

Lekcja 10

Sieć komórkowa

Cel

- Przedstawienie podstawowej koncepcji sieci komórkowej i jej funkcjonowania.

Efekty kształcenia

- Uczeń zna zasady doboru częstotliwości nośnej dla sygnału o danej szerokości pasma i docelowego rozmiaru anteny.
- Uczeń rozumie konieczność podnoszenia częstotliwości nośnej przy zwiększaniu szerokości pasma sygnału w warunkach ograniczeń podziału częstotliwości.
- Uczeń potrafi wyjaśnić korzyści z komórkowego podziału obszaru w sieciach mobilnych.
- Uczeń zna zasady nawiązywania połączenia w sieciach komórkowych.



1. Dobór częstotliwości nośnej

W poprzednich lekcjach pokazaliśmy, jak techniki modulacji mogą być wykorzystane do podziału częstotliwości pomiędzy różnych nadawców, dzięki czemu mogą oni korzystać jednocześnie z pola elektromagnetycznego (EM) do transmisji swoich sygnałów. Zastanówmy się teraz od czego zależy dobór wartości częstotliwości nośnej.

W Lekcji 3 podaliśmy wzór na oszacowanie minimalnego rozmiaru l anteny do transmisji sygnału w postaci fali EM. Rozmiar ten zależy w bardzo prosty sposób od długości emitowanej fali – uzyskujemy go przez pomnożenie długości fali λ przez mnożnik zależny od typu anteny ($1/2$ dla anteny dipolowej, $1/4$ dla anteny monopolowej, itp.). Przyjmijmy, że mamy do czynienia z anteną dipolową:

$$l \geq \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$$

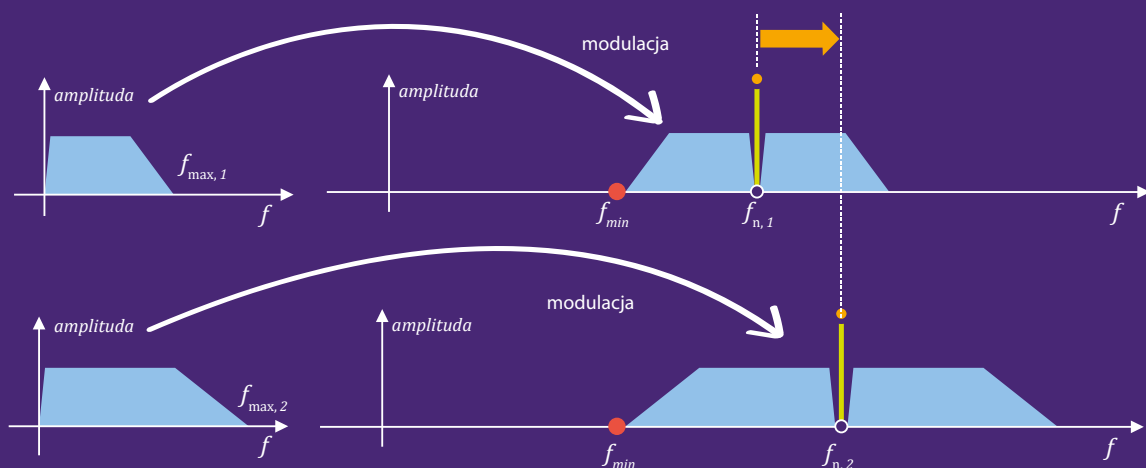
Wykorzystaliśmy tutaj wzór wiążący długość fali, częstotliwość oraz prędkość światła c . Jeżeli przyjmijemy określony, akceptowalny dla nas rozmiar anteny, możemy zapytać o warunek, który muszą spełniać częstotliwości emitowanego, zmodulowanego sygnału. Po prostym przekształceniu powyższego wzoru:

$$f \geq \frac{c}{2l}$$

Zatem przy ustalonym rozmiarze anteny częstotliwości w pasmie sygnału zmodulowanego powinny być większe od minimalnej wartości f_{\min} :

$$f_{\min} = \frac{c}{2l}$$

Przypomnijmy sobie postać sygnału zmodulowanego (patrz Lekcje 7, 8, 9). Jego pasmo składa się z dwóch wstęg bocznych położonych wokół częstotliwości nośnej, a szerokość wstęg zależy od pasma sygnału modulującego. W przypadku modulacji AM szerokość wstęgi jest dokładnie równa jego szerokości, zaś w modulacji FM może być większa, szczególnie w modulacji szerokopasmowej. Jeżeli całe pasmo sygnału zmodulowanego ma znaleźć się powyżej częstotliwości minimalnej, to w skrajnym przypadku lewy kraniec wstęgi dolnej może się z nią pokrywać (Rys. 1, u góry). Zatem częstotliwość nośna musi być przynajmniej równa częstości minimalnej powiększonej o szerokość wstęgi bocznej.

