

# 심볼 간 간섭 보상을 위한 적응형 등화기 및 TDMA 기반 다중 홉 릴레이 네트워크 설계 및 구현

오 영 우\*, 최 우 열°

## Design and Implementation of TDMA-Based Multi-Hop Relay Network with Adaptive Equalizer for Inter-Symbol Interference Compensation

Youngwoo Oh\*, Wooyeol Choi°

요 약

본 논문은 무선통신 환경에서 발생하는 신호 감쇠에 따른 패킷 손실 및 지연시간을 최소화하기 위한 시분할 다중접속(Time Division Multiple Access, TDMA) 기반의 다중 홉 릴레이 네트워크 설계 및 구현을 수행한다. Software-defined radio 기반 채널 코딩을 통해, 실제 감쇠 환경의 네트워크를 구성하였다. 신호 대 잡음 비와 단말 간 지연시간의 최대-최소 전략을 통해 릴레이를 결정하고, 최적의 링크 경로를 제공한다. 심볼 간 간섭 및 통신 품질을 보장하기 위해, 훈련 비트와 최소 평균 제곱 알고리즘 기반의 적응형 등화기를 설계한다. 훈련 비트는 송신 및 수신단의 프레임 동기화를 위해 사용된 기호 시퀀스를 재사용하며, 학습과 피드백 과정을 통해 최적값을 산출한다. 실험 결과를 통해, 최대-최소 릴레이 방식의 TDMA 다중 홉 중계 성능은 일반적인 멀티 홉 네트워크 방식보다 데이터 지연 및 신뢰성 측면에서 월등히 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Multi-hop relay, adaptive equalizer, max-min selection strategy, software-defined radio

### ABSTRACT

In this paper, we design and implement a multi-hop relay network based on time division multiple access (TDMA) to minimize packet loss and delay time due to signal attenuation in wireless communications. Through software-defined radio-based channel coding, we construct a network of actual attenuation environments. The proposed maximum-minimum relay selection scheme determines a relay based on a signal-to-noise ratio (SNR) and delay time between terminals, and provides an optimal link path. To ensure inter-symbol interference (ISI) and communication quality, we design an adaptive equalizer based on training bits and the least mean square (LMS) algorithm. The training bit reuses the symbol sequence used for frame synchronization of the transmitting and receiving nodes, and an optimal value is calculated through the learning and feedback process. Through the experimental results, we confirmed that the TDMA multi-hop relaying performance of the maximum-minimum relay selection scheme is far superior to the general method in terms of data delay time and reliability.

\* This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. NRF-2019R1F1A1046687).

• First Author : Chosun University, Department of Computer Engineering, snlyoungwoo@gmail.com, 학생회원

° Corresponding Author : Chosun University, Department of Computer Engineering, wyc@chosun.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202102-039-B-RE, Received February 17, 2021; Revised March 12, 2021; Accepted March 16, 2021

## I. 서 론

최근 무선 기술의 발전과 함께 산업 인터넷(Industrial Internet of Things, IIoT)을 위한 통신 시스템도 점차 발전하고 있으며, 산업 현장에서의 점검 및 생산, 분석을 위한 무선 기술 도입에 노력을 기울이고 있다. 그러나 장애물의 반사, 흡수성, 투과율 등과 같은 물리적 특성과 무선 장비 간의 신호 간섭으로 셀 영역 감소 및 신호 감쇠 문제가 발생하며, 안정적인 데이터 신뢰성을 제공하기 어렵다는 문제점을 지닌다. 따라서 셀 커버리지 보강과 네트워크 유연성 향상을 위한 연구와 노력이 필요하다<sup>1-2)</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해 무선 주파수 신호의 증폭·중계 기술이 주목받고 있다. 일부 문헌에 따르면 중계 단말을 활용한 릴레이 방식은 네트워크에서 발생하는 과부하 문제를 줄임과 동시에 서비스의 영역을 효과적으로 확장하였음을 확인할 수 있다. 그러나 라우팅 선정, 자원관리 및 할당 방식에 따라 큰 성능 차이를 보이므로 이를 체계적으로 제어하고, 처리하는 보상 정책의 도입이 요구된다<sup>3-6)</sup>.

다수의 연구 결과에 따르면, 효과적 자원관리와 다중 사용자 접근 제어를 위해, 시분할 다중 접속(Time division multiple access, TDMA) 기반 빔포밍(Beamforming) 등이 제안되었다<sup>7-9)</sup>. 기존의 실시간 처리 데이터를 분산 스케줄링하는 방식을 통해, 자원 손실을 방지하고 간섭 문제 등을 최소화하는 높은 성능 개선을 보였다.

그러나 제안된 스케줄링 및 릴레이 전략에도 불구하고, 손실된 패킷을 복구 및 재전송하는 과정에서 발생하는 지연시간의 증가는 전체 네트워크의 처리율 감소를 야기하며, 특히 시분할 정책을 기반으로 한 멀티 홉 네트워크의 경우, 치명적인 성능 저하가 발생한다. 따라서, 이러한 멀티 홉 네트워크의 패킷 지연시간과 신뢰성을 동시에 보장하기 위한 검증 및 연구가 필요하다. 이에 따라 본 논문에서는 앞서 언급된 중계 네트워크의 장·단점을 충분히 고려하고, maximum-minimum 릴레이 선택 기법과 최소 평균 제곱(Least mean squares, LMS) 알고리즘 기반의 적응형 등화기를 결합하여, 신호 감쇠 환경에서의 고신뢰·저지연 성능을 보장하는 실험을 진행한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 다중 홉 네트워크와 패킷 신뢰성, 지연시간을 고려한 최대-최소 릴레이 선택전략을 설명한다. III장에서는 채널 왜곡 및 ISI 제거를 위한 적응형 등화기를 소개하며, 변조 오류율(Modulation error ratio, MER), 오류 벡

터 크기(Error vector magnitude, EVM)를 평가하기 위한 모의실험을 수행한다. IV장에서는 실제 테스트베드를 통해 디바이스 간(Device to device, D2D) 중계 네트워크와 설계된 TDMA 기반 릴레이 네트워크의 성능을 비교·분석한다.

