https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.5.123 JIIBC 2018-5-16

밀리미터파 Massive MIMO 시스템을 위한 공간 다중화 및 하이브리드 빔 형성

Combined Hybrid Beamforming and Spatial Multiplexing for Millimeter-Wave Massive MIMO Systems

주상임^{*}, 이병진^{*}, 김남일^{**}, 김경석^{***}

Sang-Lim Ju^{*}, Byung-Jin Lee^{*}, Nam-II Kim^{**}, and Kyung-Seok Kim^{***}

요 약 최근 요구되는 트래픽이 지속적으로 증가하면서 광대역의 주파수를 확보할 수 있는 밀리미터파 기반의 이동통신 기술이 주목을 받고 있다. 하지만 밀리미터파 대역의 채널은 NLoS (Non-Line-of-Sight) 환경에 취약하며 경로 감쇠가 매우 큰 문제점을 갖는다. 이를 위해 기지국에 수십 개 이상의 안테나를 장착하여 빔 형성을 통해 경로 감쇠를 보완하는 Massive MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 시스템이 연구되고 있다. 기존 빔 형성 기법에는 아날로그 방식과 디지털 방식 이 있지만 시스템의 복잡도와 비용적인 측면에서 Massive MIMO 시스템에 적용하기에 현실적인 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 대역의 Massive MIMO 시스템에서 상기 두 방식을 융합한 하이브리드 빔 형성 기법을 연구한다. 또한 다수의 안테나를 장착한 다중 사용자를 서비스할 수 있도록 공간 다중화 기법을 고려한다. 주파수 효율 분석을 통해 빔 형성 및 공간 다중화에 의한 이득을 평가한다.

Abstract Recently, as required wireless communication traffic increase, millimeter wave mobile technologies that can secure broadband spectrum are gaining attention. However, the path loss is high in the millimeter wave channel. Massive MIMO system is being researched in which can complement the path loss by beamforming by equiped large-scale antenna at the base station. While legacy beamforming techniques have analog and digital methods, practical difficulties exist for application to massive MIMO systems in terms of system complexity and cost. Therefore, this paper studies a hybrid beamforming scheme for massive MIMO system in the millimeter wave band. Also this paper considers spatial multiplexing scheme to serve multi-users with multiple received antennas. Gains of the beamforming and the spatial multiplexing schemes are evaluated by analyzing the spectral efficiency.

Key Words : Hybrid beamforming, Massive MIMO, Millimeter wave, Spatial multiplexing, Spectral efficiency

I.서 론

이동통신에서 요구되는 트래픽은 해마다 증가하고 있 지만 현행 4G 이동통신이 운용되고 있는 주파수 대역이 포화되어 추가 주파수 대역의 확보가 제한되고 있다. 따 라서 폭증하는 이동통신의 트래픽을 수용하기 위해 최근 전 세계적으로 광대역의 주파수를 확보할 수 있는 밀리 미터파 기반의 이동통신 기술이 5G의 주요 핵심 기술로

^{*}준회원, 충북대학교, 전과통신공학 **장회원, 한국전자통신연구원 ***정회원, 충북대학교, 정보통신공학, 교신저자 접수일자 : 2018년 8월 23일, 수정완료 : 2018년 9월 23일 게재확정일자 : 2018년 10월 5일

Received: 23 August, 2018 / Revised: 23 September, 2018 / Accepted: 5 October, 2018

