

초대규모 MIMO 환경에서 Self-healing 알고리즘 연구

명정호, 김민식, 조원철, 신우람, 고영조
한국전자통신연구원

{jhmyung, msk, woncheol, w.shin, koyj}@etri.re.kr

A Study of Self-healing Algorithms for Extreme Massive MIMO

Jungho Myung, Minsik Kim, Woncheol Cho, Wooram Shin, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 초대규모(Extreme) MIMO 시스템의 하이브리드 빔포밍 환경에서 발생하는 RF 채널 고장에 대응하기 위한 경량 self-healing 알고리즘을 제안한다. 제안 기법은 아날로그 프리코더 출력 직후의 RF-스테이지 채널 정보만을 사용하여, 첫째 위상 복원(phase-only reconstruction) 단계에서 정상 동작하는 RF 채널의 이상적 위상 조합을 재구성하고, 둘째 최소제곱 보상(least-squares compensation) 단계에서 잔여 진폭·위상 오차를 선형 매핑으로 보정한다. 복구된 아날로그 프리코더에 Regularized ZF 디지털 빔포밍을 적용한 결과, 50% 규모의 서브어레이 고장 상황에서도 원 설계 대비 80% 이상의 sum-rate 성능을 유지함을 보였다. 제안 기법은 전체 CSI 재획득 없이 빠르게 실행 가능하므로 실시간 무선 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킨다.

I. 서론

대규모 MIMO 기술은 기지국에 수십에서 수백 개의 안테나를 배치하여 다수 사용자에게 동시에 공간분할 다중전송을 수행함으로써 무선 링크 용량과 스펙트럼 효율을 획기적으로 증가시킨다. 특히 밀리미터파 대역에서 안테나 소형화와 넓은 대역폭이 가능해지면서 Massive MIMO는 5G/6G 네트워크의 핵심 기술로 자리매김했다. 그러나 모든 안테나에 개별 RF 채널을 연결하는 완전 디지털 빔포밍 구조는 장비 비용, 전력 소모, 하드웨어 복잡도 측면에서 큰 부담을 초래한다. 이를 완화하기 위해 소수의 RF 채널과 다수의 위상 시프터를 결합한 하이브리드 빔포밍이 제안되었다. 하이브리드 빔포밍은 아날로그 도메인에서 대략적인 빔을 형성한 뒤 디지털 도메인에서 사용자 간 간섭을 제거하여 디지털 빔포밍의 이점을 유지하면서도 RF 채널 수를 효과적으로 줄인다.

하지만 하이브리드 구조는 RF 채널 또는 위상 시프터 고장에 취약하다. 일부 RF 채널이 동작을 멈추면 해당 서브어레이에서 빔 형성이 이루어지지 않아 메인로브가 왜곡되고 사이드로브가 상승하며, 사용자별 SINR과 전체 sum-rate 성능이 급격히 저하된다. 실시간으로 변화하는 무선 환경에서 이러한 하드웨어 결함은 서비스 중단과 품질 저하로 직결될 수 있다. 기존 대응 방법은 전체 채널 정보를 재획득 후 디지털 프리코더를 재설계하거나 백업 RF 채널을 투입하는 방식이지만, 이들은 복구 지연을 유발하거나 시스템 비용과 복잡도를 증가시킨다 [1]–[3].

따라서 추가 하드웨어 없이도 빠르게 복구할 수 있는 경량화된 아날로그 도메인 복구 기법이 필요하다. 본 논문에서는 하이브리드 빔포밍 시스템에서 아날로그 프리코더 출력 직후의 RF-스테이지 채널 정보만을 활용하여 손상된 아날로그 프리코더를 실시간으로 복원하는 self-healing 알고리즘을 제안한다.

II. 본론

제안된 RF-채인 Self-Healing 알고리즘은 하이브리드 빔포밍 시스템에서 일부 RF-채인이 고장 났을 때, 전체 복잡한 CSI(채널 상태 정보)를 재획득하거나 여분의 하드웨어를 추가하지 않고도 빠르게 아날로그 프리코더를 복원할 수 있도록 설계되었다. 이 알고리즘은 아날로그 단계 직후의 RF-스테이지 채널 정보만을 이용하며, 위상 복원(Phase-Only Reconstruction)과 최소제곱 보상(Least-Squares Compensation) 두 축으로 구성된다.