## II. 다중 홉 릴레이 네트워크 모델

### 2.1 시분할 다중접속 기반 중계 네트워크

본 논문에서는 다중 홉 릴레이 네트워크의 효과적인 자원관리와 다중 사용자 접속으로 인한 트래픽 제어를 위해 TDMA 기반 중계 단말을 설계하고, 신호 감쇠가 발생하는 무선 환경에서의 신호 증폭·전달(Amplify and forward, AF) 방식을 통해, 셀 영역 확장 및 통신 품질(Quality of service, QoS) 보장 연구를 수행한다.

노이즈 강도에 따른 패킷 손실률 및 전송률 보장을 위한 M-QAM(Multi-level quadrature amplitude modulation) 방식의 선택적 변·복조와 채널 상태 변화에 따른 적응형 등화기를 설계하고, 부정확인 응답(Negative acknowledgment, NACK) 메커니즘을 통해 각각의 패킷 응답 횟수를 줄임과 동시에 데이터 신뢰성을 보장한다. 할당된 타임 슬롯 내 패킷 수신 응답을 비롯한 여러 평가지표를 기준으로 각 단말의 채널 상태를 확인함으로써, 채널 품질에 적합한 최적의 릴레이 단말을 결정한다.

### 2.2 전송 패킷 구성

그림 1은 본 연구에 활용되는 전송 패킷의 생성 과정을 나타낸다. 사용자가 입력한 텍스트 메시지의 손실을 최소화하기 위해 bit 단위로 변환한 뒤, 해당 비트 스트림을 payload로 지정한다. 이후, 인식용 제어 비트인 guard, sync, token, tail bit 등을 결합해 신호 감쇠 환경에서의 데이터 손실 및 복구에 대비하도록

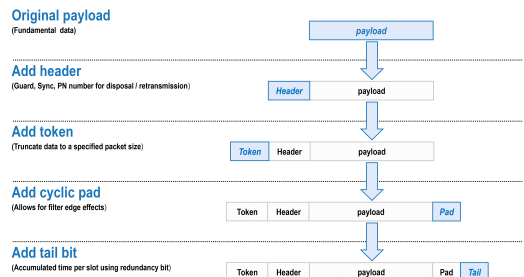


그림 1. 전송 패킷의 생성 과정  
Fig. 1. The generation process of the transmission packet.

설계하였다. 송·수신 간 단말의 오버플로우 및 타이밍 제어를 위한 framing을 진행하고, 이후 필터의 에지 효과 보정과 각각의 패킷 경계를 정의하기 위한 padding bit를 추가하여 데이터 패킷을 생성한다. 남은 redundancy bit를 tail bit으로 활용하여, 프로세스 지연을 누적 측정하도록 설계한다. 패킷 헤더와 토큰을 활용하여 신호 감쇠에 따른 손실 패킷을 탐지하고, 재전송 큐에 해당 정보를 저장 및 전달하여 재전송을 준비한다.

### 2.3 효과적 자원관리를 위한 프로세스 설계

신호 감쇠가 발생하는 무선통신 환경에서 다중접속에 의한 트래픽 증가 및 데이터 손실을 처리하기 위해, 송신 단말은 소비자 - 생산자 구조와 대기열 정보를 활용한 큐 상태 머신기반의 전송 정책을 따른다. 수신 단말의 경우, 전방위 안테나를 활용하여 전송 신호를 수집하고, 할당된 타임 슬롯 유무에 따라 작동-유휴 동작을 수행하는 시분할 다중접속 정책을 따른다. time out, no response, over slot을 sleep 상태로 정의하여, 지연 발생에 따른 추가 및 반복 작업을 최소화하고, 다중 사용자에 의한 간섭 및 트래픽 과부하를 방지한다.

### 2.4 Max-min 릴레이 선택 기법

본 논문은 중계 단말을 활용하여 신호 감쇠 환경 간 최적의 링크 경로를 제공하는 방식을 통해 통신 품질을 보장한다. 중계 단말의 경우, 송·수신 단말의 정책과 동일하게 적용되며, maximum-minimum 릴레이 선택을 위해 신호 대 잡음 비, 링크 간 지연시간을 기반으로 단말 간 감쇠 정도와 채널 상태를 평가한다. 각 단말에서 수집된 평가지표를 클러스터링하여 연산 간 오차값을 최소화하고, 가장 우수한 통신 품질을 지닌 단말을 결정한다. 이때, 사용자가 정의한 슬롯을 모두 할당했음에도, 패킷의 수신을 비롯한 평가지표가 관측되지 않은 단말을 이상 단말(Abnormal terminal)로 정의하여 경로 후보에서 제외하고, 불완전한 라우팅 정보를 사전에 차단한다.