^{****}Corresponding Author: kseokkim@cbnu.ac.kr

Department of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Korea

연구되고 있다^[1-2]. 3GPP (Third Generation Partnership Project) 에서도 최근 2017년 12월에 6 GHz 이상의 밀리 미터파 대역을 지원하는 새로운 무선접속 기술인 NR(New Radio access)을 표준화하여 발표하였다^[3]. 하 지만 밀리미터파 대역의 채널은 높은 주파수의 특성으로 경로 감쇠가 매우 큰 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 보안하기 위해 수십 개 이상의 안테나가 사용되는 Massive MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 기술을 이용하여 지향성의 빔을 형성하고 경로 감쇠를 보상해 주어야 한다^[4]. 밀리미터파의 짧은 파장으로 기지 국의 제한된 공간에 많은 수의 안테나가 장착될 수 있기 때문에 Massive MIMO 시스템의 구현에 유리하다. 하지 만 기존 LTE (Long Term Evolution) 기반의 MIMO 시 스템에 비해 수십 개 이상으로 증가되는 안테나들은 각 안테나 마다 RF (Radio Frequency) chain이 요구되어 하 드웨어가 크게 복잡해지는 문제를 갖는다. 이러한 하드 웨어의 복잡도와 전력 소모 등을 감소하기 위해 최근 많 은 연구 기관에서 하이브리드 빔 형성 기술이 연구되고 있다. 하이브리드 빔 형성 기술은 기저대역의 디지털 프 리코더와 함께 RF 대역에서 아날로그 프리코더를 운용 하는 기술이다^[5].

본 논문은 밀리미터파 대역에서 다수의 사용자들에게 높은 주파수 효율의 스트림을 전송하기 위해, NR 기반의 Massive MIMO 시스템에서 하이브리드 빔 형성 기법과 공간 다중화 기법을 연구한다. 본 논문은 다음과 같이 구 성된다. 2장에서는 다중 사용자가 존재하는 Massive MIMO 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 공간 다중화 와 하이브리드 빔 형성 기법을 연구하고, 4장에서 주파수 효율의 분석을 통해 3장에서 연구된 기법을 평가한다. 마 지막으로 5장에서 결론을 가진다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 다중 사용자를 지원하는 밀리미터파 Massive MIMO 시스템을 고려한다. 하나의 기지국은 N_t 개의 안테나가 장착되고, K개의 사용자들은 각각 N_r 개의 안테나를 사용한다. 그림 2 (a)와같이 기지국은 수평방향으로 N_h 개의 안테나와 수직방향으로 N_v 개의 안테나로 구성된 URA (Uniform Rectangular Array) $(N_t = N_v \times N_h)$ 가 적용된다. 사용

자는 그림 2 (b)와 같이 N_r개의 안테나가 수평방향으로 구성된 ULA (Uniform Linear Array)가 고려된다. 안테 나 어레이 모델은 3GPP의 보고서에서 제시하는 모델을 따른다^[6]. 본 논문에서는 송신 안테나들을 다음 과 같이 표현한다.

$$\begin{bmatrix} (n_{h1}, N_v) & (n_{h2}, N_v) & \dots & (N_h, N_v) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ (n_{h1}, n_{v2}) & (n_{h2}, n_{v2}) & \dots & (N_h, n_{v2}) \\ (n_{h1}, n_{v1}) & (n_{h2}, n_{v1}) & \dots & (N_h, n_{v1}) \end{bmatrix}$$
(1)

모든 사용자는 각각 기지국으로부터 동시에 L개의 데 이터 스트림을 수신할 수 있다. 이때 데이터 스트림의 수 L은 사용자가 사용하는 안테나 수 N_r 과 동일한 것으로 고려한다. 즉 모든 데이터 스트림의 수 $N_S = K \times L$ 이다. 이 논문에서는 기지국의 안테나 수 N_t 가 사용자의 안테 나 수 N_r 보다 많다고 전제한다. 즉, 사용자는 기지국에



그림 1. 다중사용자 Massive MIMO 시스템 모델 Fig. 1. Multi-user Massive MIMO system model



그림 2. 기지국과 사용자의 안테나 배열 Fig. 2. Antenna array of base station and user

장착된 수많은 안테나를 통해 공간 다중화 이득과 함께 빔 형성에 의한 이득을 획득할 수 있다.

