

5G 시스템에서의 비-직교 다중 액세스(NOMA)

리아즈*, 김재명*, 광경섭°

On Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems

SM Riazul Islam*, Jae MOUNG Kim*, Kyung Sup Kwak°

요약

NOMA는 차세대 유망한 무선 접속 기술 중 하나다. 중첩코딩(SC: superposition coding) 기술을 활용한 송신부와 순차적 간섭 제거(SIC: successive interference cancellation) 기술을 탑재한 수신부를 갖춘 NOMA는 다수의 바람직한 특징을 가지고 있으며, 기존의 LTE에서 채택하고 있는 직교 다중 접속(OMA) 방식인 직교 주파수 분할 다중(OFDMA)기술에 비해 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 5G 시스템에서의 NOMA에 관한 최근의 연구 동향을 분석하였다. 먼저, NOMA의 기본 개념을 논하고 장래 무선 기술 분야에서의 그 중요성을 진단하였다. 다음은, 5G 시스템에서의 NOMA에 대한 가장 최근의 주요 기술들을 분석하고, 다양한 항목별로 분류하여 제시하였다. 마지막으로 NOMA의 성능을 수치해석 결과를 통해 분석하고, NOMA의 현안과 난제에 기반하여 향후 해결해야 할 이슈들을 제시하였다.

Key Words : NOMA, Superposition coding(SC), Successive interference cancellation(SIC), Orthogonal multiple access(OMA), OFDMA

ABSTRACT

The non-orthogonal multiple access (NOMA) is one of the fledging paradigms which next generation radio access technologies are sprouting toward. The NOMA with superposition coding (SC) in the transmitter and successive interference cancellation (SIC) at the receiver comes with many desirable features and benefits over orthogonal multiple access (OMA) such as orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) adopted by Long-Term Evolution (LTE). In this paper, we study the recent research trends on NOMA in 5G systems. We discuss the basic concept of NOMA and explain its aspects of importance for future radio access. Then, we provide a survey of the state of the art in NOMA for 5G systems in a categorized manner. Further, we analyze the NOMA performances with numerical examples; and provide some avenues for future research on NOMA on a set of open issues and challenges.

1. 서론

이동 통신 서비스의 안정성을 지속적으로 확보하고 사업자와 사용자들의 늘어나는 수요를 충족시키기 위

해 2020년까지 5G 이동 통신 서비스가 출현될 것으로 예측된다. 5G 네트워크의 가장 중요한 과제는 4G 네트워크보다 월등한 주파수 효율을 달성하는 것이다. 이는 2020년대의 모바일 데이터 트래픽이 2010년과

※ 본 연구는 미래창조부 및 정보통신기술진흥센터 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8601-15-1019)

• First Author : Inha Univ. UWB Wireless Communications Research Center, islam.smriaz@inha.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Inha Hanlim Fellow Professor, kskwak@inha.ac.kr, 종신회원

* Inha University, jaekim@inha.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-09-297, Received September 7 2015; Revised December 8, 2015; Accepted December 15 2015

비교했을 때 적어도 1000배 이상의 기하급수적인 증가를 보일 것으로 예상되기 때문이다. 특히 5G의 피크 전송률(peak data rate)은 10~20 Gbps로 예상되며 이는 4G의 최대 전송률보다 10~20배 큰 수치이다. 또한 5G의 체감 전송률은 1 Gbps일 것으로 예상된다(4G의 경우보다 100배 큰 수치임)

셀룰러 네트워크의 시스템 성능을 향상시키는 가장 중요한 요소는 일반적으로 무선 접속 기술의 설계이며, 그 중에서도 특히 다중 접속 기술이다. 다중 접속 기술은 보통 직교 방식과 비-직교 방식의 두 가지 유형으로 분류된다¹⁾. 직교 방식에서는 각기 다른 사용자로부터의 신호가 서로에게 직교한다, 즉 상호 상관값이 0이다(시스템의 대역폭과 시간 등 가용 자원이 사용자들 간에서 분산된다). 코드 분할 다중 접속(CDMA)과 같은 비-직교 방식은 사용자 신호간의 상관 관계가 0이 아닐 수 있다. IS-95, CDMA2000, 광대역 CDMA(WCDMA)와 같은 2세대, 3세대 셀룰러 시스템은 사실 비-직교 다중 접속(MA: multiple access) 기술을 채택하였다. CDMA는 셀 상호 간섭(cross-cell interference)과 페이딩(fading) 현상에는 강하지만 셀 내 간섭(intracell interference)에는 보다 취약하다. 적절한 셀 설계가 이루어진다면 직교 다중 접속(orthogonal multiple access: OMA)의 경우 셀 내의 사용자 간의 간섭을 피할 수 있다. 때문에 대부분의 1세대와 2세대 셀룰러 시스템이 OMA 방식을 채택하였다. 또한 4G 시스템, 즉, LTE와 LTE-A도 OFDMA 기반의 OMA 방식이 채택되었다.

셀 내 간섭의 억제력에서 실용적인 면에도 불구하고, CDMA는 대역 확산(spread-spectrum)의 특성 때문에 데이터 전송 속도(data rate)에 한계가 있다. OMA는 시스템 수준의 처리 효율(throughput)의 관점으로 본다면 좋은 성능을 기대할 수 있는 선택이다. 하지만 앞서 언급한 이유들 때문에 5G 네트워크는 보다 높은 시스템 효율을 필요로 한다. 다수의 연구자들은 미래 무선 접속의 잠재적 무선 접속 방식으로서 NOMA를 연구하기 시작했다. NOMA는 송신기의 중첩코딩(SC)과 수신기의 순차적 간섭 제거(SIC) 기술을 바탕으로 월등한 스펙트럼 효율을 달성할 수 있다^{2,3)}. 주지해야 할 사항은 중첩코딩을 사용하면 송신기는 다중 사용자의 정보를 동시에 전송할 수 있다. 이 목적을 달성하기 위하여서는, 송신기는 각 사용자의 정보를 각각 부호화 해야 한다. 예를 들어, 두 명의 사용자의 경우, 송신기는 두 개의 부호화기가 필요하며, 이 부호화기는 각 사용자의 입력 정보를 복소 시퀀스로 매핑시킨다. 중첩코딩은 비직교 부호화 방식으로 가우시안

방송 채널 상에서 통신용량을 달성할 수 있다.

