

Beamforming Training for Asymmetric Links in IEEE 802.11ay: Implementation and Performance Evaluation

Yena Kim*

*Research Engineer, Institute of Engineering Research, Yonsei University, Seoul, Korea

[Abstract]

In this paper, we present Beamforming (BF) Training (BFT) for asymmetric links in IEEE 802.11ay. IEEE 802.11ay introduced BFT for asymmetric links that aims to increase the BFT success probability for Station (STA) with insufficient link budget to communicate with an Access Point (AP). BFT for asymmetric links utilizes directional BFT allocation to avoid the usage of quasi-omni pattern at the AP side, and thus to increase STA's BFT success rate. However, there are no publicly available simulation tools supporting IEEE 802.11ay. For these reasons, we present in this paper an implementation of BFT for asymmetric links in ns-3 with its novel techniques such as Training RX (TRN-R) subfield and BFT allocation. We then evaluate by simulation the performance of BFT for asymmetric links.

▶ **Key words:** IEEE 802.11ay, Beamforming, Beamforming Training, Asymmetric Links, ns-3, IEEE 802.11ad

[요 약]

본 연구에서는 IEEE 802.11ay의 비대칭 링크를 위한 Beamforming (BF) Training (BFT)을 소개하고 주요 기술을 구현하였다. 비대칭 링크를 위한 BFT는 Access Point (AP)와 통신하기에 불충분한 링크 버짓(link budget)을 가지고 있는 Station (STA)의 BFT 성공 확률 향상을 목표로 한다. 비대칭 링크를 위한 BFT는 AP의 quasi-omni 수신 모드 사용을 막기 위해 directional BFT allocation을 활용하며, 이를 통해 STA의 BFT 성공 확률을 높일 수 있다. 그러나 현재 IEEE 802.11ay를 지원하는 네트워크 시뮬레이터가 없어서 이러한 BFT의 성능 검증이 쉽지 않다. 본 연구는 ns-3에 비대칭 링크를 위한 BFT를 구현하고 Training RX (TRN-R) subfield와 BFT allocation과 같은 주요 기술에 대해서 소개한다. 새로 구현한 BFT의 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

▶ **주제어:** IEEE 802.11ay, 빔포밍, 빔포밍 트레이닝, 비대칭 링크, ns-3, IEEE 802.11ad

• First Author: Yena Kim, Corresponding Author: Yena Kim
*Yena Kim (yena22@gmail.com), Institute of Engineering Research, Yonsei University
• Received: 2020. 10. 20, Revised: 2020. 11. 04, Accepted: 2020. 11. 04.

I. Introduction

초연결(Hyper-connected) 시대에 진입함에 따라 6GHz 이하의 주파수 대역은 포화 상태이며, 데이터 수요는 나날이 기하급수적으로 증가하고 있다. 이에 넓은 대역폭을 활용하여 대량의 데이터 전송이 가능한 Millimeter-wave (mmWave)가 많은 주목을 받고 있다 [1-5]. 2012년 승인된 IEEE 802.11ad는 처음으로 60GHz mmWave를 사용한 Wi-Fi 기술이다 [6]. Augmented Reality (AR)/Virtual Reality (VR), 실시간 multi-view 8K video 등과 같이 새로운 애플리케이션을 위해서 IEEE 802.11ad를 기반으로 100Gbps의 처리량 목표의 IEEE 802.11ay이 표준화 진행 중에 있다 [7-8].

mmWave는 넓은 대역폭을 사용한다는 장점이 있는 반면, 주파수가 높아진 만큼 대기 중이나 전송선로에서 손실이 많이 증가한다는 단점이 있다. 이 같은 문제 해결을 위해 mmWave 통신 시스템에서는 phased-array antenna를 사용해 원하는 방향으로 안테나 beam을 움직여 directional beam을 생성하며, 이 같은 기술을 *Beamforming (BF)*이라고 한다. BF 사용 시 송수신 노드가 통신을 위해 사용할 적합한 directional beam을 찾는 것이 중요하며, 이 같은 과정을 *BF Training (BFT)*이라고 한다. BFT 수행 시, sector 개념을 사용하며 이는 안테나 영역을 방향성 조절을 통해 여러 개로 세분화한 영역을 뜻한다.

