

위상 배열 안테나에 대한 단위 안테나 방사패턴 동시 측정 방안

박대희, 유종인
한국전자기술연구원

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

요 약

본 논문은 Hybrid-beamforming 구조의 Antenna-in-Package(AiP) 시스템에서 단위 안테나 방사패턴을 실제 운용 환경에 근접한 조건에서 정확하게 측정할 수 있는 새로운 방안을 제안한다. 제안된 방법은 모든 안테나가 동시에 방사되는 상태에서 동작하며, 각 챔버 측정각도에서 $2N+1$ 번 방사전력 측정을 수행하여 효과적으로 단위 안테나의 방사패턴을 도출할 수 있는 방안을 제시한다. Upper-mid 대역 1x4 배열 안테나를 이용하여 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 매우 높은 정확도로 방사패턴을 도출할 수 있음을 검증하였다.

I. 서 론

이동통신 기술의 발전과 함께, 지속적으로 Hybrid-beamforming 구조의 배열 안테나 시스템이 고려되고 있다. 배열 안테나 시스템이 스마트폰과 같은 이동통신 단말에 적용되기 위해서 일반적으로 Antenna-in-Package (AiP) 구조가 채택되며, 이는 RFIC, RF 배선, 안테나 소자가 일체화된 형태로 구현된다 [1]. 이러한 시스템은 제한된 공간 내에서 빔포밍 기능을 구현하기 위해 Hybrid-beamforming 구조로 설계되며, 각 단위 안테나의 방사패턴(크기 및 위상)을 정확하게 파악하는 것이 시스템 최적화의 핵심이 된다.

AiP 는 그 자체로 복합 시스템이기 때문에, 개별 부품의 특성뿐 아니라, 시스템 통합 상태에서의 방사패턴 특성을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 기존의 단위 안테나 방사패턴 측정 방식은 여러 한계를 가진다. 대표적으로, 단위 안테나를 하나씩 방사시켜 패턴을 측정하는 방식으로 AiP 내 RFIC 의 고속 안테나 제어 기능을 필요로 하며, 일반적인 상용 RFIC 에서는 구현이 어렵다. 또한, 이 방식은 외부 계측기기(VNA)와 장치 간의 추가적인 기능이나 VNA 의 동기화 기능, 등의 부수적인 기능들이 필요하여 단순한 챔버 환경에서는 적용이 어렵다 [2].

무엇보다 기존 방안이 가지는 한계는 측정 환경과 실제 운용 환경 간의 불일치이다. 기존 방식은 단위 안테나 하나만 Tx On 된 상태에서 패턴을 측정한 후, 이를 전체 안테나가 활성화된 환경으로 일반화하는데, 이는 현실적으로 성립하기 어렵다. 실제로 모든 안테나가 동시에 방사할 경우, PA(Power Amplifier)의 발열 증가로 인해 각 채널의 이득이 열화되고, 이로 인해 전체 방사패턴이 왜곡될 수 있다. 그림 1 은 단위 안테나에 대한 Tx On/Off 상태에 따라 발생할 수 있는 방사 세기의 변화를 시각적으로 설명하고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하는 새로운 방사패턴 측정 기술이 필요하다. 첫째, 고속 단위 안테나 별 동작기능이 없이 범용 OTA 챔버 환경에서 측정할 수 있어야 하며, 둘째, 모든 안테나가 실제와 같이 Tx On 된 상태에서 각 단위 안테나의 방사패턴을 개별적으로 측정할 수 있어야 한다. 종래 기술에서 모든 안테나를 구동하면서 각 단위 안테나의 방사패턴을 추출하는 방법을 제시하고 있으나, 유일한 해로 추출하는 데에 한계가 있고 임의의 초기값으로 인해 방사패턴 추출에 왜곡이 유발될 수 있다는 단점을 가지고 있다[3].

본 연구에서는 종래 기술이 가지고 있었던 유일 해 문제와 방사패턴 왜곡을 절감하면서 모든 안테나를

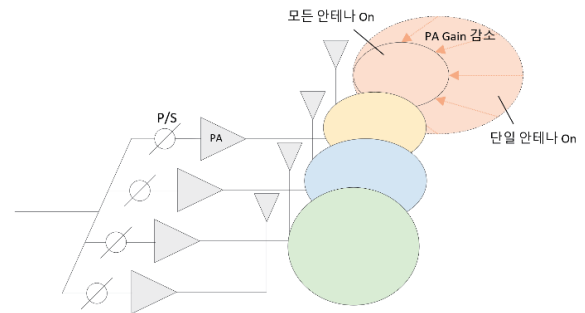


그림 1 방사 조건에 따른 단위 안테나의 방사패턴 변화

동시에 구동하면서 각 단위 안테나의 방사패턴을 효과적으로 추출할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

II. 본 론

가. 동시 방사 기반 단위 안테나 방사 패턴 측정 방안

위상 배열 안테나가 N 개의 안테나로 구성되었다고 가정하고, 각 단위 안테나에 할당된 위상천이기에 가중치를 인가하였을 때 빔포밍되어 형성되는 방사패턴을 아래 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$B e^{j\Phi} = \sum_n E_n e^{j\phi_n} \cdot e^{jw_n} = \sum_n E_n e^{j(\phi_n + w_n)},$$

여기에서 E_n 와 ϕ_n 는 n 번째 안테나의 방사패턴 크기와 위상을 나타내고, e^{jw_n} 는 n 번째 안테나에 인가되는 가중치 값을 의미한다.