순차적 간섭제거(SIC) 기술은 물리계층에서 사용되는 기법으로 수신기 측에서 다중 수신신호를 동시에 처리하는데 사용된다²⁰⁾. 이 기술은 고려 대상의 신호들 중에서 신호 강도의 차이를 이용하여 수신기에서 신호를 처리하게 한다. 즉, 수신기는 보다 강한 신호를 복호화한 후, 중첩된 신호로부터 강한 신호를 먼저 추출하고, 이후 나머지 신호로부터 약한 신호를 제거한다. 중첩코딩과 순차적 간섭제거 관련 해석적 방법은 참고 문헌^{12, 21)}을 참고하기 바란다.

최근 몇 년 간, NOMA는 5G 기술의 필요 조건을 충족시킬 수 있다는 차원에서 연구자들의 주목을 끌어들였다. 그 결과, 이미 다수의 연구 결과가 있으며, NOMA와 관련된 연구 분야는 다양한 주제들을 포함하고 있다. 성능 분석, 협력 통신, 공정성 문제(fairness issue) 등이 그 예다. 하지만, 5G에서의 NOMA 기술은 여전히 초창기에 머물러 있는 단계이기 때문에, 5G 시스템에서의 NOMA 기술에 대한 현재까지의 연구 현황을 총체적으로 파악하는 일은 이 분야에 대한 더 많은 연구를 이끌어내기 위해 무척 중요하다. 본 논문에서 가장 최근의 NOMA 연구 경향을 살펴보고 NOMA가 무선 접속 기술의 변화를 이끌기 위해 앞으로 해결되어야 할 다양한 문제점들을 조사한다. 본 논문은 다음과 같은 관점에서 NOMA를 연구하고 분석하였다.

- NOMA의 기본 개념을 제시하며 5G 네트워크 내 다중 접속 기술의 후보 기술로 NOMA를 분석함.
- 현존하는 NOMA 연구 결과를 항목별로 분류한 뒤 각 항목에 대한 요약 정보와 성능 수치 결과를 제공함.
- NOMA의 완전 상용화를 위해 해결되어야 할 도전 과제와 문제점들을 진단함.

본 논문은 제 2절에서 NOMA의 개념과 그 중요성을, 제 3절에서는 NOMA의 주요 연구 동향을 제시하고, 제 4절에서 NOMA와 OMA와의 성능 비교, 제 5절에서는 향후의 연구 방향 그리고 결론을 6절에 기술하였다.

II. NOMA의 개념과 중요성

하나의 기지국(base station: BS)과 N 명의 사용자 $U_i (i \in N = 1, 2, \dots, N)$ 가 있고 각 단말기는 단일

안테나를 사용하고 있고, 단일 셀(single-cell) 하향링크(down-link) 상황을 고려한다. 마찬가지로, 상향링크(up-link) 상황에서도 동일한 NOMA 구성을 사용할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 하향링크만을 고려한다. 기지국은 언제나 모든 사용자들에게 동시 다발적으로 정보를 송신한다. 이때 기지국이 정보를 송출하는 전체 전력은 일정하며 이를 P 라 한다. 이때 무선 링크는 독립적이며 동일한 분포(independently, identically distributed)를 가지며, 이 분포는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 신호와 부가 백색 가우스 잡음(AWGN)이라 가정한다. 채널은

$0 < |h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq \dots \leq |h_i|^2 \dots \leq |h_N|^2$ 의 순차적 크기로 가정하며, 이는 매 순간 사용자 U_i 가 i 번째로 열악한 채널을 차지하게 됨을 의미한다. NOMA는 기지국의 SC 기술과 사용자측의 SIC 기술을 통해 전체 시스템 대역폭을 사용하여, 모든 사용자들에게 동시에 서비스를 제공할 수 있다. 사용자 다중화(user multiplexing)는 전력할당 측면에서 수행된다. 기지국은 N 명 사용자의 데이터를 선형 중첩(linear superposition)하여 전송하며 이때 전체 전력(P)을 β_i 의 비율로 각 사용자 U_i 에게 할당한다. 따라서 i 번째 사용자에게 할당된 전력은 $P_i = \beta_i P$ 이다. 데이터를 수신할 때 각 사용자는 자신보다 더 약한 신호를 가진 사용자의 신호를 복호화할 수 있다. 예를 들어 사용자 U_i 는 $m < i$ 일 때, 사용자 U_m 의 신호를 복호화할 수 있다. 그 후 약한 사용자 신호는 전체 수신 신호에서 제거된 후, 사용자 U_i 본인의 신호를 복호화한다. 이때 $m > i$ 인 가정 아래 더 강한 사용자 U_m 을 위한 신호는 간섭(interference)로 간주한다. U_i 가 수신한 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다

$$y_i = h_i x + w_i \tag{1}$$

여기서 $x = \sum_{i=1}^N \sqrt{P\beta_i} S_i$ 는 BS에 의해 전송된 중첩 코딩의 신호이며 S_i 는 U_i 의 신호를 뜻한다. 또한 w_i 는 평균이 0이고 σ_n^2 을 분산으로 가지는 사용자 U_i 의 AWGN이다. BS의 신호 중첩과 U_i 의 SIC가 완벽하게 적용되었을 경우, 사용자 U_i 가 1Hz의 시스템 대역(bandwidth)에서 얻을 수 있는 데이터 전송 속도(data rate)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_i = \log \left(1 + \frac{\beta_i P |h_i|^2}{P |h_i|^2 \sum_{k=i+1}^N \beta_k + \sigma_n^2} \right) \tag{2}$$

여기서 강한 사용자의 의미는 신호가 보다 좋은 채널 조건을 가진다는 의미이며 신호 자체가 강함을 의미 하지 않는다. 즉, 보다 약한 전송 전력은 보다 강한 사용자에 할당한다. 결과적으로 약한 사용자 신호는 보다 강한 신호가 된다. NOMA 기술은 강한 신호를 먼저 복호화 처리하게 하는 SIC의 기본 개념에 모순이 되지 않는다.

