

Anteny dookólne i kierunkowe do łączności lokalnej i DX na KF i UKF

Pole elektromagnetyczne wytwarzane
przez anteny, zysk anten, charakterystyki
promieniowania, szerokość pasma pracy
anteny, impedancja anteny.

Webinarium BASR 7 maja 2020 Piotr SP9LVZ

Troszkę teorii pola elektromagnetycznego??

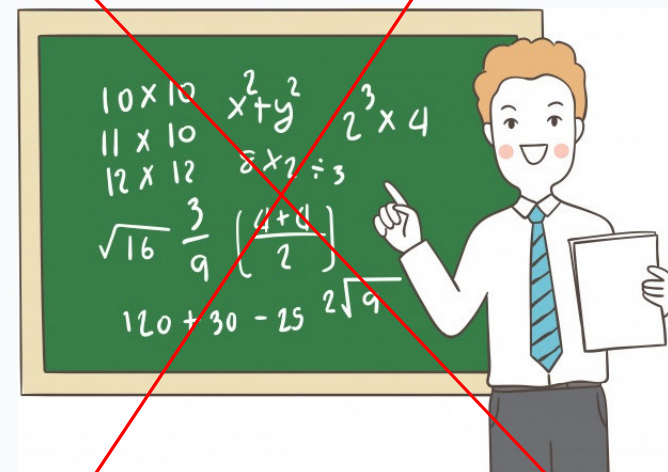
$$E_r = 2 \frac{I \Delta l}{4\pi} \eta \beta^2 \cos \theta \left(\frac{1}{\beta^2 r^2} - \frac{j}{\beta^3 r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

$$E_\theta = \frac{I \Delta l}{4\pi} \eta \beta^2 \sin \theta \left(\frac{j}{\beta r} + \frac{1}{\beta^2 r^2} - \frac{j}{\beta^3 r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

$$E_\phi = 0$$

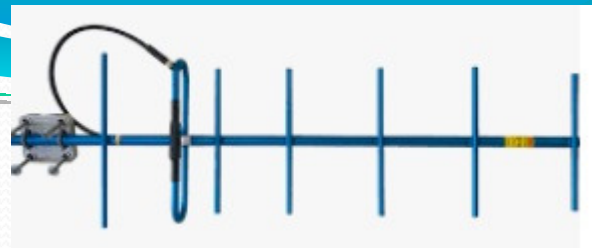
$$H_\phi = \frac{I \Delta l}{4\pi} \beta^2 \sin \theta \left(\frac{j}{\beta r} + \frac{1}{\beta^2 r^2} \right) e^{-j\beta r}$$

$$H_r = 0; H_\theta = 0$$



Nie, dziękuję – przedstawimy to nieco prościej....

Antena nadawcza i odbiorcza



Zadaniem anteny nadawczej jest konwersja energii elektrycznej na falę elektromagnetyczną .

Nadajnik wymusza szybko zmienne prądy elektryczne w antenie, co skutkuje promieniowaniem fali elektromagnetycznej.

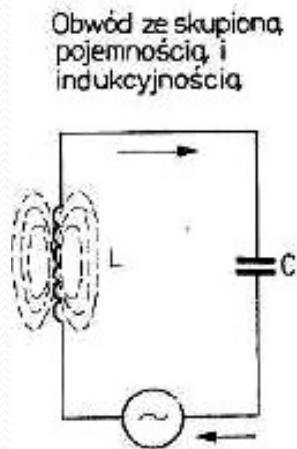
Zadaniem anteny odbiorczej jest konwersja odwrotna, konwersja fali elektromagnetycznej na sygnał elektryczny w antenie odbiorczej, który skutkuje powstaniem słabych napięć na zaciskach anteny, podlegającymi w dalszej kolejności wzmacnianiu w odbiorniku.

W szczególnym przypadku **zgodnie z zasadą wzajemności** antena nadawcza i antena odbiorcza może być tą samą anteną.

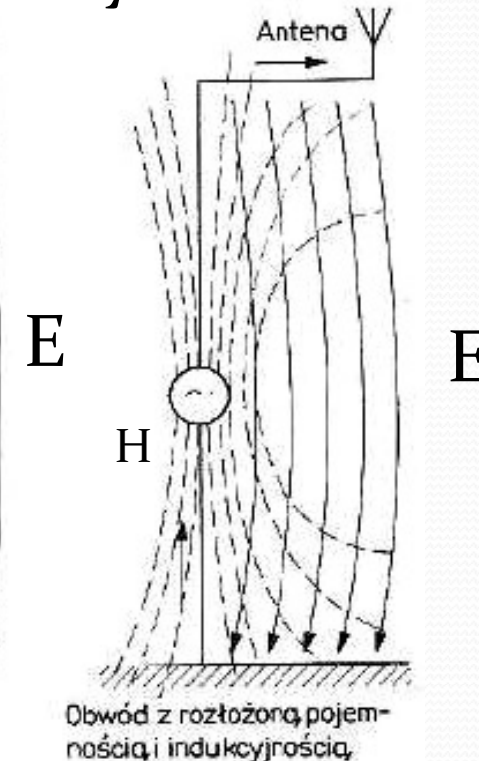
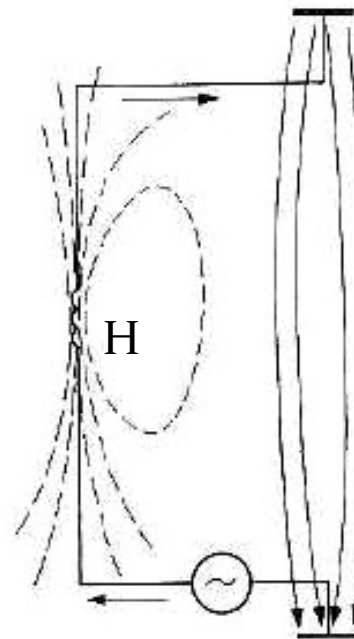
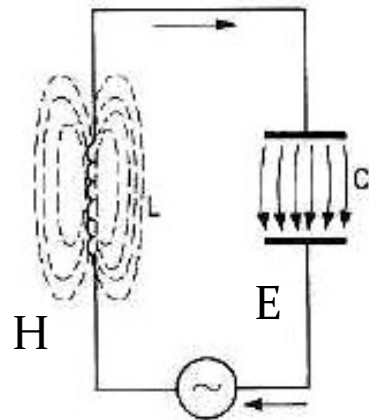
! Anteny nie można zastąpić żadnym innym urządzeniem elektronicznym.

! Antena może wyemitować praktycznie do 100% mocy dostarczonej.

Od obwodu rezonansowego do anteny



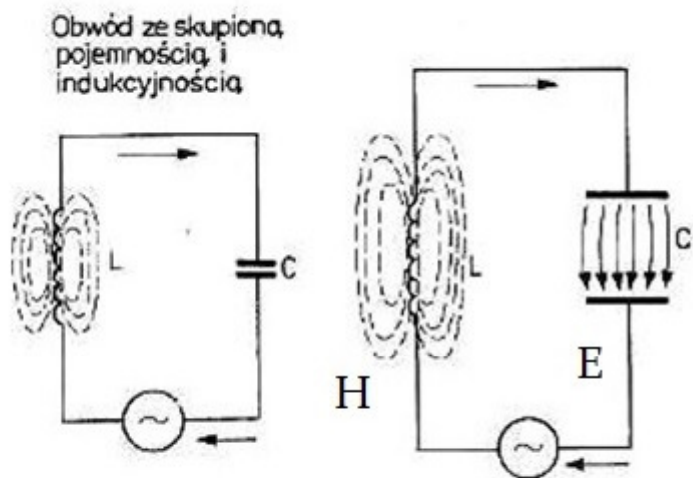
Obwód LC wytwarzający pole elektromagnetyczne



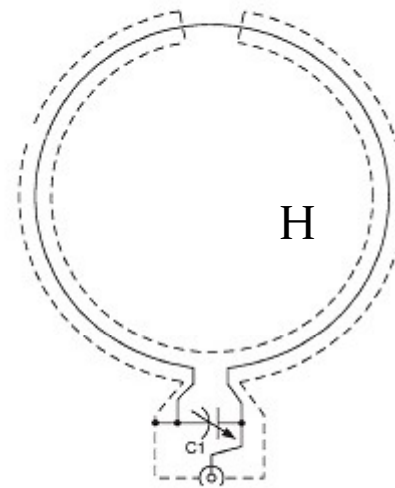
Ramiona anteny tworzą okładki kondensatora, pomiędzy którymi powstaje zmienne pole elektryczne. Anteny drutowe oddziałują z polem elektrycznym.

E (V/m) - **pole elektryczne** – pole wektorowe określające w każdym punkcie siłę działającą na jednostkowy, spoczywający ładunek elektryczny. Pole elektryczne wytwarzane jest przez ładunki elektryczne (pole E stałe) oraz zmieniające się pole magnetyczne (pole E zmienne).

Od obwodu rezonansowego do anteny



Obwód LC wytwarzający pole elektromagnetyczne



Obwód pętli $\ll$ długości fali

Obwód anteny tworzy zwoj cewki (obwodu rezonansowego), wewnątrz której powstaje silne zmienne pole magnetyczne. Anteny magnetyczne oddziałują z polem magnetycznym.

H (A/m)- pole magnetyczne – stan przestrzeni, w której siły działają na poruszające się ładunki elektryczne. Pole magnetyczne wytwarzane jest przez zmieniające się pole elektryczne (pole H zmienne) lub magnesy (pole H stałe).

Antena magnetyczna i na podstawie z magnesem



**Antena pętlowa magnetyczna
ze strojonym kondensatorem**

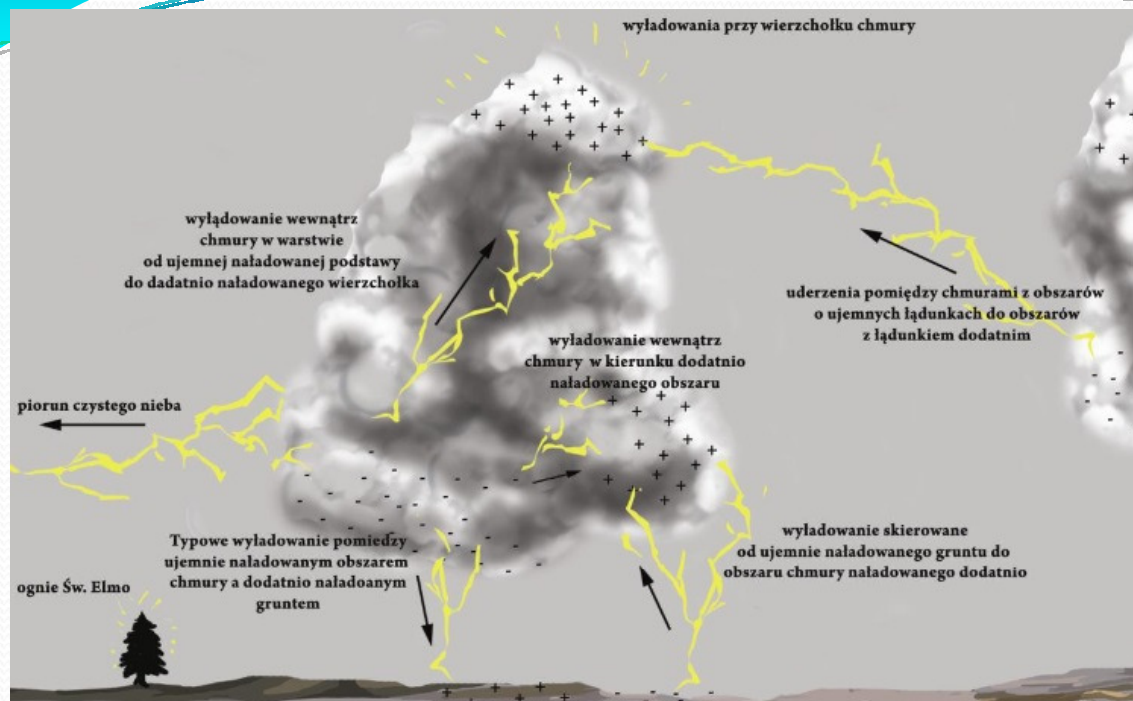


**Antena na podstawie z magnesem
nazywana niepoprawnie magnetyczną**

Anteny drutowe i pętlowe magnetyczne (o małych wymiarach)

