6G 이동통신 시스템을 위한 위상천이기 선택기반 저복잡도 하이브리드 빔포밍 기법

최현서, 정방철, 오성근
아주대학교 전자공학과

hsmanse@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr, oskn@ajou.ac.kr

Low-Complexity Hybrid Beamforming Based on Phase-Shifter Selection for 6G Mobile Communication Systems

Hyun Seo Choi, Bang Chul Jung, Seong Keun Oh
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요 약

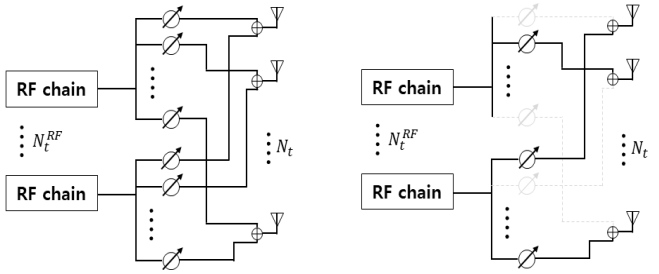
본 논문에서는 6G 이동통신시스템용 대규모 MIMO 시스템에서 데이터 전송 효율은 유지하면서 시스템의 구현 복잡도를 효과적으로 감소시키기 위한 위상천이기(Phase shifter) 선택 기반 하이브리드 빔포밍 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 먼저 완전 연결 하이브리드 빔포머를 설계한 후, 전체 빔포머의 원소별 기여도를 바탕으로 RF chain-안테나 연결을 선택한다. 연결 구조가 결정된 이후에 송수신 아날로그 및 디지털 빔포빙 계수를 반복적으로 최적화한다. 모의실험을 통해 제안한 기법이 동일한 하드웨어 복잡도를 갖는 기존 기법보다 우수한 Spectral Efficiency를 달성함을 확인하였다.

Ⅰ. 서론

밀리미터파(mmWave) 및 테라헤르츠(THz) 대역을 활용하는 차세대 무선통신 시스템에서는 높은 경로 손실을 보상하고 스펙트럼 효율 극대화를 위해 대규모 안테나 배열 기반의 빔포밍 기술이 필수적으로 요구된다. 특히, 완전 디지털 빔포밍(Fully Digital Beamforming)의 경우 각 안테나마다 독립적인 RF chain을 할당하여 우수한 성능을 제공하지만, 대규모 안테나 환경에서 안테나 개수에 비례하여 RF chain의 수가 증가하므로, 하드웨어 비용과 전력 소모가 크다는 단점이 있다 [1]. 이를 보완하기 위해 하이브리드 빔포밍(Hybrid Beamforming) 구조가 제안되었다. 하이브리드 빔포밍에서는 적은 수의 RF chain을 사용하여 다수의 안테나를 제어하기 위해 위상천이기(Phase shifter)를 사용한다. 대표적으로 완전 연결 구조(Fully-connected)에서는 각 RF chain이 모든 안테나에 연결된다 [2]. 따라서 완전 디지털 빔포밍과 유사한 성능을 확보하지만, 필요한 위상천이기의 개수가 커져 대규모 안테나 환경에서 전력 소모와 하드웨어 복잡도가 증가한다. 이를 해결하기 위해 각 RF chain을 일부 안테나에만 연결하여 필요한 위상천이기의 개수를 줄이는 부분 연결 구조(Sub-array)가 제안되었으나, 연결 구조가 고정되어 있어 빔포밍 자유도가 제한되고 이에 따른 성능 열화가 발생할 수 있다 [3]. 따라서 위상천이기의 개수를 줄이며, 동시에 최대한의 성능을 확보할 수 있는 효율적인 RF 연결 구조 설계가 중요하다. 본 논문에서는 완전 연결 하이브리드 빔포머로부터 얻어지는 전체 빔포머 가중치를 활용하여 기여도가 높은 위상천이기의 연결만을 선택하는 위상천이기 선택 기반 하이브리드 빔포밍 기법을 제안한다. 이후 선택된 위상천이기 연결 구조를 고정한 상태에서 송수신단의 아날로그 및 디지털 빔포머를 반복적으로 재설계함으로써, 완전 연결 구조에 근접한 스펙트럼 효율을 달성하는 것을 목표로 한다.