IEEE 802.11ad/ay에서 BFT을 하는 두 노드는 *Initiator* 또는 *Responder* 역할을 수행한다. Initiator는 frame을 서로 다른 Transmission (TX) directional sector로 frame을 전송함으로써 BFT를 시작하는 역할이고, Responder는 어느 방향으로 Initiator의 frame이 올지 모르기 때문에 가장 넓은 빔 폭으로 frame들을 수신하는 quasi-omni 모드를 사용한다. Responder는 수신한 frame의 quality를 측정 후, 서로 다른 TX sector를 통해 frame을 전송하고 Initiator는 quasi-omni 모드로 frame을 수신한다.

일반적으로 Station (STA)는 Access Point (AP) 보다 적은 수의 안테나를 가지고 있기 때문에 전송 파워가 AP 보다 약할 수 있다. 따라서 STA이 frame을 전송할 경우, quasi-omni 모드를 사용 중인 AP는 frame을 수신하지 못할 수도 있다. 이 같은 비대칭 링크(*asymmetric link*) 문제를 해결하기 위해, IEEE 802.11ay는 비대칭 링크를 위한 BFT를 제안했다 [7][9-10]. 각 sector 별로 directional BFT allocation을 사용함으로써 STA의 frame 도착 확률을 높여 BFT 시간도 줄일 수 있다. 그러나 현재 IEEE

802.11ay를 지원하는 네트워크 시뮬레이터가 없어서 BFT 성능을 검증하는 게 쉽지 않다. 이에 본 논문에서는 IEEE 802.11ad 기반으로 IEEE 802.11ay의 비대칭 링크를 위한 BFT을 설계 및 구현하고 성능 검증을 수행한다.

II. Preliminaries

2.1. Beamforming Training in IEEE 802.11ad

Fig. 1은 IEEE 802.11ad/ay의 Beacon Interval (BI) 구조를 보여준다. 하나의 BI는 Beacon Header Interval (BHI)와 Data Transmission Interval (DTI)을 포함한다. BHI는 주로 BFT에 사용되며, DTI는 데이터 전송을 위해 주로 사용된다. BHI는 Fig. 1에 나와 있는 것처럼 Beacon Transmission Interval (BTI), Association Beamforming Training (A-BFT) 및 Announcement Transmission Interval (ATI)을 포함한다. BTI와 A-BFT는 beacon frame 전송뿐만 아니라 AP와 STA 간의 BFT을 위해 사용되고, ATI는 AP와 BFT 완료한 STA간의 management frame 전송을 위해 사용된다.



Fig. 1. IEEE 802.11ad/ay Beacon Interval (BI) Structure [7]

Fig. 2는 AP의 sector 수가 8개이고 STA의 sector 수가 4개 일 때, IEEE 802.11ad BFT의 예제를 보여준다. AP는 BTI에서 서로 다른 TX sector로 beacon frame을 전송함으로써 Initiator TX Sector Sweep (I-TXSS)를 수행한다. STA은 quasi-omni 모드로 beacon frame들을 수신하면서 quality를 측정한다. 이는 어떤 AP TX sector가 STA와의 통신을 위해 사용하기 가장 적합한지를 탐색하기 위함이다.

A-BFT에서 STA은 Sector Sweep (SSW) frame들을 서로 다른 TX sector로 전송함으로써 Responder TX Sector Sweep (R-TXSS)를 수행한다. 이때 전송되는 SSW frame들은 BTI의 I-TXSS 단계에서 알아낸 AP의 best TX sector 정보를 담고 있다. AP는 SSW frame들을 quasi-omni 모드로 수신하며, STA의 best TX sector를 알아내기 위해 quality를 측정한다. BFT 과정을 완료하기 위해, AP는 SSW Feedback frame을 STA에게 전송한다. SSW Feedback frame은 R-TXSS 단계에서

얻은 STA의 best TX sector 정보를 포함하고 있다. STA는 SSW Feedback frame을 quasi-omni 모드로 수신한다. 성공적으로 SSW Feedback frame을 수신하면, AP와 STA 간의 beam-trained 통신 링크가 생성된다. Fig. 2의 예제에서 STA는 AP TX sector 2를 best TX sector로 측정하였고, AP는 STA TX sector 3을 best TX sector로 측정하였다.