그림 2는 maximum-minimum 릴레이 선택 기법을 나타낸 것으로 신호 감쇠 환경 간 하나의 송·수신 단말과 N개의 릴레이 노드( $R_1, R_2, \dots, R_n$ )를 활용하여 최적 링크 경로를 결정한다. 각 중계 단말은 distance rate에 따라 각 중계 사이의 랜덤한 위치에 배치되고, 이때 임의의  $i$  번째 노드와  $j$  번째 노드 사이에서 나온 결과를 다음과 같이 가정한다.

$h_{ij}$ 는 단말  $i$ 에서  $j$ 까지의 경로,  $s_{ij}$ 는 신호 대 잡

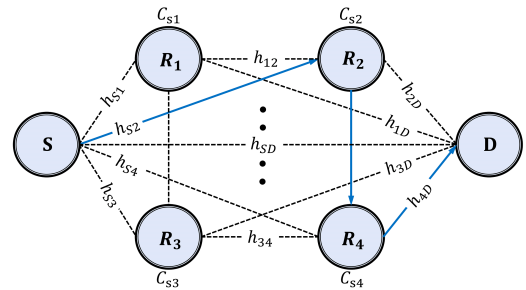


그림 2. Maximum-minimum 릴레이 선택 기법  
Fig. 2. Maximum-minimum relay selection scheme.

음 비,  $d_{ij}$ 는 링크 간 지연시간의 가중치를 의미한다.  $C_{ij}$ 는  $s_{ij}$ ,  $d_{ij}$ 를 비롯한 여러 평가지표를 포함하는 단말의 성능으로 수식 1과 같이 표현된다.

$$\{s_{ij}, d_{ij}, \dots\} \in C_{ij} \tag{1}$$

이때, 소스로부터 수신된 신호 대 잡음 비율과 같은 단일 지표를 활용한 일반적인 릴레이 선택 방식은 직접 경로 및 간접 경로 사이의 지연시간까지 고려할 수 없으므로 멀티 홉 시스템의 복잡도가 높다. 이를 개선하기 위해, 본 논문에서는 신호 대 잡음 비율  $s_{ij}$ , 단말 간 지연시간의 가중치인  $d_{ij}$ 를 활용한 max-min 릴레이 선택 기법을 통해 중단의 신호 품질 개선 및 N개의 홉 통과에 따른 전체 지연시간(End-to-end delay)을 최소화한다.

$$p = \operatorname{argmax} \{s_{ij}\} \tag{2}$$

$$q = \operatorname{argmin} \{d_{ij}\} \tag{3}$$

본 연구에 사용된 실제 처리 방안은 다음과 같다. 각 단말에서 측정되는 SNR을 기준으로 정렬을 수행한 뒤, 지연시간의 가중치를 기반으로 우선순위를 부여함으로써, 최대 신호 대 잡음 비와 최소 지연시간을 의미하는 수식 2, 3을 모두 만족하는 중계 단말을 선택한다. 실제 LabVIEW NXG 개발 환경 간 구현된 모듈은 그림 3과 같으며, 표 1은 SNR 및 단말 간 지연시간을 활용한 max-min 릴레이 선택 방안의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 실제 측정된 SNR과 단말 간 지연시간의 가중치를 비교함으로써 불완전한 라우팅 정보를 차단하고, 최적화된 경로를 통해 수신 확률과 여러 홉 통과에 따른 전체 지연시간을 효과적으로 처리할 수 있음을 확인할 수 있다.

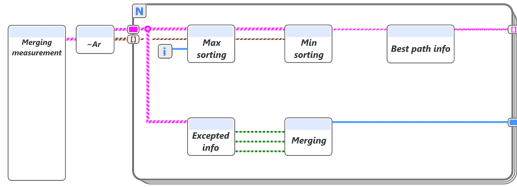


그림 3. 다중 홉 릴레이 선택 다이어그램  
Fig. 3. Multi-hop relay selection diagram.

표 1. 릴레이 선택 시뮬레이션 결과  
Table 1. Result of relay selection simulation.

Measurements	Index of multi-hop			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
SNR	22 dB	14 dB	8 dB	14 dB
Per link delay	120 ms	460 ms	1180 ms	370 ms
T / F	-	-	1	-
The priority of the relay	$R_1 - R_4 - R_2$			

### III. 채널 왜곡 및 간섭 보상 방안

#### 3.1 LMS 알고리즘 기반 적응형 등화기 구현

본 논문에서는 M-QAM 변조 특성과 전송 효율을 고려한 적응형 등화 알고리즘을 구현하여, 신호 감쇠 환경 간 여러 방해 요인을 제거하고, 왜곡된 데이터를 효과적으로 복구하는 등화기를 설계 및 구현한다. [10-12]에 따르면, multi-path fading 및 제한된 대역 채널에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 LMS, RLS(Recursive least squares), QR-RLS(QR decomposition based RLS) 등의 균등화 알고리즘이 제안되었다. 특히 LMS의 단순성과 느린 수렴속도의 문제점을 스텝 계수를 활용하여 쉽게 개선할 수 있다는 점에서 Wiener filter, adaptive filter 등에 활용된다. 그러나 수렴 특성을 결정하는 스텝 크기에 따라 등화기의 수렴속도와 평균 제곱 오차(Mean squared error, MSE)가 반비례하는 상반 관계가 성립되므로 정밀한 계수 추정이 요구된다<sup>[13]</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해, [14-17]에서 제안한 방식을 활용한다. 훈련 시퀀스 기반의 채널 계수와 필터 매개 변수 추정을 수행하고, 훈련 피드백 과정을 기반으로 계수 및 가중치를 점진적으로 조정하여 최적값을 유도한다. LMS 기반 적응형 등화기의 구현은 앞서 언급된 참조 문헌 기반의 간소화 과정을 거쳐, 총 5단계로 구성된다.

