increased. To operate UWASNs efficiently, it is important to adopt well-designed medium access control (MAC) protocols that prevent collisions and allow the sharing of resources between nodes efficiently. On the other hand, underwater channels suffer from a narrow bandwidth, long propagation delay, and low data rate, so existing terrestrial node pairing schemes for non orthogonal multiple access (NOMA) cannot be applied directly to underwater environments. Therefore, a multi-dimensional node pairing scheme is proposed to consider the unique underwater channel in UWASNs. Conventional NOMA schemes have considered the channel quality only in node pairing. Unlike previous schemes, the proposed scheme considers the channel gain and many other features, such as node fairness, traffic load, and the age of data packets to find the best node-pair. In addition, the sender employs a list of candidates for node-pairs rather than path loss to reduce the computational complexity. The simulation results showed that the proposed scheme outperforms the conventional scheme by considering the fairness factor with 23.8% increases in throughput, 28% decreases in latency, and 5.7% improvements in fairness at best.

Keywords : Medium Access Control Protocol, Non Orthogonal Multiple Access, Node Pairing, Successive Interference Cancellation, Underwater Acoustic Sensor Networks

이 논문은 2019학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Ho-Shin Cho(Kyungpook National Univ.)

email: hscho@ee.knu.ac.kr

Received April 6, 2021

Revised May 10, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

수중 채널은 지상 무선 채널과 달리 좁은 대역폭, 긴 전파 지연 시간, 낮은 전송률 등의 특성을 갖는다[1]. 좁은 대역폭은 수중 채널에서 NOMA를 사용함에 있어 노드 쌍의 구성에 제약으로 작용한다. 또한 제한된 최대 송신 전력은 순차 간섭 제거(SIC: Successive Interference Cancellation)를 고려해 하나의 NOMA 채널에 다중화되는 노드의 수를 제한시킨다. 이 밖에도, 긴 전파 지연 시간과 낮은 전송률로 인해 노드 페어링과 실제 데이터 전송 사이의 시각 간격이 커져 부정확한 노드 페어링을 야기하기도 한다. 따라서 넓은 대역폭, 무시 가능한 전파 지연 시간, 높은 전송률의 지상 라디오 채널 환경에서 설계된 기존 노드 페어링 기법들은 수중 환경에 바로 적용될 수 없다.

지금까지 제안된 기존 지상 통신 환경에서의 NOMA를 위한 노드 페어링 기법들은 크게 세 가지 분류로 나눌 수 있다.

첫 번째는 채널 품질만을 고려하여 채널 품질 순으로 정렬한 뒤 노드 페어링하는 기법이다[2-4]. 일반적으로 채널 품질의 차가 클수록 높은 순시 전송률(instantaneous throughput)을 가지므로 이 분류의 기법들은 모든 노드를 채널 품질의 오름 순으로 정렬한 뒤 채널 품질의 차가 크도록 노드들을 선택하여 페어링한다. 기법에 따라 인지 라디오(CR: Cognitive Radio) 개념을 도입하여 송신 노드가 채널 품질이 나쁜 주 노드(primary node)에는 통신에 요구되는 최소 신호대잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 만족하기 위한 전송 전력을 할당하고 이후 채널 품질이 좋은 부 노드(secondary node)에는 잔여 전력을 할당하여 동시 전송하도록 페어링 하기도 한다. 하지만 이 유형의 기법들은 채널 품질이 좋은 노드와 나쁜 노드들은 페어링 시 우선적으로 선택되지만 채널 상태가 일반적인 노드들은 노드 쌍으로 선택되기 힘들어 채널 품질에 따라 노드 간 공평성이 낮아지는 것이 단점이다.

두 번째는 기지국으로부터의 물리적 거리나 채널 상태에 따라 그룹을 나눈 뒤 노드 페어링하는 기법이다[5-10]. 이 기법들은 일반적으로 물리적 거리에 따라 두 개의 그룹으로 노드들을 나눈 뒤 각각의 그룹에서 하나의 노드씩 선택하여 페어링을 한다. 그룹을 기반으로 페어링을 하게되면 페어링 시 대부분의 노드들이 선택되므로 페어링 시 제외되는 노드들이 비교적 적다. 하지만 채널 품질의 차가 큰 노드들 위주로 우선적으로 선택하다

보면 나중에 남은 노드들은 채널 품질의 차가 적어 노드 페어링이 제약된다.

세 번째는 전체 대역폭을 여러 협대역폭으로 나누어 여러 노드가 동시에 사용하는 기법이다[11,12]. 이 기법들은 전체 대역폭을 다수의 협대역폭으로 나눈 뒤 일부 협대역은 직교 다중 접속(OMA: Orthogonal Multiple Access) 방식으로 일부 협대역은 NOMA 방식으로 사용하는 기법이다. 또는 간섭을 줄이기 위한 다른 방식으로 전체 대역폭을 사용하는 하나의 노드가 존재하고 협대역 별로 하나의 노드씩 NOMA 방식으로 주파수 자원을 공유하여 사용하도록 한다. 이 기법도 마찬가지로 채널 품질만을 고려하여 노드 페어링을 수행하므로 공평성을 보장하지 못한다.

따라서 본 논문에서는 채널 품질의 차이만을 고려한 기존 기법들과 달리 채널 품질 외에 공평성, 트래픽 부하, 패킷 나이 등의 요소들을 추가적으로 고려한 다차원 노드 페어링 기법을 제안한다. 지상과 다른 수중 채널 특성에 맞게 추가 요소 고려를 통해 제안 기법이 채널 품질만을 고려한 기존 기법들 대비 전송률, 지연 시간, 공평성 측면에서 더욱 뛰어난 성능을 보임을 확인하였다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 채널에서의 NOMA 노드 페어링 제약 사항들을 연구 문제로 정의한다. 3장에서는 제안하는 다차원 노드 페어링 기법에 대해 설명한다. 시뮬레이션 환경과 시뮬레이션 결과는 4장에 정리하였다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 서술하였다.

