



Anteny





Anteny

1. Wstęp
2. Geneza promieniowania
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. Parametry anten
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa





Anteny

1. **Wstęp**
2. Geneza promieniowania
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. Parametry anten
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa





Wstęp

Współczesna teleinformatyka,
zdominowana przez **paradygmaty mobilności**
i wszechobecnego dostępu do sieci,
opiera się na fundamentach, które często
pozostają abstrakcyjne dla inżynierów
zajmujących się wyższymi warstwami modelu
OSI.





Wstęp

Współczesna teleinformatyka,
zdominowana przez **paradygmaty mobilności**
i wszechobecnego dostępu do sieci,
opiera się na fundamentach, które często
pozostają abstrakcyjne dla inżynierów
zajmujących się wyższymi warstwami modelu
OSI.

Aby w pełni zrozumieć ograniczenia
przepustowości, zjawiska opóźnień czy
problemy z zasięgiem w systemach 5G i IoT,
niezbędne jest głębokie zrozumienie **warstwy**
fizycznej.





Wstęp

Współczesna teleinformatyka,
zdominowana przez **paradygmaty mobilności
i wszechobecnego dostępu do sieci**,
opiera się na fundamentach, które często
pozostają abstrakcyjne dla inżynierów
zajmujących się wyższymi warstwami modelu
OSI.

Aby w pełni zrozumieć ograniczenia
przepustowości, zjawiska opóźnień czy
problemy z zasięgiem w systemach 5G i IoT,
niezbędne jest głębokie zrozumienie **warstwy
fizycznej**.

W przypadku komunikacji bezprzewodowej
warstwa ta jest realizowana przez **interfejs
antenowy**, który stanowi pomost między
deterministycznym światem obwodów
cyfrowych a **stochastycznym i analogowym**
środowiskiem propagacyjnym.



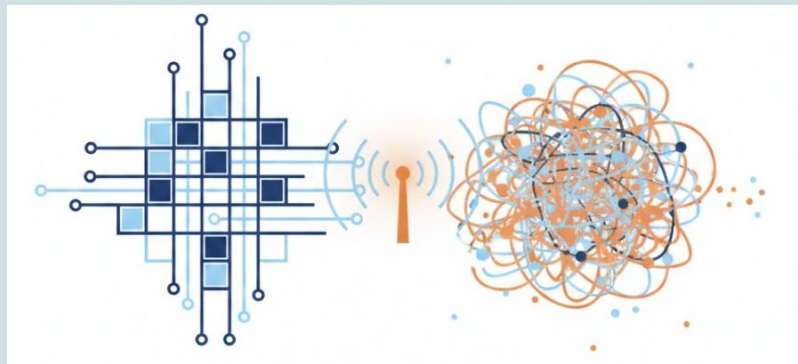


Wstęp

Współczesna teleinformatyka, zdominowana przez **paradygmaty mobilności i wszechobecnego dostępu do sieci**, opiera się na fundamentach, które często pozostają abstrakcyjne dla inżynierów zajmujących się wyższymi warstwami modelu OSI.

Aby w pełni zrozumieć ograniczenia przepustowości, zjawiska opóźnień czy problemy z zasięgiem w systemach 5G i IoT, niezbędne jest głębokie zrozumienie **warstwy fizycznej**.

W przypadku komunikacji bezprzewodowej warstwa ta jest realizowana przez **interfejs antenowy**, który stanowi pomost między **deterministycznym** światem obwodów cyfrowych a **stochastycznym i analogowym** środowiskiem propagacyjnym.