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 다수의 안테나를 통한 빔 형성을 위해 하이브리드 빔 형성 방법을 고려한 다. *K*×*K* 디지털 프리코더 *F_{BB}*와 RF단에서의 *N_t*×*K* 아날로그 프리코더 *F_{RF}*가 기지국에 적용된다. 공간 다중 화가 적용된 *K*×1 송신 심볼을 *s* 라 할 때, 송신 신호 *x* 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = F_{RF}F_{BB}s \tag{2}$$

 $x \in C^{N_t \times 1}$ 이고, $E[ss^*] = \frac{P}{K}I_K$ 이고, P는 송신 파워 이다. 본 논문에서는 모든 사용자에 대한 송신 파워가 동 일하다고 전제한다. k 번째 사용자에 대한 수신신호 y_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = H_k F_{RF} F_{BB} s + n_k \tag{3}$$

 H_k 는 기지국와 k번째 사용자 사이의 $N_r \times N_t$ 밀리 미터파 채널을 나타낸다. 채널랭크는 N_r 이며, $N_r \ge L$ 이다. 본 논문에서는 3GPP TR 38.901 채널 모델을 고 려하였다^[6]. H_k 는 각 채널 경로별로 수평 및 수직방향 의 출발각도와 도착각도가 고려된다. 또한 3GPP TR 38.901 채널 모델은 대표적으로 도심환경의 Micro 셀 환경과 Macro 셀 환경을 지원하며, 본 논문에서는 Micro 셀 환경을 고려하였다. n_k 는 가우시안 (Gaussian) 잡음이다.

Ⅲ. 다중 사용자를 고려한 공간 다중화 및 하이브리드 빔 형성

본 논문에서는 아날로그 빔 형성을 위해 빔 조종 (Beam Steering) 코드북 F_{RF} 을 생성한다. 코드북 F_{RF} 는 다음과 같이 벡터들로 구성된다.

$$F_{RF} = \left[V_1(\theta_1, \phi_1), V_2(\theta_1, \phi_2), ..., V_B(\theta_{B_a}, \phi_{B_v}) \right]$$
(4)

 θ_i 는 기지국에서 빔 형성 시 수평축에 대한 발사각으로, 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\theta_i = \frac{\pi}{2^{B_a}} \times i \tag{5}$$

B_a는 수평축에 대한 빔 발사각의 개수이다. 임의로 지정한 B_a에 따라 0°180° 사이에 일정한 간격으로 빔의 수평각도가 구성된다. φ_j는 수직축에 대한 발사각이다. 본 논문에서 고려한 도심 환경의 Micro 셀에서는 기지국 과 사용자사이에 수직축의 각도가 70°110° 사이에 분포 한다 [6]. 따라서 φ_j는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\phi_j = \frac{7\pi}{180} + \frac{(11\pi - 7\pi)/180}{2^{B_v}} \times j \tag{6}$$

 B_v 는 수직축에 대한 빔 발사각의 개수이다. 계산된 θ_i 와 ϕ_j 는 다음의 안테나 어레이 응답 식에 대입하여 아날 로그 빔 조절 벡터를 생성한다.



그림 3. 아날로그 빔 형성 Fig. 3. Analog beamforming

$$\begin{split} V_{b}(\theta_{i},\phi_{j}) &= \frac{1}{\sqrt{N_{t}}} \begin{bmatrix} 1, \\ e^{j\pi(n_{h1}\sin\theta_{i}\sin\phi_{j}+n_{v2}\cos\phi_{j})}, \\ e^{j\pi(n_{h1}\sin\theta_{i}\sin\phi_{j}+n_{v3}\cos\phi_{j})}, \\ \dots, \\ e^{j\pi(N_{h}\sin\theta_{i}\sin\phi_{j}+N_{v}\cos\phi_{j})} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_{n_{h1},n_{v1}}(\theta_{i},\phi_{j}), v_{n_{h1},n_{v2}}(\theta_{i},\phi_{j}), \dots, v_{N_{h},N_{v}}(\theta_{i},\phi_{j}) \end{bmatrix}^{T} \end{split}$$
(7)

