

Temat: Symulacja rozchodzenia się sygnału ISM 2.4 GHz

Zamodelowanie procesu rozchodzenia się fali elektromagnetycznej o częstotliwości 2,4 GHz w pomieszczeniach.

## **Wykorzystanie pasma 2,4 GHz**

Pasmo częstotliwości 2,4 GHz, w którym pracują najbardziej dziś popularne urządzenia RLAN zgodne z normami IEEE 802.11b/g, jest jednym z pasm częstotliwości przeznaczonych w Regulaminie Radiokomunikacyjnym dla potrzeb urządzeń przemysłowych, naukowych i medycznych (*Industry, Scientific, Medical, ISM*). Pasma częstotliwości ISM z definicji nie są pasmami chronionymi. Oznacza to, że użytkownicy systemów pracujących w paśmie ISM muszą się liczyć z występowaniem zakłóceń radioelektrycznych, których konsekwencją może być znaczne obniżenie jakości transmisji radiowej, a nawet przerwy w łączności. Natomiast istotną zaletą pasma 2,4 GHz jest fakt, że jest ono udostępnione w większości uprzemysłowionych krajów świata. Podstawowe ustalenia dotyczące przeznaczenia zakresu częstotliwości  $2400 \div 2483,5$  MHz, nazywanego pasmem 2,4 GHz, dla radiowych sieci lokalnych (RLAN) zawiera decyzja Europejskiego Komitetu Radiokomunikacyjnego ERC/DEC/(01)07.

Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego, nazywane inaczej promieniowaniem elektromagnetycznym. Istnieją różne rodzaje fal elektromagnetycznych, które nas otaczają, choć tylko niektóre z nich są przez nas dostrzegalne.

Ze względu na środowisko rozchodzenia się fali elektromagnetycznej wyróżnia się fale przyziemną, troposferyczną, jonosferyczną i falę w przestrzeni kosmicznej.

Fale radiowe to fale elektromagnetyczne o długości większej niż 0,1 mm. Ze względu na ich długość (czy też częstotliwość) rozróżnia się ich poszczególne typy. Fale radiowe powstają przez wypromieniowanie energii ze źródła najczęściej określanego jako „antena nadawcza”.

Mikrofale są to fale elektromagnetyczne o długości 0,1mm–30 cm. Mogą być wytwarzane w elektronicznych układach drgających, podobnie jak fale radiowe (dlatego dość często zalicza się je do fal radiowych). Mikrofały o częstotliwości 2 - 4 GHz mają długość 7.5 - 15 cm.

Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych jest uwarunkowane wpływem ośrodków biorących udział w propagacji, wyjątkowo trudnym do analitycznego ujęcia w przypadku tych o znacznym stopniu niejednorodności. W eksploatacji systemów radiokomunikacyjnych istotne znaczenie ma określenie strat transmisji na trasie łączy, zniekształceń sygnałów i zmiany kierunku propagacji fali elektromagnetycznej.

## **Środowisko propagacji fal elektromagnetycznych wewnątrz budynków**

W ostatnich latach następuje dynamiczny wzrost liczby urządzeń korzystających z komunikacji bezprzewodowej. Trudno wyobrazić sobie dzisiaj funkcjonowanie bez dostępu do Internetu. Połączenie sieciowe towarzyszy nam od rana do wieczora, na ekranie smartfonów, tabletów i komputerów. Dlatego konieczne jest prowadzenie symulacji pracy urządzeń bezprzewodowych w różnych środowiskach propagacyjnych. Optymalne wykorzystanie systemów bezprzewodowych wewnątrz budynków jest jednym z największych wyzwań projektowych. Przyczyną problemów są skomplikowane zjawiska fizyczne towarzyszące propagacji fali radiowej w zamkniętych obiektach.

