

폐 루프 다중안테나를 활용한 이동 통신 시스템에서 동작 주파수의 한계

김 성 만[°]

Limit of Operating Frequencies in Mobile Communications Based on Closed-Loop MIMO

Sung-Man Kim[°]

요 약

본 논문에서는 closed-loop MIMO를 사용하는 이동통신 시스템에서 발생하는 동작 주파수의 한계에 대해 연구하였다. 이동통신에서 closed-loop MIMO가 정상적으로 동작하기 위해서는 통신신호가 왕복으로 오가는 시간동안에 채널이 유지되어야 하는 조건이 발생한다. 이러한 조건을 분석하여 동작 주파수의 최대한계가 있다는 점을 수학적으로 유도하였다. 본 논문의 결과에 따르면, 이동통신 시스템의 한계 동작주파수는 단말기의 이동속도, 기지국의 지연시간, 기지국의 셀 반경에 의존하는 함수로 주어진다. 이 함수를 이용하면, 120 km/h로 이동하는 단말을 지원하기 위해서는 39 GHz 이상의 주파수 대역을 사용할 수 없다는 결론을 얻을 수 있다.

Key Words : Limit of operating frequency, millimeter wave, mobile communications

ABSTRACT

We analyze the limit of operating frequency in mobile communications using closed-loop multiple-input multiple-output (MIMO). In mobile communications, the wireless channel should be the same during the time when the communications signal travels back and forth between a base station and a cell phone. Using the condition, we can mathematically derive the limit of operating frequency in mobile communications. According to our results, the frequency limit is dependent on the speed of the mobile device, the delay time in the base station, and the cell radius. Our results show that it is difficult to apply closed-loop MIMO at a frequency band over 39 GHz to support a mobile device with a moving speed of 120 km/h.

1. 서 론

최근 국내에서는 5G 주파수 경매를 위한 정부의 공고문이 발표되었고, 2018년 6월에는 5G 이동통신의 세계 최초 상용화를 위해 3.5 GHz 대역과 28 GHz 대역의 주파수 경매가 이루어졌다. 이렇게 이동통신

시스템에서는 세대를 거듭할수록 점점 높은 주파수 대역을 사용하는 방향으로 진화하고 있다. 이러한 이유는 날이 갈수록 사용자가 요구하는 통신용량은 증가하고 있고, 이를 충족하기 위해서는 기존에 사용하던 RF 주파수 이외에 새로운 주파수 자원을 사용하여야 하기 때문이다¹⁾. 따라서, 5G 이상의 이동통신 시

※ 이 논문은 2018학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

[°] First and corresponding Author : (ORCID:0000-0003-1497-6832) KyungSung University, Department of Electronic Engineering, sungman@ks.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201808-252-A-RN, Received August 17, 2018; Revised September 10, 2018; Accepted September 20, 2018

스텝에서는 수십 GHz 이상인 밀리미터파 대역의 주파수를 활용하여 이동통신을 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 이렇게 점점 높은 주파수 대역을 이용하고자 노력을 하고 있지만, 계속 높아지는 주파수 대역을 이동통신에서 사용하는데 있어서 발생하는 이론적인 문제점이 없는지를 분석한 연구는 찾아보기 힘들다.

한편, 최근의 이동통신에서는 무선 전송구간에서 전송속도를 높이기 위하여 다양한 MIMO(multiple input multiple output) 기술을 사용하고 있다. 이러한 MIMO 기술은 무선 구간의 채널정보를 몰라도 상관없이 동작하는 open-loop MIMO 기술과 무선 구간의 채널정보를 알아야만 정상적으로 동작이 되는 closed-loop MIMO 기술로 나눌 수 있다. 그 중에서도 closed-loop MIMO 기술은 이동통신 발전의 근간을 이루어온 기술인데, 이로 인해 이동통신 시스템의 동작 주파수의 한계가 발생하게 된다는 점을 본 논문에서 수학적으로 고찰해 보고자 한다.

본 논문의 내용은 이동통신 시스템의 발전의 한계를 규정짓는 매우 중요한 연구결과가 될 것이다.

II. 이동통신 시스템의 구조

본 논문에서 가정한 이동통신 셀 구조를 그림 1에 나타내었다. 여기에서 R은 기지국의 셀 반경을 나타낸다. 이러한 구조에서 closed-loop MIMO가 동작되는 상황은 다음과 같다. 단말에서 기준신호(pilot signal)를 기지국으로 보내면, 그 신호를 기지국이 수신하여 무선채널을 추정하고, 그에 맞게 MIMO가 적용된 신호를 다시 downlink(DL) 방향으로 송출하게 된다. 그러면, MIMO 기법이 적용된 DL 신호가 무선채널을 거쳐서 단말에 도착하게 된다.

