



Politechnika
Wrocławska

Pole elektromagnetyczne w środowisku – efektywne metody monitorowania emisji pola elektromagnetycznego w otoczeniu stacji bazowych

Paweł Bieńkowski, prof. PWr

mgr inż. Bartłomiej Zubrzak

**Pracownia Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego
Politechnika Wrocławska**

dr Joanna Podlaska

Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Łodzi



Plan prezentacji

1. Monitoring mobilny PEM – propozycja metodyki i weryfikacja pomiarowa
2. Uniwersalna metoda szacowania natężenia pola w otoczeniu stacji bazowych

Prezentowane zagadnienia są częścią artykułu ***P. Bieńkowski, J. Podlaska, B. Zubrzak „Pole elektromagnetyczne w środowisku – metody szacowania i monitoring”*** – Medycyna Pracy – w procesie redakcyjnym

Monitoring PEM w Polsce

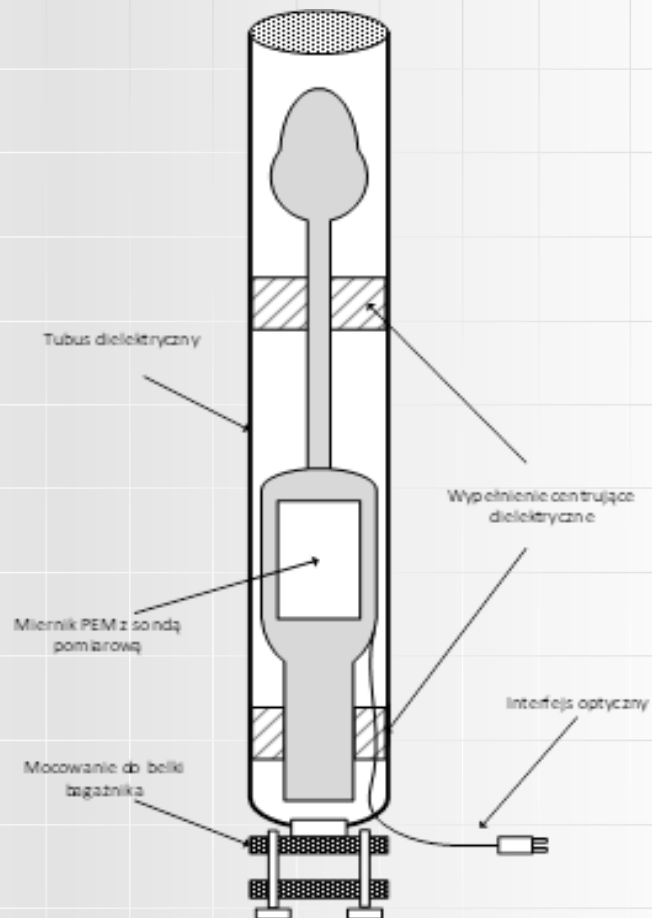
- System monitoringu PEM w Polsce daje obraz o natężeniu PEM w ściśle wyznaczonych punktach
- Cykliczne powtarzanie pomiarów pozwala określić długoterminowe trendy zmian
- Sposób doboru punktów pozwala na wyznaczanie wartości średnich – „systemowo” eliminując obszary w bezpośrednim otoczeniu źródeł PEM (do 100m)
- Przy wdrożeniu 5G i znacznym zagęszczeniu stacji bazowych może być trudne utrzymanie 100m odległości od źródeł
- Takie podejście nie pozwala na rozpoznanie rozkładu natężenia pola w szerokim obszarze (co nie znaczy, że takich badań nie ma – są to pomiary kontrolne wykonywane po uruchomieniu instalacji)

Monitoring mobilny

- Monitoring mobilny nie jest odkryciem nowym... ale pozwala na wykonywanie pomiarów w wielu punktach, co może przyczynić się do zebrania informacji o natężeniach PEM na dużym obszarze, a nie tylko w wybranych punktach.
- Wyniki takiego monitoringu, przy odpowiednio dobranym algorytmie wyznaczania trasy pomiarów, mogą pozwolić na przedstawienie znacznie szerszych informacji, niż system stosowany obecnie
- Pewną niedogodnością monitoringu mobilnego jest pomiar wartości chwilowej w danym punkcie, co może spowodować utratę informacji o statystycznej zmienności natężenia PEM w czasie.
- Istnieje także ryzyko zarejestrowanie artefaktów – np. przejeżdżającego obok samochodu z radiotelefonem dużej mocy (np. służby dyspozytorskie czy CB-radio) – ale można to wyeliminować odpowiednim algorytmem