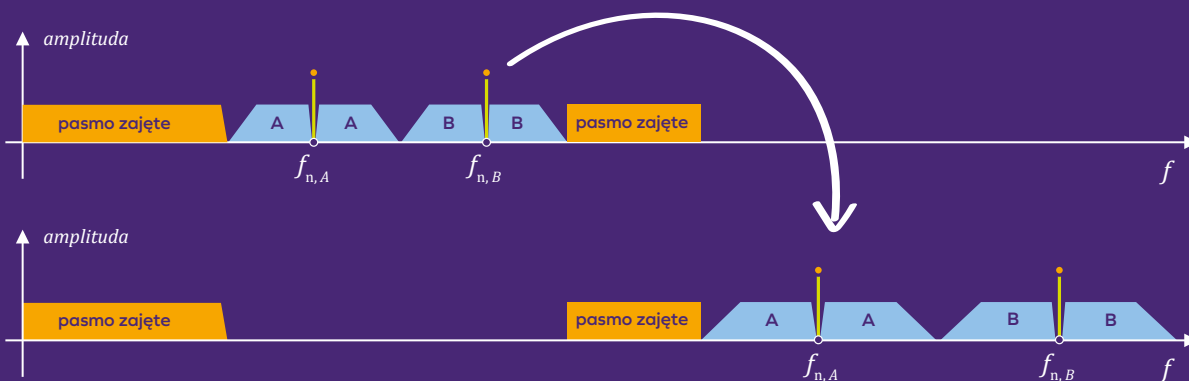


Rys. 1. Zależność częstotliwości nośnej od pasma sygnału i minimalnej częstotliwości w pasmie sygnału zmodulowanego.

Co stanie się, gdy szerokość pasma sygnału informacyjnego poszerzy się, na przykład w wyniku zwiększenia jakości transmitowanego sygnału audio lub szybkości przesyłanych danych cyfrowych (patrz Lekcja 9)? Doprowadzi to oczywiście do poszerzenia wstęg bocznych, zatem częstotliwość nośna także będzie musiała ulec zwiększeniu (Rys. 1, na dole).

Ograniczenie narzucone na pasmo sygnału zmodulowanego wynikające z częstotliwości minimalnej jest tylko jednym z możliwych ograniczeń, z jakimi w praktyce się spotykamy rozwijając systemy telekomunikacji mobilnej. Załóżmy, że pewien nadawca otrzymał do dyspozycji zakres częstotliwości pozwalający na transmisję dwóch różnych sygnałów. Na Rys. 2 oznaczyliśmy je przez A i B. Częstotliwości poniżej tego zakresu oraz pewne pasmo powyżej zostało przydzielone innym nadawcom, możemy zatem uznać je za pasma zajęte (z punktu widzenia nadawcy, o którym mówimy). Szerokość pasma obu zmodulowanych sygnałów jest taka, że wstęgi boczne niemal stykają się z pasmami zajęтыми, co oznacza, że nadawca wykorzystał w pełni dostępną mu przestrzeń.

Kiedy pojawi się konieczność poszerzenia pasma sygnału informacyjnego, a tym samym – wstęg bocznych, lub zwiększenia liczby nadawanych sygnałów, jedyne, co może zrobić nadawca, to przenieść się do zupełnie innego obszaru na osi częstotliwości, zwykle do znacznie większych częstotliwości nośnych nieużywanych dotąd przez pozostałych nadawców. Dokładnie takie zjawisko obserwujemy w kolejnych generacjach telefonii mobilnej.

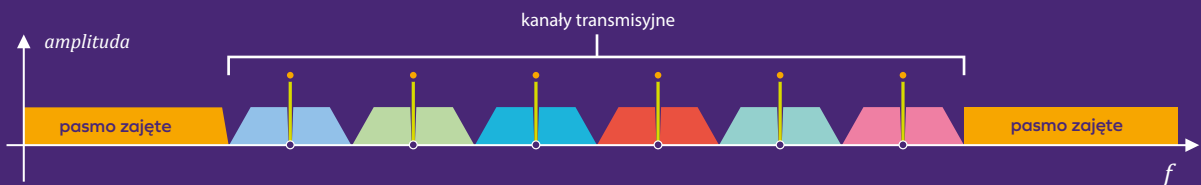


Rys. 2. Konieczność przeniesienia częstotliwości nośnych danego nadawcy przy poszerzeniu pasma sygnału w warunkach ograniczonego pasma.

2. Przydział kanałów transmisyjnych

Pole EM jako medium do przesyłania informacji dostępne jest w takim samym stopniu dla każdego nadawcy, który jest w stanie wytworzyć falę EM. Ponieważ fale EM o wysokiej częstotliwości tracą od pewnego momentu walory praktycznego nośnika informacji (np. z powodów silnego pochłaniania lub bezpieczeństwa, o czym szerzej powiemy w Lekcji 11), miejsce na osi częstotliwości jest ograniczone. Ze względu na ogromną liczbę nadawców konieczne jest zatem prawne uregulowanie dostępu do poszczególnych

zakresów. Mamy tu sytuację podobną do ruchu drogowego w warunkach dużego obciążenia sieci drogowej. Bez regulacji wprowadzonej przez Kodeks Drogowy trudno byłoby sobie wyobrazić poruszanie się samochodem po mieście. W Polsce zarządzaniem pasmami częstotliwości fal EM i przydzielaniem ich dla poszczególnych nadawców zajmuje się Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE).