Anteny

1. Wstęp
2. **Geneza promieniowania**
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. Parametry anten
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa



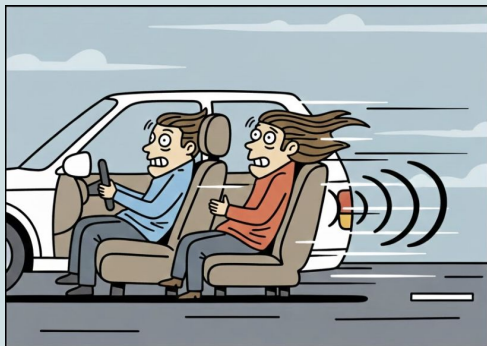


Geneza promieniowania

Podstawowym pytaniem, które definiuje istnienie telekomunikacji bezprzewodowej, jest:

W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku, transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?

Odpowiedź na to pytanie wymaga przeanalizowania dynamiki ładunków elektrycznych.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - przyspieszenie ładunku

Stany kinematyczne ładunku

- Statyczny
- Ruch jednostajny prostoliniowy
- Ruch przyspieszony





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - przyspieszenie ładunku

Stany kinematyczne ładunku

- **Statyczny** - wokół ładunku istnieje symetryczne pole elektrostatyczne, które zanika wraz z kwadratem odległości, ale **nie przenosi energii w postaci fali**.
- Ruch jednostajny prostoliniowy
- Ruch przyspieszony





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - przyspieszenie ładunku

Stany kinematyczne ładunku

- **Statyczny** - wokół ładunku istnieje symetryczne pole elektrostatyczne, które zanika wraz z kwadratem odległości, ale **nie przenosi energii w postaci fali**.
- **Ruch jednostajny prostoliniowy** - prąd stały wytwarza statyczne pole magnetyczne. Choć ładunek się porusza, jego pole "podróżuje" razem z nim. **Nie następuje oderwanie się energii**.
- Ruch przyspieszony





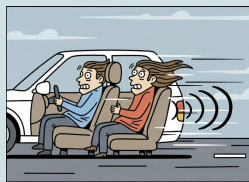
W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - przyspieszenie ładunku

Stany kinematyczne ładunku

- **Statyczny** - wokół ładunku istnieje symetryczne pole elektrostatyczne, które zanika wraz z kwadratem odległości, ale **nie przenosi energii w postaci fali**.
- **Ruch jednostajny prostoliniowy** - prąd stały wytwarza statyczne pole magnetyczne. Choć ładunek się porusza, jego pole "podróżuje" razem z nim. **Nie następuje oderwanie się energii**.
- **Ruch przyspieszony** - prędkość ładunku zmienia się w czasie, co ma miejsce w przypadku prądu zmiennego (AC) płynącego w antenie. Powstaje zaburzenie pola, które nie nadąża za źródłem ze względu na skończoną prędkość światła. To zaburzenie propaguje na zewnątrz jako fala elektromagnetyczna.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?

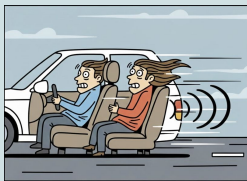


Geneza promieniowania - przyspieszenie ładunku

Wzór Larmora dla nierelatywistycznego ładunku punktowego wyraża **całkowitą moc wypromieniowaną P jako funkcję kwadratu przyspieszenia a :**

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

Oznacza to, że aby antena działała, musimy wymusić gwałtowne zmiany ruchu elektronów. Im wyższa częstotliwość (szybsze zmiany kierunku, większe przyspieszenie), tym efektywniejsze promieniowanie.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm “odrywania się” fali

Proces transformacji pola związanego w falę swobodną jest zjawiskiem dynamicznym, które najlepiej zobrazować na przykładzie **dipola elektrycznego zasilanego sygnałem sinusoidalnym**.