그림 1은 앞서 언급했던 두 명의 사용자를 가진 NOMA 구성을 도식화한 것이다. 이 그림은 또한 OMA와 비교했을 때 NOMA가 가지는 장점을 보여주기 위해 OMA 구성도 역시 도식화 하고 있다. NOMA의 경우, 1Hz의 전체 BW를 두 사용자에 의해 동시에 사용되고 있다. 하지만 OMA의 경우 사용자 1이 α Hz를 사용하며 사용자 2에게는 남은 $(1-\alpha)$ Hz가 배정된다. NOMA에서는 사용자 1이 사용자 2를 위한 신호를 복호화하기 위해 먼저 SIC를 시행한다. 이는 사용자 1의 채널 이득(channel gain)이 사용자 2보다 높기 때문이다. 복호화된 신호는 사용자 1이 수신 받은 전체 신호에서 제거된다. 이 결과 신호는 사용자 1 자신의 신호를 복호화하는데 쓰이게 된다. 사용자 2는 SIC를 시행하지 않고 그 신호를 바로 복호화한다. 따라서 사용자 1과 사용자 2가 얻을 수 있는 데이터 전송 속도는 각각 (3)과 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$R_1 = \log(1 + P_1 |h_1|^2 / \sigma_n^2) \tag{3}$$

$$R_2 = \log(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{P_1 |h_2|^2 + \sigma_n^2}) \tag{4}$$

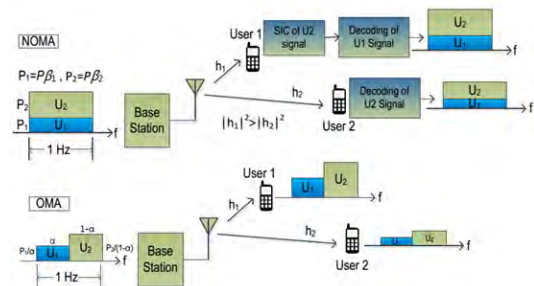


그림 1. NOMA and OMA schemes with spectrum usage comparison for two users' case

OMA의 경우, 사용자 1과 사용자 2가 얻을 수 있는 데이터 전송 속도는 각각 (5)와 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$R_1 = \alpha \log(1 + P_1|h_1|^2/\sigma_n^2) \quad (5)$$

$$R_2 = (1 - \alpha) \log(1 + P_2|h_2|^2/\sigma_n^2) \quad (6)$$

(3)과 (4)는 NOMA 구성에서는 전력의 할당 비율 P_1/P_2 의 조절을 통하여 각 사용자의 처리량을 얻을 수 있음을 보여준다. 따라서 전체 처리량과 사용자 공정성(user fairness)은 전력의 할당과 밀접한 관련이 있다. 비대칭 채널(asymmetric channel)을 고려할 경우(두 사용자의 신호대잡음비(SNR)가 다른 경우), (3)과 (4)를 통해 얻은 값이 (5)와 (6)을 통해 얻을 수 있는 값보다 큼을 수치해석을 통해 알 수 있다[2]. 따라서 NOMA는 두 명의 사용자가 각기 다른 채널을 사용하는 경우 시스템 레벨의 처리량 측면에서 보다 효율적임을 알 수 있다. 때문에 NOMA는 향후 유망한 차세대 무선 접속 기술의 후보로 주목 받고 있다.

III. NOMA의 연구 동향

이 절에서 현존하는 NOMA 연구 사례 및 결과를 항목별로 분류하여 간략하게 제시한다. 본 논문의 주요 목적이 5G NOMA 시스템에 대한 최근의 연구 경향을 이해하는 것이기 때문에 각 기술에 대한 자세한 수학적 분석은 생략하였다.

3.1 성능 문제

다수의 연구자들이 5G 시스템의 다중 접속기술로서의 적합성을 판단하기 위해 NOMA의 성능을 연구하였다. 결과, 차세대 무선 접속 기술의 가능성을 전력 측면에서 NOMA가 사용자 다중화 기술의 새로운 대안임을 확인하였다[4]. 사용자가 무작위로 배치되어 있는 셀룰러 네트워크에서, 사용자의 데이터 속도와 전력을 적절히 할당할 경우, NOMA는 OMA에 비해 보다 우수한 아웃티지(outage) 성능을 보임을 확인하였다[5]. 또한 NOMA가 보다 우수한 에르고딕 합산 속도(ergodic sum rate)를 가진다는 것을 확인하였다. 신호대잡음비(SNR)가 높은 경우, 반경 R_D 인 전형적인 원판 모양의 무선 서비스 영역에서 i 번째 사용자의 아웃티지 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_i^{out} = \frac{\tau_i}{i} \eta^i (\psi_i^*)^i \quad (7)$$

여기서, $\tau_i = \frac{N!}{(i-1)!(N-i)!}$, $\eta = \frac{1}{R_D} \sum_{l=1}^L \beta_l$,
 $\beta_l = \frac{\pi}{l} \sqrt{1 - \theta_l^2} \left(\frac{R_D}{2} \theta_l + \frac{R_D}{2} \right) \left(1 + \left(\frac{R_D}{2} \theta_l + \frac{R_D}{2} \right)^\alpha \right)$, $\theta_l = \cos \left(\frac{2n-l}{2L} \pi \right)$.