Rys. 3. Kanały transmisyjne przydzielone danemu nadawcy.

Mamy zatem pewne pasma przydzielone m.in. określonym służbom państwowym (np. policji), stacjom radiowym, telewizji, radionawigacji lotniczej lub morskiej, radioamatorom oraz poszczególnym generacjom telefonii mobilnej różnych operatorów.

Chociaż można znaleźć pasma dostępne swobodnie, to podział osi częstotliwości fal EM jest w wysokim stopniu zorganizowany. Dany nadawca np. operator sieci telefonii komórkowej, otrzymuje do dyspozycji pewne pasmo, w którym ma prawo nadawać. Uwzględniając szerokość pasma sygnału zmodulowanego możemy powiedzieć, że na danego nadawcę przypada określona liczba tzw. **kanałów transmisyjnych** (Rys. 3). Im większa jest to liczba, tym większą liczbę równoczesnych rozmów telefonicznych może dany operator obsłużyć. Zawsze jest to jednak liczba ograniczona, co ma wyjątkowe znaczenie dla sposobu budowy sieci mobilnej, jak zobaczymy w następnym etapie niniejszej lekcji. W szczególności wymusza wprowadzenie tzw. komórek.



Dla zainteresowanych. Dla porządku warto wspomnieć, że we współczesnej telefonii mobilnej wykorzystuje się znacznie bardziej zaawansowane techniki modulacji niż wspomniane przez nas w poprzednich lekcjach modulacje AM i FM. Dzięki nim możliwe jest efektywniejsze wykorzystanie pasma sygnału zmodulowanego tzn. uzyskać większą szybkość przesyłu informacji cyfrowej niż w prostej modulacji amplitudowej. Niektóre z tych technik łączą w sobie modulację amplitudową z modulacją fazową, dzięki czemu można „upchać” więcej bitów informacji w różnych parametrach modulowanej fali harmoniczej.

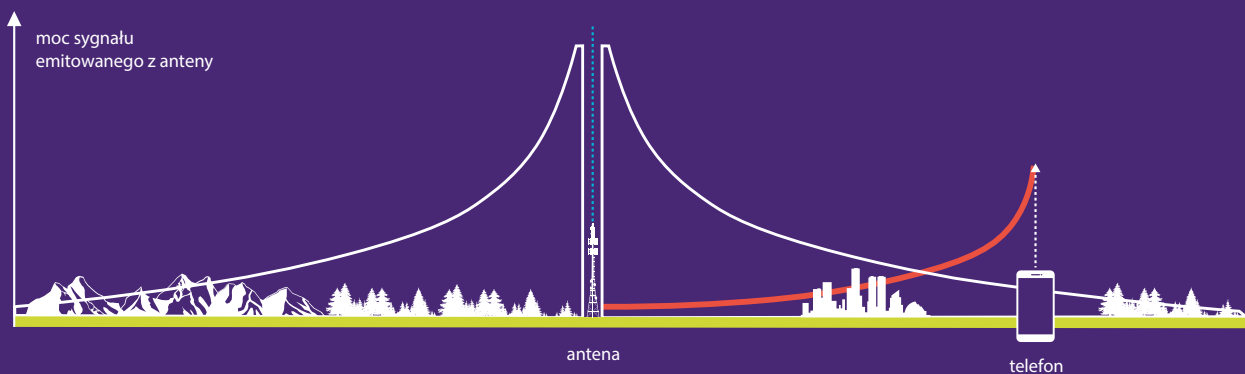
3. Komórkowy podział obszaru

W sieciach telefonii mobilnej poszczególne telefony nie komunikują się pomiędzy sobą bezpośrednio, lecz zawsze za pośrednictwem tzw. **stacji bazowej**, czyli zespołu anten umieszczonych na jednym maszcie. Stacje bazowe systemu **GSM**, ale też późniejszych generacji telefonii komórkowej, nazywane są często w skrócie **BTS**-ami (skrót BTS

pochodzi od angielskiej nazwy „*base transceiver station*”, czyli „stacja bazowa nadawczo-odbiorcza”).

Czy system telefonii mobilnej obejmujący bardzo duży obszar (np. całego kraju) mógłby składać się z pojedynczej stacji bazowej i łączących się z nią za pośrednictwem fal EM telefonów? Taki system byłby niepraktyczny przynajmniej z trzech powodów.

