

메타소자 기반 Reconfigurable Intelligent Surface 설계 및 분석

전 동수*, 채 찬병^o

Design and Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface with Meta-Devices

Dongsoo Jun*, Chan-Byoung Chae^o

요 약

무선 환경을 인위적으로 재구성하여 높은 스펙트럼 효율을 달성하는 재구성 가능 지능형 표면 (RIS)이 5G 및 6G 광대역 통신 시스템에서 제안되고 있다. 하지만 이상적으로 100% 빔 튜닝이 가능한 소자 기술은 존재하지 않으며, 집적 회로 (IC) 기반 메타표면을 이용하는 대부분의 연구는 여러 한계를 가진다. 본 논문은 우선 RIS의 위상 튜닝 범위에 의해 반사파의 추가 각도 변화가 결정되는 관계를 공식화한다. 다음으로 액정, 2D 물질, 능동 THz 물질과 같은 메타소자를 통해 RIS를 설계하는 방법론을 조사한다. 이후 실제적인 통신 시나리오를 반영하는 3D 레이 트레이싱을 통해 시스템-레벨에서 RIS의 성능을 평가한다. 마지막으로 다양한 메타소자를 접목한 RIS 시스템 디자인과 빔포밍 스루풋 성능을 분석한다. 그 결과 본 논문은 지향하는 성능과 용도에 적합한 RIS 설계에 유용한 직관을 제공한다.

키워드 : 재구성 표면, 지능형 반사 표면, 메타소자, 메타표면, 6G

Key Words : RIS, IRS, Meta-devices, Metasurface, 6G

ABSTRACT

A reconfigurable intelligent surface (RIS) that artificially reconstructs the wireless environment to achieve high spectral efficiency has been proposed in 5G and 6G broadband communication systems. However, there is no device technology capable of ideal 100% beam tuning, and most studies using integrated circuit (IC)-based metasurfaces have some limitations. This paper first formalizes the relationship in which the additional angular change of the reflected wave is determined by the phase tuning range of the RIS. Next, a methodology for designing RIS through meta-devices such as liquid crystals, 2D materials, and active THz materials is investigated. Thereafter, the performance of the RIS via system-level simulation is evaluated through 3D ray tracing that reflects the realistic communication scenario. Finally, we analyze the RIS system design and beamforming throughput performance that incorporates various meta-devices. As a result, this paper provides useful intuition for designing RIS suitable for the performance and application of the goal.

* 본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었습니다.
(No. 2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템, No. 2021-0-02208, 6G 서브테라헤르츠 대역 증강 라우팅과 송수신 기법 개발)

• First Author : School of Integrated Technology, Yonsei University, dongsoo.jun@yonsei.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : School of Integrated Technology, Yonsei University, cbchae@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202203-037-A-RE, Received March 4 2022; Revised March 31, 2022; Accepted March 31, 2022

I. 서론

5G의 상용화와 함께 등장한 초연결사회 서비스의 본격적인 실현을 위해 학계와 산업계에서 beyond 5G (B5G), 그리고 6G 통신에 대한 연구가 펼쳐져 오고 있다. 보다 지능화되고 획기적으로 높은 무선 성능을 가지는 차세대 통신 네트워크는 초고속 데이터 전송률, 네트워크 커버리지, 에너지 효율을 요구한다. 성능 도약을 위한 핵심 기술로서, 재구성 가능 표면 (reconfigurable intelligent surface, RIS)이 중요한 역할을 할 것으로 예상되고 있다. 무선 전파 환경을 인공적으로 재구성할 수 있는 RIS는 높은 주파수 대역 신호의 물리적 한계를 보완하며 동시에 에너지 효율성을 확보할 수 있다고 조망되어 왔다^[1].

RIS는 입사하는 전파와 소자 사이의 상호작용을 동적으로 조절하여 원하는 방향과 성질을 가지는 빔을 형성할 수 있다. 이는 반사와 굴절, 투과, 집광, 시준(collimation) 등을 포함하며, 본 논문에서는 이와 같은 기능들을 빔 튜닝이라 부른다. 이를 통해 RIS를 활용하여 새로운 변조 기법을 만들거나^[2] THz massive MIMO 구조를 설계하며^[3], 빠른 빔 트레이닝 기법을 제안하는 등^[4] 많은 연구들이 수행되어 왔다. 또한 신호처리 측면의 이득 뿐 아니라 RIS는 기존의 중계기 (relay)와 비교하여 에너지와 비용 효율성에서도 이득을 얻을 수 있으며, 그럼으로써 IoT (Internet of Things) 등 확장 가능한 네트워크에서 연결성과 지속가능성을 강화할 수 있다.