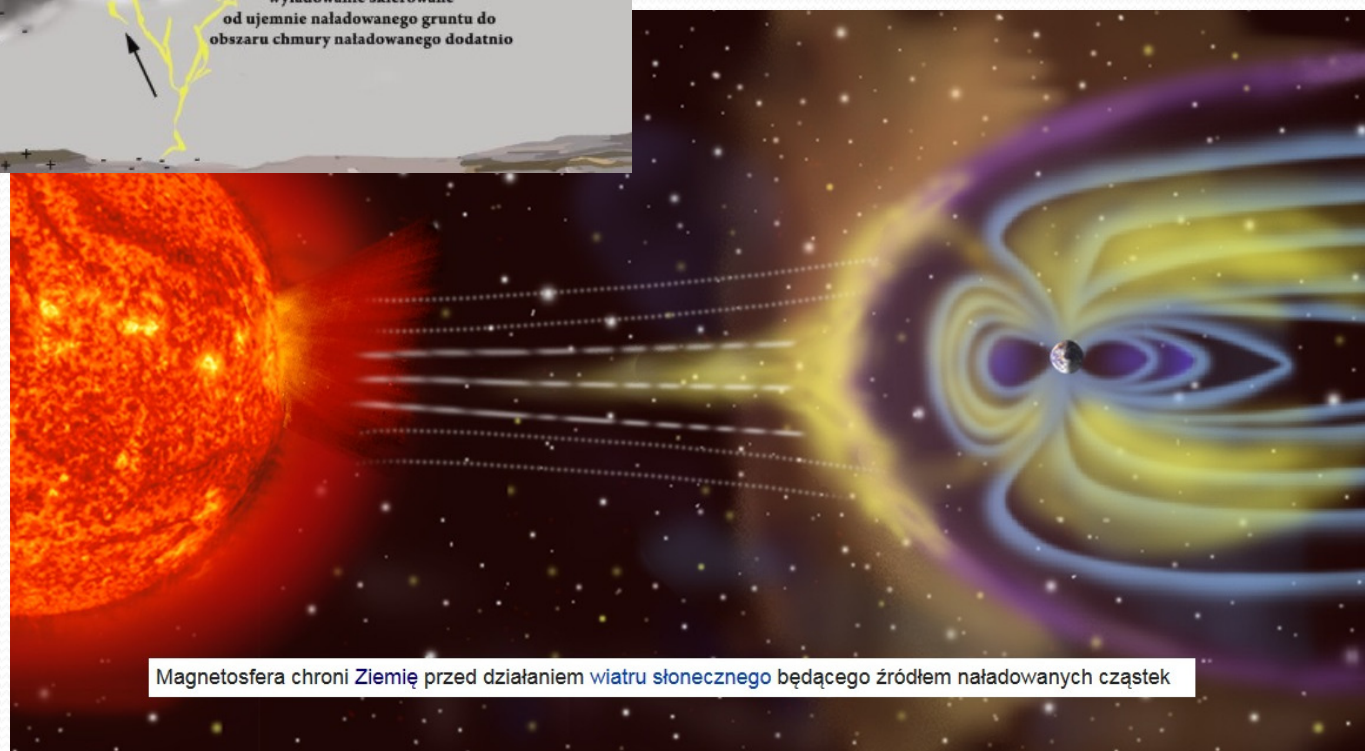
1. Teoretycznie nie ma to istotnego znaczenia, czy będziemy wytwarzać - odbierać falę elektromagnetyczną w oparciu o pole elektryczne czy magnetyczne.
2. Anteny drutowe mają największą sprawność gdy ich długość jest zbliżona do $\lambda/4$ lub $\lambda/2$ – więc mają duże wymiary. Wysoka sprawność związana jest z ich wysoką rezystancją promieniowania (73Ω dla dipola otwartego, 300Ω dla dipola zamkniętego). Antena drutowa może wyemitować do 100% dostarczonej energii.
3. Anteny magnetyczne wykonane jako pętla indukcyjna o małych wymiarach w stosunku do długości fali, mają małą sprawność ze względu na niską rezystancję promieniowania (poniżej 1Ω) - sprawności rzędu kilku – kilkudziesięciu %.

Stałe pole elektryczne i magnetyczne



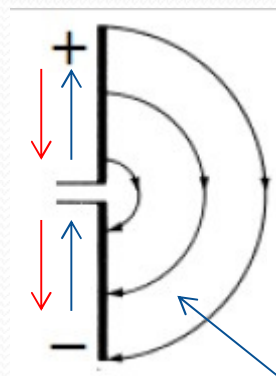
Stałe pole elektryczne
wytwarzane przez ładunki
zgromadzone w chmurach
i na Ziemi

Stałe pole
magnetyczne
Ziemi

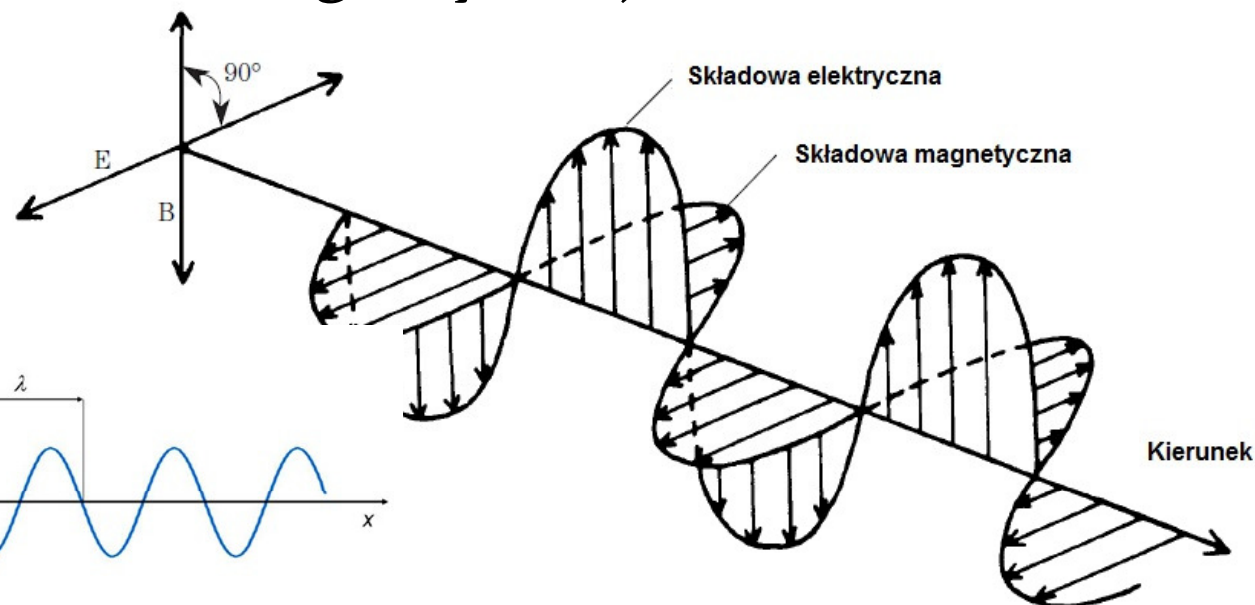
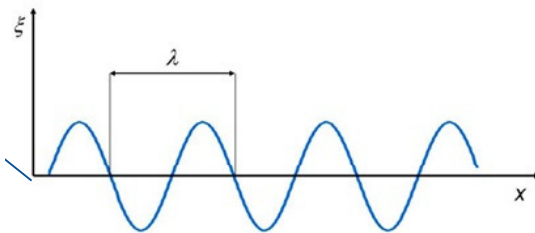


Zmienne pola elektryczne i magnetyczne

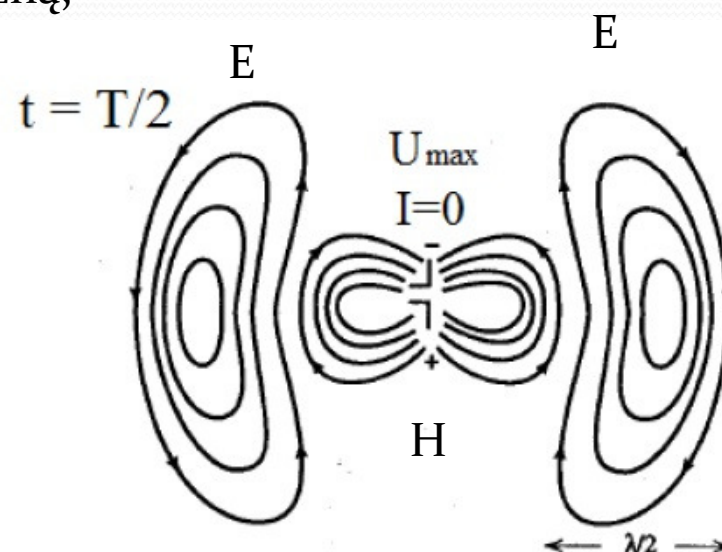
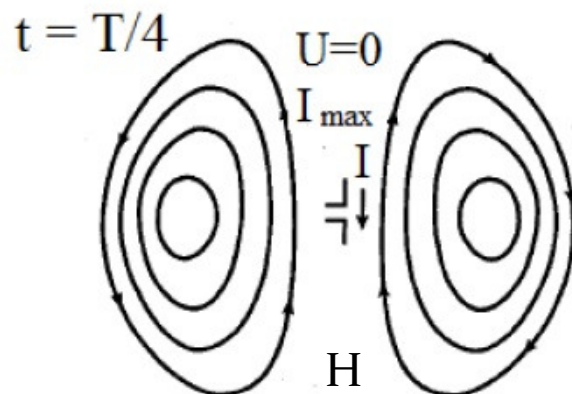
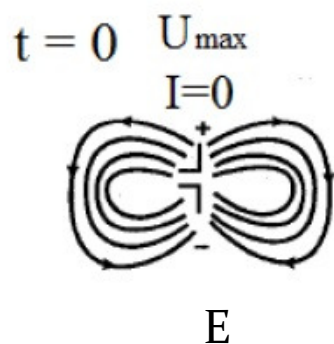
Emisja fali elektromagnetycznej



$$f_{\text{MHz}} = \frac{300}{\lambda_{\text{m}}}$$



Przewód najefektywniej emituje falę elektromagnetyczną, gdy jego długość wynosi $\lambda/2$ lub $\lambda/4$.



Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji częstotliwości, gęstość mocy.

$$E(x, t) = E_0 \sin(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x) \quad \text{V/m}$$

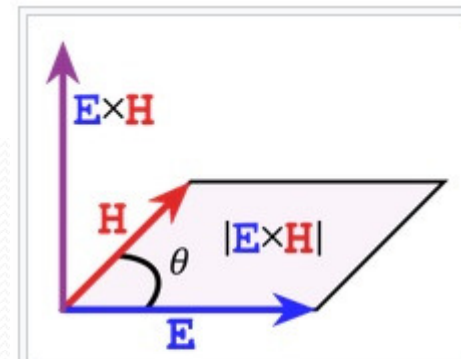
$$H(x, t) = H_0 \sin(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x) \quad \text{A/m}$$

Gdzie E_0 ; H_0 – amplitudy natężenia elektrycznego i magnetycznego; λ - długość fali;
 ν - częstotliwość

Gęstość mocy

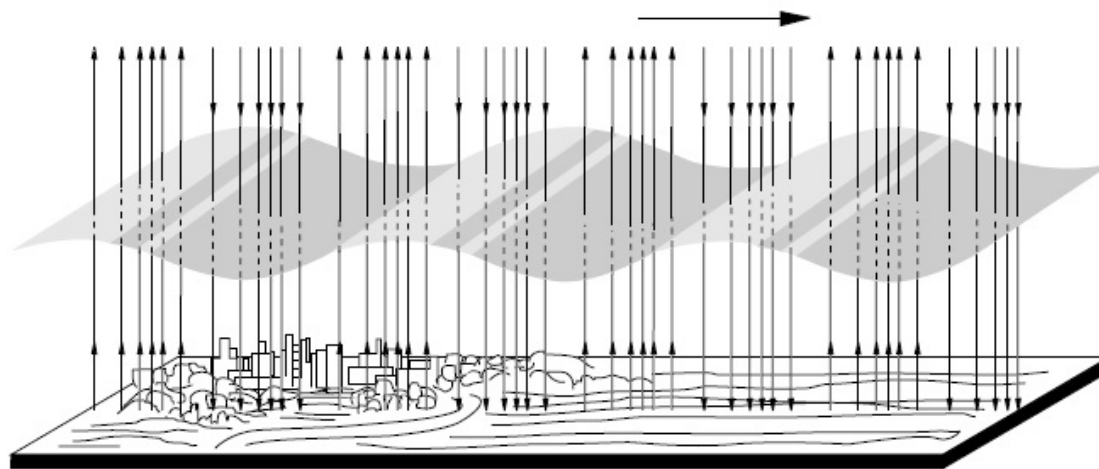
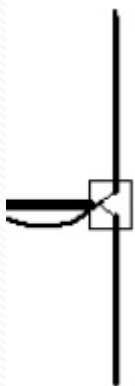
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

$$|\vec{S}| = \frac{\text{energia / czas}}{\text{pole powierzchni}} = \frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

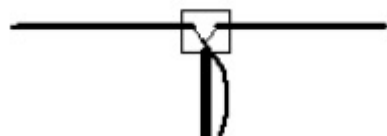
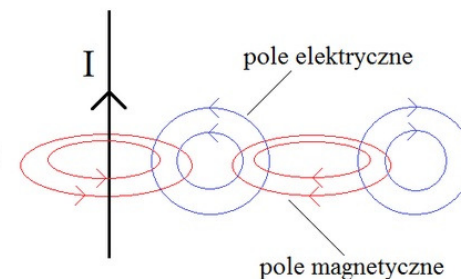


Długość wektora Poyntinga $\vec{S}$ jest równa polu powierzchni równoległoboku wyznaczonego przez wektory $\vec{E}$ i $\vec{H}$.