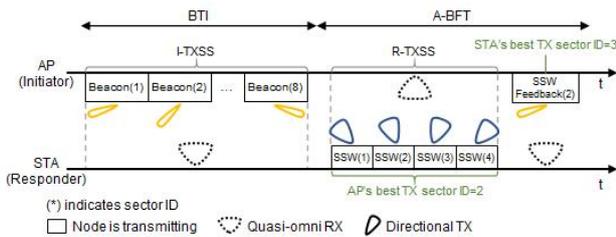


Fig. 2. Example of BFT in IEEE 802.11ad [6]

Fig. 2의 I-TXSS와 R-TXSS 단계에서 STA와 AP는 frame들을 수신하기 위해 quasi-omni 모드를 사용한다. Quasi-omni 모드는 넓은 빔 폭으로 frame들을 수신할 수는 있지만, 그로 인해 수신 강도가 떨어질 수도 있다. 일반적으로 STA는 AP에 비해 적은 수의 안테나를 가지기 때문에 전송 파워가 AP 보다 약할 수도 있다. 따라서 I-TXSS 단계와 같이 AP가 높은 전송 파워로 frame들을 전송하면 STA이 quasi-omni 모드로 frame들을 수신하는데 문제가 없다. 하지만 R-TXSS 단계와 같이 STA이 약한 전송 파워로 frame들을 전송할 경우, AP는 quasi-omni 모드로 frame들을 수신 못할 수도 있다. 이 같은 비대칭 링크 문제를 해결하기 위해, IEEE 802.11ay는 비대칭 링크를 위한 BFT를 제안했다 [7][9-10].

2.2. Beamforming Training for Asymmetric Links in IEEE 802.11ay

IEEE 802.11ay는 비대칭 링크를 위한 BFT를 제안하였고, 이는 AP가 BFT 수행 시 quasi-omni 모드로 frame를 수신하는 것을 막아준다. Fig. 3은 비대칭 링크를 위한 IEEE 802.11ay BFT의 예제를 보여주며, 크게 두 단계로 구성되어 있다. 먼저 BTI에서 AP는 IEEE 802.11ad에서와 같이 I-TXSS를 수행한다. 그러나 IEEE 802.11ad와 달리 IEEE 802.11ay는 STA이 자신의 RX sector를 training할 수 있게 Training (TRN)-Unit들을 beacon frame 뒤에 덧붙인다. 각 TRN-Unit은 10개의 TRN RX (TRN-R) subfield로 구성되어 있다.

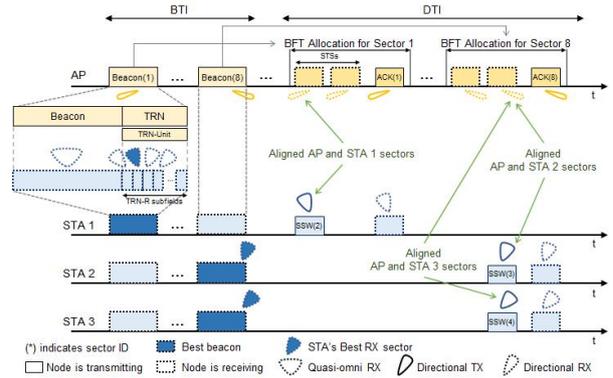


Fig. 3. Example of BFT for asymmetric links in [8]

STA는 quasi-omni 모드로 beacon을 수신한 후, 자신의 RX sector training을 위해 directional 수신 모드로 바꾼다. 즉, STA는 RX sector를 바꾸기면서 TRN-R subfield 수신 및 quality 측정을 수행함으로써 자신의 best RX sector를 찾을 수 있다. 안테나의 쌍대성 (Reciprocal)에 의해, STA는 best RX sector를 자신의 best TX sector로 간주하고 AP와의 통신을 위해 사용할 수 있다. Fig. 3 예제에서 STA 1은 AP가 TX sector 1로 beacon을 보냈을 때 best beacon을 수신하였고, 이때 STA 1의 best RX sector는 2였다. 따라서 STA 1은 자신의 TX sector 2를 AP에게 frame 송신 시 사용해야 할 best TX sector로 간주한다. 이처럼 STA 2와 STA 3은 AP가 TX sector 8을 사용했을 때 best beacon을 수신하였고, 이때 STA 2와 STA 3의 best RX sector는 3과 4였다.