2. 연구문제 정의

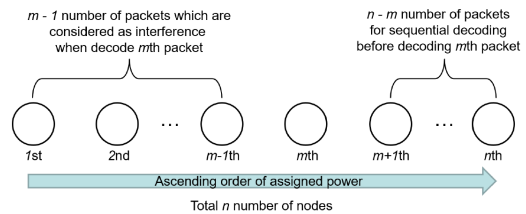


Fig. 1. n number of nodes list for SIC

OMA와 달리, NOMA는 2차원의 비직교 시간-주파수 자원을 다수의 노드가 전력 영역에서 공유하며 사용한다. 다수의 노드로 전송한 패킷들은 전력 영역에서 증첩되어 전송되며, 이는 수신 노드측에서 SIC를 통해 복호 가능하다. Fig. 1에서와 같이 n 개의 수신 노드가 채널 품질

내림차순으로 정렬되어 있다고 가정한다. 하향링크 NOMA에서 수신 노드 당 패킷 1개씩 다수의 패킷을 전력 영역에서 중첩해 송신하기 위해서 송신 노드는 채널 상태가 나쁜 수신 노드로 송신하는 패킷에 더 많은 송신 전력을 할당한다. 이 경우, 임의의 m 번째 노드의 경우, 자신이 수신할 패킷을 복호하기 전 더 많은 송신 전력이 할당되어 송신된 $n - m$ 개의 패킷을 순차적으로 복호한 뒤 제거하는 과정이 필요하다. 그 이후, m 번째 노드는 더 적은 송신 전력이 할당된 $m - 1$ 개의 패킷을 간섭신호로 간주하고 자신의 패킷을 복호한다. 이 때, m 번째 수신 노드의 패킷은 복호를 위한 최소 요구 SNR을 만족해야 한다.

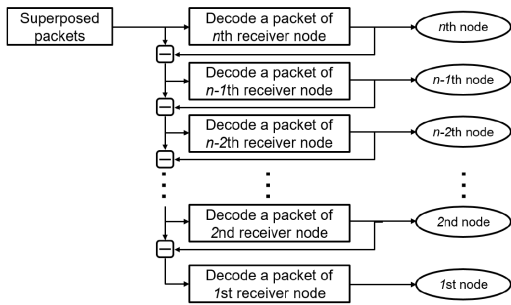


Fig. 2. Decoding procedure of SIC for n superposed packets on one sub-band

Fig. 2는 동일한 시간-주파수 자원에 중첩된 n 개의 패킷을 복호하는 SIC 과정을 나타낸다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 SIC의 복잡도는 수신 노드(중첩된 패킷)의 개수에 비례한다. 따라서, NOMA를 통해 송수신 가능한 패킷의 개수는 송신 전력과 복잡도 면에서 볼 때 제한될 필요가 있다.

Fig. 3은 지상과 수중 통신 환경에서 NOMA의 주파수-전력 자원 사용을 나타낸다. 주파수 자원, 즉 부대역(sub-band)은 서로 다른 송신 전력이 할당된 다수의 패킷이 공유한다. 노드 페어링 측면에서 광대역의 주파수 자원을 활용해 한번에 많은 패킷을 송신할 수 있는 지상 통신에서는 한번에 다수의 노드 쌍을 구성하여 전송하는 것이 효율적이지만 협대역의 수중 통신 환경에서는 그렇지 않다. 게다가, 수중 통신 환경은 지상의 무선주파수(RF: Radio Frequency) 통신 환경과 비교하여 전파 지연 시간이 매우 길기 때문에 노드 페어링 시 활용한 채널 정보의 경우 실제 패킷을 송신하는 시점에서는 부정확한 정보가 될 수도 있다. 따라서 수중 통신 환경에서는 한번

에 많은 노드 쌍을 구성하는 것보다 한번에 하나의 노드 쌍씩 구성하는 것이 효율적이다.

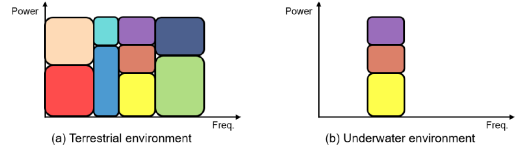


Fig. 3. The comparison of the number of packets which can be concurrently supported
(a) Terrestrial environment
(b) Underwater environment

3. 제안하는 다차원 노드 페어링 기법

3.1 시스템 설명

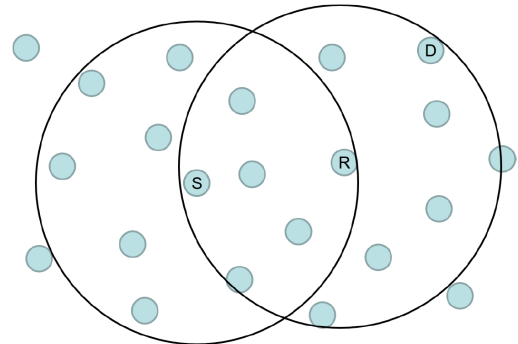


Fig. 4. Multi-hop based UWASN

Fig. 4는 배터리, 계산 능력, 송신 전력 등 동일 성능을 지닌 노드들로 구성된 다중 홉 수중 음향 센서 네트워크를 나타낸다. 모든 노드는 소스 노드(S), 중계 노드(R), 목적지 노드(D)로 동작할 수 있다. 여기서 소스 노드는 자신이 직접 생성한 패킷을 중계 노드나 목적지 노드로 송신하는 노드, 중계 노드는 다른 노드로부터 수신한 패킷을 또 다른 중계 노드 또는 목적지 노드로 송신하는 노드, 목적지 노드는 해당 패킷의 최종 도착지를 뜻한다. 본 논문에서는 패킷을 송신하는 소스 노드와 중계 노드를 합쳐 송신 노드라고 한다. 모든 송신 노드는 패킷 생성 후 최대 대기 시간 경과 또는 버퍼 내 최대 패킷 개수 초과에 의해 패킷 송신 과정이 시작되며 이 때 모든 패킷 송신은 두 개의 수신 노드(중계 노드 또는 목적지 노드)로 패킷을 동시에 전송하는 하향링크 NOMA로 이루어진다.