수식에 사용된 변수  $S$ 는 스텝 크기,  $I(n)$ 은 입력 신호,  $W(n)$ 은 필터의 가중치 벡터,  $O(n)$ 은 필터의 출력값,  $w_j$ 는 필터 가중치 계수,  $E(n)$ 은 추정된 오류, 이상적 응답을  $R(n)$ 으로 정의한다. 입력 신호와 필터의 가중치 벡터는 수식 (4), (5)와 같이 정의된다.

$$I(n) = [i(n) i(n-1) \dots i(n-N+1)]^T \quad (4)$$

$$W(n) = [w_0(n) w_1(n) \dots w_{N-1}(n)]^T \quad (5)$$

필터 출력은 벡터 전치와 입력 벡터의 행렬 곱과 동치 관계이므로, 수식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$O(n) = \sum_{j=0}^{N-1} w_j(n) i(n-j) = W^T(n) I(n) \quad (6)$$

이상적인 응답과 필터 출력의 오차를 기반으로 평균 제곱 오차를 점진적으로 줄이는 작업을 수식 (7)과 같이 정의하고, 수식(8)을 통해 다음 반복을 준비하기 위한 필터 계수 업데이트를 진행한다<sup>[15-18]</sup>.

$$E(n) = R(n) - O(n) \quad (7)$$

$$W(n+1) = W(n) + 2SE(n)I(n) \quad (8)$$

#### 3.2 모의실험 기반 등화기 평가

실제 성능평가에 앞서, 이론적 노이즈 환경에서의 모의실험을 통해 적응형 등화기의 사전 평가를 수행한다. 이때, EVM(%)은 위상 노이즈, 비선형성 오류 등의 여러 장애를 포함하는 디지털 송·수신의 신호 품질을 의미하고, MER(dB)은 복조된 디지털 신호의 오류를 평가하는 변조 품질 평가지표이다. 특히 EVM의 경우, 복구된 파형을 제거한 후 그림 4와 같이 수신된 심볼과 이상적인 심볼 간 비교를 통해, 디지털 변조 및 신호의 품질을 측정한다.

$$EVM = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]}}{|V_{\max}|} \quad (9)$$

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \quad (10)$$

수식 9, 10에서의  $I_j$ ,  $Q_j$ 는 수신된  $j$ 번째 심볼의 I,

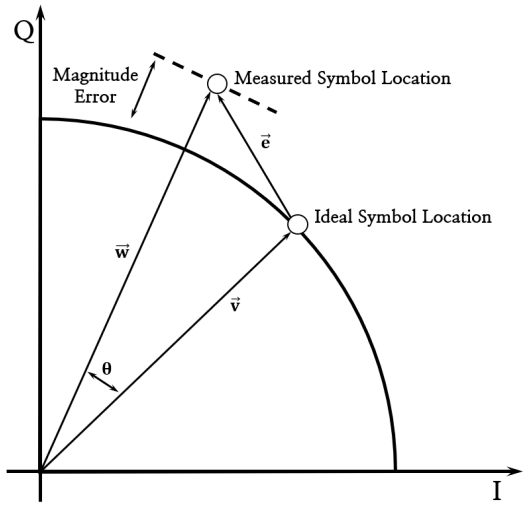


그림 4. EVM을 위한 측정 방법  
Fig. 4. Measurement methods of EVM.

$Q_j$ ,  $\tilde{I}_j$ ,  $\tilde{Q}_j$ 를 수신된  $j$  번째 심볼의 이상적인 I, Q를 의미한다. 그림 5는 LabVIEW NXG 개발 환경에서 구현된 적응형 등화기를 보여주고, 그림 6, 7은 이론적 노이즈 환경에서의 등화기 유무에 따른 성능 차이를 나타낸다.

그림 6은 M-QAM 변조 방식의 지수 증가에 따른 변조 오류확률을 보여준다. 동일한  $E_b/N_0$  임에도 불구하고, 적응형 등화기에 의해 2배가량의 변조 오류확률이 개선되었음을 확인할 수 있다.

그림 7에서도 앞서 진행된 실험 결과와 동일하게 M-QAM 변조의 지수 증가에 따른 오차 벡터 크기가 2.5배가량 감소하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, LMS 알고리즘 기반의 적응형 등화기는 신호 감쇠 환경에서 발생하는 부호 간 간섭 제거와 신호 왜곡에 강인한 성능을 지녔음을 확인하였다.

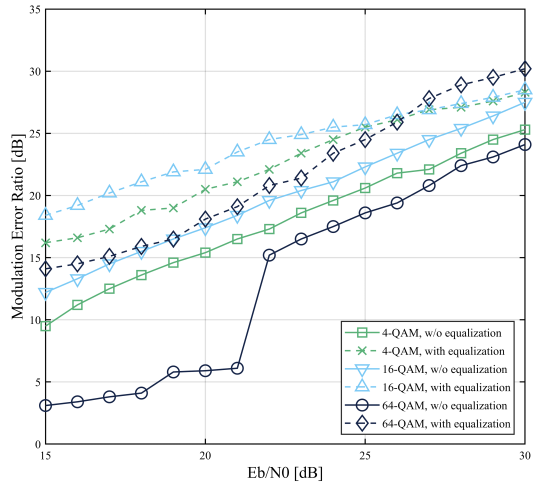


그림 6. 이론적 AWGN channel 환경에서 적응형 등화기의 변조 오류확률 성능 분석 결과  
Fig. 6. MER performance analysis result of an adaptive equalizer in theoretical AWGN environment.

