

테라헤르츠 통신에서 빔 편이 현상 완화를 위한 2-Layer 시간 지연 네트워크 기반 저복잡도 스위칭 네트워크 설정 기법

권정현, 이정훈*, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소, *한국외국어대학교 전자공학과

junghyeon@snu.ac.kr, tantheta@hufs.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

Low-Complexity Switching Network Configuration Based on 2-Layer Time Delay Network for Mitigating Beam Squint Effect in Terahertz Communication

Junghyeon Kwon, Jung Hoon Lee*, Wan Choi

Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media Communications, Seoul National University

*Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies

요 약

본 논문에서는 테라헤르츠 채널 환경에서 통신을 수행할 때 초고주파 초광대역에서 발생하는 빔 편이 현상(beam squint effect)을 보상하기 위해 시간 지연 네트워크(time delay network, TDN)를 활용한 빔포밍 구조를 제안한다. 본 논문에서는 기존의 TDN 구조에서 활용되었던 시간 지연 소자(true-time-delayer, TTD)가 갖는 높은 전력 소모량 문제를 해결하고자 TTD 대신 고정된 시간 지연 값을 갖는 고정 시간 지연 소자(fixed true-time-delayer, FTTD)를 2-layer로 배치한 2-layer TDN을 제안한다. 또한, 제안된 구조에서 스펙트럼 효율(spectral efficiency)을 최대화하기 위한 switching network 설정 최적화 문제를 수립한다. 해당 문제는 mixed integer 문제로 최적의 switching network를 찾는 과정이 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 보다 낮은 계산 복잡도(computational complexity)를 갖는 순차적 switching network 설정 기법을 제안하고, 제안하는 기법이 random switching network 설정 기법과 conventional hybrid beamforming 기법보다 높은 스펙트럼 효율을 달성함을 보인다.

I. 서론

6G 통신 시스템은 초고용량/초광대역/저전력 통신 서비스를 제공하고 초실감 확장 현실, 고정밀 모바일 홀로그램을 비롯한 다양한 미래 기술을 구현하기 위해 기존보다 높은 정보 전송률 달성을 목표로 한다. 테라헤르츠 대역은 풍부한 주파수 자원을 바탕으로 현재 5G 통신 시스템에서 활용 중인 밀리미터파 대역에 비해 초광대역 확보가 용이하고 이를 기반으로 높은 정보 전송률 달성이 가능하다.

하지만 테라헤르츠 대역은 높은 주파수 선택적 채널 특성이 존재하며, 이러한 채널 특성으로 인해 동일한 대역폭 내 다른 주파수 성분 신호들이 서로 다른 채널을 겪으며, 송신단 혹은 수신단에서 관찰되는 각도가 달라지는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 빔 편이 현상(beam squint effect)이라고 하는데, 신호의 주파수가 중심 주파수로부터 더 멀어질수록 빔의 각도가 아날로그 위상 변이기(analog phase shifter)가 의도한 방향으로부터 더 멀어지게 된다 [1-2]. 빔 편이 현상으로 인해 광대역을 통해 전송된 신호는 한 방향으로 전송되지 않고 퍼진 형태로 전송되기 때문에 빔 편이 현상을 보상하지 않으면 목표한 수신 신호 세기를 달성하기 어렵다. 따라서 초광대역 통신 환경에서는 빔 편이 현상에 대한 고려가 필수적이다.

본 연구에서는 TTD보다 적은 전력 소모량을 가지며 고정된 시간 지연 값을 갖는 고정 시간 지연 소자(fixed true-time-delayer, FTTD)를 2-layer로 배치한 2-layer TDN을 설계하고 이에 적합한 빔포밍 기법을 제안한다. 또한, 스펙트럼 효율을 최대화하기 위한 switching

network 설정 최적화 문제를 수립한다. 해당 문제는 mixed integer 문제로 높은 복잡도를 가지며, 본 연구에서는 switching network 설정 문제를 보다 낮은 계산 복잡도를 갖는 방식으로 해결하기 위해 순차적 switching network 설정 기법을 제시한다. 결과적으로 제안하는 기법이 random switching network 기법, conventional hybrid beamforming 기법에 비해 높은 스펙트럼 효율을 달성함을 보인다.

II. 본론

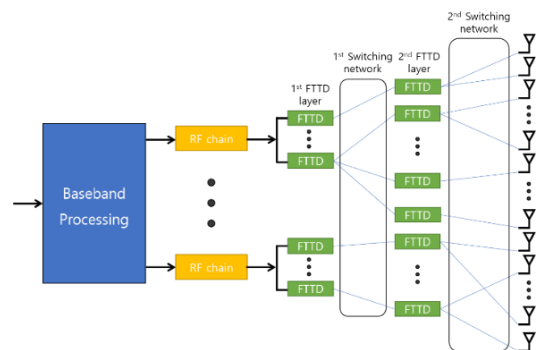


그림 1 2-Layer 시간 지연 네트워크

제안하는 2-Layer TDN을 통해 신호를 전송하고 이를 단일 안테나를 갖는 수신단이 신호를 수신할 때 m 번째 subcarrier에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y[m] = \mathbf{h}^T[m] \mathbf{S}_2 \mathbf{F}_2[m] \mathbf{S}_1 \mathbf{F}_1[m] \mathbf{d}[m] \mathbf{s}[m] + n[m]$$

