

다중 안테나 시스템에서 안테나 교정 방식 연구

김근영, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

kykim12@etri.re.kr, jhmyung@etri.re.kr, koyj@etri.re.kr

Antenna Calibration Methods in Distributed MIMO Systems

Keunyoung Kim, Jung Ho Myung, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

많은 안테나를 사용하고 있는 시분할 다중 안테나 시스템에서 상하향 링크가 서로 다른 하드웨어 경로를 거쳐서 발생하는 차이를 교정하기 위한 방식을 소개한다. 안테나 교정 방식은 단말의 기준 신호 전송없이 안테나 간 내부적으로 기준신호를 전송하는 내부 교정 방식을 사용하고, 상하향 링크 경로 차이를 없애는 방식이 아닌, 모든 안테나가 동일한 차이를 갖도록 하는 상대적 교정 방식을 사용한다. 이러한 방식을 5G 시스템에서 적용하고, 이에 대한 성능을 제시한다.

I. 서론

이동통신시스템의 성능 향상을 위해, 송수신단에 더욱더 많은 안테나를 설치하고 있다. 안테나 수가 많아지면, 각 안테나 별로 기준신호를 전송하고, 이를 통해 채널 추정값을 피드백하는 것은 많은 자원을 요구하기 때문에 적절하지 않다. 따라서, 시분할 방식을 이용하여, 단말이 상하향링크로 전송한 기준신호를 이용하여 채널 추정하고, 채널이 변하지 않은 코히어런트 시간 내에 하향링크 전송에 활용하는 방식이 일반적으로 사용된다 [1].

상하향링크로 수신되는 신호와 하향링크로 전송되는 신호가 다른 하드웨어 경로를 거치기 때문에 이를 교정하지 않으면, 코히어런트 시간 내에 채널이 변하지 않는다 하더라도 성능 저하가 발생한다. 본 논문에서는 많은 수가 있는 상황에서 안테나 교정 방식을 소개하고, 이에 대한 성능을 제시한다.

II. 본론

TDD 시스템에서 상하향링크로 전송된 기준신호를 이용하여 하향링크 채널을 추정하는 모델은 다음 그림과 같이 표현할 수 있다 [2].

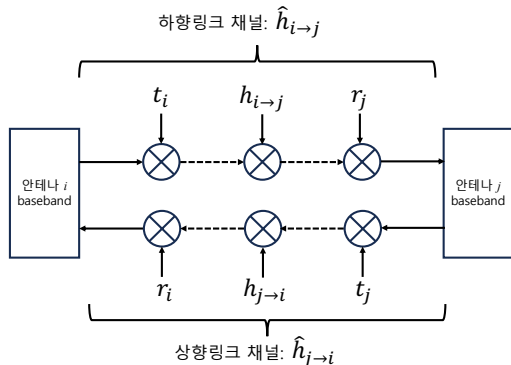


그림 1. 하드웨어 경로를 고려한 상하향링크 채널

송신기 안테나 i 에서 수신기 안테나 j 로의 하향링크 채널은 송신기 하드웨어에 의한 영향 t_i , 무선채널 $h_{i \rightarrow j}$, 수신기 하드웨어에 의한 영향 r_j 의 곱으로 표현할 수 있다. 즉, 하향링크 채널은 $\hat{h}_{i \rightarrow j} = t_i \cdot h_{i \rightarrow j} \cdot r_j$ 이다. 송신기 안테나 j 에서 수신기 안테나 i 로의 상하향링크 채널은 송신기 하드웨어에 의한 영향 t_i , 무선채널 $h_{j \rightarrow i}$, 수신기 하드웨어에 의한 영향 r_i 의 곱으로 표현할 수 있다. 즉, 하향링크 채널은 $\hat{h}_{j \rightarrow i} = t_j \cdot h_{j \rightarrow i} \cdot r_i$ 이다.

하향링크 채널 추정을 위한 안테나 교정 계수, $b_{i \rightarrow j}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$b_{i \rightarrow k} = \frac{\hat{h}_{i \rightarrow j}}{\hat{h}_{j \rightarrow i}} = \frac{t_i \cdot \hat{h}_{i \rightarrow j} \cdot r_j}{r_i \cdot \hat{h}_{j \rightarrow i} \cdot t_j} = \frac{t_i \cdot r_j}{r_i \cdot t_j} = \frac{1}{b_{j \rightarrow i}} \quad (1)$$

채널 추정값은 다음과 같이 안테나 교정 계수와 상하향링크 채널의 곱으로 구할 수 있다.

$$\hat{h}_{i \rightarrow j} = b_{i \rightarrow k} \cdot \hat{h}_{j \rightarrow i} \quad (2)$$

상하향링크 채널을 통해 하향링크 링크 채널을 추정하기 위해서는 하드웨어 차이를 극복에 필요한 안테나 교정 계수를 알아야 한다. 안테나 교정 계수 추정을 위해 송수신기 안테나간 채널 추정하는 방식을 사용한다면, 전송되는 기준신호 뿐 아니라 피드백이 필요하기 때문에 안테나 수가 많은 경우에는 실용적인 방안이 아니다. 따라서, 송신기 안테나간 내부에서만 하는 안테나 교정 방식이 필요하다.

