

# 전자기 정보이론 연구 동향

## Trend of Electromagnetic Information Theory

권동승 (D.S. Kwon, dskwon@etri.re.kr)

지능형스몰셀연구실 연구전문위원

나지현 (J.H. Na, jhna@etri.re.kr)

지능형스몰셀연구실 책임연구원/실장

### ABSTRACT

Shannon's information theory analyze the capacity in only one dimension of time among the four-dimensional electromagnetic field signals between the source and destination, even though mobile communication systems use a four-dimensional electromagnetic field including one time dimension and three spatial dimensions. However, multiple input multiple output (MIMO) technology continues to evolve and develop, but the electromagnetic phenomenon caused by antennas are not sufficiently considered in the standardization and design processes. In other words, Shannon's information theory can be seen as providing a theoretical limitation that is effective in wireless communication systems, which do not realistically utilize the degree of freedom (DOF) in three-dimensional electromagnetic space. In this paper, we analyze and summarize research trends in electromagnetic information theory (EIT), which integrates the information theory with mathematical abstraction with the effects of the continuous four-dimensional electromagnetic field and the physical phenomena caused by antennas. Specifically, we discuss the following topics: the spatial bandwidth in a scattered field environment; the circuit-theoretical multiport model that bridges the physics of electromagnetic fields with the mathematical representation of information theory; the integration of the electromagnetic principles of Maxwell's equations into signal processing methodologies and communication theories, such as MIMO antenna systems; and the study of electromagnetic information capacity from an electromagnetic perspective rather than Shannon's channel capacity from a mathematical perspective. This electromagnetic information theory will basically represents a new research direction that reflects three-dimensional electromagnetic phenomena beyond the probabilistic channel model based on an antenna array of isotropic point sources typically used in MIMO performance analysis. Additionally, this theory is expected to facilitate a more realistic optimal design by sufficiently accounting for the physical phenomena of electromagnetic fields in performance analysis, including extreme MIMO, orbital angular momentum (OAM), reconfigurable intelligent surface (RIS), and holographic MIMO for 6G.

**KEYWORDS** 6G, Channel Capacity, Electromagnetic Information Theory, Hartley, Maxwell Equation, MIMO, Shannon, Spatial Bandwidth, Spatial Degree of Freedom

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390607>

\* 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[No. 2018-0-01659, 5G NR 기반 지능형 오픈 스몰셀 기술 개발].



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2024 한국전자통신연구원

## 1. 서론

지금까지 이동통신시스템의 세대별 진화에서 첫 번째 화두는 전송속도 증대였으며, 이를 위해 신규 주파수 대역 발굴, 채널 대역폭 확대, Shannon의 정보이론적 성능 달성을 위한 채널부호화와 변복조 기술, MIMO(Multi-Input Multi-Output) 기술 등이 이동통신 표준에 반영되었다. 그중에서 1948년 Shannon은 잡음 채널에서 일련의 심벌을 안정적으로 전송할 수 있는 조건에 대해 수학적 통신이론의 기초를 확립했다[1]. Shannon의 정보이론은 송신기에서 수신기로 신호로 송신하기 위한 통신 채널로서 한 쌍의 전선, 동축 케이블, 무선 주파수 대역, 광선 등이라는 가정과 통신 채널이 조건부 확률 분포로 수학적으로 모델링된다는 가정에 기반을 두고 있다. 따라서 통신 채널에 대한 모델이 주어지면 채널 용량을 정의할 수 있으므로, 무선통신시스템에서 물리적 에너지를 전달하는 안테나도 채널 모델에 포함시키기 위해 안테나를 포함한 전자기적 벡터 공간을 확률론적 페이딩 채널로 가정하였다. 그런데, 1953년 Gabor는 통신은 한 시스템에서 다른 시스템으로 물리적 효과를 전달하는 것이므로 통신이론이 물리학의 한 분야로 간주되어야 하므로, 양자의 행동과 전하의 이산성과 같은 근본적인 물리적 데이터를 기반으로 구현하는 것이 필요하다고 주장하였다[2]. 구체적으로 무선통신시스템에서는 통계적 접근이 아니라 에너지를 방사시키기 위해 Maxwell-Poynting 이론을 따라야 한다고 했다. 그러나 지금까지 무선통신에 대한 연구는 Shannon 이론을 바탕으로 무선통신시스템을 스칼라 문제로 다루었고, 전자기적 벡터에 대한 연구는 상대적으로 적었다.

Shannon의 정보이론은 발신지와 목적지 간의 4차원 전자기장 신호 중 1차원의 시간 차원에서만

용량을 분석하였지만, 실제 무선통신시스템은 정보 교환을 위해 1개의 시간 차원과 3개의 공간 차원을 포함한 4차원 전자기장을 사용하고 있다. 그런데 4G부터 3개의 공간 차원을 활용하는 MIMO 기술이 도입되었고, 5G에서는 Massive MIMO 기술로 표준화되었으며, 6G에서는 Extreme MIMO 기술 표준화가 진행되고 있다. 하지만 여러 방식의 MIMO 기술 분석 시 연속적인 3개의 공간 차원에 대한 정보를 단순 이산화함으로 인해 공간 정보를 온전히 고려하지 못하고 있다. 구체적으로, MIMO 기술 성능 분석 과정에서 그 안테나 어레이의 3차원에서 전자기적인 현상을 단순하게 등방성 점 소스의 안테나 어레이에 기반하는 확률적 채널 모델로 단순화함으로써 어레이 안테나의 실제 물리적 현상을 충분히 반영하지 못하고 있다. 또한 5G 이후 OAM(Orbital Angular Momentum), RIS(Reconfigurable Intelligent Surface), 홀로그래픽 MIMO 등 전자기장의 물리적 현상을 활용하는 혁신적인 안테나 기술들이 연구되고 있으나, 그 물리적인 현상을 여전히 고려하지 않고, 여전히 안테나를 단순히 전력을 효율적으로 전달하는 수단으로만 간주하고 있다.