다음 단계를 위해 AP는 BFT allocation을 TX sector 수만큼 DTI에 할당하며 이는 각 beacon을 통해 광고된다. BFT allocation 구간 동안 AP는 RX 추가 이득 (extra-gain)을 위해 RX 안테나 패턴을 directional 모드로 바꾸고 Space-Time Slot (STS) 시간만큼 대기한다. 각 BFT allocation의 STS 수는 각 beacon 전송 시 함께 전달된다. 각 STA는 BTI에서 알아낸 AP의 best TX sector로 AP가 수신 대기 중인 BFT allocation에서 임의의 STS를 선택하여 SSW frame을 전송한다. SSW frame 전송 또한 directional 모드로 수행되며, 이때 STA는 TRN-R subfield training을 통해 알아낸 STA의 best TX sector를 사용한다. Fig. 3 예제에서 STA 1은 AP의 RX sector가 1일 때 첫 번째 STS를 선택해서 SSW frame를 전송했고, STA 2와 STA 3은 AP RX sector가 2일 때 두 번째 STS를 선택해서 SSW frame을 전송했다.

SSW frame을 전송한 STA는 Sector acknowledgment (ACK)를 수신하기 위해 directional

모드로 전환 후, 자신의 best RX sector로 대기한다. 각 BFT allocation에서 AP는 STS 시간만큼 대기 후, directional 모드로 Sector ACK를 전송한다. Sector ACK는 AP에 도착한 SSW frame을 보낸 STA의 정보가 담겨있다. Sector ACK 도착 후, STA이 자신의 정보를 확인할 수 있으면 해당 STA의 BFT은 완료된다.

III. Implementation

3.1. Beacon Transmission Interval (BTI)

mmWave 연구가 많은 주목을 받고 있지만 mmWave에서의 MAC과 PHY 동작 및 기능을 고려한 시뮬레이터 관련 연구는 많지 않다. 최근 ns-3를 기반으로 IEEE 802.11ad 모델 개발이 진행 중에 있으며, 이 모델은 채널 접근 구간 (BTI + A-BFT + ATI + DTI), BHI와 DTI에서의 BFT, 60GHz directional 안테나 모델 등과 같은 기능을 지원한다 [11-12]. 이 모델을 기반으로 IEEE 802.11ay를 ns-3에 구현하고자 하며, 특히 본 논문에서는 비대칭 링크를 위한 BFT 관련 기능을 중점적으로 개발 및 구현하였다.

비대칭 링크를 위한 BFT은 크게 AP의 TX sector, STA의 RX sector를 트레이닝하고 BFT allocation을 스케줄링하는 BTI 구간과 BTI 구간에서 획득한 정보를 주고받음으로써 BFT를 완료하는 DTI 구간으로 나눌 수 있다. Fig. 4는 BTI 구간에서 주로 사용되는 IEEE 802.11ad 기능과 함께 새로 구현한 IEEE 802.11ay의 기능을 보여준다.

상기 서술한 바와 같이 AP는 beacon frame을 전송할 때마다 DTI에서 사용할 BFT allocation을 정보를 함게 실어서 전송한다. 클래스 *DmgApWifiMac*의 함수 *SendOneDMGBeacon*에서는 각 BFT allocation에 할당할 STS 개수를 정한 후, 이 정보를 리스트 변수 *m_totalChannelAllocationList*에 저장하고 DTI 할당위해 함수 *AllocateBeamformingAsymLinksPeriod*를 호출한다. 클래스 *DmgWifiPhy*의 함수 *SendPacket*에서는 TRN-R subfield를 포함한 전송 시간(txDuration) 값과 남은 TRN-Unit의 수(remainingTrnUnits)를 재계산한다. IEEE 802.11ad는 BFT을 위해 Automatic Gain Control (AGC)와 Channel Estimation (CE) field를 사용하는데, 이 두 field는 IEEE 802.11ay에서 사용되지 않는다 [6-7]. 따라서 함수 *SendPacket*와 *StartTrnUnitTx*에서 함수 *StartAgcSubfieldsTx*와 *SendCeSubfield*를 호출하지 않았다. 함수 *StartTrnSubfieldsTx*에서 TRN-Unit에 들어가는 TRN-R subfield의 총 수를 10으로 정의해주고, 클

래스 *DmgWifiChannel*을 통해 TRN-Unit과 함께 beacon frame을 전송한다.

