Network: Satcom wstęp

Antena satelitarna

Antena satelitarna, Raisting Niemcy. CC BY-SA 2.5
Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Erdfunkstelle_Raisting_2.jpg

Antena satelitarna to niezbędna część traktu satelitarnego, bez której nie może działać ani część nadawcza jak i również część odbiorcza. Jest to element służący do nadawania lub odbioru sygnału radiowego, najczęściej z satelitów telekomunikacyjnych. Stosowane często w gospodarstwach domowych do odbioru telewizji satelitarnej.

Na powyższym rysunku 1 przedstawiono antenę satelitarną (średnicy 28.5m) stosowaną w transmisji przez europejskie teleporty. Ateny takie w dzisiejszych czasach są już rzadko stosowane gdyż technologia półprzewodnikowa umożliwiła budowę wzmacniaczy wysokiej mocy przy optymalizacji kosztów takiego wzmacniacza. W nowych instalacjach stosuje się maksymalnie anteny o średnicy nie większej niż 10 metrów.

Wygląd anteny wynika z tego że przy częstotliwościach EHF (30-300 GHz), zjawiska falowe uwidaczniają się zdecydowanie bardziej niż przy niższych częstotliwościach. Atena satelitarna

przypomina zdecydowanie bardziej swoim działaniem zwierciadło paraboliczne niż klasyczną antenę bazującą na zasadzie dipola pół falowego. Konsekwencją tego jest również to że możemy w łatwy sposób obliczyć zysk takiej anteny.

$$G = \frac{4 \pi A}{\lambda^2}e_A = (\frac{\pi d}{\lambda})^2 e_A \label{eq:antenna_gain}$$

- A: pole powierzchni apertury anteny. Rozmiar otworu przez który przechodzą fale elektromagnetyczne.
- d: Średnica anteny jeżeli antena jest okrągła.
- λ: Długość fali elektromagnetycznej.
- e_A: Parametr wydajności apertury, pomiędzy 0 a 1.

Z tego wzoru możemy wywnioskować że im większa średnica anteny tym większy jej zysk. Dlatego w starszych instalacjach z lat 90 stosowano bardzo duże anteny, ponieważ wzmacniacze dużych mocy na wysokie pasmo były bardzo nie wydajane energetycznie oraz kosztowo.

Budowa sztucznego satelity ziemskiego

Makieta ERS 2 – sztucznego satelity Ziemi
Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ERS_2.jpg

Sztuczny satelita ziemski to każdy obiekt wykonany przez człowieka który porusza się po pewnej orbicie wokół ziemi. Pierwszym tego rodzaju obiektem był Sputnik 1, wystrzelony na orbitę przez ZSRR w 1957 roku. W tym rozdziale są opisane główne części które są odpowiedzialne za działanie takiego satelity. Poniższe sekcje skupiają się głównie na kwestiach elektroniki oraz teleinformatyki, kwestie mechaniczne są omówione mniej obszernie.

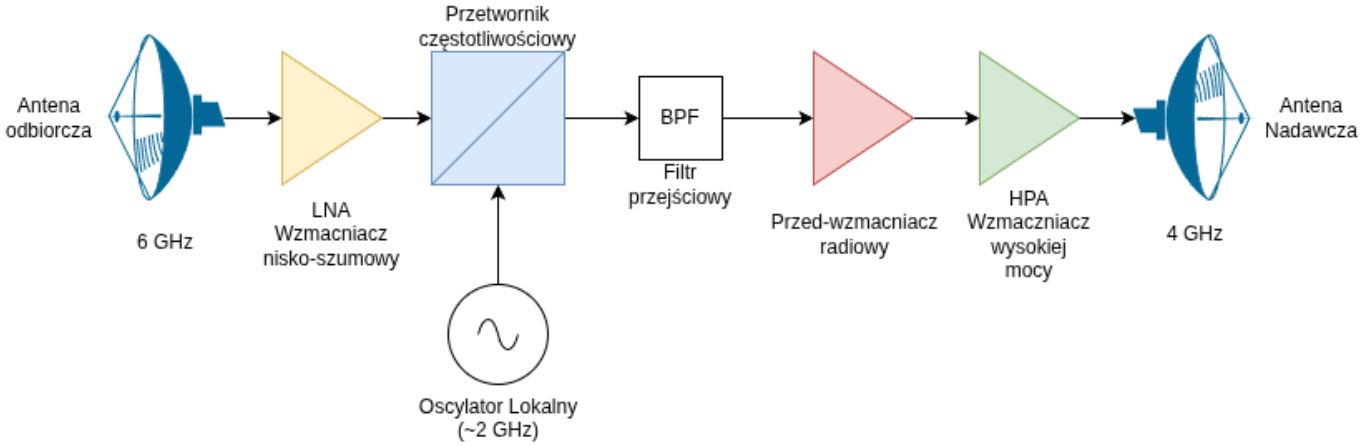
Pozycjonowanie oraz kontrola orbitalna satelity