그림3과 같이 $V_i(\theta_{i_a}, \phi_{i_v})$ 벡터는 i 번째 빔을 나타낸 다. 식과 같은 방법으로 B개의 빔 조종 벡터가 생성된다 $(B = B_a \times B_v)$. 사용자들이 원하는 신호를 수신하여 조 합할 때 사용하는 컴바이너 코드북 W_{RF} 도 상기 식 (7) 과 같은 방법으로 생성할 수 있다.

$$W_{RF} = \left[\Psi_{1}(\theta_{1}, \phi_{1}), \Psi_{2}(\theta_{1}, \phi_{2}), ..., \Psi_{B}(\theta_{B_{a}}, \phi_{B_{c}})\right]$$
(8)

k번째 사용자는 기지국으로부터 F_{RF}의 각 벡터에 대응하는 빔을 수신하여 다음 수식을 통해 최적의 아 날로그 프리코더(빔 조종 벡터)와 컴바이너 벡터를 선 택한다.

$$\left\{ V_j^*(\theta_i, \phi_l), \Psi_j^*(\theta_i, \phi_l) \right\} =$$

$$\text{arg max } \| \Psi_k(\theta_i, \phi_l) H_k V_k(\theta_i, \phi_l) \|$$

$$(\Psi_k \in F_{RF}, V_k \in W_{RF})$$

$$(9)$$

V_j^{*}(θ_i, φ_l), Ψ_j^{*}(θ_i, φ_l) 는 k번째 사용자에게 선택된 최 적의 아날로그 프리코더와 컴바이너 벡터이다. 모든 사 용자들은 식 (9)에 의해 최적의 빔을 선택하여 기지국으 로 선택한 빔에 대한 정보를 기지국으로 보고한다. 기지 국에서는 각 단말이 선택한 최적의 빔 조절 벡터를 종합 하여 RF단에서 데이터를 전송할 빔 형성 시 사용한다. 이때 사용되는 아날로그 빔 형성 행렬은 다음과 같이 표 현할 수 있다.

$$F_{RF}^{*} = \left[V_{1}^{*}(\theta_{1}, \phi_{1}), V_{2}^{*}(\theta_{2}, \phi_{2}), ..., V_{K}^{*}(\theta_{K}, \phi_{K}) \right]$$
(10)

 $F_{RF}^* \in C^{N_t \times K}$ 이고, $V_k^*(\theta_k, \phi_k)$ 는 k번째 사용자가 선 택한 빔 조절 벡터를 나타낸다. 디지털 빔 형성을 위한 기저대역의 프리코더 F_{BB} 는 유효채널에 대해 Zeroforcing 기법을 적용하여 생성한다. 유효 채널 \overline{H} 는 다음 식에 따라 계산될 수 있다.

표 1. 시스	노템 파라띠	미터
Table 1.	System	parameters

Parameter	Value
Carrier frequency	28 GHz
System Bandwidth	100 MHz
Subcarrier spacing	60 kHz
The number of slots per a subframe	4
The number of symbols per a subframe	56
FFT size	2048
mmWave channel model	3GPP TR 38.901
Scenario	UMi
The number of users	2, 4, 6, 8, 10
UE distribution (horizontal)	Uniformly
BS transmit power	30 dBm
The number of BS antennas	16, 32, 64, 128
BS antenna configuration URA $(N_v \times N_h)$	4X4, 4X8, 8X8, 8X16
The number of UE antennas	1, 2, 4 (ULA)
Antenna element spacing	$\lambda/2$
Scheduler	PF
Channel estimation	Perfect
Feedback CSI	RI, PMI, CQI

$$\overline{h}_{k} = \Psi_{k}^{*}(\theta_{k}, \phi_{k}) H_{k} V_{k}^{*}(\theta_{k}, \phi_{k})$$
(11)

$$\overline{H} = \left[\overline{h}_1, \overline{h}_2, ..., \overline{h}_K\right] \tag{12}$$