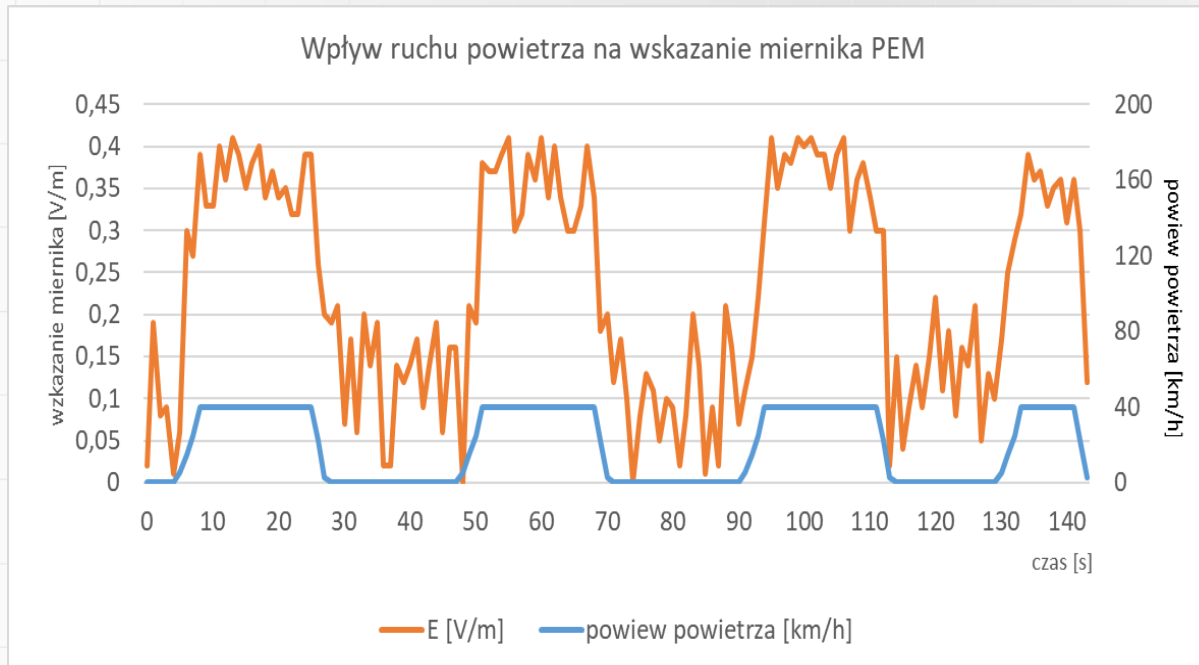
Monitoring mobilny

- Podstawowe założenie – minimalizacja kosztów sprzętu dzięki wykorzystaniu mierników obecnie stosowanych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska
- System pomiarowy wykorzystuje miernik szerokopasmowy przeznaczony do pomiarów stacjonarnych, który został dostosowany do prowadzenia pomiarów terenowych w ruchu z prędkościami „miejskimi”



Monitoring mobilny

- Weryfikacja zastosowanego rozwiązania – wpływ powiewu powietrza na wskazania przyrządu pomiarowego