### **Zjawiska fizyczne towarzyszące propagacji (rozprzestrzenianiu się) fal radiowych wewnątrz budynku:**

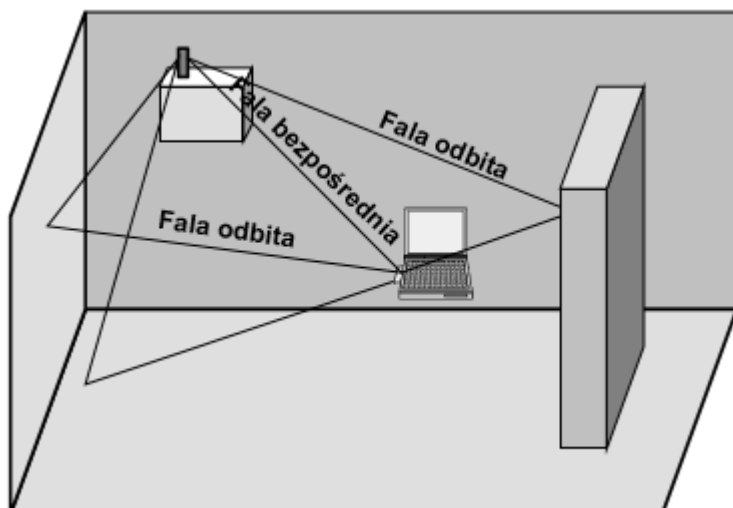
#### Odbicie fali

Fala padająca na przeszkody ulega odbiciu. Promień fali tworzy z normalną do powierzchni kąt padania. Po odbiciu fala biegnie w innym kierunku, wyznaczony przez promień fali odbitej. Promień ten tworzy z normalną do powierzchni kąt odbicia.

Według prawa odbicia kąt odbicia jest równy kątowi padania. Promień fali padającej, normalna i promień fali odbitej leżą w jednej płaszczyźnie.

Jeżeli powierzchnia odbijająca jest chropowata i nieregularna, dochodzi do rozproszenia fali. Fala, która pada na powierzchnię w określonym kierunku, po odbiciu rozchodzi się w wielu kierunkach równocześnie, ponieważ kąt padania na każdy fragment powierzchni jest inny.

- Odbicia występują, gdy propagowana fala radiowa spotyka na drodze obiekt, który ma bardzo duży rozmiar w porównaniu z długością propagowanej fali. Odbicia tworzą się na powierzchni ziemi, sufitów, podłogi oraz ścian i murów. Rozpraszanie powstaje często przez ostre krawędzie, małe obiekty.



### *Odbicia sygnału od ścian i wyposażenia pomieszczeń* Załamanie fal

Gdy fala pada na granice między dwoma ośrodkami, w których rozchodzi się z różnymi szybkościami, to przy przejściu do drugiego ośrodka kierunek jej rozchodzenia ulega zmianie. Kąt zawarty między promieniem fali padającej a prostą prostopadłą do powierzchni granicznej nazywamy kątem padania. Natomiast kąt zawarty między promieniem fali załamanej i prostą prostopadłą do powierzchni granicznej nazywamy kątem załamania. Jeżeli fala przechodzi do ośrodka, w którym rozchodzi się wolniej, to załamuje się w taki sposób, że kąt załamania jest mniejszy od kąta padania. Jeżeli fala przechodzi do ośrodka, w którym rozchodzi się z większą szybkością, kąt załamania jest większy od kąta padania.

Dyfrakcja, czyli ugięcie (zmiana kierunku) fali podczas przechodzenia obok przeszkód i przez szczeliny. Ugięcie jest tym silniejsze im bardziej wielkość przeszkody lub szczeliny jest zbliżona do długości fali.

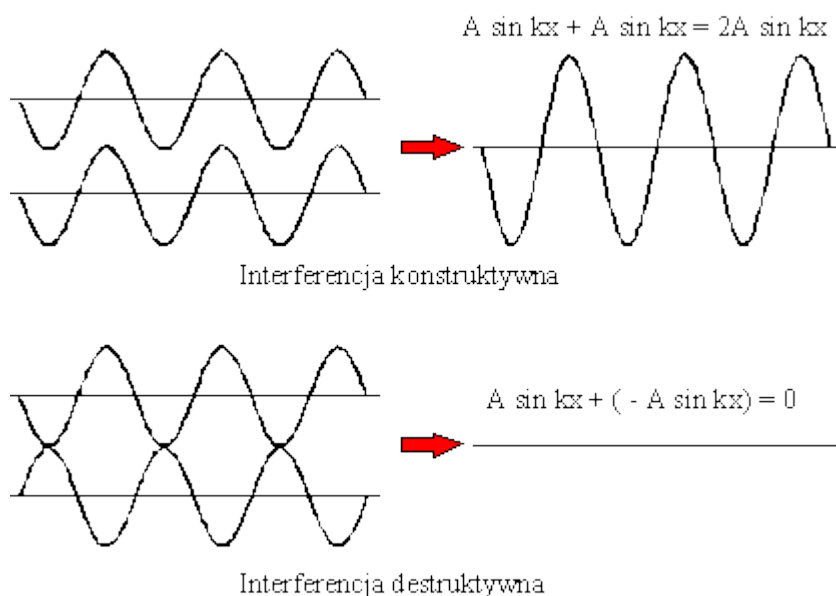
Dyfrakcja fal polega na opływaniu przeszkody jaką napotyka fala na swej drodze (krawędzi szczeliny, przez którą przechodzi fala lub brzegów przesłony zatrzymującej falę).