Proces ten, zwany "detachment", polega na topologicznej zmianie linii sił pola elektrycznego.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm “odrywania się” fali

Cykl pracy anteny dipolowej





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm “odrywania się” fali

Cykl pracy anteny dipolowej

1. **Źródło napięcia wymusza przepływ ładunków.** Na jednym ramieniu gromadzi się ładunek dodatni (+), na drugim ujemny (-). W przestrzeni wokół anteny rozbudowują się linie pola elektrycznego biegnące od ładunków dodatnich do ujemnych. W tej fazie energia jest "pompowana" w pole bliskie.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm “odrywania się” fali

Cykl pracy anteny dipolowej

1. **Źródło napięcia wymusza przepływ ładunków.** Na górnym ramieniu gromadzi się ładunek dodatni (+), na dolnym ujemny (-). W przestrzeni wokół anteny rozbudowują się linie pola elektrycznego biegnące od ładunków dodatnich do ujemnych. W tej fazie energia jest "pompowana" w pole bliskie.
2. **Osiągamy maksymalne napięcie.** Linie pola są maksymalnie rozciągnięte.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm "odrywania się" fali

Cykl pracy anteny dipolowej

1. **Źródło napięcia wymusza przepływ ładunków.** Na górnym ramieniu gromadzi się ładunek dodatni (+), na dolnym ujemny (-). W przestrzeni wokół anteny rozbudowują się linie pola elektrycznego biegnące od ładunków dodatnich do ujemnych. W tej fazie energia jest "pompowana" w pole bliskie.
2. **Osiągamy maksymalne napięcie.** Linie pola są maksymalnie rozciągnięte.
3. **Napięcie źródła spada, a następnie zmienia polaryzację.** Ładunki w antenie zaczynają wracać i przyspieszają w przeciwnym kierunku. Tutaj kluczową rolę odgrywa skończona prędkość propagacji informacji. Pole elektryczne w pewnej odległości od anteny "nie wie" jeszcze, że ładunki u źródła zmieniły kierunek.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



Geneza promieniowania - mechanizm "odrywania się" fali

Cykl pracy anteny dipolowej

1. **Źródło napięcia wymusza przepływ ładunków.** Na górnym ramieniu gromadzi się ładunek dodatni (+), na dolnym ujemny (-). W przestrzeni wokół anteny rozbudowują się linie pola elektrycznego biegnące od ładunków dodatnich do ujemnych. W tej fazie energia jest "pompowana" w pole bliskie.
2. **Osiągamy maksymalne napięcie.** Linie pola są maksymalnie rozciągnięte.
3. **Napięcie źródła spada, a następnie zmienia polaryzację.** Ładunki w antenie zaczynają wracać i przyspieszają w przeciwnym kierunku. Tutaj kluczową rolę odgrywa skończona prędkość propagacji informacji. Pole elektryczne w pewnej odległości od anteny "nie wie" jeszcze, że ładunki u źródła zmieniły kierunek. Pole elektryczne w pewnej odległości od anteny "nie wie" jeszcze, że ładunki u źródła zmieniły kierunek.
4. **W pobliżu anteny zaczynają się tworzyć nowe linie pola o przeciwnej polaryzacji.** Tymczasem stare linie pola, które oddaliły się od źródła, zostają "odcięte". W wyniku działania sił elektromagnetycznych następuje przewężenie i zamknięcie się linii pola na samych sobie. Tworzą się **zamknięte pętle** pola elektrycznego.





W jaki sposób prąd elektryczny, zamknięty w przewodniku,
transformuje się w falę swobodną, która może podróżować przez próżnię?



