

6G 통신을 위한 복합 빔포밍 시스템 구조 및 성능 분석

박대희, 박세훈
한국전자기술연구원

daehee.park@keti.re.kr, psh104@keti.re.kr

요약

본 논문은 Upper-mid 대역의 6G 통신을 단말 관점에서 효과적으로 지원할 수 있는 복합 빔포밍 시스템을 제안한다. 제안하는 복합 빔포밍 시스템의 수신 신호 및 빔포밍 방법을 제시하고, 이에 대한 채널용량 분석을 수행하여 기존 디지털 빔포밍 시스템 대비 약 10%의 채널용량이 증대되는 것을 확인하였다.

I. 서론

이동통신의 발전함에 따라, 단말에서 다양한 형태의 Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) 구조로 구현 및 발전되어왔다. MIMO 시스템을 구현하기 위한 단말에서의 실제적인 안테나 구조는 반송주파수에 밀접한 관련이 있다. 이러한 5G 통신 시스템에서는 FR1 인 Sub-6GHz 와 FR2 인 mmWave 로 구분되고, 이에 대한 단말에서의 구체적인 안테나 구조 및 시스템이 다르게 구성되어 있다.

기지국과는 다르게, 단말에서는 소모전력과 제한된 실장공간으로 인하여 Sub-6GHz 는 이전 통신시스템인 2G, 3G, 4G 의 반송주파수와 유사하기 때문에, 단말에서는 여러 RAT 가 복수의 안테나를 공유하는 형태로 구현되어있다.

mmWave 대역에서는 채널에서의 신호감쇄가 매우 높지만, 요구되는 물리적 안테나 크기가 Sub-6GHz 대비 매우 작아서 배열 안테나 형태의 안테나 모듈로 구현되어있다. 이러한 다수의 안테나 모듈과 모뎀을 접목하여 Hybrid-빔포밍 시스템으로 사용되고 있다.

한편, Sub-6GHz 와 mmWave 대역의 중간 주파수인 Upper-Mid 대역이 6G 통신을 위한 주파수 후보로 결정되었다. 이 Upper-Mid 대역에서의 채널특성과 요구하는 안테나의 크기는 Sub-6GHz 와 mmWave 의 특징을 모두 가지게 된다는 특징이 있다 [1]. 즉, 약전계에서는 mmWave 기술과 같이 높은 신호감쇄의 채널환경을 가지고, 강전계에서는 다수의 채널경로 기반의 다중화이득을 얻을 수 있는 채널환경을 가진다.

이러한 6G 통신을 단말 관점에서 구현하기 위해서는 다양한 형태의 안테나 시스템이 제안될 수 있다. 단말 관점에서는 6G 통신을 지원 뿐만 아니라, 이전의 통신시스템들을 모두 지원해야 한다는 제약이 있다.

이와 같은 제약조건과 더불어 제한된 실장공간을 고려하여 안테나 Topology 를 구현해야 하기 때문에 매우 복잡한 요소들을 고려해야 한다 [2, 3]. 따라서, 본 연구에서는 종래의 MIMO 시스템과 Hybrid 빔포밍 시스템이 복합적으로 적용되는 복합 빔포밍 시스템 구조를 제시하고 이에 대한 성능을 분석하고자 한다.

II. 복합 빔포밍 시스템

LTE 및 Sub-6GHz 를 위한 안테나 시스템은 RAT 간의 공유된 다중 안테나에 대해서 각 안테나가 모뎀에 연결되는 그림 1(a)에서의 디지털 빔포밍 시스템 형태를 가지고 있다. 한편, 그림 1(b)와 같이 mmWave 안테나 시스템의 경우 Hybrid-빔포밍 시스템을 기반으로 설계되어왔다. 배열 안테나 형태의 안테나 모듈이 있고,

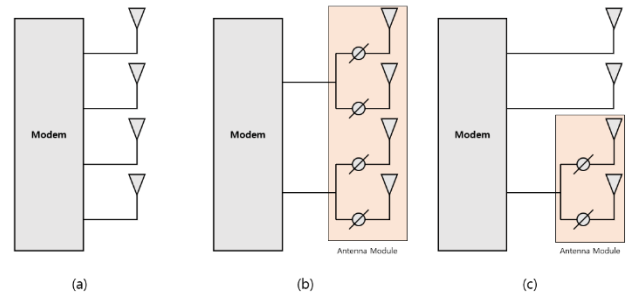


그림 1 종래 빔포밍 시스템 및 제안 복합 빔포밍 시스템 구조

빔포밍하여 송/수신된 신호가 모뎀으로 전달되는 형태를 가지고 있다.