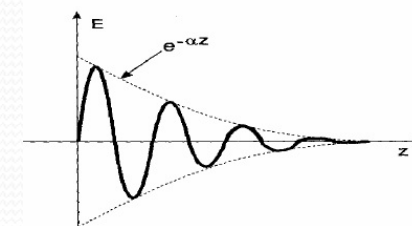
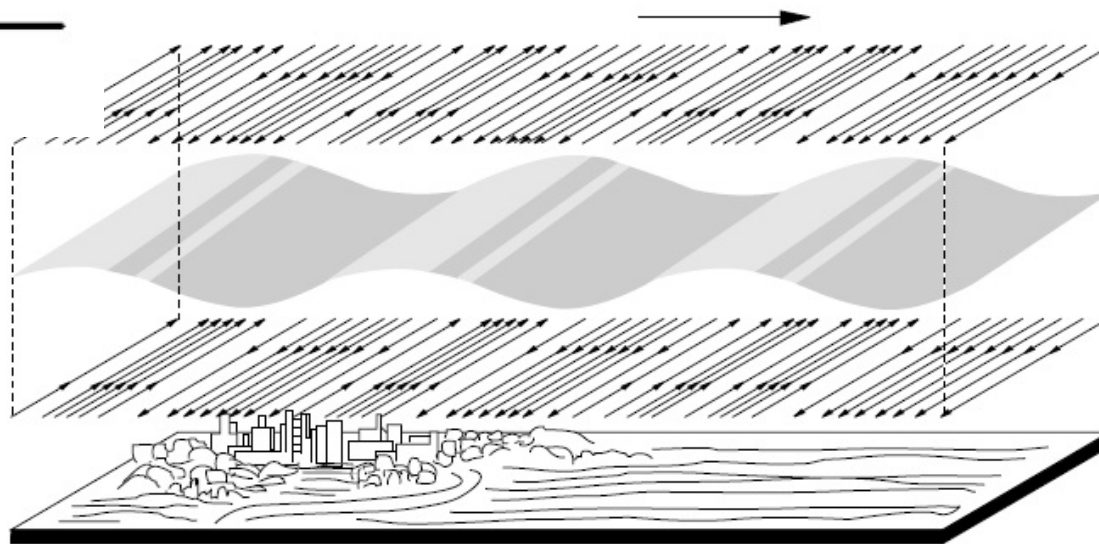
Polaryzacja fali elektromagnetycznej – wektor E



Polaryzacja
Pionowa
liniowa



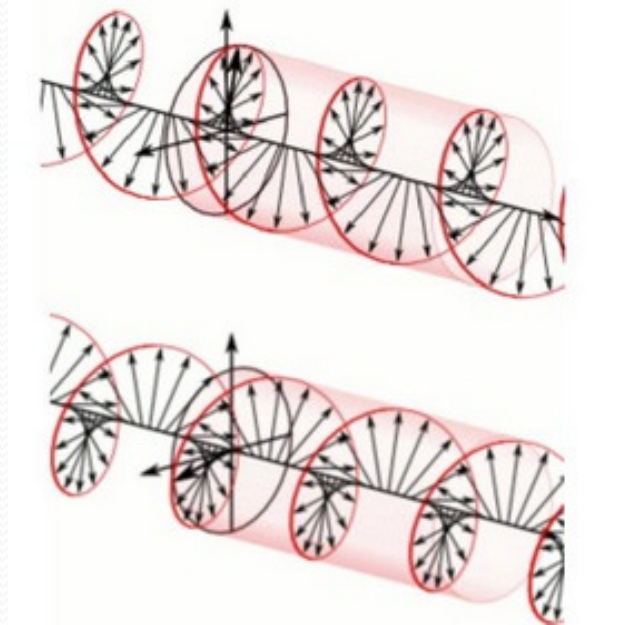
Polaryzacja
pozioma
liniowa



Zanik natężenia
pola z odległością

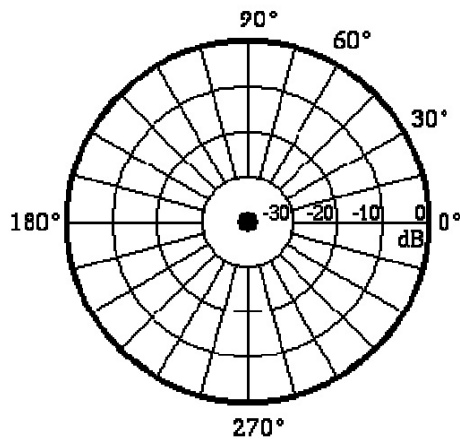
Polaryzacja posiada znaczenie dla łączności bezpośrednich – te same polaryzacje anten

Polaryzacja fali elektromagnetycznej – wektor E



Polaryzacja kołowa – lewo i prawo skrętna, anteny helikalne wykorzystywane są do łączności w zakresach fal ultrakrótkich, łączności satelitarnych.

Antena izotropowa – teoretyczny odnośnik do porównywania parametrów anten

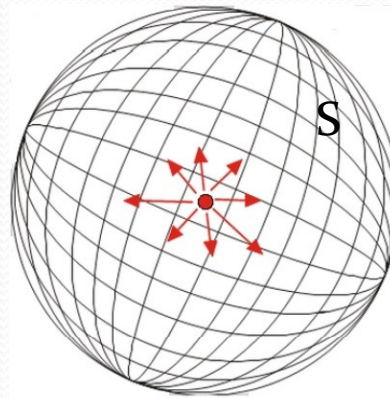


Antena izotropowa promieniuje jednakowo we wszystkich kierunkach

$$S = P_t / (4\pi r^2) \text{ W/m}^2$$

$P = 100 \text{ W}$, odległość 1 km

$$S = 100 / 4\pi 1000^2 = 7,96 \text{ uW/m}^2$$



Antena może teoretycznie wypromieniować w formie kuli do 100% mocy dostarczonej do anteny.

Wypromieniowana moc będzie się jednakowo rozprzestrzeniać we wszystkich kierunkach i możemy ją w określonym punkcie przestrzeni określić jako gęstość mocy S w jednostce W/m^2

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$
$$|\vec{S}| = \frac{\text{energia / czas}}{\text{pole powierzchni}} = \frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Pytania:

- jak mierzyć/wyliczyć gęstość mocy w przestrzeni dla anteny nie izotropowej?**
- czy wolna przestrzeń posiada impedancję dla fal radiowych?**



Odpowiedzi:

Wolna przestrzeń posiada impedancję ok. 377Ω

Gęstość mocy w wolnej przestrzeni możemy wyliczyć znając natężenie pola elektrycznego.

Znamy wzór na moc $P = U^2 / R$ (W)

dla gęstości mocy przyjmie postać

$$S = E^2 / R \text{ (W/m}^2\text{)}$$

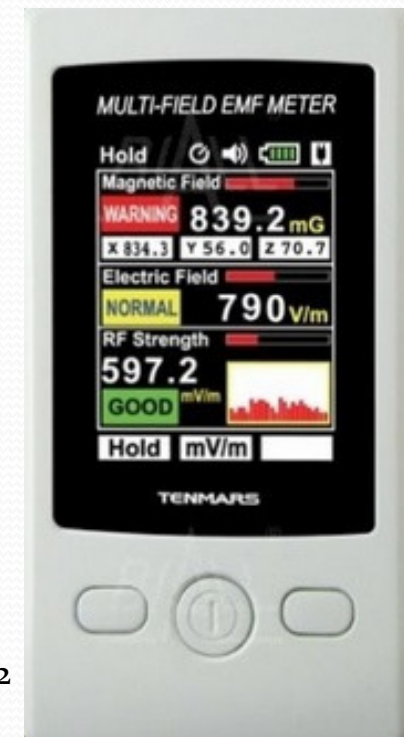
E – natężenie pola elektrycznego (V/m)

R – impedancją wolnej przestrzeni 377Ω

Miernik natężenie pola elektromagnetycznego

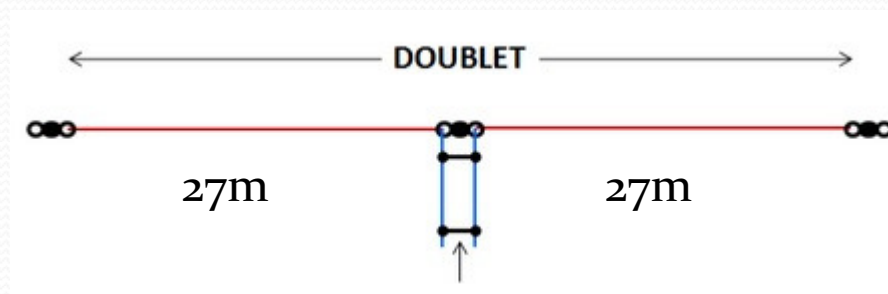
Przykład: dla $E = 10 \text{ V/m}$, $R = 377 \Omega$, $S = 0,265 \text{ W/m}^2$

Dla poprzedniego przykładu $S = 8 \mu\text{W/m}^2$, $E = 0,15 \mu\text{V/m}$



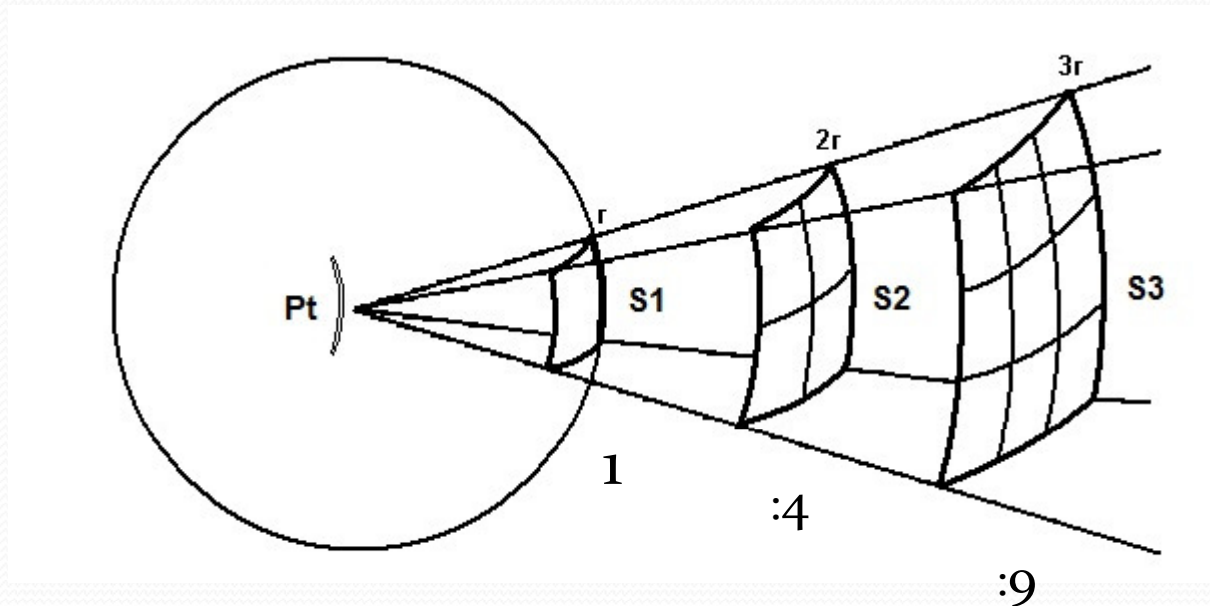
Wolna przestrzeń posiada impedancję ok. 377Ω

Czy zastanawiał się ktoś dlaczego przewód o długości 27m (co nie stanowi $\lambda/2$ lub $\lambda/4$) oraz $2 \times 27\text{m}$ tak dobrze promieniuje falę elektromagnetyczną?



Antena doublet posiada rezystancję promieniowania około $240\text{-}300 \Omega$ w pasmach 80-40-20-10m, czyżby miało to związek z impedancją wolnej przestrzeni?