Pierwszym powodem jest to, że odległość pomiędzy stacją a telefonem mogłaby być potencjalnie bardzo duża. Jak pamiętamy z Lekcji 2, natężenie fali EM zmniejsza się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła. Nawet jeśli umieścimy stację bazową w środku obszaru, objęcie jego brzegów sygnałem o energii wystarczającej do niezakłóconego odbioru wymagałoby nadajnika o potężnej mocy (Rys. 4). Mogłoby to spowodować przekroczenie norm bezpieczeństwa w pobliżu maszty (patrz Lekcja 11) oraz trudno byłoby zapewnić małą liczbę przeszkód terenowych dla fali pomiędzy masztem i odbiorcą (patrz Lekcja 6). Co więcej, nadajnik dużej mocy wymagany byłby także w samym telefonie, co mogłoby naruszyć normy bezpieczeństwa, tym bardziej, że jest to urządzenie używane w bardzo bliskim sąsiedztwie ciała. Wiązałoby się to także z szybszym zużyciem baterii.



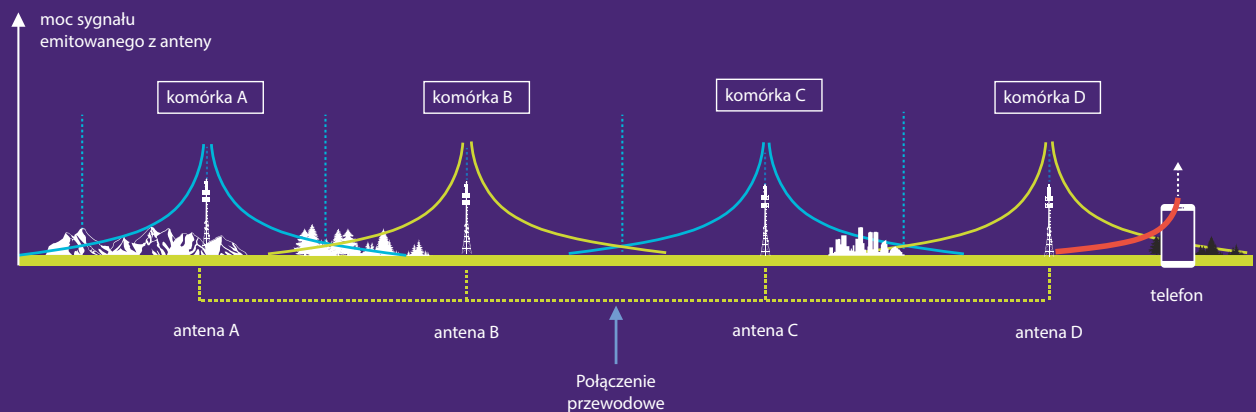
Rys. 4. Sieć mobilna z pojedynczą stacją bazową.

Drugi powód związany jest z ograniczoną liczbą kanałów transmisyjnych. Kiedy użytkownicy z całego kraju musieliby współdzielić relatywnie niewielką liczbę kanałów dostępnych danemu operatorowi, dochodziłoby często do sytuacji, że podejmowana byłaby próba połączenia przy zajętych wszystkich kanałach przez pozostałych użytkowników, co skończyłoby się odrzuceniem połączenia i komunikatem „sieć zajęta”.

Trzeci powód dotyczy problemu z powiększaniem obszaru dostępności sieci. Jeżeli nadawca chciałby dołączyć użytkowników z sąsiedztwa pokrywanego obszaru, wiązałoby się to z jeszcze większym wymaganiem na moc nadajnika stacji bazowej i zwiększeniem konkurencji o ograniczone zasoby kanałów transmisyjnych.

Na szczęście wszystkie te problemy da się rozwiązać wprowadzając podział obszaru na tzw. **komórki**, czyli mniejsze obszary, którym przypisuje się dedykowane im oddzielne stacje bazowe (Rys. 5). Zmniejszony obszar obsługiwany przez daną stację bazową pozwala na zmniejszenie mocy nadajników sygnału i w stacjach bazowych, i w telefonach. Ponadto, pasma częstotliwości użyte w jednej komórce mogą być wykorzystane w innych wystarczająco oddalonych komórkach. Jest to możliwe właśnie dzięki mniejszej

mocy nadajników – sygnał docierający do odległych komórek jest na tyle słaby, że nie wprowadza zakłóceń do sygnałów emitowanych wewnątrz nich w tym samym paśmie. Zmniejsza to znacząco konkurencję o kanały transmisyjne i pozwala także na łatwe rozbudowywanie sieci o kolejne komórki.



Rys. 5. Koncepcja sieci komórkowej.

Ponieważ częstotliwości nośne wykorzystywane w telefonii mobilnej są bardzo wysokie (w sieciach 5G mogą sięgać nawet $26 \text{ GHz} = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$), efekty dyfrakcyjne fal EM są niewielkie (patrz Lekcja 6) i wskazane jest maksymalne ograniczenie liczby przeszkód pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem sygnału. Dzięki podziałowi na komórki można znacznie łatwiej dobrać położenie stacji bazowej oraz wysokość zawieszenia jej anten tak, by zapewnić jej jak najlepszą widoczność (a tym samym – bezpośrednie połączenie z telefonami) w możliwie największej części obejmowanego przez nią obszaru. Ma to szczególne znaczenie w warunkach zabudowy miejskiej.