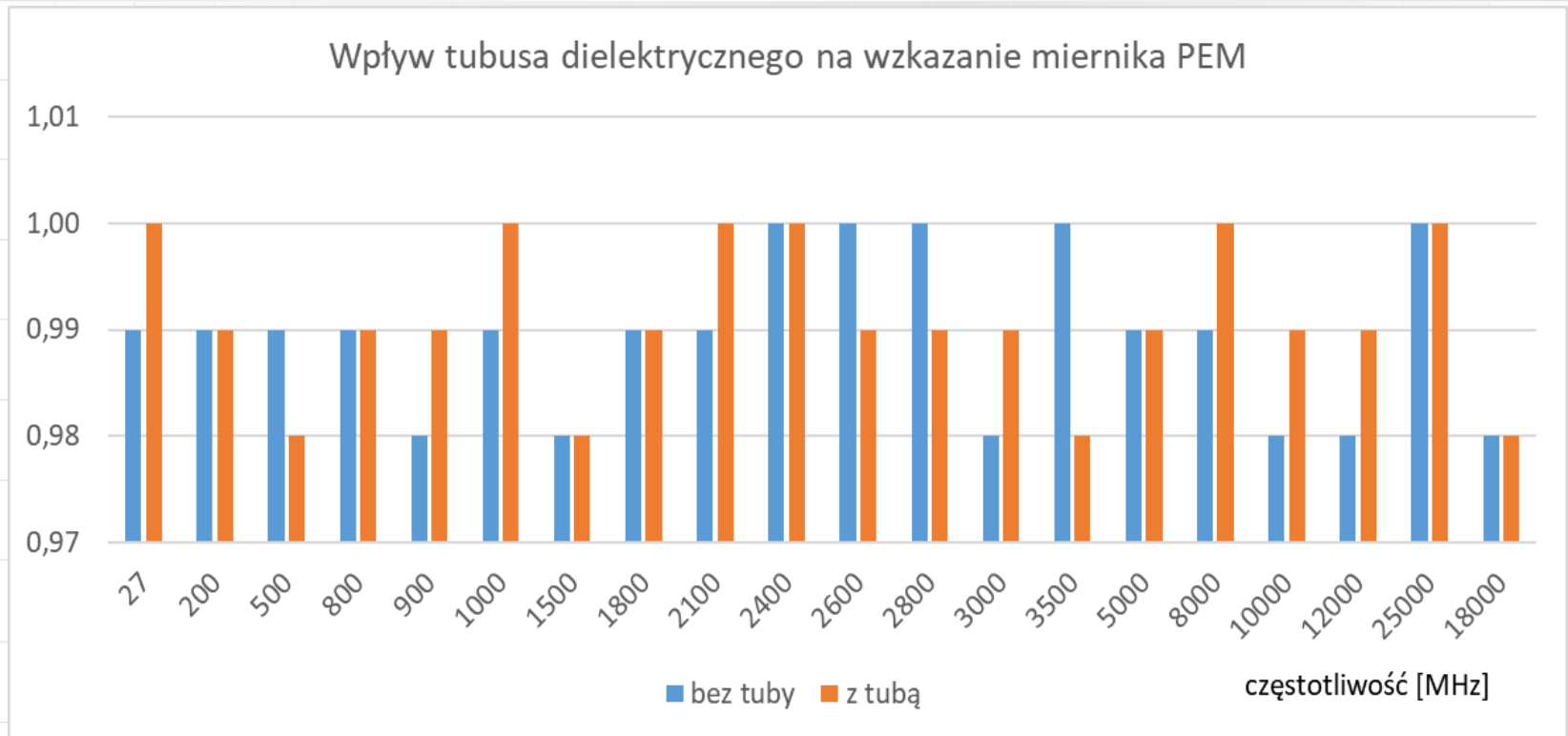


Przy powiewie o prędkości 40 km/h wskazania fluktuowały nawet do 0,3–0,4 V/m, co przy natężeniu pola elektromagnetycznego poniżej 1 V/m stanowi błąd kilkudziesięciu procent

Rozwiązanie: tubus dielektryczny o właściwościach antystatycznych – testy – pomijalny wpływ wiatru i elektryzowania na wynik pomiaru

Monitoring mobilny

- Weryfikacja zastosowanego rozwiązania – wpływ tubusu na wskazanie przyrządu – zmiany czułości miernika