F_{BB}는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{BB} = \overline{H}^* (\overline{H}\overline{H}^*)^{-1} \tag{13}$$

각 사용자들은 식 (3)과 같이 신호가 전달되면, 식 (9) 에서 선택된 컴바이너 벡터를 이용하여 신호를 조합하여 수신한다. 수신된 신호는 ADC (Analog to Digital Convertor) 와 FFT (fast Fourier transform)를 거쳐 MIMO 디코딩 후 주과수 효율이 계산된다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

이번 장에서는 밀리미터파 대역에서 공간 다중화와 하이브리드 빔 형성이 적용된 다중 사용자 Massive MIMO 시스템의 성능을 평가한다. 본 논문은 3GPP Release 15의 NR 프레임 규격과 시스템 모델을 기반으 로 주파수 효율을 분석하였다^[3]. 중심 주파수는 28 GHz 이며, 부 반송파의 대역폭은 60 kHz가 고려되었다. 100 MHz의 시스템 대역폭과 30 dBm의 송신 파워를 적용하 였다. 3D 채널 모델의 시나리오 중 도심 환경의 Micro 셀 환경이 고려되었다^[6]. 하나의 셀에서 하나의 기지국이 다 수의 사용자를 지원한다. Micro 셀 시나리오에서 셀의 반경은 200m이며, 기지국과 사용자 간의 최소거리는 10m로 제시된다. 따라서 본 논문에서는 기지국으로부터 10m~200m 사이에 사용자들을 랜덤하게 분포시켜 평균 적인 성능을 분석했다. 기지국의 안테나는 16개부터 128 개까지 고려되고, 사용자가 사용하는 안테나는 1개부터 4 개까지 고려된다. 자세한 파라미터는 표에 나타내었다. 또한 본 논문에서는 사용자에게 피드백 받은 CQI (Channel Quality Indicator) 에 따라 변조된 신호를 송/ 수신 하고, 이에 따른 비트를 계산하여 주파수 효율을 분 석한다.

사용자의 안테나 수와 채널의 랭크, 기지국에서 전송 하는 스트림의 수는 동일하다. 사용자에게 다수의 안테 나가 고려되면, 기지국은 *N*,과 대응하는 수의 송신 안테 나를 사용하여 공간 다중화 기법을 사용하여 다중 스트 림을 전송한다. 공간 다중화 기법을 위해 사용되는 송신 안테나 외에 남아있는 안테나들은 빔 형성에 사용하여 빔 형성에 따른 이득을 획득한다.

그림 4는 기지국의 안테나가 16개이고, 사용자의 안테 나가 1개, 2개, 4개일 때 주파수 효율을 보여준다. 그림의 결과에서 사용자의 안테나가 2개일 경우, 기지국의 홀수 번에 해당하는 안테나들은 s1 스트림을 전송하고 짝수 번에 해당하는 안테나들은 s2 스트림을 전송하고 짝수 번에 해당하는 안테나들은 s2 스트림을 전송한다. 사용 자의 안테나가 1개인 경우에 비하여 사용자가 다중 안테 나를 사용할 경우 공간 다중화 이득으로 향상된 주파수 효율을 나타내었다. 10명의 사용자를 기준으로 약 7.1 bps/Hz (Rx.1)에서 19.46 bps/Hz (Rx.4)로 증가한 결과 를 보였다.