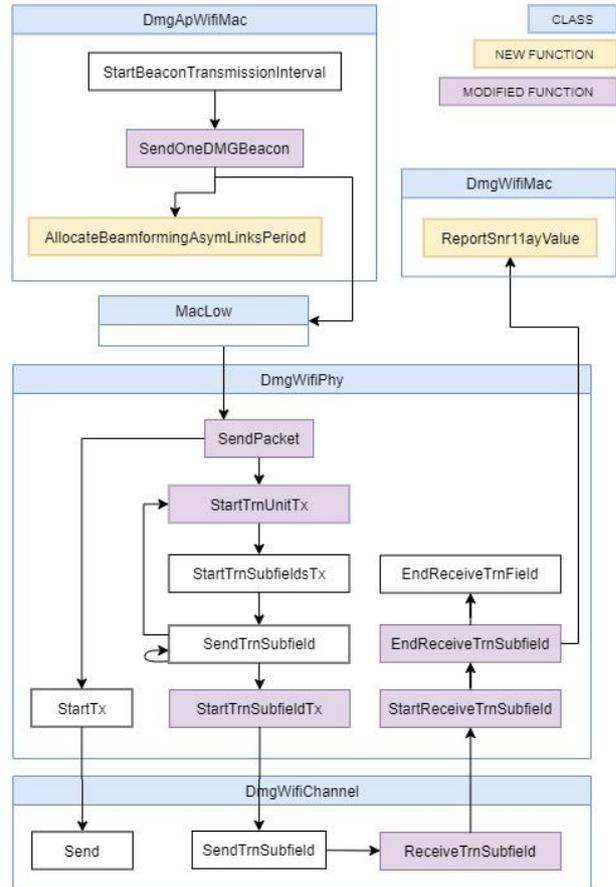


Fig. 4. Our implemented IEEE 802.11ay BTI architecture

TRN-R subfield가 도착할 때마다 STA는 클래스 *DmgWifiMac*의 함수 *ReportSnr11ayValue*를 통해 Signal-to-Noise Ratio (SNR) value를 측정하고 자신의 best RX sector를 찾는다. 또한 각 beacon frame의 마지막 TRN-R subfield가 도착할 때마다 STA 자신의 best RX sector를 업데이트하고 그 sector를 자신의 best TX sector로 설정한다. 함수 *EndReceiveTrmSubfield*에서는 다음 beacon frame을 quasi-omni 모드로 받기 위해 함수 *SetReceivingInquasiOmniMode*를 호출한다.

3.2. Data Transmission Interval (DTI)

Fig. 5는 DTI 구간에서 주로 사용되는 IEEE 802.11ad 기능과 함께 새로 구현한 IEEE 802.11ay의 기능을 보여준다. AP는 DTI에 BFT allocation을 스케줄링하기 위해, 클래스 *DmgApWifiMac*의 *StartDataTransmissionInterval*에서 리스트 변수 *m_totalChannelAllocationList*을 사용한다. 리스트 원소 수만큼 클래스 *DmgWifiMac*의 함수

$StartBeamformingAsymLinksServicePeriod$ 를 호출한다. 각 BFT allocation이 끝날 때마다 RX sector를 바꿔주기 위해, 함수 $ChangeRxSectorId$ 도 호출한다. 함수 $StartBeamformingAsymLinksServicePeriod$ 는 각 BFT allocation의 파라미터 값 설정 후, 함수 $StartBeamformingAsymLinksInitiatorPhase$ 를 호출한다.

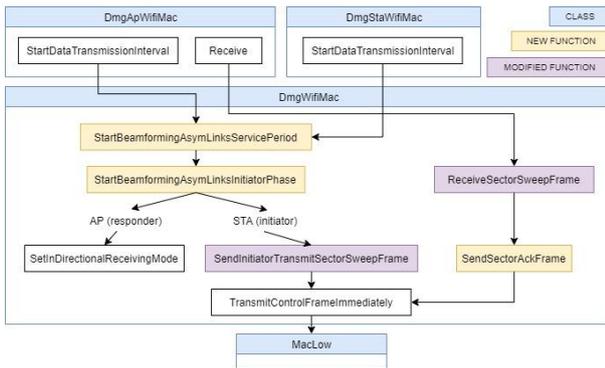


Fig. 5. Our implemented IEEE 802.11ay DTI architecture

STA는 리스트 변수 $m_totalChannelAllocationList$ 에 AP의 best TX sector를 사용하는 BFT allocation이 있으면, $StartBeamformingAsymLinksServicePeriod$ 를 호출하고 임의의 STS를 함수 $StartBeamformingAsymLinksInitiatorPhase$ 에서 선택한다. 선택한 STS에서 SSW frame을 전송하기 위해 함수 $SendInitiatorTransmitSectorSweepFrame$ 을 호출한다. SSW frame 전송 후, STA는 Sector ACK를 수신하기 위해 함수 $SetReceivingInDirectionalMode$ 를 호출함으로써 directional 수신 모드로 전환한다. AP는 SSW frame을 수신할 때마다 전송한 STA 정보를 저장한다. 각 BFT allocation에서 모든 STS 수신 대기가 끝나면 상기 정보를 Sector ACK에 담아서 전송하기 위해 함수 $SendSectorAckFrame$ 을 호출한다.