Antena izotropowa – teoretyczny odnośnik do porównywania parametrów anten



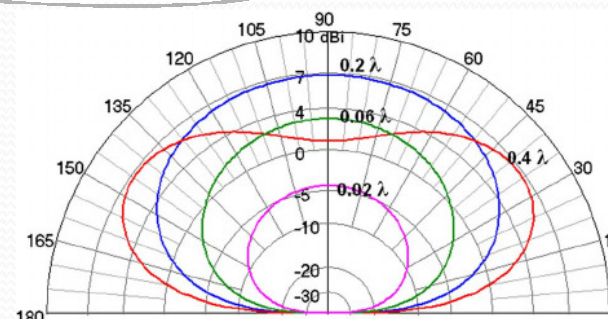
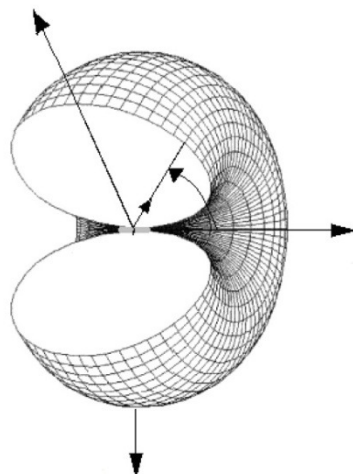
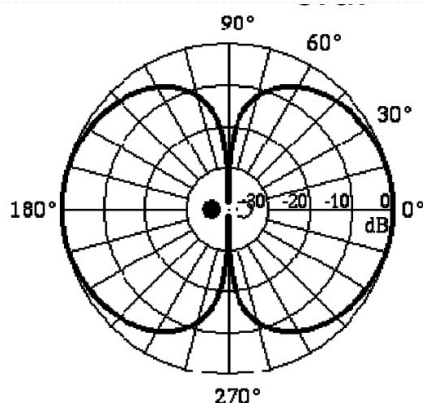
Gęstość mocy S maleje z kwadratem odległości r^2

Wzrost gęstości mocy następuje w wyniku podniesienia mocy promieniowanej lub ukierunkowania wiązki promieniowanej.

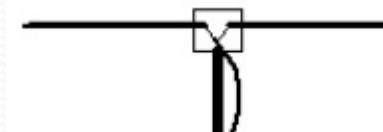
Strata trasy sygnału $L_{dB} = [20 \log d] + [20 \log F_{MHz}] + k$

d – długość trasy (km), F – MHz, $k = 32,4$

Antena dipolowa – praktyczny odnośnik do porównywania parametrów anten



Zysk dipola półfalowego w stosunku anteny izotropowej wynosi **2,14 dB** w kierunku głównego promieniowania.



$$G_{dBi} = 10 \log (S_b/S_i) \text{ lub } G_{dBi} = 10 \log (P_b/P_i)$$

G_{dBi} – zysk w stosunku do anteny izotropowej wyrażony w decybelach

G_{dBd} – zysk w stosunku do anteny dipolowej wyrażony w decybelach

S_b (W/m^2) – gęstość mocy anteny badanej, S_i (W/m^2) – gęstość mocy anteny izotropowej na głównym kierunku promieniowania anteny badanej, przy założeniu, że do obu anten jest doprowadzona ta sama moc.

P_b (W) – moc doprowadzona do anteny badanej, P_i (W) – moc doprowadzona do anteny izotropowej, przy założeniu, że obie anteny wytwarzają tę samą gęstość mocy na głównym kierunku promieniowania anteny badanej.

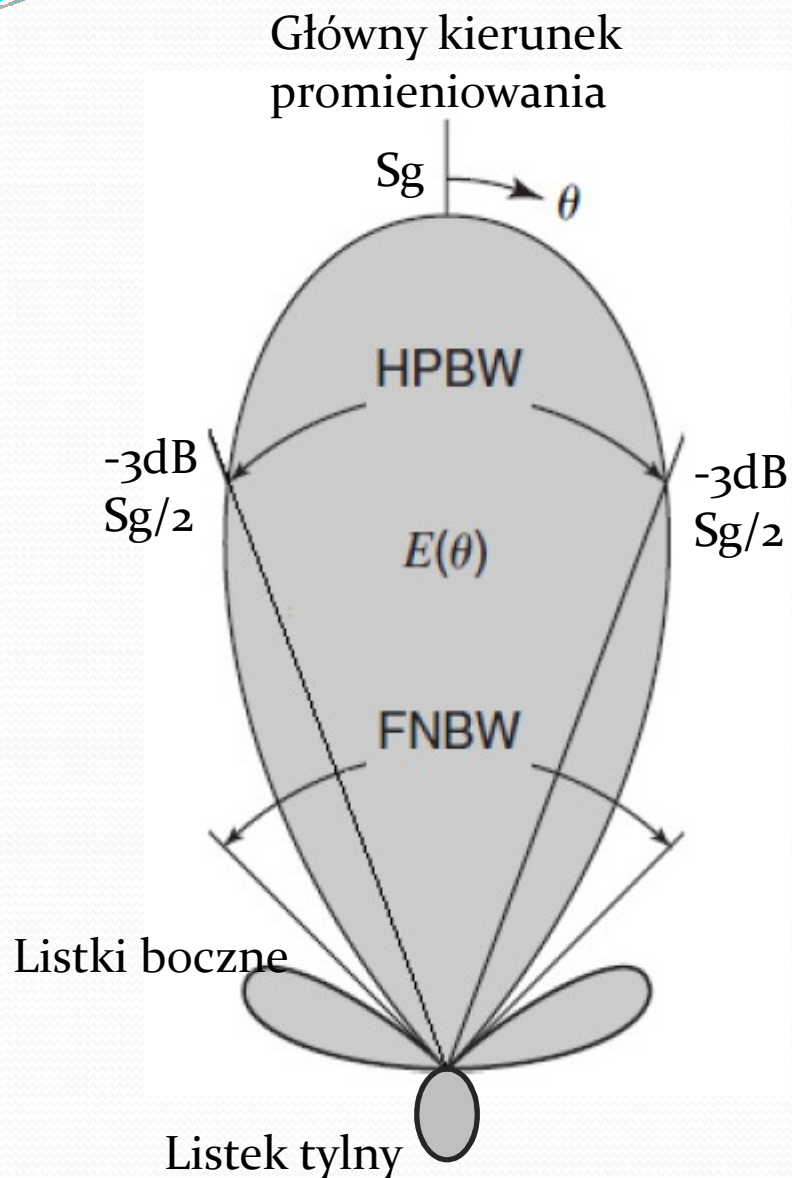
Częsty błąd w interpretacji zysku anteny, definicja EIRP

1. Zysk anteny nie jest wzmocnieniem anteny, bo antena nie jest wzmacniaczem (wzmacniacz możemy zainstalować przy antenach).
2. Antena nie wzmacnia mocy P (W) tylko powoduje wzrost gęstości mocy S (W/m²) na głównym kierunku promieniowania.
3. „Wzmocnienie” mocy anteny mylone jest z definicją **EIRP**.
4. **EIRP** - efektywna (zastępcza, równoważna, ekwiwalentna) moc wypromieniowana izotropowo – moc jaką musiałaby wypromieniować antena izotropowa (teoretyczna antena) która promieniuje jednakowo w każdym kierunku przestrzeni, aby uzyskać taką samą gęstość mocy, jaka wystąpiłby przy wykorzystaniu anteny kierunkowej w kierunku jej maksymalnego promieniowania.

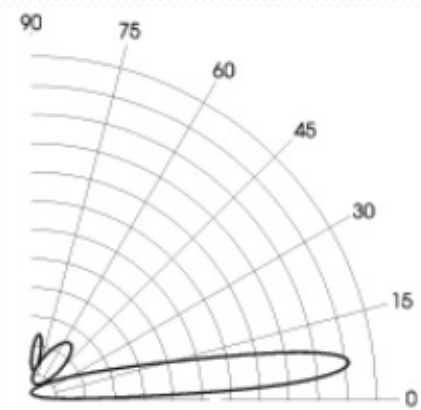
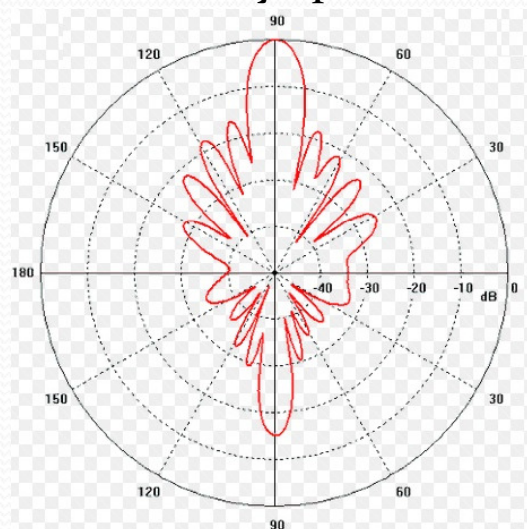
Przykład: jeśli do anteny badanej o zysku 3 dBi doprowadzimy moc 10W, to wytworzy ona taką samą gęstość mocy S_b w danym punkcie przestrzeni, jak antena izotropowa do której doprowadzimy moc 20W. $3\text{dB} = P \times 2$



Kąt promieniowania anteny kierunkowej KF i UKF do DX.



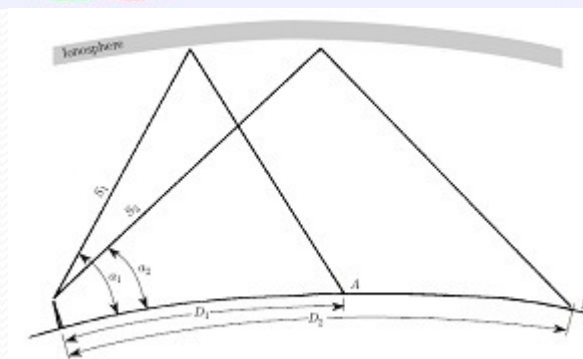
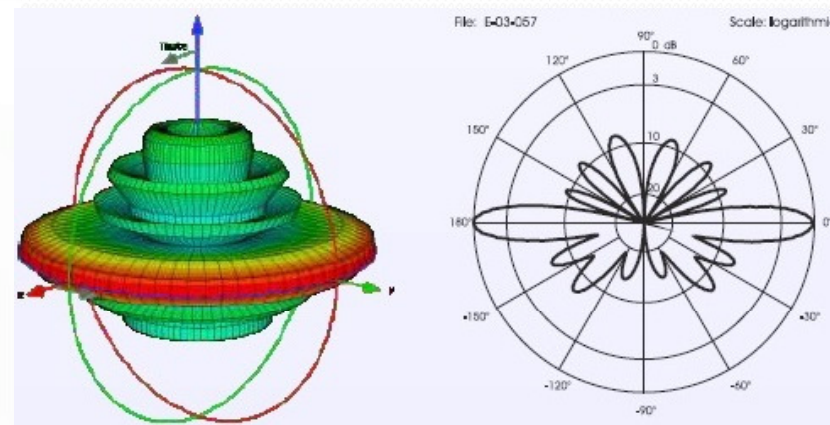
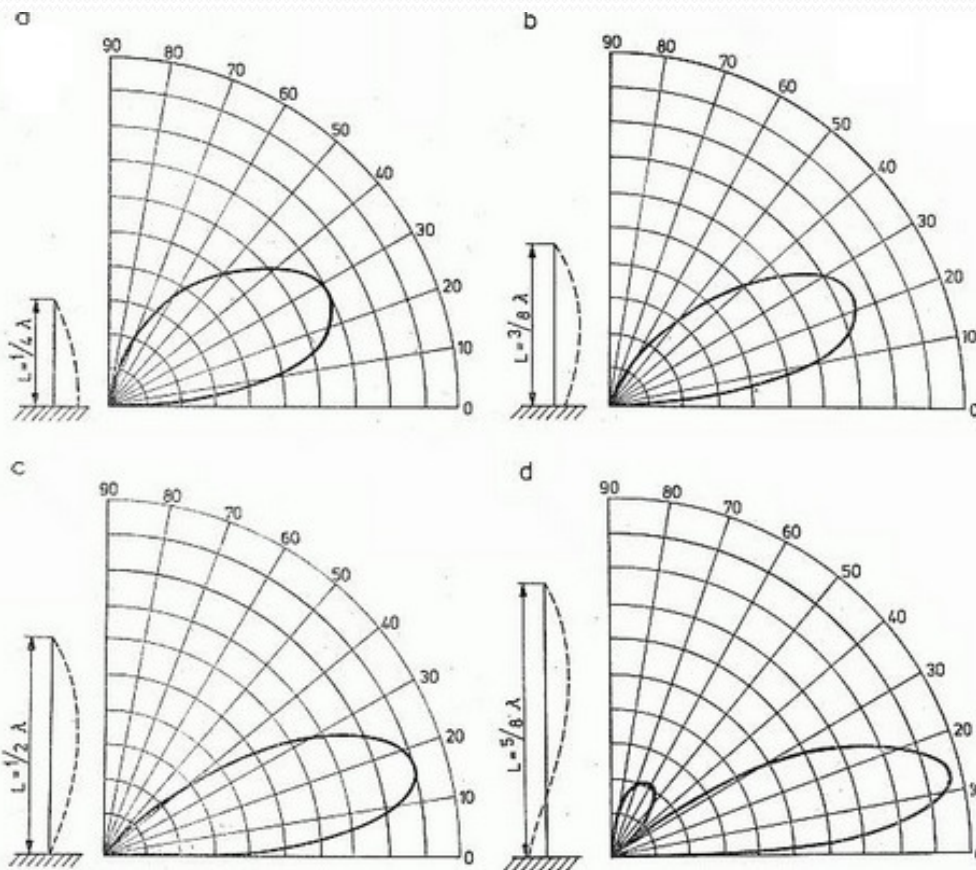
Dla anten kierunkowych podaje się:
HPBW – kąt promieniowania anteny
FNBW – kąt wiązki głównej
GdBi lub GdBd – zysk
Tłumienie tył/przód F/B w dB



Charakterystyka promieniowania anteny pionowej.