Do opisu zjawiska dyfrakcji wykorzystuje się zasadę Huyghensa, mówiącą o tym, że wszystkie punkty czoła fali można potraktować jako źródła nowych fal kulistych.

Interferencja (nakładanie się) fal może prowadzić do ich dodawania się i wzmocnienia (interferencja konstruktywna) lub do odejmowania się i wzajemnego wygaszania (interferencja destruktywna). Kiedy nakładające się fale mają ten sam kierunek i długość fali  $\lambda$  oraz są zgodne w fazie wtedy występuje interferencja konstruktywna. Amplituda fali wypadkowej jest dwa razy większa niż amplituda  $A$  obu fal oddzielnie. Ponieważ natężenie fali  $I$  jest proporcjonalne do kwadratu jej amplitudy ( $I \sim A^2$ ) to natężenie fali wypadkowej jest czterokrotnie większe niż natężenie każdej z fal oddzielnie. Jeżeli obie spotykające się fale są przesunięte względem siebie o połówkę długości fali, czyli drgają w przeciwfazie to rezultatem ich nałożenia się będzie ich całkowite wygaszenie.

Termin „interferencja” odnosi się do każdej sytuacji, w której dwie lub więcej fal nakłada się w przestrzeni. W opisie zjawiska interferencji stosujemy zasadę superpozycji liniowej: Kiedy

dwie lub więcej fal nakłada się na siebie, to wypadkowe wychylenie w każdym punkcie i w każdym momencie może być znalezione przez dodawanie wychyleń w tym punkcie wywoływanych przez poszczególne fale tak, jak gdyby każda z nich występowała tam oddzielnie.



Wewnątrz budynków omawiane zjawiska wprowadzają dodatkowe ścieżki propagacji między nadajnikiem a odbiornikiem (zjawisko wielościeżkowości) na bezpośredniej linii widoczności. Gdy istnieje wiele ścieżek propagacji sygnałów, powodowanych przez rozmaite zjawiska, aktualnie odbierany poziom sygnału jest wektorem sumy wszystkich sygnałów pochodzących z dowolnego kierunku. Niektóre sygnały będą wspomagały ścieżkę bezpośrednią, podczas gdy inne będą znosiły ścieżki z różnych kierunków.

Występują dwa rodzaje wielościeżkowości: lustrzana – pochodząca od dyskretnych, koherentnych odbić od gładkich powierzchni metalowych, oraz rozproszona - pochodząca od rozproszonych źródeł czy zjawiska dyfrakcji. Obie utrudniają komunikację radiową. Rozproszona wprowadza pewien rodzaj interferencji, natomiast lustrzana może powodować powstawanie martwych pól w zasięgu. Ten problem jest szczególnie trudny do wyeliminowania w tunelach, na trasach metra oraz małych pokojach. Prawidłowe funkcjonowanie komunikacji radiowej wymaga zminimalizowania lub wyeliminowania wielościeżkowości.

Bardzo trudno projektować budynki przyjazne dla fal radiowych (optymalnym materiałem jest drewno), wolne od zjawisk wielościeżkowości, odbić, dyfrakcji na krawędziach ścian lub rozpraszania na ścianach, podłogach, wnękach. Propagacja fal wewnątrz budynków, ze ścianami zawierającymi dużo metalu, jest już praktycznie nie do zaakceptowania.

Analiza propagacji fal w zakresie wielkich częstotliwości (np. Wireless Fidelity, Wi-Fi) wiąże się z koniecznością badania zjawisk związanych z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego i materiałów budowlanych o różnych właściwościach. Stosowanie

nowoczesnych systemów komunikacji bezprzewodowej wymaga uwzględnienia efektów mogących pogarszać zakładaną jakość transmisji danych. Zjawiska, takie jak dyfrakcja, czy interferencja, są tematem licznych badań mających na celu jak najdokładniejsze określenie rozkładu natężenia pola w rozpatrywanych pomieszczeniach.