IV. Performance Evaluation

4.1. Simulation Environment

본 논문에서 개발 및 구현한 모델의 성능 검증을 위해 ns-3를 통해 시뮬레이션을 수행한다 [13]. BFT allocation에서 사용되는 STS의 개수 설정 및 조절 방법과 관련해서는 아직 정의된 바가 없다 [8]. 이에 본 논문에서는 모든 BFT allocation에 대해 같은 수의 STS를 사용하는 방법을

F -STS라 정의한다. 개발한 모델의 정확한 성능 검증을 위해 STS 수를 환경에 맞게 자동 조절해주는 기존 연구 [14]와의 비교실험도 수행하며, 이는 A -STS라 정의한다.

다양한 환경에서의 검증을 위해 BFT에 참여하는 STA 수도 50, 100, 150, 200으로 설정하였다. F -STS와 A -STS를 위해 첫 번째 BI에서 사용할 STS 초기값 (STS_i)을 8과 32로 설정하였다. 즉 F -STS는 모든 STA의 BFT이 끝날 때까지 모든 BFT allocation의 STS 값을 STS_i 로 사용하는 반면, A -STS는 두 번째 BI부터 환경에 맞게 조절된 STS 값을 사용하게 된다 [14]. Fig. 6은 본 논문에서 사용한 두 개의 서로 다른 시뮬레이션 시나리오를 보여준다. 시나리오 A에서 STA는 AP의 반경 10m 이내 골고루 분포되어있고, 시나리오 B에서 STA는 AP의 1사분면에만 분포되어 있다. AP는 16개의 sector을 가지고 있고 STA는 4개의 sector를 가지고 있다. 시뮬레이션 결과는 200번 수행한 결과의 평균값을 보여준다.

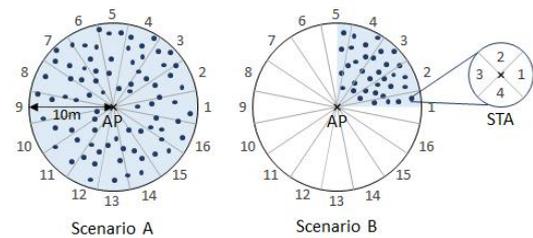


Fig. 6. Simulation scenarios

4.2. Simulation Results

앞서 서술한 바와 같이 AP는 각 BFT allocation마다 서로 다른 RX sector를 사용해 STS 시간만큼 STA로부터의 SSW frame을 기다린다. AP가 BTI에서 설정한 STS 정보가 beacon frame과 함께 잘 전달이 되었고 DTI에서 BFT allocation별로 STS 수가 올바르게 할당이 되는지 관찰하기 위해 Fig. 7과 같이 BI마다 BFT allocation별 STS를 관찰해보았다. Fig. 7은 STA 수가 200일 때의 결과를 보여준다. 먼저 F -STS의 경우 처음 정한 STS 값 (STS_i) = 8 또는 32가 시나리오 관계없이 모든 BFT allocation에 똑같이 할당된 것을 볼 수 있다. 반면 A -STS의 경우 처음에는 F -STS와 같이 8 또는 32개의 STS로 시작하지만 점차 BFT 완료한 STA이 많아지고 남은 STA만을 위한 STS 할당을 하다 보니 점차 STS 값이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 시나리오 A의 두 번째 BI에서 $STS_i = 32$ 일 때의 STS 값이 $STS_i = 8$ 일 때의 STS 값보다 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 $STS_i = 32$ 로 시작하면 $STS_i = 8$ 로 시작할 때 보다 STA 간의 충돌이 적어지고

