

메타표면 SWC 채널에서 지연 기반 OFDM GI 최적 설계 및 Surrogate 모델 적용 방안

이승현, 오성현, 김정곤*

한국공학대학교 전자공학부

seng0424@tukorea.ac.kr, osh119@tukorea.ac.kr, jgkim@tukorea.ac.kr*

Delay-based OFDM GI Optimization and Surrogate Model Application in SWC Channel with Metasurfaces

Seung Hyun Lee, Sung Hyun Oh, Jeong Gon Kim*

Dept. of Electronic Engineering, Tech University of Korea

요약

SWC(Surface Wave Communication)는 도체 표면을 전송 매질로 활용하여 전자기파를 표면에 구속시켜 전달하는 방식으로 유전체 코팅과 메타표면 구조를 통해 표면 임피던스 및 분산 특성을 설계함으로써 채널을 구조적으로 제어할 수 있다. 본 논문은 유전체로 코팅된 도체 평판 위에 주기 패치 배열 메타표면을 형성한 초단거리 SWC 2-port 채널 모델을 CST Studio Suite 기반 전자기 시뮬레이션으로 구축하고 구조 변수 변화에 따른 채널 전달계수 $S_{21}(f)$ 를 추출하여 시간영역 지연 통계량을 산출한 뒤 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) GI (Guard Interval) 길이를 전송효율-BER(Bit Error Rate) 간 trade-off 관점에서 최적화하는 절차를 제안한다. 각 케이스별 $S_{21}(f)$ 를 저장한 후 대역 제한 및 기저대역 등가화, Windowing 및 Zero Padding 등의 전처리를 거쳐 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)로 CIR(Channel Impulse Response)를 복원하고 PDP(Power Delay Profile)를 계산한다. PDP의 모멘트 기반 통계량으로 RMS(Root Mean Square) Delay Spread 및 유효 지연 구간을 정의하고 GI 후보군에 대해 링크 레벨에서 BER과 유효 전송효율을 동시 평가하여 최적화된 GI를 선택한다. 시뮬레이션 통해 목표 BER을 만족하는 범위에서 GI 오버헤드를 줄여 전송효율을 향상시킴을 확인하였다. 또한 구조 변수와 지연 통계량으로부터 최적 GI로의 매핑을 회귀 기반 Surrogate 모델로 학습함으로써, 자율주행 차량의 V2X(Vehicle-to-Everything) 안전 서비스와 지연 및 신뢰도 제약이 엄격한 응용을 고려하더라도 새로운 구조 조건에서 반복적인 링크 탐색 없이 최적 GI를 신속히 예측하는 설계 프레임워크를 제시한다.

I. 서론

초기 SWC(Surface Wave Communication)는 도전성 표면을 따라 유도되는 표면파 또는 표면 유도 모드를 이용하여 신호 에너지를 표면 인근에 집중시키는 전송 방식으로 정리되어 왔으며, 단일 도체 기반 표면파 전송 선의 성립 조건과 전파 특성도 체계적으로 논의되어 왔다[1]. 최근에는 메타표면과 결합된 SWC가 스마트 무선 환경 구현 관점의 새로운 전송 경로로 제안되었고, 전송 경로를 구조적으로 형성하고 조절하려는 접근이 부각되었다[2]. 이러한 구조 설계형 채널은 패치 배열 간격, 코팅 두께, 손실 특성과 같은 설계 변수는 정합, 전달, 분산 특성을 동시에 변화시키므로 경험적 파라미터 선택만으로는 안정적인 링크 설계를 보장하기 어려워졌다. 또한 자율주행 차량의 V2X 안전 서비스는 자율주행 및 군집주행과 같은 안전 관련 시나리오를 포함하며, 저지연 및 고신뢰 전송을 요구하므로, 채널 지연 특성에 기반한 물리 계층 파라미터를 정량적 설정과 최적화 중요성이 커지고 있다[3].

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 GI(Guard Interval)는 다중경로 지연 확산에 따른 ISI(Inter Symbol Interference)를 완화하기 위한 핵심 파라미터이다. 그러나 기존 무선 통신 표준의 GI는 상대적으로 긴 전송 환경을 가정하는 경우가 많아, Chip-to-Chip 통신과 같은 초단거리 SWC 환경에서는 채널 지연 대비 과도한 오버헤드로 유효 전송효율을 크게 저하시킬 수 있다[4].