Ⅱ. 위상천이기 선택 기반 하이브리드 빔포밍 시스템 모델

그림 1은 완전 연결 구조와 본 논문에서 고려하는 위상천이기 선택 기반 연결 구조를 나타낸다. 완전 연결 구조는 각 RF chain이 모든 안테나에 연결되는 반면, 제안 구조는 일부 RF chain-안테나 연결만을 활성화하여 위상천이기 수를 줄인다. 본 논문에서는 이러한 위상천이기 선택 기반 연결 구조를 송신단과 수신단에 적용한 단일 사용자 MIMO 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려한다.



(a) 완전 연결 구조 (b) 위상천이기 선택 기반 구조

그림 1. (a) 완전 연결 하이브리드 빔포밍 구조
(b) 제안하는 위상천이기 선택 기반 하이브리드 빔포밍 구조

송신단은 N_t개의 안테나와 N_t^{RF}개의 RF chain을 가지며, 수신단은 N_r개의 안테나와 N_r^{RF}개의 RF chain을 갖는다고 가정한다. 송신단은 N_s개의 데이터 스트림을 전송하며, 송신 심볼 벡터를 $\mathbf{s}\in\mathbb{C}^{N_s\times 1}$ 라고 정의한다. 송신단의 디지털 프리코더와 아날로그 프리코더는 각각 $\mathbf{F}_{\mathrm{D}}\in\mathbb{C}^{N_t^{RF}\times N_s}$, $\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}\in\mathbb{C}^{N_t\times N_t^{RF}}$ 로 표현된다. 따라서 전체 송신 프리코더는 $\mathbf{F}=\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}\mathbf{F}_{\mathrm{D}}$ 로 정의된다. 이때 수신 신호는 $\mathbf{y}=\mathbf{HFs}+\mathbf{n}$으로 표현된다. 여기서 $\mathbf{H}\in\mathbb{C}^{N_r\times N_t}$는 송수신단 사이 채널 행렬이다. 본 논문에서는 각 채널 원소가 독립적인 복소 가우시안 분포를 따르는 레일레이 페이딩 채널을 고려한다. 또한 $\mathbf{n}$ 은 평균이 0이고 분산이 σ^2인 복소 가우시안 잡음 벡터이다. 수신단에서는 아날로그 컴바이너와 디지털 컴바이너를 이용하여 수신 신호를 결합한다. 수신단의 디지털 컴바이너와 아날로그 컴바이너는 각각 $\mathbf{W}_{\mathrm{D}}\in\mathbb{C}^{N_r^{RF}\times N_s}$, $\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}\in\mathbb{C}^{N_r\times N_r^{RF}}$ 로 정의되며, 전체 수신 컴바이너는 $\mathbf{W}=\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}\mathbf{W}_{\mathrm{D}}$ 로 표현된다. 수신 컴바이너를 적용한 후의 신호는 $\hat{\mathbf{s}}=\mathbf{W}^{\mathrm{H}}\mathbf{y}$로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 위상천이기 선택 기반 연결 구조를 표현하기 위해 송신단, 수신단의 연결 선택 여부를 나타내는 이진 mask 행렬을 각각 $\mathbf{M}_{\mathrm{t}}\in\{0,1\}^{N_t\times N_t^{RF}}$, $\mathbf{M}_{\mathrm{r}}\in\{0,1\}^{N_r\times N_r^{RF}}$ 로 정의한다. $\mathbf{M}_{\mathrm{t}}$의 원소가 1이면 해당 송신 RF chain-안테나 연결이 활성화됨을 의미하고, 0이면 해

당 연결이 비활성화됨을 의미한다. 수신단의 $\mathbf{M}_{\mathrm{r}}$도 동일하게 정의된다. 따라서 선택된 송신 아날로그 프리코더와 수신 아날로그 컴바이너는 각각 $\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}=\mathbf{M}_{\mathrm{t}}\odot\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}$, $\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}=\mathbf{M}_{\mathrm{r}}\odot\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}$로 표현된다.

