

## 5G 밀리미터파 통신에서 Fronthaul의 한계거리

김성만<sup>°</sup>

## Maximum Distance of Fronthaul in 5G Millimeter Wave Communications

Sung-Man Kim<sup>°</sup>

요약

현재 국내의 이동통신망에서는 digital unit(DU)와 radio unit(RU)으로 나뉘는 형태의 기지국을 많이 사용하고 있다. 이러한 구조의 이동통신망에서 DU와 RU를 연결하는 구간을 fronthaul이라고 지칭하는데, 이 fronthaul의 거리는 무한히 늘릴 수 있는 것이 아니라, closed-loop MIMO(multiple input multiple output) 동작에 의해 제한되는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 fronthaul의 한계거리를 수학적으로 유도하고, 향후 28 GHz 대역의 5G 밀리미터파 통신에서는 이 한계거리가 매우 짧아져서 통신의 성능에 한계를 가져온다는 점을 밝히고자 한다. 본 연구에 따르면, 28 GHz 동작 주파수에서 closed-loop MIMO를 동작시키기 위해서는 10 km/h 이하로 이동하는 사용자만 실질적인 서비스가 가능하며, 이러한 경우에 fronthaul의 최대거리는 DU 및 RU의 지연시간에 따라 8~10 km로 도출된다.

**Key Words** : Fronthaul, millimeter wave communication, 5G

## ABSTRACT

Currently, base stations composed of a digital unit (DU) and radio units (RUs) are widely used in wireless communication networks. In this architecture, the link between a DU and RUs are referred to as fronthaul. The length of fronthaul is not limitless but limited by the operation of closed-loop MIMO (multiple input multiple output). In this paper, we analyze the maximum limit of fronthaul mathematically and reveal that the length of fronthaul is very short in 5G millimeter wave. Our results show that the base stations based on the fronthaul scheme can accommodate the users only moving under 10 km/h in 28-GHz frequency band. The maximum limit of the fronthaul is 8~10 km depending on the delay of DU and RU.

## 1. 서론

최근 5G 이동통신에서는 기존에 사용하던 RF 주파수 대역 이외에 더 높은 새로운 주파수 대역을 사용하고자 계획을 세우고 있다. 이러한 새로운 주파수 대역들을 New RAT(radio access technology)이라고 부르거나 또는 앞글자만 따서 NR이라고 부르고 있다.

이에 따라 5G 이동통신에서는 수십 GHz 대역이상의 밀리미터파(millimeter wave)를 이용하여 이동통신을 구현하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>1,2)</sup>. 실제로 우리나라에서는 밀리미터파 대역의 주파수를 사용한 5G 이동통신을 구현하기 위하여 2018년 6월에 이미 28 GHz 대역의 주파수 경매를 진행한 바가 있다. 하지만, 이렇게 높은 주파수 대역을 사용하여 이동

※ 이 논문은 2018학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

<sup>°</sup> First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-1497-6832)KyungSung University Department of Electronic Engineering, sungman@ks.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201809-290-B-RN, Received September 27, 2018; Revised October 25, 2018; Accepted November 2, 2018

통신을 구현하게 되면, 현재 널리 쓰이고 있는 DU(digital unit)와 RU(radio unit)로 구성된 형태의 이동통신망에서 Fronthaul이라고 불리는 DU와 RU간의 거리에 제약을 받게 된다<sup>3,4)</sup>. 참고로 이동통신망에서 Fronthaul의 정의를 그림 1에 나타내었다. Fronthaul은 DU와 RU로 구성된 이동통신 기지국에서 DU와 RU를 연결하는 구간을 말하며, 주로 저가형 광통신망으로 구현되어 있다. 이러한 Fronthaul 거리의 제약은 이동통신 기술의 발전의 한 축이 되어온 Closed-loop MIMO (multiple input multiple output)<sup>5)</sup> 기술 때문에 발생하게 된다는 점을 본 논문에서 보이고자 한다. 참고로 28 GHz 대역을 이용한 5G 밀리미터파 통신에서 Closed-loop MIMO 기반의 기술을 이용하고자 하는 테스트는 국내의 여러 통신사업자들로 인해 이루어지고 있는 실정이다.