먼저, 아날로그 프리코더 $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{rf}}$ 가 적용된 후의 RF-스테이지 채널은

$$\mathbf{H}_{RF} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF}$$

로 주어진다. 여기서 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times N_t}$ 는 사용자 K 명에 대한 원 채널, N_t 와 N_{rf} 는 안테나 엘레먼트 수와 RF-채인 수를 의미한다. 고장으로 N_{fail} 개의 RF-채인이 동작을 멈추면, 해당 열에 대응되는 \mathbf{F}_{RF} 성분은 0이 되며, 그에 따른 RF-스테이지 채널은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{H}_{RF, fail} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF, fail}$$

해당 채널은 빔패턴 왜곡과 전력 손실을 내포하고 있어, 단순히 디지털 재설계만으로는 아날로그 도메인 손실을 완전 복구하기 어렵다.

Phase-only Reconstruction

제안된 기법의 첫 단계는 위상 정보만으로 복구할 수 있는 부분을 즉시 복원하는 것이다. 이를 위해, 고장 후 채널 $\mathbf{H}_{RF, fail}$ 에 대해 SVD(singular-value-decomposition)를 아래와 같이 수행한다.

$$[\mathbf{U}_{rf}, \mathbf{\Sigma}_{rf}, \mathbf{V}_{rf}] = \text{svd}(\mathbf{H}_{RF, fail}).$$

여기서 $\mathbf{V}_{rf} \in \mathbb{C}^{N_{rf} \times K}$ 의 각 열 $\mathbf{v}_{rf}^{(m)}$ 가 사용자 m 에 대한 이상적 RF-채인 위상 조합을 담고 있다. 따라서, 각 사용자 m 에 대하여, 살아남은 RF-채인 인덱스 집합 Λ_m 에서만 다음과 같이

$$[\mathbf{F}_{RF,heal}]_{i,m} = \begin{cases} e^{j\angle v_{rf,i}^{(m)}}, & i \in \Lambda_m, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

로 위상만 복사한 뒤, 각 열을 단위 노름(unit-norm)으로 정규화하여 phase-only 아날로그 프리코더 $\mathbf{F}_{RF,heal}$ 을 얻는다. 이때 각 열을 단위 노름으로 정규화하면, 전체 송신 전력 분배를 해치지 않으면서 위상 정보만으로 손실된 빔패턴의 주요 축을 복원할 수 있다.

Least-Squares Compensation

Phase-only reconstruction 이후에도 복구된 아날로그 프리코더를 적용한 RF-스테이지 채널

$$\mathbf{H}_{RF,heal} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF,heal}$$

은 원래 의도한 채널 $\mathbf{H}_{RF} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF}$ 와 진폭 및 위상에서 차이를 보인다. 이 차이를 정량화하고 보상하기 위해, RF-스테이지 관점에서 선형 매핑 보상행렬 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_{rf} \times N_{rf}}$ 를 최소제곱 기준으로 설계한다. 즉, 고장 이후 1 차 복원행렬 $\mathbf{H}_{RF,heal}$ 에 \mathbf{X} 를 적용할 때, 목표 채널 \mathbf{H}_{RF} 와의 오차를 최소화하는 \mathbf{X} 를 구해야 한다. 해당 최적화 문제는

$$\arg \min_{\mathbf{X}} \|\mathbf{H}_{RF,heal} \mathbf{X} - \mathbf{H}_{RF}\|_F^2,$$

로 정의할 수 있으며, 최적화 솔루션은 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_{opt} = (\mathbf{H}_{RF,heal}^H \mathbf{H}_{RF,heal})^{-1} \mathbf{H}_{RF,heal}^H \mathbf{H}_{RF}.$$

보상 행렬 \mathbf{X}_{opt} 의 각 열은 살아남은 RF-체인들이 어떻게 결합되어야 원래 채널 \mathbf{H}_{RF} 효과를 가장 잘 근사하는가를 나타내는 가중치 벡터이다.

최종적으로 보상된 아날로그 프리코더는 다음과 같이 업데이트 된다.

$$\mathbf{F}_{RF,heal}^{opt} = \mathbf{F}_{RF,heal} \mathbf{X}_{opt}.$$

행렬 곱을 통해, 1 차 위상 근사에서 보정되지 못한 진폭 편차와 위상 잔여 오차가 선형 결합 방식으로 보상된다. 마지막으로, 실제 RF-체인 출력 전력 제약을 맞추기 위해 각 열에 대한 정규화 과정을 수행한다.