서론에서 설명한 것과 같이, Upper-Mid 대역이 가지는 특징으로 인하여 6G 통신을 위한 단말에서의 안테나 구조는 여러가지 형태로 제안될 수 있다. 본 논문에서는 종래의 Sub-6GHz 안테나를 효과적으로 활용하면서 약전계에서의 성능을 개선하기 위한 배열안테나를 추가적으로 사용하는 형태로 그림 1(c)와 같은 복합 빔포밍 시스템을 제안한다.

종래의 기술에서는 Hybrid-빔포밍 혹은 Sub-배열 안테나, 등의 다중 stage 형태를 가지는 획일화된 안테나 시스템을 가지고 있는 반면, 본 연구에서 제안하고 있는 구조는 일부는 디지털 빔포밍과 유사하고 일부는 Hybrid-빔포밍과 유사한 형태를 가지고 있다.

제안하는 복합 빔포밍 시스템 구조가 단말에서 가지는 장점은 다음과 같다. 종래의 LTE 및 Sub-6GHz 를 지원하는 다수의 안테나에 매칭회로를 이용하여 Upper-Mid 대역의 안테나로 방사할 수 있게 구성할 수 있어 다수의 안테나를 확보할 수 있게 된다. 또한, 약전계와 같은 환경에서는 안테나 모듈에 실장된 배열 안테나를 기반으로 빔포밍 이득을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 제안 복합 빔포밍 시스템은 Downlink 를 고려하였고, 송신부, 수신부의 디지털 빔포밍, Hybrid-빔포밍이 각각 N_t , M_a , M_a 의 안테나 개수로 구성되어 있고, Hybrid-빔포밍에서 모뎀으로 연결되는 부분은 1 개를 가지고 있다고 가정하였다. 또한, $N_t > M_a + M_a$ 로 가정하였다.

제안 시스템에서의 수신 신호는 디지털 빔포밍 부와 Hybrid-빔포밍 부의 수신 신호로 구성되어 있고 다음과 같이 표현된다.

$$y = Hx + n = \begin{bmatrix} H_d \\ \hat{h}_a \end{bmatrix} x + n ,$$

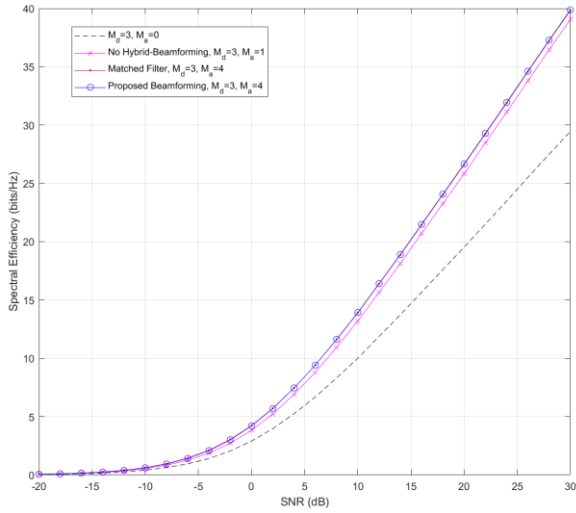


그림 2 제안 시스템의 시플레이션 성능 분석

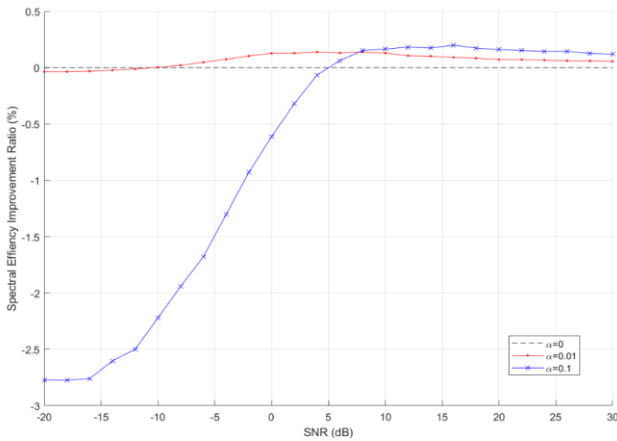


그림 3 빔포밍 알고리즘에 대한 성능 분석

여기서 \mathbf{H}_d 는 $M_d \times N_t$ 차원 채널이고, $\hat{\mathbf{h}}_a$ 은 빔포밍 가중치를 적용한 Hybrid-빔포밍 수신 채널로 $1 \times N_t$ 차원을 가지고 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{h}}_a = \mathbf{w}_a^H \cdot \mathbf{H}_a,$$

여기서 \mathbf{H}_a 는 배열안테나가 경험하는 $M_a \times N_t$ 채널을 의미하고, \mathbf{w}_a 는 Hybrid-빔포밍에서 적용된 가중치 $M_a \times 1$ 벡터이다.

