

## 선행 복호 정보를 활용한 버퍼기반 연쇄적 중계 기법

이병수<sup>1</sup> · 정방철<sup>2\*</sup> · 반태원<sup>1</sup>

### A Buffer-Aided Successive Relaying Technique with a Prior Decoding Information

Byeong Su Lee<sup>1</sup> · Bang Chul Jung<sup>2\*</sup> · Tae-Won Ban<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

<sup>2</sup>Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

#### 요 약

본 논문은 버퍼가 장착된 복수개의 중계기가 존재하는 연쇄적 데이터 중계 네트워크에서 각 중계기가 이미 복호에 성공한 정보를 활용하여 인접 중계기로부터의 간섭을 원천적으로 제거하는 새로운 중계 기법을 제안한다. 기존의 버퍼기반 중계 선택 기술에서는 송신단으로부터 데이터를 수신할 중계기와 수신단으로 데이터를 전송할 중계기를 각각 하나씩 선택한다. 그러나 제안된 중계 기법에서는 수신단으로 데이터를 전송할 중계기가 선택된 후 나머지 모든 중계기들은 송신단으로부터 도착한 신호의 복호를 시도하고 복호에 성공한 모든 중계기들은 자신의 버퍼에 복호된 신호를 저장한다. 제안된 기법에서는 자신이 데이터를 전송했을 때, 자신의 신호가 수신단에 성공적으로 도착하면서 동시에 송신단으로부터 도착한 신호 복호에 성공하는 중계기의 수를 최대화하는 중계기가 선택된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 중계기 선택 방식이 기존 중계기 선택 기법에 비해 훨씬 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인한다.

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a novel relay selection technique which utilizes a priori decoding information at relays for buffer-aided successive relaying networks. In the conventional relaying schemes, a single relay pair is selected for receiving data from the source and transmitting data to the destination. In the proposed technique, however, all relays except the relay selected for transmitting data to the destination try to decode the received signal from the source, and they store the data if they succeed decoding. The proposed technique selects the relay such that it can succeed its own transmission and it maximizes the number of relays successfully decoding the data from the source at the same time. It is shown that the proposed relaying technique significantly outperforms the conventional buffer-aided relaying schemes in terms of outage probability through extensive computer simulations.

**키워드** : 협력 통신, 버퍼기반 중계기 네트워크, 중계기 선택, 간섭제거

**Key word** : Cooperative Communications, Buffer-Aided Relay Networks, Relay Selection, Interference Cancellation

Received 13 November 2015, Revised 12 December 2015, Accepted 21 December 2015

\* Corresponding Author Bang Chul Jung (E-mail:bcjung@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6580)

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.2.275>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

복수개의 중계기를 이용한 협력 다이버시티(Cooperative Diversity) 기술이 최근에 연구되었는데, 특히 기회적으로 중계기를 선택하는 기술이 제안되었다[1, 2]. 이러한 기회적 중계기 선택은 채널 품질 지표(Channel Quality Indicator, CQI)와 같은 적은 양의 피드백 정보를 수신단에서 중계기까지 허용할 때 이론적으로 최적의 성능을 보인다. 그러나 기회적 중계기 선택 기술은 중계기의 수가 충분하지 않으면 오류 확률이 증가하는 단점이 있다[3].

