



METODY SYMULACYJNE

---

## **Analiza agregacji ramek IEEE 802.11**

---

Jan Ściga, Hubert Majdański, Hubert Talar

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Konfiguracja symulacji</b>	<b>3</b>
2.1	Topologia badanych sieci . . . . .	3
2.2	Implementacja . . . . .	3
2.3	Parametry wejściowe zmienne . . . . .	4
2.4	Parametry wejściowe stałe . . . . .	5
2.5	Parametry wyjściowe . . . . .	5
2.6	Proces symulacyjny . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Wyniki Symulacji</b>	<b>7</b>
3.1	A-MSDU . . . . .	7
3.2	Brak agregacji . . . . .	8
3.3	Badanie wydajności agregacji A-MSDU . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>10</b>

---

## 1 Wstęp

Specyfikacje standardów 802.11ac (2014) oraz 802.11ax (2019) wprowadziły wiele nowych rozszerzeń względem wcześniejszego standardu 802.11n (2009), mających na celu zapewnienie wsparcia dla rosnącej liczby stacji przy jednoczesnym wzroście jakości transmisji oferowanej użytkownikowi sieci Wi-Fi. Zwiększoną przepływność transmisji uzyskano między innymi poprzez agregację ramek, a także szereg udoskonaleń warstwy MAC takich jak zastosowanie zwielokrotnienia antenowego MIMO, rozszerzenie szerokości kanału transmisyjnego czy wprowadzenie nowych schematów modulacyjno-kodowych MCS.

Celem pracy jest porównanie dostępnych w standardach 802.11n/ac/ax następujących rodzajów agregacji ramek:

- Agregacja A-MSDU
- Brak agregacji

Porównanie będzie polegało na wykonaniu symulacji, która dla identycznych parametrów wejściowych będzie zakładała konfigurację każdego z powyższych rodzajów agregacji przy zmienności wymienionych poniżej parametrów:

- Wielkość pakietu
- Odległość od AP
- MCS
- MIMO/Spatial streams

Dodatkowo, zostanie przeprowadzona symulacja pozwalająca stwierdzić wydajność agregacji A-MSDU przy zmienności maksymalnej wielkości agregowanej ramki. Wspomniane badania pozwalają ocenić wpływ danej zmiany na metrykę symulacji czyli znormalizowaną przepływność. Na bazie uzyskanych wyników zostaną sporządzone wykresy i wyciągnięte wnioski dotyczące wydajności poszczególnych rozwiązań.

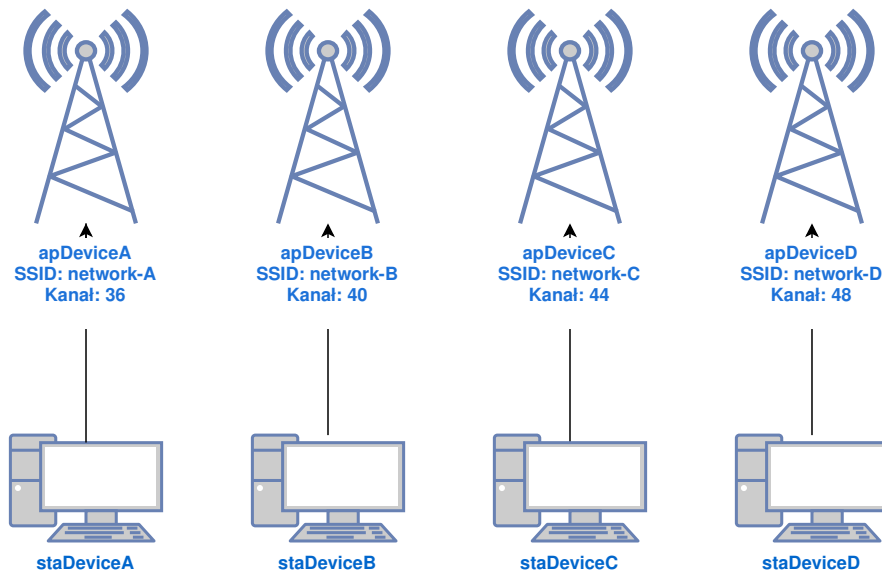
Praca składa się z następujących części. W rozdziale drugim przedstawiono wysokopoziomowy opis zbudowanego frameworka, pozwalającego w sposób zautomatyzowany korzystać z symulacji agregacji ramek, a także analizować i wizualizować jej wyniki. Następnie szczegółowo opisano zaimplementowane skrypty ns-3 odpowiedzialne za konfigurację topologii sieciowej i przeprowadzenie eksperymentu, przedstawiono topologię sieciową oraz zaprezentowano stałe i zmienne parametry symulacji. W rozdziale trzecim omawiamy konfigurację scenariuszy testowych, przedstawiamy uzyskane wyniki oraz wyciągamy wnioski płynące z doświadczeń. W ostatnim punkcie sformułowano ogólne konkluzje płynące z całości testów oraz przedstawiono przyszłe prace, mogące stanowić uzupełnienie wykonanych badań.