본 논문에서는 수십 GHz 이상의 밀리미터파 통신을 사용할 때에 Closed-loop MIMO 기법으로 인해 발생하는 Fronthaul의 한계거리에 대해 수학적으로 분석하고자 한다. 이러한 연구는 이동통신 사업자가 Fronthaul이 포함된 5G 이동통신망 설계를 할 때에 아주 중요한 정보가 될 것이다.

또한, 이러한 분석을 통해 5G 밀리미터파 통신에서 Fronthaul 구조의 이동통신망으로는 고속으로 이동하는 사용자에게 Closed-loop MIMO 기술을 적용하기 어렵다는 사실을 이론적으로 밝히고자 한다. 이러한 내용도 미래의 이동통신 기술의 방향을 설정하는데 있어서 아주 중요한 연구결과가 될 것으로 판단된다.

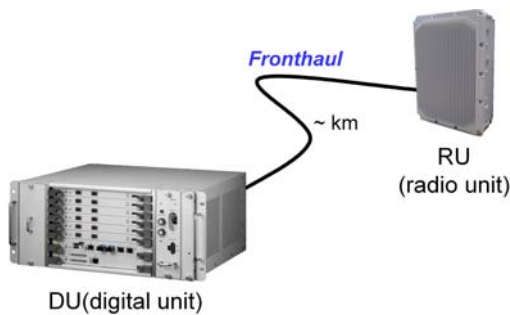


그림 1. 이동통신망에서 Fronthaul의 정의  
Fig. 1. Definition of fronthaul in mobile network

## II. Fronthaul 한계거리의 원인

본 논문에서 가정한 5G 이동통신망 구조를 그림 2에 나타내었다. 현재 국내를 비롯한 여러 나라에서 DU와 RU로 구성된 형태의 이동통신망 구조를 많이

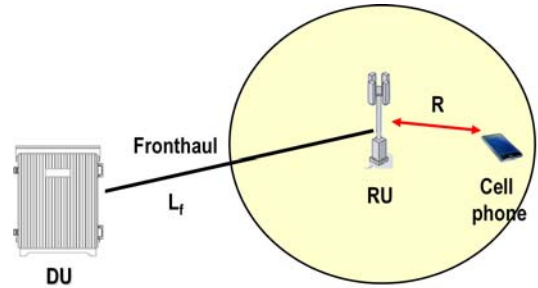


그림 2. 본 논문에서 가정한 이동통신망의 구조  
Fig. 2. Structure of the assumed mobile networks

채택하고 있는데, 이는 외부에 설치되는 RU의 크기가 작아 쉽게 설치할 수 있기 때문이다. 이러한 구조에서 fronthaul의 거리를  $L_r$ 라고 가정하였으며, RU에서 생성되는 셀의 반경을  $R$ 로 가정하였다. 여기에서 Closed-loop MIMO가 동작되는 상황은 다음과 같다.

단말기에서 파일럿 신호(pilot signal)를 Uplink (UL) 방향으로 무선채널을 통해 방사하면, 이 신호는 RU와 Fronthaul을 차례로 통과하여 DU에 도착하게 된다. 이 파일럿 신호를 DU가 수신하여 무선채널을 추정하고, 그에 맞게 MIMO가 적용된 신호를 다시 Downlink(DL) 방향으로 전송하게 된다. 그러면, MIMO 기법이 적용된 DL 신호가 다시 Fronthaul, RU, 무선 채널을 차례로 거쳐서 단말기에 도착하게 된다.

이때에 단말기가 송신한 파일럿 신호가 DU에 도착하고 이 정보를 처리하여 MIMO가 적용된 DL 신호가 다시 단말기에 도착할 때까지 무선구간의 채널상태가 변하지 않아야 하는 조건이 발생하게 된다. 단, 여기에서 고려해야 할 사항이 있는데, 바로 사용자의 단말기가 이동할 수 있으며 이로 인해 무선구간의 채널상태가 변할 수 있다는 점이다.