대부분의 선행 연구들은 간단하고 이상적인 모델링을 위해 RIS 소자의 위상 튜닝 범위를 [0, 2), 즉 100%로 가정하고 문제를 구성한다. 비슷한 관점에서 많은 연구가 RIS가 변화시킬 수 있는 반사 각도의 최대치를 엄밀히 고려하지 않고 시스템 성능을 계산한다. 하지만 현실에 100% 위상 튜닝이 가능한 소자는 존재하지 않으므로 튜닝 한계에 따른 채널 모델링과 반사 각도의 정확한 계산이 필요하다. 본 논문에서는 빔 도메인에서 기하적인 모델링을 통해 RIS 단위 소자의 위상 튜닝 범위와 추가적인 반사 각도의 관계를 공식화하고 이에 따른 방사 빔 조향 방향의 제어 범위를 계산한다. 그리고 이를 통해 현실적인 RIS의 빔 스위핑 (sweeping) 범위를 적용한 성능 평가를 수행한다.

보다 자세한 관점에서 RIS에 의한 빔 튜닝은 물리적 성질을 동적으로 재구성 가능한 소자를 통해 조절된다. 무선통신 분야에서는 제어와 전자기적 분석의 용이함을 위해 주로 집적회로 (IC) 기반의 칩을 RIS unit cell 소자로 사용한다. 하지만 입사 전파의 위상

과 성질을 바꾸는 튜닝 기법은 광학 등 다른 분야에선 다양한 소자들을 이용해 연구 및 구현되고 있으며, 그 중 일부는 통신 대역에서도 적용 가능성이 존재한다. 일부에서는 액정, 그래핀 등의 소자를 적용한 RIS 구현에 대한 연구가 진행되고 있지만^[5,6], 대부분 안테나 파라미터, EM field 레벨에서 분석한다. 본 논문에서는 기존 IC chip 기반 RIS 시스템의 한계를 서술하고, RIS unit cell에 적용될 수 있는 다양한 재구성 가능한 소자를 제안한다. 우리는 이를 메타소자라고 부르며, 이를 기반으로 향후 적용 가능한 RIS 디자인을 서술한다. 나아가 각 메타소자의 물리적 특성에 따른 RIS 디자인을 통신 성능 관점에서 분석하고 관계를 설명한다.

나아가 본 논문에서는 실제적인 도심 시나리오를 반영한 3D 레이 트레이싱 기반 시스템-레벨 시뮬레이션 (system-level simulation, SLS)을 통해 RIS의 성능을 large-scale에서 평가한다. 또한, RIS의 반사 특성을 반영하면서 레이 트레이싱을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하고 물리적 기능과 한계를 반영한 다양한 시나리오에서 시스템 이득을 분석한다. 그 결과, 우리는 RIS가 고려된 시스템-레벨 성능 평가를 통해 제안하는 RIS 디자인의 가치와 가능성을 입증한다.

II. RIS 시스템 모델

2.1 RIS 기반 반사 제어 및 빔 튜닝

그림.1과 같이 RIS는 특정한 소자와 구조로 이루어진 2D 메타표면을 통해 전자기파의 전파 (propagation) 성질을 제어할 수 있다. 이때 RIS에 입사한 전파의 특성 및 변화는 표면의 인터페이스에서 경계 조건 (boundary condition)에 의해 결정되어진다. 이 논문

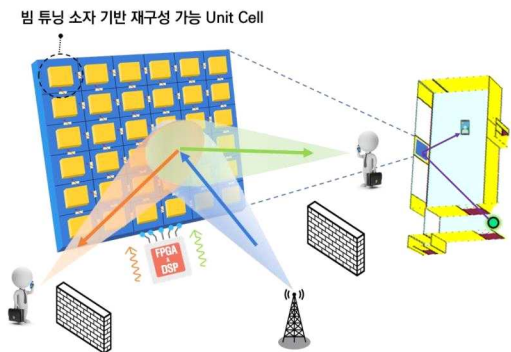


그림 1. RIS 기반 지능형 빔 조향 시스템
Fig. 1. RIS-embedded intelligent beam steering system

에서는 제어 가능한 여러 전자기-광학적 기능들 중 무선 통신에 기여하는 핵심인 반사에 초점을 맞추고 반사 타입 메타표면을 주로 다룬다.

일반적으로, 입사한 전파가 어떤 매질을 지나면 위상이 변화하게 된다. 이때 전파의 파장과 입사각, 해당 매질의 두께, 유전율, 투과율 등에 의해 형성된 경계 조건은 인터페이스 위의 어느 지점에서든 만족되어야 한다. 경계 조건에 따르면 인터페이스의 양 사이드에서 E-field와 H-field 접선 성분 (tangential component)은 연속적이어야 한다. 따라서 다음과 같이 반사 계수 관계를 유도할 수 있다⁷⁾.

$$\Gamma = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}. \quad (1)$$

이때 n_1, n_2 는 각각 자유 공간에서의 공기와 매질의 굴절률이다. 이 관계는 수직 입사의 경우이며, 전자기장과 회로 컴포넌트를 고려해 해당하는 어드미턴스나 역수인 임피던스를 사용해 나타낼 수도 있다. 굴절률은 입사 전파의 E-field 접선 성분 E_{oi} 와 반사 전파의 접선 성분 E_{or} 의 비 E_{or}/E_{oi} 이므로, 불연속적인 인터페이스에서 입사 전파와 반사 전파의 E-field 벡터는 평행하지 않게 된다. 다시 말해 반사 전파의 위상 변화가 일어나고 이는 다음과 같이 얻어진다.