## 2 Konfiguracja symulacji

### 2.1 Topologia badanych sieci

Symulowana architektura posiada cztery działające niezależnie sieci, z których każda realizuje jeden ze rodzajów agregacji ramek. Połączenia są zestawiane pomiędzy jednym punktem dostępowym i jedną stacją bazową. Cała architektura wraz z adresacją jest widoczna na Rysunku 1

- **Network-A** - agregacja A-MPDU
- **Network-B** - brak agregacji
- **Network-C** - agregacja A-MSDU (7938 bajtów)
- **Network-D** - agregacja dwupoziomowa(A-MPDU 32768 bajtów, A-MSDU 3839 bajtów)



Rysunek 1: Topologia sieci

### 2.2 Implementacja

Skrypt zaimplementowany został korzystając z wersji ns-3.37. Jest on oparty na znajdującym się w katalogu examples/wireless skrypcie wifi-aggregation.cc. Agregacja odbywa się w nim za pomocą instrukcji przedstawionej na listingu 1

```
1 wifi_dev->GetMac()->SetAttribute("BE_MaxAmpduSize", UIntegerValue(32768));  
2 wifi_dev->GetMac()->SetAttribute("BE_MaxAmsduSize", UIntegerValue(7935));
```

Listing 1: Uruchomienie agregacji ramek w wykorzystywanym skrypcie

Gdzie atrybut *BE-MaxAmpduSize* jest atrybutem odpowiedzialnym za agregację *A-MPDU* natomiast atrybut *BE-MaxAmsduSize* jest atrybutem odpowiedzialnym za agregację *A-MSDU*. W wersji niezmodyfikowanego skryptu możliwymi do zmiany parametrami były: Wielkość pakietu, mechanizm RTS/CTS, Odległość pomiędzy stacją a punktem dostępowym. W celu porównania zachowania agregacji ramek w różnych standardach sieci Wi-Fi dodano kod pozwalający na wybór standardu sieci. Został on przedstawiony na Listingu 3

```
1 if (standard == "ax"){  
2     wifi.SetStandard(WIFI_STANDARD_80211ax);  
3     wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager",  
4                                   "DataMode",  
5                                   StringValue(DataPlane),  
6                                   "ControlMode",  
7                                   StringValue(ControlPlane));}  
8 else if (standard == "ac"){  
9     wifi.SetStandard(WIFI_STANDARD_80211ac);  
10    wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager",  
11                                  "DataMode",  
12                                  StringValue(DataPlane),  
13                                  "ControlMode",  
14                                  StringValue(ControlPlane));}
```

```

15 else if (standard == "n"){
16     wifi.SetStandard(WIFI_STANDARD_80211n);
17     wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager",
18                                 "DataMode",
19                                 StringValue(DataPlane),
20                                 "ControlMode",
21                                 StringValue(ControlPlane));}

```

Listing 2: Wybór standardu symulowanej sieci Wi-Fi

W celu dokładniejszego zbadania zachowania w sieci została również dodana możliwość wyboru *MCS* zarówno Data Plane'u jak i Control Plane'u mającego wpływ na osiąganą przez sieć przepływność. W celu zbadania większej ilości możliwych konfiguracji dodany został również parametr pozwalający na zmianę liczby anten w sieci.

```

1 phy.Set ("Antennas", UIntegerValue (antennas));
2 phy.Set ("MaxSupportedTxSpatialStreams", UIntegerValue (antennas));
3 phy.Set ("MaxSupportedRxSpatialStreams", UIntegerValue (antennas));

```

Listing 3: Kod pozwalający na ustawienie odpowiedniej ilości anten punktu dostępowego

Dodatkowo aby przyspieszyć działanie skryptu uruchamiany jest tylko jeden scenariusz z wybraną agregacją ramek. Pozwoliło to na znaczące zmniejszenie czasu symulacji który przy czasie symulowanym = 100 s wynosił więcej niż 20 minut. W tak przygotowanej sieci z ustalonymi parametrami rozpoczyna się komunikacja między punktem dostępowym a stacjami poprzez protokół UDP korzystając z parametrów przedstawionych na Listingu 4

```

1 clientA.SetAttribute("MaxPackets", UIntegerValue(4294967295U));
2 clientA.SetAttribute("Interval", TimeValue(Time("0.0002"))); // packets/s
3 clientA.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(payloadSize));
4 ApplicationContainer clientAppA = clientA.Install(wifiApNodes.Get(0));
5 clientAppA.Start(Seconds(1.0));
6 clientAppA.Stop(Seconds(simulationTime + 1));