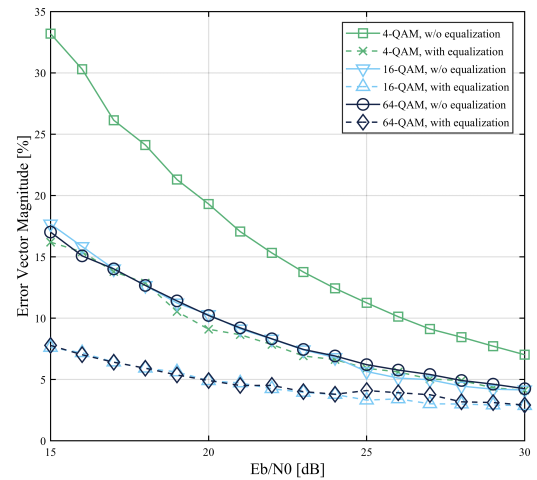


그림 7. 이론적 AWGN channel 환경에서 적응형 등화기의 오차 벡터 크기 성능 분석 결과  
Fig. 7. EVM performance analysis result of an adaptive equalizer in theoretical AWGN channel environment.

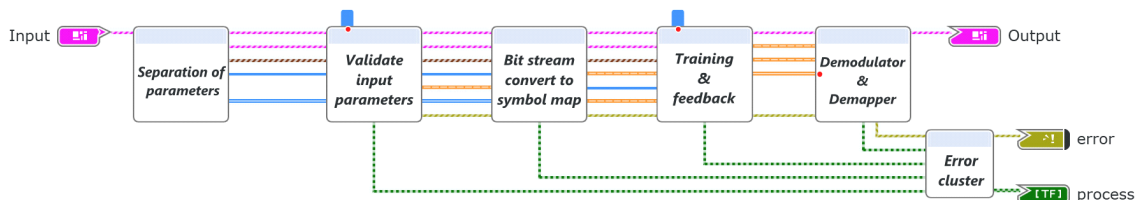


그림 5. LabVIEW NXG 개발 환경에서 구현한 적응형 등화기 모듈  
Fig. 5. Adaptive equalizer module implemented in LabVIEW NXG development environment.



#### IV. 테스트베드 구축 및 네트워크 성능 분석

##### 4.1 실험환경 구성

NI-USRP와 LabVIEW NXG 소프트웨어를 이용한 시분할 다중접속 기반 다중 홉 릴레이 네트워크 설계하였다. 산업용 2.4 GHz 대역의 무선통신 환경을 위해 사용된 RF 파라미터는 표 2와 같이 설정하였으며,

표 2. SDR 기반 NI-USRP의 RF 파라미터 설정  
Table 2. RF parameter setting of SDR-based NI-USRP.

RF system parameters	Value
Carrier frequency	2.4 GHz
I/Q rate	4 M
Sample per symbol	8
Symbol rate	500 K
Modulation scheme	16-QAM
Pulse shaping filter	Raised cosine
Roll-off factor	0.5
Enable channel	0, AWGN channel
Active antenna	TX1, RX2
Gain	18-22
Clock source	Internal or external
Distance between each USRP device	1.5 m to 9 m

-30dB 신호 감쇠기 부착, AWGN 채널 코딩을 통해 신호 감쇠가 충분히 발생할 수 있는 테스트베드를 그림 8과 같이 구성하였다.

##### 4.2 감쇠에 따른 네트워크 모델별 비교 분석

그림 9, 10은 다중 홉 통과에 따른 종단의 지연시간 및 패킷 손실률을 비교 분석한 결과를 나타낸다. D2D 기반의 일반적인 멀티 홉은 각 단말에서 발생하는 지연시간을 고려하지 않음으로 여러 홉 통과에 따른 지연시간이 안정적이지 못한 360~2240ms의 성능을 보이는 반면, maximum-minimum 릴레이 선택 전략을 활용한 TDMA 기반 네트워크의 경우, 180~960ms로 기존 멀티 홉 방식 대비 50%~57%의 종단 간 패킷 지연의 감소를 보였다. 그뿐만 아니라, D2D 기반의 멀티 홉 방식은 선택된 중계 단말에 패킷 데이터가 집중됨으로 트래픽 증가와 함께 패킷 손실률이 증가하였으나, 설계된 TDMA 기반 멀티 홉은 링크 당 지연시간의 가중치를 활용한 단말 간 우선순위와 오류 단말을 사전에 차단하는 릴레이 결정 방식을 통해 선택된 릴레이의 트래픽 포화를 방지함으로써, 종단의 패킷 손실과 지연시간 최소화를 보장하였다.