Każdy z satelit stworzonych przez ludzi, nie miał dostatecznie dużo czasu (Miliardów lat) żeby ustabilizować swoją orbitę, więc potrzebuje on kompensacji, która pozwoli mu utrzymać się na jego wyznaczonej pozycji. Pozycje satelitów geostacjonarnych są oznaczane ze względu na odchylenie na wschód oraz na zachód od południka zerowego. Na przykład satelita wysunięty nad równikiem na wschód o 7 stopni od południka zerowego będzie nazwany „E7”, w dzisiejszych czasach z racji dużej

zajętości pozycji czasami wysyła się kilka satelit na jedną pozycję powoduje to wtedy że nazewnictwo wygląda np. „E7A”, „E7B”, „E7C”.

Sama kompensacja pozycji satelity jest realizowana poprzez silniki odrzutowe, wyrzucają one mieszankę gazu która pozwala kompensować ruchy około orbitalne satelity. Ilość paliwa jest zwykle ograniczona co powoduje że satelity mają ograniczoną żywotność np. satelita Eutelsat 7B wysłany na obitę w 2013 roku jest przeznaczony do działania około 15 lat, co oznacza że w roku 2028 prawdopodobnie skończy mu się paliwo do przeprowadzania kompensacji. Rozwiązaniem w takich sytuacjach jest zastosowanie anteny nadawczo-odbiorczych z śledzeniem satelity, pozwala to wtedy na wykorzystanie satelity jeszcze przez kilka lat po zakończeniu się jego daty przydatności.

Transponder



Schemat przykładowego transpondera [Opracowanie własne]

Transponder satelitarny to kluczowy element systemów komunikacyjnych, odpowiedzialny za odbieranie, wzmacnianie i retransmisję sygnałów. Jego budowa obejmuje kilka kluczowych komponentów:

- **Antena odbiorcza:** Odbiera sygnały z Ziemi.
- **Wzmacniacz nisko-szumowy (LNA):** Wzmacnia słabe sygnały, aby zredukować szumy i zwiększyć ich moc.
- **Przetwornik częstotliwościowy (i lokalny oscylator):** Konwertuje częstość odbieranego sygnału na inną częstość, wymagającą do nadawania.
- **Filtr przejściowy (BPF):** Odrzuca niepożądane częstotliwości, pozwalając tylko na przejście oczekiwanego sygnału.
- **Przed wzmacniacz radiowy:** Dalsze zwiększanie mocy sygnału przed jego nadawaniem.
- **Wzmacniacz radiowy wysokiej mocy (HPA):** Ostatecznie wzmacnia sygnał do poziomu, który może być skutecznie retransmitowany z powrotem na Ziemię.
- **Antena nadawcza:** Emisja sygnału w kierunku stacji odbiorczej na Ziemi.

Pasma satelitarne i zależność dostępności usług

Pasma częstotliwości wykorzystywane w łączności satelitarnej determinują nie tylko charakter oferowanych usług, ale także ich dostępność geograficzną, odporność na zakłócenia atmosferyczne oraz wymogi regulacyjne. Poniżej przedstawiono najważniejsze pasma, ich typowe zastosowania oraz czynniki wpływające na dostępność usług w poszczególnych regionach.

Pasmo L (1-2 GHz)

- **Zastosowania**: systemy nawigacji satelitarnej (GPS, GLONASS, Galileo), łączność mobilna w warunkach niskiego SNR, niektóre systemy telemetrii.
- **Zalety**: duża odporność na opady atmosferyczne (deszcz, śnieg) oraz zakłócenia jonosferyczne; stosunkowo niewielka utrata mocy sygnału przy długich odległościach.
- **Ograniczenia**: ograniczona przepustowość w porównaniu z wyższymi pasmami; konieczność stosowania większych anten w celu uzyskania wysokiego zysku.
- **Dostępność**: szeroko dostępne globalnie, ponieważ pasmo L jest przydzielone do usług publicznych i nie wymaga kosztownych licencji.

Pasmo S (2-4GHz)

- **Zastosowania**: radary pogodowe, monitorowanie atmosfery, niektóre systemy łączności awaryjnej, satelity obserwacyjne.
- **Zalety**: umiarkowana wrażliwość na opady; możliwość uzyskania średniej przepustowości przy relatywnie niewielkich antenach.
- **Ograniczenia**: pasmo jest częściowo zajęte przez systemy wojskowe i naukowe, co może ograniczać dostępność w niektórych krajach.
- **Dostępność**: dostępne w większości regionów, ale wymaga koordynacji z organami regulacyjnymi w celu uniknięcia interferencji.