또한 L , α , ψ_i^* 는 각각 복잡도 절충 변수(complexity trade-off parameter), 경로 손실(path-loss) 계수, 그리고 i 번째 사용자의 데이터 전송 속도에 해당하는 최대 SNR을 의미한다. 또한 충분한 사용자 수 N 과 적절한 전송 신호대잡음비, ρ 가 주어 진다면 NOMA는 다음의 에르고딕 합산 속도를 얻을 수 있다.

$$R_{erg} = \log(\rho \log \log N) \quad (8)$$

참고문헌 [6]에서는 단일 사용자-다중입출력(single user-MIMO)의 상황에서 행렬의 계수 최적화(rank optimization)가 NOMA의 성능에 주는 영향을 집중적으로 분석하고 있다. 이를 통해 SU-MIMO 기술과 결합한 NOMA가 채널 행렬의 계수(rank)를 조절함으로써 어떻게 시스템 성능을 보다 향상시킬 수 있는지 보여주고 있다.

3.2 협력적 NOMA

문헌 [7]에서 제안하고 있는 협력적 NOMA(Cooperative-NOMA) 방식은 기존의 NOMA 시스템이 가진 사전 정보를 활용하고 있다. 이 방식에서는, 보다 나은 채널 환경을 가진 사용자들이, 다른 사용자들을 위해 수신 메시지를 복호화하여, 기지국과의 연결 상태가 좋지 않은 사용자들의 수신 성능을 향상시켜 주는 중계기 역할을 한다. 채널 환경이 좋은 사용자와 그렇지 못한 사용자 간의 협력적 통신은 UWB와 블루투스 와 같은 근거리 통신 기술을 이용한다. 협력적-NOMA는 모든 사용자들로 하여금 최대 다이버시티(maximum diversity)를 성취할 수 있도록 협력할 수 있다는 점이 증명되었다. 협력적-NOMA의 전체 아웃티지 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$P^{out} \doteq 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i^{out}) \quad (9)$$

협력적-NOMA 방식은 특정한 할당 비율에 따라, i 번째 최적 사용자로 하여금 N 차의 다이버시티를 경험할 수 있도록 한다. 하지만 협력적-NOMA는 추가의 타임 슬롯(time-slot)을 필요로 하기 때문에 보다 넓은 대역폭을 요구한다. 이는 협력 단계의 중계 역할을 담당하는 사용자들의 일련의 메시지를 다시 송신해야 하기 때문이다. 시스템 복잡도를 줄이기 위해, 협력적-NOMA는 고유의 채널 이득(channel gain)에 근거하여 사용자들을 짝으로 묶어서(pairing) 실행된다. 협력적-NOMA의 성능은 최적의 전력 할당 계획을 통하여 보다 향상된 성능을 얻을 수 있다^{8,9)}.

3.3 NOMA의 사용자 공정성(fairness)

전력 할당이 공정성의 성능에 미치는 영향은 참고 문헌 [10]에서 연구된 바 있다. 다음 두 가지 가정을 고려하여 공정성 관점에서 전력 할당의 문제점을 연구하였다. i) BS가 완전한 채널상태정보(CSI: channel state information)를 가지고 있어, 채널 환경에 따라 사용자의 데이터 속도를 적응적으로 설정할 때, ii) 평균적 CSI 조건에서 사용자들이 고정된 목표 데이터 속도를 가지고 있을 때, 최적의 해법을 산출할 수 있는 저-복잡도의 알고리즘을 도출하였다. 이 연구는 NOMA 방식이 최악의 채널 환경을 가지고 있는 사용자들의 무선 접속 성능을 월등히 향상시킴으로써 기존의 다중접속 방식을 능가하는 장점을 가지고 있음을 확인하였다. 만일 BS가 시변적 CSI 정보를 얻을 수 있다면, 사용자들 간의 공정성은 사용자들의 최소 전송 속도를 최대화함으로써 실현될 수 있다.

$$\max_{\beta} \min_{i \in N} R_i(\beta) \quad (10a)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^N \beta_j = 1 \quad (10b)$$

$$0 \leq \beta_j, j \in N \quad (10c)$$

문제 (10)은 볼록함수(convex)가 아니기 때문에, 먼저 선형계획법(linear programming)으로 변환해야 한다. 즉, 문제 (10)에 대한 최적의 해법은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_i = \frac{2^t - 1}{P|h_i|^2} \left(P|h_i|^2 \sum_{k=i+1}^N \beta_k + \sigma_n^2 \right) \quad (11)$$

$$i = N, N-1, \dots, 1.$$

여기서, t 는 최소 데이터 전송 속도를 의미한다. 시변적 CSI 정보를 획득하지 못할 경우, 우리는 평균 CSI 값을 사용하여 아웃티지 확률을 최적화하여야 한다. 이 경우, (10b)와 (10c) 조건하에서 최대 아웃티지 확률을 최소화함으로써 사용자 공정성을 보장할 수 있다. 즉, $\max_{\beta} \min_{i \in N} P_i^{out}(\beta)$. 하지만 불행하게도 이 공정성 연구는 달성 가능한 최대 공정성 속도를 도식적으로 제시하지 않고 있으며, NOMA와 시분할 다중접속(TDMA) 방식 간의 확인할 수 있는 비교 결과를 제시하지 못하고 있다.

