

극소 다이폴 모델링을 이용한 연속 개구 안테나기반 MIMO 시스템의 새로운 해석

염정선, 김영담, 정방철
충남대학교

jsyeom@cnu.ac.kr, youngdamkim@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Novel Analysis of Continuous Aperture (CAP)-Based MIMO System with Infinitesimal Dipole Modeling

Jeong Seon Yeom, Young Dam Kim, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요 약

본 논문은 연속 개구 안테나 시스템에서 극소 다이폴 모델링 (infinitesimal dipole modeling, IDM)을 이용한 무선 통신 시스템의 해석 방법을 소개한다. 구체적으로 전자기-정보 이론 (electromagnetic information theory)을 기반으로 IDM을 이용하여 송신단과 수신단 간의 채널을 모델링하며 기존 연속 개구 다중 입력 다중 출력 (continuous aperture multiple-input multiple-output, CAP-MIMO) 연구에서 고려하는 송신단과 수신단 전류 밀도 분포를 미소 다이폴 모멘트의 조합으로 표현한다. 이를 통해 복잡한 함수해석학적 분석이 필요한 기존 연구와의 차별성을 제공하며 전통적인 무선통신의 분석 프레임워크와 유사한 CAP-MIMO 시스템 해석 방법을 제공한다.

I. 서 론

6세대 이동통신은 1 Tbps의 전송율을 지원하는 것을 목표로 한다. 이러한 목표를 달성하기 위한 방법 중 하나로 테라헤르츠 (terahertz) 대역에서 수 GHz의 넓은 대역폭을 사용하는 것이다[1]. 하지만 테라헤르츠 대역의 통신 특성은 상대적으로 짧은 통신 거리 및 안테나 요소의 이격 거리 감소이다. 위 두 가지 요인으로 인해 기존 전파 모델링 방법인 평면파 모델을 적용할 수 없게 된다. 더욱이 현재 활발히 연구되고 있는 연속 개구 안테나의 경우, 3차원 공간상의 연속 표면 혹은 연속 체적에서 발생하는 전자기파를 수학적으로 정확하게 모델링하기 위해 맥스웰 방정식을 사용한다[2].

이러한 해석 방법을 전자기-정보 이론이라 하며 최근 다중화 전송을 위해 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 전자기-정보 이론의 기존 연구들은 수학적 분석을 위해 함수 해석학을 이용하여 Hilbert-Schmidt operator의 고유함수를 유도하는 등의 높은 수학적 복잡성을 요구한다. 하지만 본 논문에서는 극소 다이폴 모델링을 이용하여 비교적 단순하며 기존 무선통신 분석 프레임워크와 유사한 CAP-MIMO 시스템 해석 방법을 새롭게 소개한다.

II. CAP-MIMO 시스템에서의 극소 다이폴 모델링

우선 극소 다이폴 모델링이란 임의의 안테나 전류 분포를 미소 다이폴 모멘트의 조합으로 표현하는 방법이다. 본 논문에서는 CAP MIMO 시스템에서 임의의 안테나 체적에 미소 다이폴을 배치하고 임의의 미소 전류분포에 따른 방사문제를 해석한다. 미소 다이폴을 이용한 CAP MIMO 분석에 대한 기존 연구는 각 미소 다이폴에 개별 RF 체인을 결합하여 신호 처리를 진행하였지만[4] 이는 현실적이지 않다. 그러므로 본 논문은 문헌 [3]과 유사하게 송신단과 수신단의 미소 다이폴에 패턴이라고 불리는 미소 전류밀도를 분포하여 이로부터 발생하는 전자기파의 방사 및 수신을 모델링한다. 이에 대한 간략한 시스템 다이어그램은 그림 1에서 보인다.