Pasmo C (4-8 GHz)

- **Zastosowania**: telewizja satelitarna (DTH), transmisje danych w sieciach korporacyjnych, łącza back-haul.
- **Zalety**: dobre pokrycie geograficzne przy umiarkowanej wielkości anten; stosunkowo niska podatność na deszcz w porównaniu z wyższymi pasmami.
- **Ograniczenia**: wymaga większych anten niż pasma Ku/Ka; pasmo jest silnie zagospodarowane, co może prowadzić do zatłoczenia spektrum.
- **Dostępność**: szeroko wykorzystywane w Europie i Ameryce Północnej; w niektórych regionach Azji i Afryki dostępność może być ograniczona ze względu na przydziały narodowe.

Pasmo X (8-12 GHz)

- **Zastosowania**: komunikacja wojskowa, radary śledzące, łącza satelitarne w trudnych warunkach atmosferycznych.
- **Zalety**: wysoka precyzja i możliwość uzyskania dużej przepustowości; lepsza odporność na zakłócenia jonosferyczne niż niższe pasma.
- **Ograniczenia**: silna absorpcja przy intensywnych opadach deszczu (tzw. *rain fade*); wymaga precyzyjnego ukierunkowania anten.
- **Dostępność**: ograniczona do użytkowników posiadających odpowiednie licencje wojskowe lub rządowe; w niektórych krajach dostępna jedynie w ramach programów badawczych.

Pasmo Ku (12-18GHz)

- **Zastosowania**: transpondery telewizyjne, szerokopasmowy Internet satelitarny, łącza VSAT.

- **Zalety**: stosunkowo wysoka przepustowość przy umiarkowanej wielkości anten; dobra równowaga między zasięgiem a podatnością na *rain fade*.
- **Ograniczenia**: wymaga precyzyjnego ustawienia anteny; w rejonach o intensywnych opadach deszczu jakość usługi może się obniżać.
- **Dostępność**: szeroko dostępne w Europie, Ameryce Północnej i części Azji; w niektórych regionach wymaga uzyskania licencji od lokalnych regulatorów.

Pasmo Ka (26,5-40GHz)

- **Zastosowania**: wysokoprzepustowe łącza satelitarne, 5G back-haul, transmisje wideo w jakości 4K/8K, systemy IoT o dużej przepustowości.
- **Zalety**: bardzo duża przepustowość, umożliwiająca transmisję gigabitowych strumieni danych; małe anteny ze względu na krótszą długość fali.
- **Ograniczenia**: silna podatność na *rain fade* i inne zjawiska atmosferyczne; wymaga zaawansowanych technik korekcji błędów i adaptacyjnego przydziału mocy.
- **Dostępność**: rośnie w miarę wprowadzania nowych regulacji; w niektórych krajach dostępne dopiero w ramach pilotowych projektów.

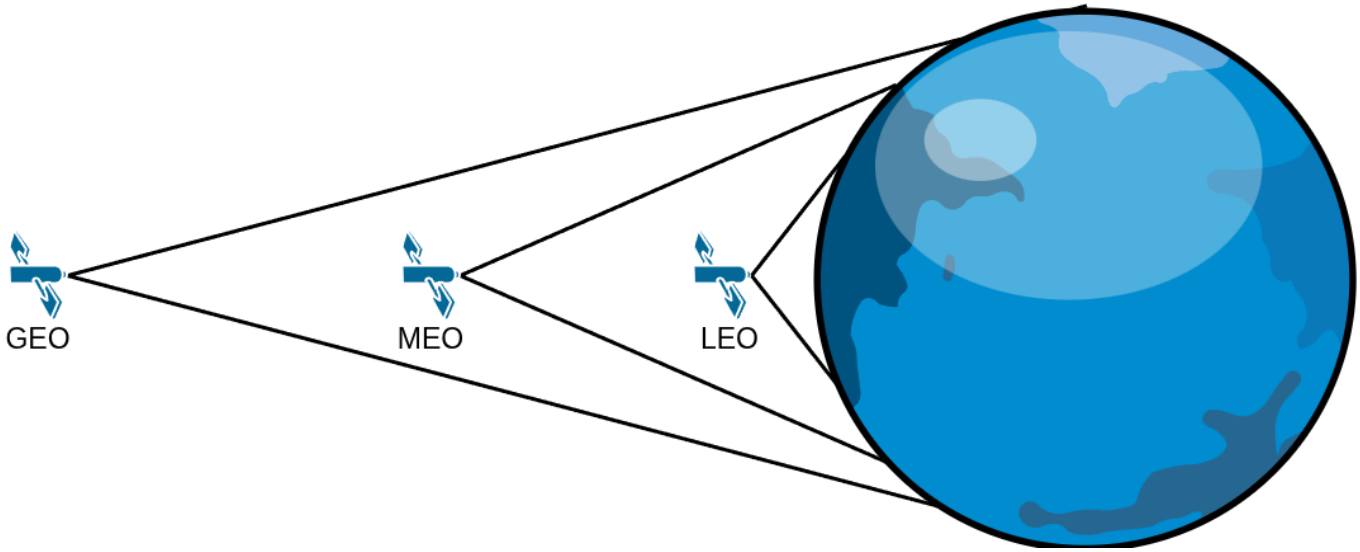
Pasmo V (40-75 GHz)