Analiza pól występujących w systemach komunikacji bezprzewodowej wymaga również rozpatrzenia efektów związanych z ugięciami, wielokrotnymi odbiciami czy tłumieniem fali na obszarach o zróżnicowanej zabudowie. Wskazane zjawiska są efektem rozchodzenia się fal w strukturach zawierających elementy metalowe i zbudowane z niedoskonałych dielektryków (np. beton, gazobeton, różne odmiany cegieł). Występują w nich złożone układy, zawierające struktury periodyczne oraz elementy o szczególnych właściwościach materiałowych i nietypowej geometrii. W takim przypadku należy ocenić wpływ: zakłóceń, zjawisk nakładania się fal od sąsiednich stacji bazowych, opóźnień sygnałów, czasowej zmiany w tłumieniu i zaniku sygnału na projektowany bezprzewodowy kanał transmisyjny. Konstrukcja odpornych, stabilnych i o oczekiwanych właściwościach sieci komunikacji bezprzewodowej wymusza już na etapie projektowania systemu uwzględnienie: geometrii, konstrukcji budynków, złożonych struktur materiałowych występujących na drodze między nadajnikiem a odbiornikiem.

Wskazane problemy są szczególnie widoczne w przypadku sieci bezprzewodowych Wi-Fi o małym zasięgu, stosowanych w budynkach. Uwzględnienie nowych konstrukcji (np. dobudówka), jak również już istniejących budynków ma znaczenie przy rozmieszczaniu stacji (np. Access Point, AP). Wskazana technologia pozwala m.in. na przesyłanie danych między komputerami, wspólne użytkowanie jednego szerokopasmowego połączenia, łączenia się z serwerem bez konieczności instalowania przewodów.

## **Modelowanie tłumienia propagacyjnego wewnątrz budynków**

- Modele propagacyjne dzielimy na przeznaczone do analizy tłumienia wewnątrz budynków oraz w środowisku miejskim (na zewnątrz budynków). Istnieje możliwość wyznaczenia tłumienności określonej trasy przy wykorzystaniu kilku modeli i porównanie uzyskanych wartości tłumienności ze sobą. Główną trudnością i najważniejszym elementem w procesie wyznaczania tłumienności tras z wykorzystaniem modeli propagacyjnych jest odpowiedni i umiejętny dobór określonego modelu propagacyjnego odpowiednio do analizowanej sytuacji. W przypadku nieoptymalnego wyboru wyznaczona wartość tłumienia trasy może różnić się o kilka a nawet kilkanaście dB w stosunku do wartości pomierzonej.

Rozchodzenie fal elektromagnetycznych we wnętrzach budynków jest bezpośrednio powiązane z jego architekturą, na którą składa się przede wszystkim określona liczba ścian i stropów o różnej grubości i wykonana w różnej technologii oraz z różnego materiału zamkniętego w danej przestrzeni oraz elementy wyposażenia znajdujące się w pomieszczeniach.

- **Propagację fal radiowych wewnątrz budynków** charakteryzują:

– na ogół małe odległości pomiędzy przeszkodami, różnorodność i zmienność przeszkód

(ściany, stropy, meble i inne wyposażenie),

– zmienność sytuacji (drzwi otwarte / zamknięte, przechodzące osoby),

– zmienność otoczenia na małej odległości,

– małe odległości między komunikującymi się urządzeniami.

Ze względu na wielokrotne odbicia sygnału radiowego od podłogi, sufitu, ścian i wyposażenia pomieszczeń jest to środowisko "niepowtarzalne", trudne do odwzorowania za pomocą uniwersalnych modeli propagacji fal radiowych, które dają się stosować w postaci formuł przydatnych do obliczeń inżynierskich.

- W zaleceniu **ITU-R P.1238-3** zakłada się, że AP i terminal znajdują się w tym samym budynku. Uwzględnia się tłumienie fal pomiędzy piętrami, co pozwala planować wykorzystanie

częstotliwości na poszczególnych piętrach. Każdą ścianę można traktować jako dodatkowe tłumienie. Do obliczania tłumienia trasy podano formułę:

$L_t = 20 \log f + 10 n \log D + L(N) + 28 \log t f$  [dB], gdzie:

$L_t$  - całkowite tłumienie trasy [dB],

$f$  - częstotliwość fali [MHz],

$D$  - odległość terminal – AP [m],

$n$  - współczynnik charakteryzujący środowisko propagacji, przy czym:

$n = 3,2$  dla pomieszczeń biurowych,

$n = 2,8$  dla wnętrza domowego,

$N$  - liczba pięter,

$L_f(N)$  - tłumienie pięter [dB].