1. Antena pionowa promieniuje dookoła.
2. Antena pionowa posiada charakterystyczny kąt nachylenia wiązki głównej w stosunku do powierzchni ziemi.

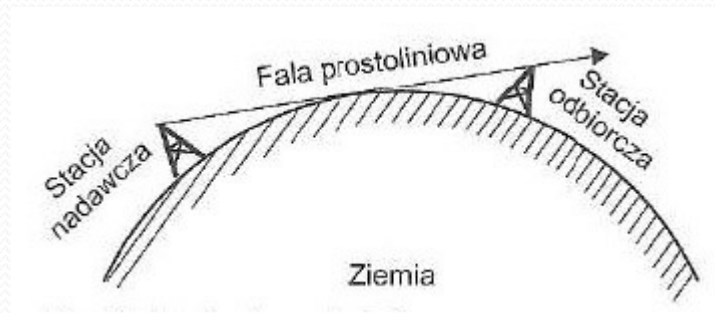
Antena UKF długa



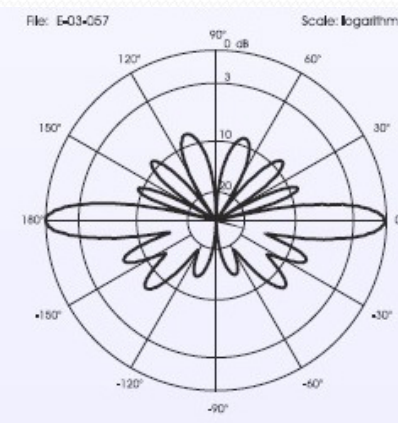
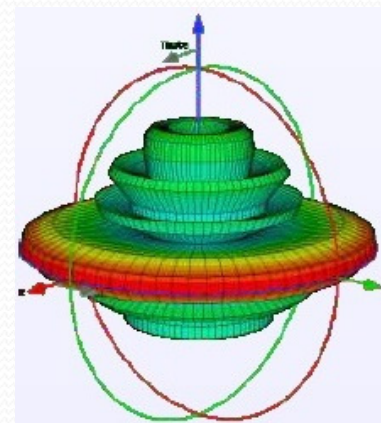
Zasiąg łączności DX,
a kąt promieniowania

Zysk anteny $\frac{1}{4} \lambda = -1,0 \text{ dBd} (1,14 \text{ dBi})$, $\frac{5}{8} \lambda = 3,5 \text{ dBd} (5,64 \text{ dBi})$

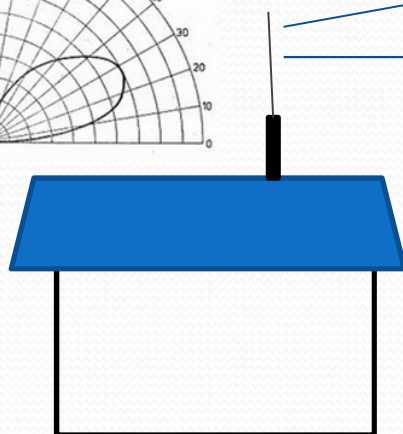
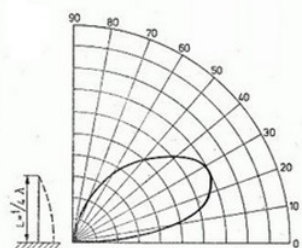
Charakterystyka promieniowania anteny pionowej w aspekcie łączności FM na UKF.



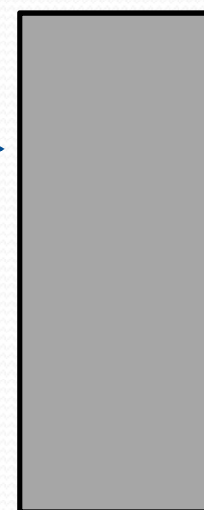
Fale radiowe o wyższych częstotliwościach rozchodzą się prostoliniowo ~50-100km



Anteny o niskich kątach promieniowania cechują się wyższymi zasięgami.



Zanik sygnału o niskim kącie promieniowania na przeszkodzie

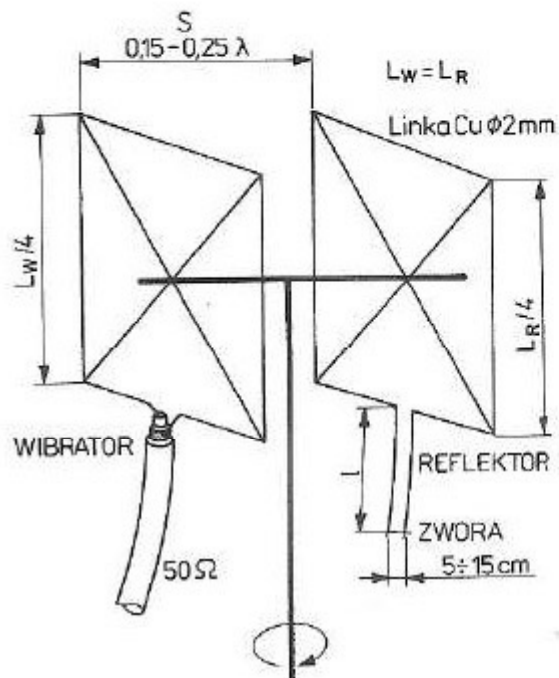


Ugięcie sygnału o wyższym kącie promieniowania na przeszkodzie

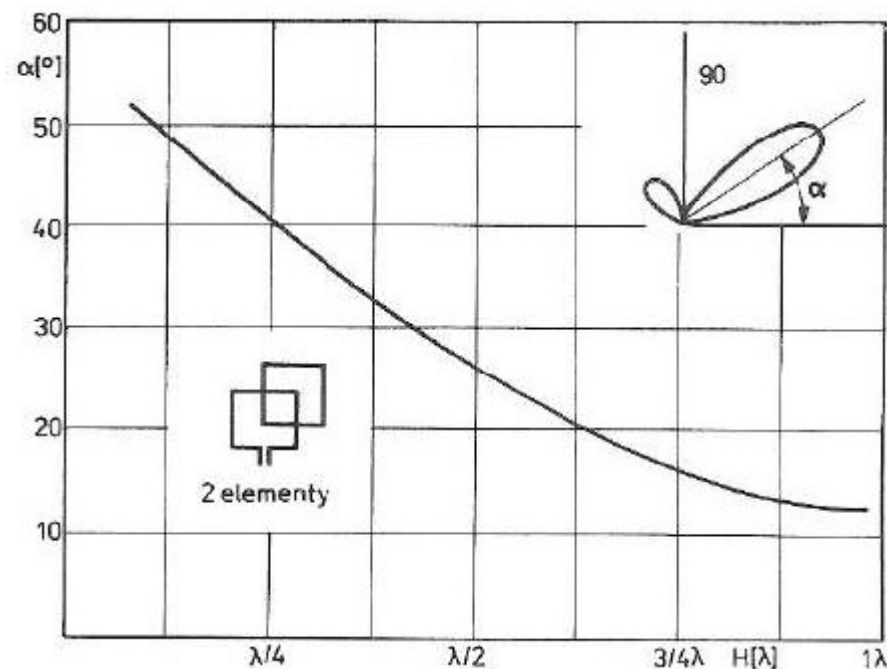
Im dalej jesteśmy od przeszkody tym korzystniej

Należy zastanowić się nad odpowiednim typem anteny, w zależności od lokalizacji i celem łączności FM na UKF

Najskuteczniejsze anteny do DX na KF – Qubical Quad

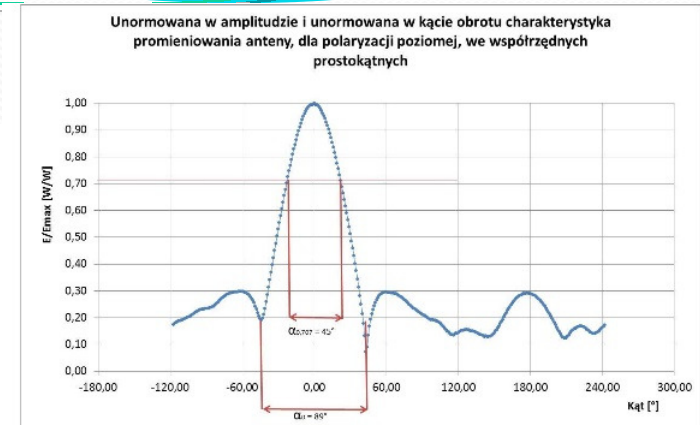
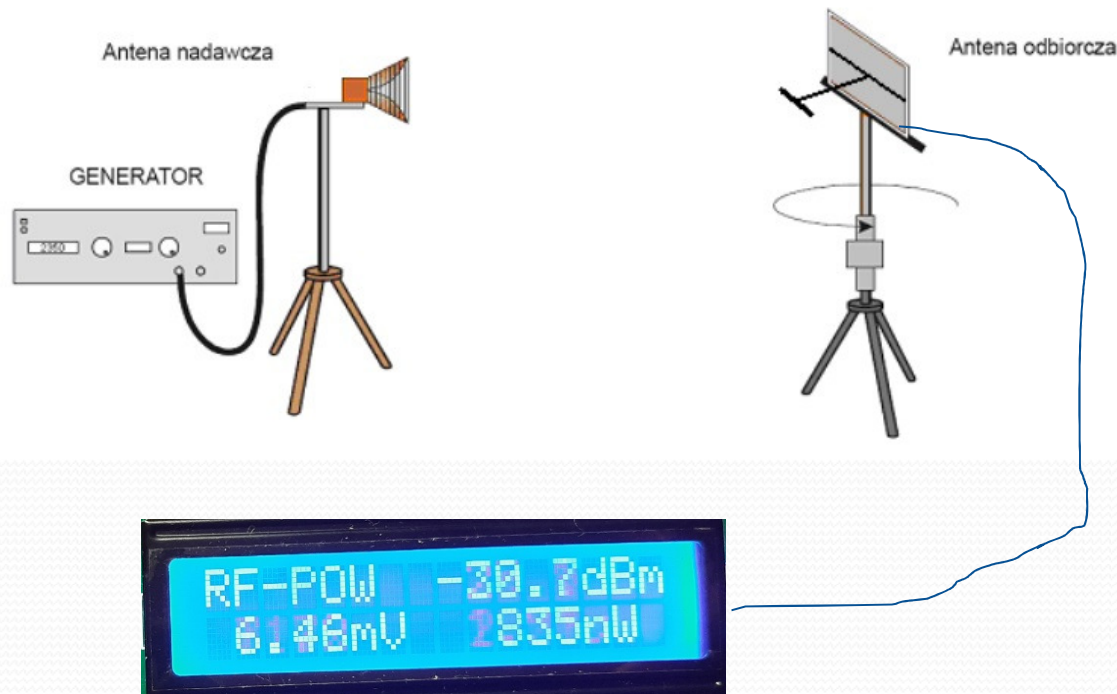


Pasmo	14	21	28
L_w [m]	5,35	3,55	2,65
S [m]	4,25	2,83	2,20
l [m]	1,5	1,0	0,7

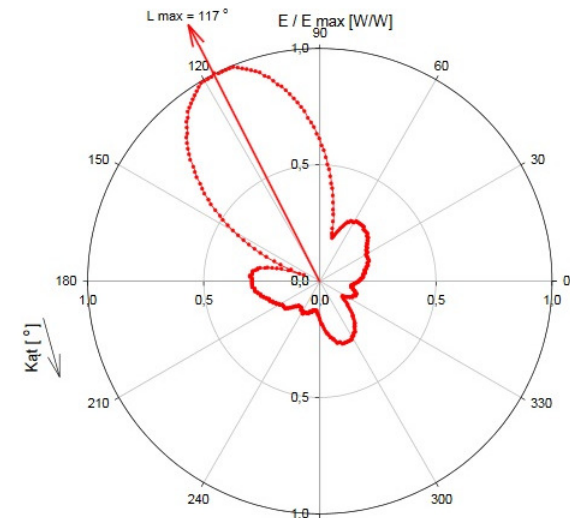


Wadą anteny QQ jest duża zależność kąta promieniowania od wysokości zawieszenia i konieczność stosowania wysokich masztów

Pomiary charakterystyki anteny



Unormowana w amplitudzie i nieunormowana w kącie obrotu charakterystyka promieniowania anteny, dla polaryzacji poziomej, we współrzędnych biegunowych

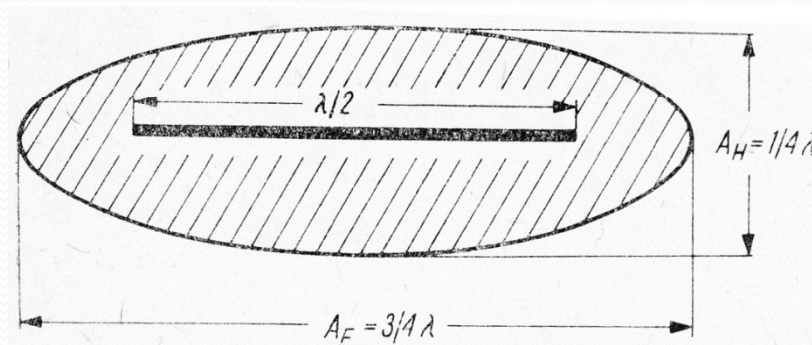


Wyznaczanie charakterystyki kierunkowej anteny na podstawie pomiaru wielkości sygnału odbieranego miernikiem mocy w dBm.