이 때에 단말이 송신한 기준신호가 기지국에 도착

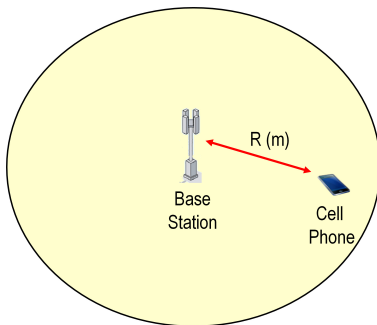


그림 1. 이동통신 셀(cell)의 구조
Fig. 1. Structure of a cell in mobile networks

하고 이 정보를 처리하여 MIMO가 적용된 DL 신호가 다시 단말에 도착할 때까지 무선구간의 채널상태가 변하지 않아야 하는 조건이 발생하게 된다^{3,4)}. 여기에서 고려해야 할 사항이 있는데, 바로 사용자의 단말기가 이동할 수 있으며 이로 인해 무선구간의 채널상태가 변할 수 있다는 점이다.

한편, MIMO 단말기에서 안테나의 이격거리에 따른 두 신호의 상관계수(correlation coefficient)를 연구한 이전의 연구결과들을 살펴보면^{5,6)}, 채널의 조건에 따라 $0.3\lambda \sim 0.5\lambda$ 만큼 두 안테나가 떨어져 있으면, 두 안테나간의 상관계수가 0에 가까워지는 것을 알 수 있다 (λ 는 동작 주파수의 파장). 즉, 바꾸어 말하면, 단말기가 공간상에서 $0.3\lambda \sim 0.5\lambda$ 만큼 이동하면, 채널 상태가 완전히 바뀐다는 것을 의미한다. 따라서, 본 논문에서는 채널상태가 유지되는 공간적인 범위를 0.3λ 의 1/10인 0.03λ 범위 내라고 가정하였다³⁾.

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

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

Item	Assumed value
Coherent distance of the wireless channel	0.03λ
Cell radius	R

III. 동작 주파수의 최대 한계식 유도

본 논문의 2 장에서 정의한 시스템의 구조와 조건에서 기준신호가 단말에서 출발하여 기지국에 도달했다가 MIMO가 적용된 DL 신호로 다시 돌아오는 왕복시간 T_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_r = \frac{2R}{C} + D_{BS} \quad (1)$$

여기에서 R은 셀의 반경, C는 빛의 속도, D_{BS} 는 기지국에서 기준신호를 수신하고 이를 이용하여 MIMO 적용된 DL 신호를 무선구간으로 송출하는데 걸리는 지연시간이다. 한편, 단말의 최대 이동속도를 v로 가정하면, 무선 구간에서 채널상황이 변하지 않는 허용 시간 $T_{coherent}$ 은 2 장에서 가정한 조건에 의해 단말기

가 0.03λ 만큼의 거리를 이동하는데 걸리는 시간으로 계산할 수 있다. 따라서, $T_{coherent}$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

여기에서 λ 는 동작 주파수의 파장, f 는 동작 주파수이다.

식(1)에서 구한 T_r 이 식(2)에서 구한 $T_{coherent}$ 보다 작아야 하므로, 아래의 조건식을 만들 수 있다.

$$\frac{2R}{C} + D_{BS} = T_r < T_{coherent} = \frac{0.03C}{fv} \quad (3)$$

이 조건식(3)을 주파수에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$f < \frac{0.03C^2}{v(2R + CD_{BS})} = f_{max} \quad (4)$$

식(4)로 주어진 f_{max} 가 closed-loop MIMO가 적용되는 이동통신 시스템에서 사용할 수 있는 최대 한계 주파수가 된다.