그림 11은 변조 오류 및 오차 벡터 크기를 기반으로 각 단말의 오류 성능을 비교 분석한 결과를 보여준다. TDMA 기반 멀티 홉 릴레이 네트워크는 신호 감

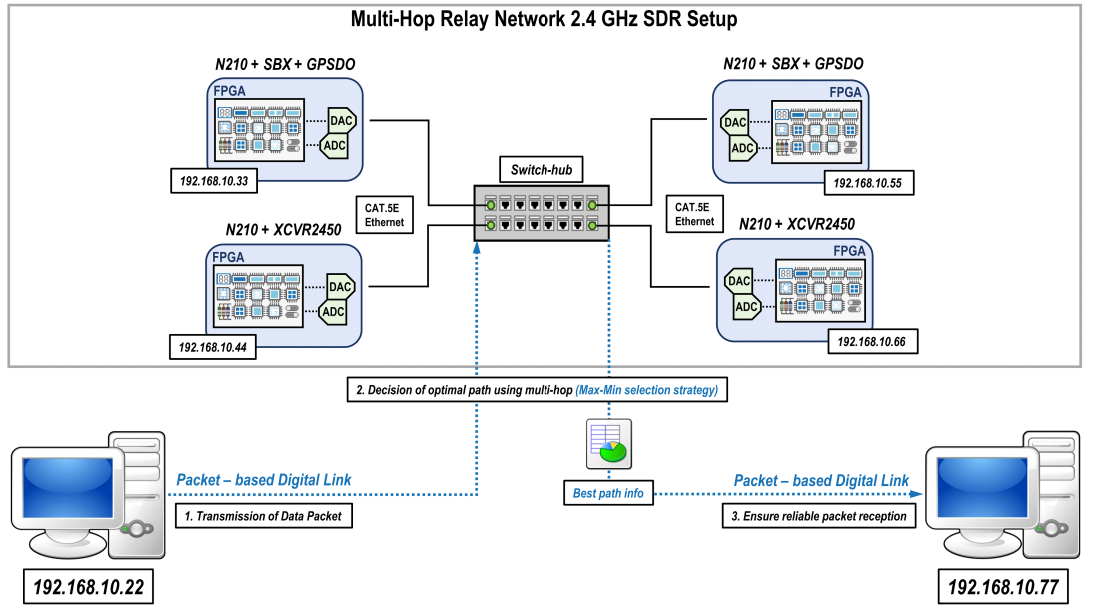


그림 8. TDMA 기반 다중 홉 릴레이 네트워크 테스트베드 구성  
Fig. 8. TDMA-based multi-hop relay network testbed configuration.

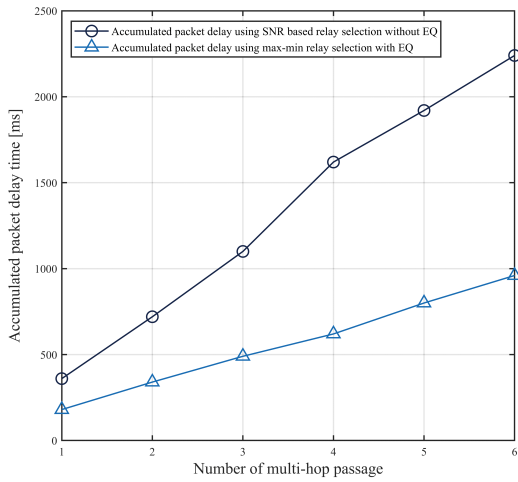


그림 9. 다중 홉 통과에 따른 종단 간 패킷 지연 비교  
Fig. 9. Comparison of end-to-end packet delay time according to multi-hop passing.

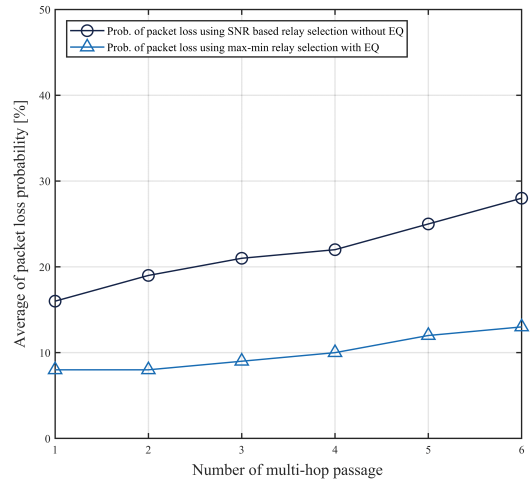


그림 10. 다중 홉 통과에 따른 종단 간 패킷 손실률 비교  
Fig. 10. Comparison of end-to-end packet loss ratio according to multi-hop passing.

외 환경 간 LMS 알고리즘 기반의 적응형 등화기를 통해 심볼 드리프트 및 신호 왜곡에 대한 보상을 수행함으로써 일반적인 멀티 홉 방식 대비 변조 오류의 15%~76%의 개선율을 보인다.

오차 벡터 크기 성능에서도 43%~73%가량의 감소세를 보였으며, 중계 및 최종 수신 단말에서 4%~7%의 안정적인 통신 품질을 보였다.

그림 12의 경우, 네트워크 모델에 따른 중계 및 최종 수신 단말의 패킷 수신율을 보여준다. TDMA 다중 홉 릴레이 네트워크는 신호 대 잡음 비와 단말 간 지연시간의 가중치를 활용한 릴레이 선택 기법을 통

해 불완전한 라우팅 경로를 사전에 차단하고, 최종 수신 단말의 수신 확률 개선과 전체 지연시간을 최소화한다. 이후, 직접 및 간접 경로를 실시간으로 갱신함으로써, 일반적인 멀티 홉 방식 대비 40%~350%의 패킷 수신 확률의 개선을 보였다.