- **Zastosowania**: eksperymentalne systemy łączności satelitarnej, badania nad transmisją danych w bardzo wysokich częstotliwościach, prototypy sieci satelitarnych dla 6G.
- **Zalety**: ekstremalnie duża przepustowość (kilkadziesiąt gigabitów na sekundę); możliwość wykorzystania bardzo małych anten i układów elektronicznych.
- **Ograniczenia**: bardzo silna absorpcja przez atmosferę (głównie woda i tlen); wymaga precyzyjnego sterowania wiązką oraz zaawansowanych technik modulacji.
- **Dostępność**: obecnie ograniczona do laboratoriów badawczych i projektów demonstracyjnych; regulacje dopuszczające komercyjne wykorzystanie dopiero w fazie opracowywania.

Podsumowanie zależności dostępności usług

- **Czynniki geograficzne**: w regionach o wysokich opadach (np. tropikalne) pasma wyższe (Ku, Ka, V) mogą wymagać dodatkowych technik mitigacji *rain fade*, co podnosi koszty wdrożenia.
- **Regulacje i licencje**: niektóre pasma (X, V) są zarezerwowane dla zastosowań wojskowych lub badawczych, co ogranicza ich dostępność dla sektora komercyjnego.
- **Wymagania przepustowości**: aplikacje wymagające dużej przepustowości (np. transmisje wideo 4K, back-haul 5G) skłaniają się ku pasmom Ka i Ku, natomiast systemy o krytycznym znaczeniu i niskiej przepustowości (np. nawigacja) korzystają z pasma L.
- **Koszty infrastruktury**: niższe częstotliwości (L, S) wymagają większych anten, co zwiększa koszty instalacji, podczas gdy wyższe częstotliwości (Ka, V) pozwalają na mniejsze anteny, ale zwiększają koszty związane z korekcją zakłóceń.

Rodzaje sztucznych satelit ziemskich



Schemat ideowy orbit satelit komunikacyjnych [Opracowanie własne]

LEO (Low Earth Orbit)

Satelity na niskiej orbicie (160-2000 km) charakteryzują się:

- **Niskim opóźnieniem** (20–40ms) – korzystne dla aplikacji czasu rzeczywistego (VoIP, aplikacje online, telekonferencje).
- **Wysoką rozdzielczością obrazów** – umożliwiają szczegółowe obserwacje Ziemi, monitorowanie zmian środowiskowych.
- **Krótkim okresem orbitalnym** (90–120min) – wymaga dużej liczby satelit w konstelacji, aby zapewnić ciągłość pokrycia.

Typowe zastosowania: konstelacje broadbandowe (Starlink, OneWeb), systemy obserwacji Ziemi (Sentinel-2, Landsat), misje badawcze i edukacyjne.

MEO (Medium Earth Orbit)

Orbita średnia (2000–35786km) jest wykorzystywana głównie przez systemy nawigacyjne:

- **Stała wysokość około 20200km** – optymalny kompromis między zasięgiem a opóźnieniem (ok. 70ms).
- **Stała liczba satelit** (np. 24 w GPS) zapewnia globalne pokrycie przy umiarkowanej liczbie jednostek.
- **Stabilność orbitalna** – mniejsze wpływy atmosferyczne niż w LEO, co zmniejsza potrzebę korekt orbitalnych.

Przykłady: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.

GEO (Geostationary Orbit)

Satellity geostacjonarne (35786km) poruszają się z prędkością kątową równą rotacji Ziemi, co daje:

- **Stałą pozycję względem powierzchni** – jedna antena naziemna może obsługiwać cały

obszar widoczny z jednego punktu.
- **Duży zasięg** – pojedynczy satelita pokrywa ok. $\frac{1}{3}$ powierzchni Ziemi.
- **Wyższe opóźnienie** (ok. 250ms) – mniej korzystne dla aplikacji wymagających niskiego RTT, ale akceptowalne dla transmisji wideo i telekomunikacji.

Zastosowania: transmisje telewizyjne, szerokopasmowy Internet satelitarny, meteorologia, łączność awaryjna.