결론적으로 Shannon의 정보이론은 3차원의 전자기적 공간에서의 자유도(DoF: Degree of Freedom)를 현실적으로 활용하지 않는 무선통신시스템에서 유효한 이론적 한계를 제공한다고 할 수 있다. 그러나 전자기적 공간에서 DoF를 적극 활용하는 다중 안테나 기반 무선통신시스템에서는 시간 차원과 3차원 공간을 모두 고려한 연속적인 4차원 전자기적 벡터 채널에서 그 물리적 현상을 실제로 반영한 이론적 성능 한계 분석과 무선통신시스템 설계 연구가 필요하다. 연속적인 4차원 전자기장의 효과를 고려한 정보이론을 기존의 수학적 추상화를 기반으로 만들어진 정보이론과 안테나에 의한 전자기장의 효과를 결합시킨 것을 전자기 정보이론(EIT: Electromagnetic

Information Theory)이라 부른다. 지금까지의 EIT의 주요 연구 분야는 크게 다음 세 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째, Bucci 등은 공간 대역폭(Spatial Bandwidth) 기반으로 공간 자유도(SDoF: Spatial Degree of Freedom)를 이론적으로 유도했다[3-6,9]. 공간 대역폭은 공간 영역의 푸리에 변환인 파수(Wave-Number) 영역에서 대역 제한 기능을 나타내며, 점유 공간이 충분히 클 때 단위 공간에서 DoF를 도출하는 데 사용할 수 있다. 불행하게도 이 모든 작업은 공간 대역폭을 기반으로 하며, 대상이 차지하는 공간이 충분히 클 경우에만 단위 공간의 DoF를 제공한다. 그러나 제한된 공간의 실제 통신시스템에서는 공간 대역폭 방법이 부정확해지므로, 제한된 공간에서의 실용적인 통신시스템을 위해 여러 연구에서 EIT에 대한 DoF를 도출하기 위해 Orthogonal Basis 확장을 활용했다. 공간 대역폭 기반 후속 연구들은 EIT에 대한 DoF를 분석하는 데 유용한 방법을 제공했지만, 그들은 결정론적 신호의 가정에 크게 의존했기 때문에 용량을 도출할 수 없었다.

둘째, 현실적인 무선통신시스템의 해석과 최적화를 위해 전자기장 이론, 무선 주파수 공학, 신호, 코딩과 정보이론을 포함시킨 연구로서, 특히 전형적인 통신이론이 무시했던 안테나 이론을 결합시킨 연구다. Ivrlac 등은 무선통신시스템을 위한 회로이론적 멀티포트 모델을 개발하였다[8]. Sarkar 등은 Maxwell 방정식의 전자기 원리를 신호 처리 방법론과 통신이론에 통합하면, 실제 환경에 설치된 무선통신시스템에 대해서 더 나은 성능 분석, 설계 등을 할 수 있다고 주장하였다[9]. 이어서 Sarkar 등은 MIMO용 안테나에 의한 전자기적 현상을 포함하여 그 안테나들의 적절한 통합과 분석을 통해 최적 설계하는 MIMO 안테나시스템이라는 개념을 제안하였다. 그리고 이 MIMO 안테나시스템에 계산 전자

기학을 적용한 수치해석 기반의 성능 분석으로 다양한 전자기 효과가 MIMO 안테나시스템의 성능을 저하시킬 수 있음을 보여주었다[10].

셋째, 무선통신시스템에 대한 용량으로 수학적 관점에서의 Shannon의 채널 용량과 달리 전자기적 관점에서 Maxwell 방정식으로부터 전자기 정보 용량을 연구한 것들이다. Sarkar 등은 무선통신시스템에 대한 초기의 정보이론적 용량으로서 Shannon과 Hartley의 두 가지 채널 용량에 대한 분석을 한 후, 무선통신시스템에 대한 설계와 성능 분석에서 원하는 신호를 스칼라 양으로 가정하는 현 문제 해결을 위해 원하는 신호의 전자기적 특성을 바탕으로 전자기 신호의 방사와 수신에 대해 Maxwell 방정식으로부터 얻은 결과를 통신시스템 이론의 현 설계와 해석을 어떻게 수정하고 개선해야 하는지 설명했다 [11]. 수학적 관점에서 채널 용량이 아닌 전자기 관점에서 Maxwell 방정식에서 시작하여 Kolmogorov  $\varepsilon$ -capacity 기반의 EIT 용량을 분석 정리하였다. 이어서 Kolmogorov  $\varepsilon$ -capacity 계산을 위한 최적화 방법은 Migliore 등이 연구했다[12,13]. 이 방법은 시물레이션에 의존했기 때문에 일반적인 경우의 DoF와 용량에 대한 이론적 솔루션을 제공하지 못했다. 그런데, Z. Qan 등은 결정론적 신호의 가정에 의존하는 DoF에 대한 기존 연구와 달리 랜덤 필드 이론을 기반으로 용량을 분석했다. 분석한 용량은 두 연속 영역 간의 통신 전송속도의 이론적 한계를 보여주었다. 공간 상관 분석을 기반으로 전자기장의 용량을 분석했다[14].

본고에서는 그동안 무선통신에서 이론적 한계로 인식되어온 정보이론에 전자기이론을 결합시킨, 즉 전자기적 벡터 공간을 고려한 전자기 정보이론에 대한 연구 현황으로 전자기적 관점에서 무선통신 채널 용량 연구 동향, 전자기 정보이론의 연구 동향 등을 기술하였다. 세부적으로는 II장에서는 공간

대역폭에 대한 연구 현황을, III장에서는 전자기적 관점에서 바라본 무선통신시스템에 대한 연구 현황을, 마지막으로 IV장에서는 4차원의 전자기 벡터 공간을 모두 고려한 전자기 정보이론의 연구 현황을 분석 정리하였다.

## II. 공간 대역폭 연구

1980년대에 Bucci와 Franceschetti는 전자기장의 공간적 유효 대역폭(이하 공간 대역폭)이라는 개념을 도입하였고, 산란 필드 환경에서 전자기장의 DoF는 산란을 포함한 안테나 개구면과 송신 디스크상에서 수신 영역이 이루는 각도에 의해 결정됨을 보여주었다. 그리고 주어진 정밀도에서 수신 영역에서 필드 요소 설명에 필요한 Basis 함수의 최소 수로 표현되는 전자기장의 DoF로 설명되는 산란장 해석을 기초로 Bucci-Franceschetti 다이버시티 한계와 공식을 제안했다[3]. 이후 연구에서는 산란된 필드의 DoF 수를 정의·계산하였고, 산란된 필드의 공간 대역폭과 관찰 도메인의 확장에 적합한 Nyquist 수와 실질적으로 동일함을 보였다[4].