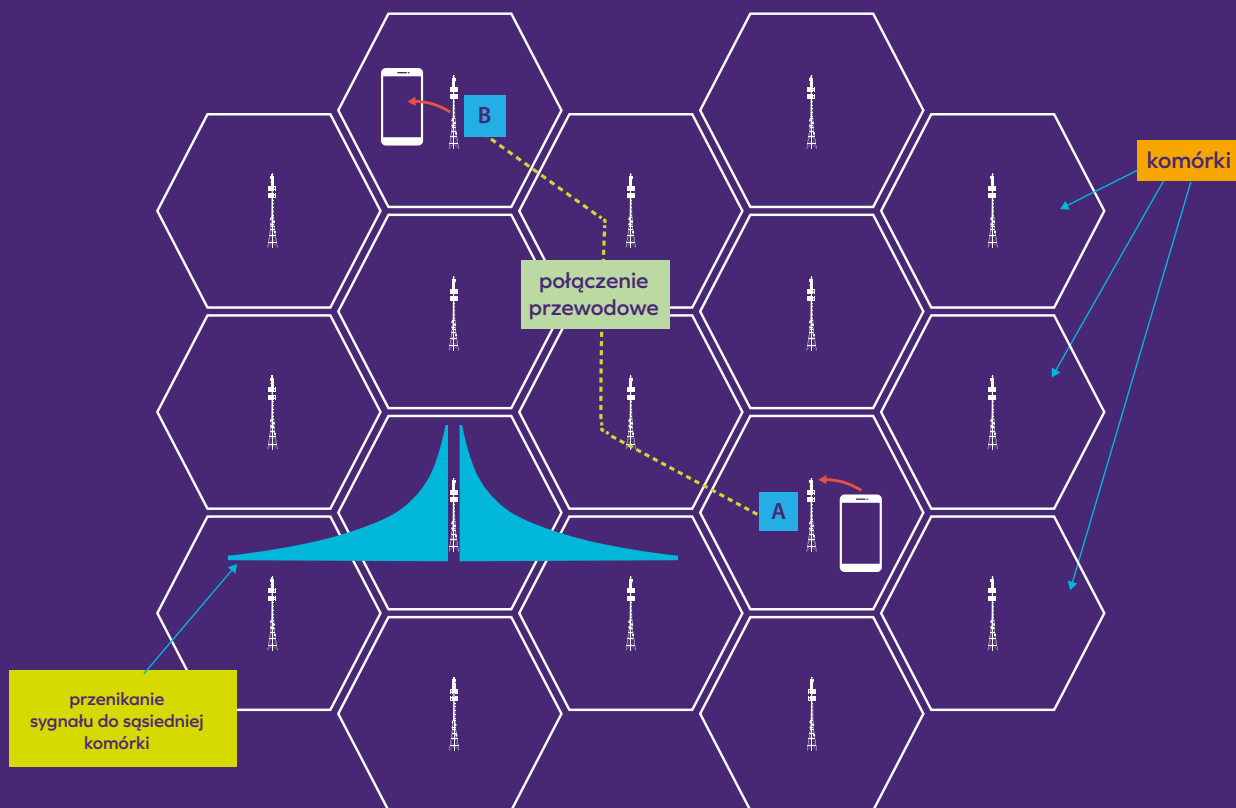
W jaki sposób stacje bazowe łączą się pomiędzy sobą? Szczęśliwie nie są to już obiekty ruchome, zatem wystarczy je połączyć siecią przewodową (uwaga: czasami stosuje się dedykowane, silnie ukierunkowane łącze radiowe, ale dla uproszczenia skupimy się na połączeniach przewodowych).

Faktyczny podział obszaru często odbywa się z wykorzystaniem komórek sześciokątnych, jak pokazano na Rys. 6. Sześciokąty mają tę korzystną właściwość, że można nimi swobodnie pokrywać płaszczyznę bez luk, a przy tym, w przeciwieństwie do trójkątów równobocznych lub kwadratów, niewiele odbiegają kształtem od koła.

4. Połączenia telefoniczne w sieci komórkowej

Przypatrzmy się jeszcze Rys. 6. Sygnał emitowany przez stację bazową w danej komórce zawsze do pewnego stopnia przenika do komórek sąsiednich. Po części jest to efekt niekorzystny – w końcu wprowadziliśmy podział na komórki m.in. po to, by mieć możliwość użycia tych samych kanałów transmisyjnych w różnych częściach obszaru. Przenikanie sygnału do sąsiednich komórek oznacza, że nie mogą one korzystać z kanałów transmisyjnych występujących w ich bezpośrednim sąsiedztwie.