본 제안 방안에서는 각 챔버 측정 각도(azimuth, elevation angle)에 대해 아래 수식과 같은 초기 가중치 값으로 인가하여 P_0 를 측정한다.

$$P_0 = B_t^2, \quad B_t e^{j\Phi_t} = \sum_n E_n e^{j\phi_n} \cdot e^{jw_{n,t}} = \sum_n E_n e^{j(\phi_n + w_{n,t})},$$

여기에서 $e^{jw_{n,t}}$ 는 n 번째 안테나에 인가된 초기 가중치를 의미하고, B_t 와 $e^{j\Phi_t}$ 는 초기 가중치를 기반으로 포함되는 위상 배열 안테나의 빔포밍 방사패턴을 의미한다.

제안 방안에서의 초기 가중치는 매우 중요한데, 이는 P_0 의 크기에 비례하여 단위 안테나의 방사패턴 크기와 위상의 측정 정확도가 높아지기 때문이다. 일반적으로 방사패턴을 측정함에 있어서, 챔버 측정 각도 부근에서의 방사패턴이 유사한 특성을 가지므로, 초기 가중치는 직전 챔버 측정 각도에서 추출된 단위 안테나의 방사패턴을 기반으로 동위상이 되도록 설정한다.

초기 가중치에 대한 방사전력을 기반으로 n 번째 안테나에 인가되는 가중치 $e^{j(w_{n,t} + \theta)}$ 를 이용하여 하기와 같이 표현할 수 있다.

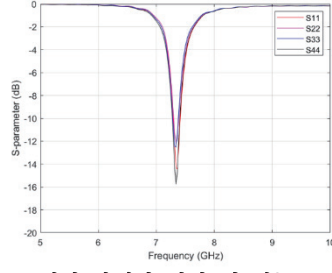
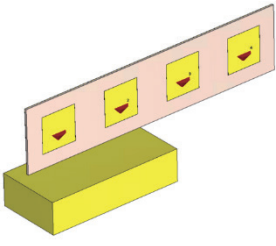


그림 2 Upper-mid 대역 1x4 배열 안테나 형상 및 성능

$$B_{n,\theta} e^{j\Phi_{n,\theta}} = E_n e^{j\Phi_n} \cdot e^{j(w_{n,t} + \theta)} + \sum_{m \neq n} E_m e^{j(\Phi_m + w_{m,t})}$$

$$= B_t e^{j\Phi_t} - E_n e^{j(\Phi_n + w_{n,t})} + E_n e^{j(\Phi_n + w_{n,t})} \cdot e^{j\theta},$$

이를 기반으로 n 번째 안테나에 대한 초기 가중치 대비 θ 만큼 변화시켰을 때의 방사전력과 $\theta = \pi, \pi/2$ 인 경우에 대한 방사전력을 아래와 같이 각각 표현할 수 있다.

$$P_{n,\theta} = B_t^2 + 2E_n^2(1 - \cos\theta) + 2B_t E_n(\cos(X_n + \theta) - \cos X_n),$$

$$P_{n,0} = B_t^2 = P_0,$$

$$P_{n,\pi} = B_t^2 + 4E_n^2 - 4B_t E_n \cos X_n,$$

$$P_{n,\pi/2} = B_t^2 + 2E_n^2 - 2B_t E_n(\sin X_n + \cos X_n),$$

여기에서 X_n 는 n 번째 안테나의 보상된 상대적 위상으로 $X_n = e^{j(\Phi_n + w_{n,t} - \Phi_t)}$ 와 같이 정의된다.