$$\phi(\Gamma) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}(\Gamma)}{\text{Re}(\Gamma)}\right). \quad (2)$$

이때 위상 변화에 의한 벡터 관계를 경계 조건에 적용하면 입사각 θ_i 가 반사각 θ_r 과 같게 되는, 즉 반사 법칙이 성립해야만 한다. 전통적인 통신에서는 이와 같은 정반사를 적용하여 3D 채널 및 무선 환경을 모델링해왔다.

하지만, 전파가 RIS 어레이로 입사하게 되면, 특정한 물성을 갖는 능동 메타소자와 상호작용하게 된다. 각 unit cell의 능동 메타소자는 임의의, 혹은 자연에 없는 물성으로 동적으로 변할 수 있다. 따라서 각 unit cell의 유전율, 커패시턴스 등을 조절하여 유효 굴절율, 어드미턴스, 임피던스에 새로운 성분을 추가하게 되고 위 관계에 의해 해당하는 추가적인 위상 변화가 생긴다. 이때 각각의 추가적인 위상 변화는 새로운 경계 조건에 영향을 주게 된다. 이로 인해 전통적인 반사의 법칙을 위반하여 입사한 전파의 반사각이 입사각과 달라지게 되는 것이 가능해진다. 선행 연구는 이

를 인터페이스의 위상 불연속성을 반영한 일반화된 반사 법칙으로 이끌어냈다⁸⁾. 이를 통해 입사 전파가 임의의 방향으로 특이 반사 (anomalous reflection)가 이루어지도록 RIS의 unit cell과 메타소자를 디자인하는 것이 가능해진다.

그럼, 2와 같이 기하적인 모델링을 통해 RIS에 의한 위상 변화가 반사 각도에 미치는 영향을 고려할 수 있다. Unit cell 간 거리가 d 인 RIS에 입사각 θ_i 로 입사한 광선의 위상 변화는 $d \sin \theta_i$ 에 파수 $2\pi/\lambda$ 를 곱한 꼴이다. 이때 RIS에 의한 추가적인 위상 변화가 더해진다면 기존 위상 변화 $d \sin \theta_i$ 에 $\phi \cdot 2\pi/\lambda$ 만큼이 더해진다. 이 추가적인 위상 변화로 인해 반사 광선은 각도가 α 만큼 더해진 $\theta_r = \theta_i + \alpha$ 의 반사각으로 진행되게 된다. 이때 기하적으로 파면에서 RIS에 의한 위상 변화 $\phi \cdot 2\pi/\lambda$ 는 α 에 대해 접선 (tangent)관계이므로, 추가적인 각도 튜닝 α 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda \phi}{2\pi d \cos \theta_i}\right). \quad (3)$$

즉 입사각 θ_i 대비 반사각의 추가적인 변화인 각도 튜닝 α 는 RIS에 의한 위상 변화에 의해 결정되며, 위와 같이 서로 상보적으로 계산될 수 있다. 이때 전파의 완전한 제어를 위해서는 $-\pi$ 부터 π 까지 커버하는 RIS의 위상 변화가 요구된다. 하지만 현실에서 100%의 위상 변화를 만들 수 있는 소자 기술은 존재하지 않으며, 이로 인해 제어할 수 있는 반사각의 범위가 한정적이다. 따라서 본 논문은 RIS를 설계하는 메타소자의 특성에 따른 위상 및 각도 튜닝 특성을 조사하고 이로 인한 통신 성능과의 관계를 분석한다.

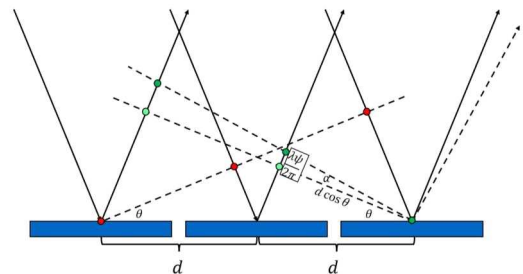


그림 2. RIS에 의한 위상 변화와 추가 반사 각도 사이의 관계
Fig. 2. Relationship between RIS phase shift and additional reflection angle tuning