최근 중계기 네트워크에서 중계기에 버퍼를 장착하여 통신하는 방식이 제안되었다[4]. 하나의 중계기가 존재하는 버퍼기반의 중계 시스템에 대해서는 송신단과 중계기, 중계기와 수신단간의 각 채널상태를 고려하여 송신단이 중계기로 데이터를 전송할 것인지 중계기가 데이터를 수신단으로 전송할 것인지를 선택하는 적응적 전송 기법이 제시되었다[5]. 또한 복수개의 버퍼기반 중계기가 존재하는 네트워크 환경에서 중계기를 선택하는 방식에 대한 연구도 진행되었다. 버퍼를 고려하지 않은 중계기 선택 알고리즘[6]의 성능을 개선하는 알고리즘으로서 MMRS (Max-Max Relay Selection) 중계기 선택 기법이 제안되었다[7]. MMRS 기법은 복수개의 중계기가 존재하는 버퍼기반의 중계시스템에서 송신단과 중계기, 중계기와 수신단의 채널을 각각 고려하여 각 채널에서 가장 좋은 채널을 가지는 중계기를 선택하고 첫 번째 시간 슬롯에서는 송신단과 중계기 사이의 채널이 가장 좋은 중계기가 송신단으로부터 데이터를 수신하고 두 번째 시간 슬롯에서는 중계기와 수신단간의 채널이 가장 좋은 중계기가 수신단으로 데이터를 전송한다. 또한 복수개의 중계기가 존재하는 버퍼기반 중계시스템 내에 존재하는 모든 채널에 대해서 가장 좋은 채널을 이용하여 전송하는 MLS (Max-Link Selection) [8] 기법과 서로 다른 중계기가 데이터의 송신과 수신을 동시에 수행하는 SFD-MMRS (Space Full-Duplex Max-Max Relay Selection) 기법[9]이 제안되었다. SFD-MMRS 기법의 경우 기존의 중계기법에 비하여 2배의 데이터 전송률 이득을 얻을 수 장점을 가지고 있으나 데이터를 송신하는 중계기의 신호가 데이터를 수신하는 중계기에 간섭을 일으킬 수 있다는 점을 고려하지 않아 실제 시스템에 적용하기는 어렵다.

최근 SFD-MMRS 기법과 동일하게 데이터를 수신하는 중계기와 데이터를 전송하는 중계기를 동시에 선택하여 데이터 전송률을 증가시키면서 중계기들의 간섭까지 고려한 BA-SOR (Buffer-Aided Successive Opportunistic Relaying) 기법이 제안되었다[10, 11]. 이 기법은 데이터를 수신할 중계기와 데이터를 전송할 중계기 쌍을 선택함에 있어서 데이터를 수신할 중계기에서 간섭제거 (Successive Interference Cancellation) 기술을 도입하였다. BA-SOR 기법에서는 중계기 쌍의 선택을 위하여 각 중계기의 송수신 채널 뿐 아니라 모든 중계기 사이의 간섭 채널들을 알고 있는 중앙 제어 장치가 있다고 가정하여 성능의 최대치를 분석하였다. 실제 시스템에 적용되기 위하여 추가적인 보완이 필요하겠지만, (저자들이 지식에 의하면) BA-SOR 기법은 중계기 사이에 간섭이 존재하는 네트워크 모델에서 버퍼기반 중계기법의 성능의 최대치를 보여주는 기술이다 ([10, 11]에서 보여주는 BA-SOR 기법의 성능 그래프에 는 다소 오류가 존재함에 주의하라).

본 논문에서는 버퍼가 장착된 복수개의 중계기가 존재하는 연쇄적 데이터 중계 네트워크에서 각 중계기가 이미 복호에 성공한 정보를 활용하여 데이터를 전송하는 중계기로부터의 간섭을 원천적으로 제거하는 새로운 중계 기법을 제안한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 제안된 중계기 선택 방식의 구체적인 방법을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 하나의 송신기와 수신기, 길이  $L$ 짜리 버퍼가 장착된  $K$ 개의 Decode-and-Forward (DF) 중계기가 존재하는 네트워크를 고려한다. 각 송신기와 수신기, 각 중계기는 한 개의 안테나를 가지며, 송신기와 수신기 사이에 직접적인 통신경로는 없다고 가정한다. 송신기에서 중계기로 데이터를 전송하는 것과 중계기가 수신기로 데이터를 전달하는 것은 같은 시간, 같은 주파수 밴드를 이용하여 수행되고 하나의 중계기가 전송과 수신을 동시에 하지는 못한다고 가정한다.