테스트베드를 통해, 네트워크를 비교·분석한 결과는 다음과 같다. 일반적인 멀티 홉 네트워크 방식은 신호 감쇠 환경 간 단일 지표를 활용한 릴레이 선택 방안을 통해 최적의 링크 경로를 산출하지만, 노이즈 및 왜곡을 보상하는 정책 부재와 중계 단말 간 자원

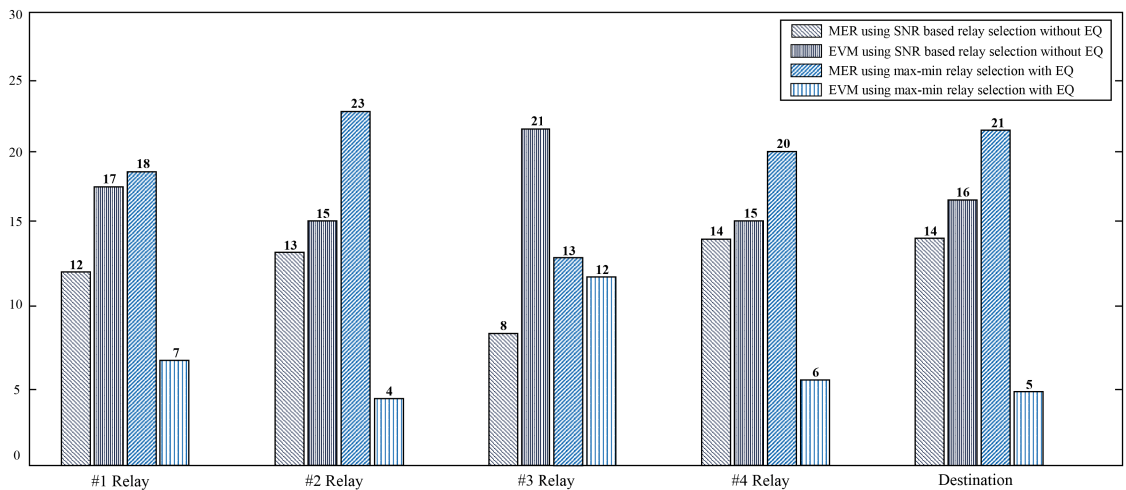


그림 11. 적응형 등화기 적용 여부에 따른 테스트베드의 릴레이 별 MER 및 EVM 성능 비교  
Fig. 11. Comparison of MER and EVM performance per relay of testbed according to the application of adaptive equalizer.

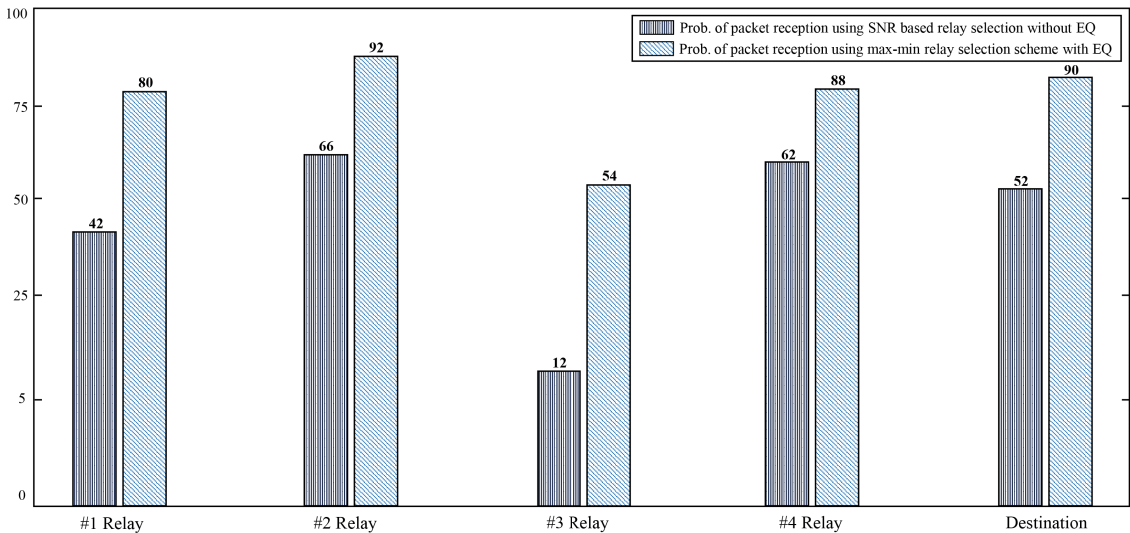


그림 12. 적응형 등화기 적용 여부에 따른 테스트베드의 릴레이 별 패킷 수신율 성능 비교  
 Fig. 12. Comparison of packet reception ratio performance per relay of testbed according to the application of adaptive equalizer.

충돌에 따른 신호 품질 저하를 해결하지 못하고, 중계 단말과 최종 수신 단말에서 낮은 패킷 신뢰성과 높은 지연을 보였다.

이를 개선하기 위해 본 연구에서 설계된 TDMA 다중 홉 릴레이 네트워크는 SNR과 단말 간 지연시간의 가중치를 활용한 maximum-minimum 릴레이 선택 기법과 부호 간 간섭 및 채널 왜곡 보상을 위한 LMS 알고리즘 기반의 적응형 등화기를 통해 중계 및 종단의 신호 품질을 개선하고, 높은 패킷 신뢰성 및 낮은 지연시간을 동시에 보장할 수 있는 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

### V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 SDR 기반의 테스트베드를 구성하기 위해 NI-USRP와 LabVIEW NXG 개발 환경을 이용하여, 신호 감쇠에 따른 통신 품질보장 연구를 수행하였다. 실험 결과를 통해, 신호 대 잡음 비, 링크 당 지연시간의 가중치를 활용한 maximum-minimum 릴레이 선택 전략과 적응형 등화기를 결합한 시분할 다중접속 기반의 네트워크 성능은 기존의 다중 홉 중계 방식에서 문제점으로 지적되는 자원 할당 문제를 해결하고, 데이터 지연 및 신뢰성 측면의 성능을 대폭 개선하였다.