2.2 IC Chip 기반 RIS 설계

RIS 구현에 있어 가장 중요한 요소는 각 cell을 구성하는 튜닝 소자이며, 지향하는 성능과 구현가능성 위해 다양한 물질과 디자인이 존재한다. 많은 연구에서 원하는 전자기적 기능을 만들기 위한 재료, 소자, 회로 기술이 제안되고 있으며, 그 중 무선통신에서 널리 적용되는 디자인은 그림.3과 같다. Printed circuit board (PCB) substrate 위에 두 개의 금속 패치가 위치하고, 도입된 튜닝 chip이 가운데 연결되어 있다. 여기서, 이 chip은 제어 가능한 커패시턴스 C 와 저항 R 등 가변소자로 이루어져 있으며, 그렇기에 트랜지스터를 포함하는 집적회로 기반 메타소자라고 분류할 수 있다. 따라서 능동 회로 안의 커패시턴스와 저항 성분을 외부 전압을 통해 조절하면서 소자의 로드 임피던스를 제어할 수 있으며, 이는 등가 RLC 회로로 모델링할 수 있다. 유효 커패시턴스는 금속 패치들과 IC chip 사이의 갭으로부터 유도되며, 유효 인덕턴스는 그라운드 기판에 영향을 받는다. 이때 가변 커패시턴스와 저항으로 이루어진 두 IC chip 모두 metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)에 의해 실현된다⁹⁾. 따라서 이론적으로 이 능동 집적회로의 파라미터들을 조절함으로써 전자기파의 진폭, 위상 등을 튜닝할 수 있고, 이로써 반사, 흡수 등의 성질을 제어할 수 있다. 집적회로를 사용하는 대부분의 디자인이 이와 유사한 토폴로지를 가진다.

많은 연구에서 버랙터 혹은 PIN 다이오드 소자를 사용해 IC chip 기반 RIS 설계한다. 이들은 unit cell 구동 회로에서 주로 임피던스 소스로 활용되며 각각 다른 전자기적 특성을 가진다. 버랙터 다이오드는 인가 바이어스에 응답하는 가변 커패시턴스 소자로 역

전압을 통해 구동된다. 버랙터 다이오드는 일반적으로 약 2V에서 20V 볼트의 범위에서 작동한다. 이때 커패시턴스는 역전압의 제공근에 반비례하여 작아지므로, 바이어스 범위의 끝자락에서는 같은 커패시턴스 차이를 얻기 위해 더 높은 전압이 필요하다. 이 비선형 증감 성질을 이용하여 유효 로드 임피던스를 바꿀 수 있다. 버랙터 다이오드의 등가 회로에서 로드 임피던스 $Z_{varactor}$ 는 다음과 같이 결정되며, 바이어스에 따른 커패시턴스 변화를 통해 제어될 수 있다.

$$Z_{varactor} = \frac{j\omega L_2(j\omega L_1 + (j\omega C)^{-1} + R)}{j\omega L_2 + j\omega L_1 + (j\omega C)^{-1} + R} \quad (4)$$

이때 f, L_1, L_2 는 각각 캐리어 주파수, 외부 레이어의 인덕턴스, 내부 레이어의 인덕턴스이다.

PIN 다이오드는 이름처럼 P-type, intrinsic region, N-type 반도체의 접합으로 구성되는 소자이다. PIN 다이오드는 신호가 저주파일 때는 일반적인 다이오드와 같이 동작하고, 고주파에서는 마치 저항처럼 동작한다. 이렇게 고주파 회로에서 저항 값은 다이오드를 흐르는 직류 바이어스 전류에 반비례하며, 즉 전류가 크면 저항은 매우 작아진다. 또한 등가 회로에서, 순전압이 가해지면 소자는 마치 저항과 인덕턴스의 직렬 연결과 같다. 하지만 역전압이 가해지면, PIN 다이오드는 커패시터의 성질을 보이며, 이때 커패시턴스는 가해주는 전압과 무관하다. 이처럼 PIN 다이오드는 바이어스에 따라 스위치처럼 작동할 수 있으며, 로드 임피던스는 다음과 같이 나타난다.

$$Z_{PIN} = \begin{cases} R + j\omega L, & \text{Forward bias} \\ j\omega L + 1/j\omega C. & \text{Reverse bias} \end{cases} \quad (5)$$

따라서 제어 가능한 로드 임피던스를 (1)에서 굴절을 대신 가능한 어드미턴스의 역수로 사용할 수 있고, 그림으로써 반사 계수와 위상을 조절할 수 있다. 이와 같은 IC chip 기반 소자는 빠른 응답 속도와 제어의 용이함, 비용적인 측면으로 현재 대부분의 RIS 설계에서 채택되었다.