Z drugiej strony, utrzymywanie się sygnału na granicach komórek pozwala na płynne „przekazywanie” połączenia telefonicznego, gdy użytkownik sieci przekracza te granice, a może się to jak najbardziej zdarzyć, gdyż sieć telefonii komórkowej została zaprojektowana właśnie pod kątem mobilnych użytkowników. Kiedy zatem w trakcie rozmowy telefonicznej przechodzimy z jednej komórki do drugiej, przez jakiś czas utrzymujemy połączenie z poprzednią stacją bazową i dopiero, gdy sygnał ze stacji obsługującej drugą komórkę będzie wystarczająco silny, połączenie zostanie do niej przekazane.



Rys. 6. Podział komórkowy na powierzchni danego obszaru.

A jak wygląda sam proces nawiązywania połączenia? Telefon znajdujący się w komórce A wysyła odpowiedni sygnał z żądaniem połączenia do stacji bazowej jego komórki. Stacja bazowa odczytuje potrzebne informacje (m.in. kto dzwoni i do kogo) i przekazuje je drogą przewodową do centrum zarządzania siecią. Centrum odnajduje komórkę, w której znajduje się cel połączenia i zestawia połączenie przewodowe pomiędzy stacjami bazowymi komórek A i B. Następnie stacja bazowa B nawiązuje połączenie bezprzewodowe z telefonem docelowym.

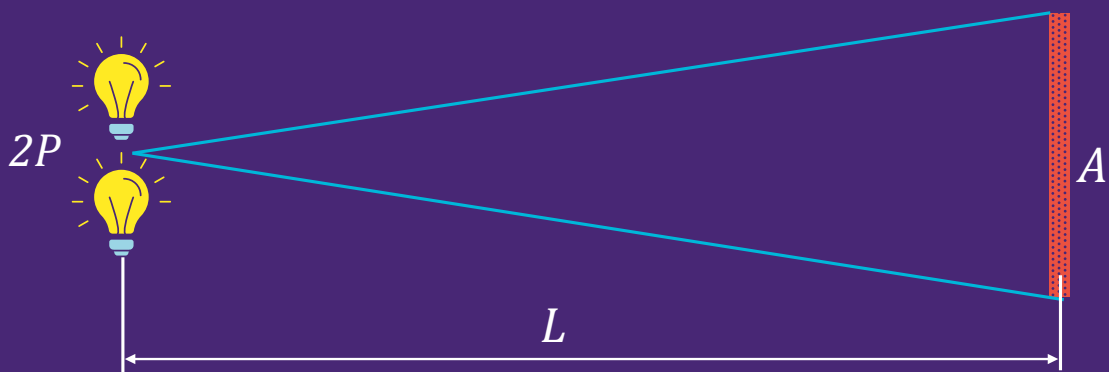
A w jaki sposób centrum zarządzania odnajduje poszczególne telefony? Otóż każdy telefon okresowo nawiązuje krótkie połączenie ze stacjami bazowymi w okolicy informując o swoim położeniu, dzięki czemu w razie potrzeby komórka, w której znajduje się telefon, może być natychmiast zlokalizowana.



Doświadczenie

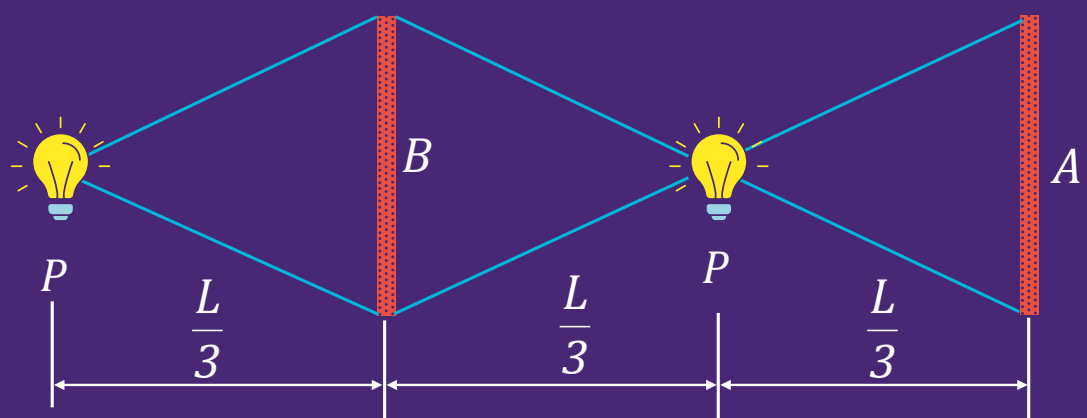
Przeprowadzimy doświadczenie, które pozwoli nam na ocenę efektywności rozprawa-
dzenia energii fali EM w danym obszarze dwoma sposobami: w jednym użyjemy moc-
nego źródła umieszczonego w jednym miejscu, zaś w drugim – dwóch słabszych źródeł
rozłożonych równomiernie. Falą EM będzie w tym przypadku światło, a jego źródłem
– żarówki.