MIMO 단말기에서 안테나의 이격 거리에 따른 수신호의 상관계수(correlation coefficient)를 연구한 이전의 연구 결과들을 살펴보면<sup>6,7)</sup>, 채널의 상황에 따라  $0.3\lambda \sim 0.5\lambda$  만큼 두 안테나가 떨어져 있으면, 두 안테나간의 상관계수가 0에 가까워지는 것을 알 수 있다 ( $\lambda$ 는 동작 주파수의 파장). 즉, 달리 표현하면, 단말기가 공간상에서  $0.3\lambda \sim 0.5\lambda$  만큼 이동하면, 채널상태가 완전히 바뀐다는 것을 의미한다. 따라서, 본 논문에서는 채널상태가 유지되는 공간적인 범위를  $0.3\lambda$ 의  $1/10$ 인  $0.03\lambda$  범위 내라고 가정하였다. 참고로, 앞에서 언급한 연구결과를 살펴보면<sup>6,7)</sup>, 공간적으로  $0.03\lambda$  범위 내에서는 상관계수가 0.9 이상임을 알 수

표 1. 본 논문에서 가정한 fronthaul 기반의 이동통신 시스템의 조건  
Table 1. Assumed conditions of mobile networks with fronthaul

Item	Assumed value
Coherent distance of the wireless channel	0.03 λ
Length of fronthaul	L <sub>f</sub>
Cell radius	R

있으며, 이러한 가정이 타당함을 알 수 있다<sup>5)</sup>.

따라서, 단말기의 기준신호가 DU에 도착했다가 MIMO가 적용된 DL신호가 다시 단말기로 돌아오는 시간 사이에 단말기가 0.03λ 범위 내에서 이동했다면 채널이 유지되었다고 가정할 수 있다. 본 논문에서 가정한 이동통신 셀의 구조 및 조건을 표 1에 정리하였다.

### III. Fronthaul의 한계거리식 유도

본 논문의 2장에서 정의한 시스템의 구조와 조건에서 단말기에서 송출한 기준신호가 DU에 도달했다가 MIMO 기법이 적용된 DL 신호가 다시 단말기까지 돌아오는 왕복시간 T<sub>r</sub>은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_r = 2 \times \left( \frac{R}{C} + D_{RU} + \frac{L_f}{C_f} \right) + D_{DU} \quad (1)$$

여기에서 R은 셀의 반경, C는 빛의 속도, D<sub>RU</sub>는 RU에서 발생하는 지연, L<sub>f</sub>는 fronthaul의 거리, C<sub>f</sub>는 유선망인 fronthaul에서의 전파속도, D<sub>DU</sub>는 DU에서 발생하는 지연시간이다.

한편, 단말의 최대 이동속도를 v로 가정하면, 무선 구간에서 채널상황이 변하지 않는 허용시간 T<sub>c</sub>은 2장에서 가정한 조건에 의해 단말기가 0.03 λ만큼의 거리를 이동하는데 걸리는 시간으로 계산할 수 있다. 따라서, T<sub>c</sub>는 다음과 같이 표현된다.

$$T_c = \frac{0.03 \times \lambda}{v} = \frac{0.03C}{fv} \quad (2)$$

여기에서 λ는 동작 주파수의 파장, f는 동작 주파수이다.

식(1)에서 구한 T<sub>r</sub>이 식(2)에서 구한 T<sub>c</sub>보다 작아야 하므로, 아래의 조건식을 만들 수 있다.

$$T_r < T_c \\ \Rightarrow 2 \times \left( \frac{R}{C} + D_{RU} + \frac{L_f}{C_f} \right) + D_{DU} < \frac{0.03C}{fv} \quad (3)$$

이 조건식(3)을 fronthaul의 거리 L<sub>f</sub>에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$L_f < C_f \left( \frac{0.015C}{fv} - \frac{D_{DU}}{2} - \frac{R}{C} - D_{RU} \right) = L_{\max} \quad (4)$$

즉, DU와 RU로 이루어진 이동통신망에서 fronthaul의 최대거리는 식(4)에서 주어진 L<sub>max</sub>로 주어진다. fronthaul은 주로 광통신망으로 구현되므로, fronthaul에서의 전파속도 C<sub>f</sub>는 광섬유에서의 빛의 전파속도로 주어진다. 광섬유는 굴절률이 1.5정도인 유리로 이루어지므로 C<sub>f</sub>는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$C_f = \frac{C}{1.5} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 다시 정리하면 아래와 같다.