Dla typowych zakresów częstotliwości stosowanych w RLAN wzór można uprościć do postaci:

$L(2,45 \text{ GHz}) = 40 + 10 n \log D + L(N) + 28 \log t f$  [dB],

$L(5,2 \text{ GHz}) = 46 + 10 n \log D + L(N) + 28 \log t f$  [dB].

Dla budynku biurowego:  $L(1) = 41 + 10 n \log D$  [dB] przy częstotliwości rzędu 2 GHz,

$L_f = 16$  dB dla piętra przy częstotliwości 5,2 GHz.

Zwrócono uwagę na to, że:

\_ na trasach, gdzie do terminala dochodzi i dominuje składowa bezpośrednia (LOS), np.

w halach, dużych sklepach detalicznych, można przyjąć  $n \approx 2$ ;

Niektórzy autorzy stosują tę zasadę w odległości do 8 m.

\_ korytarze wykazują tłumienie mniejsze niż obserwowane w otwartej przestrzeni, można przyjąć  $n \approx 1,8$ ;

\_ propagacja na długiej trasie z występującymi przeszkodami, zaburzającymi pierwszą strefę Fresnela  $n \approx 2$  do 4;

\_ przy propagacji przez przeszkody, np. z pokoju do pokoju, należy przyjmować  $n \approx 4$ ;

\_ wszystkie kanały nawiewu powietrza, instalacje elektryczne i podwieszane sufity zwiększają wypadkowe tłumienie piętra.

Standardowa dewiacja tłumienia trasy w pomieszczeniach wynosi ok. 10 dB dla pasma 2,4 GHz i ok. 12 dB dla pasma 5,2 GHz.

Znany producent urządzeń RLAN Atheros Communications [37] zaleca inną formułę szacowania tłumienia sygnału o częstotliwości 2,4 GHz w pomieszczeniach:

$L_i[\text{dB}] = L(1) + 10 \log[Dn] = L(1) + 10 n \log(D)$  gdzie:

$L(1)$  – tłumienie w odległości 1 m od AP, wynoszące 41 dB,

$D$  – odległość [m],

$n$  – wykładnik charakteryzujący tłumienie środowiska, równy:

$n = 2$  dla otwartej przestrzeni,

$n = 3,3$  dla otwartej przestrzeni biurowej,

$n = 4,5$  dla domu.

Posługując się tą zależnością można wyznaczyć tłumienie trasy pomiędzy pierwszym punktem znajdującym się np. w odległości 10 m, a kolejnymi punktami odległymi od siebie np. o 10 m. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 4 oraz w formie wykresów na rys. 28

Standardowa dewiacja tłumienia trasy w pomieszczeniach wynosi ok. 10 dB dla pasma 2,4 GHz.

- **Path loss** - model utraty ścieżki logarytmicznej odległości, jest modelem propagacji radiowej, który przewiduje utratę ścieżki napotkanej przez sygnał wewnątrz budynku lub gęsto zaludnionych obszarów na odległość.

W badaniu komunikacji bezprzewodowej utratę ścieżki można przedstawić za pomocą wykładnika utraty ścieżki, którego wartość zwykle mieści się w przedziale od 2 do 4 (gdzie 2 dotyczy propagacji w wolnej przestrzeni, 4 oznacza względnie stratne środowiska i przypadek pełne odbicie lustrzane od powierzchni ziemi - tak zwany model płaskiej ziemi). W niektórych środowiskach, takich jak budynki, stadiony i inne środowiska wewnętrzne, wykładnik utraty ścieżki może osiągnąć wartości w zakresie od 4 do 6. Z drugiej strony tunel może działać jako falowód, powodując wykładnik utraty ścieżki mniejszy niż 2).

### Formułowanie matematyczne

Utrata ścieżki (tłumienie) jest zwykle wyrażana w decybelach. W najprostszej postaci utratę ścieżki można obliczyć za pomocą formuły:

$$L=10n\log_{10} (d)+C$$

Gdzie  $L$  oznacza utratę ścieżki w decybelach,  $n$  jest wykładnikiem utraty ścieżki,  $d$  to odległość między nadajnikiem i odbiornikiem, zwykle mierzona w metrach, oraz  $C$  jest stałą, która uwzględnia straty systemowe.