3.4 NOMA와 빔 포밍(beamforming)

NOMA의 다중 사용자 빔 포밍(BF: beam forming)관련 논문 [9]에서 제안된 NOMA-BF 방식은 두 명의 사용자가 하나의 빔 포밍 벡터를 공유하게끔 하고 있다. 빔 간 간섭(interbeam interference: 다른 빔 사용자로부터의 간섭) 과 빔내의 간섭(intrabeam interference: 같은 빔 포밍 벡터를 공유하는 사용자끼리의 간섭)을 줄이기 위해, NOMA-BF는 클러스터링(clustering)과 사용자들간의 상관 관계에 기반한 전력할당 알고리즘 그리고 채널이득 차이에 근거하고 있다. NOMA-BF 시스템은 기존의 다중 사용자 빔 포밍 시스템과 비교하여 보다 향상된 합산속도를 얻고 있다. NOMA-BF는 또한 사용자 공정성을 위해 무선 접속 환경이 열악한 사용자들의 접속을 역시 보장하고 있다. 각 클러스터(cluster)은 두명의 사용자 짝으로 구성하며, N 개의 클러스터 중에서 n 번째 클러스터의 전력 할당은 문제 (12)을 통해 구할 수 있으며 그 조건은 (10b)와 (10c)를 따른다. 이러한 방식은 최대의 합산 속도를 성취하면서 동시에 열악한 사용자들의 접속 능력을 기존의 다중 사용자 빔 포밍 시스템과 동일하게 유지할 수 있게 한다.

$$\beta_1^n = \arg \max_{\beta_1^n} (R_1 + R_2) \quad (12a)$$

$$s.t. R_2 \geq \frac{1}{2} R_{2,conv-BF} \quad (12b)$$

여기서, R_1 과 R_2 는 접속 능력이 우수한 사용자와 열악한 사용자의 능력을 각각 나타낸다. $R_{2,conv-BF}$ 는 기존의 빔 포밍 방식을 사용했을 때의 취약 사용자가 보여줄 수 있는 접속 능력의 값이다. β_1^n 과 $1-\beta_1^n = \beta_2^n$ 는 n 번째 클러스터에 속한 접속 능력이 우수한 사

용자와 열악한 사용자에 할당된 비율이다. 문제 (12)에 대한 최적의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_1^n = \frac{1}{\sqrt{(1 + |h_{2,n}|^2 \rho)}} \frac{\left\{ \sqrt{(1 + |h_{2,n}|^2 \rho)} - 1 \right\} \left\{ \sum_{i=1, i \neq n}^N |h_{2,i} w_i|^2 \rho + 1 \right\}}{\rho |h_{2,i} w_i|^2 \sqrt{(1 + |h_{2,n}|^2 \rho)}} \quad (13)$$

3.5 협력 시스템에서의 NOMA

셀룰러 시스템에서 다수의 BS가 셀 외곽의 사용자들을 지원하는 협력적 다점 (Coordinated Multi-point: CoMP) 전송 (혹은 수신) 기술은 셀 외곽 사용자들의 전송 속도를 향상시키기 위해 사용된다. 때문에 CoMP 방식을 적용한 기지국들은 셀 외곽의 사용자들에게도 같은 채널을 배정하여야 한다. 그 결과, 셀 외곽 사용자들의 수가 증가함에 따라 시스템의 스펙트럼 효율은 악화될 수밖에 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 협력적 중첩 코딩(coordinated superposition coding: CSC) 기반의 NOMA를 채용하고 있다^[11]. 이 방식은 셀 외곽 사용자와 기지국 주변 사용자들에게 공용 접속 채널로 하향 링크 (downlink) 전송 시 협력적 중첩 코딩 기술을 사용한다^[12]. 다시 말해, 기지국은 알라무티(Alamouti) 부호화된 신호^[13]를 셀 외곽 사용자들에게, 동시에, 기지국 주변의 사용자들에게 신호를 전송하는 것이다. 알라무티(Alamouti) 부호를 사용하는 CSC-NOMA 방식은 기지국 주변 사용자들의 전송 속도와 전체 스펙트럼 효율을 손상시키지 않고 셀 외곽 사용자들에게 적정 수준의 전송 속도를 제공할 수 있다. R_{c1} , R_{c2} , R_c 를 각각 BS1 주변 사용자 (U_1), BS2 주변 사용자 (U_2), 그리고 셀 외곽 사용자 (U_c)의 전송 속도라고 하면, 전체 전송 속도는 $R_{c1} + R_{c2} + R_c$ 이다.

$$R_{c1} = E \left[\log_2 \left(1 + \frac{|h_{1,1}|^2 P_1}{E[|h_{1,2}|^2] P_2 + \sigma_n^2} \right) \right] \quad (14)$$

$$R_{c2} = E \left[\log_2 \left(1 + \frac{|h_{2,2}|^2 P_2}{E[|h_{2,1}|^2] P_1 + \sigma_n^2} \right) \right] \quad (15)$$

$$R_c = \min \{ Z_1, Z_2, Z_c \} \quad (16)$$

여기서, $Z_1 = E[\log_2(1 + SINR_1)]$,

$Z_2 = E[\log_2(1 + SINR_2)]$ 그리고

$Z_c = E[\log_2(1 + SINR_c)]$ 이다. 그리고 $SINR_i$ 은 U_c 의 신호를 복호화하는 사용자 U_i 의 신호 대비 간섭과 잡음의 비이다. $h_{i,j}$ 는 BS_j 로부터 사용자 i 에 이르는 채널 계수를 의미한다.

3.6 기타 연구 이슈

고속 가시광 통신 시스템 (VLC: visible light communication)의 처리량을 향상시키기 위해 NOMA를 적용하는 연구를 수행하였으며, 이 연구에서는 NOMA가 VLC 네트워크 하향링크에서도 높은 개선된 용량을 얻을 수 있다는 것을 보여준다^[14]. 이미 존재하는 채널과 간섭을 일으키는 채널(interfering channel)을 결합함으로써 통신 채널의 용량을 향상시키고자 NOMA 기술에 랩터 코드(raptor codes)를 설계하였다^[15]. NOMA와 더불어 랜덤 선형 네트워크 코딩(random linear network coding)의 결합은 패킷 성공 확률(packet success probability)을 향상시켜 멀티캐스트 서비스를 제공할 수 있다^[16].

참고문헌[22]에서는 5G를 위한 NOMA 기술을 연구하였고, NOMA 기술의 원리, 주요 특징 그리고 수신기의 복잡도를 분석하였다. 이 연구에서는 시스템의 일부 복잡도가 증가에도 불구하고 제어 가능할 정도의 간섭을 허용할 수 있다고 결론짓고 있다. 참고문헌 [23]은 MIMO NOMA 방식의 에르고딕 용량을 연구하였으며, 전체 전송전력 제약과 열악한 사용자의 최소 데이터 율을 보장한다는 조건하에서 최적 전력할당 기법을 이용하여 에르고딕 용량을 최적화 할 수 있음을 보였다.