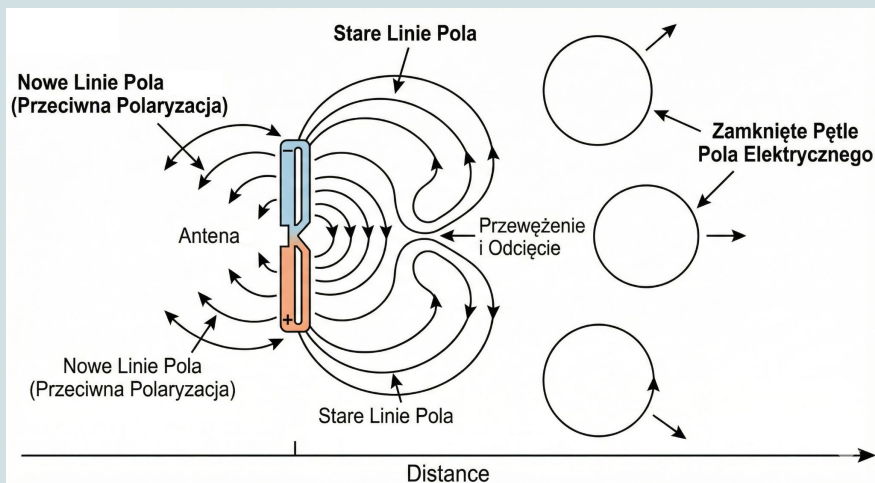
Geneza promieniowania - mechanizm "odrywania się" fali

Odrywanie się (detachment) następuje w fazie czwartej, gdy

W pobliżu anteny zaczynają się tworzyć nowe linie pola o przeciwnej polaryzacji.

Tymczasem stare linie pola, które oddaliły się od źródła, zostają "odcięte".

W wyniku działania sił elektromagnetycznych następuje przewężenie i zamknięcie się linii pola na samych sobie. Tworzą się **zamknięte pętle** pola elektrycznego.





Anteny

1. Wstęp
2. Geneza promieniowania
3. **Dipol idealny - równania Maxwella**
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. Parametry anten
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa





Dipol idealny

Model **dipola Hertza** jest fundamentalnym elementem teorii anten.





Dipol idealny

Model **dipola Hertza** jest fundamentalnym elementem teorii anten.

Jest to teoretyczny, nieskończenie krótki element o stałym rozkładzie prądu wzdłuż swojej długości. Choć fizycznie nierealizowalny (prąd na końcach rzeczywistego drutu musi spadać do zera), stanowi on "cegiełkę" (funkcję Greena), z której poprzez całkowanie można obliczyć pole dowolnej realnej anteny.





Dipol idealny - definicja problemu

Rozważamy element prądowy o długości dl umieszczony w początku układu współrzędnych, wzdłuż osi z .

Prąd zmienia się harmonicznie: $I(t) = I_0 e^{j\omega t}$

Kluczem do rozwiązania jest **magnetyczny potencjał wektorowy A** .

Dla prądu w osi z , A ma tylko składową z .

W odległości r od źródła, uwzględniając opóźnienie fazowe wynikające z przebycia drogi r , **potencjał wynosi:**

$$A_z = \frac{\mu_0 I_0 dl}{4\pi r} e^{-jkr}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} - \text{liczba falowa}$$

$$e^{-jkr} - \text{czynnik opóźnienia}$$





Dipol idealny - definicja problemu

W odległości r od źródła, uwzględniając opóźnienie fazowe wynikające z przebycia drogi r , **potencjał wynosi:**

$$A_z = \frac{\mu_0 I_0 dl}{4\pi r} e^{-jkr}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} - \text{liczba falowa}$$

e^{-jkr} – czynnik opóźnienia

Aby wyznaczyć pola we **współrzędnych sferycznych**, które są naturalne dla promieniowania, musimy dokonać rzutowania wektora na wersory sferyczne:

$$\mathbf{A} = A_r \hat{\mathbf{r}} + A_\theta \hat{\boldsymbol{\theta}} + A_\phi \hat{\boldsymbol{\phi}}$$

$$A_r = A_z \cos \theta, \quad A_\theta = -A_z \sin \theta, \quad A_\phi = 0$$





Dipol idealny - wyprowadzenie pola magnetycznego $\mathbf{H}$

Pole magnetyczne wyznaczamy z rotacji potencjału wektorowego: $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}$.