3.2 노드 쌍 가능 노드 목록

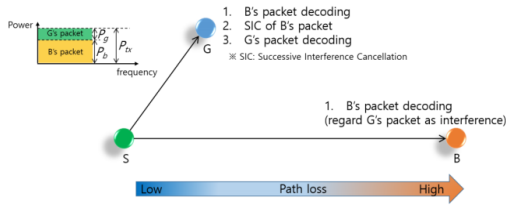


Fig. 5. Two receiver nodes downlink NOMA

Fig. 5는 본 논문에서 고려하는 두 수신 노드(G와 B 노드)로의 하향링크 NOMA를 나타낸다. 두 수신 노드 중 G 노드는 S 노드 인근에 있어 낮은 경로 손실을 겪고 B 노드는 S 노드로부터 멀리 위치하여 높은 경로 손실을 겪어 채널 상태가 좋지 않다. 일반적으로 하향링크 NOMA를 사용하기 위해 요구되는 최소 경로 손실 차가 존재하며 두 수신 노드 사이의 경로 손실 차가 커야 높은 순서 전송률을 얻을 수 있다. 따라서 송신 노드는 패킷 송신 시작 시 일정한 조건을 만족하는 두 수신 노드를 선택한 뒤 두 경로로 전력 영역에서 동시에 패킷을 송신한다. 3.2절에서 각 이웃 노드들의 페어링 가능 노드 목록 생성 시 규칙에 대해 설명한 뒤 3.3절에서는 본 논문에서 제안하는 다차원 노드 페어링 기법의 동작 예시를 제시한다.

Fig. 6은 9번 노드의 PNL을 나타낸다. 각 노드는 초기 설정 단계를 통해 이웃 노드 탐색을 마친 뒤 자신의 PNL을 가진다고 가정한다. PNL은 각 노드가 노드 쌍을 이룰 수 있는 노드를 미리 파악함으로써 송신 노드가 노드 페어링 시 복잡도를 줄이는데 도움을 준다. PNL은 다음의 규칙들을 준수해야 한다.

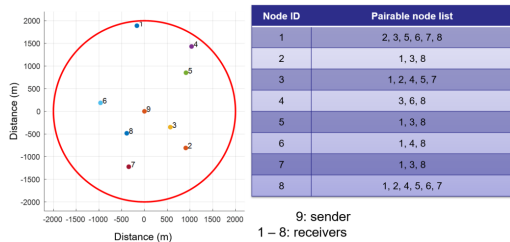


Fig. 6. Pairable nodes list

- 1) 전체 송신 전력은 제한되어 있다. 이는 Eq. (1)과 같이 표기할 수 있다.

$$P_x + P_y \leq P_{\max}, \forall x \in NN_m, \forall y \in PN_x \quad (1)$$

여기서, $P_x(P_y)$, P_{\max} , NN_m , 그리고 PN_x 는 각각 송신 노드가 노드 $x(y)$ 로 전송 시 송신 전력, 송신 노드의 가능한 최대 전체 송신 전력, 노드 m 의 이웃 노드들의 집합, 그리고 노드 x 의 페어링 가능한 노드들의 집합을 나타낸다.

따라서 노드 쌍 내 노드들에 할당되는 송신 전력의 합은 최대 전체 송신 전력 이하이어야 한다.

- 2) 노드 쌍 내 각 노드로의 경로 손실의 차는 SIC 복호를 위해 요구되는 최소 경로 손실 차 이상이어야 한다. 이는 Eq. (2)와 같이 표기할 수 있다.

$$|PL_x - PL_y| \geq PL_{TH} \quad \forall x \in NN_m, \forall y \in PN_x \quad (2)$$

여기서, $PL_x(PL_y)$ 와 PL_{TH} 는 각각 송신 노드와 노드 $x(y)$ 사이의 경로 손실, SIC를 위해 필요한 최소 요구 경로 손실 차를 나타낸다.

노드 페어링 시 PNL내에서 수행한다면 모든 가능한 노드 쌍의 경로 손실 차이는 NOMA 복호를 보장한다. 문턱 경로 손실의 차이가 높아지면 각 노드의 페어링 가능한 노드의 수는 감소되지만 노드 쌍 내 노드 사이의 채널 품질의 차이가 커짐으로써 순서 전송률은 증가된다.

3.3 다차원 노드 페어링

기존의 노드 페어링 기법들과 달리 제안하는 다차원 노드 페어링 기법은 각 채널 품질 외에 패킷 나이, 각 수신 노드로의 송신 패킷의 개수, 수신 노드들 사이의 공평성 등 여러 요소를 추가 고려한다. 고려 요소에 대한 자세한 설명은 다음과 같다:

- 1) 패킷의 나이는 패킷의 생성 시각부터 현재 시각까지 경과된 시간을 뜻한다. 저지연 전달을 위해서 송신 노드는 나이가 적은 패킷보다 나이가 많은 패킷을 우선적으로 송신하여야 한다. 일반적으로 중계 패킷의 경우 다른 노드에 의해 최초 생성되어 전달되므로 평균적으로 패킷 나이가 많다. 따라서 제안 기법에서는 중계 패킷이 다른 패킷들에 비해 우선 순위가 평균적으로 높다.