Zaciemnijmy maksymalnie pomieszczenie i umieśćmy dwie identyczne żarówki możliwie
blisko siebie i w pewnej odległości L od nieprzezroczystego ekranu A (Rys. 7). Zwróć
uwagę na stopień oświetlenia ekranu przy obecnym ustawieniu źródeł.



Rys. 7. Oświetlenie za pomocą żarówek umieszczonych w jednym miejscu.

Następnie wprowadźmy drugi ekran – B – i umieśćmy go wraz z jedną z żarówek tak, jak
pokazano na Rys. 8. Dzięki takiemu ustawieniu oba ekrany powinny być oświetlone w jed-
nakowym stopniu. Czy jesteś w stanie ocenić, w którym z ustawień ekrany są bardziej
oświetlone?



Rys. 8. Oświetlenie za pomocą żarówek rozmieszczonych równomiernie.



Dyskusja. Przypomnijmy sobie doświadczenie z Lekcji 2. Skorzystaliśmy tam ze wzoru na natężenie fali świetlnej w pewnej odległości r , gdy źródło ma moc P . Użyjmy tego samego wzoru do oszacowania natężenia oświetlenia ekranu A w pierwszym ustawieniu:

$$I_1 = a \frac{2P}{L^2}$$

Wstawiliśmy tutaj jako moc źródła $2P$, gdyż mamy do czynienia z dwoma identycznymi żarówkami znajdującymi się w odległości L od ekranu (a jest tutaj pewnym mnożnikiem, którego wartość okaże się nieistotna).

A czemu jest równe natężenie oświetlenia ekranu A w drugim ustawieniu (dla ekranu B będzie takie samo i to po obu stronach):

$$I_2 = a \frac{P}{(L/3)^2} = a \frac{9P}{L^2}$$

Zatem stosunek obu natężeń jest równy:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{a \frac{9P}{L^2}}{a \frac{2P}{L^2}} = 4,5$$

Widzimy zatem, że natężenie oświetlenia w drugim przypadku jest ponad czterokrotnie większe! Kiedy zależy nam więc na dobrym oświetleniu większego obszaru, bardziej korzystne jest równomierne rozłożenie źródeł światła, niż skupianie ich w jednym miejscu.

Podobnie jest w przypadku stacji bazowych telefonii mobilnej. Z punktu widzenia pokrycia określonego obszaru, lepiej jest wprowadzić wiele równomiernie rozmieszczonych anten z nadajnikiem mniejszej mocy niż jedną antenę z nadajnikiem o mocy równej sumie mocy nadajników poszczególnych anten.



Słowniczek

Kanał transmisyjny – pasmo przydzielone danemu nadawcy wokół określonej częstotliwości nośnej.

Komórka – obszar wydzielony z całego regionu obsługiwanego przez operatora sieci mobilnej z przypisaną mu stacją bazową i zbiorem kanałów transmisyjnych.

Stacja bazowa (inaczej BTS) – zespół anten połączony z urządzeniami nadawczo-odbiorczymi pozwalający na bezprzewodowe połączenie telefonów z siecią telefonii mobilnej. Stacje bazowe połączone są ze sobą przewodowo lub z wykorzystaniem dedykowanych łączy radiowych.

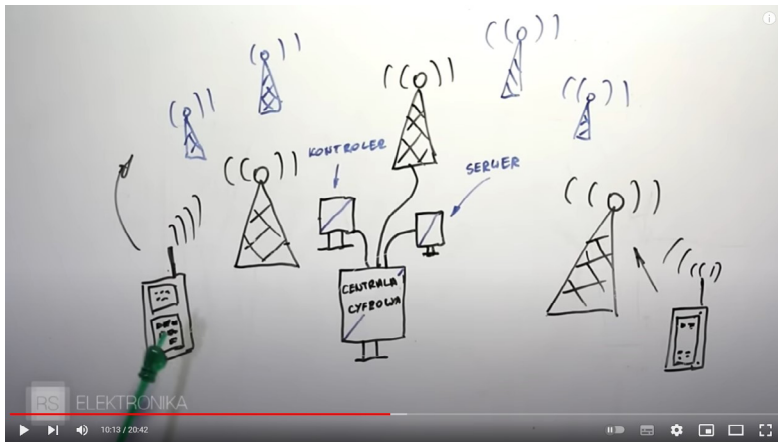
BTS (ang. *base transceiver station*) – skrótowa nazwa stacji bazowej sieci telefonii mobilnej.

GSM (ang. *Global System for Mobile Communications*) – skrótowa nazwa jednego z najpopularniejszych standardów telefonii komórkowej.