Wnioski projektowe

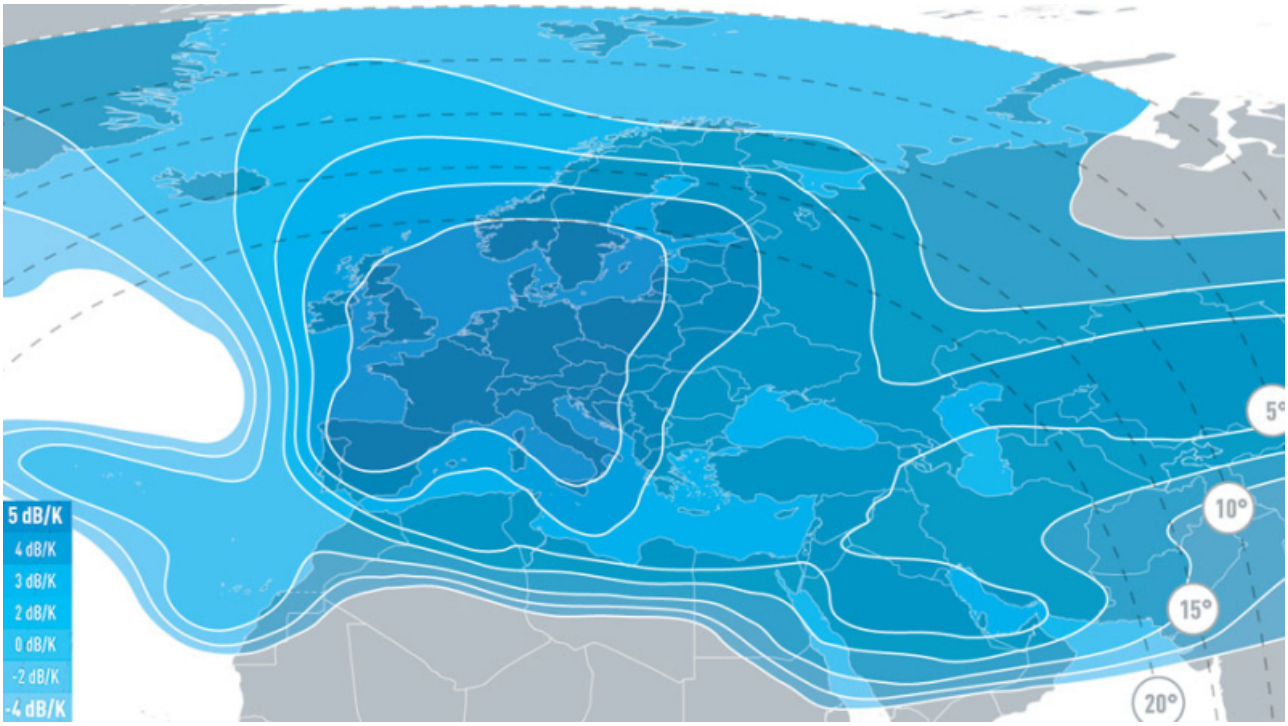
- **Wybór orbity** powinien być uzależniony od wymagań aplikacji: niskie opóźnienie → LEO; globalna dostępność przy minimalnej liczbie satelit → MEO; szeroki zasięg przy jednej jednostce → GEO.

- **Koszty uruchomienia i eksploatacji** rosną wraz z wysokością orbity (większe wymagania napędowe, dłuższy czas życia satelity, droższe systemy napędowe).
- **Zarządzanie interferencjami** wymaga uwzględnienia przydziału pasm oraz współpracy międzynarodowej, szczególnie w pasmach Ku/Ka, które są intensywnie wykorzystywane.
- **Redundancja i niezawodność** – konstelacje LEO i HEO zapewniają naturalną redundancję dzięki dużej liczbie satelit; w GEO redundancja wymaga uruchomienia zapasowych satelit w tej samej pozycji orbitalnej.

Pokrycie planety przez sygnał satelitarny

Sygnał satelitarny pokrywa obszary planety za pomocą różnych metod transmisji, co pozwala na dostarczanie usług telekomunikacyjnych i danych na dużą skalę.

- **Mapa odbiorcza:** Przedstawia zasięg, w jakim sygnał z satelity może być odbierany na powierzchni Ziemi. W przypadku Eutelssatelliteat 7B, sygnał pokrrackywa znaczną część Europy, Bliskiego Wschodu oraz części Afryki.



Mapa nadawcza (z ziemi) satelity Eutelsat 7B
Źródło: https://www.eutelsat.com/satellite-network/GEO-fleet/eutelsat-7-east

- **Mapa nadawcza:** Ukazuje zasięg obszarów, z których sygnał może być wysyłany do satelity. W przypadku Eutelsat 7B, użytkownicy muszą znajdować się w odpowiednich strefach, aby skutecznie korzystać z usług nadawczych.

Pokrycie sygnałem satelitarnym jest kluczowe dla zapewnienia szerokopasmowego dostępu do internetu, transmisji telewizyjnej oraz komunikacji w trudno dostępnych regionach, gdzie infrastruktura lądowa nie jest rozwinięta.