IV. 이동통신에서 동작 주파수의 한계값

3장에서 유도한 수식(4)를 가지고, 현재 일반적으로 사용되는 이동통신 시스템의 파라미터 값에서 최대 한계 주파수의 값을 실제로 계산해 보도록 하자. 5G 밀리미터파 기지국에서 셀 반경을 300 m, 기지국에서 기준신호를 수신하고 MIMO 적용된 DL 신호를 송출하는데 걸리는 시간을 $5 \mu s$, 빛의 속도는 3×10^8 m/s, 5G 단말기의 최대 이동속도를 120 km/h (= 33.3 m/s)로 가정하면 식(4)를 통해 계산되는 최대 동작 주파수의 한계는 39 GHz가 된다. 즉, 39 GHz 이상의 동작 주파수를 사용하는 이동통신 시스템에서는 closed-loop MIMO를 활용하기 어렵다는 것이다. 이를 표 2에 정리하였다.

한편, 밀리미터파를 이용한 이동통신 시스템에서 단말기의 최대 이동속도를 다르게 가정할 수도 있다. 따라서, 표 2의 시스템 파라미터 값에서 단말기의 최대 이동속도를 하나의 변수로 놓고 이에 따른 동작 주파수 한계값을 나타낼 수 있으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 이 결과 값을 보면 단말기의 최대 이동속도가

표 2. 이동통신 시스템의 최대 한계 주파수 계산
Table 2. Estimation of limit of operating frequency in mobile communications

Item	value
C (speed of light)	3×10^8 m/s
R (cell radius)	300 m
v (speed of user)	120 km/h (= 33.3 m/s)
DBS (time delay in base station)	$5 \mu s$
Limit of operating frequency in mobile communications	38.6 GHz

높아질수록 한계 동작주파수의 값은 낮아지는 것을 알 수 있다. 단말기의 최대 이동속도를 시내 주행속도인 60 km/h로 가정하면 한계 동작 주파수는 77 GHz가 되고, 단말기의 최대 이동속도를 고속열차 기준인 300 km/h로 가정하면 한계 동작 주파수는 15.4 GHz가 된다. 즉, 300 km/h로 이동하는 단말을 closed-loop MIMO 기반의 이동통신 시스템으로 동작시키려면 동작 주파수를 15.4 GHz 이하로 사용해야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

또한, 그림 2의 결과를 살펴보면, 현재 5G 이동통신을 위해 할당된 28 GHz 대역을 사용했을 때에 단말의 최대 이동속도는 160 km/h까지만 지원할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만, 이 결과는 기지국의 지연시간을 $5 \mu s$ 라는 다소 이상적인 값으로 가정한 결과이고, 실제로는 이동통신 표준에서 정의한 DL 프레임에서 DL 신호의 할당 위치에 의한 추가적인 시간지연이 발생하기 때문에 지원하는 단말의 최대 이동속도는 160 km/h에서 더 줄어들 것으로 판단된다.

한편, 기지국에서의 지연시간인 D_{BS} 에 따라 한계

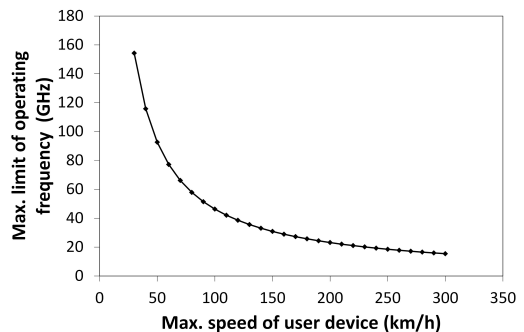


그림 2. 단말기의 이동속도에 따른 최대 한계 동작주파수
Fig. 2. Maximum limit of operating frequency as a function of the speed of user device

동작 주파수 값이 어떻게 변하는 지를 그림 3에 나타내었다. D_{BS} 를 제외한 나머지 시스템 파라미터 값들은 표 2의 값들을 사용하였다. 그림 3을 보면, 기지국에서의 지연시간이 늘어남에 따라 한계 동작주파수의 값은 낮아지는 것을 알 수 있다. 기지국의 처리시간을 $5 \mu s$ 로 가정했을 때에는 39 GHz가 동작 주파수의 최대 한계값으로 계산되지만, DL 프레임의 할당 등으로 인한 추가 지연을 고려하여 기지국의 지연시간을 $10 \mu s$ 로 가정하면 한계 동작 주파수의 값은 23 GHz가 되고, 기지국의 지연시간을 $20 \mu s$ 로 가정하면 한계 동작 주파수의 값은 12 GHz로 낮아지게 된다.

한편, 그림 3의 결과를 살펴보면, 현재 5G를 위해 할당된 28 GHz의 동작주파수를 가정하면, 기지국의 지연시간은 $7 \mu s$ 이내가 되어야함을 알 수 있다.