그리고 Franceschetti는 물리적 원리로부터 모든 산란 환경과 통신 노드 위치에 대해서 상한이 존재하고, 정보가 흘러야 하는 Cut이 무선통신 환경의 기하학적 변화에 따라 달라진다고 하였고, 그 최대 값이 무선통신 네트워크의 DoF 수라는 것을 보여주었다[5]. 이것은 새로이 달성 가능한 코딩 체계 설계가 아니라 물리적으로 달성할 수 있는 정보이론적 한계를 도출한 것이다. 즉, 무선통신에서 가용한 DoF 수는 목적지와 소스를 분리하는 모든 Cut에서 사용할 수 있는 독립 채널의 수에 해당한다는 물리적 접근 방식을 제시한 것이다. 이 결과는 정보가 흘러야 하는 Cut의 크기에 의해 부과되는 근본적인 한계를 보여줌으로써 무선통신 네트워크 용량 계산

문제에 대해 새로운 시각을 제시했다.

그 후, Franceschetti는 무선통신 네트워크의 용량에 대하여 정보이론과 물리적 한계를 설명하였다[6]. Shannon은 정보 용량이 통신에 사용할 수 있는 전력과 물리적 채널에서 사용할 수 있는 다이버시티에 의해 제한된다고 하였고, 고전 정보이론에서 이 다이버시티는 사용 가능한 주파수 대역폭으로 표현되었다. 그런데, 무선통신 네트워크와 같이 공간적으로 분산된 시스템에서 이 다양성 제약은 공간에서도 나타난다. 확률론적 페이딩 채널 모델을 가정하는 고전적 정보이론에서는 이 공간 다양성에 대해 명시적인 계산을 하지 않았다. 무선통신 네트워크의 용량에 대한 정보이론적 연구방법 중 하나는 네트워크의 모든 노드가 동일한 비트율로 전송하는 경우를 먼저 연구하고, 네트워크의 노드 수가 증가함에 따라 달성 가능한 속도의 스케일링 한계를 살펴보는 것이었다. 따라서 많은 연구자는 전자기 전파 프로세스라는 가정에 의존하는 정보이론적 스케일링 방법을 확립했다. 이 이론에 따르면 네트워크의 노드 수가 무한대에 가까워짐에 따라 빠르게 0으로 감소하는 노드당 비율에서 더 느린 감소를 예측하는 한계, 즉 실질적으로 상수인 한계까지 달성된다는 것이다. 그래서 고전적 정보이론에서는 정교한 협력 통신 체계를 사용하여 달성하는 더 높은 용량 스케일링의 수학적 증명에 대한 다수의 연구는 확률적 채널 모델에 의존하였다. 그 정교한 협력 통신 체계는 원칙적으로 모든 고정 크기의 네트워크에서 매우 유용할 수 있다. 따라서 분산된 매체 액세스 동기화와 채널 상태 정보의 가용성과 같은 프로토콜 오버헤드와 관련된 많은 실제 문제를 고려해야 한다. 그래서 Franceschetti는 확률론적 페이딩 채널 모델을 가정하는 대신 전파하는 필드의 벡터 공간을 연구하여 무선통신에서 정보이론적 한계를 얻을 수 있음을 보여주었다[6].

### III. 전자기학 관점에서 무선통신

MIMO 기술을 도입한 4G 이후 시공간 무선채널의 중요성 때문에 랜덤 미디어 채널을 포함하여 다양한 전파 방사에서 전파전파 시스템의 DoF 수와 Shannon의 정보 용량을 추정하기 위한 기본 이론과 계산 방법론에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이에 Gruber 등은 전자기 이론과 정보이론의 교차점에서 무선통신과 안테나 엔지니어링 문제를 공식화하였다[7]. 이 연구는 전파이론과 정보이론 문제와 그 해법을 포함하는 학제 간 연구로서 기술적으로는 시공간 EIT, 안테나 관점에서는 안테나 정보이론이라고도 한다. 세부적으로는 Shannon의 정보 용량과 DoF 수를 통해 전파 방사(안테나) 및 무선전파 시스템의 정보이론적 특성을 연구하고, 전자기장을 설명하는 Maxwell 방정식의 기본 물리적 관점에서 AWGN 채널에서 전자기 소스와 수신기에 의해 형성된 공간 제한과 엄격한 대역 제한 무선 채널뿐만 아니라 공간 제한, 시간 제한과 본질적으로 대역 제한 무선 채널의 정보 용량을 자유공간에서 유도하였다.

무선통신시스템의 해석과 최적화에는 전자기장 이론, 무선 주파수 공학, 신호, 코딩과 정보이론이 포함된다. 그런데, 전자기장 이론과 무선 주파수 공학은 Maxwell 방정식이나 보존 법칙과 같은 자연 법칙에 대한 물리적 이론의 일부이지만, 신호, 코딩과 정보이론은 본질적으로 수학적 이론으로, 자연의 법칙에 근거한 것이 아니라 정의와 수학적 논리에 근거한 것이다. 따라서 정의와 수학적 논리는 물리학 분야와 결합해야만 예측을 실험으로 테스트할 수 있는 완전한 이론이 될 수 있다. 한 예로, 물리학 관점에서 에너지는 보존 법칙이 존재하는 양이지만, 신호와 정보이론에서 에너지는 일반적으로 어떤 복소수의 제곱 크기로 표현되며, 어떤 보존 법