$$L_{\max} = \frac{C}{1.5} \times \left( \frac{0.015C}{fv} - \frac{D_{DU}}{2} - \frac{R}{C} - D_{RU} \right) \\ = \frac{0.01C^2}{fv} - \frac{CD_{DU}}{3} - \frac{R}{1.5} - \frac{CD_{RU}}{1.5} \quad (6)$$

결국 식(6)으로 주어진 L<sub>max</sub>가 Closed-loop MIMO가 적용되는 이동통신 시스템에서 fronthaul의 최대거리가 된다.

### IV. 5G 이동통신에서 fronthaul의 한계거리

3장에서 유도한 수식(6)을 가지고, 5G 밀리미터파 통신에서 사용될 이동통신 시스템의 파라미터 값을 이용하여 fronthaul의 최대 한계거리를 실제로 계산해 보도록 하자. 동작 주파수는 국내에서 밀리미터파 주파수 대역으로 할당된 28 GHz로 가정하고, 셀 반경은 500 m, D<sub>DU</sub>와 D<sub>RU</sub>는 모두 10 μs, 빛의 속도는 3×10<sup>8</sup> m/s, 5G 단말기의 최대 이동속도를 120 km/h (= 33.3 m/s)로 가정하면, 식(6)을 통해 계산되는 fronthaul의 최대 한계거리는 -2.4 km(음수임에 유의)가 도출된다. 이 결과를 표 2에 정리하였다.

식(6)을 통해 계산되는 fronthaul의 한계거리가 음

표 2. 5G 밀리미터파 이동통신 시스템에서 fronthaul의 최대 한계거리  
 Table 2. Estimation of maximum limit of fronthaul in 5G millimeter wave communications

Item	value
C (speed of light)	$3 \times 10^8$ m/s
R (cell radius)	500 m
v (speed of user)	120 km/h (= 33.3 m/s)
DRU (time delay in RU)	10 $\mu$ s
DDU (time delay in DU)	10 $\mu$ s
f (operating frequency)	28 GHz
Maximum limit of fronthaul	-2.4 km (negative value)

수가 나오는 결과가 의미하는 바는 표 2에서 가정하는 시스템 조건에서는 fronthaul이 존재할 수 없음을 뜻한다. 즉, fronthaul구조의 기지국으로서 위에서 제시한 조건의 시스템을 지원할 수 없음을 뜻한다.

한편, 현재 수 GHz 대역을 사용하는 4G 이동통신의 동작주파수에서는 fronthaul 형태의 기지국을 사용하여도 아무런 문제가 없다. 따라서, 표 2에서 가정하는 시스템 조건에서 동작주파수를 변화시켜 가면서 fronthaul의 한계거리가 어떻게 변하는지를 그래프로 도시하여 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 결과에서 알 수 있듯이, 현재 4G LTE (long-term evolution)로 사용되는 동작 주파수 대역인 2 GHz 에서는 fronthaul의 한계거리가 10.2 km에 달하기 때문에 현재의 이동통신 시스템에 별다른 문제가 없지만, 동작 주파수가 올라가서 9 GHz가 되면 fronthaul의 한계거리는 음수로 계산결과가 도출되는 것을 알 수 있다. 이 결과는 9 GHz 이상의 동작 주파수에서는 fronthaul 구조의 기지국으로 Closed-loop

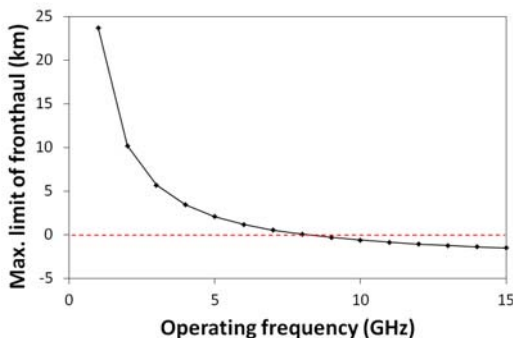


그림 3. 동작 주파수 대역에 따른 fronthaul의 최대 한계거리  
 Fig. 3. Maximum limit of fronthaul distance as a function of operating frequency

MIMO 기반의 이동통신 기술을 제공할 수 없음을 뜻한다.