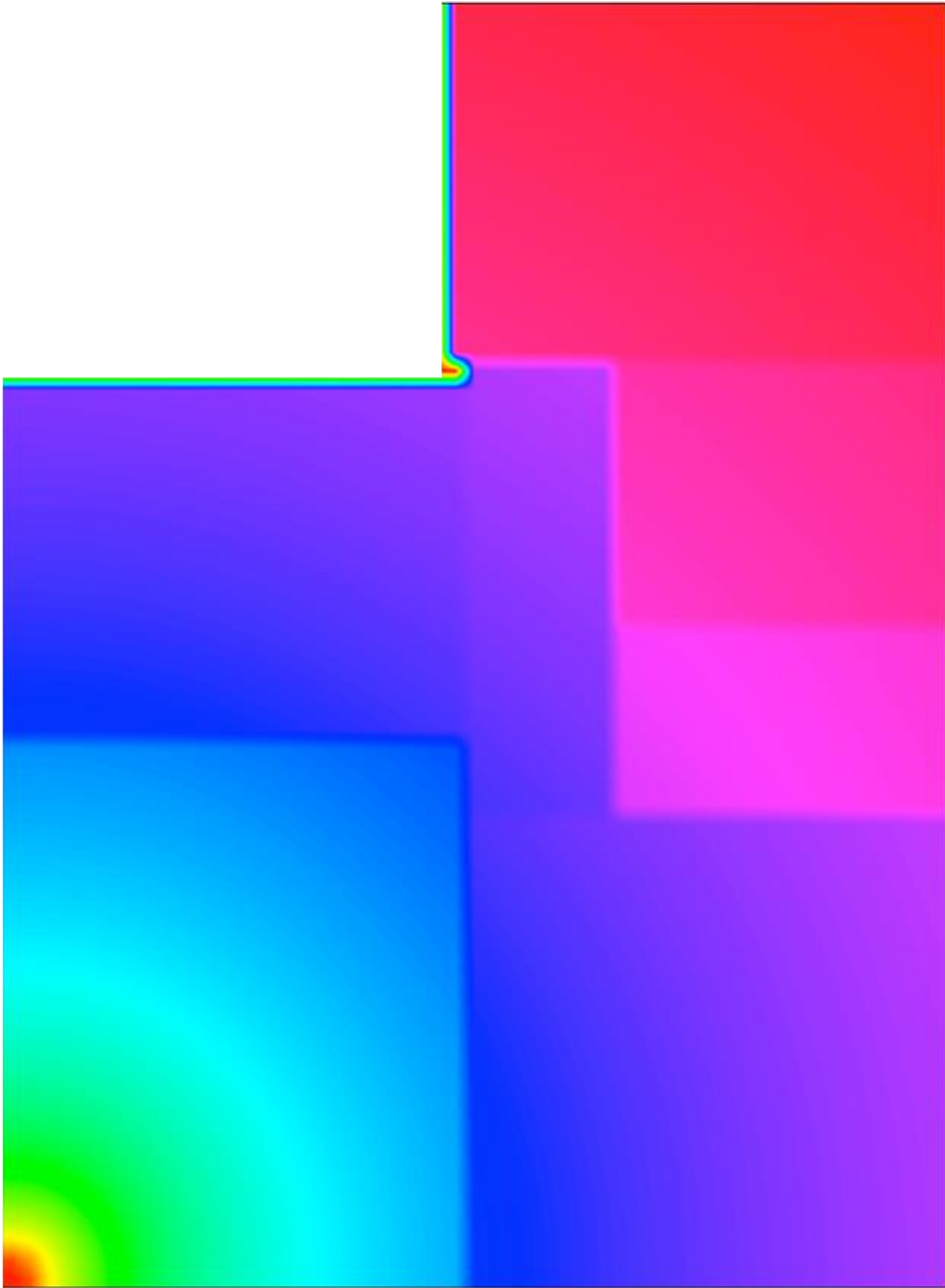
Wi-Fi to technologia oparta na komunikacji radiowej, czyli na transmisji sygnału za pośrednictwem fal radiowych, które podatne na różnego rodzaju przeszkody terenowe, takie jak ściany, drzwi czy inne elementy konstrukcyjne domu. Dlatego jeśli umieścimy router możliwie na środku, sygnał będzie musiał pokonać podobną drogę do wszystkich urządzeń, a zakłócenia w niektórych pomieszczeniach będą zminimalizowane. Najlepszym miejscem na ustawienie routera będzie więc punkt centralny domu, ponieważ taka lokalizacja sprzyja równomiernemu rozchodzeniu się sygnału Wi-Fi.

