

그래프 이론에 기반한 군 통신 시스템에서의 주파수 자원 관리 알고리즘: 전이중 통신 관점에서

전 흥 배*, 구 본 홍*, 채 찬 병°, 박 성 호**, 박 재 돈***

Graph Theory Based Resource Allocation Algorithm for Military Communication Systems: From a Full-Duplex Perspective

Hong-Bae Jeon*, Bonhong Koo*, Chan-Byoung Chae°, Sung-Ho Park**, Jaedon Park***

요 약

본 논문에서는 전이중(Full-Duplex, FD) 기술이 적용될 수 있는 군 관련 장비 간의(Device-to-Device, D2D) 통신에서 그래프 이론의 중심성(Centrality) 개념에 기반한 주파수 자원 배정 알고리즘을 제안한다. 여기서 기존의 반이중(Half-Duplex, HD) 기술 기반의 장비를 전이중 통신이 가능하도록 고도화할 때 높은 비용과 복잡한 기술이 필요하므로, 전체 장비들을 모두 한 번에 교체할 수 없고 부분적으로 교체해야 한다. 따라서 전체 장비의 특정 비율이 전이중이 가능하도록 주어졌을 때 전체 통신 환경에 대한 사용 주파수 대역 감소 정도와 전체 통신 용량의 증가 정도가 커지는 방향으로 전이중으로 고도화시킬 장비를 택하는 알고리즘을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 주어진 통신 링크들을 그래프로 치환하여 그래프의 꼭짓점의 중심성을 고도화할 장비 선택의 척도로써 사용하였다. 그리고 주어진 알고리즘을 통하여 전체 사용 주파수 대역 감소와 전체 통신 용량의 증가를 얻을 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 주파수 자원관리, 전이중 통신, 그래프 이론, 통합 필터 변별도, 자가 간섭 제거

Key Words : Resource Allocation, Full-Duplex, Graph Theory, Net Filter Discrimination, Self-Interference Cancellation

ABSTRACT

In this paper, we propose a graph-theory based frequency resource allocation algorithm for full-duplex (FD)-applied military D2D communication environments. Since changing half-duplex devices to full-duplex is expensive and complicated to implement, we are not able to replace all the devices at once. Hence, we should select proper devices for performance enhancements which are defined by the reduction of the range of frequency and the increase of system throughput. We suggest an algorithm that selects communication device pairs based on the centrality concept of graph theory. Numerical and analytical results confirm the performance enhancements, such as the range of frequency and the sum-rate.

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author : School of Integrated Technology, Yonsei University, hongbae08@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Integrated Technology, Yonsei University, cbchae@yonsei.ac.kr, 정회원

* School of Integrated Technology, Yonsei University, harpeng7675@yonsei.ac.kr, 학생회원

** ㈜데이터솔루션, shpark@datasolution.kr

*** Agency for Defense Development, jaedon@add.re.kr, 정회원

논문번호 : 201902-464-A-RE, Received February 15 2019; Revised April 8, 2019; Accepted May 7, 2019

I. 서 론

군 관련 상황에서 여러 군 통신 장비들이 도입될 때, 각 장비별로 주파수를 빠르게 할당해야 할 상황이 종종 발생한다. 여기서 사용되는 주파수 대역은 민간에서 쓰는 영역을 피해 매우 한정된 범위에서 정해지고 단가 역시 비싸다는 특징을 갖는다. 따라서 이러한 주파수 자원을 효율적으로 할당하면서 임의의 어느 두 장비도 간섭에 의한 통신 장애가 생기지 않도록 하는 방안이 필요하다. 기존의 연구에서는 이를 위하여 탐욕 알고리즘에 기반을 둔 방식을 많이 사용하였다^[1]. 이는 계산량이 적지만 효율이 최대가 아닌 해를 도출한다는 단점을 가진다.