따라서 채널의 물리적 지연 특성에 기반한 GI 정량화와 BER(Bit Error Rate)과 전송효율 사이의 trade-off 평가가 필요하며, 설계 공간 확장에

* : 고신저자

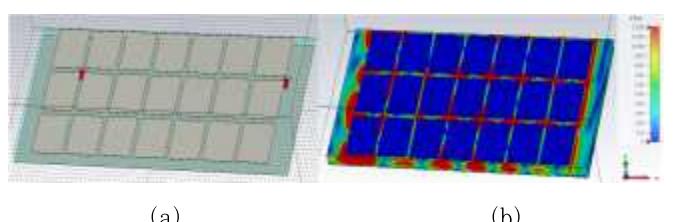
따른 반복 비용을 줄이기 위해 최적 GI를 직접 추정하는 Surrogate 회귀 모델 결합은 설계 자동화 및 비용 절감에 유리하다.

본 논문은 CST 기반 2-port 메타표면 SWC 환경에서 $S_{21}(f)$ 를 추출하고 IFFT 기반 CIR 및 PDP 복원과 지연 통계량 산출을 수행한 뒤 OFDM 링크 레벨 GI 스윕을 통해 강건 기준을 포함한 최적 GI 라벨을 생성하는 workflow를 제안한다. 나아가 구조 변수, 지연 통계 특징량, 최적 GI 매핑을 Surrogate 회귀 모델로 학습하여 새로운 구조 조건에서 GI를 신속히 추정하는 설계 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 설계된 SWC 구조 및 GI 예측 방안을 설명한다. 이후 3절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 본론

본 연구에서는 [그림 1]과 같이 80mm x 30mm 크기를 갖는 유전체 기판($\epsilon_r = 2.2$) 위에 주기적인 구리 패치 배열을 형성하여 메타표면 기반



[그림 1] 시스템 모델 (a)메타표면 SWC 채널 구조, (b)표면파 구속 전계 분포

SWC 전송 선로를 설계하였다. 표면 임피던스 특성을 결정짓는 주요 변수인 패치 간격(g)은 0.2~1.0 mm, 기판 두께(h)는 1.0~2.0 mm 범위에서 가변하여 총 30개의 SWC 채널 구조를 설정하였다. CST 시뮬레이터의 주파수 영역 해석기를 이용하여 10~12GHz 대역에서의 $S_{21}(f)$ 를 출력하였다. [그림 1]의 우측 그림에서 확인할 수 있듯이 전계가 유전체 - 도체 계면 근방에 집중되고 Tx에서 Rx 방향으로 표면을 따라 에너지가 전송되는 표면 유도 특성을 확인하였다. 주파수 응답 $S_{21}(f)$ 데이터는 IFFT를 통해 시간 영역의 CIR($h(\tau)$)로 변환되었다. 이때 유한한 대역폭으로 인한 Ringing 현상을 완화하기 위해 Hann Window를 적용하였으며 시간 해상도 향상을 위해 Zero Padding을 수행하였다. 복원된 $h(\tau)$ 로부터 PDP를 $P(\tau) = |h(\tau)|^2$ 로 정의하고 채널의 시간 분산을 정량화하기 위해 RMS Delay Spread τ_{rms} 과 유효 지연 시간 τ_{99} 을 식 (1),(2)와 같이 정의하였다.

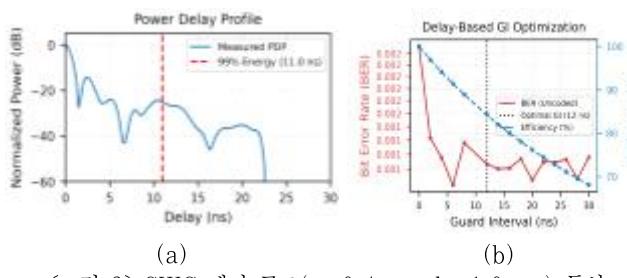
$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int (\tau - \bar{\tau})^2 P(\tau) d\tau}{\int P(\tau) d\tau}} \quad (1)$$

$$\tau_{99} = \arg \min_t \left\{ \int_0^t P(\tau) d\tau \geq 0.99 E_{\text{total}} \right\} \quad (2)$$

이후 링크 레벨 시뮬레이션에서는 GI 후보군에 대해 식 (3)의 유효 전송 효율 η 와 BER을 평가하고 안전 마진 조건인 $GI \geq \tau_{99}$ 및 BER 제한을 만족하는 범위에서 η 가 최대가 되는 GI를 최적 GI로 정의한다.