칙도 필요는 없다. 따라서 정보이론에서 추상화 계층의 에너지가 물리적 에너지와 일치하도록 특별한 주의를 기울여야 한다. 이를 해결하기 위하여 Ivrlac 등은 무선통신시스템을 위한 회로 이론적 멀티포트 모델을 개발하였다[8]. 회로 이론적 멀티포트 개념은 전자기장의 물리학과 정보이론의 수학적 세계 사이의 간극을 연결하는 데 도움이 되며, 에너지 또는 안테나와 같은 용어가 실제로 모든 추상화 계층에서 일관되게 사용됨을 보여주었다. 그는 회로 이론적 접근 방식의 유용성을 입증하기 위해 임피던스 정합, 안테나 상호 결합(Mutual Coupling)과 통신 시스템 성능에 대한 다양한 잡음 소스의 영향에 대한 심층 분석을 제공하였다. 임피던스 정합의 역할과 수신 증폭기의 잡음 특성, 그리고 다양한 상황에서 안테나 수에 따라 어레이 이득과 채널 용량이 확장되는 방식에 대한 흥미로운 결과를 제시했다. 흥미로운 결과 중 하나는 등방성 배경 잡음을 수신하는 무손실 안테나 어레이를 사용하면 안테나가 아무리 조밀하게 채워져 있어도 효율적인 멀티스트리밍을 달성할 수 있다는 것을 보여주었다. 그리고 이를 바탕으로 다음의 새로운 연구 방향을 제시하였다: 1) MIMO 시스템을 위한 안테나 요소와 어레이의 최적화 설계; 2) 시스템 대역폭(광대역 매칭)을 고려한 실행 가능한 임피던스 매칭 멀티포트의 최적 설계; 3) 파라미터값의 변화에 대한 시스템의 민감도를 최적화; 4) 다중 사용자/다중 셀 시나리오를 고려하고 통신 물리학과 일치하는 수많은 중요한 정보의 이론적 결과를 만드는 것이다. 이는 주어진 MIMO 통신 채널에 대한 용량을 달성하려는 노력뿐만 아니라 최적의 용량을 위한 채널을 설계하려는 노력이라 할 수 있다. 그러므로 제시된 회로 이론은 전자기학 관점에서 무선통신의 새로운 연구 방향으로 나아가는 과정에서 물리학과 정보이론 사이의 중재자라고 주장하였다.



2006년 Sarkar 등은 Maxwell 방정식의 전자기 원리를 신호 처리 방법론과 통신이론에 통합하면, 실제 환경에 설치된 무선통신시스템에 대해서 더 나은 성능 분석, 설계 등을 할 수 있다고 주장하였다[9]. 구체적으로, 실제 환경에서 전자기 벡터 현상을 반영한 안테나 어레이 모델, 안테나 빔포밍, 공간 다이버시티, 전파 모델링, 채널 용량 특성화 등에 대한 주요 연구 결과는 다음과 같다. 첫째, 전형적인 통신이론은 위상 어레이 안테나에서 신호 도래각 등을 분석 시 실제 안테나가 아닌 등방성 점 방사기로 가정하여, 실제 안테나 요소 간의 상호 결합, 근거리 필드에서 산란체의 존재로 인한 현상 등을 무시한다. 그러나 위상 어레이 안테나 효과를 정확히 분석하려면, 안테나 요소 간의 상호 결합, 안테나와 주변 환경 또는 안테나가 장착된 플랫폼 간의 기타 근거리 상호작용 등의 영향 분석이 필요하다. 예로서 상호 결합, 근거리 필드에서 현상 등으로 인한 실제 전자기 현상에서 유도된 전압을 계산하려면 Maxwell 방정식을 풀어서 제시하였다. 둘째, 전형적인 통신이론에서 언급되는 안테나 빔 패턴은 항상 원거리 필드 패턴을 암시하므로 셀로부터 거리에 무관하게 일정하다. 그러나 현실적으로 많이 구축된 마이크로 셀과 피코 셀을 이용하는 이동통신 사용자들은 근거리 필드에 존재할 확률이 높고, 근거리 필드에서 단일 안테나의 빔 패턴도 셀로부터 거리마다 다르기 때문에 특정 빔 패턴으로 정의할 수 없다. 따라서 근거리 필드에서 빔 포밍을 어떻게 할 수 있는지 연구가 필요하다. 셋째, 전형적인 통신이론에서는 송수신기 간의 채널 용량으로 전자기장의 물리적 현상인 군속도나 분산을 고려하지 않는 Shannon의 채널 용량을 사용하는데, Maxwell 관점에서 보면 근거리 필드의 전력밀도는 Poynting 벡터의 복소수 값인데, 그 Poynting 벡터의 어떤 값을 적용해야 하는가라는 이슈를 제기하였다. 전형적인 통신시스템

모델링에서는 일반적으로 등방성 점 소스로 가정되는 안테나에 유도된 전압만 고려하고, 푸리에 변환을 통해 전압의 자기상관 함수를 전력 스펙트럼 밀도와 연관시켜 절대값의 제곱을 취하여 전력을 추정하기 때문에 등방성 점 소스에서는 근거리 필드를 고려하지 않는다. 일반적으로 전압이나 전류의 제곱 절대값은 저항성 회로에 대해서만 전력 추정을 제공하고, 실제 안테나에서 유도성 또는 용량성의 복잡한 임피던스를 포함하는 회로인 경우 전압이나 전류만 사용하면 전력 값을 제공하는 데 충분하지 않다. 즉, 총 전력을 계산하려면 전류와 전압 그리고 이들의 위상각이 필요하기 때문이다. 또한 Shannon의 채널 용량은 송신기와 수신기 간의 이격 거리에 따라서만 달라지며, 또한 수신기 단말에서만 적용 가능하고, 송신 전력 요구사항에 대한 언급은 없다. 결론적으로 실제로 안테나의 방사와 수신 효율을 제공하는 Poynting 벡터와 Shannon 채널 용량 공식을 연결하는 방법의 예를 제시하였고, 지속적인 연구가 필요하다고 하였다.

2019년 Sarkar 등은 전자기적 관점에서 MIMO 안테나시스템이라는 개념을 제안하였다[10]. 지금까지 MIMO 연구는 실제 안테나에서 야기될 수 있는 여러 이슈를 무시하고, 어레이 안테나를 단순한 등방성 점 소스의 어레이로 모델링한 후, RF 단에서 인코딩과 디코딩에 대한 최적 설계를 하는 것이었다. 반면에 MIMO 안테나시스템이라는 것은 MIMO용 안테나에 의한 전자기적 현상을 포함하여 그 안테나들의 적절한 통합과 분석을 통해 최적 설계하는 것이다. MIMO 안테나시스템에 계산 전자기학을 적용한 수치해석 기반의 성능 분석을 통해 다양한 전자기 효과가 MIMO 안테나시스템 성능을 저하시킬 수 있음을 보여주었다. 구체적으로 MIMO 안테나시스템 설계에서 전자기 효과를 고려하지 않으면, 최고의 성능을 얻을 수 없거나 SISO 시스템에 비

해서도 성능이 더 나빠질 수도 있음을 보여주었다. Shannon은 채널 용량 도출 시 점대점 유선통신시스템만을 고려하였고, 간섭, 다중경로 효과, 상호 결합, 안테나 이득, 방사 효율 등 전자기 효과는 고려하지 않았음을 다시 지적하였다. 따라서 Sarkar 등은 무선통신시스템 연구자들이 MIMO 안테나 분석 시 안테나를 등방성 점 소스로 사용하는 것은 필드 간 간섭의 실제 특성과 안테나 간에 존재하는 상호 결합 효과를 반영하지 않기 때문에 원거리 필드라 하더라도 올바르지 않다고 지적하였다.