Korzystając z definicji rotacji we współrzędnych sferycznych: $H_\phi = \frac{1}{\mu_0 r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right]$

Po wykonaniu różniczkowania otrzymujemy pełny, zespolony wzór na pole magnetyczne:

$$H_\phi = \frac{I_0 dl}{4\pi} e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin \theta$$

Widać w nim dwa składniki:

- składnik promieniowania $(1/r)$
- składnik pola indukcyjnego $(1/r^2)$





Dipol idealny - wyprowadzenie pola elektrycznego $\mathbf{E}$

Pole elektryczne obliczamy z równania Maxwella-Ampère'a dla próżni: $\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0\mathbf{E}$

Co prowadzi do: $\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \mathbf{H}$

Obliczenie rotacji wektora $\mathbf{H}$ (który ma tylko składową ϕ) generuje dwie składowe pola elektrycznego:

- radialną
$$E_r = \frac{I_0 dl}{4\pi} \eta_0 e^{-jkr} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j}{kr^3} \right) 2 \cos \theta$$

- południkową
$$E_\theta = \frac{I_0 dl}{4\pi} \eta_0 e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{kr^3} \right) \sin \theta$$

Gdzie $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \approx 377\Omega$ (impedancja falowa próżni).





Anteny

1. Wstęp
2. Geneza promieniowania
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. **Strefy pola elektromagnetycznego**
5. Parametry anten
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa





Strefy pola elektromagnetycznego

1. Strefa indukcji

Granica strefy: $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$, gdzie D to największy wymiar anteny.

W tej strefie dominują $1/r^3$ i $1/r^2$. Oznacza to, że energia nie jest transportowana, lecz oscyluje – w jednej ćwiartce okresu wypływa z anteny, by w kolejnej do niej powrócić.

Antena zachowuje się jak kondensator lub cewka powietrzna. Każdy obiekt przewodzący wprowadzony w tę strefę (np. ręka użytkownika smartfona, metalowa obudowa itp.) staje się częścią układu rezonansowego anteny.

Powoduje to "rozstrojenie" anteny (zmianę jej impedancji wejściowej) i drastyczny spadek sprawności.





Strefy pola elektromagnetycznego

2. Strefa bliska promieniowania (Fresnela)

Granica strefy: $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < R < 2D^2/\lambda$, gdzie D to największy wymiar anteny.

Pola reaktywne zanikają, zaczyna dominować pole promieniowania ($1/r$), jednak fale emitowane z różnych fragmentów dużej anteny nie sumują się jeszcze w fazie w sposób uporządkowany.

Kształt wiązki zmienia się wraz z odległością. Możliwe są lokalne minima i maksima sygnału, które nie wynikają z tłumienia, lecz z interferencji.

Pomiary charakterystyki anteny w tej strefie są obarczone dużym błędem i wymagają skomplikowanych algorytmów transformacji bliskiego pola na dalekie (Near-Field to Far-Field Transform).





Strefy pola elektromagnetycznego

3. Strefa daleka (Fraunhoffera)

Granica strefy: $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ (kryterium fazowe) oraz $R \gg \lambda$ i $R \gg D$

Dominuje wyłącznie człon $(1/r)$. Czoło fali sferycznej na niewielkim wycinku przestrzeni (w miejscu odbioru) można aproksymować jako **falę płaską**. Wektory **E** i **H** są prostopadłe do siebie i do kierunku propagacji, a ich stosunek jest stały $Z_0 \approx 377\Omega$

Kształt charakterystyki promieniowania jest ustalony i nie zmienia się z odległością (jedynie amplituda maleje).

Jest to strefa operacyjna dla większości systemów telekomunikacyjnych (LTE, Wi-Fi, łącza satelitarne, radar).





Anteny

1. Wstęp
2. Geneza promieniowania
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. **Parametry anten**
6. Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa





Parametry anten - charakterystyka promieniowania i listki

Charakterystyka promieniowania to trójwymiarowa bryła reprezentująca rozkład gęstości mocy w funkcji kątów sferycznych (θ, ϕ).





Parametry anten - charakterystyka promieniowania i listki

Charakterystyka promieniowania to trójwymiarowa bryła reprezentująca rozkład gęstości mocy w funkcji kątów sferycznych (θ, ϕ).