그러나, 현재 시스템에서는 각 단말의 오류 및 시분할 정책에 의한 유휴 슬롯 증가가 발생함으로 전송 및

처리 성능이 감소할 수 있다. 따라서, 향후 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 간섭 및 다중 경로 페이딩에 강건한 직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 방식의 전송 메커니즘을 도입하여 연구 수행할 예정이다.

### References

- [1] C. B. Ali, M. B. Khan, M. Rehman, and S. A. K. Tanoli, "NI-USRP based experimental evaluation of cooperative communication over direct communication in lab environment," in *Proc. ICEIC*, pp. 1-5, Honolulu, USA, Jan. 2018.
- [2] K. S. Mohamed, M. Y. Alias, and M. Roslee, "Interference avoidance using TDMA-Beamforming in location aware small cell systems," *Applied Sci.* vol. 9, no. 23, pp. 4979-4990, Nov. 2019.
- [3] K. Naito and H. Kobayashi, "Feasible cooperative communication with IEEE 802.11a based devices for multi-hop networks," in *Proc. IEEE CCNC*, pp. 91-98, Las Vegas, USA, Mar. 2016.
- [4] H. Sun, M. Naraghi-Pour, W. Sheng, and R. Zhang, "A hop-by-hop relay selection strategy



in multi-hop cognitive relay networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21117-21126, Jan. 2020.

[5] H. A. Suraweera, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis, and A. Nallanathan, “Effect of feedback delay on amplify-and-forward relay networks with beamforming,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 3, pp. 1265-1271, Mar. 2011.

[6] K. Shamganth and M. J. N. Sibley, “A survey on relay selection in cooperative device-to-device communication for 5G cellular networks,” in *Proc. ICECDS*, pp. 42-46, Chennai, India, Aug. 2017.

[7] S. C. Ergen and P. Varaiya, “TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks,” *Wirel. Netw.*, vol. 16, pp. 985-997, May 2010.

[8] X. Tong, X. Li, and Y. Liu, “Research on resource efficiency optimization model of TDMA-Based distributed wireless ad hoc networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 96249-96260, May 2020.

[9] A. Sgora, D. J. Vergados, and D. D. Vergados, “A survey of TDMA scheduling schemes in wireless multihop networks,” *ACM Comput. Surv.*, vol 47, no. 3, pp. 1-39, Apr. 2015.

[10] V. Djigan, “Fast RLS algorithms in combined adaptive array and fractionally-spaced feed-forward/feed-backward equalizer,” in *Proc. IEEE Int. Symp. EWDTs*, pp. 1-6, Varna, Bulgaria, Sep. 2020.

[11] R. Martinek and J. Zidek, “The real implementation of NLMS channel equalizer into the system of software defined radio,” *Advances in Electr. and Electron. Eng.* vol. 10, no. 5, pp. 330-336, Dec. 2012.

[12] J. Taylor and Q. Huang, *CRC handbook of electrical filters*, CRC Press, pp. 137-150, Feb. 1997.

[13] B. S. Oh, S. Y. Kwon, and C. W. Lee, “A study on ECLMS using estimated correlation,” *J. KICS*, vol. 27, pp. 651-658, Jul. 2002.

[14] S. Sirvi and L. Tharani, “Wavelet based OFDM system over flat fading channel using

NLMS equalization,” in *Proc. ICCCA*, pp. 1460-1463, Greater Noida, India, Apr. 2016.

[15] K. O. Akande, P. A. Haigh, and W. O. Popoola, “Joint equalization and synchronization for carrierless amplitude and phase modulation in visible light communication,” in *Proc. IWCMC*, pp. 876-881, Valencia, Spain, Jun. 2017.

[16] M. Zhang, Y. Wang, Z. Wang, J. Zhao, and N. Chi, “A novel scalar MCMMA blind equalization utilized in 8-PAM LED based visible light communication system,” in *Proc. IEEE ICC*, pp. 321-325, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.

[17] R. Martinek, J. Vanus, P. Bilik, M. Al-Wohaishi, J. Zidek, and H. Wen, “The implementation of equalization algorithms for real transmission channels,” in *Proc. IEEE MTC*, pp. 1-6, Taipei, Taiwan, May 2016.

[18] A. B. Bruce, *Introductory Communications System*, Rose-Hulman Institute of Technology, pp. 131-138, 2013.

오 영 우 (Youngwoo Oh)



2016년 3월~현재 : 조선대학교  
컴퓨터공학과 학사과정  
<관심분야> Multi-hop relay,  
massive MIMO, multiple  
access systems, full-duplex,  
SDR  
[ORCID:0000-0001-6452-6333]

최 우 열 (Wooyeol Choi)



2015년 8월 : 광주과학기술원 정  
보통신공학부 (공학박사)  
2015년 9월~2017년 1월 : 한국  
해양과학기술원 선임연구원  
2017년 1월~2018년 2월 : 한국  
항공우주연구원 선임연구원  
2018년 3월~현재 : 조선대학교  
컴퓨터공학과 조교수  
<관심분야> Wireless network, deep learning, IoT  
[ORCID:0000-0002-7834-4044]