- 2) 송신 노드는 높은 전송률을 위해 송신 노드의 버퍼에 해당 노드로 송신해야 하는 패킷이 많은 노드를 노드 페어링 시 우선시한다.

- 3) 송신 노드는 경로 손실을 고려하여 PNL을 작성한다. 따라서 PNL 크기를 조절함으로써 가능한 노드 쌍의 경우의 수를 줄여 계산 복잡도를 줄일 수 있다.

송신 노드는 PNL 내 노드들의 우선 순위를 계산한 뒤 우선 순위에 근거하여 두 개의 노드를 노드 쌍으로 결정한다. 여기서 우선 순위는 해당 노드가 노드 쌍의 한 노

드로 선택될 계산값을 뜻한다. 우선 순위는 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$Pri_j = \frac{WAS_j}{FF_j} = \frac{\sum_{i=1}^z w_j^i AGE_j^i}{1 + \alpha \left(\frac{p_j - \bar{p}}{\bar{p}} \right)} \quad (3)$$

여기서, Pri_j 와 FF_j 는 각각 노드 j 의 우선 순위, 공평성 인자를 뜻한다. AGE_j^i , w_j^i , 그리고 WAS_j 는 각각 노드 j 로 송신해야 하는 패킷 중 i 번째 패킷 나이와 가중치, 그리고 패킷 나이 가중합을 나타낸다. 마지막으로 α 는 공평성 향 반영 비율 조절을 위한 공평성 비율, p_j 와 \bar{p} 는 각각 최근 n 번의 과거 전송동안 송신 노드가 노드 j 로 송신한 패킷의 개수, 전체 노드로 송신한 개수의 평균 개수를 뜻한다.

α 의 경우 0에서 0.9 범위의 값을 가진다고 가정한다. α 가 크고 \bar{p} 이 작을수록 Pri 의 변동폭이 커진다.

패킷 나이에 대한 가중치를 결정하기 위해, 먼저 구간의 개수와 각 구간에 대한 가중치를 찾아야 한다. 패킷 나이에 대한 가중치 결정 과정은 다음과 같다.

송신 노드는 버퍼 내 n 개의 패킷에 대해 패킷 나이 기준으로 2개의 그룹으로 나눈다. 그룹은 Eq. (4)와 Eq. (5)에 따라 생성된다.

$$\begin{cases} G_{low} = \{AGE_1, AGE_2, \dots, AGE_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 2}, AGE_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1}\} \\ G_{high} = \{AGE_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1}, AGE_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 2}, \dots, AGE_{n-1}, AGE_n\} \end{cases} \quad (4)$$

, if n is odd

$$\begin{cases} G_{low} = \{AGE_1, AGE_2, \dots, AGE_{\frac{n}{2}-1}, AGE_{\frac{n}{2}}\} \\ G_{high} = \{AGE_{\frac{n}{2}+1}, AGE_{\frac{n}{2}+2}, \dots, AGE_{n-1}, AGE_n\} \end{cases} \quad (5)$$

, if n is even

여기서, AGE_i 는 송신 노드의 버퍼 패킷 나이 오름차순 정렬 시 i 번째 패킷의 패킷 나이를 뜻한다.

버퍼 내 최저 패킷 나이 AGE_1 과 최고 패킷 나이 AGE_n 간 차이를 $[\mu_{high} / \mu_{low}]$ 개의 구간으로 나눈다. 여기서 μ_{low} 와 μ_{high} 는 각각 G_{low} 와 G_{high} 의 평균 패킷 나이를 나타낸다.

구간 m 을 위한 패킷 나이 가중치는 Eq. (6)과 같이 계산된다.

$$w_m = 1 + \beta(m - 1) \quad (6)$$

여기서, w_m 은 구간 m 에 해당되는 패킷 나이의 가중치, β 는 가중치의 간격을 나타낸다.

만약 $[\mu_{high} / \mu_{low}]$ 이 1과 같다면 가중치는 사용되지 않는다. 송신 노드가 이와 같은 복잡한 과정을 통해 가중치를 결정하는 이유는 패킷 나이의 분포에 따른 적응적 가중치를 위한 것이다.

노드 쌍을 구성하기 위해 먼저 송신 노드는 가장 높은 Pri 를 가지는 노드를 첫 번째 수신 노드로 선택한다. 그 다음, 송신 노드는 첫 번째 수신 노드의 PNL 내 노드 중 가장 높은 Pri 를 갖는 노드를 두 번째 수신 노드로 선택한다. 이 때, 만약 두 번째 수신 노드의 Pri 가 Pri_{TH} 보다 낮다면 송신 노드는 전체 수신 노드 중 차순으로 높은 Pri 를 가지는 노드를 새로운 첫 번째 수신 노드로 선택한 뒤 해당 노드의 PNL 내 노드 중에서 두 번째 수신 노드로 선택한다. 여기서 Pri_{TH} 는 노드 쌍 내 허용되는 최소 Pri 이다. 이와 같은 동작은 노드 쌍이 성립될 때까지 계속된다.