본 논문에서는 이러한 주파수 지정 문제를 전이중 통신이 고려된 환경에서 푸는 알고리즘을 제시한다. 이러한 전이중 통신은 송수신단이 서로 같은 주파수 대역을 사용하므로 한정된 범위 내에서 사용해야 하는 군 관련 주파수 대역을 절약할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 전이중 통신은 송수신단이 동시에 정보를 전송하는데, 이를 통하여 전자전과 같은 급박한 군 관련 상황에서 전이중 통신을 사용하지 않는 경우에 비하여 시간적으로 적에 대한 기술적 우위를 점할 수 있다^[2]. 하지만 전이중 장비의 높은 복잡도와 가격으로 인하여 모든 군 장비들을 한 번에 전이중 장비로 바꿀 수는 없고, 대신 부분적으로 교체해야 한다^[3]. 따라서 특정 비율의 장비들에 전이중을 적용할 수 있다고 했을 때, 어떤 장비를 택하여 전이중 기술을 적용해야 전체 사용 주파수 대역 감소와 전체 전송 용량 증가에 대한 성능 향상이 최적화되는지에 대하여 고찰하였다. 그리고 이를 그래프 이론의 중심성 개념을 사용하여 해결하였으며, 기존의 반이중 기술을 사용하는 경우와 임의로 전이중 기술을 적용할 장비를 택하는 경우와 비교하여 제안한 알고리즘이 더 높은 성능을 가짐을 확인하였다.

II. 문제 정의

2.1 주파수 지정 문제

제한된 공간에서 통신 장비들의 집합 $\mathbb{D} = \{1, \dots, N\}$ 을 생각하고 이들 간의 쌍방향 통신 링크들을 생각하자. 여기서 홉수 k 에 대하여 장비 k 와 $k+1$ 이 쌍방향 통신 링크를 형성하고 있다고 가정해도 일반성을 잃지 않는다. 그리고 이러한 통신 링크들을 그래프 $G_1 = (\mathbb{V}, \mathbf{W})$ 로 치환할 수 있고, 여기서

장비의 통신 링크를 그래프의 꼭지의 집합 \mathbb{V} 로 정의하며 각 링크의 다른 링크에 대한 간섭들을 그래프의 모서리 (인접행렬) \mathbf{W} 로 정의한다. 링크 간 간섭의 크기 W_0 는 간섭신호의 수신 전력과 장비의 수신한계레벨 (T)을 이용해 아래 (1)과 같이 계산된다.

$$W_0 = P_t + G - PL - L - T \quad (1)$$

(1)에서 P_t 는 송신 전력, G 는 송수신단의 안테나 이득이며, L 은 전송 선로 손실 (Cable Loss)을 의미한다. 또한 PL 은 경로 손실 (Path Loss)이며 ITU P.525에서 정의하는 자유 공간 감쇠모델을 따른다. 그리고 이는 간섭 링크의 송신단과 피간섭 링크의 수신단 사이의 거리 d 와 간섭 링크의 주파수 f 에 영향을 받는다.

(1)로부터 계산된 예측 간섭량이 0보다 큰 경우 주파수를 서로 이격하여 간섭을 감쇠시켜야 한다. 이러한 감쇠의 정도는 통합 필터 변별도^[4] (NFD: Net Filter Discrimination) 함수 F 를 사용하여 구할 수 있으며 주파수가 Δf 만큼 이격되었다고 하였을 때 전력의 감쇠 정도 W_0 (dB)는 아래와 같이 정의된다.

$$F(\Delta f) = W_0 \quad (2)$$

그리고 여기서 W_0 값을 앞서 정의한 그래프의 모서리 가중치로써 정의하며, F 의 정의로부터 $F(0) = 0$ 이므로 이 경우 꼭지 간의 모서리는 생성되지 않는다.

이제 주파수를 할당하기 위하여 사용 가능한 주파수 집합 $\mathbb{S} = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ 를 정의한다. 각 주파수 대역은 동일하게 $U = 0.15$ MHz만큼 이격된 중심 주파수를 갖는다. 또한 주파수 지정 함수 $C: \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{N}$ 를 $v \in \mathbb{V}$ 에 대하여 $C(v)$ 를 링크 v 에 배정된 주파수의 번호 ($C(v) \in \{1, \dots, M\}$, M 은 사용할 수 있는 주파수의 최대 개수)와 같이 정의할 수 있고, 이는 대역폭 $B = 15$ MHz에 대하여 링크 v 의 중심 주파수는 $f_v = B + U \cdot C(v)$ 와 같이 주어짐을 의미한다. 그리고 이에 대하여 아래 (3)을 만족시키는 함수 C 를 찾는 것을 주파수 지정 문제라 정의한다.