III. RIS 후보 메타소자

3.1 IC Chip 기반 RIS의 한계

RIS가 접목된 무선 시스템의 중요성은 5G 밀리미터

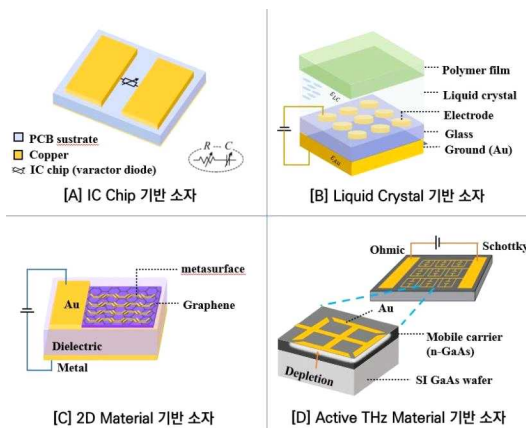


그림 3. RIS 빔 튜닝 메타소자 디자인
Fig. 3. RIS beam tuning meta-devices design

터파를 넘어 6G에서 핵심 대역이 될 것으로 예상되는 THz 대역의 빔포밍에서 주목받고 있다. 하지만 버랙터 다이오드는 실제 구현시 위상 제어 범위가 이상적인 값의 70% 이하로 제한되는 물리적 한계가 있다. 따라서 포화 지점이 존재해 높은 전압을 가한다 해도 일정 수준 이상의 위상 변화를 얻을 수 없다. 그리고 PIN 다이오드는 이산적인 위상 변화 구조로 인해 정확한 빔 튜닝이 불가능하고 이로 인한 성능 열화가 발생한다. 또한 이 경우 매우 많은 다이오드의 사용으로 인해 전력 소비 역시 커지는 한계가 있다¹⁰⁾. 이로 인해 여러 주파수 대역에서 RIS의 성능 보장과 구현 가능성을 위해 다양한 물리적 특성을 가진 빔 튜닝 메커니즘과 소자를 적용할 필요성이 대두된다.

3.2 후보 메타소자 빔 튜닝 메커니즘

대표적으로 그림. 3-B와 같이 액정(liquid crystal, LC) 기반의 재구성 가능한 메타소자가 존재한다. LC 분자들의 배열은 전기장, 열 전달 등 외부 조건의 변화에 따라 다른 위상을 가지며, 이를 통해 메타표면의 튜닝 가능한 유전물질이 될 수 있다. 즉 전위차를 걸어 전기장에 변화를 주면 LC의 위상이 동적으로 변하고, 유전 상수와 굴절률이 변해 전파를 제어할 수 있다¹¹⁾. LC 메타소자의 경우 구현과 조작성이 간단하지만 위상 변화의 속도와 범위에 한계가 상대적으로 큰 편이다.

그래핀과 같은 2D 물질은 높은 캐리어 모빌리티와 튜닝 가능한 Fermi level 덕에 전파와의 상호작용을 조절할 수 있으며, 이를 통해 그림. 3-C와 같이 RIS 소자로서 적용될 수 있다. 대표적인 디자인은 그래핀 단일 레이어 위에 상호 접촉된 메타구조 안테나로 구성되며, 인가 전압에 따른 coupling condition의 변화를 통해 반사계수를 변화시킨다¹⁶⁾. 이 메타소자의 경우 빔 변조 속도 (modulation speed)가 매우 빠르고 위상 제어 범위가 높지만, 제작 난이도와 비용이 높다는 한계가 있다.

그림 3-D와 같이 Active THz 재료를 이용한 메타소자 역시 가능하며, 캐리어 전하 밀도를 조절할 수 있는 반도체 물질을 기반으로 한다. 대표적인 디자인은 n-type GaAs 레이어 위에 금 resonator를 위치시켜 구성되며, 작동 원리는 갭 영역 안의 캐리어 공핍층을 제어하는 것이다¹¹⁾. 이로써 트랜지스터 없이 인가 전압을 통해 전도율과 유전율을 변화시켜 빔을 튜닝하며, 상대적으로 높은 전압이 필요하지만 높은 튜닝 범위를 얻을 수 있다. 해당하는 메타소자들의 파라미터 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1. 후보 메타소자 물질 비교
Table 1. Candidate meta-devices comparison

RIS Design	Operation freq	Modulation speed	Tuning range
IC chip	GHz to sub -THz	Up to GHz	70 %
Liquid crystal	GHz to THz	20 Hz	15 %
2D material	GHz	20 GHz	95 %
Active metamaterial	THz	30 kHz	79 %

IV. 시스템-레벨 시뮬레이션 및 성능 분석

지금까지 RIS 기반 프로그래밍 가능한 무선 환경에 대한 성능 평가는 주로 빔포밍 최적화 관점에서 이론적으로 이루어졌다. 하지만 기존 무선 시스템의 효율성과 성능을 향상시키기 위한 RIS의 본질을 생각할 때 결국 전반적인 통신 시스템 성능 관점에서 제안한 시스템이 미치는 영향을 분석하는 것이 필요하다. 즉 실내외 지형을 담은 3D map, 건물과 벽 등 구조물의 성분까지 디지털 환경에서 공간적이고 실제적인 토폴로지를 반영하는 방법론이 중요한 역할을 한다. 이에 본 논문에서 우리는 3D 레이 트레이싱을 사용한 시스템-레벨 환경에서 RIS 디자인에 따른 성능을 평가한다.