```

Listing 4: Kod odpowiadający za ruch w sieci

Po tak wykonanej symulacji następuje zmierzenie ilości pakietów otrzymanych przez stacje a następnie przeliczenie jej na *Mb/s*. Proces ten przedstawiono na Listingu 5

```

1 totalPacketsThroughA = DynamicCast<UdpServer>(serverAppA.Get(0))->GetReceived();
2 throughput = totalPacketsThroughA * payloadSize * 8 / (simulationTime * 1000000.0);

```

Listing 5: Pomiar otrzymanej w symulacji przepływności

## 2.3 Parametry wejściowe zmienne

Tabela 2: Wejściowe parametry zmienne symulacji

ID	Scenariusz	Min	Max	Krok
1	Wielkość pakietu	200 B	4200 B	400 B
2	Odległość od AP	20 m	80 m	5 m
3	MCS	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7 - 802.11n</li> <li>• 8 - 802.11ac</li> <li>• 10 - 802.11ax</li> </ul>	1
4	MIMO/Spatial streams	1	4	1
5	Wydażność agregacji	935 B	7935 B	1000 B

## 2.4 Parametry wejściowe stałe

Tabela 3: Wejściowe parametry stałe symulacji

Parametr	Wartość	Opis
<i>simulationTime</i>	60 s	Czas symulacji rozumiany jako czas rzeczywistej symulacji działania sieci Wi-Fi (z pominięciem czasu konfiguracji sieci, zestawienia topologii czy zapisu wyników)
<i>staNum</i>	4	Liczba stacji Wi-Fi działających w środowisku symulacyjnym
<i>payloadSize</i>	1500 B	Wielkość pakietu
<i>distance</i>	1 m	Dystans transmitującej stacji od AP
<i>aggreg</i>	C	Rodzaj symulowanej agregacji. Dostępne wartości to A, B, C oraz D, których znaczenie wyjaśniono na Rysunku 1
<i>antennas</i>	1	Liczba anten MIMO oraz liczba strumieni przestrzennych ( <i>Spatial streams</i> ) w łączu w górę <i>uplink</i> oraz w dół <i>downlink</i>
<i>enableRts</i>	0	Wykorzystanie ramek RTS/CTS
<i>enablePcap</i>	0	Ustawienie pozwalające wygenerować plik pcap z przebiegu symulacji
<i>verifyResults</i>	0	Parametr używany w pierwotnej wersji skryptu do oceny poprawności otrzymanych wyników.
<i>DataPlane</i> <i>ControlPlane</i>	HtMcs7	Rodzaj wykorzystywanego schematu modulacyjno kodowego w notacji ns-3
<i>standard</i>	ac	Standard symulowanej sieci WiFi. Dostępne wartości to ac, ax oraz n

## 2.5 Parametry wyjściowe

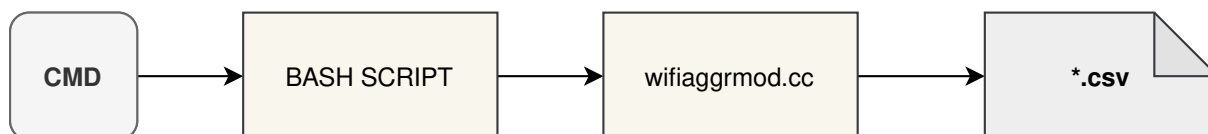
Parametrem wyjściowym wszystkich przeprowadzonych symulacji jest przepływność znormalizowana względem szybkości przesyłanych danych na warstwie fizycznej.

## 2.6 Proces symulacyjny

Proces symulacyjny w naszej pracy składa się z wywołań trzech skryptów odpowiedzialnych za różne etapy symulacji. Poniżej przedstawiono najważniejsze elementy rozpatrywanej symulacji:

- **Trzykrotne** wywołanie skryptu symulacyjnego
- Wykonanie skryptu symulacyjnego ns-3
- Wywołanie skryptu do analizy i wizualizacji danych

Pierwszym etapem symulacji agregacji ramek jest uruchomienie skryptu **bash**, który został zaimplementowany w taki sposób aby na podstawie wprowadzonych danych automatycznie dokonywał serii wywołań właściwego skryptu **ns-3**. Skrypt bash przekazuje do kodu ns-3 parametry przekazane mu wcześniej przez użytkownika, zmieniając *RngRun* oraz wybrany zmienny parametr aby uzyskać niezależne wyniki symulacyjne. Skrypt ns-3 zbudowany na bazie skryptu *wifi-aggregation.cc* dostępnego w repozytorium przykładowych skryptów ns-3, oprócz tego, że wyświetla w konsoli wyniki swojego działania, zapisuje również wyniki do pliku csv, tak aby rezultaty symulacji mogły być następnie pobrane i przeanalizowane przez następny etap symulacji. Ten etap symulacji przedstawiono na Rysunku 4.