본 논문에서는 해석 방법을 설명하기 위해 [3]에서 제안하는 파수 분할 다중화 (wavenumber division multiplexing, WDM) 기법을 예시로 한다. 송신단과 수신단은 극소 다이폴로 모델링되어 Z축 방향으로 각각 L_s 의 길이 N_s 개 소자와 L_r 의 길이에 N_r 개의 소자가 균일 간격으로 구성되어 있다. 각 소자는 Z축 편파의 λ 파장을 갖는 전자기파를 발생시킬 수 있는 미소 다이폴 모멘트를 배치한다. WDM 기법을 위해 송신단 s_i ($i \in \{1, \dots, N_s\}$) 위치에서 소자별 다이폴 모멘트의 복소 전류계수를 다음과 같이 설정한다.

$$\mathbf{j}(s_i) = \sum_{m=1}^N x_m \phi_m(s_i) \hat{\mathbf{z}} = \sum_{m=1}^N \xi_m \frac{1}{\sqrt{N_s}} \exp\left(j \frac{2\pi m}{L_s} s_i\right) \hat{\mathbf{z}}, \quad (1)$$

여기서 x_m 은 m 번째 송신 신호, $\phi_m(s_i)$ 는 s_i 위치에서의 m 번째 ($m \in \{1, \dots, N\}$, $N \leq 2 \lfloor L_s/\lambda \rfloor + 1$) WDM 기저 벡터, $k = m - (N+1)/2$ 이고 $\hat{\mathbf{z}}$ 는 +Z축으로의 단위 방향 벡터이다.

모든 s_i 에 대한 복소 전류 분포에 의해 방사된 전계 분포는 수신단 r_j ($j \in \{1, \dots, N_r\}$)에 대하여 벡터 자기 포텐셜 및 dyadic Green 함수에

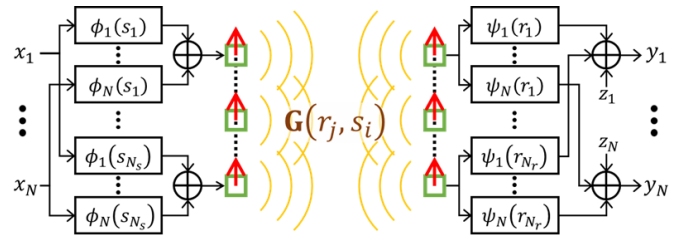


그림 1 IDM을 이용한 CAP-MIMO 해석 방법을 고려한 시스템 다이어그램 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{e}(r_j) = \sum_{i=1}^{N_s} \mathbf{G}(r_j, s_i) \mathbf{j}(s_i). \quad (2)$$

수신단은 위치 r_j 에서 WDM 기법을 위한 복소 전류계수 $\psi_n(r_j)$ ($n \in \{1, \dots, N\}$)를 (3)과 같이 설정하며 이로부터 파수 영역에서 m 번째 송신 파수에 대한 n 번째 수신 파수의 유요 채널은 (4)와 같이 주어진다.

$$\psi_n(r_i) = \frac{1}{\sqrt{N_r}} \exp\left(-j \frac{2\pi n}{L_s} r_i\right), \quad (3)$$

$$H_{mm} = \sum_{j=1}^{N_r} \sum_{i=1}^{N_s} \psi_n(r_j) \hat{\mathbf{z}}^H \mathbf{G}(r_j, s_i) \phi_m(s_i) \hat{\mathbf{z}}. \quad (4)$$

다른 해석으로 H_{mm} 은 결합 계수 (coupling coefficient)를 의미한다.

그러므로 수신단에서의 n 번째 파수에 대한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_n = \sum_{m=1}^N H_{mm} x_m + z_n, \quad (5)$$

여기서 z_n 은 n 번째 파수에 대한 전자기 간섭 및 수신단 잡음을 의미한다.

극소 다이폴 모델링을 이용하여 CAP MIMO 시스템에서 WDM 기법뿐만 아니라 임의의 전류 분포에 대한 성능을 검증할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템)

참 고 문 헌

- [1] C. Han *et al.*, "Terahertz wireless channels: A holistic survey on measurement, modeling, and analysis," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 3, pp. 1670-1707, 3rd Quart., 2022.
- [2] D. A. Miller, "Communicating with waves between volumes: Evaluating orthogonal spatial channels and limits on coupling strengths," *Applied Optics*, vol. 39, no. 11, pp. 1681-1699, Apr. 2000.
- [3] L. Sanguinetti, A. A. D'Amico, and M. Debbah, "Wavenumber-division multiplexing in line-of-sight holographic MIMO communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Sept. 2022 (early access).
- [4] S. Mikki, "The Shannon information capacity of an arbitrary radiating surface: An electromagnetic approach," *techrxiv preprint 10.36227/techrxiv.20321664.v1*, 2022.