$$|C(v) - C(w)| \geq F^{-1}(\max(\mathbf{W}_{vw}, \mathbf{W}_{wv}, 0)) / U \quad (\forall v, w \in \mathbb{V}) \quad (3)$$

2.2 전이중 기술의 적용

앞서 주어진 통신 환경에 전이중 기술이 적용된 상

황을 생각하기 위하여 먼저 아래와 같이 $N \times N$ 간섭 행렬 \mathbf{E} 을 생각하자.

$$\mathbf{E}_{ij} = \begin{cases} \frac{P_i + G - PL_{ij}}{10} & (i \neq j) \\ 0 & (i = j) \\ E_{SI} & (i, j \text{ are comm. pair}) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 i, j 는 장비의 번호이고, P_i 는 장비 i 의 송신 전력이며, PL_{ij} 는 장비 i 에서 j 로의 경로 손실이다. (4)는 장비 i 가 j 에 미치는 간섭의 정도에 대응하며, E_{SI} 는 전이중에서 자가 간섭 제거 전의 자가 간섭에 대응한다. 그리고 위 정의로부터 또 다른 유향 그래프 $G_2 = (\mathbb{D}, \mathbf{E})$ 를 장비들을 꼭지로 하고 장비 간의 간섭의 정도를 모서리로 정의함으로써 생각할 수 있다. 이제 홀수 k 에 대하여 만일 통신 링크 $k \leftrightarrow k+1$ 에 전이중을 적용한다고 가정하면 이에 대응하는 상호 링크가 같은 주파수를 갖게 되고, 자가 간섭 제거를 통하여 $\mathbf{E}_{k,k+1} = \mathbf{E}_{k+1,k} = E_{SI} = 0$ 역시 얻을 수 있다. 그러나 여기서 자가 간섭 제거가 완벽하지 않으므로^[3,5] 자가 간섭이 $gE_{SI} (g \ll 1)$ 와 같이 일정 부분 남게 되고, 이는 곧 신호-대-간섭-잡음 비 (Signal-to-Interference-Noise Ratio, SINR)에 영향을 준다.

2.3 그래프 중심성

앞서 전체 통신 환경을 유향 그래프 G_2 로 치환하였고, 여기서 꼭짓점 사이의 “중요도”를 꼭짓점 마다 숫자를 대응시킴으로써 나타낼 수 있으며 이를 “그래프 중심성 (Centrality)”라 한다. 본 논문에서는 입력 연결 중심성 (In-Degree Centrality)과 권위 중심성 (Authority Centrality)을 도입하였으며, 이는 유향 그래프에서 각각 꼭짓점의 입력 차수 (In-Degree)와 각 꼭짓점이 얼마나 많이 다른 꼭짓점에 지목되어 간섭을 받는지에 대한 척도에 대응한다. 그리고 꼭짓점 i 의 입력 연결 중심성 d_i 와 권위 중심성 e_j 는 각각 아래와 같이 주어진다^[6].

$$\begin{cases} d_i = \sum_j \mathbf{E}_{ji} \\ e_i : \mathbf{E}\mathbf{E}^T \text{의 가장 큰 고유값에 대응하는} \\ \text{고유벡터의 } i \text{번째 성분} \end{cases} \quad (5)$$

그리고 위 값을 각 꼭짓점마다 구하여 이들이 가장 크거나 작은 꼭짓점들을 일정 비율 택하여 전이중 기

알고리즘 1. FD-COG

- 1) 통신 링크 쌍의 중심성의 합을 각 쌍방 링크마다 계산하여 상위 $100p_{FD}\%$ 의 쌍에 전이중을 적용함.
- 2) 그래프 $G_1 = (\mathbb{V}, \mathbf{W})$ 각 꼭짓점마다 색깔을 칠함. 여기서 1번 꼭지에는 1번 색을 칠하고, k 번 꼭지에는 k 와 연결된 꼭지들에 칠해져있지 않은 색깔 중 가장 자주 사용된 색깔을 칠하며, 후보가 여럿인 경우 번호가 가장 작은 색깔을 칠함. 그리고 각 색을 칠할 때 마다 전이중인 쌍에는 서로 같은 색을 칠함.
- 3) 같은 색인 꼭지들을 모아서 새로 그래프를 형성함. (모서리의 가중치: 기존 그래프의 서로 다른 두 색 간의 모서리의 가중치들 중 최댓값)
- 4) (3)을 사용하여 연결도가 큰 장비부터 주파수를 배정함.