IV. NOMA 성능 비교

이 절에서는, NOMA의 성능을 인지할 수 있는 몇 가지 수치 결과를 간략하게 제시한다. 그림 2는 식 (7)의 정보를 바탕으로 셀룰러 네트워크에서의 NOMA와 OMA 아웃티지 성능을 비교한 것이다. 사용자의 분포는 무작위이며 $N = 2$, $L = 10$, $\alpha = 2$, $R_D = 3m$ 로 설정하였다. 사용자들은 네트워크상에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 목표 데이터 율을 약한 사용자는 채널당 0.1 비트 그리고 강한 사용자는 채널당 0.5 비트로 설정한다. 반면 전통적인 직교방식과 비교하기 위하여 목표 데이터 율을 채널당 0.6 비트 (두 사용자의 데이터 율의 합한 비율임)로 한

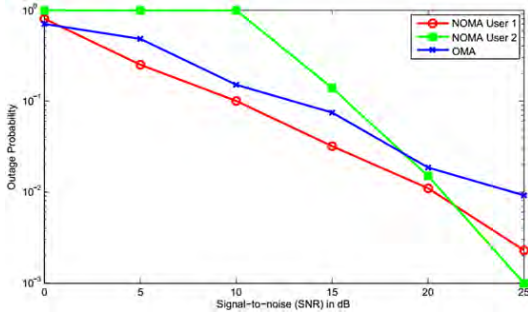


그림 2. Outage performance of NOMA in 5G systems with random users

다. 수치 결과 비교를 위하여 표준화된 SNR 을 사용 하였다.

그림에서 볼 수 있듯, NOMA가 비교 대상보다 더 나은 결과 값을 보여주고 있으며 다이버시티 차수 (diversity order)는 채널 조건과 함수관계에 있다. 이때, 채널 조건이 좋은 사용자와 그렇지 못한 사용자에게 각 전력 할당 비율은 1:4이다. 식 (7)에 주어진 아웃티지 확률은 기본적으로 높은 SNR조건에서 유효함을 알 수 있다. 비교 측면에서 아웃티지 성능을 분석하기 위하여, 두 사용자가 모두 우수한 성능을 가지는 높은 SNR 영역에 초점을 맞출 필요가 있다. 보다 강한 사용자에게 할당된 전력은 그에 비례하여 낮기 때문에, 낮은 SNR 구간에서는 아웃티지 성능은 좋지 못하게 된다. 그러나 SNR이 충분히 높아지면 전력할당 다중화 기법은 그 효과가 유리하게 작용하여 그 결과 보다 높은 차수의 다이버시티에서 월등한 성능을 보여 준다. 그림 3은 동일한 사용자 수와 전력 할당 비율 조건에서, 비-협력적 NOMA와 협력적 NOMA 사이의 아웃티지 확률을, 식 (9)을 사용하여, SNR 함수로 표현한 것이다. 협력적 NOMA가 비교 대상에 비해 탁월한 성능을 보이고 있으며 협력적 NOMA를 적용하였을 때 모든 사용자들이 최대의 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이러한 높은 다이버시티 이득은 다음과 같이 설명할 수 있다. 협력적 NOMA하에서는, 가장 열악한 채널 조건에서 임의의 사용자는 다른 (N-1) 사용자로부터 협력을 얻는다. 반면, 비협력적 NOMA는 *i*번째 사용자는 단지 *i*차수의 다이버시티를 성취할 수 있다. 협력적 NOMA는 사용자 협력을 통한 모든 사용자로부터 N차의 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 그림 4는 NOMA-BF와 기존의 다중 사용자 빔 포밍 방식의 합산 용량(sum capacity)을 비교한 것이다. 임계 SNR β , $\rho = 0.75$ 이며, 시스템 BW는 4.32MHz, 클러스

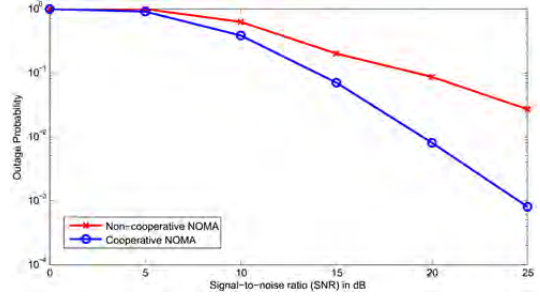


그림 3. Outage performance of cooperative NOMA

터 당 최대 전송 전력은 43 dBm, 잡음 밀도는 -169 dBm/Hz이다. 그림에서 알 수 있듯이, NOMA-BF는 합산 용량을 증가시킨다. 이때, 사용자들은 반경 500m 범위 안에서 무작위로 균일 분포되어 있다고 가정하였다. NOMA-BF는 기존의 다중사용자 빔 포밍에 비교하여 합산 용량 측면에서 우수하다. 그 이유는 효과적인 전력 할당을 통하여 상관 기반의 클러스터링 기법이 빔내 및 빔외의 간섭을 줄여 주기 때문이다. 두 명의 사용자는 단일 빔 포밍 백터를 공유하기 때문에, NOMA-BF를 활용하여 지원가능한 사용자 수를 쉽게 증가시킬 수 있다.