Ⅲ. 제안하는 위상천이기 선택 기법 및 빔포밍 기법

본 논문에서는 제한된 수의 위상천이기를 사용하며 동시에 성능 열화를 완화하기 위한 위상천이기 선택 기반 빔포밍 기법을 제안한다. 제안 기법의 핵심은 완전 연결 하이브리드 빔포머로부터 얻어지는 전체 빔포머의 가중치를 이용하여 성능 기여도가 높은 RF chain-안테나 연결을 선택하는 것이다. 즉, 전체 빔포머에서 큰 전력 값을 갖는 원소에 해당하는 연결만을 활성화함으로써 위상천이기의 수와 하드웨어 복잡도를 줄일 수 있다. 이후 선택된 연결 구조를 고정하고 송신단과 수신단의 아날로그 및 디지털 빔포머를 반복적으로 재설계한다.

먼저, 송신단의 위상천이기 연결을 선택하기 위해 완전 연결 구조에서 송신 하이브리드 빔포머를 설계한다[2]. 완전 연결 아날로그 프리코더와 디지털 프리코더를 각각 $\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{FC}},\mathbf{F}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{FC}}$라고 할 때, 전체 송신 빔포머는 $\mathbf{F}_{\mathrm{FC}}=\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{FC}}\mathbf{F}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{FC}}$로 정의된다. 본 논문에서는 $N_s=N_t^{RF}=N_r^{RF}$인 경우를 고려하며, 전체 송신 빔포머의 각 열을 대응되는 RF chain의 연결 선택 지표로 사용한다. 따라서 전체 송신 빔포머의 원소별 전력 크기인 $\left|\mathbf{F}_{\mathrm{FC}}\right|^2$를 기준으로 송신 위상천이기를 선택한다. 각 데이터 스트림에 대해 $\left|\mathbf{F}_{\mathrm{FC}}\right|^2$값이 큰 L_t개의 원소를 선택하며, 선택된 위치에 해당하는 RF chain-안테나 연결만을 활성화한다. 이때 L_t는 각 데이터 스트림당 활성화 되는 위상천이기의 개수이며, 활성 비율 α를 이용하여 $L_t=\lfloor \alpha N_t \rfloor$로 정의된다. 송신단 위상천이기 연결이 선택된 이후에는 선택된 아날로그 프리코더 $\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}$에 대해 디지털 프리코더를 다시 설계한다. 따라서 선택된 송신 구조에서 최종 송신 프리코더는 $\mathbf{F}^{\mathrm{sel}}=\mathbf{F}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}\mathbf{F}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{sel}}$로 표현된다. 다음으로 수신단은 위에서 얻은 송신 프리코더 $\mathbf{F}^{\mathrm{sel}}$을 고려하여 완전 연결 수신 하이브리드 컴바이너를 설계한다. 완전 연결 아날로그 컴바이너와 디지털 컴바이너를 각각 $\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{FC}},\mathbf{W}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{FC}}$라고 할 때, 전체 수신 컴바이너는 $\mathbf{W}_{\mathrm{FC}}=\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{FC}}\mathbf{W}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{FC}}$로 정의된다. 이후 송신단과 동일하게, 전체 수신 컴바이너의 원소별 전력 크기인 $\left|\mathbf{W}_{\mathrm{FC}}\right|^2$를 수신단 위상천이기 선택 지표로 사용한다. 각 데이터 스트림에 대해 $\left|\mathbf{W}_{\mathrm{FC}}\right|^2$값이 큰 L_r개의 원소를 선택하며, 선택된 위치에 해당하는 RF chain-안테나 연결만을 활성화한다. 이때 L_r은 각 데이터 스트림당 활성화되는 위상천이기의 개수이며, 활성 비율 α를 이용하여 $L_r=\lfloor \alpha N_r \rfloor$로 정의된다. 이후 선택된 아날로그 컴바이너 $\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}$에 대해 디지털 컴바이너를 다시 설계하여 최종 수신 컴바이너 $\mathbf{W}^{\mathrm{sel}}=\mathbf{W}_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{sel}}\mathbf{W}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{sel}}$를 얻는다.