4.1 RIS 기반 지능형 네트워크와 레이 트레이싱

현재 사용되는 레이 트레이싱 소프트웨어는 입사 전파에 대한 RIS 어레이의 추가적인 작용으로 이루어지는 일반화된 반사 법칙을 적용할 수 없어 입사각과 반사각이 다른 특이 반사가 실행될 수 없다¹²⁾. 따라서 본 논문에서는 첫 번째 시뮬레이션을 통해 송신기에서 RIS로 전파되는 신호를 구성하고 두 번째 시뮬레이션에서 RIS에서 수신기로 반사되는 신호를 분석한다. 이때 각 광선별로 무선 파라미터를 추출할 수 있는 레이 트레이싱의 특징을 이용하여 첫 시뮬레이션의 아웃풋이 이후 시뮬레이션의 인풋으로 적용된다. 이를 통해 RIS-반사 경로를 포함한 시스템 레벨 성능을 비교/분석할 수 있다.

첫 번째 시뮬레이션에서 기지국은 point 형태의 송신기로 설정되고 RIS는 배치된 위치에 있는 point 형태의 수신기가 된다. 그리고 송신기의 빔 조향 방향은 정확히 RIS를 향한다. 이후 설계된 지형에서 레이 트레이싱을 수행하고 여러 개의 경로들 중 line of sight (LoS)와 1차 반사 경로만 추출하고 나머지 반사되는 광선들은 모두 지운다. 이는 신호 감쇠가 심한 타겟 주파수 대역의 특성을 반영하여 RIS에 입사하는 전파를 LoS에 가까운 경로로 한정하는 것이다. 이후 출력 데이터로부터 지연 확산, 경로 손실, 수신 전력, angle-of-departure (AoD), angle-of-arrival (AoA) 과

라미터를 가져오고, 이어지는 시뮬레이션 및 스루풋 계산에 사용한다.

다음으로 두 번째 시뮬레이션에서는 실제 성능 평가를 위한 본 시뮬레이션을 진행한다. 먼저 RIS가 반사 광선을 보내는 두 번째 송신기이므로 이전 단계에서 수신기의 위치에 송신기 point를 배치한다. 그리고 large-scale 시스템 커버리지와 전반적 스루풋을 보기 위해 수신기는 디지털 맵 전반에 그리드 형태로 배치된다. 이때 RIS는 일반화된 반사 법칙이 가능한 특이 반사체로 구성되어 지향하는 반사각으로 전파를 보낼 수 있다. (3)에 의해 RIS 소자의 위상 튜닝 범위와 AoA에 의해 최대 추가적으로 더해줄 수 있는 각도 변화가 계산되기 때문에 인풋으로 주어진 해당 파라미터에 따라 송신기의 각도를 결정한다. 또한 이전 단계에서 가져온 경로 손실과 수신 전력은 전체 경로 손실과 송신 전력에 영향을 주게 된다. 여기에 지향하는 방향에서 RIS의 요소 개수에 따른 벡터의 합을 통한 어레이 이득을 반영하여 후처리로 추가해준다^[13]. 그리고 RIS가 없을 때의 경로와 중첩하여 최종적으로 성능을 비교하고 분석한다.

4.2 RIS 빔 선택 시뮬레이션 및 3D 성능 평가

RIS 디자인과 앞에서 언급한 소자 물성에 기반하여, 우리는 실제적인 3D 환경에서 레이 트레이싱을 사용해 시스템-레벨 성능 평가를 수행한다. 본 시뮬레이션에서 우리는 Remcom 사의 Wireless Insite 소프트웨어를 사용하며, wall geometry와 material을 고려한 실내 통신 환경을 도입한다^[14]. 그림. 4와 같이 통신 환경은 9.5 m × 27 m × 3.3 m 스케일 안에 실내 구조를 반영하여 모델링하였다. 구조물들은 목

재, 철근 벽, 벽돌 벽, 금속 구조, 천장 및 바닥으로 분류되며 각각 주파수 선택적 성질을 가져 밀리미터파와 sub-THz 채널을 반영하기 위해 업데이트된다. 우리는 28GHz의 밀리미터파와 120GHz의 sub-THz 중심 주파수에서 레이 트레이싱을 수행하였다. 본 레이 트레이싱 시뮬레이션에서 적용된 무선 파라미터들은 표. 2에 나타내었다.

첫 번째 시나리오에서 우리는 각 시뮬레이션에서 같은 빔 개수를 적용하여 RIS를 통한 빔 스위핑을 진행하고 빔 선택 프로세스에 따른 시스템 성능을 분석한다. 송신기에서 RIS 전파된 신호가 반사되며 총 8개의 빔이 형성되며, RIS가 없을 때 송신기에서 바로 같은 개수의 빔 스위핑을 진행한다. 본 시나리오에서 분석하고자 하는 것은 RIS의 추가적인 각도 제어 범위에 따른 통신 성능에의 영향이다. 따라서 다양한 메타소자들이 가질 수 있는 위상 튜닝 범위를 고려하여 고르게 분포시켰고, 이에 따른 각도 튜닝 범위를 (3)에 의해 계산하여 레이 트레이싱에 반영했다. 이때 입사각은 45°를 기준으로 하였다. 다시 말해 다른 각도 튜닝 범위를 가지는 소자의 경우 메인 빔 방향이 가리키는 각도 범위가 달라지며, 이에 따라 고르게 분포하는 수신기가 받는 신호 성능이 달라지게 된다.