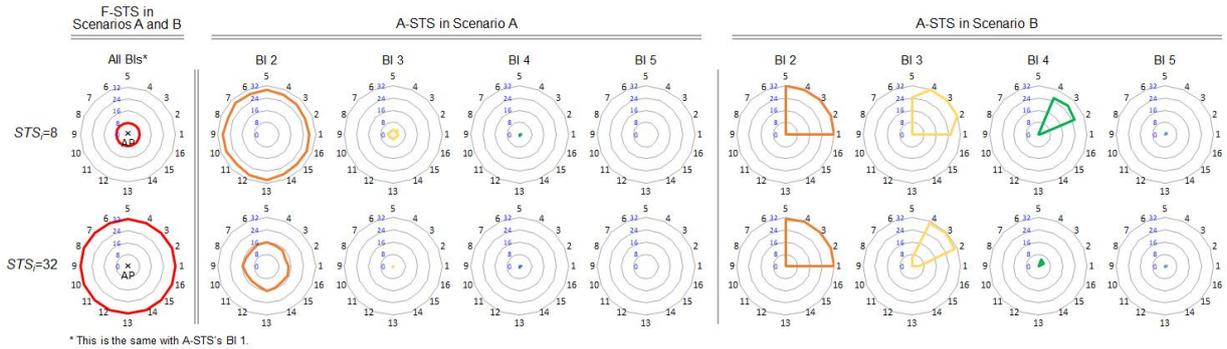


Fig. 7. STS per BI in F-STs and A-STs

BFT를 실패한 STA 수도 적어지기 때문에, 그에 맞게 A-STs가 STS를 낮게 조절했기 때문이다. 시나리오 B에서는 F-STs와 달리 A-STs가 STA가 있는 sector에만 STS를 할당한 것을 볼 수 있다.

리오 B에서의 높은 STA 밀집도로 인해 보다 많은 STA이 같은 BFT allocation에서 경쟁했기 때문이다. 그러나 이러한 상황에 맞게 STS를 조절한 A-STs가 모든 상황에서 F-STs 보다 BFT 시간이 짧은 것을 알 수 있다.

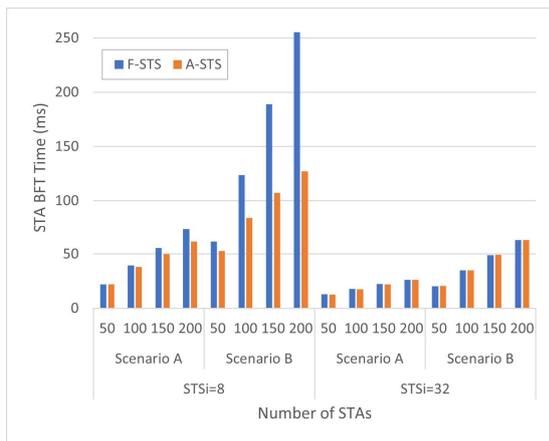


Fig. 8. STA BFT time

다음으로 비대칭 링크를 위한 BFT이 올바르게 작동하고 DTI에서 정상적으로 완료하는지 확인하기 위해 STA의 BFT 시간을 측정해보았다. BFT 시간은 시뮬레이션 시작 시점부터 Sector ACK를 받기까지의 시간을 측정하였으며 결과는 Fig. 8과 같다. 먼저 F-STs와 A-STs 모두 STA 수가 많아질수록 BFT 시간이 늘어난 것을 볼 수 있다. 이는 STA 수가 많아질수록 BFT allocation 내에서의 충돌 확률이 커지고 이로 인해 BFT를 실패한 STA 수가 늘어났기 때문이다. 실패한 STA는 다음 BI에서 BFT를 재시작하기 때문에 결과적으로 BFT 시간이 늘어난 것이다. STS 값이 커질수록 BFT 시간이 줄어드는 것도 확인할 수 있다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 더 많은 수의 STA이 첫 번째 BI에서 BFT를 완료할 수 있었기 때문이다. 마지막으로 F-STs와 A-STs 모두 시나리오 B에서의 BFT 시간이 시나리오 A의 BFT 시간보다 긴 것을 볼 수 있다. 이는 시나