한편, 밀리미터파 주파수 대역을 도심에서만 사용하거나 핫스팟(hotspot) 용도로만 사용한다고 가정하면, 120 km/h와 같은 고속으로 이동하는 사용자를 고려하지 않아도 될 수 있다. 따라서, 사용자의 이동속도에 따라 fronthaul의 한계거리 값이 어떻게 변하는지를 구하여 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 도보로 이동하는 속도를 지원할 수 있는 10 km/h를 가정하였을 때에는 28 GHz의 동작주파수에서 8.2 km의 한계거리를 나타내었다. 하지만, 사용자의 이동속도가 30 km/h일 때에는 28 GHz의 동작주파수에서 0.5 km의 한계거리를 나타내었고, 사용자의 이동속도가 60 km/h일 때에는 28 GHz의 동작주파수에서 음수의 한계거리를 나타내었다.

이 결과가 의미하는 바는 28 GHz의 밀리미터파 통신의 주파수에서는 도보로 이동하는 속도인 10 km/h 정도의 이동속도 내에서만 fronthaul 구조의 기지국으로 closed-loop MIMO 지원이 가능하다는 뜻이다.

한편, 표 2에서 가정하는 시스템의 조건에서 DU와 RU에서 발생하는 시간지연 값이 관련 기술의 발전에 따라 줄어들 가능성도 있다. 따라서, DU와 RU의 시간지연 값의 변화에 따라 fronthaul의 최대 한계거리가 어떻게 변하는지를 그림 5에 도시하였다. 상세하게 설명하면, 사용자의 속도가 10 km/h 및 30 km/h일 때에 DU와 RU의 시간지연 값이 2  $\mu$ s 및 5  $\mu$ s로 줄어들 때의 fronthaul 최대 한계거리를 구하여 도시하였다.

그림 5의 결과를 살펴보면, 28 GHz의 동작주파수에서 사용자의 속도가 10 km/h일 때에  $D = D_{RU} = D_{DU} = 5 \mu$ s일 때에 fronthaul의 한계거리가 9.7 km로

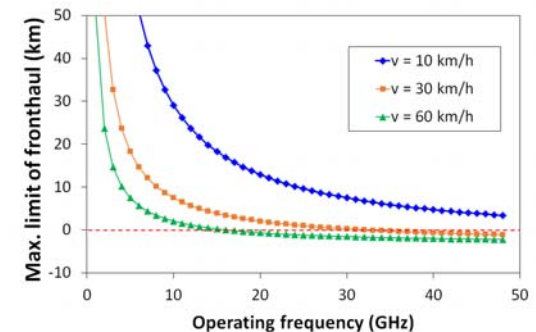


그림 4. 사용자의 이동속도에 따른 fronthaul의 최대 한계거리  
 Fig. 4. Maximum limit of operating frequency depending on the speed of users

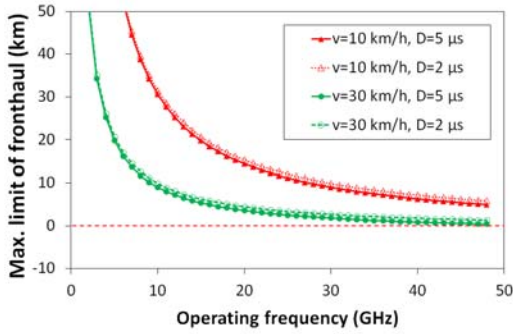


그림 5. DU와 RU의 시간지연 값 변경에 따른 최대 한계 동작주파수  
 Fig. 5. Maximum limit of operating frequency depending on the delay of DU and RU

도출되고,  $D_{RU} = D_{DU} = 2 \mu s$  일 때에는 fronthaul의 한계거리가 10.6 km가 도출된다. 또한, 사용자의 속도가 30 km/h일 때에는  $D = D_{RU} = D_{DU} = 5 \mu s$  일 때에 fronthaul의 한계거리가 2.0 km로 도출되고,  $D_{RU} = D_{DU} = 2 \mu s$  일 때에는 fronthaul의 한계거리가 2.9 km가 도출된다.