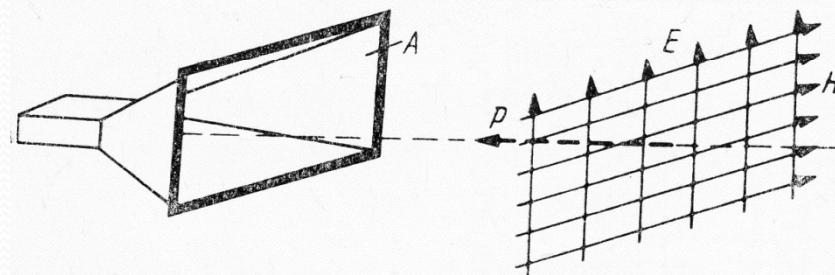
Apertura anteny – powierzchnia skuteczna

Powierzchnia skuteczna anteny – jest to stosunek mocy wydzielonej w dopasowanym obciążeniu anteny do gęstości mocy pola elektromagnetycznego w miejscu umieszczenia anteny.

Parametr ten charakteryzuje własności odbiorczo-nadawcze anteny.



Powierzchnia skuteczna dipola

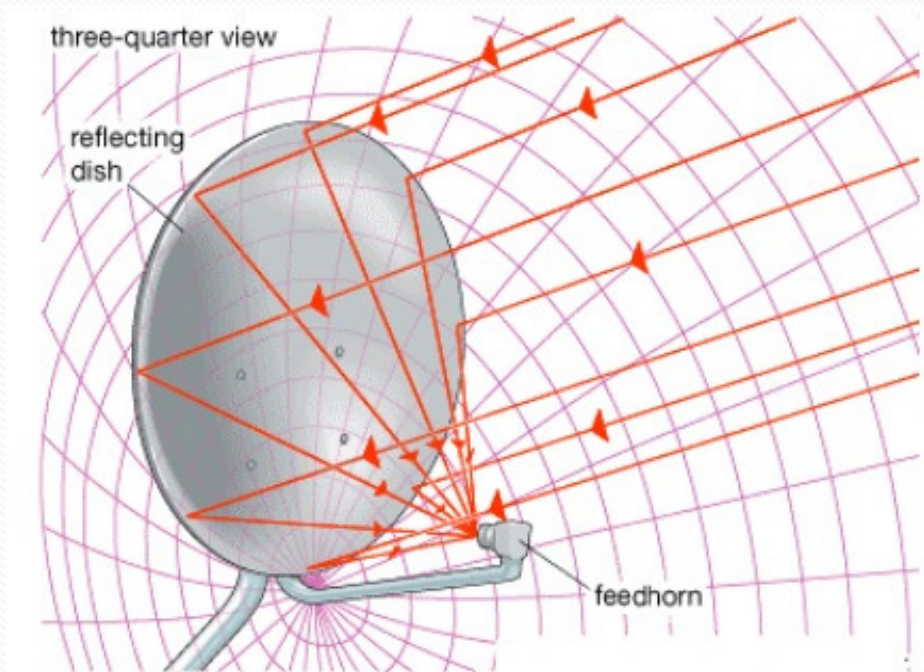


Powierzchnia skuteczna anteny tubowej

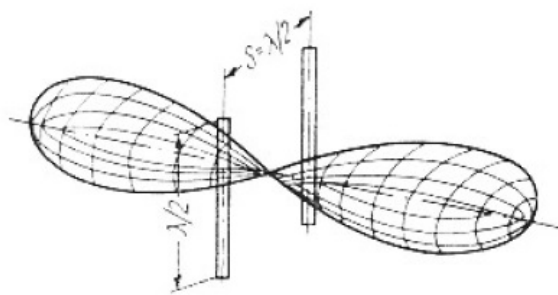
Apertura ma związek z zyskiem kierunkowym.

Anteny posiadające większe apertury mają większe zyski np. parabola na GHz.

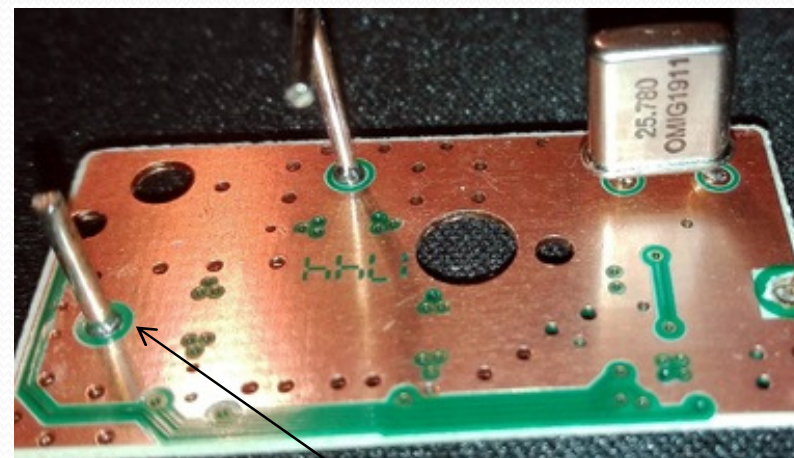
Apertura anteny – powierzchnia skuteczna



Powierzchnia skuteczna w paraboli
rośnie z kwadratem częstotliwości



Anteny
ścianowe
na KF



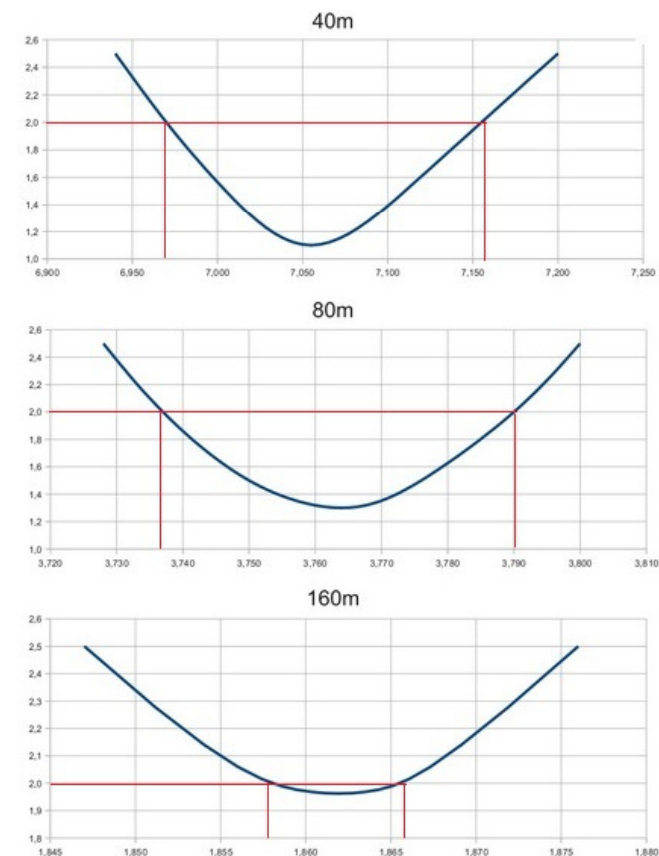
Wielkość anteny w konwerterze
na 10,7 GHz



Szerokość pasma pracy anteny - pasmowość

Szerokość pasma pracy anteny – zakres częstotliwości, dla którego antena spełnia założone z góry wymagania względem jednego określonego parametru na przykład współczynnika SWR.

1. Dipol półfalowy możemy traktować jak szeregowy obwód rezonansowy.
2. Przy zmianie częstotliwości ulegają jednocześnie zmianie impedancja wejściowa, SWR, charakterystyka promieniowania i zysk.
3. Szerokość pasma obwodu rezonansowego określamy częstotliwościami granicznymi, przy których napięcie w obwodzie maleje o 3 dB.
4. W antenie spadek napięcia o 3 dB, to spadek zysku o 3 dB, jest to za szeroka wartość do określania szerokokopasmowości anteny (np. ze względu na impedancję wejściową anteny).
5. W przypadku anten najczęściej bierze się pod uwagę graniczne wartości SWR np. 1:2.0.



Szerokość pasma pracy anteny - pasmowość

Na pasmowość wpływa smukłość anteny określana jako λ/d

λ – długość fali, d – średnica wibratora

Dipol na 80m z linki

2,6 mm posiada smukłość 3×10^4

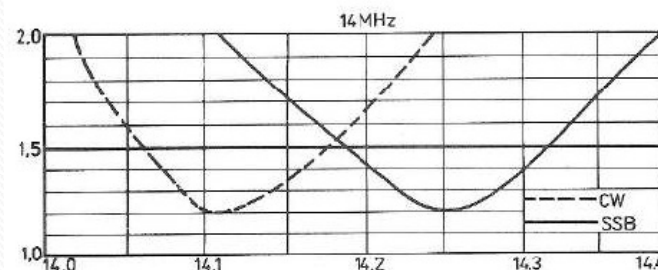
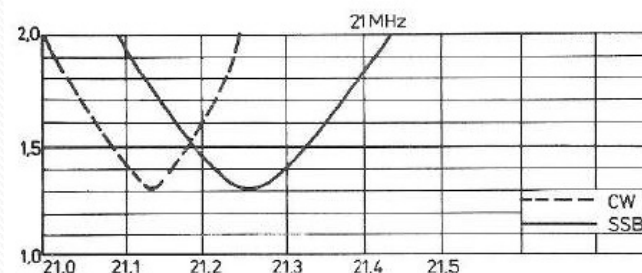
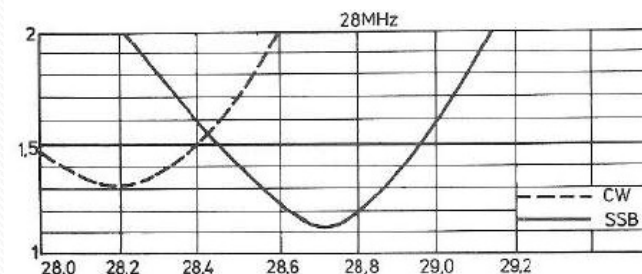
Dipol na 10m z linki

2,6 mm posiada smukłość 4×10^3

Szerokopasmowość anteny
wzrasta z grubością elementów.

Z szerokopasmowością maleje
zysk anteny.

Wykonanie anteny o dużym
zysku powoduje zawężanie
szerokopasmowości.