술을 적용하였다.

III. 제안 알고리즘

3.1 주파수 대역폭 감소의 측면

서론에서 언급했듯이 특정 비율 p_{FD} 의 장비들에 전이중을 적용할 수 있다고 했을 때, 사용 주파수 대역을 최소화시키는 최적화 문제는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{C, \mathbb{F}} \chi = \max(\{C(v) : v \in \mathbb{V}\}) \\ & \quad - \min(\{C(v) : v \in \mathbb{V}\}) \\ & \text{s.t } \mathbb{F} = \{k : \mathbf{E}_{k,k\pm 1} = \mathbf{E}_{k\pm 1,k} = 0\}, \frac{|\mathbb{F}|}{N} = p_{FD} \\ & \quad (+: \text{odd } k, -: \text{even } k) \\ & \quad |C(v) - C(w)| \geq F^{-1}(\max(0, \mathbf{W}_{vw}, \mathbf{W}_{wv})) / U \\ & \quad (\forall v, w \in \mathbb{V}) \end{aligned} \quad (6)$$

즉, 전이중을 적용할 장비의 번호의 집합 \mathbb{F} 와 주파수 배정 함수 C 를 적절히 선택해서 위 χ 를 최소화해야 되는데, 이는 NP-Hard 문제이므로 알고리즘 1과 같은 FD-COG 알고리즘을 사용한다. 이는 [4]에서 제시된 COG 알고리즘을 전이중 상황에 맞게 변형한 것이다. 또한 여기서 중심성이 높을수록 주파수 대역이 감소하는 정도가 커지므로 큰 중심성을 갖는 꼭지의 링크를 전이중으로 적용하였으며, 성능을 높이기 위하여 알고리즘 1의 단계 4)에서 주파수를 배정하는 장비의 순서를 서로 뒤바꾸는 방식의 “유전 알고리즘 (Genetic Algorithm)”^[7]을 적용하여 χ 를 추가적으로 감소하는 효과를 피하였다.

3.2 전송 용량 증가의 측면

장비 k 가 반이중 통신을 사용할 경우 수신 SINR은 아래와 같다.

$$\text{SINR}_{k,HD} = \frac{P_{t(k\pm 1)}|h_k|^2}{N_0 + \sum_{i \neq k\pm 1} \mathbf{E}_{i_k}} \quad (7)$$

여기서 N_0 는 잡음의 크기, h_k 는 장비 k 에게 주어진 채널 정보이며 여기에서도 마찬가지로 k 가 홀수이면 +, 짝수이면 -를 위 식에서 택하였다. 그리고 이로부터 전송 용량은 아래 식과 같이 주어진다.

$$R_{k,HD} = E[\log_2(1 + \text{SINR}_{k,HD})] \quad (8)$$

그리고 전이중 통신을 사용할 경우 수신 SINR은

$$\text{SINR}_{k,FD} = \frac{P_{t(k\pm 1)}|h_k|^2}{N_0 + \sum_{i \neq k\pm 1} \mathbf{E}_{i_k} + gE_{SI}} \quad (9)$$

와 같이 주어지며, 이로부터 전송 용량은 아래와 같다.

$$R_{k,FD} = 2E[\log_2(1 + \text{SINR}_{k,FD})] \quad (10)$$

따라서 전체 최적화 문제는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{maximize}_{\mathbf{P}} R &= \sum_{k \in \mathbb{F}} R_{k,FD} + \sum_{k \in \mathbb{D} - \mathbb{F}} R_{k,HD} \\ \text{s.t. } \frac{|\mathbb{F}|}{N} &= p_{FD} \end{aligned} \quad (11)$$

그리고 여기서 아래 정리 1을 통하여 작은 중심성을 갖는 꼭지의 링크를 전이중으로 적용하는 것이 전송 용량의 증가 측면에서 더 유리함을 알 수 있다.