그림 5의 결과를 종합하면, DU와 RU의 기술 발전에 따라 시간 지연 값이 최소로 줄어들더라도 fronthaul의 한계거리 값에 주는 영향은 그리 크지 않은 것을 알 수 있다.

그림 3, 4, 5에서 정리하였듯이 동작주파수, 사용자의 이동속도, DU 및 RU에서의 시간지연에 따라 fronthaul의 한계거리가 어떻게 변하는지를 살펴보았다. 이를 정리하면, Closed-loop MIMO 기법을 사용하는 이동통신 시스템에서 28 GHz의 밀리미터파 주파수 대역에서는 120 km/h와 같은 고속으로 이동하는 사용자에게는 서비스를 제공할 수 없으며, 10 km/h이하로 이동하는 사용자에게만 서비스를 제공할 수 있다. 그리고, 그 때의 fronthaul 한계거리는 DU 및 RU의 시간지연 값에 따라 다소 변동이 있으나, 8~10 km 정도의 값을 보인다.

따라서, fronthaul 구조의 기지국을 사용하여 28 GHz 동작 주파수를 가지고 Closed-loop MIMO 기법을 적용하려면 보행자 이동속도의 단말기만 서비스가 가능하고, fronthaul의 최대 거리는 8~10 km이내가 되어야 한다는 것을 의미한다. 이러한 결론은 향후 fronthaul 구조의 이동통신망을 설계할 때에 중요한 지침이 될 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 논문에서는 fronthaul 구조를 가진 5G 밀리미터파 이동시스템에서 Closed-loop MIMO를 사용하기 위해서 발생하는 fronthaul의 최대 한계거리에 대해서 수학적으로 유도하고 여러 시스템 조건에 대해서 그 변화를 고찰해 보았다.

본 논문의 연구에 따르면, fronthaul 구조의 이동통신 시스템에서 28 GHz의 동작주파수를 사용하게 되면, 실질적으로 10 km/h 이내로 이동하는 단말기들만 지원이 가능할 것으로 파악되며, 이때에 fronthaul의 한계거리는 DU와 RU의 지연수준에 따라 8~10 km 정도로 계산되었다. 따라서, 이동통신망의 fronthaul을 설계할 때에는 이보다 더 짧은 길이를 가지도록 주의해야 할 것이다.

본 연구는 이동통신망에서 fronthaul의 한계거리를 간편한 수식을 통해 계산할 수 있도록 만든 상당히 의미 있는 연구로 판단된다.

## References

- [1] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models," *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.
- [2] S.-M. Kim, "Study on applicability of radio over fiber system for 5G new radio access technology," *J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci.*, vol. 11, no. 9, pp. 849-854, Sep. 2016.
- [3] S.-M. Kim, "Limit analysis of the distance between DU and RU in 4G FDD mobile communication systems," *J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 135-139, Feb. 2012.
- [4] S.-M. Kim, "Limits of digital unit-remote radio unit distance and cell coverage induced by time division duplex profile in mobile WiMAX systems," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 250-258, Feb. 2013.
- [5] S.-M. Kim, "Limit of operating frequencies in mobile communications based on closed-loop MIMO," *J. KICS*, vol. 43, no. 10, pp.

1571-1575, Oct. 2018.

- [6] N. Ebrahimi-Tofighi, M. ArdebiliPour, and M. Shahabadi, "Receive and transmit array antenna spacing and their effect on the performance of SIMO and MIMO systems by using an RCS channel model," *World Academy of Sci., Eng. and Technol.*, vol. 36, 2007.
- [7] S.-K. Kim and Y.-S. Oh, "Analysis of channel capacity with respect to antenna separation of an MIMO system in an indoor channel environment," *J. Korea Electromagnetic Eng. Soc.*, vol. 17, no. 11, pp. 1058-1064, Nov. 2006.

김 성 만 (Sung-Man Kim)



1999년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 학사

2001년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 석사

2006년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 박사

2006년 3월~2009년 2월 : 삼성

전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년 3월~현재 : 경성대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 이동통신, 가시광통신, 광통신, 광전력  
전송