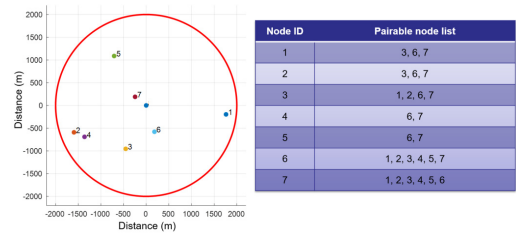


Fig. 7. The node deployment for an example

Fig. 7과, Fig. 8에서 Fig. 11은 각각 노드 배치와 제안 기법의 동작 예시를 나타낸다. Fig. 7에서 각 노드 인근의 숫자는 노드 번호를 나타낸다. 본 동작 예시에서는 α 와 Pri_{TH} 를 각각 0.1과 20으로 설정하였다.

	Node ID	Pairable nodes	$N_{transmitted}$	WAS	FF	Priority value
2 nd pick	1	3, 6, 7	0	20.65	1	20.65
	2	3, 6, 7	0	11.2	1	11.2
	3	1, 2, 6, 7	0	12.8	1	12.8
	4	6, 7	0	2	1	2
	5	6, 7	0	20	1	20
	6	1, 2, 3, 4, 5, 7	0	10.8	1	10.8
1 st pick	7	1, 2, 3, 4, 5, 6	0	21.2	1	21.2

Fig. 8. Calculation of priority values before 1st transmission

Fig. 8은 첫 번째 전송을 위한 우선 순위를 나타낸다. Pairable nodes 필드는 각 노드(Node ID)의 PNL을 나타낸다. $N_{transmitted}$ 는 과거의 최근 n 번의 전송동안 해당 노드로 송신한 패킷의 개수를 나타낸다. 본 예시에서

n 은 5로 가정한다. 모든 노드의 $N_{transmitted}$ 가 0이므로 모든 노드의 FF 는 1로서 동일하다. 송신 노드는 첫 번째 수신 노드로 가장 높은 Pri 를 가지는 7번 노드를 선택한다. 그리고 7번 노드의 PNL 내 노드 중 가장 높은 Pri 를 가지는 1번 노드를 노드 쌍의 두 번째 수신 노드로 결정한다. 첫 번째 전송에서 송신 노드는 1번과 7번 노드에 각각 2개와 4개의 패킷을 NOMA 방식으로 전송한다.

Node ID	Pairable nodes	$N_{transmitted}$	WAS	FF	Priority value
1	3, 6, 7	2	5.4	1.13	4.78
2	3, 6, 7	0	19.4	0.90	21.56
3	1, 2, 6, 7	0	24.1	0.90	26.78
4	6, 7	0	7.7	0.90	8.56
5	6, 7	0	31.5	0.90	35
6	1, 2, 3, 4, 5, 7	0	22.2	0.90	24.67
7	1, 2, 3, 4, 5, 6	4	10.7	1.37	7.81

Fig. 9. Calculation of priority values before 2nd transmission

Fig. 9는 두 번째 전송을 위한 우선 순위를 나타낸다. 첫 번째 전송으로 송신된 패킷들로 인해 1번 노드의 WAS 가 크게 감소한다. 이는 첫 번째 전송을 통해 송신 노드 버퍼 내 1번 노드로의 오래된 패킷들이 전송되었기 때문이다. 유사하게, 7번 노드의 WAS 가 다른 노드들에 비해 다소 감소했다. 평균 $N_{transmitted}$ 보다 큰 $N_{transmitted}$ 를 가지는 1번과 7번 노드는 다른 노드들보다 큰 FF 를 가진다. 그래서 공정성 측면에서 1번과 7번 노드의 Pri 는 실제 WAS 보다 작은값을 가진다. 반면 그 외의 작은 FF 를 가지는 노드들은 실제 WAS 보다 높은 Pri 를 가진다. 즉 FF 는 패킷 송신 내역을 통해 각 노드의 WAS 를 보정해 최종 Pri 를 산출해낸다. 두 번째 전송을 위한 노드 쌍 선출 과정은 다음과 같다. 송신 노드는 가장 높은 Pri 를 가지는 5번 노드를 첫 번째 수신 노드로 결정한다. 그리고 5번 노드의 PNL 내 노드들 중 가장 높은 Pri 를 가지는 6번 노드를 두 번째 수신 노드로 결정한다. 비록 3번 노드가 5번 노드를 제외하고 가장 높은 Pri 를 가지지만 3번 노드는 5번 노드와 노드 쌍이 될 수 없는 노드이므로 (5번 노드의 PNL에 포함되지 않으므로) 선택되지 않는다. 두 번째 전송을 통해 송신 노드는 5번과 6번 노드로 각각 패킷 2개와 3개를 NOMA 방식으로 송신한다.

Node ID	Pairable nodes	$N_{transmitted}$	WAS	FF	Priority value
1	3, 6, 7	2	15.7	1.03	15.24
2	3, 6, 7	0	27.2	0.9	30.22
3	1, 2, 6, 7	0	31.4	0.9	34.89
4	6, 7	0	16.8	0.9	18.67
5	6, 7	2	12.5	1.03	12.14
6	1, 2, 3, 4, 5, 7	3	4.1	1.09	3.76
7	1, 2, 3, 4, 5, 6	4	15.7	1.15	13.65

Fig. 10. Calculation of priority values before 3rd transmission

Fig. 10은 세 번째 전송을 위한 우선 순위를 나타낸다. 두 번째 전송을 통해 평균 $N_{transmitted}$ 가 증가함에 따라 1번과 7번 노드의 FF 또한 다소 감소한다. 그래서 Fig. 9와 비교하면 Fig. 10에서의 1번과 7번 노드의 우선 순위가 높아진다. 첫 번째 전송과 유사하게 송신 노드는 2번과 3번 노드를 노드 쌍으로 구성하여 패킷 전송을한다.