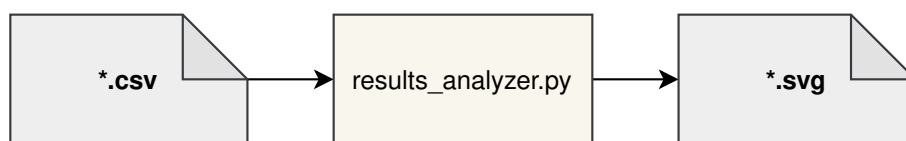


Rysunek 4: Automatyzacja wywołań skryptu symulacyjnego

Po zakończeniu działania pliku automatyzującego wywołanie skryptu symulacyjnego uzyskujemy plik csv z zapisanymi wynikami symulacji. Plik zawiera zapisane parametry wejściowe symulacji oraz uzyskaną metrykę czyli przepływność dla wybranego wcześniej standardu 802.11. Na tym etapie procesu symulacyjnego może być uruchomiony skrypt **python** do analizy i wizualizacji danych. Jest on odpowiedzialny za następujące czynności:

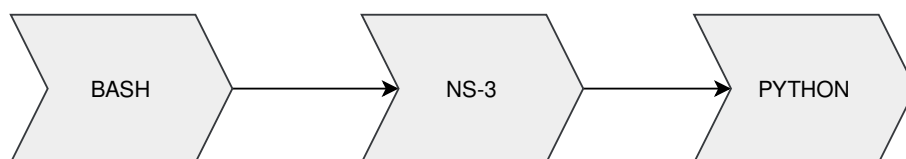
- Pobiera on wskazany przez użytkownika plik csv
- Wylicza niepewność przepływności zgodnie z rozkładem t-Studenta z ufnością na poziomie 95 procent
- Obliczoną niepewność wraz z wynikami zapisuje w postaci wykresu w pliku svg

Do tego celu wykorzystuje dostępne biblioteki pandas, matplotlib, pyplot oraz numpy. Działanie drugiej części procesu symulacyjnego przedstawiono na Rysunku 5.



Rysunek 5: Analiza i wizualizacja wyników symulacji

Podsumowując, zbudowany i przedstawiony powyżej sposób przeprowadzania symulacji (*framework*) pozwala w sposób automatyczny przeprowadzać i analizować rezultaty symulacji agregacji różnych rodzajów ramek przy zmienności szeregu różnych parametrów. Do tego celu wykorzystaliśmy różne języki programowania, których kod jest wykonywany na różnych etapach symulacji co widoczne jest na Rysunku 6.



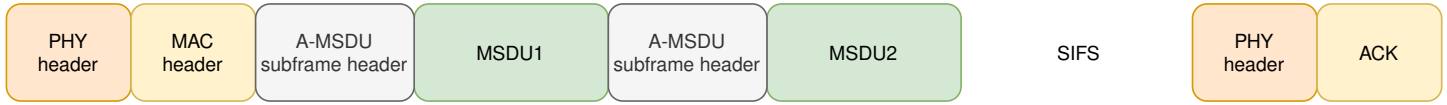
Rysunek 6: Języki programowania wykorzystywane w procesie symulacyjnym

W sposób szczegółowy konfigurację właściwej części symulacji sieciowej, czyli skryptu ns-3 przedstawiono w podrozdziale 2.2.

### 3 Wyniki Symulacji

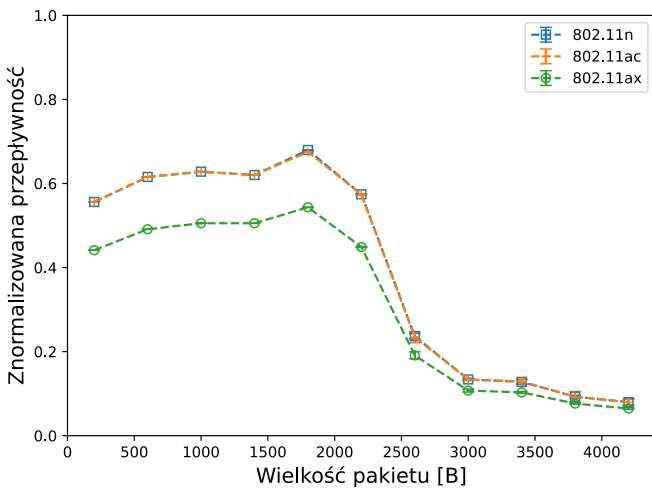
#### 3.1 A-MSDU

Agregacja A-MSDU została przedstawiona na Rysunku 11. Polega ona na łączeniu kilku MSDU (*MAC Service Data Unit*) oddzielonych nagłówkiem A-MSDU w większą jednostkę danych w celu zwiększenia wydajności transmisji bezprzewodowej.