구현 복잡도와 오류 확산 문제는 NOMA의 단점이 될 수 있다. NOMA 수신기는 자신의 정보를 복호화하기 이전에 다른 사용자 정보를 먼저 복호화 해야 하기 때문에, SIC를 사용한 신호의 복호화는 전통적인 직교방식에 비하여 추가적인 구현 복잡도를 요구한다. 더불어, 해당 셀 내부의 사용자 수가 증가하면 이에 비례하여 그 복잡도도 증가한다. 그러나 사용자들은 다수의 그룹으로 클러스터화할 수 있다. 여기서 각 클러스터는 좋지 못한 채널 조건에 있는 소수의 사용자들로 그룹화하고, SC/SIC 는 이후 각 그룹 내에서 작동된다. 이와 같이 그룹 별 SC/SIC 실행은 기본적으로

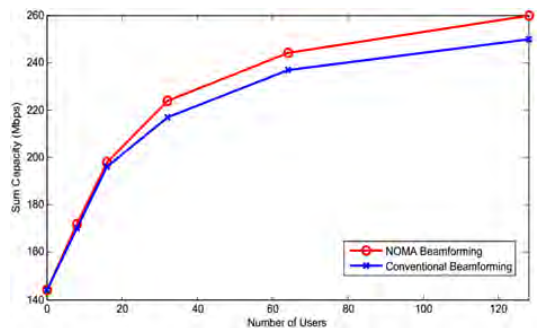


그림 4. Sum capacity performance of NOMA beam-forming

로 성능 이득과 구현 복잡도간 상호 절충이 필요하다.

NOMA는 일단 한 사용자에게 오류가 발생하게 되면 다른 모든 사용자의 정보에도 연속적으로 복호화 오류가 발생할 수 있다. 그러나 이러한 오류는 비교적 강력한 채널코드를 사용하면 쉽게 보정 받을 수 있다. 특히, 참고문헌 [2]에 의하면, 열악한 채널상의 임의의 사용자는 NOMA 스케줄링 동안 좋은 채널의 다른 사용자로 할당되기 때문에, 오류 전파는 NOMA 성능에 거의 영향을 미치지 않는다.

V. 연구 방향

NOMA 방식의 설계 및 구현에 관한 다양한 연구 노력들이 존재하고 있음을 앞서 살펴 보았다. 이러한 연구 배경과 더불어 앞으로 해결되어야 할 과제와 문제점들이 상존한다. 이 절에서는, NOMA를 보다 넓은 범위에서 추진되어야 할 몇 가지 가능한 연구 방향을 제시 한다.

5.1 왜곡 분석

전송된 데이터는 수신자에게 전파되는 과정에서 반드시 왜곡(distortion)을 겪는다. 전송 용량과 왜곡은 모두 아웃티지 확률에 의해 영향을 받는다. NOMA가 아웃티지율을 최대화하는 아웃티지 확률이 왜곡 발생 확률을 최소화 한다는 보장을 할 수 없다 [17]. 최대의 아웃티지율을 보장하면서도 적절한 왜곡 수준을 유지할 수 있는 최적화된 아웃티지 확률을 구하는 연구가 필요하다.

5.2 간섭 분석

간섭 분석이라는 용어는 무선 통신 분야에서 일반적으로 쓰이고 있지만, 여기서는 [7]에서 제안한 협조적 NOMA 방식에 중점을 두고 있다. 이 논문은 협조 단계에서 블루투스 와 같은 근거리 통신 방식을 제안하고 있다. 하지만 셀룰러 통신에서 블루투스 무선 통신을 사용할 경우 이미 존재하고 있는 무선 개인 통신망(WPAN)으로부터 심각한 간섭을 받을 확률이 크다. 이러한 환경에서의 협조적 NOMA 방식의 성능을 분석하는 것은 흥미로운 과제가 될 것이다.

5.3 자원 할당

통신 시스템의 스펙트럼을 효율적으로 활용하기 위해 전체 대역을 몇 개의 작은 대역으로 나누어 분할된 대역은 특정 사용자 혹은 사용자 그룹에게 배정된다. 시간에 따라 각 사용자 별 패킷의 수 역시 다양하게

변한다. 따라서 NOMA 방식에서 사용자 간 짝(user-pairing)을 만들고 최적의 전력을 할당하는 작업은 매우 정교한 알고리즘을 필요로 하며, 이는 최소한의 자원(전력과 대역)을 활용하여 최고의 성능을 제공하기 위해 반드시 필요하다.

5.4 이기종 네트워크(Heterogeneous Networks)

모바일 사용자의 불규칙적인 공간 분포는 NOMA의 성능에도 영향을 미칠 것이다. 따라서 이기종 네트워크에서 사용자 분포에 따른 NOMA의 아웃티지 성능, 에르고딕 용량, 사용자 공정성을 연구하는 것은 무척 가치 있는 연구가 될 것이다.

5.5 빔 포밍 아웃티지(Beamforming Outage)

NOMA-BF 시스템 [9]이 기존의 다중 사용자 BF 시스템에 비해 합산 용량을 증가시킨다는 것을 알 수 있다. NOMA에 빔 포밍을 결합할 경우 사용자의 아웃티지 확률도 변화될 것이다. 따라서 NOMA-BF의 아웃티지 성능을 분석할 필요가 있다.

5.6 현실성 있는 채널 모델

무선 채널을 정확히 이해하는 것은 5G 이동 통신 시스템은 물론 백홀(backhaul) 기술을 개발하는 데 있어 매우 중요하다. NOMA에 대한 현재의 연구들은 송신기와 수신기 사이의 무선 연결이 AWGN과의 관계에서 레일리 페이딩으로 가정하고 있다. 5G 셀룰러의 정확한 무선 채널을 반영할 수 있도록 경로 손실과 지연 확산 값 [18]을 측정하여 적용한다면 보다 현실적인 분석이 가능할 것이다.

5.7 균일 공정성(Uniform Fairness)

밀리미터파 무선 통신의 경우, 셀 경계 지역에서 175m 이상 떨어진 위치에서 대부분의 경우 신호를 획득하지 못한다. 지역에 장애물이 있을 경우 이러한 현상은 더욱 심해질 수 있다. 모든 사용자들에게(특히 밀리미터파 무선 통신의 경우 셀 경계 지역에서 150m 이상 떨어진 사용자들) 균일한 무선 환경을 제공할 수 있는 NOMA 방식을 고안하는 것은 의미 있는 연구가 될 것이다.

