

확장형 멀티 패널 배열을 위한 계층적 합성 코드북 설계

박대희, 유종인

한국전자기술연구원 ICT 디바이스·패키징연구센터

daehlee.park@keti.re.kr, aceryu@keti.re.kr

Hierarchical Synthesized Codebook Design for Scalable Multi-Panel Arrays

Daehee Park, Jongin Ryu

ICT Device · Packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute(KETI)

요약

본 논문은 6G 네트워크 제어 리피터(NCR) 시스템의 커버리지 확장을 위한 멀티 패널 배열 안테나의 효율적인 빔포밍 코드북 설계 기법을 제안한다. 다수의 AiP(Antenna-in-Package) 패널을 결합하여 배열을 확장할 때 발생하는 빔 탐색 공간의 지수적 증가 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 계층적 합성 접근 방식을 적용한다. 제안 기법은 단위 패널에 대해 최적화된 기저 코드북을 우선 생성하고, 이를 순차적으로 적층하며 패널 간 위상 정렬을 수행하여 전체 배열의 빔을 합성한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 전역 탐색 대비 현저히 낮은 계산 복잡도로도 이론적 상한선에 근접하는 빔 커버리지 성능을 달성함을 확인하였다.

I. 서 론

6 세대 이동통신의 성공적인 상용화를 위해 7~24 GHz 대역인 Upper-Mid Band (FR3)가 핵심 주파수 자원으로 부상하고 있다. 이 대역은 기존 Sub-6GHz 대역이 가지는 넓은 커버리지 이점을 동시에 제공할 수 있는 최적의 대역으로 평가받는다 [1]. 그러나 주파수가 높아짐에 따라 필연적으로 발생하는 경로 손실과 건물 침투 손실은 여전히 해결해야 할 과제이며, 이를 극복하기 위해 기지국과 단말 사이에서 빔포밍을 통해 신호 도달 범위를 능동적으로 확장하고 링크 예산(Link Budget)을 개선하는 네트워크 제어 리피터(NCR: Network Controlled Repeater)의 도입이 필수적이다 [2].

효율적인 NCR 시스템 구축을 위한 하드웨어 아키텍처로는 안테나 소자와 RFIC 를 하나의 패키지에 통합한 AiP (Antenna-in-Package) 기술 기반의 패널(Panel) 단위 모듈형 구조가 표준으로 자리 잡고 있다. AiP 기술은 시스템의 소형화와 전력 효율성을 극대화할 뿐만 아니라, 단위 패널을 타일 형태로 결합함으로써 요구되는 이득과 커버리지에 맞춰 전체 배열의 크기를 유연하게 확장할 수 있는 장점을 제공한다. 이는 다양한 설치 환경과 서비스 요구사항에 대응해야 하는 NCR 인프라 구축에 있어 비용 효율적인 솔루션이 된다.

하지만 패널을 결합하여 대규모 멀티 패널(Multi-Panel) 시스템으로 확장할 때, 최적의 빔포밍 벡터를 구성하는 것은 심각한 복잡성 문제에 직면한다. 전체 배열의 성능을 극대화하기 위해 모든 안테나 소자를 결합하여 위상을 최적화하는 전역 탐색 방식은 패널 수와 위상 분해능에 따라 빔 탐색 공간이 지수적으로 폭증한다. 이는 제한된 메모리 자원을 갖는 NCR 하드웨어에 저장 및 운용상의 큰 부담을 야기할 뿐만 아니라, 패널 개수나 배열 형태가 변경될 때마다 방대한 양의 전체 코드북을 새롭게 설계하고 저장해야 하므로 확장성 및 재사용성 측면에서 매우 비효율적이다. 반면, 메모리 절감을 위해 개별 패널의 빔을 단순히

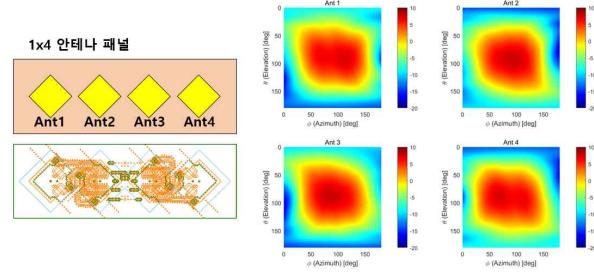


그림 1 1x4 안테나 패널의 형상 및 개별 안테나 소자의 방사 패턴 특성

물리적으로 결합할 경우, 패널 간 위상 불일치로 인해 빔 패턴이 왜곡되거나 원치 않는 격자 부엽(Grating Lobe)이 발생하여 시스템의 에너지 효율을 저하시킨다.