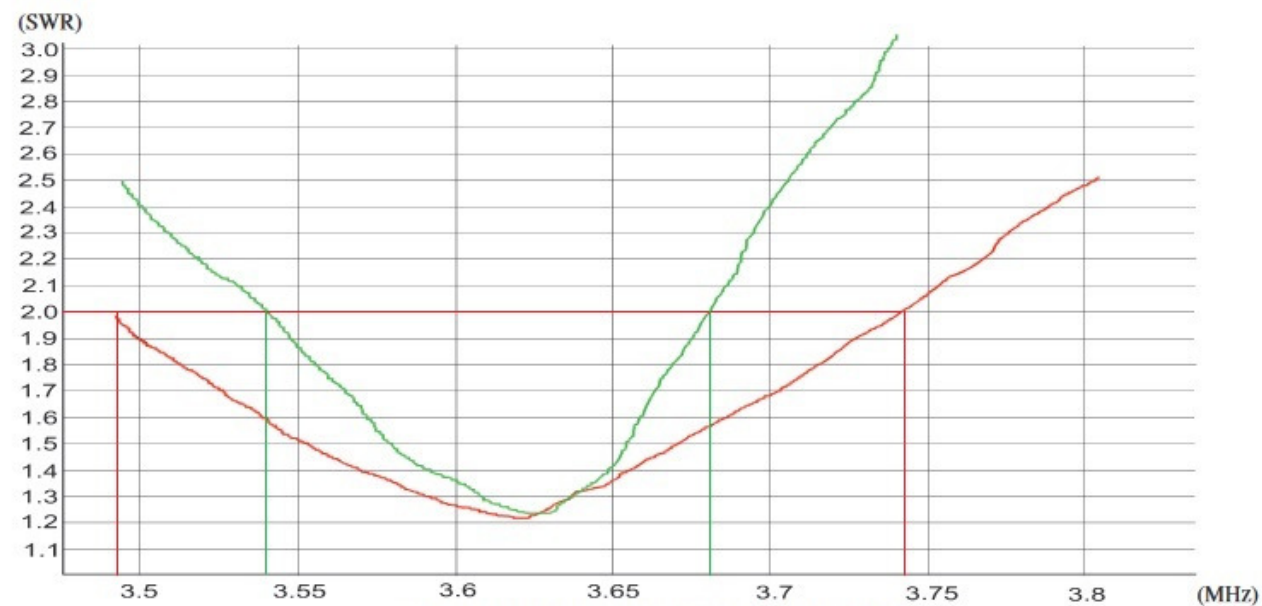
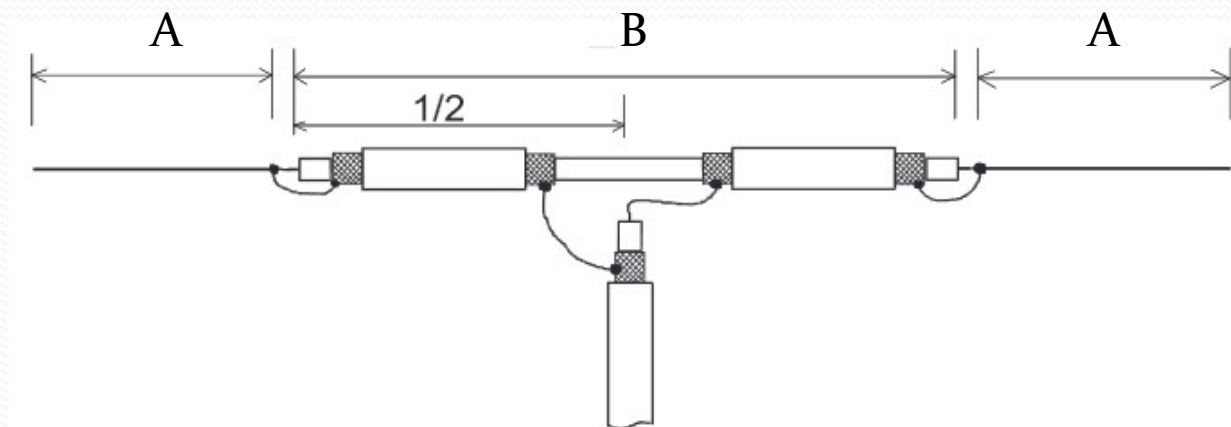
Przykładowe szerokości pasm
dla trzelementowej beam TH₃

Szerokość pasma pracy anteny - pasmowość

Porównanie
szerokopasmowości
dipola na 80m
wykonanego
z linki 2,6 mm
oraz dipola
szerokopasmowego
z kabla
koncentrycznego
RG58

$B = 28,2 \text{ m}$

$A = 5,9 \text{ m}$



Pomiary współczynnika fali stojącej

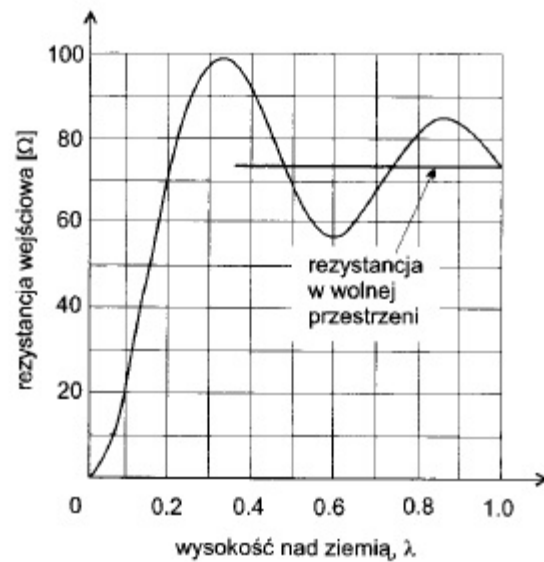
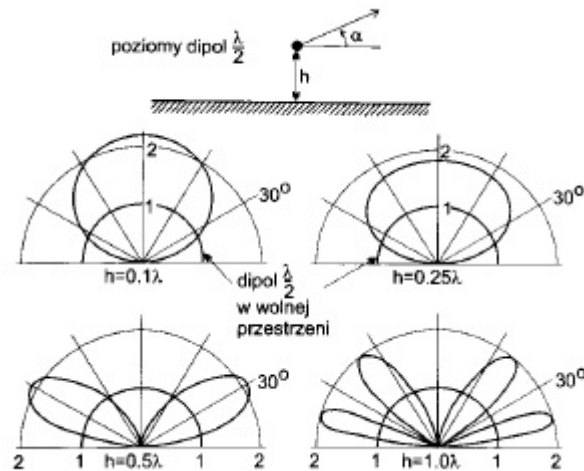
Na zakończenie - rezystancja promieniowania anteny

Rezystancja promieniowania anteny R_{pr} jest elementem impedancji wejściowej anteny Z_A i zależy głównie od długości anteny i wysokości zawieszenia anteny nad ziemią.

$$Z_A = R_{pr} + R_s + jX_a \qquad R_A = R_{pr} + R_s$$

1. Rezystancja anteny R_A jest sumą rezystancji promieniowania i strat, niewiele się zmienia przy zmianie długości anteny lub częstotliwości nadawania (w dipolu na 80m może wynosić w granicach 40-75 Ω).
2. Rezystancja strat R_s jest zależna od zastosowanych materiałów, ale także od rozkładu prądu w antenie (krótka antena – duże straty).
3. Antena w rezonansie posiada tylko rezystancję R_A .
4. Nieznaczne zmiany długości anteny lub częstotliwości nadawania powodują znaczne zmiany składowej biernej $+jX_a$.
5. Pamiętajmy, że antena przedstawia sobą obwód rezonansowy, który tylko w rezonansie posiada czystą rezystancję, a odstrojona będzie posiadała charakter indukcyjny lub pojemnościowy.
6. Pojawienie się składowej biernej jest stratą, składowa bierna $+jX_a$ może być skompensowana „skrzynką antenową”.

Rezystancja promieniowania dipola



Charakterystyka promieniowania
i rezystancja promieniowania
dipola zawieszonego
poziomo nad ziemią

$$Z_A = R_{pr} + R_s + jX_a$$

$$R_A = R_{pr} + R_s$$

Rezystancja promieniowania anten

Sprawność anteny w rezonansie zależy od strat.

$$\eta = R_{pr}/R_s$$

Anteny o większej rezystancji promieniowania mają mniejsze straty.

Typowe rezystancje wejściowe anten:

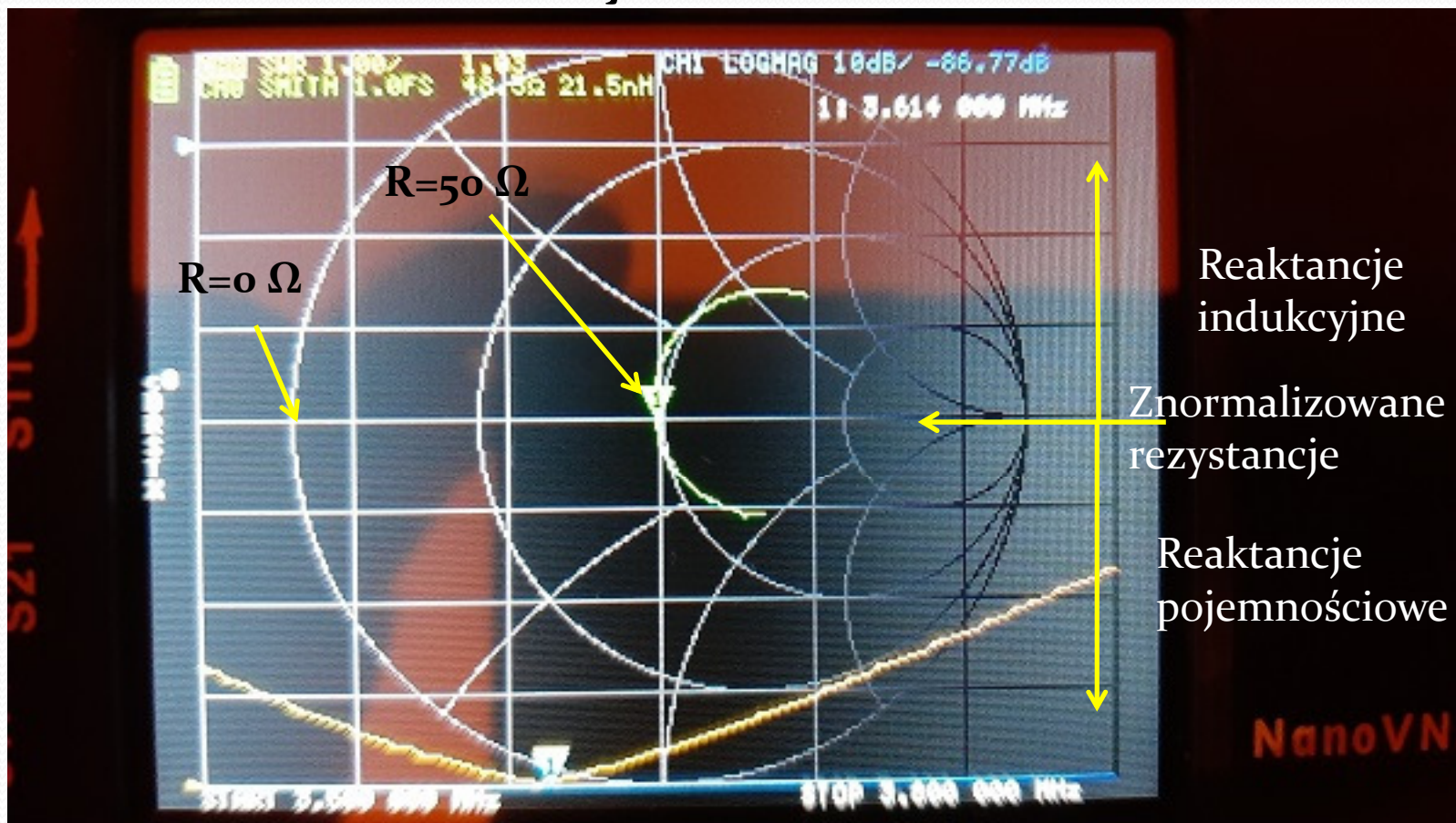
- Dipol półfalowy 60-75 Ω
- Dipol pełnofalowy 600-3000 Ω
- Dipol pętlowy 250-300 Ω

Impedancja wejściowa anten yagi jest zależna od długości elementów oraz odległości od wibratora direktora i reflektora



Antena yagi z dipolem pętlowym

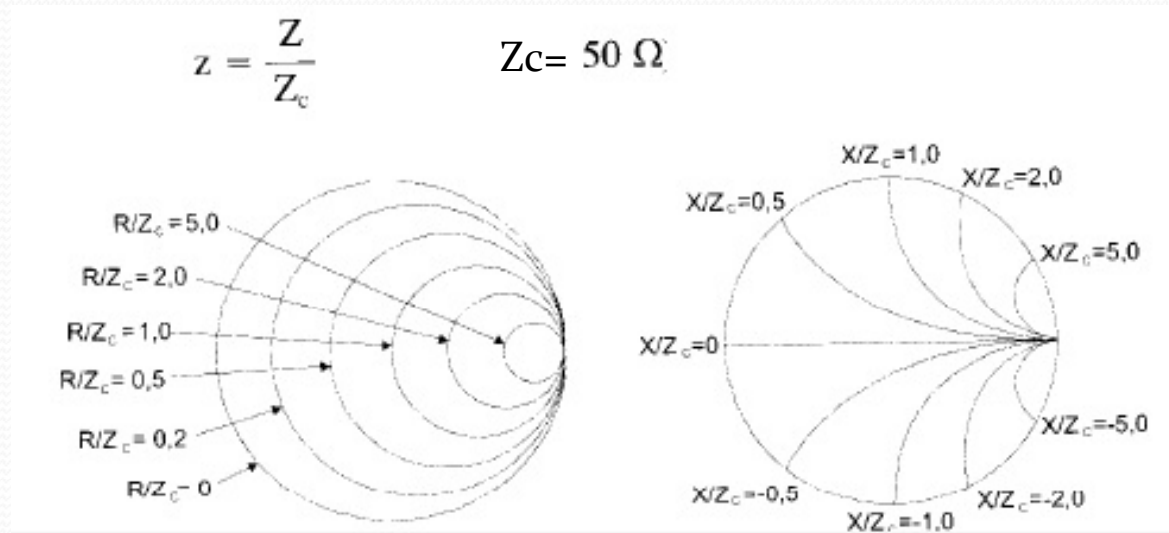
Pomiar rezystancji promieniowania anteny analizatorem antenowym NanoVNA