안테나 내부 교정 방식을 설명하기 위해 다음과 같은 안테나 배치를 고려한다.

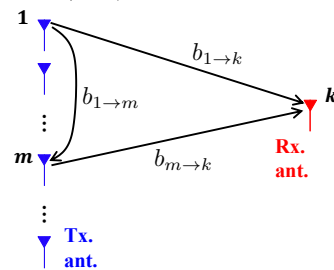


그림 2. 안테나 내부 교정을 위한 안테나 배치

상향링크 채널 정보, $\hat{h}_{k \rightarrow m}$ 을 이용하여 하향링크 채널 정보, $\hat{h}_{m \rightarrow k}$ 를 파악하기 위해서는 다음과 같은 관계를 이용한다.

$$\hat{h}_{k \rightarrow m} \cdot \frac{b_{1 \rightarrow k}}{b_{1 \rightarrow m}} = \hat{h}_{k \rightarrow m} \cdot b_{m \rightarrow k} = \hat{h}_{m \rightarrow k} \quad (3)$$

여기서, 문제는 $b_{1 \rightarrow k}$ 를 구하기 위해서는 하향링크 채널 정보, $\hat{h}_{1 \rightarrow k}$ 를 파악하기 위한 피드백이 필요하다는 것이다. 이러한 문제를 해결하는 방안이 상대적 채널 보정 계수를 구하는 방안이다.

상대적 안테나 교정 계수를 구하는 방식은 송신 안테나 빔포밍에 동일한 상수를 곱하게 되더라도 빔포밍 형태가 변하지 않는 성질을 이용하는 것이다. 송신기의 송수신 하드웨어 경로 차이를 0으로 만드는 절대적 안테나 교정 계수를 구하는 방식이 아닌, 기준 안테나 1번의 송수신 하드웨어 경로 차이가 θ 라면, 다른 송신 안테나의 송수신 하드웨어 경로 차이도 θ 가 되도록 하는 방식이다. 송신기의 수신 하드웨어 경로에 비해 송신 하드웨어 경로가 θ 로 모든 송신 안테나가 동일하다면, 빔포밍 형태는 변하지 않는다. 따라서, $b_{1 \rightarrow k}$ 의 정확한 값이 θ 라 하더라도, 이를 1로 가정하더라도 성능에는 영향을 미치지 않는다. 결론적으로 다음과 같이 피드백 없이 상향링크 기준 신호만을 이용한 채널 추정 정보와 내부 안테나 교정 계수만을 이용하여, 하향링크 채널 정보를 이용할 수 있다.

$$\hat{h}_{m \rightarrow k} = \hat{h}_{k \rightarrow m} \cdot \frac{b_{1 \rightarrow k}}{b_{1 \rightarrow m}} \Rightarrow \hat{h}'_{m \rightarrow k} = \frac{\hat{h}_{k \rightarrow m}}{b_{1 \rightarrow m}} = \hat{h}_{k \rightarrow m} \cdot b_{m \rightarrow 1} \quad (4)$$

안테나 교정 절차는 M 개의 안테나 사이에 서로 기준 신호를 전송하고, 각자 수신된 기준 신호를 통한 채널 추정 값을 통해 안테나 교정 계수를 구한다. 기준 안테나를 1이라고 하고, 안테나 m 의 채널 추정 계수를 구하고자 한다면, 기준 안테나 1이 기준 신호를 전송하고, 나머지 $M-1$ 개의 안테나는 각각 수신된 기준 신호를 통해 기준 안테나 1에서 안테나 m 사이의 채널 추정 값 ($\hat{h}_{1 \rightarrow m}$)을 구한다. 이후, $M-1$ 개의 안테나는 순차적으로 기준 신호를 전송하여, 안테나 m 과 기준 안테나 사이 채널 추정 값 ($\hat{h}_{m \rightarrow 1}$)를 구한다. 이를 통해 구한 안테나 교정 계수 ($\hat{b}_{m \rightarrow 1}$)는 다음과 같다.