이에 본 연구에서는 NCR 시스템의 메모리 효율성과 확장성을 동시에 만족하기 위해, 패널 기저(Basis)에 기반한 계층적 합성 코드북 설계 기법을 제안한다. 제안하는 방식은 전체 시스템을 위한 방대한 코드북을 별도로 저장하는 대신, 사전에 최적화된 소규모의 패널 단위 코드북을 공통의 기저로 저장하여 재사용한다. 상위 계층에서는 패널 간의 위상 정렬 정보만을 추가로 관리하여 전체 시스템의 빔을 효율적으로 합성한다. 이를 통해 코드북 저장에 필요한 메모리 요구량을 획기적으로 줄이면서도, 다양한 패널 구성에 유연하게 적용 가능하고 이득 빔포밍 시스템을 구현할 수 있음을 보인다.

II. 계층적 합성 코드북 설계

본 연구에서 제안하는 계층적 코드북 설계는 시스템의 기본 단위가 되는 안테나 패널에 대한 1 차 빔북(Basis Codebook)을 우선 설계하고, 이를 기반으로 확장된 전체 멀티 패널에 대한 2 차 빔북을 합성하는 순차적 구조를 따른다. 우선 단위 안테나 배열 구조에서의 1 차 빔북 설계 과정을 기술한다. 그림 1 은 본 연구에 적용된 1x4 안테나 패널의 형상과 각 단위 안테나 소자의 방사 패턴을 보여준다. 실제 하드웨어 구현 시 전력

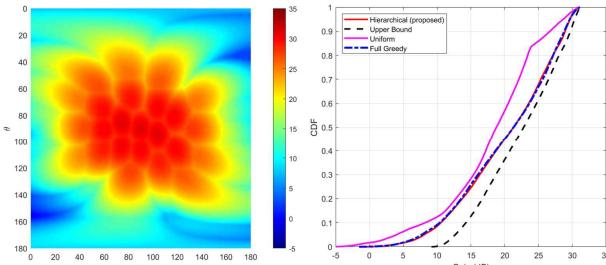


그림 2 확장된 멀티 패널 배열의 합성 빔 패턴 및 CDF 성능 비교

증폭기(PA)의 효율성을 고려하여 모든 안테나 소자는 동일한 전력을으로 구동됨을 가정하며, 빔 조향을 위해 n-bit 해상도를 갖는 위상 천이기를 적용한다. 이러한 하드웨어 제약 조건 하에서 방사 각도별로 최대 이득을 갖는 최적의 빔 코드를 전수 조사하여 성능의 상한선을 설정한다.

그러나 모든 각도에 대한 빔을 코드북에 포함하는 것은 메모리 비효율성을 초래하므로, 본 연구에서는 서비스 영역 내에서 빔 간의 이득 편차를 최소화하고 최소 이득을 최대화하는 그리디(Greedy) 알고리즘을 적용하여 핵심 빔을 선별한다[3]. 1×4 안테나 패널 구조에 대한 시뮬레이션 결과, 약 7 개의 빔 코드로 구성된 빔북이 커버리지 성능과 코드북 크기 간의 트레이드오프를 고려했을 때 가장 실용적으로 적합함을 확인하였으며, 이를 전체 시스템 확장을 위한 기저(Basis)로 정의한다.

다음으로, 확보된 1 차 빔북을 활용하여 패널이 결합된 전체 배열 구조에 대한 2 차 빔북을 설계한다. 패널 수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어나는 탐색 공간 문제를 해결하기 위해 순차적 누적 방식을 적용한다. 이는 전체 배열의 위상을 동시에 최적화하는 대신, 패널을 하나씩 추가해 나가면서 최적화를 수행하는 방식이다. 구체적으로, 기 생성된 1 차 빔북 내의 7 개 빔 코드 중 현재 목표하는 방사 각도에 가장 높은 이득을 제공하는 빔을 선택하고, 인접한 패널 간의 위상 정렬을 위한 위상 오프셋(Phase Offset)만을 변수로 하여 최적화를 수행한다. 이렇게 생성된 빔 후보군은 전체 배열의 모든 소자 위상을 무작위로 탐색하는 것이 아니라, 이미 검증된 패널 단위의 빔을 블록처럼 조립하고 위상만 미세 조정하는 형태이므로 탐색 복잡도가 현저히 낮다.