실험을 위한 디지털 빔포밍은 Regularized Zero-forcing(RZF)을 가정했으며, RF-스테이지 채널 정보에 대하여 노이즈 정규화 계수 α 를

$$\alpha = \sigma^2 \frac{\text{tr}(\mathbf{H}_{RF} \mathbf{H}_{RF}^H)}{K}$$

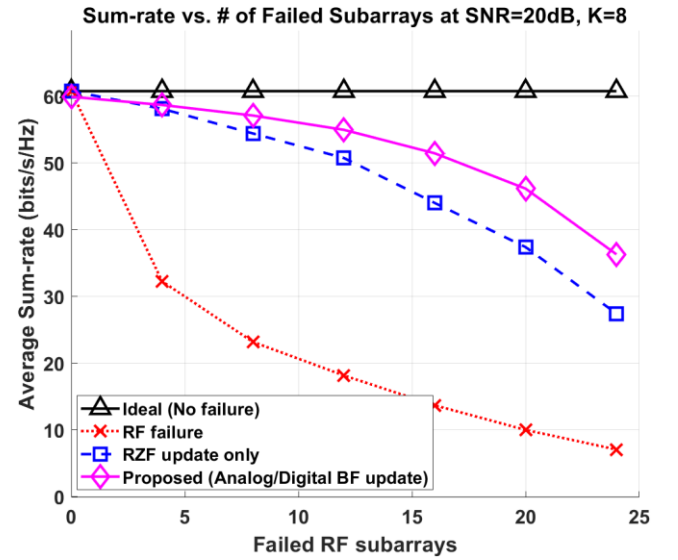
로 계산한 뒤, RZF 수식으로 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{F}_{BB} = \mathbf{H}_{RF}^H (\mathbf{H}_{RF} \mathbf{H}_{RF}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1}$$

이때, 성능 비교를 위해 RF-스테이지 채널은 \mathbf{H}_{RF} , $\mathbf{H}_{RF,fail}$, $\mathbf{H}_{RF,heal}$ 을 이용한다.

채널 생성을 위한 주파수는 7GHz 를 고려하였으며, 사용된 하이브리드 구조는 4x1 으로 구성된 subarray 가 4x8 개로 적층된 패넌 구조를 고려하였다. MIMO 채널은 CDL-C 모델을 사용하였으며 기타 파라미터는 3GPP에서 제안된 파라미터를 참조하였다 [4].

실험결과를 보면, RF-체인이 고장 없이 정상 동작할 때("Ideal") 시스템은 약 61 bits/s/Hz 의 최고 sum-rate 를 안정적으로 유지한다. 반면 복구 없이 고장만 반영한 경우("RF failure") 네 개의 서브어레이 장애만으로도 sum-rate 가 절반 이하(≈ 32 bits/s/Hz)로 급락하며, 장애 수가 늘어날수록 거의 소실 수준(≈ 5 bits/s/Hz)까지 떨어진다. 디지털 프리코더만 재설계한 RZF 업데이트("RZF update only")는 고장 여파를 크게 완화하여, 12 개 장애 시에도 약 50 bits/s/Hz 를 유지하며 RF failure 대비 세 배 이상의 성능을 보인다. Self-Heal 알고리즘 제안 기법은 여기에



아날로그 위상 복원과 최소제곱 보상을 추가함으로써, 동일 조건에서 약 53 bits/s/Hz(원래 성능의 87%)까지 회복하며 RZF 업데이트만 적용한 경우보다 3-5 bits/s/Hz 추가 이득을 제공한다. 이를 통해 제안 기법이 심각한 RF-체인 고장 상황에서도 시스템 용량을 효과적으로 유지할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 일부 RF 체인 고장 시 아날로그 손실을 복구하는 Self-Healing 알고리즘을 제안하였다. 제안 기법은 SVD 기반 위상 복원 후 RF-스테이지 채널에 대해 최소제곱 보상을 수행하여 진폭·위상 오차를 정밀 보정하고, 이후 RZF 디지털 빔포밍으로 안정적인 성능을 확보한다. 시뮬레이션 결과, 고장 없는 상태 대비 80% 이상의 sum-rate 를 유지했으며, 디지털 재설계만 대비 최대 10 bits/s/Hz 의 추가 이득을 달성했다. 제안 기법은 초대규모 MIMO 환경에서 실시간 고장 복구에 효과적임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2024-00397216, Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발).

참 고 문 헌

- [1] Z.Hamici, "Fast Beamforming with Fault Tolerance in Massive Phased Arrays Using Intelligent Learning Control," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 67, no. 7, pp. 4517-4527, 2019.
- [2] S.-M.Tsai, M.-T.Wu, Y.-H.Chen, H.-W.Yan, and M.-L.Chuang, "Pattern Compensation for Faulty Phased Array Antenna Based on Deep-Learning Technique," IEEE Open J. Antennas Propag., vol. 6, no. 2, pp. 414-421, 2025.
- [3] S.I.Krich, I.Weiner, and C.J.Prust, "Low Sidelobe Antenna Patterns with Failed Elements," in Proc. IEEE ICASSP, 2012, pp. 2581-2584.
- [4] 3GPP TR RAN, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 18)," 3GPP TR 38.901 V18.0.0, Apr. 2024.