정리 1) 비선형적 자가 간섭 제거 (Nonlinear SIC)^[5]와 같은 높은 성능의 SIC를 사용하였다고 가정하면 (8)과 (10)에 의하여 전이중과 반이중의 전송 용량의 차이는 꼭짓점 k 의 입력 연결 중심성 $\sum_{i \neq k\pm 1} \mathbf{E}_{i_k}$ 에 대한 감소함수이다.

증명) $\sum_{i \neq k\pm 1} \mathbf{E}_{i_k} = x (> 0)$ 에 대하여 $R_{k,FD} - R_{k,HD}$ 를 아래와 같이 쓸 수 있다.

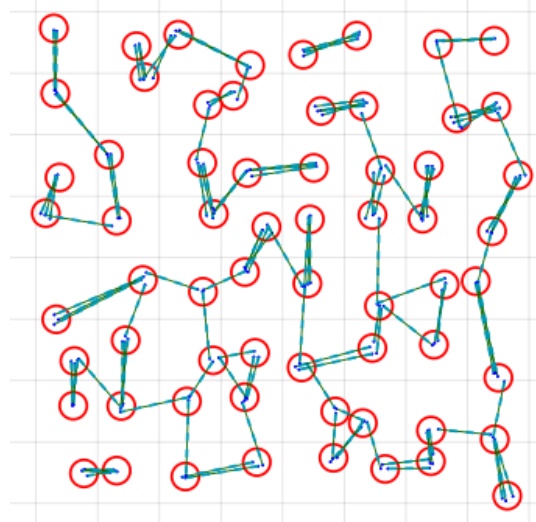


그림 1. 장비 분포 및 링크 형성 토폴로지 예시
Fig. 1. Example of topology of the devices and the links

$$\begin{aligned} R_{FD} - R_{HD} &= 2\log\left(1 + \frac{Ph^2}{N_0 + x + gE_{SI}}\right) - \log\left(1 + \frac{Ph^2}{N_0 + x}\right) \quad (12) \end{aligned}$$

그리고 이를 x 에 대하여 미분하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(R_{FD} - R_{HD}) &= \frac{Ph^2(gE_{SI} - N_0 - x)}{(1 + Ph^2)(N_0 + x)(N_0 + x + gE_{SI})} \quad (13) \end{aligned}$$

(13)에서 분모는 양수이므로 분자가 음수이면 되는데, 이는 아래와 동치이다.

$$x > gE_{SI} - N_0 \approx -N_0 (g \ll 1) \quad (14)$$

그리고 여기서 $x > 0$ 임을 사용하면 위 (14)은 참임을 알 수 있다. 따라서 증명 끝. ■

IV. 성능 평가

4.1 시험 환경

본 논문에서는 그림 1과 같이 100km×100km와 40km×40km 크기의 지형에 각각 244개와 24개의 장비들이 배치되어 있는 구조를 가정한다. 여기서 링크의 최대 거리는 20km로 제한한다. 장비의 수신한계레벨 T 는 -70dBm이며 각 장비는 10dBm의 송신 전력

을 사용한다. 또한 잡음의 크기 N_0 는 -120dBm 으로 가장하였으며 SIC의 정도 g 는 -80dB 로 가장하였다. 그리고 주어진 알고리즘과의 비교를 위하여 모두 기존의 반이중이 적용된 방식과 임의로 통신 링크를 골라서 전이중으로 바꾸는 방식 역시 고려하였다. 또한 장비 개수가 같게 주어진 200개의 서로 다른 장비 배치 구조들에 대한 독립적인 반복 시행을 통하여 사용 주파수 대역의 감소 정도와 전체 전송 용량을 측정하고 평균을 계산하였다.

4.2 성능 비교

그림 2는 입력 연결 중심성과 권위 중심성이 큰 상위 $100p_{FD}\%$ 만큼의 통신 링크들에 전이중 기술을 적용시켰을 때의 사용 주파수 대역의 감소의 정도를 p_{FD} 를 바꿔가면서 나타내었다. 이로부터 중심성 개념을 사용하였을 때 주파수 대역을 약 30% 정도 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 이는 임의로 링크를 골랐을 때에 비해서 더 나은 성능임 역시 알 수 있다.