## IV. 전자기 정보이론 연구

### 1. 전자기관점에서 채널 용량 연구

2008년 Sarkar 등은 무선통신시스템에 대한 설계와 성능 분석에서 원하는 신호를 스칼라 양으로 가정하는 문제 해결을 위해, 원하는 신호의 전자기적 특성을 고려한 전자기 신호의 방사와 수신에 대한 Maxwell 방정식으로부터 얻은 결과를 통신시스템 이론의 현 설계와 해석을 어떻게 수정하고 개선해야 하는지 설명했다[11]. 즉, 통상 무선통신시스템에서 채널 용량에 대한 수학적 표현(Shannon 채널 용량, Hartley 채널 용량 등)들은 수신기에서 입사 필드와 관련된 전력과 전압이지만, 엔트로피로 정의된 채널 용량은 무선통신의 전자기적 특성과 거의 관련이 없는 추상적인 수학적 숫자이므로 시스템 설계에는 유용하지 않음을 지적하였다. 즉 전자기학에서 전력은 기본적으로 필드에 의해 전달되므로, Maxwell 물리학을 도입한 벡터 전자기 방정식을 사용하면, 채널 용량 공식을 물리적이고 현실적인 방식으로 해석하는 데 도움이 될 수 있다고 하였다. 즉, 수학적인 채널 용량의 공식들에 물리적 관점을 적용하자는 것이다.

신호 진폭이 배경 잡음과 비슷하거나 작을 수 있

어서 배경 잡음이 중요한 역할을 하는 환경에서 신호에 대한 통계적 모델을 기반으로 하는 Shannon의 채널 용량은 전압과 전류가 회로단자에서 정의되는 유선통신시스템에서 도출되었으므로, 전자기 이론에서 발생하는 전파의 군속도나 분산 등을 고려하지 않았다. 또한 Shannon은 엔트로피 개념을 사용하여 용량 공식을 도출했는데, 여기서 잡음 현상은 순전히 랜덤이지만 다중경로나 다른 간섭 소스를 포함하지 않았다. 따라서 Shannon 채널 용량 공식을 무선통신시스템에 적용할 때 이슈는 다음과 같다: 첫째, Shannon 채널 용량 수식을 무선통신시스템에 적용할 때, 전력은 송신 안테나에 대한 입력 전력이 아니라 평균 수신 안테나 전력을 다루고 있다. 즉, 송수신 안테나의 방사 효율과 같은 시스템 손실은 고려되지 않았다. 둘째, Shannon 채널 용량 공식에서 전력은 실수이므로, 그 크기는 무선통신시스템의 원거리 필드에서만 가능하지만, 근거리 필드 시나리오에서는 전력이 복소수이므로, 적용 시에 주의해야 한다. 즉, 다른 근거리 필드 산란체, 안테나들 간의 상호 결합과 안테나가 장착된 플랫폼들은 안테나가 등방성 점 소스로 근사되기 때문에 고려되지 않았다. 이 효율성의 누락과 등방성 점 소스 모델의 부적절함은 시스템 설계에 심각한 장애가 된다. 따라서 Shannon의 채널 용량( $C_S$ )인 식 (1)은 입력 전력을 명시적으로 지정하지 않으면 유용하지 않다.

$$C_S = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \quad (1)$$

여기서,  $B$ 는 One-sided 대역폭,  $P_S$ 는 평균 수신 전력,  $P_N$ 는 채널 대역폭에 대한 평균 잡음 전력이다.

한편 실제 통신시스템에 더 적합한 실용적인 채널 용량은 1928년 Hartley가 처음 개발했다. Hartley는 “제한된 범위의 주파수로 전송이 제한된 시스템을 통해 전송될 수 있는 총 정보량은 전송하는 주파

수 범위와 전송 가능한 시간의 곱에 비례한다.”라고 언급했으며, 이는 메시지와 시스템의 메시지 전송 용량을 측정하는 방향으로 나아가는 첫걸음으로 인정되고 있다. 즉, 이 모델에서 잡음은 관련성이 없는 것으로 간주되며, 용량은 식별이 가능한 전압 수준에 따라 결정된다는 것이다. 또한, Hartley는 단일 수신기에 사용할 수 있는 다양한 신호의 수가 간섭의 상대적 크기에 의해 어떻게 제한되는지를 보여주었다. 구체적으로 신호가 전송 매체를 통과하면서 신호가 왜곡되고, 잡음과 간섭 신호가 추가되는 경우 원하는 목적지에서 신호를 올바르게 해석하는 것이 주요 작업이었다. 실제 물리 시스템에서는 다음의 두 가지 이유로 신호 변화 속도를 무한정 증가시키거나, 전압 진폭 또는 레벨을 무한정으로 구별할 수 없다: 첫째, 모든 시스템에는 인덕턴스와 커패시턴스와 같은 에너지 저장 장치가 있어서 신호를 변경하면 에너지 함량이 변경된다. 이 변경에 대한 제한은 특정 시스템의 대역폭에 따라 결정된다; 둘째, 모든 시스템은 전압에서 또는 신호 진폭 측정에 사용되는 모든 파라미터에서 고유한 Variations (변동) 혹은 Fluctuations(출렁임)이 있으므로, 진폭을 무한으로 세분화할 수는 없다. 이 변동되는 원치 않는 출렁임을 잡음이라고 했다. 이상 두 가지 제한 사항은 시스템 용량을 위해 다음의 간단한 식으로 표현하였다:  $C = 1/\tau \log_2 n$ , 여기서  $\tau$ 는 시스템이 신호 변경에 응답하는 데 필요한 최소 시간이고,  $n$ 은 구별 가능한 신호 레벨의 수가 된다. 최소 응답 시간은 시스템 대역폭의 역수에 비례하므로 시스템 용량은  $C = B \log_2 n$ 가 된다. 여기서  $B$ 는 시스템 대역폭(Hz)이다. 이 Hartley 용량은 송수신 안테나시스템이 모두 공역 정합될 때 용량에 대한 Shannon 정의와 동일하다. Shannon 정리의 기본 형태는 채널에서  $T$ 기간에  $M$ 개 서로 다른 신호 함수를 구별하기 위해, 채널은 시간  $T$ 에서  $\log_2 M$  비트를 송신할 수 있다고 명