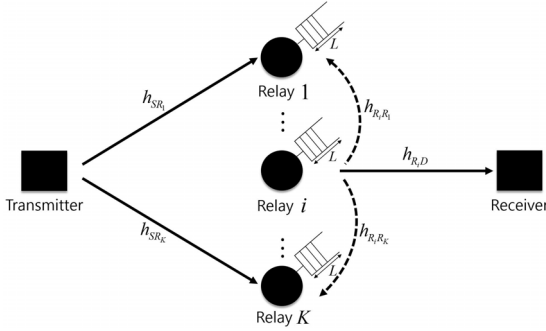


Fig. 1 System Model

송신기와  $i$  번째 중계기가 사용하는 송신전력은 각각  $P_S$ 와  $P_{R_i}$ 로 가정하고, 채널을 통하여 데이터를 전송하는 전송률은  $\gamma_0$ 라고 가정한다. 네트워크에 존재하는 모든 채널 정보는  $h_{ij}(i \rightarrow j)$ 로 나타내며 평균이 0이고 분산이 1인 Complex Gaussian, 즉  $CN(0,1)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 따라서, 채널 이득은  $g_{ij} = |h_{ij}|^2$ 으로 나타내며,  $n_i$ 는 additive white Gaussian noise (AWGN)을 나타낸다.

### III. 제안하는 버퍼기반 연쇄적 데이터 중계 기술

#### 3.1. 기존 연쇄적 데이터 중계 기술: Buffer-Aided

##### Successive Opportunistic Relaying (BA-SOR)

BA-SOR 방식은 복수개의 중계기가 존재하는 버퍼기반 중계시스템에서 중계기간 간섭이 존재하는 경우 중계기를 선택하는 방식이다. 이 기술에서 가장 특징적인 것은 데이터를 수신단으로 전달할 중계기( $R_t$ )와 송신기로부터 데이터를 수신할 중계기( $R_r$ ) 사이의 간섭 채널을 고려하여  $R_r$ 에서 간섭제거(interference cancellation, IC)를 시도한다는 것이다. 만약 간섭채널의 채널 이득이 충분히 커서 간섭제거가 가능하면 송신기로부터 도착하는 신호는 간섭 없이 수신 가능하다. 송신률이  $\gamma_0$ 일 때  $R_r$ 에서 다음식을 만족하면 간섭제거가 가능하다.

$$\frac{g_{R_t R_r} P_{R_t}}{g_{S R_r} P_S + n_{R_r}} \geq 2^{\gamma_0} \quad (1)$$

(1)에서  $g_{R_t R_r}$ 은 수신단으로 데이터를 전달하는 중계기  $R_t$ 와 송신단으로부터 데이터를 받는 중계기  $R_r$ 간의 간섭 채널의 이득을 나타내고  $g_{S R_r}$ 은 송신단  $S$ 와  $R_t$ 간의 채널 이득,  $P_{R_t}$ 와  $P_S$ 는 각각 중계기  $R_t$ 와 송신단에서 사용하는 전송 전력을 나타낸다.

BA-SOR 기술에서는 버퍼에 전달할 데이터가 있는 송신 중계기와 송신 중계기가 데이터를 수신단으로 전달할 때 송신단으로부터 데이터를 수신할 수신 중계기의 쌍을 선택한다. 이때 (1)를 이용하여 간섭제거의 가능여부까지 이용하여 전체 중계기의 쌍 중 송신단과 수신중계기 사이의 채널 이득과 송신 중계기와 수신기 사이의 채널 이득값의 최소값이 최대가 되는 중계기의 쌍을 선택한다.

#### 3.2. 제안하는 선행 복호정보 기반 연쇄적 데이터 중계 기술

본 절에서는 제안하는 선행 복호정보 기반 연쇄적 데이터 중계 기술을 설명한다. 설명의 편의를 위하여 중계기에 장착된 버퍼에는 수신단으로 전달할 데이터를 가지고 있다고 가정한다.