그림 4. 주파수 효율: Tx.16 Fig. 4. Spectral efficiency: Tx.16



그림 5. 주파수 효율: Tx.32 Fig. 5. Spectral efficiency: Tx.32



그림 6. 주파수 효율: Tx.64 Fig. 6. Spectral efficiency: Tx.64



그림 7. 주파수 효율: Tx.128 Fig. 7. Spectral efficiency: Tx.128

그림 5부터 그림 7은 기지국의 안테나를 증가시키면 서 빔 형성 이득을 높였을 때 결과를 나타낸다. 그림 4의 Tx16, Rx4과 그림 7의 Tx128, Rx4의 주파수 효율은 약 10 bps/Hz의 차이를 보였다. 동일한 조건에서 기지국의 안테나 수를 증가시켰을 때 보인 결과로, 증가된 빔 형성 이득으로 주파수 효율이 높아졌음을 알 수 있다. 그림 7 에서 Rx1과 Rx4에 대한 주파수 효율은 약 16 bps/Hz의 차이를 보였다. 이는 사용자의 안테나 수를 증가시켜 공 간 다중화 이득을 획득하여 얻은 결과임을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문은 밀리미터파 대역에서 5G 이동통신의 핵심

기술인 Massive MIMO 시스템을 연구하였다. 다수의 안 테나가 사용됨에 따라 증가되는 하드웨어의 복잡도를 감 소시키기 위해 하이브리드 빔 형성 기법이 적용되었다. 또한 다수의 사용자에게 고속의 데이터를 전송하기 위해 공간 다중화 기법을 적용하였다. 본 논문의 빔 형성과 공 간 다중화를 조합한 연구에서 송신 안테나 수 증가에 따 른 빔 형성 이득을 평가하였다. 또한 수신 안테나 수 증 가에 따라 공간을 다중화 하여 다중 스트림을 전송했을 때 획득할 수 있는 이득을 확인하였다. 본 연구 결과를 토대로 향후 하이브리드 빔 형성 기법을 더 최적화하는 연구가 진행될 것이다. 또한 알려지지 않은 채널 정보 환 경에서 효과적으로 채널을 추정하고, 피드백 오버헤드를 감소시키는 연구가 진행될 것이다.

References

- R. W. H. Jr, N. González-prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," IEEE J. Sel. Top. Signal Process., vol. 10, no. 3, pp. 436 - 453, apr 2016. DOI: 10.1109/ISTSP.2016.2523924
- [2] A. L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari, and F. Capolino, "Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?" IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 9, pp. 56 - 62, sep 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894453
- [3] 3GPP TS 38.211, "Physical channels and modulation (Release 15)," 3GPP, V15.0.0, 2017.
- [4] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of BS antennas," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590 - 3600, Nov. 2010.

DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092

 [5] S. Han, I. Chih-Lin, Z. Xu, and C. Rowell, "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 186 - 194, 2015.

DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010533

[6] 3GPP TR 38.901, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14)," V14.3.0, 2017.

저자 소개

주 상 임(준회원)



- 2014년 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2016년 : 충북대학교 전파통신공학과 공학석사
- 2016년 ~ 현재 : 충북대학교 전파통 신공학과 박사과정

<주관심분야 : 디지털라디오, Massive MIMO>

이 병 진(준회원)



- 2013년 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전 파통신공학과 통합과정

<주관심분야 : 전파채널 모델링, 5G Massive MIMO, IR-UWB 레이더, 가시광 통신, 복합재난 모델링 기술>

김 남 일(정회원)



- 1996년 : 충북대학교 전자공학과 공학사 • 1998년 : 충북대학교 전자공학과 공학 석사
- 2009년 : 충북대학교 전자공학과 공학 박사
- 1999년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미래이동통신연구본부 책임연구원

<주관심분야 : 기지국 가상화, 4G/5G 이동통신 시스템, 무선 전송방식>

김 경 석(정회원)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월: 한국전자통 신연구원 무선통신연구단 선임연구원 • 1999년 1월 ~ 2002년 3월: University
- of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학 원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통 신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전 임강사
- •2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 교수
- <주관심분야 : SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력 선통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파채널분석, 전파감시 /관리시스템, 위성망분석>

※ 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연 구임. (No. 2016-0-00183, 컴퓨팅이 융합된 가상화 기반 5G 이동통신 액세스 플랫폼 기술 개발)