Technologie satelitarne wykorzystane w pracy

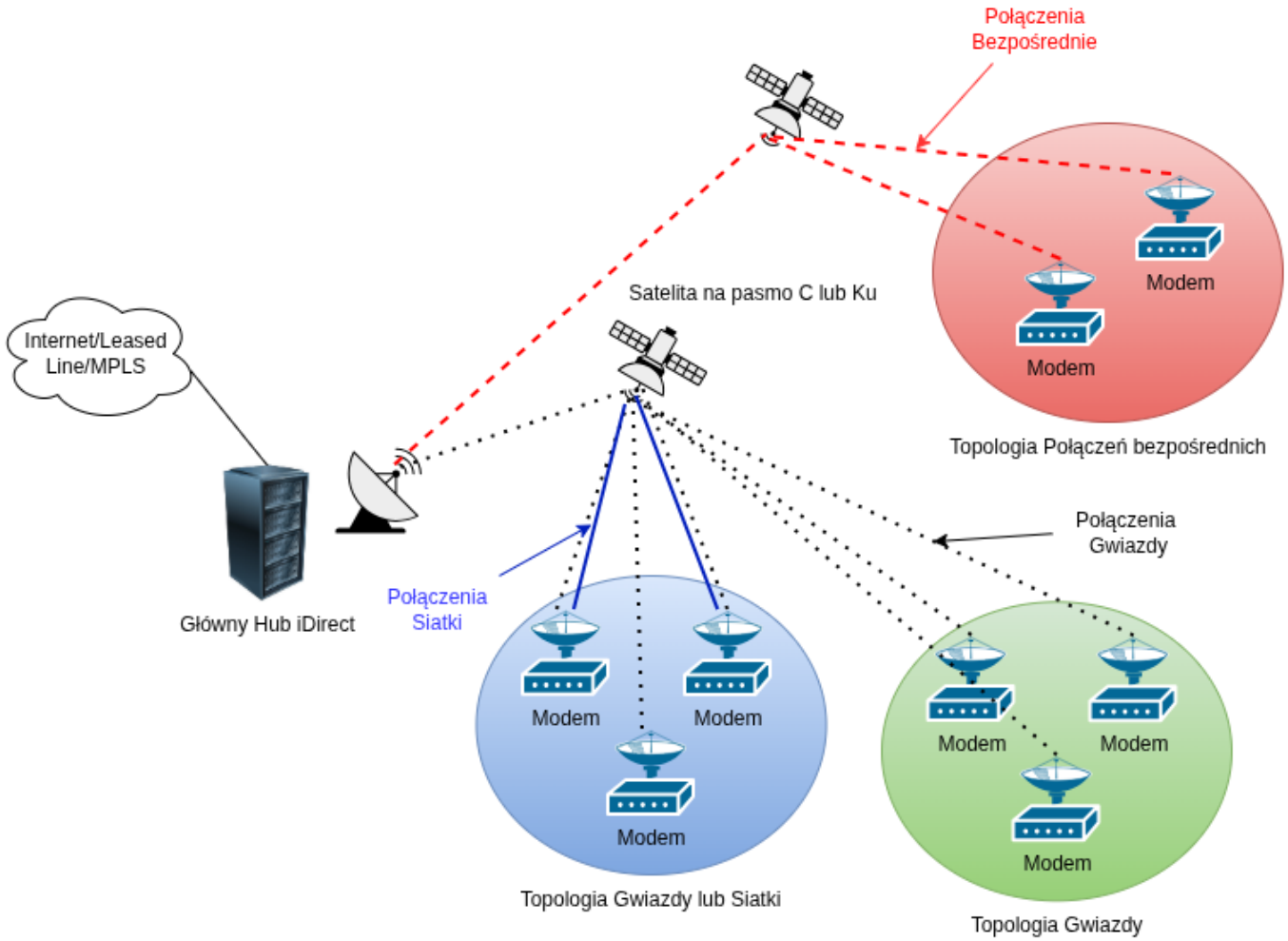
W poniższej sekcji omówimy technologie satelitarne, które są kluczowe dla budowy sieci obsługującej terminale satelitarne. Takie sieci odgrywają istotną rolę w transmisji danych IP, co czyni je niezbędnymi w sytuacjach, gdy tradycyjne łącza, takie jak przewodowe połączenia internetowe, są niedostępne.

Sieci satelitarne są niezwykle cenne w obszarach, gdzie infrastruktura telekomunikacyjna jest ograniczona. Przykładem mogą być lokalizacje wiejskie lub odległe tereny, w których brak jest dostępu do kabli światłowodowych lub łączy radiowych, takich jak sieci komórkowe 4G/LTE. W takich przypadkach, technologie satelitarne oferują elastyczne rozwiązania, które umożliwiają użytkownikom uzyskanie stabilnego i szybkiego dostępu do internetu.