전체 중계기의 집합을  $A$ 라고 정의하고, 버퍼에 수신단으로 보낼 데이터를 가지고 있는 (버퍼가 비어있지 않은) 중계기들을 집합  $T$ 로 ( $T \subset [1, K]$ ) 정의한다. 정의된 집합  $T$ 에 대해서  $t$ 번째( $t \in T$ ) 중계기인  $R_t$ 가 수신단까지의 채널이득이 충분히 커서 데이터 송신이 가능하여 수신단으로 데이터를 전달한다고 가정하면  $R_t$ 를 제외한 네트워크에 존재하는 모든 중계기에 대해서  $R_t$ 가 수신단으로 데이터를 전달할 때 간섭이 발생한다. 이 간섭에 대하여 3가지의 처리 방식이 존재할 수 있다. 첫째로,  $R_t$ 가 수신단으로 전달하고자 하는 데이터를  $i$  번째 중계기인  $R_i$ 가 이전 시간 슬롯에서 복호하여 이미 가지고 있다면  $R_i$ 에서  $R_t$ 로의 간섭 채널이득 값과 상관없이  $R_i$ 는  $R_t$ 로부터 도착하는 간섭신호를 원천적으로 제거할 수 있다 (Case 1). 둘째로,  $R_i$ 가  $R_t$ 가 전송하는 데이터를 미리 가지고 있지 않더라도 (1)의 조건을 만족하면 BA-SOR 방식과 동일한 방식으로 간섭을 제거할 수 있다 (Case 2). 마지막으로, 위의 두 가지 경우를 만족하지 않으면  $R_i$ 는  $R_t$ 로부터 도착하는 간섭신호를 제거할 수 없는데 이 경우에도 간섭신호를 잡음으

로 간주하고 송신단으로부터 도착하는 신호의 복호를 시도한다. Case 1과 2의 경우 중계기간 간섭은 제거되므로  $R_i$  은 송신단과  $i$  번째 중계기 간의 채널 이득  $g_{SR_i}$  을 이용하여 데이터 복호 가능 여부를 결정하게 된다. Case 3의 경우 signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)를 계산하여 송신단으로부터의 신호가 복호 가능한지 체크한다. 주어진  $R_i$ 에 대하여 위의 3가지를 모두 시도한 후 송신단으로부터 성공적으로 신호 수신 가능한 중계기의 수를  $N_i$ 로 나타낸다.

제안된 기술에서는 집합  $T$ 에 속하고 수신단으로 데이터를 성공적으로 전송할 수 있는 송신 중계기 중 자신이 데이터를 전송했을 때 송신단으로부터의 신호 수신이 가능한 수신 중계기의 수를 최대화 하는 송신 중계기를 선택한다. 송신 중계기가 선택되면 해당 송신 중계기는 수신단으로 데이터를 전달하고 이때 전달된 데이터를 가지고 있던 다른 중계기들은 이 데이터를 이용하여 송신 중계기로부터의 간섭을 제거하고 송신 중계기에서 전달된 데이터가 수신기에서 성공적으로 복호되면 버퍼에서 해당 데이터를 제거한다. 송신 중계기가 수신기로 데이터를 전달할 때 송신기에서도 새로운 데이터가 송신 중계기를 제외한 수신 중계기들로 도착하게 되는데 데이터 복호에 성공한 수신 중계기들은 모두 해당 데이터를 버퍼에 저장한다.

여기서 주목해야 할 점은 제안하는 연쇄적 중계기술에서는 송신단에서 중계기로 전달된 데이터가 순서대로 수신기에 전달되지 않을 수도 있다는 것이다. 또한, 기존 BA-SOR 기술의 경우 송신하는 중계기와 수신하는 중계기가 각각 한 개씩 선택되므로 특정 시간에 송신단으로부터 한 개의 중계기만 데이터를 수신하여 버퍼에 저장하지만, 제안하는 연쇄적 데이터 중계 기술에서는 송신단으로부터 도착한 데이터의 복호에 성공한 불특정 다수의 수신 중계기들이 모두 해당 데이터를 버퍼에 저장하므로 기존 BA-SOR 기술에 비하여 필요한 버퍼의 양이 다소 증가한다. 하지만 이렇게 저장된 데이터를 이용하여 송신 중계기로부터의 간섭을 효과적으로 제거하여 궁극적인 오류확률은 기존의 기법에 비해 현저히 줄일 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제안 버퍼기반 연쇄적 데이터 중계 기술의 성능을 검증한다. 비교하고자 하는 기존의 기술은 버퍼기반의 중계기가 복수 개 존재하는 중계 시스템에 대해서 모든 채널을 대상으로 가장 좋은 채널을 가진 중계기를 선택하는 max-link selection (MLS)[5] 기술과 중계기간 간섭을 고려하지 않은 이상적 환경에서 중계기 쌍을 선택하는 space full-duplex max-max relay selection (SFD-MMRS)[9], 간섭 제거 조건만을 이용하여 간섭 제거 유무를 결정하여 중계기 쌍을 선택하는 BA-SOR [10, 11] 기법이다.