V. Conclusion

IEEE 802.11ay는 IEEE 802.11ad에서 발생할 수 있는 비대칭 링크 문제를 해결하기 위한 BFT을 제안하였다. 비대칭 링크를 위한 BFT는 AP의 quasi-omni 모드 사용을 막기 위해 TRN-R subfield와 BFT allocation를 활용한다. 본 논문에서는 기존 mmWave 기반의 IEEE 802.11ad 모델을 기반으로 비대칭 링크를 위한 BFT의 핵심적인 기능을 ns-3에 구현하였다. 구현한 모델의 성능 검증을 위해 기존 연구를 추가적으로 구현하였으며 다양한 환경에서의 실험을 통해 성능을 검증하였다. 이러한 연구 내용은 IEEE 802.11ay 기반으로 무선 네트워크를 연구하는 많은 연구원들에게 도움을 줄 수 있을 것이라 기대하고 있다. 향후 연구 계획으로는 이번에 구현한 비대칭 링크를 위한 BFT에 기계 학습을 추가로 구현하여 보다 정확하게 무선 네트워크 환경을 파악하고 STS 수를 조절해줄 수 있는 알고리즘에 대해 연구하고자 한다.

REFERENCES

[1] A.N. Uwaechia and N.M. Mahyuddin, "A Comprehensive Survey on Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation Wireless Networks: Feasibility and Challenges," IEEE Access, vol. 8, pp. 62367-62414, March 2020. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2984204

[2] K. Hassan, M. Masarra, M. Zwingelstein, and I. Dayoub, "Channel

- Estimation Techniques for Millimeter-Wave Communication Systems: Achievements and Challenges," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 1336-1363, Aug. 2020. DOI:10.1109/OJCOMS.2020.3015394
- [3] S. Payami et al., "Developing the First mmWave Fully-Connected Hybrid Beamformer With a Large Antenna Array," IEEE Access, vol. 8, pp. 141282-141291, July 2020. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3013539
- [4] S. Tomasin, C. Mazzucco, D. De Donno, and F. Cappellaro, "Beam-Sweeping Design Based on Nearest Users Position and Beam in 5G mmWave Networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 124402-124413, June 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006015
- [5] N. González-Prelcic, H. Xie, J. Palacios, and T. Shimizu, "Wideband Channel Tracking and Hybrid Precoding for mmWave MIMO Systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, Oct. 2020. DOI: 10.1109/TWC.2020.3033514
- [6] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band," IEEE Standard 802.11ad, 2012.
- [7] "IEEE Draft 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 - Amendment 2: Enhanced throughput for operation in license-exempt bands above 45 GHz," IEEE Standard 802.11ay/D4.0, pp. 1-791, June 2019.
- [8] C. Chen, O. Kedem, C.R.C.M. d. Silva, and C. Cordeiro, "Millimeter-Wave Fixed Wireless Access Using IEEE 802.11ay," IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 12, pp. 98-104, Dec. 2019. DOI:10.1109/MCOM.001.1900076
- [9] A. Maltsev, A. Puduev, I. Bolotin, and O. Bolkhovskaya, "Asymmetric Links Beamforming for mmWave Overlay in LTE-Based Heterogeneous Network," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017.
- [10] A. Maltsev, I. Bolotin, A. Puduev, A. Lomayev, C. Cordeiro, S. Training, and C. Chen, "Enhanced SLS BF Flow for Efficient AP-STA Access in Dense Environment," IEEE doc. 802.11-17/0067r1, Jan. 2017.
- [11] H. Assasa, J. Widmer, T. Ropitault, and N. Golmie, "Enhancing the ns-3 IEEE 802.11ad Model Fidelity: Beam Codebooks, Multi-Antenna Beamforming Training, and Quasi-Deterministic mmWave Channel," in Proc. WNS3, June 2019.
- [12] IMDEA Networks Institute, "WLAN IEEE 802.11ad model for ns-3," <http://wireless.networks.imdea.org/wlan-ieee-80211ad-model-ns-3>.
- [13] Ns-3 Network Simulator, "The Network Simulator, NS-3," Available: <http://www.nsnam.org/>.
- [14] Y. Kim, S. Lee, and T. Ropitault, "STS Adaptation for Beamforming Training of Asymmetric Links in IEEE 802.11ay-based Dense Networks," in Proc. Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), 2020.

Authors



Yena Kim received the B.S. degree in multimedia engineering and computer science from Dankook University, Korea, in 2008, the M.S. degree in computer science from Dankook University, Korea, in 2010, and

Ph.D. degree in computer science from Yonsei University, Korea, in 2016. From 2015 to 2020, she worked with the Wireless Networks Division at the National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg, MD, USA. Her current research interests include 5G/6G wireless communications and networking.