Satelitarna łączność geostacjonarna

Z racji popularności i łatwości implementacji w pracy została zastosowana łączność geostacjonarna, ponieważ orbita GEO zapewnia stałą pozycję satelity względem punktu naziemnego, co eliminuje konieczność skomplikowanego śledzenia anteną i znacząco upraszcza konfigurację sieci w warunkach polowych. Symulacje oraz wszystkie powiązane konfiguracje zostały opracowane z myślą o paśmie Ku, które jest najczęściej wykorzystywanym pasmem do transmisji danych IP w sieciach satelitarnych ze względu na korzystny stosunek przepustowości do podatności na zjawisko *rain fade*. Pasmo Ku (12–18GHz) oferuje wystarczającą szerokość pasma, aby obsłużyć protokoły transportowe (TCP/UDP) oraz techniki adaptacyjnego kodowania i modulacji (ACM), co pozwala na dynamiczne dostosowywanie parametrów transmisji do aktualnych warunków atmosferycznych. Dodatkowo, pasmo to jest szeroko wspierane przez liczne platformy satelitarne, w tym rozwiązania iDirect, które dostarczają gotowe terminale, oprogramowanie zarządzające pasmem oraz narzędzia diagnostyczne, co znacząco skraca czas wdrożenia i redukuje koszty operacyjne. Dzięki temu połączenie GEO-Ku stanowi optymalne rozwiązanie zarówno dla łączności zapasowej, jak i jako główne łącze internetowe w lokalizacjach pozbawionych dostępnych łączy przewodowych lub radiowych (np. 4G/LTE).

Platforma iDirect



Schemat sieci satelitarnej na bazie platformy iDirect [Opracowanie własne]

W realizacji projektu sieci wykorzystano platformę satelitarną iDirect. W poniższym porównaniu wykorzystano pojęcie przeskoku satelitarnego. Przeskok satelitarny to przesłanie sygnału z miejsca nadawania i następnie odebranie go w miejscu odbioru, w poniższym porównaniu wykorzystano pojęcie pojedynczego skoku oraz podwójnego skoku. Poniżej wyjaśnienie tych pojęć.

Pojedynczy skok satelitarny następuje w momencie w którym, nadawany sygnał jest przetwarzany tylko raz przez satelitę. Czyli na przykład w sytuacji w której dwa terminale komunikują się razem poprzez pasmo satelitarne. Sygnał jest najpierw nadawany przez jeden terminal potem odbierany przez drugi.

Podwójny skok satelitarny następuje w momencie w którym sygnał jest przetwarzany przez satelitę podwójnie. Kiedy np. terminal chce dostać się do internetu i musi przejść przez punkt główny czyli huba. Terminal wykonuje polecenie `ping 8.8.8.8`, pakiet najpierw jest przesyłany do huba, hub następnie rozkodowuje pakiet satelitarny i przesyła go na adres docelowy `8.8.8.8`, czeka na odpowiedź `ECHO REPLY` w momencie otrzymania odpowiedzi, zakodowuje ją w pakiet satelitarny, wysyła na satelitę i następnie terminal go otrzymuje. W taki sposób zachodzi tzw. podwójny skok.