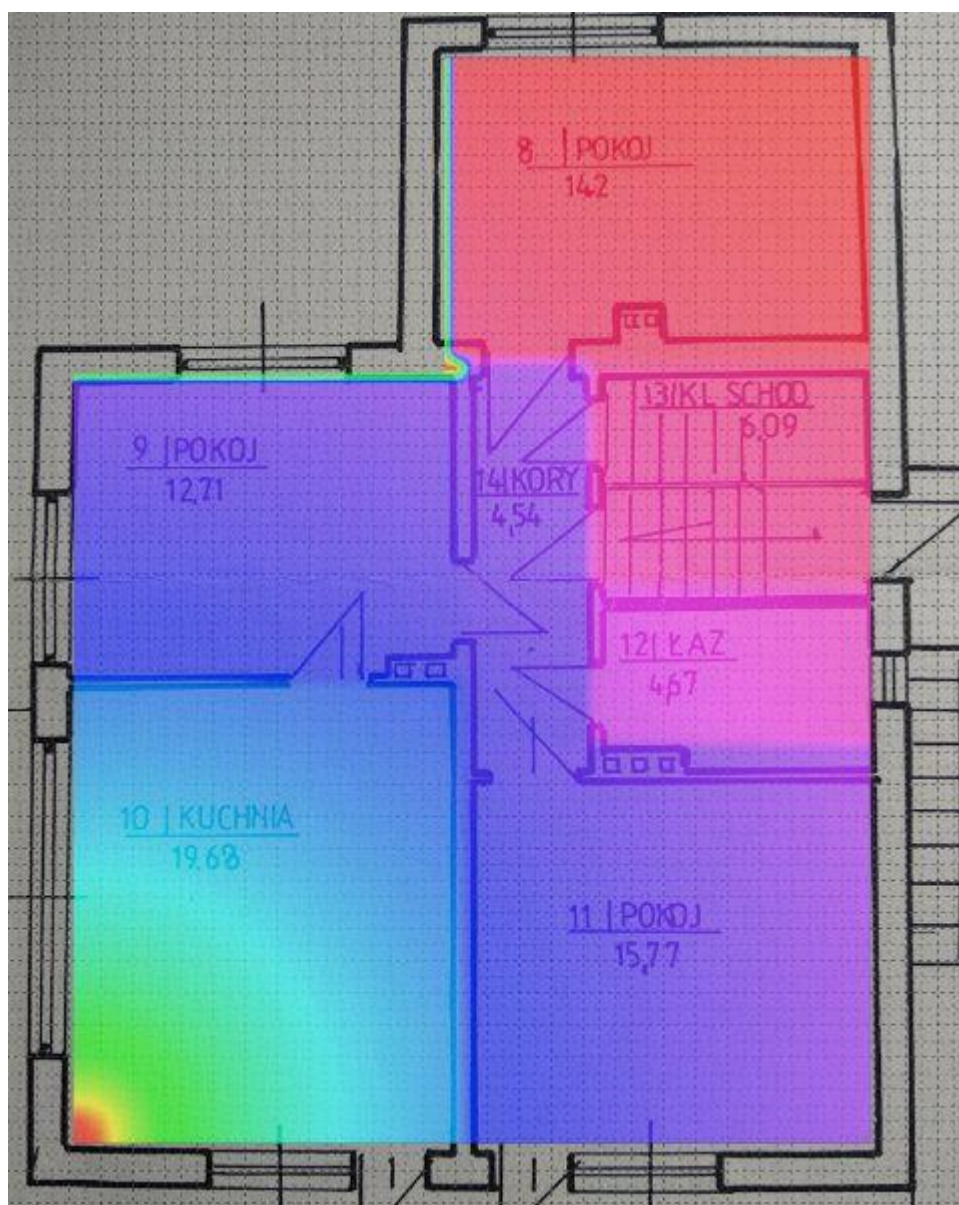
Router warto postawić z dala od innych sprzętów elektronicznych. Każdy sprzęt elektroniczny generuje bowiem fale elektromagnetyczne, które zakłócają sygnał fal radiowych.