마지막으로, 이렇게 합성된 전체 배열용 빔 후보군에 대해 다시 한번 그리디 알고리즘을 적용하여, 최종적으로 NCR 시스템에 탑재될 N 개의 빔북을 선정한다. 이 과정은 패널 단위 기저를 재사용함으로써 시스템이 확장되더라도 코드북 설계의 복잡도가 선형적으로만 증가한다는 장점을 갖는다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 계층적 합성 코드북 설계 기법의 성능을 검증하기 위해, 1×4 안테나 패널을 선형으로 확장하여 구성한 4×1 멀티 패널 시스템(총 16 소자, 4 개 패널)을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2 는 제안된 기법을 통해 설계된 전체 빔 패턴과, 이에 따른 이득 성능을 누적 분포 함수(CDF)로 나타낸 결과이다. 성능 비교를 위해 이론적으로 달성 가능한 최대 성능인 상한선, 16 개 소자 전체에 대해 전수 조사 기반의 그리디 알고리즘을 적용한 경우(Full Greedy), 그리고

안테나 소자의 패턴 특성을 고려하지 않고 공간적으로 균등하게 빔을 조향한 경우(Uniform)를 대조군으로 설정하였다.

시뮬레이션 결과 그래프에서 확인할 수 있듯이, 제안하는 계층적 설계 기법(Hierarchical)은 전체 배열에 대해 전수 조사를 수행한 Full Greedy 방식과 거의 일치하는 성능 곡선을 나타내었다. 이는 패널 단위의 기저 빔을 활용하여 합성하는 방식이 전역 최적화 방식에 근접한 빔 형성 능력을 가짐을 의미한다. 특히, 단순히 공간을 등분하여 빔을 생성한 Uniform 방식의 경우, 특정 구간에서는 높은 이득을 보이나 하위 10%의 셀 경계 영역에서 급격한 성능 저하가 발생함을 확인할 수 있다. 반면 제안 기법은 상한치와의 격차를 최소화하며 전체 서비스 영역에서 안정적인 커버리지를 제공한다. 무엇보다 중요한 점은 복잡도 측면에서의 이점이다. Full Greedy 방식이 지수적인 탐색 시간을 요구하는 반면, 제안 기법은 사전에 최적화된 7 개의 빔 기저를 재사용하고 패널 간 위상 정렬만을 수행함으로써 계산 복잡도를 획기적으로 단축시켰음에도 불구하고 동등 수준의 성능을 달성하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 6G Upper-Mid Band 대역 NCR 시스템의 확장성과 메모리 효율성을 극대화하기 위해, 패널 기저에 기반한 계층적 합성 코드북 설계 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 1×4 단위 패널에 대해 최적화된 소규모 빔북을 기저로 활용하고, 이를 순차적으로 적층 및 위상 정렬하여 전체 배열의 빔을 합성하는 방식을 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 전역 최적화 방식 대비 현저히 낮은 복잡도로 빔북을 생성할 수 있음에도 불구하고, 이론적 상한선에 근접하는 우수한 커버리지 성능을 보임을 확인하였다. 이는 향후 다양한 패널 조합과 확장성이 요구되는 6G NCR 인프라 구축에 있어, 하드웨어 자원을 효율적으로 활용하면서도 고성능 빔포밍을 지원하는 실용적인 솔루션이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00395366)

참고 문헌

- [1] Kang, Seongjoon, et al. "Cellular wireless networks in the upper mid-band." IEEE Open Journal of the Communications Society 5 (2024): 2058-2075.
- [2] Chen, Wanshi, et al. "5G-advanced toward 6G: Past, present, and future." IEEE journal on selected areas in communications 41.6 (2023): 1592-1619.
- [3] Mo, Jianhua, et al. "Beam codebook design for 5G mmWave terminals." IEEE Access 7 (2019): 98387-98404.