Node ID	Pairable nodes	$N_{transmitted}$	WAS	FF	Priority value
1	3, 6, 7	2	21.5	0.98	21.89
2	3, 6, 7	2	12.4	0.98	12.62
3	1, 2, 6, 7	4	23.4	1.06	21.98
4	6, 7	0	22.9	0.9	25.44
5	6, 7	2	19.3	0.98	19.65
6	1, 2, 3, 4, 5, 7	3	8.7	1.02	8.5
7	1, 2, 3, 4, 5, 6	4	21.1	1.06	19.82

Fig. 11. Calculation of priority values before 4th transmission

Fig. 11은 네 번째 전송을 위한 우선 순위를 나타낸다. 송신 노드는 4번 노드를 첫 번째 수신 노드로 선택한다. 그러나 4번 노드의 PNL 내 가장 높은 Pri 를 가지는 7번 노드의 경우 Pri_{TH} 보다 낮은 Pri 를 가진다. 이 경우, 송신 노드는 첫 번째 수신 노드로 4번 노드 대신 두 번째 높은 Pri 를 가지는 3번 노드를 선택한다. 그에 이어 3번 노드의 PNL 내 노드 중 Pri_{TH} 보다 높으면서 가장 높은 Pri 를 가지는 1번 노드를 두 번째 수신 노드로 선택한다. 결론적으로 송신 노드는 1번과 3번 노드로 NOMA 방식을 통해 네 번째 패킷 전송을 한다. n 의 값이 5로 설정되어 있으므로 각 라운드에서는 최근 직전 5번의 패킷 전송 사항만 고려한다. 따라서 이후 일곱 번째 전송을 하기 전에는 첫 번째 전송한 패킷에 대한 기록은 $N_{transmitted}$ 에서 제외된다. 즉, 일곱 번째 전송을 위한 $N_{transmitted}$ 계산 시 두 번째 전송부터 여섯 번째 전송까지의 패킷 송신 현황만 고려한다.

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안하는 다차원 노드 페어링 기법의 성능을 기존의 채널 품질만을 고려한 기법[2]과 분석하였다. 제안 기법의 성능을 평가하기 위해 본 논문에서는 MATLAB 소프트웨어를 사용하였다. 본 시뮬레이션에서 각 노드는 10 ~ 15 kHz 대역의 저주파 협대역을 통해 최대 2 W의 송신 전력으로 패킷을 송신한다고 가정한다. 음파 감쇄를 고려한 최대 전송 거리는 2 km로 하였으며, 각 노드의 성공적인 패킷 복호화를 위해 필요한 최소 SNR은 10 dB로 가정하였다. 노드 간 공평성 반영에 따른 전송률, 지연 시간, 공평성을 비교하기 위해 우선 순위 계산 시 공평성 항의 반영 비율을 10 ~ 90% 범위에서 10% 간격으로 변화 시켰으며, 이에 따라 α 를 0.1에서 0.9, β 를 0.1로 설정하였다. 또한 공평성 항 반영 시 고려하는 최근 과거 전송 내역의 범위를 최소 1 라운드에서 최대 9 라운드로 설정하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다.

Table 1. Parameters for computer simulation

Parameters	Unit	Value
One-hop range (R)	m	2000
Bandwidth (B)	kHz	10 ~ 15 (5 kHz)
Fairness rate (α)	-	0.1 ~ 0.9
Step size (β)	-	0.1
Packet arrival rate (γ)	Packet/sec	0.5
Transmission power (P_{tx})	Watts	2
Minimum SNR	dB	10
The number of round for FF (n)	-	1 ~ 9

4.1 전송률 분석

Fig. 12는 α 변화에 따른 FF 를 고려한 제안 기법 (NP_f), FF 를 고려하지 않은 제안 기법(NP_n), 그리고 기존 기법(NP_c) 사이의 전송률 비교를 나타낸다. β 와 n 은 각각 0.1과 5로 고정하였다. 당연하게도 NP_n 과 NP_c 는 α 와 관계없이 일정한 전송률을 나타내었다. 반면 NP_f 는 α 가 증가함에 따라 전송률이 감소된다. 전송률 감소의 원인은 전송률과 공평성 사이의 트레이드 오프 관계로 인한 것이다. α 가 작은 경우 NP_f 는 높은 전송률을 가지나 α 가 큰 경우와 비교해 낮은 공평성을 가진다.

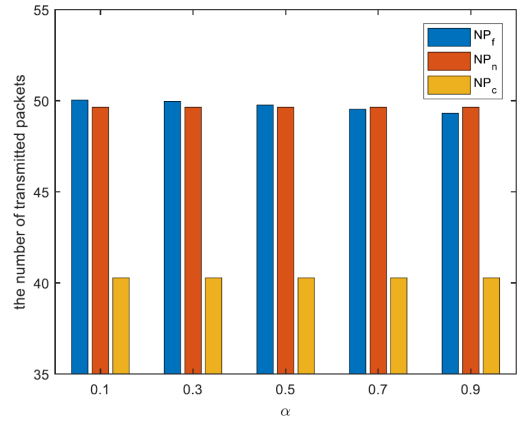


Fig. 12. The number of transmitted packets according to varying α

추가적으로 제안 기법인 NP_f 와 NP_n 이 α 에 관계없이 NP_c 보다 높은 전송률을 보임을 확인할 수 있다. 이는 NP_f 와 NP_n 모두 채널 품질뿐만 아니라 각 노드로의 송신 패킷 개수까지 고려하기 때문에 NP_c 대비 평균적으로 한번에 많은 개수의 패킷을 송신할 수 있기 때문이라고 볼 수 있다. 비록 송신 노드가 순시 전송률이 높도록 채널 품질의 차가 큰 노드들로 노드 쌍을 결정하더라도 해당 노드 쌍으로 송신할 패킷이 적다면 송신 노드는 높은 전송률을 얻을 수 없기 때문이다.