VI. 결 론

이 논문을 통해 5G 시스템에서의 NOMA 연구 현황을 분석하고, 해석적 결과 비교를 통하여 NOMA의 성능을 논의하였다. 그 결과 NOMA가 차세대 다중 접속 기술의 유망한 후보자임이 확인하였다. NOMA

의 다이버시티 이득은 중첩 부호화되어 전송되는 신호의 전력 할당 측면으로부터 발생한다. 많은 연구 결과, 아웃티지 확률, 합산 용량, 에르고딕 용량, 취약 환경 사용자의 전송 속도 보장, 그리고 셀 경계 사용자들의 무선 접속 성능 등의 분야에서 NOMA의 우수함을 증명해주고 있다. NOMA 기술의 성공적인 구현을 위해서는 송신부의 완벽한 중첩 코딩과 수신부의 순차적 간섭 제거 기술(SIC)은 물론 최적의 전력 할당, 이동성, 그리고 서브 대역 스케줄링(sub-band scheduling)이 수반되어야 한다. 현존하는 다수의 연구 결과에도 불구하고 NOMA의 효율성은 왜곡 분석, 패킷 기반 통신에서의 자원 할당, 다중 사용자 빔 포밍에서의 아웃티지 분석, 현실적이고 실제적인 MAC 계층 설계 등 후후 연구를 통해 보다 확실하게 증명될 수 있을 것이다. 또한 NOMA는 이기종 네트워크 환경에서도 보다 깊이 있는 연구가 있어야 한다. 본 논문은 NOMA의 기존 연구에 대한 근간 기술을 논의하고 우수성을 수치적 결과를 통하여 제시하고 있으며 향후 가능한 연구 방향을 제시하였다.

References

- [1] P. Wang, J. Xiao, and L. Ping, "Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 4-11, Sept. 2006.
- [2] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, L. Anxin, A. Harada, and T. Nakamura, "Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access," *ISPACS*, pp. 770-774, Nov. 2013.
- [3] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- [4] K. Higuchi and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 3, pp. 403-414, Mar. 2015.
- [5] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the Performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 1501-1505, Dec. 2014.
- [6] C. Xiaohang, A. Benjebbour, L. Yang, L. Anxin, and J. Huiling, "Impact of rank optimization on downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) with SU-MIMO," *IEEE ICCS*, pp. 233-237, Nov. 2014.
- [7] Z. Ding, M. Peng, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, Aug. 2015.
- [8] Y. Hayashi, Y. Kishiyama, and K. Higuchi, "Investigations on power allocation among beams in non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Las Vegas, NV, USA, Sept. 2013.
- [9] B. Kim, S. Lim, H. Kim, S. Suh, J. Kwun, S. Choi, C. Lee, S. Lee, and D. Hong, "Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, San Diego, CA, USA, Nov. 2013.
- [10] S. Timotheou and I. Krikidis, "Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1647-1651, Oct. 2015.
- [11] J. Choi, "Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 313-316, Feb. 2014.
- [12] S. Vanka, S. Srinivasa, Z. Gong, P. Vizi, K. Stamatiou, and M. Haenggi, "Superposition coding strategies: Design and experimental evaluation," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 2628-2639, 2012.
- [13] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, 1998.
- [14] H. Marshoud, V. M. Kapinas, G. K. Karagiannidis, and S. Muhaidat, "Non-orthogonal multiple access for visible light communications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Submitted, Jul. 2015.

[15] M. J. Hagh and M. R. Soleymani, "Raptor coding for non-orthogonal multiple access channels," *IEEE ICC*, pp. 1-6, Jun. 2011.

[16] S. Park and D. Cho, "Random linear network coding based on non-orthogonal multiple access in wireless networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1273-1276, Jul. 2015.

[17] S. Choudhury and J. D. Gibson, "Information transmission over fading channels," *IEEE GLOBECOM*, pp. 3316-3321, Nov. 2007.

[18] T. S. Rappaport, S. Shu, R. Mayzus, Z. Hang, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.

[19] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges," in *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Mar. 2014.

[20] S. Sen, N. Santhapuri, R. R. Choudhury, and S. Nelakuditi, "Successive interference cancellation: a back-of-the-envelope perspective," in *Proc. 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp. 1-6, Oct. 2010.

[21] N. I. Miridakis and D. D. Vergados, "A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 312-335, Feb. 2013.

[22] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, and C.-L. I, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sept. 2015.

[23] Q. Sun, S. Han, C.-L. I, and Z. Pan, "On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 405-408, Aug. 2015.

리 아 즈 (SM RIazul Islam)



2012년 : 인하대학교 박사(정보통신)
 2005년 9월~2014년 3월 : 벵글라데시 다카대학 조교수
 2014년 3월~2014년 9월 : 삼성 전자 벵글라데시 연구소 연구원

2014년 10월~현재 : 인하대학교 초광대역무선통신연구센터 연구교수
 <관심분야> 무선통신, 신호처리

김 재 명 (Jae Mounng Kim)



1974년 2월 : 한양대학교 전자공학 학사
 1981년 8월 : 미국 USC 전기공학 석사
 1987년 8월 : 연세대학교 전자공학 박사
 1982년 9월~2003년 3월 : ETRI

부장/단장, 무선방송연구소 소장 역임
 2003년 4월~현재 : 인하대학교 정보통신공학과 교수
 2014년 7월~현재 : 인하대학교 SSE ITRC 소장
 <관심분야> 이동/위성 통신공학

곽 경 섭 (Kyung Sup Kwak)



1981년 12월 : 미국 USC 전기공학 석사
 1988년 2월 : 미국 UCSD 전기컴퓨터공학 박사
 1988년 2월~1990년 3월 : HNS 및 IBM 연구원
 1990년 3월~현재 : 인하대학교

정보통신공학과 교수, 인하펠로우 교수 역임, 현재 인하한림교수
 <관심분야> 이동통신, 무선센서네트워크, 나노네트워크 등