Negatywny wpływ na transmisję sygnału z routera może mieć nawet lustro. Jeśli postawimy nasze urządzenie tuż przed dużą taflą lustra, sygnał odbije się od niego z powrotem.

Nazwa elementu	Materiał	Grubość [cm]	Tłumienie [dB]
Ściana wewnętrzna	Cegła	10	7
Ściana zewnętrzna	Cegła	30	9
Ściana działowa	<del>Rigips + wełna szklana</del>	7	2
Strop	Beton	30	11
Okno	Szkło	2 x szybka + 1 cm przerwy	4,5
Drzwi	Drewno	4	2,5







Model path loss (heatmap)

**Najlepszy sygnał Wi-Fi w moim mieszkaniu jest w pomieszczeniu nr 10 (kuchnia)** – tu znajduje się router. Fale radiowe ulegają tutaj odbiciu od ścian i mebli oraz sufitu, zmieniają kierunek. Odbijając się od ostrych krawędzi mebli, ulegają rozproszeniu. Stopniowo tracą swoją energię wraz z przebywaną odległością oraz na skutek rozdzielenia na szereg mniejszych fal odbitych zmierzających w różnych kierunkach. Ulegają tłumieniu przechodząc przez ściany, rozchodzą się do kolejnych pomieszczeń.

Przez cienką ścianę działową (7 cm grubości) wykonaną z rigipsu i wełny szklanej oraz zamknięte drzwi, fale przechodzą do **pokoju (pomieszczenie nr 9)**. Tu zasięg jest bardzo dobry w tej części pomieszczenia, gdzie fale docierają po linii prostej od routera, ulegając

interferencji konstruktywnej, gdyż mają ten sam kierunek i długość oraz są zgodne w fazie. W części północnej pokoju, gdzie fale dochodzą po przekątnej od routera (mają do pokonania większą odległość) – zasięg jest słabszy. Pomieszczenie nr 9 to najmniejszy pokój w mieszkaniu. Fale mając do pokonania małe odległości w linii prostej, ulegają tu licznym odbiciom od niewielkich, nierównych powierzchni i przedmiotów, rozpraszają się. Propagując przez otwarte drzwi na korytarz, ulegają dyfrakcji (ugięciu): opływają krawędzie futryn drzwi przedostają się przez szczelinę i tworzą nowe fale kuliste, przemieszczając się w prawą oraz lewą stronę, przechodzą częściowo do pomieszczeń nr 11 oraz nr 8. Ugięcie fal powoduje dodatkowo utratę ich energii.

**W pomieszczeniu nr 11(pokój)** jest bardzo dobry sygnał Wi-Fi, gdyż fale przechodzą po linii prostej od routera. Ulegają tłumieniu, pokonując ścianę wewnętrzną z cegły o grubości 10 cm. Ulegają interferencji konstruktywnej – zostają wzmocnione. Tylko w niewielkiej północno-wschodniej części tego pokoju zasięg jest słabszy, gdyż miejsce to znajduje się najdalej od routera. W kierunku pomieszczenia nr 11 rozchodzą się też fale z pomieszczenia nr 9 ulegające dyfrakcji.

**W pomieszczeniu nr 8 (pokój)** zasięg sygnału Wi-Fi jest bardzo słaby. Pokój ten znajduje się najdalej od routera. Fale, które tutaj rozchodzą się przebyły drogi o różnych długościach. Uległy wielokrotnym odbiciom, załamaniom, rozproszeniom i dyfrakcjom. Dochodzi tu do nakładania się wielu fal pochodzących z tego samego źródła, ale o zupełnie różnych fazach (interferencja destruktywna), prowadzącego do ich wygaszania. Dodatkowo docierające tu fale są w znacznym stopniu tłumione, gdyż muszą pokonać trzy ściany z cegły (o grubości 10 cm) oraz komin. Wskutek wymienionych zjawisk fizycznych w pomieszczeniu tym następuje częściowe wygaszanie sygnału.

Aby uzyskać najlepsze pokrycie sygnału w moim mieszkaniu **router** Wi-Fi najlepiej ustawić w północno-wschodniej części pomieszczenia nr 9. Wówczas propagacja fal będzie najbardziej korzystna. Będą one rozchodziły się do każdego pomieszczenia w mieszkaniu najbardziej równomiernie, mając do pokonania porównywalną długość drogi i podobne przeszkody (ściany o podobnej grubości, drzwi).