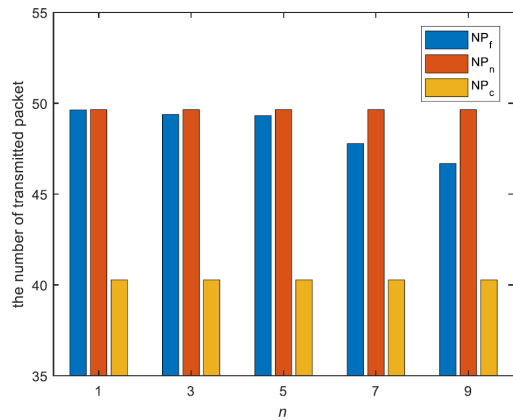


Fig. 13. The number of transmitted packets according to varying n

Fig. 13은 n 에 따른 전송률 비교를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 n 에 따른 성능 변화를 최대화하기 위해 α 를 0.9로 고정하였다. NP_f 와 NP_n 의 경우 전 영역에 대해 NP_c 보다 높은 전송률을 보이나 n 이 증가함에 따라

전송률이 지속적으로 감소함을 보인다. 이는 Fig. 12와 동일하게 n 이 증가함에 따라 공평성이 증대되어 트레이드 오프 관계인 전송률은 다소 감소되는 것이다.

4.2 지연 시간 분석

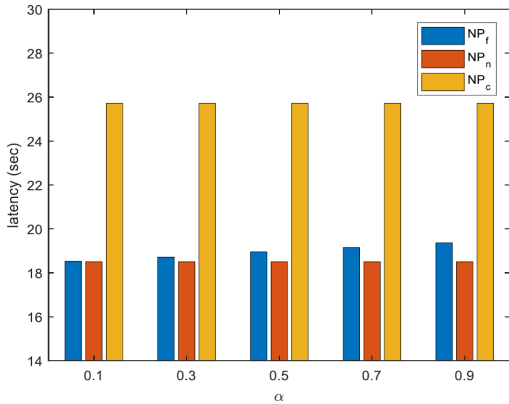


Fig. 14. The latency according to varying α

Fig. 14와 15는 각각 α 와 n 의 변화에 따른 지연 시간을 나타낸다. 여기서 지연 시간은 패킷의 최초 생성 시각부터 패킷의 최종 도착지 수신 시각까지의 시간 경과를 뜻한다. Fig. 14의 β 와 n , Fig. 15의 α 는 각각 Fig. 12와 13의 설정과 같다. 두 경우에서 모두 제한하는 NP_f 와 NP_n 의 지연 시간이 NP_c 의 지연 시간보다 작음을 확인할 수 있다. Fig. 12, Fig. 13과 유사하게 NP_f 의 지연 시간은 α 또는 n 이 증가함에 따라 감소한다. 이는 전송률 분석과 동일하게 공평성과의 트레이드 오프로 인한 것이다.

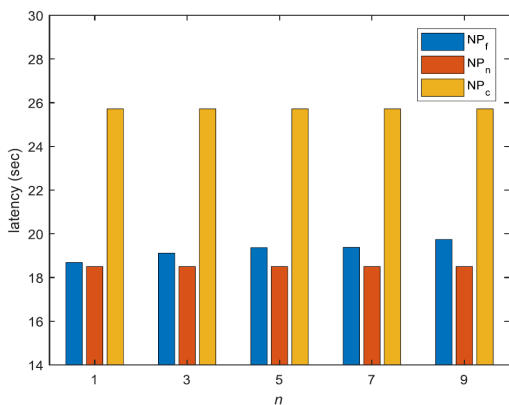


Fig. 15. The latency according to varying n

4.3 공평성 분석

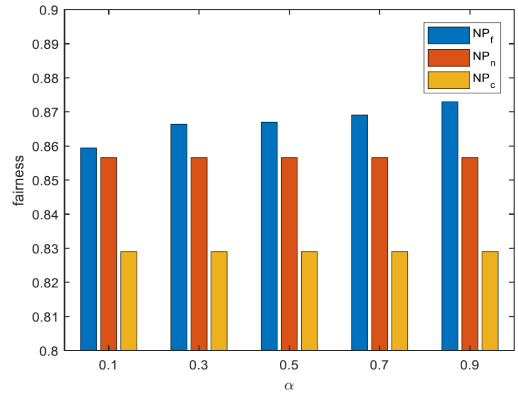


Fig. 16. The fairness according to varying α

Fig. 16은 α 의 변화에 따른 공평성을 나타낸다. NP_f 와 NP_n 의 공평성이 모든 α 에 대해 NP_c 보다 높음을 확인할 수 있다. 이는 제안 기법이 채널 품질뿐만 아니라 패킷의 나이, 패킷의 개수 등 공평성을 향상시킬 수 있는 추가 요소를 고려하기 때문이다. 또한 NP_f 와 NP_n 의 공평성 비교를 통해 α 가 공평성 향상에 유효한 인자임을 확인할 수 있다.