그림 3은 입력 연결 중심성과 권위 중심성이 작은 하위 $100p_{FD}\%$ 만큼의 통신 링크들에 전이중 기술을 적용시켰을 때의 전체 전송 용량을 전이중 장비의 개수 (p_{FD})를 바꿔가면서 나타내었다. 이로부터 중심성 개념을 사용하였을 때 무차별 대입 (Brute-Force Search)을 사용하여 구한 최대 전체 전송 용량에 근접한 결과를 얻을 수 있었으며, 이 역시 임의로 링크를 골라서 전이중을 적용했을 때에 비해서 더 나은 성능임 역시 알 수 있다.

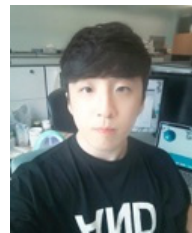
V. 결 론

본 논문에서는 전이중 기술이 적용된 장비간의 통신 환경에서 그래프 이론의 중심성 개념을 적용한 주파수 배정 알고리즘을 제시하였고, 시뮬레이션을 통하여 이에 대한 사용 주파수 대역의 감소 정도와 전체 전송 용량의 증가 정도를 확인하였다. 본 논문의 결과를 토대로 군 전용 통신망에서 전이중 기술을 사용하여 효율적으로 한정된 주파수를 사용하고 적군 장비와의 전자전 상황에서 우위를 점하는 체계를 계획할 수 있을 것이다.

References

- [1] J. Riihijärvi, M. Petrova, and P. Mähönen, "Frequency allocation for WLANs using graph colouring techniques," *Ad Hoc & Sensor Wireless Netw.*, vol. 3, pp. 121-139, 2007.
- [2] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, and M. Valkama, "On the prospects of full-duplex military radios," *ICMCIS*, pp. 1-6, Oulu, 2017.
- [3] M. Chung, M. S. Sim, J. Kim, D. K. Kim, and C.-B. Chae, "Prototyping real-time full duplex radios," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 56-63, 2015.
- [4] H. B. Yilmaz, B. Koo, S. Park, H. Park, J. Ham, and C.-B. Chae, "Frequency assignment problem with net filter discrimination constraints," *J. Commun. Netw.*, vol. 19, no. 4, pp. 329-340, 2017.
- [5] M. S. Sim, M. Chung, D. Kim, J. Chung, D. K. Kim, and C.-B. Chae, "Nonlinear self-interference cancellation for full-duplex radios: From link-level and system-level performance perspectives," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 158-167, 2017.
- [6] M. Newman, *Networks*, OUP Oxford, 2018.
- [7] K. Chae and S. Yoon, "A transmission parameter optimization scheme based on genetic algorithm for dynamic spectrum access," *J. KICS*, vol. 38A, no. 11, pp. 938-943, Dec. 2013.

전 홍 배 (Hong-Bae Jeon)



2017년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학부 졸업
2017년 9월 : 동대학원 석박사
통합과정
<관심분야> 전자공학, 통신공
학, 광통신 공학

[ORCID:0000-0003-3138-2753]

구 본 흥 (Bonhong Koo)



2014년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학과 졸업
2014년 3월~현재 : 동대학원 석박사 통합과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

[ORCID:0000-0001-9748-8281]

박 성 호 (Sung-Ho Park)



1984년 : 고려대학교 수학과 학사
<관심분야> 군통신용 라디오전파

채 찬 병 (Chan-Byoung Chae)



2008년 : 미국 텍사스오스틴 전기컴퓨터공학과 박사
2008년~2009년 : 하버드 대학 박사 후 연구원
2009년~2011년 : 미국 벨 연구소 책임연구원
2011년~현재 : 연세대학교 언더우드 특훈교수

<관심분야> 무선 네트워크

[ORCID:0000-0001-9561-3341]

박 재 돈 (Jaedon Park)



2000년 2월 : 한양대학교 전기전자공학부 졸업
2002년 2월 : KAIST 공학석사
2016년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학부 공학박사
2002년 1월~현재 : 국방과학연구소 재직중

<관심분야> Free-space optical communications, 군스펙트럼 분석

[ORCID:0000-0001-5648-2211]