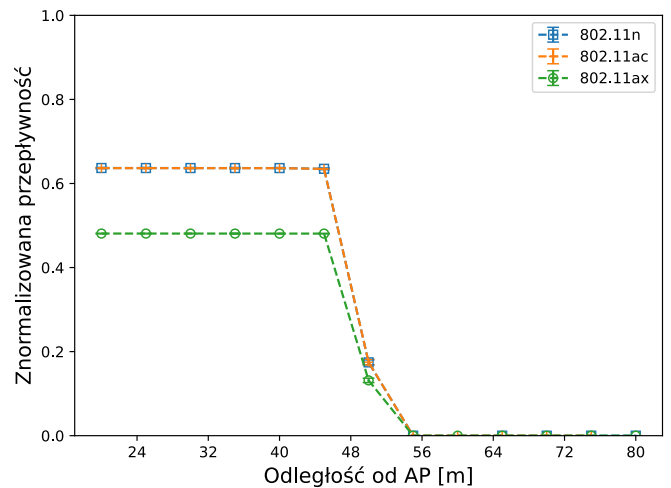


Rysunek 7: Agregacja A-MSDU

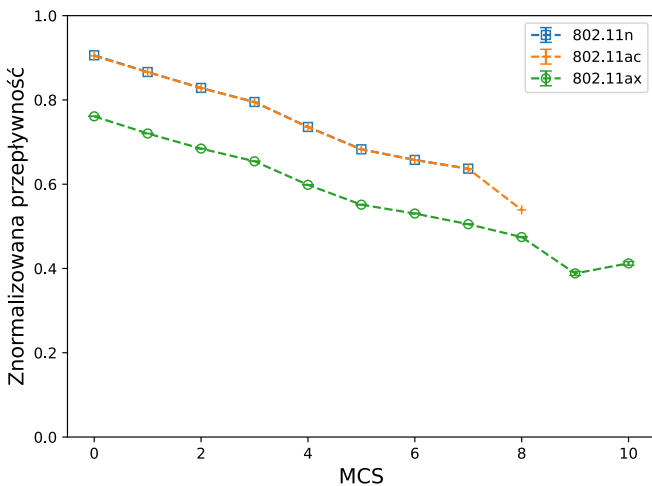
1. **Wielkość pakietu (8a)** - Obserwujemy wzrost przepływności w dziedzinie wielkości pakietu z uwagi na coraz efektywniejsze wykorzystanie kanału, aż do pewnej granicy, która powoduje jej spadek z uwagi na coraz dłuższy czas trwania transmisji, która może kończyć się kolizją.
2. **Odległość od AP (8b)** - Zaobserwowano stały poziom znormalizowanej przepływności w dziedzinie odległości od Access Pointa, aż do granicy 50 m gdzie obserwujemy spadek poziomu metryki z uwagi na utratę zasięgu transmisji.
3. **MCS (8c)** - Wzrost wartości MCS przekłada się na spadek znormalizowanej przepływności co spowodowane jest spadkiem efektywności transmisji dla dużych wartości schematów modulacyjno kodowych w warunkach kolizji pakietów.
4. **Liczba anten (8d)** - Wzrost liczby anten dostępnych dla transmisji powoduje spadek poziomu badanej metryki z uwagi na zmniejszenie efektywności transmisji spowodowanej zwiększonym prawdopodobieństwem kolizji.