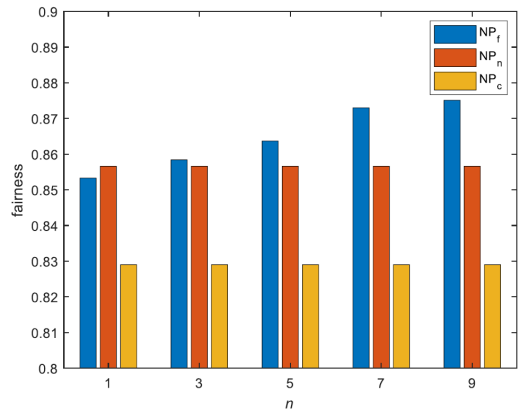


Fig. 17. The fairness according to varying n

Fig. 17은 n 의 변화에 따른 공평성을 나타낸다. NP_f 와 NP_n 의 공평성이 n 의 변화와 관계없이 NP_c 보다 높음을 확인할 수 있었다. 예상과 달리 n 이 1인 경우에 한해 NP_f 의 공평성이 NP_n 보다 낮은 것으로 확인되었다. 이는 오직 이전 라운드의 패킷 송신만을 고려 시 의미있

는 가중치가 되지 못하며 오히려 P_{ri} 를 왜곡시키기 때문이라고 설명할 수 있다. Fig. 16과 유사하게 n 이 증가함에 따라 NP_f 의 공평성은 증가하는 경향을 보인다.

3. 결론

본 논문에서는 좁은 대역폭, 긴 전파 지연 시간, 낮은 전송률 등의 특수한 수중 채널 특성을 고려하여 수중 NOMA에서의 다차원 노드 페어링 기법을 제안하였다. 기존의 지상 노드 페어링 기법들의 경우 넓은 대역폭, 높은 전송률의 지상 통신 환경을 고려하여 노드 쌍 내 노드 간 채널 품질 차가 크도록 채널 품질만을 고려하여 수행하였다. 하지만 기존 기법들과 달리 본 제안 기법은 비교적 데이터가 적은 수중 센서 네트워크의 특성을 고려하여 채널 품질 뿐 아니라 노드 간 공평성, 트래픽 부하, 패킷 나이와 같은 요소를 추가 고려하여 노드 페어링을 수행하였다. 추가적으로 노드 페어링 시 복잡도를 줄이기 위해 실제 경로 손실을 통한 계산이 아닌 PNL을 사용하여 각 노드의 페어링 가능 노드를 제한함으로써 계산량을 줄였다. 주어진 환경에서의 시뮬레이션 한 결과 제안된 기법이 기존 채널 상태만을 고려한 기법들 대비 전송률 16.1% ~ 23.8% 증가, 지연 시간 22.1 ~ 28% 감소, 공평성 2.9 ~ 5.7% 증가된 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] R. S. H. Istepanian, M. Stojanovic, Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems, Kluwer Academic, 2002.
- [2] Z. P. Ding, P. Fan, H. V. Poor, "Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.65, No.8, pp.6010-6023, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2480766>
- [3] S. M. R. Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, K. Kwak, "Resource Allocation for Downlink NOMA Systems: Key Techniques and Open Issues", *IEEE Wireless Communications*, Vol.25, No.2, pp.40-47, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700099>
- [4] J. Guo, X. Zhou, S. Durrani, H. Yanikomeroglu, "Design of Non-Orthogonal Multiple Access Enhanced Backscatter Communication", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.17, No.10, pp.6837-6852, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2864741>
- [5] W. Liang, Z. Ding, Y. Li, L. Song, "User Pairing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Networks Using Matching Algorithm", *IEEE Transactions on Communications*, Vol.65, No.12, pp.5319-5332, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2744640>
- [6] "Optimal User Pairing for Achieving Rate Fairness in Downlink NOMA Networks", *Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIC)*, IEEE, Okinawa, Japan, pp.575-578, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIC.2019.8669061>
- [7] A. A. Nasir, H. D. Tuan, T. Q. Duong and H. V. Poor, "UAV-Enabled Communication Using NOMA", *IEEE Transactions on Communications*, Vol.67, No.7, pp.5126-5138, Jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2906622>
- [8] L. Moteka, F. Takawira, C. Chabalala, "User Pairing and Power Allocation in Underlay Cognitive NOMA Networks", *Proceedings of 2019 IEEE AFRICON*, IEEE, Accra, Ghana, pp.1-6, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/AFRICON46755.2019.9133752>
- [9] C. Michaelides, F. Pavlidou, "Uplink NOMA in Body Area Networks With Simple Node Pairing Strategies", *IEEE Sensors Journal*, Vol.20, No.16, pp.9596-9603, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2986674>
- [10] T. Shen, H. Ochiai, "A UAV-Enabled Wireless Powered Sensor Network Based on NOMA and Cooperative Relaying With Altitude Optimization", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol.2, pp.21-34, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3042257>
- [11] M. B. Shahab, M. F. Kader, S. Y. Shin, "A Virtual User Pairing Scheme to Optimally Utilize the Spectrum of Unpaired Users in Non-orthogonal Multiple Access", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.23, No.12, pp.1766-1770, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2619371>
- [12] F. T. Miandoab, B. M. Tazehkand, "A user pairing method to improve the channel capacity for multiuser MIMO channels in downlink mode based on NOMA", *Computer Communications*, Vol.146, pp.15-21, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.07.005>

천 진 용(Jinyong Cheon)

[정회원]



- 2011년 8월 : 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 (공학석사)
- 2018년 8월 : 경북대학교 대학원 전자공학부 (공학박사)
- 2019년 3월 ~ 2020년 8월 : 삼성 전자 네트워크사업부 책임연구원

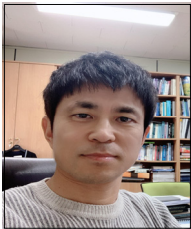
- 2020년 9월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

〈관심분야〉

수중통신, 정보통신

조 호 신(Ho-Shin Cho)

[정회원]



- 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2001년 2월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원

- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 한국항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부 전임강사
- 2003년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 IT대학 정교수

〈관심분야〉

이동통신, 수중통신, 분자통신, 무선자원관리, 매체접속프로토콜