$$\hat{b}_{m \rightarrow 1} = \frac{\hat{h}_{m \rightarrow 1}}{\hat{h}_{1 \rightarrow m}} \quad (5)$$

단말 k 가 전송하는 기준 신호를 통해 안테나 m 에서 추정된 상향링크 채널 추정을 $\hat{h}_{k \rightarrow m}$ 이라고 한다면, 이에 대응하는 하향링크 채널 $\hat{h}_{m \rightarrow k}$ 는 다음과 같이 구하고, 하향링크 채널 정보를 프리코딩 등에 활용한다.

$$\hat{h}_{m \rightarrow k} = \hat{h}_{k \rightarrow m} \hat{b}_{m \rightarrow 1} \quad (6)$$

제시된 안테나 교정 방식에 대한 성능분석을 위해, 5G 규격에서 사용된 부반송파 파라미터는 다음과 같다.

표 1. OFDM 부반송파 설정

파라미터	값
사용하는 resource block 수	32
부반송파 간격 [kHz]	120
슬롯당 심볼 수	14

채널 추정을 위해 사용하는 기준 신호인 CSI-RS 설정은 다음과 같다.

표 2. CSI-RS 설정

파라미터	값
슬롯 당 CSI-RS 심볼 수	12
CSI-RS	3
열번호	1
슬롯내 CSI-RS 심볼 위치	[1,2,3,...12]
CSI-RS 심볼용 RB 수	32

512 크기 IFFT를 이용하여 시간 영역 OFDM 샘플을

생성하고, 각 심볼 별로 CP를 추가한다. 14개 심볼에 추가되는 샘플 수는 [68 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36]이다.

채널 추정이 완벽하고, 채널 상호성이 유효한 상황에서 정확한 채널 교정 계수는 $b_{m \rightarrow 1}(i) = \frac{h_{m \rightarrow 1}(i)}{h_{1 \rightarrow m}(i)} = 1$ 이라고 가정하면, 채널 교정 계수 MSE(mean square error)는 다음과 같이 정의한다.

$$E \left[|b_{m \rightarrow 1}(i) - \hat{b}_{m \rightarrow 1}(i)|^2 \right] = E \left[\left| \frac{h_{m \rightarrow 1}(i)}{h_{1 \rightarrow m}(i)} - \frac{\hat{h}_{m \rightarrow 1}(i)}{\hat{h}_{1 \rightarrow m}(i)} \right|^2 \right] \quad (7)$$

수신 기준 신호의 SNR(signal to noise ratio)에 따른 채널 교정 계수 MSE는 다음 그림과 같이 SNR 증가에 따라 채널 교정 계수 MSE는 감소한다.

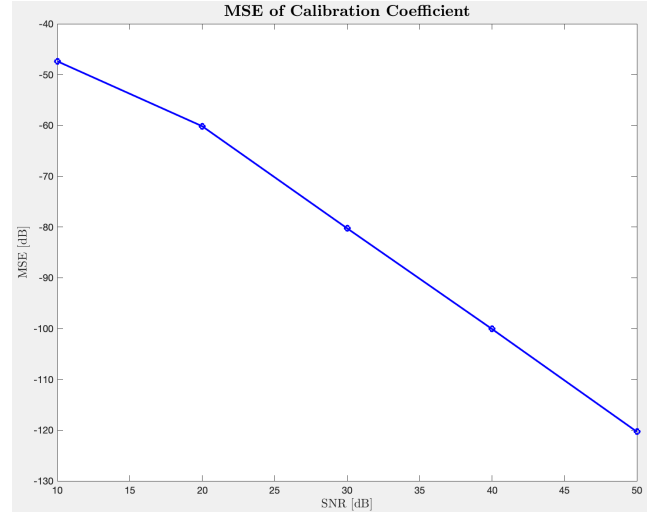


그림 3. 안테나 교정 계수 MSE

III. 결론

시분할 다중안테나 시스템에서 상하향 링크 신호가 다른 하드웨어 경로를 거치면서 발생하는 차이를 교정하기 위해, 단말의 기준 신호를 사용하지 않고, 기지국 안테나 간 기준 신호를 전송하는 안테나 내부 교정 방식과 상하향 링크 경로 차이를 모든 안테나가 일정한 값을 가지도록 하는 상대적 교정 방식을 소개하고, 5G 시스템에서 안테나 교정 계수에 대한 MSE 성능을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고 문헌

- [1] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [2] Clayton Shepard, Hang Yu, Narendra Anand, Erran Li, Thomas Marzetta, Richard Yang, and Zhong, Lin, "Argos: practical many-antenna base stations," Mobicom '12, pp. 53-64, Aug. 2012.