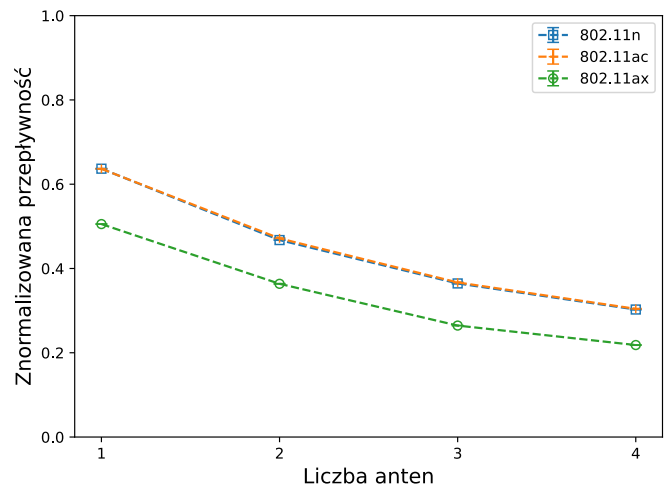
(a) Wielkość pakietu



(b) Odległość od AP



(c) MCS

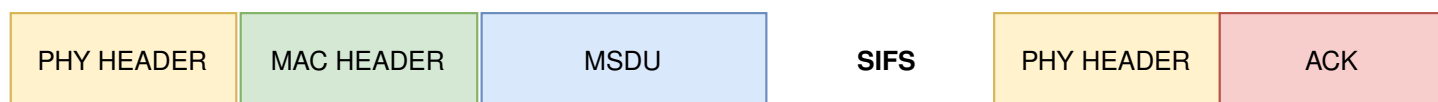


(d) Liczba anten

Rysunek 8: Wyniki symulacji agregacji ramek A-MSDU

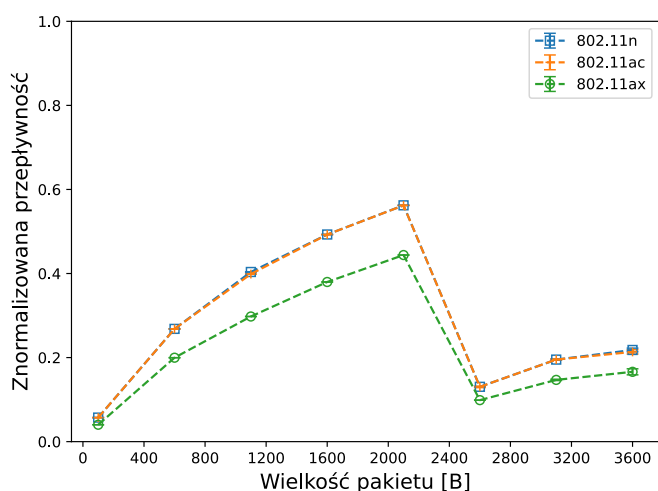
## 3.2 Brak agregacji

W celu oceny jakości działania sieci oraz analizy porównawczej sieci bezprzewodowych, z agregacją jak i jej brakiem wykonano pomiary dla sieci w której ramki nie były agregowane. Struktura pakietu przedstawiona została na Rysunku 9.

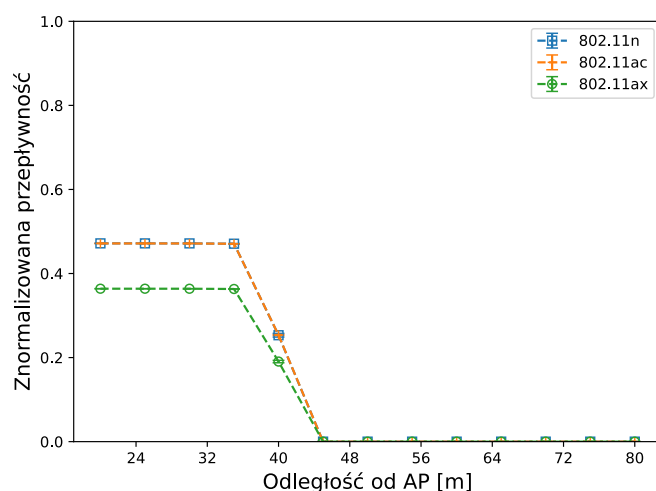


Rysunek 9: Brak agregacji ramek

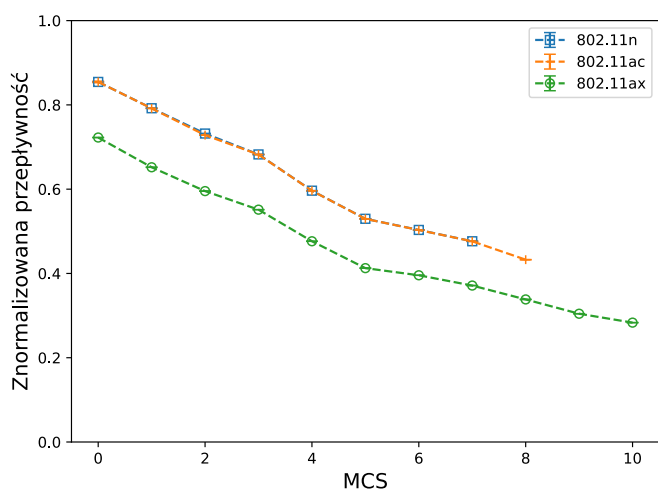
- Wielkość pakietu (10a)** - Obserwowalny jest wzrost przepływności wraz ze wzrostem rozmiaru pakietu. Zjawisko to jest obserwowalne do momentu w którym rozmiar pakietu wynosi 2700 B. W momencie tym następuje znaczący spadek znormalizowanej przepływności przez wzrost długości czasu trwania transmisji.
- Odległość od AP (10b)** - Przepływność była stała - aż do ok. 40 m w którym to momencie zasięg transmisji został utracony. Spowodowało to znaczący spadek metryki aż do osiągnięcia zera.
- MCS (10c)** - Wraz ze wzrostem schematu modulacyjno kodowego przepływność rośnie. Jednakże znormalizowana przepływność będąca wskaźnikiem wykorzystania pasma maleje - jest to spowodowane wzrostem prawdopodobieństwa wystąpień kolizji w sieci oraz brakiem wykorzystania agregacji co powoduje iż overhead w tym przypadku jest duży.
- Liczba anten (10d)** - Sytuacja jest analogiczna do przypadku MCS - wraz ze wzrostem anten przepływność maleje jednakże znormalizowana przepływność znacząco maleje. Transmisja ze względu na kolizje jest mniej efektywna.