그림 2는 중계기의 수가 4( $K=4$ )이고 데이터 전송률이 2( $\gamma_0=2$ )일 때 중계 기법에 대한 오류 확률을 나타낸다. MLS 기법의 경우 네트워크에 존재하는 모든 채널 중 가장 좋은 채널을 갖는 송신 또는 수신 중계기 하나를 선택하는 기술이므로 송수신 중계기 쌍을 선택하는 연쇄적 중계 기법들과 데이터 전송률을 맞추기 위해서 데이터 전송률을 4( $\gamma_0=4$ )로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안하는 연쇄적 중계 기술이 기존의 BA-SOR 기법보다 더 좋은 성능을 보인다. 또한 기존 BA-SOR 기술과 비교했을 때 제안한 기술의 오류 확률이 SNR의 증가에 따라 줄어드는 속도가 훨씬 빠르다는 것을 주목하라. 제안된 기법은 낮은 SNR에서는 기존 BA-SOR과 비슷한 성능을 보이지만 SNR이 높아짐에 따라 다중 중계기간 간섭이 전혀 없는 SFD-MMRS 성능에 근접하는 것을 관찰할 수 있다.

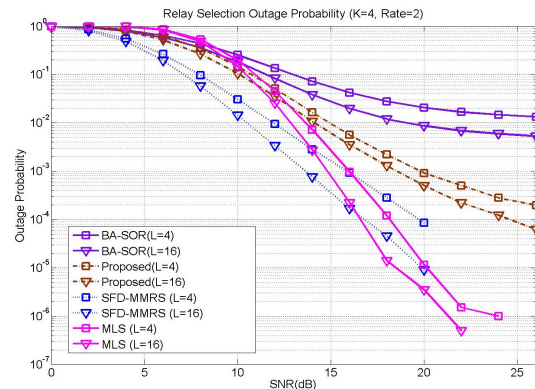


Fig. 2 Outage probability for  $K=4, L=4, 16, \gamma_0=2$ .

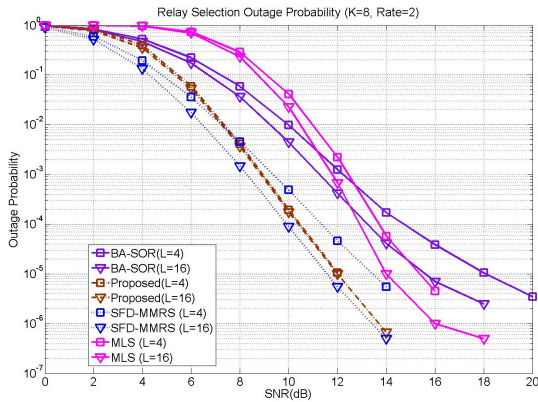


Fig. 3 Outage probability for  $K=8, L=4, 16, \gamma_0=2$ .

그림 3은 중계기의 수가  $8(K=8)$  이고  $\gamma_0=2$  일 때 제안한 연쇄적 중계기술의 성능을 보여준다. 중계기의 수가 늘어나더라도 제안한 중계 기술이 기존의 BA-SOR에 비해 좋은 성능을 나타낸다. 특히 SNR이 증가할수록 간섭을 고려하지 않는 이상적인 전송 기법(SFD-MMRS)의 성능에 근접함을 알 수 있다. 그림 4에서 간섭이 전혀 없는 이상적 환경을 고려한 SFD-MMRS에서 버퍼의 크기가 4인 경우 ( $L=4$ ) 제안된 기술의 오류확률이 더 우수함을 주목할 만하다. 그림 2,3에서 함께 도시된 MLS 기법의 경우 제안된 기법보다 낮은 데이터 전송율을 가지는 Outage 확률이 최적화된 기법으로 제안된 기법과 공평하게 비교하기 어렵지만 최적의 기법 성능을 보여주는 역할을 한다.