시한다. 즉 전송 속도는  $\log_2 M/T$ 다. Hartley에 따르면, 수신된 신호를  $2Q$  레벨로 분리해야 하는 경우 전력 개념을 깊이 파고들지 않고도 용량에 대한 단순화된 표현을 얻을 수 있으므로, 합리적으로 잘 구별할 수 있는 진폭의 수가  $2Q$ 가 된다는 것이다. 또한 Shannon이 지적한 것처럼 시간  $T$ 에는  $2TB$ 의 독립 진폭이 있으므로 총 개별 신호 수는  $M = (2Q)2BT$ 이다. 여기서  $B$ 는 신호의 One-sided 대역폭이다. 이 시간에 보낼 수 있는 비트 수는  $\log_2 M/T = 2BQ$ 가 되며, 이는 근거리 필드 환경을 특성화하는 데 더 적합하며 채널 용량 정리의 Hartley-Nyquist-Tuller 형태인 식 (2)와 유사하게 된다.

$$C_{\text{HNT}} = 2B \log_2 \left( 1 + \frac{A_s}{\Delta V} \right) \quad (2)$$

여기서,  $B$ 는 One-sided 대역폭,  $A_s$ 는 수신된 신호의 제곱평균제곱근 진폭 전압,  $\Delta V$ 는 수신된 신호의 이산화와 관련된 양자화 잡음 전압의 제곱평균제곱근 레벨이다.

채널 용량으로 식 (2)를 사용하면 전력 관계로 계산할 때 얻은 값과 다른 채널 용량 값을 제공할 수 있다. 식 (2)에서는 전압만 필요하므로, 용량이 필드와 직접적으로 관련되며 근거리 필드와 원거리 필드 특성화 모두에 유효하므로 무선통신시스템에 이상적으로 적합하다. Nyquist 또는 Hartley는 식 (2)를 유도할 때 잡음을 무시하지 않았다. Hartley는 특정 검출시스템을 가정하였고, 신호 요소가 적절한 전력을 갖고 있으며, 잡음과 심벌 간 간섭을 무시하고 전송 오류를 방지할 수 있을 만큼 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정했다. 반면, Shannon은 유한한 오류 확률을 가정하였고, 통계적 결과를 얻었다. Hartley 공식과 Shannon 공식을 비교해 보면, 이 공식들은 동일한 전송 성능을 나타내지 않는다: 하나는 본질적으로 오류가 없지만, 다른 하나는 평균 오류율을 임의로 작게 만들 수 있다는 통계적 의미에서만 오



류가 없다. 따라서 배경 잡음 특성이 두 경우에 매우 유사하다고 가정하면 공액 정합 안테나에 대해 두 표현이 유사한 결과를 얻을 수 있다. 식 (2)에서 제한 요소는 전압이 양자화되는 가장 낮은 이산화 레벨이다. 이 공식은 처음에는 통계적 모델을 가정하지 않고, 결정론적 모델을 사용하여 파생되었다. 신호 레벨이 배경 잡음보다 훨씬 큰 무선통신시스템에서 이산화  $\Delta V$ 는 신호의 양자화 레벨과 관련될 수 있으며, 무선통신시스템에 적용하는 것과 더 관련이 있으므로 식 (1)보다 식 (2)를 사용하는 것이 더 적절하다. 모든 무선통신시스템의 수신기 감도는 주로 전력밀도가 아닌 특정 입사 전계 강도에 대한 안테나의 감도로 표현되기 때문에 식 (2)가 더 적합하다. 따라서 Hartley 용량은 용량을 정의하기 위해 수신 안테나의 전압만 사용하므로, 식 (2)는 시스템 설계 관점에서 유용하다고 할 수 있다.

무선통신시스템의 설계를 위한 두 가지 형태의 채널 용량 공식으로, 첫 번째 Hartley 공식에서 사용되는 수신 전압을 기반으로 하고, 두 번째 Shannon 공식에서 사용되는 수신 전력을 기반으로 하는 것을 소개하였다. Maxwell 이론을 적절하게 사용하면, 두 형태 모두 유사한 결과를 산출함을 보여준다. 그러나 공학적 관점에서는 근거리 필드 환경과 원거리 필드 환경 모두에 적용할 수 있는 Hartley 법칙이 더 유용하고, Shannon의 공식은 근거리 필드 환경에서 사용하기에 적합하지 않다.

## 2. 전자기학 정보이론 연구

Migliore 등은 Shannon의 정보이론적 틀에서 통신 채널상의 물리학을 따르는 전자기장에 의해 신뢰성 있게 전송될 수 있는 정보의 양을 정량화했다 [12,13]. 개발된 모델을 사용하여 특히 다중 안테나에 중점을 두고 안테나 등에서 관심 있는 실제 문제

를 해결하고자 했다. 구체적으로는 Kolmogorov 정보이론을 이용하여 안정적으로 전송되는 최대 정보량을 구하면서 방사 연산자를 공간 통신 채널로 사용하는 공간 통신시스템의 근본적인 한계를 연구하였다.

2008년 Migliore 등은 정보이론과 전자기 이론 사이의 연관성을 연구하였고, Shannon의 수학적 통신이론을 현실적인 무선통신시스템에 응용하는 방법을 제시했다[12]. 핵심은 두 가지 중요한 정보량, 즉 전자기장의 공간적 분포와 관련된 정보 양 그리고 전자기장을 통해 확실하게 전달되는 정보 양을 산출하기 위해 Shannon 접근 방식 외에 Kolmogorov 접근 방식을 사용한 것이다. Kolmogorov 접근 방식의 장점은 연산자 기반 통신이론이므로, 고전적인 전자기 이론 접근 방식과 자연스럽게 일치한다는 것이다. 일반적인 무선통신시스템의 안테나에 이 결과를 적용하면, 안테나가 정보 전송 능력으로 특징지어지는 완전히 새로운 관점을 제시할 수 있으며, 일반 안테나, 적응형 안테나와 MIMO 안테나를 포함하는 안테나에 대한 새로운 통합된 접근 방식을 제시한다고 하였다. 저자는 우선 MIMO 안테나와 MIMO 시스템이라는 용어를 다음과 같이 구분하였다. MIMO 안테나는 전자기장의 공간적 변화를 활용하여 정보를 인코딩하여 통계적으로 독립적인 정보를 전달하는 것으로, 기본적으로 유효 차원이 입사 전자기장과 동일한 공간에 속하는 신호를 유한 차원 공간에 속하는 신호(안테나의 요소 출력에서 신호)로 변환하는 (일반적으로 선형) 연산자다. 그런데 무선채널로 전송되는 정보 양을 최대화하려면, 수신된 신호 공간의 차원이 전자기장의 필수적인 차원과 동일해야 한다는 의미에서 MIMO 시스템은 “정합된 DoF”이어야 한다는 것이다.