또한, 수식(4)를 이용하면 셀 반경에 따른 이동통신의 한계 동작 주파수도 구할 수도 있다. 이를 그림 4에 도시하였다. 셀 반경을 제외한 나머지 시스템 파라미터 값들은 표 2의 값들을 사용하였다. 그림 4에서

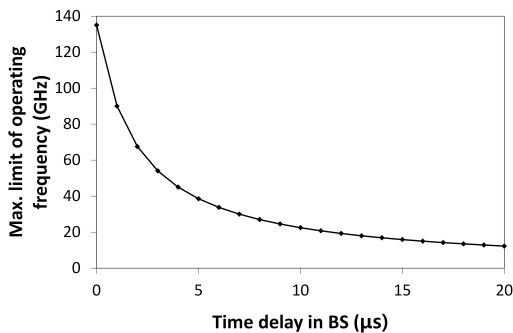


그림 3. 기지국에서의 지연시간에 따른 최대 한계 동작주파수
 Fig. 3. Maximum limit of operating frequency as a function of time delay in base station (BS)

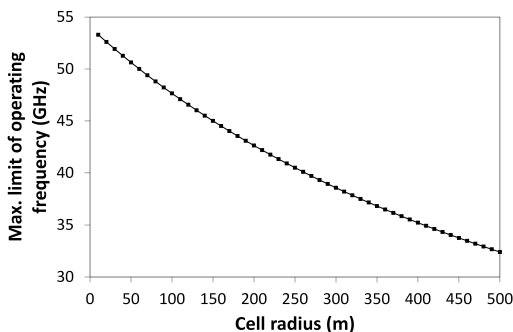


그림 4. 기지국의 셀 반경에 따른 최대 한계 동작주파수
 Fig. 4. Maximum limit of operating frequency as a function of cell radius

보듯이 기지국의 셀 반경이 커질수록 한계 동작주파수는 낮아지는 것을 알 수 있다. 셀 반경이 실령 0 m 라도 한계 동작 주파수는 존재하며, 그 값은 54 GHz 이다. 셀 반경이 100 m이면 한계동작 주파수는 48 GHz이고, 셀 반경이 200 m이면 한계 동작 주파수는 43 GHz이며, 셀 반경이 500 m일 경우에는 동작 주파수가 32 GHz이다.

그림 2, 3, 4에서 알 수 있듯이 단말의 이동속도, 기지국에서의 지연시간, 기지국의 셀반경이 증가할수록 한계 동작주파수의 값은 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 향후에 이동통신망을 설치할 때에 이러한 시스템의 파라미터 값을 측정하여 식(4)에 대입하면, 이동통신망에서 사용할 수 있는 주파수 대역의 한계값을 쉽게 구할 수 있다. 본 연구의 결과는 이동통신 기술의 한계를 보여주는 결과로서, 복잡하지 않으면서도 아주 중요한 지침이 될 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 closed-loop MIMO를 사용하는 이동통신 시스템에서 최대 동작주파수의 한계가 존재한다는 사실을 수학적으로 유도하였다.

본 논문의 결과에 따르면, 단말기의 이동속도를 120 km/h, 기지국의 지연시간을 $5 \mu s$ 로 가정하였을 때에 39 GHz 이상의 주파수 대역은 이동통신에서 closed-loop MIMO 기법을 활용하기 어렵다는 결론을 얻게 된다. 따라서, 이 경우는 open-loop MIMO 방식을 활용하여야 할 것이다.

또한, 본 논문에서는 이동통신 시스템의 한계 주파수에 영향을 미치는 요소를 밝혀내었다. 그 요소들은 단말기의 이동속도, 기지국의 셀 반경, 기지국의 지연시간이다. 각각의 요소가 변함에 따라서 한계 동작주파수가 어떻게 변하는지를 그래프를 통해 도시하였다.

References

[1] S.-M. Kim, S.-G. Mun, and S. Lee, "Required specification analysis of CPRI link of 4G mobile networks for using WDM-PON transmission," *J. KICS*, vol. 37B, no. 7, pp. 499-504, Jul. 2012.

[2] S.-M. Kim, "Study on applicability of radio over fiber system for 5G new radio access technology," *J. KIECS*, vol. 11, no. 9, pp. 849-854, Sept. 2016.

- [3] S.-M. Kim, "Limit analysis of the distance between DU and RU in 4G FDD mobile communication systems," *J. KIECS*, 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] 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.
- [6] 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," *The 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