II. 제안 시스템의 성능 분석

본 연구에서는 제안 시스템의 기본 성능을 분석하기 위해서 안테나의 방사성능이 모두 동일하고, i.i.d Rayleigh 채널을 가정하였다. 또한, 수신부에서 채널정보를 알고 있다고 가정하여 본 제안 시스템의 채널용량은 다음과 같이 고려하였다 [4].

$$\text{Capacity} = E[\log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{P}{N_0 N_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H)],$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기대 값 연산자, $\frac{P}{N_0}$ 는 신호대잡음비 (SNR)를 의미한다.

다양한 Hybrid-빔포밍 알고리즘이 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 디지털 안테나와의 간섭은 최소화하고 Hybrid-빔포밍 안테나의 이득은 최대로 할 수 있도록 아래 수식과 같은 가중치를 적용하였다.

$$\mathbf{w}_{a, \text{prop}} = \arg\max \mathbf{w}_a^H \mathbf{H}_a (\mathbf{I} - \alpha \mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d) \mathbf{H}_a^H \mathbf{w}_a.$$

여기서 α 는 간섭량에 대한 가중치를 산정하는 값을 의미하고, 0.1 를 적용하였다.

N_t , M_d , M_a 는 각각 16, 3, 4 로 가정하였고, 제안 구조 및 알고리즘과 종래 기술의 성능 결과는 그림 2 와 같다. 디지털 빔포밍만 있는 경우와 Hybrid 빔포밍 부가 1 개의 안테나로 구성된 경우를 포함하여 비교하였다.

제안 방안이 기존 시스템과 Hybrid-빔포밍이 없는 시스템 대비 약 46%, 10%의 채널용량 성능 향상을 가진다는 것을 확인하였다. 디지털 빔포밍만 있는 경우 대비 다중화이득을 얻을 수 있으므로, 강전계에서의 채널용량이 높게 향상되는 것을 확인할 수 있다.

한편, Hybrid-빔포밍 부가 1 개로 안테나 수가 증가된 것 대비 제안한 복합 빔포밍 시스템의 채널용량은 SNR 관점에서 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Hybrid-빔포밍을 기반으로 Degree-of-Freedom 을 증가시킬 수 없다는 한계점을 가지기 때문이지만, SNR 를 향상한다는 관점에서는 단말에서 사용될 가능성을 가지고 있다.

또한, α 에 따른 성능 비교를 그림 3 과 같이 수행하였다. α 가 0 일 때는 \mathbf{H}_d 와 독립적으로 \mathbf{w}_a 를 선택하는 것으로 Matched filter 와 동일한 성능을 가지는 것을 알 수 있다. 반면, α 가 커질수록 간섭량의 가중치가 높아지는 형태로 약전계에서는 Matched filter 보다 성능이 떨어지지만, 강전계에서는 더 높은 채널용량을 확보할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이 특성은 채널 환경과 방사패턴에 따라 더 높은 성능 향상을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

III. 결론

본 연구에서는 6G 통신을 위한 복합 빔포밍 시스템 구조를 제안하고, 이에 대한 성능 분석을 수행하였다. 제안 시스템을 통해 종래의 디지털 빔포밍 시스템과 Hybrid-빔포밍 시스템을 개별로 사용하는 것보다 높은 성능을 가질 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이상적인 채널환경과 안테나 특성을 고려하였으나, 추후에는 다양한 채널 환경과 안테나 방사패턴을 고려하여 분석하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2024-00354970)

참고 문헌

- [1] Kang, Seongjoon, et al. "Cellular wireless networks in the upper mid-band." IEEE Open Journal of the Communications Society (2024).
- [2] Ahmed, Irfan, et al. "A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: Architecture and system model perspectives." IEEE Communications Surveys & Tutorials 20.4 (2018): 3060-3097.
- [3] Rahman, Md Saifur, et al. "Dynamic MIMO: A Key Enabler for 6G." 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2023.
- [4] Tse, David, and Pramod Viswanath. Fundamentals of wireless communication. Cambridge university press, 2005.