두 번째 시나리오에서는 빔간 간격을 동일하고 이에 따른 빔 개수를 변화시켜 시뮬레이션을 수행한다. 이전 시나리오에서는 빔폭을 고려하지 않고 개수를 동일해 빔간 간섭을 공평하게 고려하지 않았다. 따라서 시나리오 2에서는 사용하는 빔 패턴의 half power beamwidth (HPBW)를 반영하여 같은 빔간 간격으로 빔포밍을 진행한다. 본 시뮬레이션에서 사용하는 빔 간격과 HPBW는 3GPP 문서^[16]를 참고한다. 이때 RIS의 각도 스케닝 범위가 좁으면 이에 따라 적용되는 빔의 개수가 줄어들게 된다. 즉 소자의 각도 튜닝 한계에 따른 스루풋 성능 차이가 더 커지게 된다.

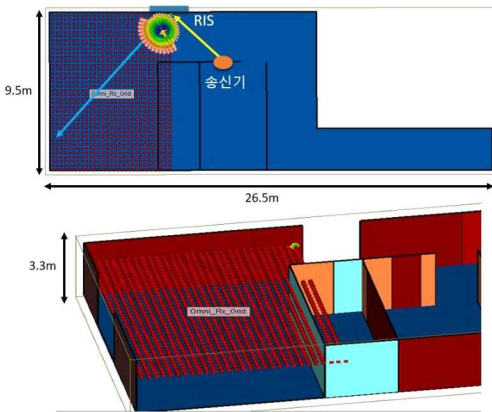


그림 4. 3D map 기반 레이 트레이싱 통신 환경
Fig. 4. 3D map based ray tracing surroundings

표 2. 레이 트레이싱 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Ray tracing simulation parameters

	밀리미터파	Sub-THz
중심 주파수	28 GHz	120 GHz
대역폭	2 GHz	10 GHz
송신 전력	23 dBm	43 dBm
송신 안테나 타입	RF 렌즈안테나[15]	지향성 안테나
수신 안테나 타입	등방성 안테나	등방성 안테나
RIS elements 수	200	1,000
RIS 어레이 이득	15 dB	25 dB
Noise Floor	-102 dBm/Hz	-102 dBm/Hz

4.3 결과 분석 및 RIS 설계 제언

제안한 알고리즘과 시나리오 모델링을 적용한 3D 레이 트레이싱에 따른 SLS 결과가 그림 5, 6에 디스플레이되었다. 먼저 시나리오 1, 2를 통해 RIS unit cell을 구성하는 메타소자의 위상 튜닝 범위 (각도 튜닝 범위)가 통신 성능에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 전반적으로 모든 시물레이션에서 RIS에 의한 각도 스캐닝 범위가 넓을수록 더 높은 스루풋 성능을 보였으며, 빔 튜닝 차이가 클수록 결과는 더 두드러졌다. 밀리미터파에서 $\pm 53^\circ$ 은 $\pm 12^\circ$ 에 비해 50% 이상의 영역에서 약 5Gbps의 성능 이득을 얻었다. 또한 RIS 없이 송신기에서 바로 빔포밍이 진행되었을 때, 높은 캐리어 주파수와 장애물이 많은 실내 환경의 특성상 RIS 접목 시스템에 비해 성능이 열화되었다. 그리고 sub-THz에서는 더욱 현저한 성능 변화가 관측되었으며, RIS가 없을 때에 비해 최대 20Gbps의 성능 이득을 확인할 수 있었다. 또한, 시나리오 2에서는 각 시물레이션별로 사용된 빔 개수가 다르기 때문에 전체적인 시스템 스루풋 경향이 차이를 보였다. 위에서 언급한 것처럼 소자 물성에 따른 성능 차이는 더욱 커졌으며 CDF의 50% 이하 영역에서도 시스템 이득이 확실함을 알 수 있었다. 이는 몇 가지 인사이트를 시사한다. 먼저 환경에 따라서 RIS가 배치된 시스템이

기존 시스템보다 확연히 성능 이득을 얻을 수 있음을 시스템-레벨에서 보일 수 있었다. 더불어 RIS device의 물리적인 위상 튜닝 최대 범위가 전체 통신 성능에 어떤 영향을 주는지 확인하였고, 비례 관계와 스루풋 이득을 정량적으로 분석하였다. 그리고 이는 캐리어 주파수로 sub-THz를 사용하면 더 지배적이었으며, HPBW를 고려하여 빔 간격을 통일하였을 때 모든 수신기 영역에서 성능 이득이 있었다.

나아가 이는 원하는 통신 성능과 환경에 따라 어떤 RIS 메타소자를 선택하는 것이 나은지를 판단하는 기준이 될 수 있다. 본 성능 평가 결과와 더불어 물리적 관점에서의 분석, 그리고 3장에서 이야기한 각 소자의 전력, 제작, 비용 이슈를 고려하였을 때, 본 논문은 RIS의 소자 레벨 디자인에 대한 가이드라인으로 사용될 수 있다. 이는 실제 상용화의 관점에서 성능 조건을 만족하면서 효율성과 양산 품질을 확보하기 위한 기여를 만들어낼 것이다.