- **Listek Główny** (Main Lobe) - kierunek maksymalnego promieniowania.





Parametry anten - charakterystyka promieniowania i listki

Charakterystyka promieniowania to trójwymiarowa bryła reprezentująca rozkład gęstości mocy w funkcji kątów sferycznych (θ, ϕ).

- **Listek Główny** (Main Lobe) - kierunek maksymalnego promieniowania.
- **Listki Boczne** (Side Lobes) - niepożądane kierunki promieniowania, które marnują energię i mogą powodować interferencje.





Parametry anten - charakterystyka promieniowania i listki

Charakterystyka promieniowania to trójwymiarowa bryła reprezentująca rozkład gęstości mocy w funkcji kątów sferycznych (θ, ϕ).

- **Listek Główny** (Main Lobe) - kierunek maksymalnego promieniowania.
- **Listki Boczne** (Side Lobes) - niepożądane kierunki promieniowania, które marnują energię i mogą powodować interferencje.
- **Listek Wsteczny** (Back Lobe) - promieniowanie w kierunku przeciwnym do zamierzonego.





Parametry anten - kierunkowość i zysk

Kierunkowość (D) - miara zdolności anteny do skupiania energii w wąskiej wiązce.

Definiuje się ją jako stosunek maksymalnego natężenia promieniowania do natężenia promieniowania anteny izotropowej promieniującej tę samą całkowitą moc.

Zależy wyłącznie od kształtu charakterystyki promieniowania.

$$D = \frac{U_{max}}{U_{avg}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

Zysk (G) - uwzględnia nie tylko skupianie wiązki, ale również straty w samej strukturze anteny (ciepło wydzielane na rezystancji metalu, straty w dielektryku).

$$G = \eta_{rad} \cdot D$$

Gdzie η_{rad} (sprawność promieniowania) to stosunek mocy wypromieniowanej do mocy dostarczonej do zacisków anteny.

Zysk wyrażamy w skali logarytmicznej.





Parametry anten - impedancja i rezystancja promieniowania

Impedancja wejściowa anteny decyduje o tym, jak łatwo doprowadzić do niej energię z nadajnika.

Kluczowym pojęciem jest **Rezystancja Promieniowania** (R_{rad}). Jest to wirtualna rezystancja, która modeluje utratę energii z obwodu na rzecz emisji fali. Dla dipola półfalowego $R_{rad} \approx 73\Omega$. Jeśli antena ma $R_{rad} = 73\Omega$ i rezystancję strat omowych $R_{loss} = 1\Omega$, to doprowadzając prąd I , wydzielimy $I^2 * R_{rad}$ mocy w postaci fal radiowych i $I^2 * R_{loss}$ mocy w postaci ciepła. Sprawność takiej anteny jest wysoka.

W antenach zminiaturyzowanych (np. w telefonach) R_{rad} spada drastycznie, co obniża sprawność.





Anteny

1. Wstęp
2. Geneza promieniowania
3. Dipol idealny - równania Maxwella
4. Strefy pola elektromagnetycznego
5. Parametry anten
6. **Tłumienie wolnej przestrzeni i równanie Friisa**





Tłumienie wolnej przestrzeni

Po opuszczeniu anteny fala wchodzi w interakcję z przestrzenią.

Podstawowym modelem opisującym ten proces jest równanie transmisji Friisa, które stanowi serce każdego budżetu łącza (link budget).

Równanie Friisa:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Człon w nawiasie nazywamy tłumieniem wolnej przestrzeni.

Przestrzeń (próżnia) nie jest ośrodkiem stratnym – nie zamienia energii na ciepło.

"Strata" mocy wynika z rozpraszania geometrycznego (energia rozkłada się na coraz większą sferę).

W postaci logarytmicznej (dB), FSPL wyraża się wzorem:

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147.55$$