Antena w rezonansie na 3,614 Mhz posiada $R_p = 48,2 \Omega$, indukcyjność 21,5 nH (minimalna indukcyjność)

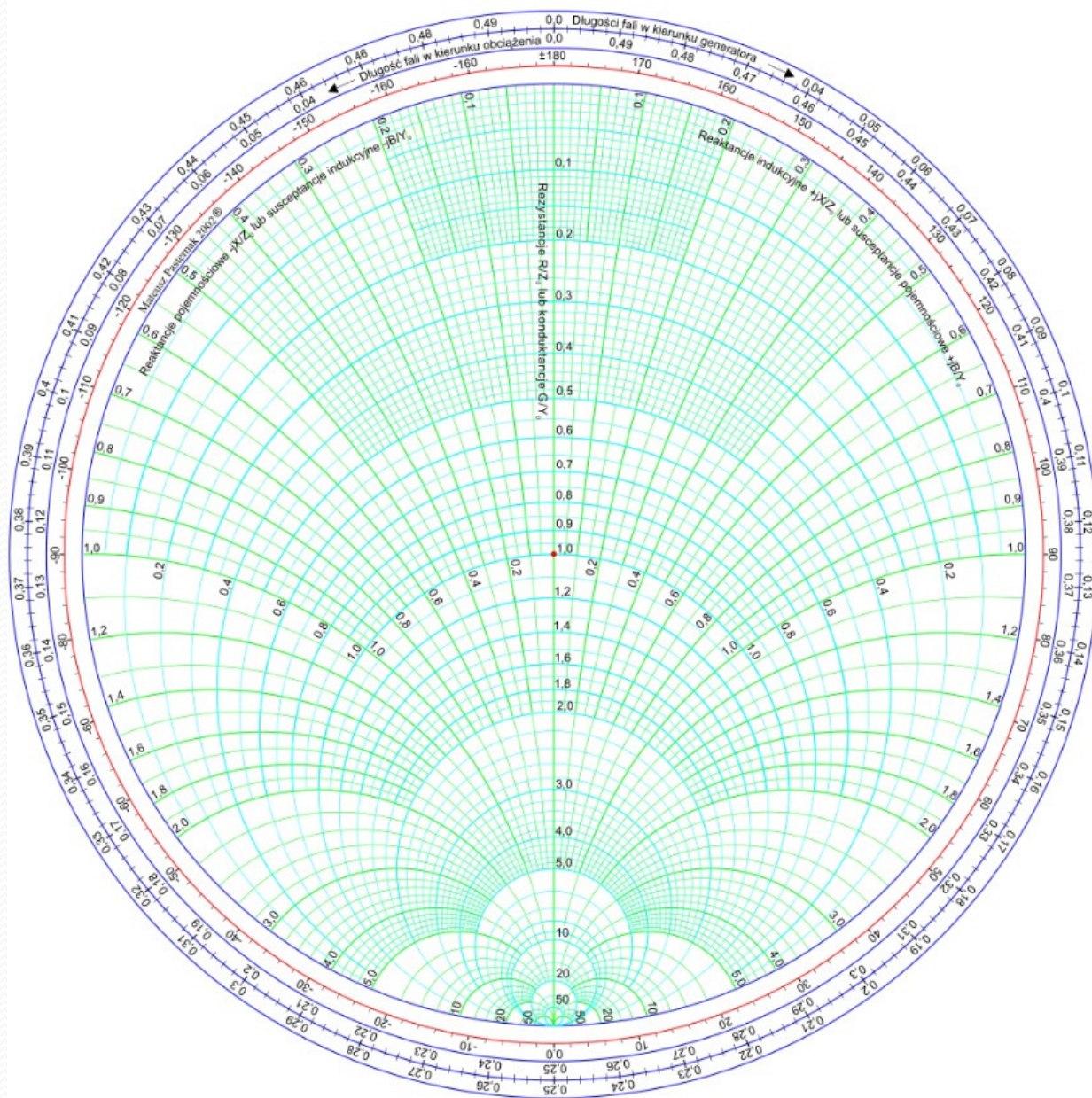
Na wykresie Smitha widzimy liczbę zespoloną $R_a + jX_a$

Pomiar rezystancji promieniowania anteny analizatorem antenowym NanoVNA

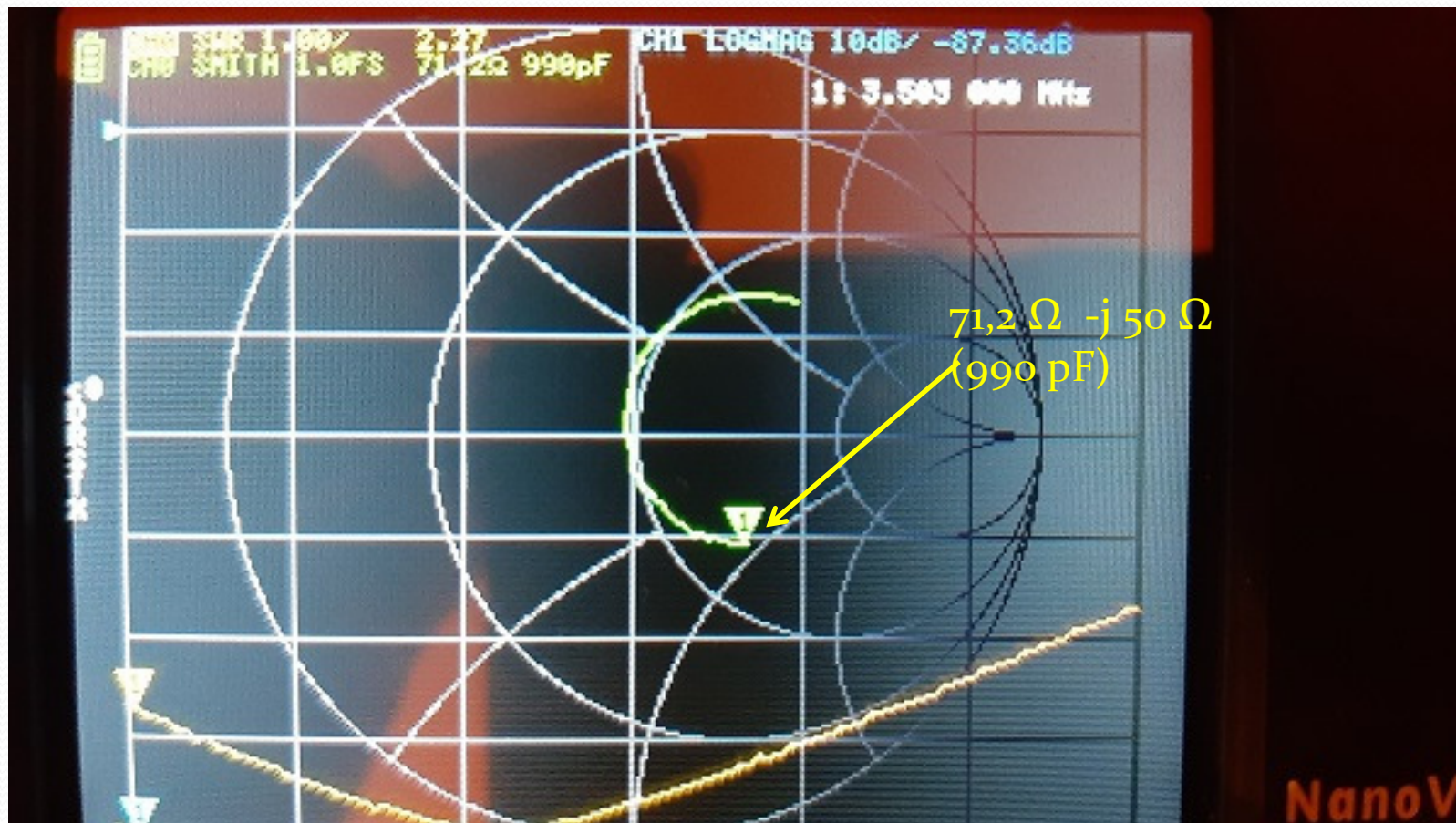


Na wykresie Smitha widzimy liczbę zespoloną $R_a + jX_a$

Wykres Smitha

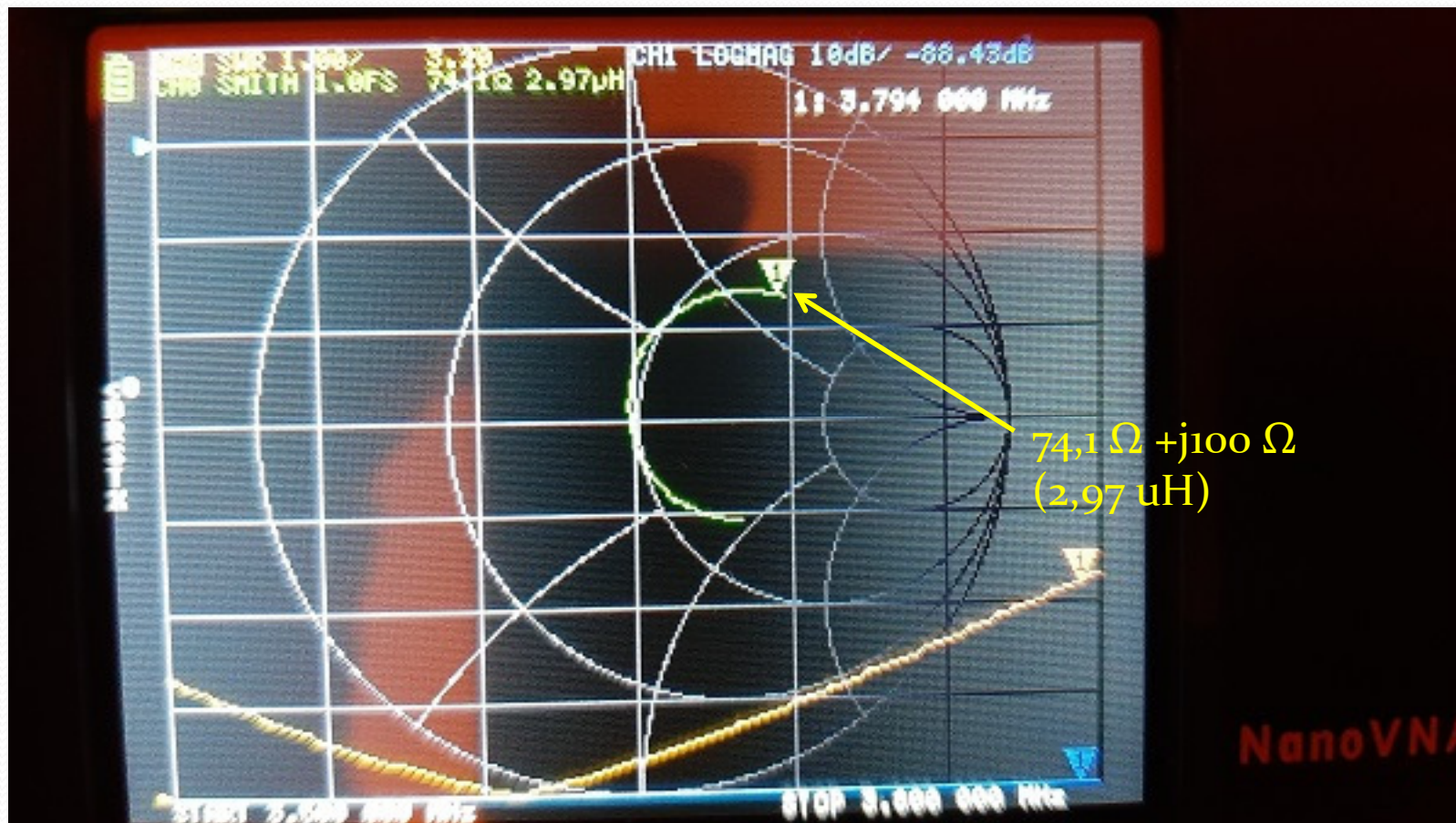


Pomiar rezystancji promieniowania anteny analizatorem antenowym NanoVNA



Antena na 3,500 Mhz posiada $R_p = 71,2 \Omega$ i pojemność 990pF

Pomiar rezystancji promieniowania anteny analizatorem antenowym NanoVNA



Antena na 3,794 Mhz posiada $R_p = 74,1 \Omega$ i indukcyjność 2,97uH



Dziękuję za uwagę

Piotr SP₉LVZ