V. 결론

본 논문에서 고려된 RIS 설계가 통신 성능에 미치는 영향은 시물레이션 결과를 분석함으로써 확인할 수 있다. 무엇보다, 각 디자인이 주로 적용되는 주파수와 채널 환경이 다르기에, 이에 따른 trade-off 관계를 시스템 레벨에서 분석하였으며, 이를 통해 RIS 디자인의 물리적 특성과 스펙트럼 효율 등 성능에 대한 직관을 얻을 수 있었다. 또한, 시물레이션 관점에서의 디자인 파라미터와 더불어 실제 RIS 구현에 있어 하드웨어 비용, 에너지 효율, 소자 구성과 제작 이슈를 분석하고 실현가능성에 대한 오버뷰를 서술하였다.

References

- [1] S. Alfattani, et al., "Aerial platforms with reconfigurable smart surfaces for 5G and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 96-102, 2021.
- [2] W. Tang, et al., "Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 180-187, 2020.
- [3] B. Ning, et al., "Terahertz multi-user massive MIMO with intelligent reflecting surface: Beam training and hybrid beamforming,"

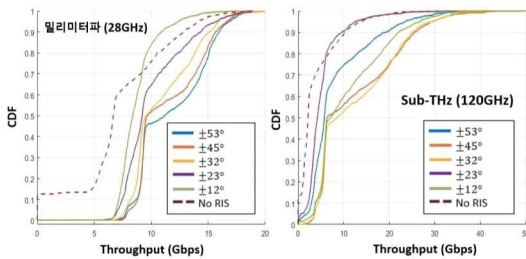


그림 5. 시스템-레벨 스루풋 성능 (동일 빔 개수)
Fig. 5. System-level throughput performance (equal beam number)

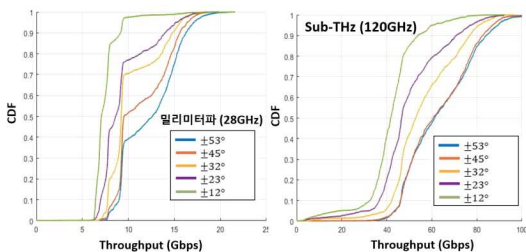


그림 6. 시스템-레벨 스루풋 성능 (동일 빔 간격)
Fig. 6. System-level throughput performance (equal beam interval)

IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 70, no. 2, pp. 1376-1393, 2021.

[4] Y. Changsheng, et al., "Fast beam training for IRS-assisted multiuser communications," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 1845-1849, 2020.

[5] A. R. Ndjiongue, et al., "Toward the use of re-configurable intelligent surfaces in VLC Systems: Beam steering," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 3, pp. 156-162, 2021.

[6] C. Molero, et al., "Metamaterial-based reconfigurable intelligent surface: 3D meta-atoms controlled by graphene structures," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, pp. 42-48, 2021.

[7] M. Lee, *Optics for Materials Scientists*, CRC Press, 2019.

[8] N. Yu, et al., "Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction," *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333-337, 2011.

[9] F. Liu, et al., "Intelligent metasurfaces with continuously tunable local surface impedance for multiple reconfigurable functions," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 11, no. 4, Apr. 2019.

[10] L. Dai, et al., "Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45913-45923, 2020.

[11] H. T. Chen, et al., "Active terahertz metamaterial devices," *Nature*, vol. 444, no. 7119, pp. 597-600, 2006.

[12] D. M. Renzo, et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, 2020.

[13] E. Basar, et al., "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019.

[14] D. Jun and C.-B. Chae, "A study on reconfigurable intelligent surface based beam

tracking performance considering 3D mobility-aware environments," in *Proc. KICS Winter Conf.*, p. 558, Feb. 2022.

[15] S.-H. Park, et al., "MmWave Lens MIMO," *IEEE WCNCW*, pp. 1-2, 2020.

[16] M. Giordani, et al., "A tutorial on beam management for 3GPP NR at mmWave frequencies," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 173-196, 2018.

전 동 수 (Dongsoo Jun)



2018년 2월: 연세대학교 글로벌융합공학부 졸업
 2018년 3월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학부 석박통합과정
 <관심분야> 무선통신, 지능형통신, 밀리미터파

[ORCID:0000-0003-1326-6978]

채 찬 병 (Chan-Byoung Chae)



2008년: 미국 텍사스오스틴 전 기컴퓨터공학과 박사
 2008년~2009년: 하버드 대학 박사 후 연구원
 2009년~2011년: 미국 벨 연구소 책임연구원
 2011년~현재: 연세대학교 언더우드 특훈교수

<관심분야> 무선 네트워크

[ORCID:0000-0001-9561-3341]