마지막으로, 제안 기법은 선택된 송신 및 수신 연결 구조를 고정한 상태에서 송수신 빔포머를 반복적으로 재설계한다. 송신단에서는 현재 수신 컴바이너를 고려한 유효 채널을 기반으로 송신 아날로그 프리코더의 위상과 디지털 프리코더를 갱신하고, 수신단에서는 갱신된 송신 빔포머를 고려하여 선택된 수신 아날로그 컴바이너의 위상과 디지털 컴바이너를 갱신한다.

Ⅳ. 모의실험 결과 및 결론

표 1. 모의실험 공통 환경

Parameter	Value	Parameter	Value
송신 안테나(N_t)	64	수신 안테나(N_r)	8
송신 RF chain(N_t^{RF})	4	수신 RF chain(N_r^{RF})	4
데이터 스트림(N_s)	4	송신 SNR	-10:2:20dB

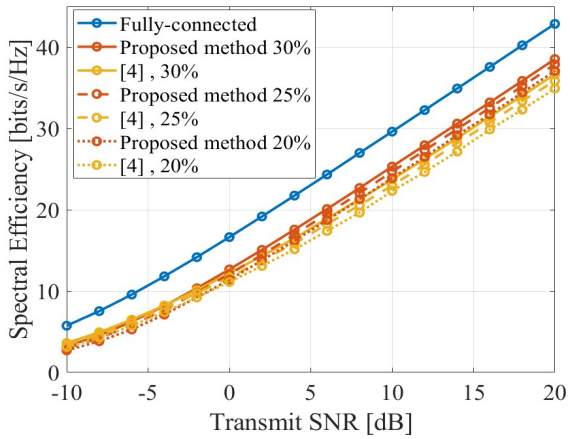


그림 2. 제안하는 위상천이기 선택 기반 빔포밍 기법의 성능

제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해 단일 사용자 MIMO 환경에서 송신 SNR에 따른 평균 스펙트럼 효율을 비교하였다. 위상천이기 활성 비율은 $\alpha=30\%,25\%,20\%$로 설정하였으며, 모든 위상천이기를 사용하는 완전 연결 하이브리드 빔포밍 구조 및 위상천이기 선택 기반 기법[4]과 비교하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2에서 완전 연결 구조는 모든 RF chain-안테나 연결을 사용하므로 가장 높은 성능을 보인다. 제안 기법은 활성 비율 감소에 따라 일부 성능 저하가 발생하지만, 완전 연결 빔포머 가중치를 기반으로 중요한 연결을 선택하기 때문에 동일한 활성 비율에서 기존 기법[4]보다 높은 스펙트럼 효율을 달성한다. 따라서 제안 기법은 위상천이기 수를 줄이면서도 성능 열화를 완화할 수 있으며, 하드웨어 복잡도와 스펙트럼 효율 사이의 효과적인 trade-off를 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2024-00420013, RS-2026-25489627)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] P. H. Chang et al., "Hybrid beamforming for wideband terahertz massive MIMO communications with low-resolution phase shifters and true-time-delay," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, no. 7, pp. 8000-8012, Jul. 2024.

[2] F. Sohrabi and W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 501-513, Apr. 2016.

[3] X. Zhao et al., "Partially-connected hybrid beamforming for spectral efficiency maximization via a weighted MMSE equivalence," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 20, no. 12, pp. 8218-8232, Dec. 2021.

[4] S. Payami, M. Ghoraishi, and M. Dianati, "Hybrid beamforming for large antenna arrays with phase shifter selection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, pp. 7258-7271, Nov. 2016.