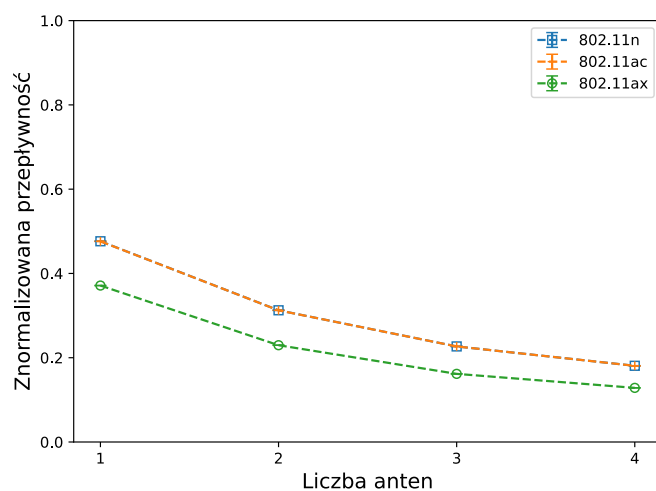
(a) Wielkość pakietu



(b) Odległość od AP



(c) MCS



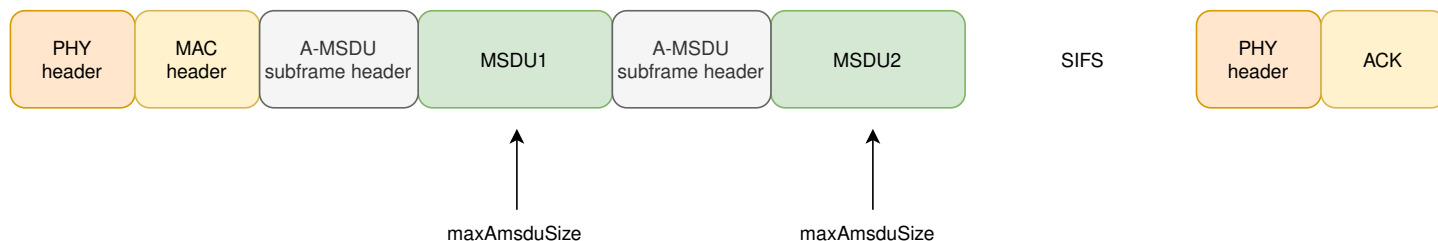
(d) Liczba anten

Rysunek 10: Wyniki symulacji braku agregacji ramek



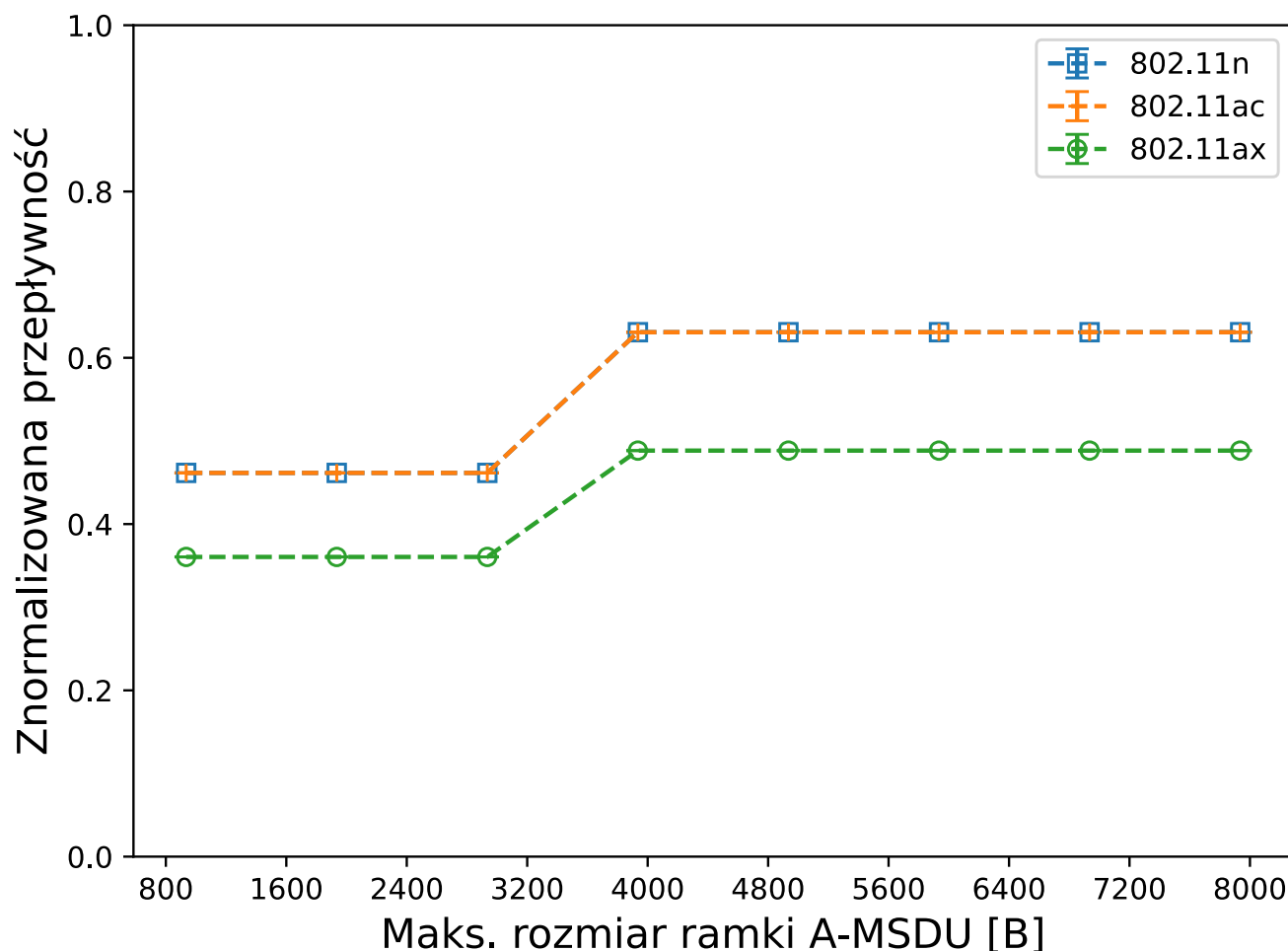
### 3.3 Badanie wydajności agregacji A-MSDU