여기서 $\mathbf{h}[m] \in \mathbb{C}^{N_{TX} \times 1}$ 는 채널, $\mathbf{S}_2 \in \{0,1\}^{N_{TX} \times N_{RF}Q_2}$ 는 2nd switching network, $\mathbf{F}_2[m] \in \mathbb{C}^{N_{RF}Q_2 \times N_{RF}Q_2}$ 는 2nd FTTD layer, $\mathbf{S}_1 \in \{0,1\}^{N_{RF}Q_2 \times N_{RF}Q_1}$ 은 1st switching network, $\mathbf{F}_1[m] \in \mathbb{C}^{N_{RF}Q_1 \times N_{RF}}$ 은 1st FTTD layer, $\mathbf{d}[m] \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times 1}$ 은 baseband processing, $s[m] \in \mathbb{C}$ 은 보내고자 하는 신호, $\mathbf{n}[m] \in \mathbb{C}$ 은 잡음을 의미한다. 각 switching network 및 FTTD layer의 자세한 설정 과정은 생략한다.

이 때 스펙트럼 효율 SE는 다음과 같이 주어진다.

$$SE = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \log_2 \left(1 + \gamma |\mathbf{h}^H[m] \mathbf{S}_2 \mathbf{F}_2[m] \mathbf{S}_1 \mathbf{F}_1[m] \mathbf{d}[m]|^2 \right)$$

위의 수식에서 γ 는 신호 대 잡음 비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 나타낸다. 이를 기반으로 본 논문에서는 다음 문제에서 기술된 바와 같이 스펙트럼 효율을 최대화하는 switching network 설정 기법을 제안한다.

maximize SE
s.t. $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$

$\mathbf{S}_1 \in \{0,1\}^{N_{RF}Q_2 \times N_{RF}Q_1}, \mathbf{S}_2 \in \{0,1\}^{N_{TX} \times N_{RF}Q_2},$

$$\|\mathbf{S}_{1,i}\|_0 = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, N_{RF}Q_2\},$$

$$\|\mathbf{S}_{2,j}\|_0 = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, N_{TX}\}$$

위 문제는 mixed integer 문제로 최적의 \mathbf{S}_1 과 \mathbf{S}_2 를 찾는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 위 문제를 풀기 위해 보다 낮은 계산 복잡도를 갖는 sub-optimal switching network 설정 기법인 순차적 switching network 최적화 알고리즘을 제안한다. 먼저 첫 번째 step에서는 첫 번째 안테나 입장에서 이와 연결될 수 있는 1st FTTD layer의 FTTD 소자 및 2nd FTTD layer의 FTTD 소자가 갖는 $(N_{RF}Q_1)^{N_{RF}Q_2}$ 가지 조합에 대해 최대 안테나 이득을 달성하는 1st FTTD layer의 FTTD 소자와 2nd FTTD layer의 FTTD 소자를 파악하고 이를 바탕으로 switching network를 설정한다. 다음으로 두 번째 step에서는 첫 번째 step에서의 결과를 바탕으로 동일한 방식으로 최대 안테나 이득을 달성하는 각 FTTD 소자를 파악하고 이를 바탕으로 switching network를 설정한다. 동일한 과정을 반복하여 전체 N_{TX} step을 통해 최종적으로 \mathbf{S}_1 과 \mathbf{S}_2 를 결정한다. 본 논문에서 제안하는 순차적 switching network 설정 기법과 random switching network 설정 기법, conventional hybrid beamforming 기법을 스펙트럼 효율 측면에서 비교한 결과는 그림 2에 나타냈다. 그림 2에서 제안한 순차적 switching network 설정 기법은 낮은 복잡도로 기존 기법에 비해 높은 스펙트럼 효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

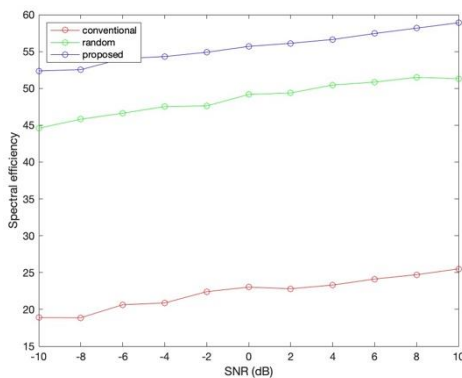


그림 2 스펙트럼 효율 비교 결과

III. 결론

기존 연구에서의 TDN 구조에서 많이 활용되었던 TTD는 전력 소비량이 크기 때문에 에너지 효율을 높이기 위해 최근 FTTD를 활용한 TDN 관련 연구가 주목받고 있다. 본 논문에서는 테라헤르츠 대역에서 발생하는 빔편이 현상을 보상하기 위해 이러한 FTTD를 기반으로 한 2-layer TDN을 제안하였고, 나아가 2-layer TDN을 기반으로 스펙트럼 효율을 최대화하기 위해 저복잡도를 가진 순차적 switching network 설정 기법을 제안하였다. 또한, 제안된 switching network 설정 기법, conventional hybrid beamforming 기법에 비해 높은 스펙트럼 효율을 달성함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018-0-00809, 새로운 자원을 활용한 beyond 5G 이동통신 변혁기술 개발).

참고 문헌

- [1] B. Wang, M. Jian, F. Gao, G. Y. Li and H. Lin, "Beam squint and channel estimation for wideband mmWave massive MIMO-OFDM systems," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 23, pp. 5893-5908, Dec. 2019.
- [2] L. Dai, J. Tan, Z. Chen and H. V. Poor, "Delay-phase precoding for wideband THz massive MIMO," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 9, pp. 7271-7286, Sep. 2022.