Materiały zewnętrzne

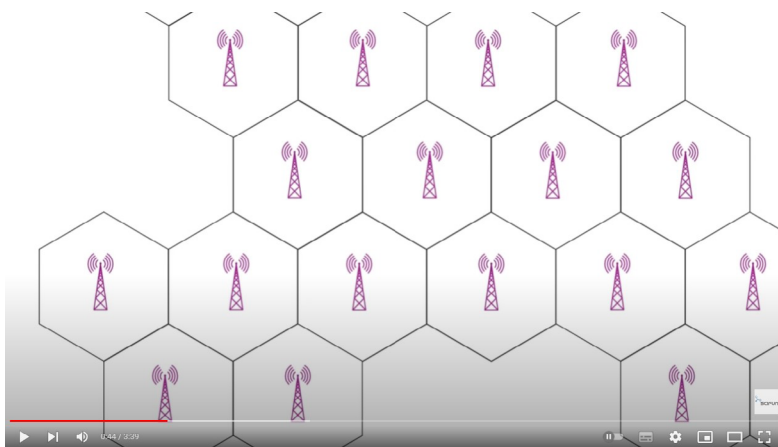
1. Jak działają sieci komórkowe.



Zeskanuj QR kod



2. Czym jest roaming i jak działa? – film edukacyjny nie tylko o samym roamingu, ale i o podstawach działania sieci komórkowej.

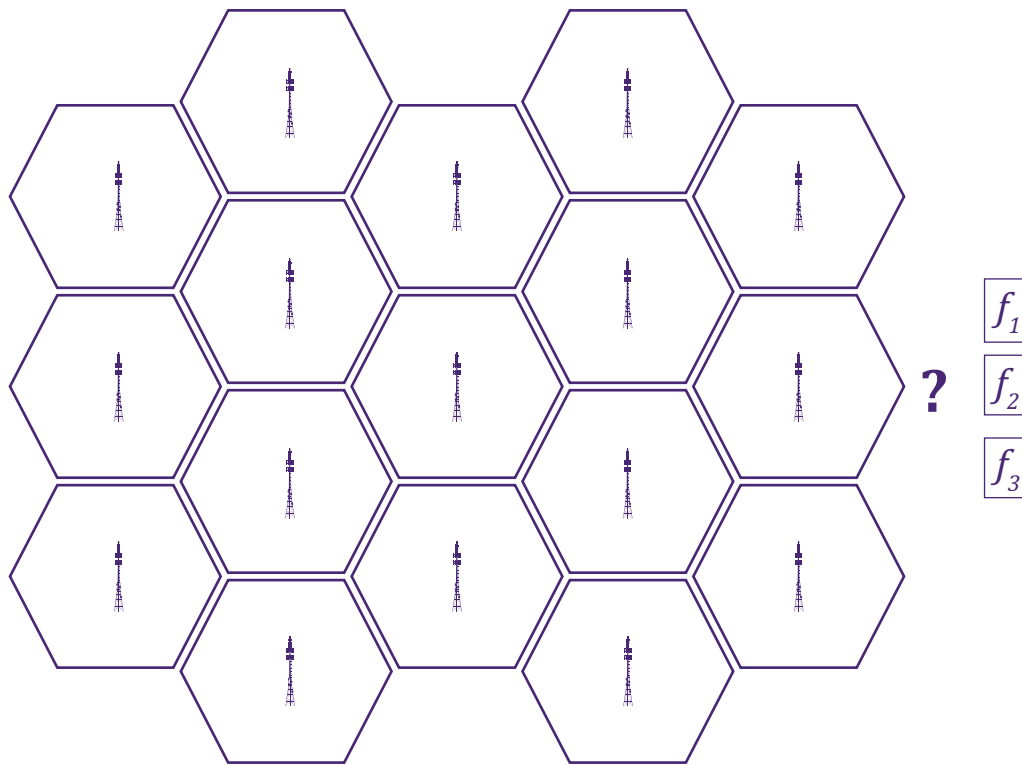


Zeskanuj QR kod



Praca domowa

1. Dla sieci komórkowej z rysunku poniżej należy przydzielić kanały transmisyjne. Sąsiadujące ze sobą komórki nie mogą mieć przydzielonego tego samego kanału ze względu na przenikanie sygnału przez granice komórek. Każdy kanał będziemy umownie nazywać przypisaną mu częstotliwością nośną (ze zbioru: f_1, f_2, f_3 , itd.). Czy zadanie może być zrealizowane przy wykorzystaniu tylko dwóch kanałów (f_1 i f_2)? Uzasadnij odpowiedź. A w przypadku trzech kanałów (f_1, f_2 i f_3)? Jeżeli tak, wpisz odpowiedni symbol do każdej z komórek.



2. Oblicz minimalną częstotliwość nośną dla sygnału o szerokości pasma 50 MHz i anteny dipolowej o długości 1 m. Do emisji sygnału zostanie wykorzystana modulacja AM. Przyjmij prędkość fali EM jako $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Dane:

$B = 50 \text{ MHz} = 50 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 5 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ – szerokość pasma sygnału modulującego.

$l = 1 \text{ m}$ – długość anteny.

Szukane:

$$f_n = ?$$