Migliore 등은 안테나의 전자기 소스에서 방사된 후, 목적지에서 관찰되는 필드로 구성되는 물리 시

스텝에서,  $\epsilon$ -레벨의 불확실성을 갖는 전자기장의 공간 분포와 관련된 정보 양을 유도한 후, 그 정보 양 중에서 신뢰할 수 있는 수준의 정보 양이 얼마인지를 유도하였다. 즉, 통신 채널을 통해 전달되는 정보의 최대량은 관측된 데이터가 불확실성의 영향을 받을 때도 구별할 수 있는 다양한 파형의 최대 수와 같아야 한다는 것이다. 따라서 구별할 수 있으면 파형이 “충분히 달라야” 하거나, 즉 적절한 Norm으로 평가된 거리가 불확실성 수준에 따라 달라지는 양보다 커야 한다. 이 정성적 관찰을 정량화하는 수학적 도구로 Kolmogorov가  $\epsilon$ -packing을 기반으로 한 Kolmogorov  $\epsilon$ -capacity다. 이 결과를 통해 관측 가능한 양에 대한 불확실성 수준인  $\epsilon$ 이 존재하는 경우, 채널 연산자를 통해 전송될 수 있는 정보의 최대량을 정량화할 수 있다. 결론적으로 전자기장은 방사 연산자의 범위에 속하는 함수 집합의  $\epsilon$ -capacity, 즉  $\epsilon$ -separated 패턴의 수와 동일한 양의 정보를 전달할 수 있음을 보여주었다. 그리고 그 채널 연산자의 예로 공간 채널 연산자, 시공간 채널 연산자를 도출하고 그 용량을 계산하였다.

이어서 2018년 Migliore 등은 전자기장에서 의해 전달되는 정보 양을 평가하기 위해 공간 통신시스템 모델을 도입한 후, 전체 시공간 통신시스템의 정보 양을 평가하였다[13]. 지금까지의 MIMO 안테나 시스템의 설계는 그 안테나 주변 공간에서 방사되는 전력밀도를 제어하는 것이 아니라, 데이터 처리량의 극대화, 즉 독립적인 정보 전송을 하게 하는 것이었다. 그러나 전자기장을 제어할 수 있다면 목적지에서 원하는 특정 필드 구성을 제공하는 소스 측에서의 전류 분포를 구할 수 있으므로, 이를 바탕으로 시공간 통신시스템에서 전자기 정보 용량을 구할 수 있게 된다. 구체적으로는 관측된 데이터에 불확실성이 있는 경우 소스 영역에서 목적지 영역으로 안정적으로 전달할 수 있는 정보의 최대량을 정

량화하기 위해 Kolmogorov 접근방식을 사용하였다. 이 접근 방식에 의한 연구 결과는 다음과 같다: 첫 번째, 불확실성의  $\epsilon$ -sphere가 존재할 때 목적지에서 구별 가능한 필드 구성의 최대 수는 공간 채널을 사용하여 안정적으로 전송될 수 있는 정보의 최대량과 관련이 있으며 Kolmogorov  $\epsilon$ -capacity로 제공된다; 두 번째, NDF는 다중 안테나시스템에서 정보를 전달하는 데 사용할 수 있는 통신 부 채널의 최대 개수다.

Kolmogorov 이론을 사용하는 이유는 시간 영역과 공간 영역 채널에 사용할 수 있는 DoF 사이에 약간의 비대칭이 존재하기 때문이다. Kolmogorov와 Shannon은 기본적으로 시간 영역 통신시스템에 대해 동일한 결과를 제공하므로 Kolmogorov  $\epsilon$ -capacity는 특별히 매력적이지 않다. 그런데 공간 영역에서 DoF의 수가 방사 연산자의 유효 순위에 의해 제한된다는 것을 보여주므로, 수학적 관점에서 볼 때 대수의 법칙을 적용하여 확률의 Soft Sphere를 공간 영역의 Hard Sphere로 변환하는 것은 불가능하다. Kolmogorov 이론은 이 문제를 극복한 것이다. 즉, 수학적 관점에서 이 약간의 비대칭성은 제시된 공간 채널 분석을 위해 Shannon 이론을 사용하는 것을 방해하였지만, 실용적 관점에서 이는 다중 안테나를 사용할 때 채널 용량 측면에서 이론적 성능과 실제 성능 간의 차이의 근원이 되는 중요 결과를 초래한다는 것으로 밝혔다.

Z. Qan 등은 전류, 전하와 필드의 변화에 의해 전자기장이 어떻게 생성되는지를 보여주는 4개의 미분방정식을 포함하는 Maxwell 방정식(Faraday 법칙과 Ampere 법칙)을 기반으로 전자기파 통신 기본 모델을 고안했다[14]. 즉, 랜덤 필드를 기반으로 하는 두 개의 4차원 연속 영역 간의 전자기파 통신시스템 모델을 개발한 것이다. 구체적으로 이 전자기파 통신시스템 모델에서 전자기장의 통계적 특성, 즉 공

간 상관관을 포착하기 위해 전통적인 결정론적 신호 대신 가우시안 랜덤 필드를 사용했다. 즉, 전자기장에서 두 개의 연속된 영역(소스 영역과 목적지 영역)에서 용량 도출을 위해 공간 상관 해석이라는 방법을 사용했다. 소스와 목적지 간의 상호 정보(Mutual Information)는 연속된 목적지 영역에서 샘플링을 통해 제한된 형태로 유도했다. 여기서 샘플링 포인트의 최상의 공분산(Covariance) 행렬은 최대 상호 정보, 즉 소스와 목적지 간의 최대 용량을 얻기 위해 Kuhn-Tucker 조건에 의해 유도하였다. 이를 바탕으로 다음 세 가지 조건에서 용량을 도출하였다.