## V. 결론

본 논문에서는 버퍼가 장착된 복수개의 중계기가 존재하는 데이터 중계 네트워크에서 선행 시간 슬롯에서 복호에 성공한 정보를 활용하여 중계기간 간섭을 효과적으로 제거하는 버퍼기반 데이터 중계기법을 제안했다. 기존의 버퍼기반 연쇄적 중계기 선택 기술은 수신단으로 데이터를 전송하는 송신 중계기와 송신단으로부터 데이터를 수신하는 수신 중계기를 각각 하나씩 선택하는 반면 제안하는 중계 기법에서는 수신단으로 데이터를 전송하는 송신 중계기가 선택되고 나면 나머지 모든 중계기가 수신 중계기로 동작하고 송신단으로부터 도착한 신호의 복호에 성공하면 데이터를 버퍼에

저장한다. 제안한 기술은 기존 기술들에 비하여 훨씬 좋은 오류 성능을 보인다. 특히 중계기의 수가 증가하면 제안된 기법의 성능이 간섭이 전혀 없는 이상적인 성능에 근접함을 확인하였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2013R1A1A2A10004905).

## REFERENCES

- [1] J. N. Laneman and G. W. Worness, "Distributed space time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, pp.2415-2525, Oct. 2003.
- [2] A. Bletsas, H. Shin, M. Z. Win, and A. Lippman, "Cooperative diversity with opportunistic relaying," in *Proc. of IEEE WCNC 2006*, Nov. 2006.
- [3] T. W. Ban, B. C. Jung, W. Choi, and D. K. Sung, "Performance analysis of two relay selection schemes for cooperative diversity," in *Proc. of IEEE PIMRC*, Sep. 2007.
- [4] B. Xia, Y. Fan, J. Thompson, and H. V. Poor, "Buffering in a three-node relay network," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4492-4496, Nov. 2008.
- [5] N. Zlatanov, R. Schober, and P. Popovski, "Throughput and diversity gain of buffer-aided relaying," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, Dec. 2011.
- [6] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [7] A. Ikhlef, D. S. Michalopoulos, and R. Schober, "Max-max relay selection for relays with buffers," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 3, pp.1124-1135, Mar. 2012.
- [8] I. Krikidis, T. Charalambous, and J. Thompson, "Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*,

- vol. 11, no. 5, pp. 1957-1967, May. 2012.
- [ 9 ] A. Ikhlef, J. Kim, and R. Schober, "Mimicking full-duplex relaying using half-duplex relays with buffers," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol.61, no.7, pp. 3025-3037, Sep. 2012.
- [10] N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas and M. Johansson, "Buffer-aided successive opportunistic relaying with inter-relay interference cancellation," in *Proc. of IEEE PIMRC*, Sep. 2013.
- [11] N. Nomikos, D. Vouyioukas, T. Charalambous, I. Krikidis, P. Makris, D. N. Skoutas, M. Johansson and C. Skianis, "Joint relay-pair selection for buffer-aided successive opportunistic relaying," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 8, pp. 823-834, Mar. 2015.



**이병수(Byeong Su Lee)**

2012년 2월 경상대학교 정보통신공학과 학사  
2012년 3월~현재 경상대학교 정보통신공학과 석박사통합과정  
※ 관심분야 : 이동통신, 협력 및 중계통신, 전이중 통신



**정방철(Bang Chul Jung)**

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사  
2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사  
2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사  
2008년 3월~2009년 8월 KAIST IT융합연구소 팀장  
2009년 9월~2010년 2월 KAIST IT융합연구소 연구교수  
2010년 3월~2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
2014년 3월~2015년 8월 경상대학교 정보통신공학과 부교수  
2015년 9월~현재 충남대학교 전자공학과 부교수  
※ 관심분야 : 무선통신시스템, 통계적 신호처리, 정보이론, 압축센싱



**반태원(Tae-Won Ban)**

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사  
2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사  
2000년 2월~2012년 8월 KT 네트워크부문  
2012년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
※ 관심분야 : 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유