$$\eta = \frac{T_{sym}}{T_{sym} + T_{GI}} \quad (3)$$

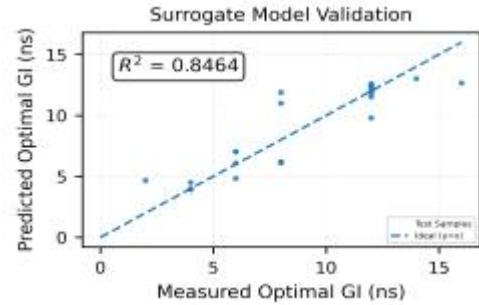
본 연구에서는 $g = 0.4$ mm, $h = 1.0$ mm을 대표적인 SWC 채널 구조로 지정하였고 해당 구조에서 채널 특성 분석 및 최적화를 수행한 결과는 [그림 2]와 같다. [그림 2]의 좌측 그림의 PDP 분석 결과를 살펴보면 신호 에너지가 약 0~20 ns 이내에 집중되며 누적 에너지 기준 $\tau_{99} = 11.0$ ns 임을 확인하였으며, τ_{99} 이상을 안전 마진으로 확보하는 지연 기반 최적화를 수행하였다.



[그림 2] SWC 채널 구조($g=0.4$ mm, $h=1.0$ mm) 특성
(a) PDP, (b) 지연 기반 최적화 trade-off

[그림 2]의 우측 그림은 GI 증가에 따른 BER-전송효율 간 trade-off를 나타낸다. GI가 짧을수록 오버헤드가 작아 효율은 높지만, 지연 확산을 충분히 보호하지 못해 BER이 약화될 수 있다. 반대로 GI가 길어질수록 ISI 억제로 BER은 안정화되지만 오버헤드의 증가로 전송효율은 감소한다. 검은색 점선으로 표시된 최적 GI는 안전 마진 조건을 만족하면서도, 추가 GI 증가에 따른 BER 개선 대비 효율 손실이 커지는 구간을 고려해 결정된 값이다.

이후 구현된 모든 SWC 채널 구조의 전자기 해석 및 링크 레벨 시뮬레이션 데이터를 데이터셋으로 활용하여 새로운 메타표면 설계 시 복잡한 계산 과정을 거치지 않고도 최적의 통신 파라미터를 즉시 예측할 수 있는 머신러닝 기반 Surrogate 모델을 구축하였다. 모델의 입력 변수로는 메타



[그림 3] Surrogate 모델의 최적 GI 예측 성능 검증

표면의 기하학적 형상을 결정하는 구조 파라미터 g , h 와 채널의 물리적 특성을 대변하는 τ_{rms} 을 선정하였고, label은 앞서 도출한 최적 GI 값을 설정하였다. 회귀 알고리즘은 비선형 데이터 관계 학습에 적합하고 과적합에 강인한 Random Forest를 선택하였다. 모델의 일반화 성능은 전체 데이터셋을 5개의 fold로 분할한 K-Fold Cross Validation으로 검증하였으며, 결과는 [그림 3]에 제시하였다. 예측된 최적 GI와 시뮬레이션 기반 최적 GI의 결정계수는 약 0.84의 값으로 나타나 반복적인 전자기 해석 및 링크 시뮬레이션 없이도 최적 물리 계층 GI를 신속히 추정할 수 있음을 보였다.

III. 결론

본 논문에서는 메타표면 SWC 채널의 구조적 지연 특성을 분석하고 이에 기반한 적응형 OFDM GI 최적화 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 통해 물리적 지연 통계량을 활용한 가변 GI 설계가 고정 GI 방식 대비 통신 신뢰성과 전송효율 간의 최적 trade-off 달성을 확인하였다. 또한 구축된 Random Forest 기반 Surrogate 모델은 높은 정확도로 최적 GI를 즉시 예측하며 복잡한 해석 과정을 대체할 수 있음을 입증하였다. 본 연구는 향후 자율주행 차량의 V2X 링크를 포함한 스마트 무선 환경에서 물리 계층 파라미터 최적화 및 설계 자동화에 활용될 것으로 시사된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00415938, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참 고 문 헌

- [1] G. Goubau, "Single-Conductor Surface-Wave Transmission Lines," Proceedings of the IRE, vol. 39, no. 6, pp. 619-624, Jun. 1951.
- [2] K.-K. Wong, K.-F. Tong, Z. Chu, and Y. Zhang, "A Vision to Smart Radio Environment: Surface Wave Communication Superhighways," IEEE Wireless Communications, vol. 28, no. 1, pp. 112 - 119, Feb. 2021.
- [3] ETSI, "5G; Service requirements for enhanced V2X scenarios (3GPP TS 22.186 version 18.0.1 Release 18)," ETSI TS 122 186 V18.0.1, May 2024.
- [4] IEEE, "IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Std 802.11-2020, Dec. 2020.