첫째, 용량에 대한 해석적 솔루션 도출을 위해, 우선 무한 길이의 선형 소스와 목적지가 서로 평행인 단순 모델을 고려하였다. 소스와 목적지 간의 상호 정보는 목적지의 잡음 필드와 전기장의 공간 스펙트럼 밀도(SSD: Spatial Spectral Density)로 표현되었다. 소스상의 전류 밀도의 SSD와 목적지상의 전기장의 SSD 간의 관계는 그린 함수의 푸리에 변환으로 특징화했다. 그다음 소스와 목적지 간의 용량과 같은 최대 상호 정보를 달성하기 위해 변형 미적분학(Variational Calculus)을 기반으로 소스의 최상의 전류 밀도 분포와 이를 바탕으로 용량을 도출했다.

둘째, 무한 길이의 선형 소스와 유한 길이의 목적지가 서로 평행인 통신 모델을 고려했다. Mercer 확장을 활용하여 소스와 목적지 간의 상호 정보를 도출한 다음, 주어진 전자기장 분포에 대한 상호 정보의 해석적 솔루션을 도출했다.

셋째, 유한 길이의 선형 소스와 목적지가 서로 평행인 실용적인 모델을 고려했다. 무한 길이의 소스와 유한 길이의 목적지 사이의 상호 정보가 유한 길이의 소스와 목적지의 상호 정보의 상한임을 증명했다. 또한, Mercer 확장을 활용하여 유한 길이의 소스와 대상 간의 상호 정보를 도출했다.

## V. 결론

Shannon의 정보이론은 발신지와 목적지 간의 4차원 전자기장 신호 중 1차원의 시간 차원에서만 용량을 분석하였지만, 실제 이동통신시스템은 정보 교환을 위해 1개의 시간 차원과 3개의 공간 차원을 포함한 4차원 전자기장을 사용하고 있다. 그러나 4G부터 도입된 MIMO 기술은 계속 진화 발전되고 있으나, 이동통신시스템의 표준화 및 설계 과정에서 그 MIMO 기술의 바탕이 되는 안테나에 의한 전자기적 물리 현상을 충분히 고려하지 못하고 있다. 즉, Shannon의 정보이론은 3차원의 전자기적 공간에서의 DoF를 현실적으로 활용하지 않는 무선통신시스템에서 유효한 이론적 한계를 제공한다고 할 수 있다. 따라서, 본고에서는 연속적인 4차원 전자기장의 효과를 고려하기 위해 기존의 수학적 추상화를 기반으로 만들어진 정보이론과 안테나에 의한 전자기장의 물리적 현상을 결합시킨 것을 전자기 정보이론에 대한 연구 동향을 분석 정리하였다. 구체적으로 산란된 필드 환경에서 공간 대역폭, 전자기장의 물리학과 정보이론의 수학적 이론의 가교가 된 회로 이론적 멀티포트 모델, Maxwell 방정식의 전자기 원리를 신호 처리 방법론과 통신이론에 통합시킨 것으로 MIMO 안테나시스템, 무선통신시스템에 대한 용량으로 수학적 관점에서의 Shannon의 채널 용량이 아닌 전자기적 관점에서 Maxwell 방정식으로부터 전자기 정보 용량을 연구 등이다.

이 전자기 정보이론은 기본적으로 전형적인 MIMO 기술 성능 분석 과정에서 등방성 점 소스의 안테나 어레이에 기반하는 확률적 채널 모델을 넘어서 3차원의 전자기적 현상을 반영하는 새로운 연구 방향이 될 것이다. 또한, 이 이론 6G 표준 후보기술인 Extreme MIMO 기술, OAM, RIS, 홀로그래픽 MIMO 등 성능 분석에서 전자기장의 물리적 현상

을 충분히 반영함으로써 보다 현실적인 최적의 설계를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

### 약어 정리

DoF	Degree of Freedom
EIT	Electromagnetic Information Theory
MIMO	Multi-Input Multi-Output
OAM	Orbital Angular Momentum
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
SDoF	Spatial Degree of Freedom
SSD	Spatial Spectral Density

### 참고문헌

- [1] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, no. 3, 1948, pp. 379-423.
- [2] D. Gabor, "Communication Theory and Physics," *Trans. IRE Professional Group Inf. Theory*, vol. 1, no. 1, Feb. 1953.
- [3] O.M. Bucci and G. Franceschetti, "On the Spatial Bandwidth of Scattered Fields," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 35, no. 12, 1987, pp. 1445-1455.
- [4] O.M. Bucci and G. Franceschetti, "On the Degrees of Freedom of Scattered Fields," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 37, no. 7, 1989, pp. 918-926.
- [5] M. Franceschetti et al., "The Degree of Freedom of Wireless Networks Via Cut-Set Integrals," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 5, 2011, pp. 3067-3079.
- [6] M. Franceschetti et al., "The Capacity of Wireless Networks: Information-Theoretic and Physical Limits," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 8, 2009, pp. 3413-3424.
- [7] F. Gruber et al., "New Aspects of Electromagnetic Information Theory for Wireless and Antenna Systems," *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, vol. 56, No. 11, 2008, pp. 3470-3484.
- [8] M.T. Ivrlac et al., "Toward a Circuit Theory of Communication," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 57, no. 7, 2010, pp. 1663-1683.
- [9] T.K. Sarkar et al., "A Discussion about Some of the Principles/Practices of Wireless Communication Under a Maxwellian Framework," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, No. 12, 2006, pp. 3727-3745.
- [10] T.K. Sarkar et al., "MIMO Does It Make Sense From an Electromagnetic Perspective and Illustrated Using Computational Electromagnetics," *IEEE J. Multiscale Multiphys. Comput. Technique*, vol. 4, 2019, pp. 269-281.
- [11] T.K. Sarkar et al., "A Look at the Concept of Channel Capacity from a Maxwellian Viewpoint," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 50, no. 3, 2008, pp. 21-50.
- [12] M.D. Migliore et al., "On Electromagnetics and Information Theory," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 10, 2008, pp. 3188-3200.
- [13] M.D. Migliore, "Horse (Electromagnetics) is more Important than Horse-Man (Information) for Wireless Transmission," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, 2018, pp. 2046-2055.
- [14] Z. Qan et al., "Capacity for Electromagnetic Information Theory," *arXiv preprint*, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2111.00496