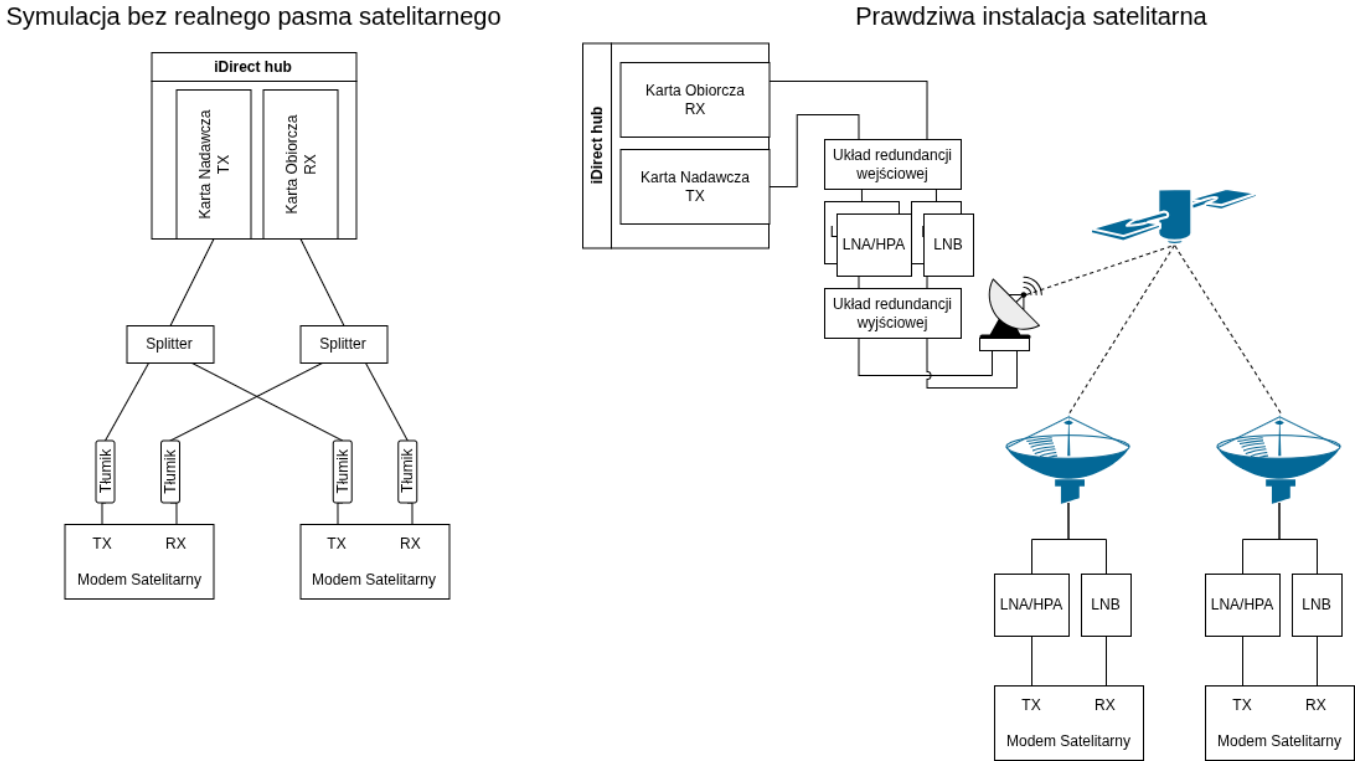
Platforma iDirect pozwala na realizację sieci satelitarnych w poniższych trybach konfiguracji:

- Topologia gwiazdy lub siatki
  - Pozwala na połączenie każdego terminala z każdym (po podwójnym przeskoku)
  - Dodatkowo pozwala na definiowanie połączeń między terminalami (po pojedynczym przeskoku)
- Topologia gwiazdy
  - Pozwala na połączenie każdego terminala z każdym (po podwójnym przeskoku)
  - Nie pozwala na połączenia siatkowe między terminalami (bez podwójnego skoku)
- Topologia połączeń bezpośrednich
  - Pozwala tylko i wyłącznie na połączenia bezpośrednie między dwoma lub więcej terminalami satelitarnymi na dedykowanym, przeznaczonym tylko i wyłącznie do tego paśmie tzw. jeden kanał na nośną (eng. SCPC single channel per carrier)

W tej pracy sieć oraz platforma satelitarna były skonfigurowane pod działanie sieci w trybie „Topologia gwiazdy”. Konsekwencją tego jest to że cały ruch sieciowy jaki zachodzi, między terminalami albo do internetu musi przejść przez punkt centralny (tzw. hub).

Wykorzystanie pętli TX-RX do symulacji łącza satelitarnego

Podczas testów przed uruchomieniem sieci satelitarnej, trzeba przeprowadzić testy funkcjonalne. Z racji tego że pasmo satelitarne jest usługą o wysokiej cenie, powoduje to szukanie i opracowywanie rozwiązań które pozwalają przetestować działanie sieci bez pasma satelitarnego. Na rysunku 8 możemy zaobserwować, porównanie tego jakie są najważniejsze komponenty prawdziwej sieci satelitarnej, oraz jak możemy to uprościć w celu przetestowania sieci bez pasma satelitarnego.



Schemat symulacji pętli TXRX oraz porównanie z realną instalacją [Opracowanie własne]

Sieć satelitarna podczas zastosowania prawdziwego pasma satelitarnego wymaga od nas zastosowania pełnych traktów odbiorczych i nadawczych dla strony terminala jak i również huba. Trakt nadawczy powinien być również redundantny, więc potrzebujemy zastosować podwójnie sprzęt nadawczy i odbiorczy po stronie huba.

Natomiast przy testach funkcjonalnych wystarczy zastosować dzielniki do których możemy podłączyć stronę nadawczą i odbiorczą terminali, i po uprzednim stłumieniu sygnału do odpowiedniego poziomu, możemy tak przygotowane sygnały podłączyć do terminali. Pozwoli to na podłączenie i uwierzytelnienie się w sieci satelitarnej bez uprzedniego wynajmowania pasma satelitarnego.

Testy wykonane w taki sposób nie pozwalają na zbadanie opóźnienia i ograniczeń pasma wynikających z pasma satelitarnego. Dlatego w następnym rozdziale przedstawiono metodę badania i symulacji takich warunków za pomocą otwarto źródłowego oprogramowania.