Badanie wydajności agregacji A-MSDU pozwala na zrozumienie, jak ta optymalizacja wpływa na wydajność sieci. Dodatkowym aspektem jest widoczne przestawienie, jak dobrze sieć radzi sobie z przesyłaniem dużych pakietów danych.



Rysunek 11: Badanie wydajności agregacji A-MSDU

1. **Maksymalna wielkość ramki A-MSDU** - Wraz ze wzrostem maksymalnego rozmiaru ramki dla A-MSDU można zaobserwować jednorazowy wzrost w wartości znormalizowanej przepływności. Skok następuje po przekroczeniu 2935 B i utrzymuje swoją wartość aż do osiągnięcia maksymalnego dopuszczanego wspólnie przez mierzone standardy rozmiaru. Spowodowane jest to możliwością wysłania większej ilości pakietów w jednej ramce jednocześnie nie obciążając znacząco sieci.



Rysunek 12: Wyniki symulacji wydajności agregacji A-MSDU

## 4 Podsumowanie

Podsumowując całość wykonanych prac, udało się nam zbudować framework służący do przeprowadzania zautomatyzowanej symulacji agregacji ramek w standardach 802.11n, 802.11ac oraz 802.11ax na bazie rozszerzenia istniejącej implementacji ns-3 oraz samodzielnie przygotowanych programów bash oraz python do automatyzacji oraz wizualizacji danych symulacyjnych.

W toku prac przetestowano scenariusze braku agregacji, agregacji A-MSDU oraz badania efektywności agregacji A-MSDU. Badania przeprowadzono biorąc pod uwagę szereg zmienności parametrów przy ocenianej metryce znormalizowanej przepływności. Następnie dokonano analizy porównawczej dotyczącej przedstawionych scenariuszy oraz wyciągnięto wniosek dotyczący zysku wynikającego ze stosowania agregacji A-MSDU. Omówiono również wpływ maksymalnej wielkości ramki A-MSDU na znormalizowaną przepływność. Na ich podstawie wyciągnięty został wniosek iż znormalizowana przepływność rośnie wraz ze wzrostem rozmiaru ramki. Dodatkowo wartym zauważeniem jest fakt iż najgorsza znormalizowana przepływność uzyskiwana jest w przypadku standardu ax. Wynika to z przyjętych do normalizacji wartości oraz uproszczeń symulacyjnych. W przypadku tego standardu wartości maksymalne są wyższe dzięki zastosowaniu zmodyfikowanego mechanizmu OFDM - jednakże w badaniach które zostały wykonane nie było to widoczne z powodu zastosowanej agregacji przez co znormalizowana przepływność osiąga mniejsze wartości w przypadku tego standardu.

Jako uzupełnienie powyższej pracy można zdefiniować rozszerzenie symulacji o pozostałe rodzaje agregacji jak agregacja A-MPDU oraz agregacja dwupoziomowa. Inną propozycją rozszerzenia może być wzbogacenie parametrów symulacji o interferencje pomiędzy kanałami oraz inne modele propagacyjne kanału transmisyjnego.