각 챔버 측정 각도에서는 초기 가중치에 대한 측정과 더불어 각 단위 안테나에 대해 $\theta = \pi, \pi/2$ 의 방사전력을 측정하여 $2N+1$ 번의 측정을 수행하고, 다음과 같은 수식을 통해 n 번째 안테나의 방사패턴 크기를 도출할 수 있다.

$$E_n = \sqrt{A_n \pm D_n},$$

$$A_n = 0.25(P_0 + P_{n,\pi}),$$

$$D_n = 0.25\sqrt{(P_0 + P_{n,\pi})^2 - 2(P_0 - P_{\pi/2})^2 - 2(P_{\pi} - P_{\pi/2})^2},$$

여기에서 볼 수 있듯이, E_n 는 $E_{n,+} = \sqrt{A_n + D_n}$, $E_{n,-} = \sqrt{A_n - D_n}$ 의 2가지 해를 가질 수 있다. 각 해에 대응되는 n 번째 안테나의 방사패턴 위상을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\cos X_n = \frac{P_0 + 4E_n^2 - P_{n,\pi}}{4\sqrt{P_0}E_n}, \quad \sin X_n = \frac{P_0 - 2P_{\pi/2} + P_{n,\pi}}{4\sqrt{P_0}E_n}.$$

모든 단위 안테나에 대한 방사패턴이 측정되면 n 번째 안테나는 $E_{n,+} e^{j(X_{n,+} - w_{n,t})}$ 과 $E_{n,-} e^{j(X_{n,-} - w_{n,t})}$ 으로 구성된 해를 가지게 되고, 총 2^N 개의 조합을 도출할 수 있다. 모든 방사패턴 조합에 대해 초기 가중치를 수치적으로 적용하여 P_0 와 동일한 값을 가지는 방사패턴 조합을 선정하여 최종적으로 모든 단위 안테나의 방사패턴 크기와 위상을 도출한다.

나. 제안 방안에 대한 성능 검증

본 제안 방안을 검증하기 위해서 6 세대 이동통신 시스템을 위한 Upper-mid 대역에서 동작하는 1x4 위상 배열 안테나를 설계하였다. 각 단위 안테나 기준에서의 실장조건을 상이하도록 그림 2와 같이 설계하였고, 모든 안테나가 7GHz 대역에서 방사하는 것을 S-파라미터를 통해서 확인할 수 있다. 설계된 Upper-mid 대역 1x4 위상 배열 안테나의 방사패턴을 이용하여 제안 방안에 대한 시뮬레이션 검증을 수행하였다.

그림 3과 4는 각 단위 안테나의 방사패턴에 대한 실제 데이터와 제안방안을 이용하여 도출된 값을 비교하고 있다. 3bit의 위상천이기 해상도를 가정한 경우이고, 실제 방사패턴과 동일한 크기와 상대적 위상을 측정할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

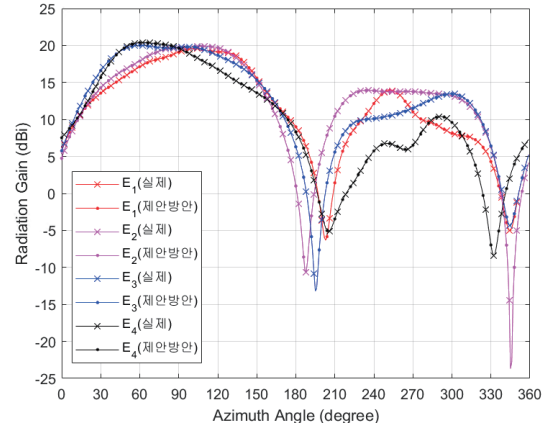


그림 3 단위 안테나 별 방사패턴 크기 비교

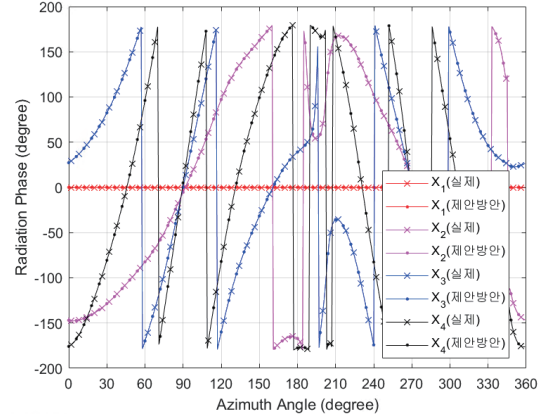


그림 4 단위 안테나 별 방사패턴 상대적 위상 비교

III. 결론

본 연구에서는 위상 배열 안테나 구조에서 실제 운용 환경을 반영한 단위 안테나 방사패턴 측정 기법을 제안하였다. 또한 Upper-mid 대역 1x4 배열 안테나를 이용하여 제안 방안이 모든 안테나가 동시에 방사하는 조건에서 개별 안테나의 위상 및 방사 세기를 정밀하게 추정할 수 있는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] IDTechEx, "Antenna in Package (AiP) for 5G and 6G 2024-2034: Technologies, Trends, Markets," IDTechEx, 2024.
- [2] Denayer, Lars, et al. "Accurate radiation pattern prediction of phased array antennas using Hadamard based excitations." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (2024).
- [3] Saha, Anik, et al. "Over-The-Air Phased Array Antenna Calibration Performance Validation and Comparison: An Experimental Approach." 2024 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference (SPACE). IEEE, 2024.