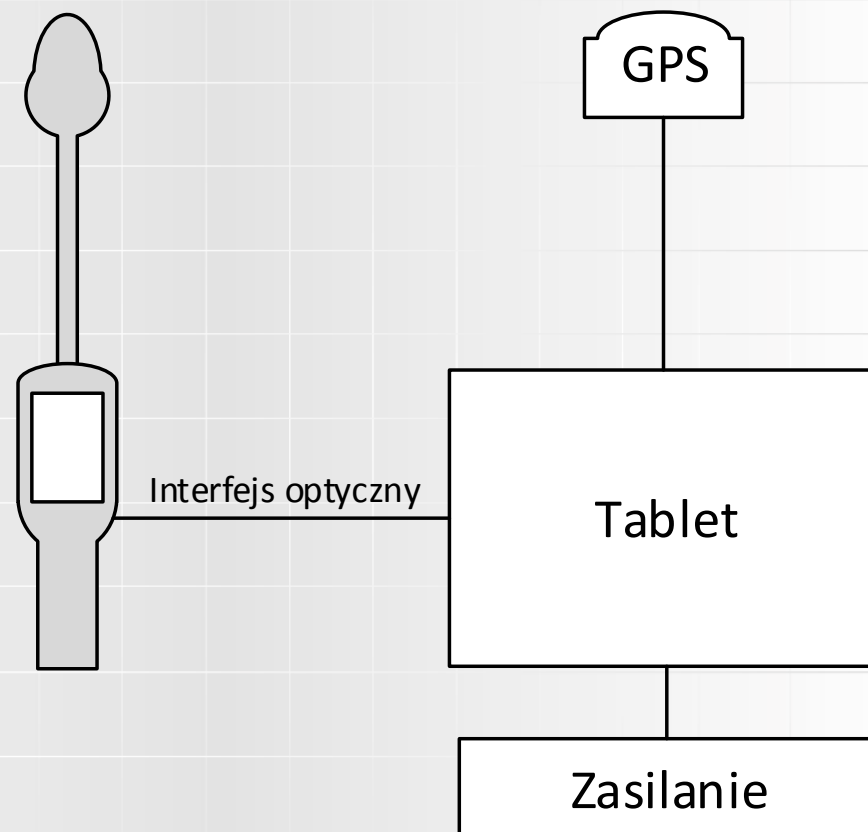


Wpływ tubusu na zmianę współczynnika częstotliwościowego nie przekraczał 0,02 co odpowiada 2% i jest pomijalne w budżecie niepewności typowych pomiarów PEM w środowisku

Monitoring mobilny

System pomiarowy:

- Miernik szerokopasmowy
- Odbiornik GPS
- Tablet z oprogramowaniem rejestrującym wyniki pomiaru oraz współrzędne GPS



Weryfikacja – pomiar w ruchu
i pomiar stacjonarny w danym
punkcie – różnice pomijalne



Własna aplikacja

Aplikacja „Logger EMF GPS” - pozwala na rejestracje wyników pomiarów wraz ze współrzędnymi GPS, ich obserwacje w czasie rzeczywistym oraz eksport do pliku (.csv) lub do formatu GIS (.kml).

The screenshot displays the 'Logger EMF GPS' application interface. On the left, there are control panels for GPS status (COM: 10, Connect), EMF Meter status (COM: 9, n/a), and Measurement settings (Interval: 1s, auto logging to file, START, PAUSE, Genety GPS, Time elapsed: 00:00:00, Measurements count: 0, Ignore when not in move, margin: 0.000005, Save to file, Open file, Export to KML, Map provider: Google). The main area is a map of Wrocław, Poland, showing a recorded path marked with green and yellow dots. The path starts near the 'Dworzec śląsko-Merchajski' and follows a route through the city, including areas like 'Fosa Miejska' and 'Krasnal Turysta'. Various landmarks and points of interest are labeled on the map, such as 'High school Liceum Ogólnokształcące nr XII im. Bolesława...', 'Amusement Center House of Crime', 'Sushi Restaurant', 'Bulka z Masłem', 'PUBO Hotel Wrocław Stare Miasto', 'Forum Muzyki', 'Palac Królewski we Wrocławiu', 'Philharmonic Hall Narodowe Forum Muzyki', 'Muzeum Teatru im. Henryka...', 'Opera House Opera Wroclawska', 'Magistrates' Court Sąd Rejonowy dla Wrocławia Śródmieścia', 'Police Department Komenda Wojewódzka Policji', and 'Elementary School Szkoła Podstawowa nr 67 ZSP 13'. The bottom of the map shows the copyright information: '©2018 Google - Map data ©2018 Tele Atlas, Imagery ©2018'.

Monitoring mobilny

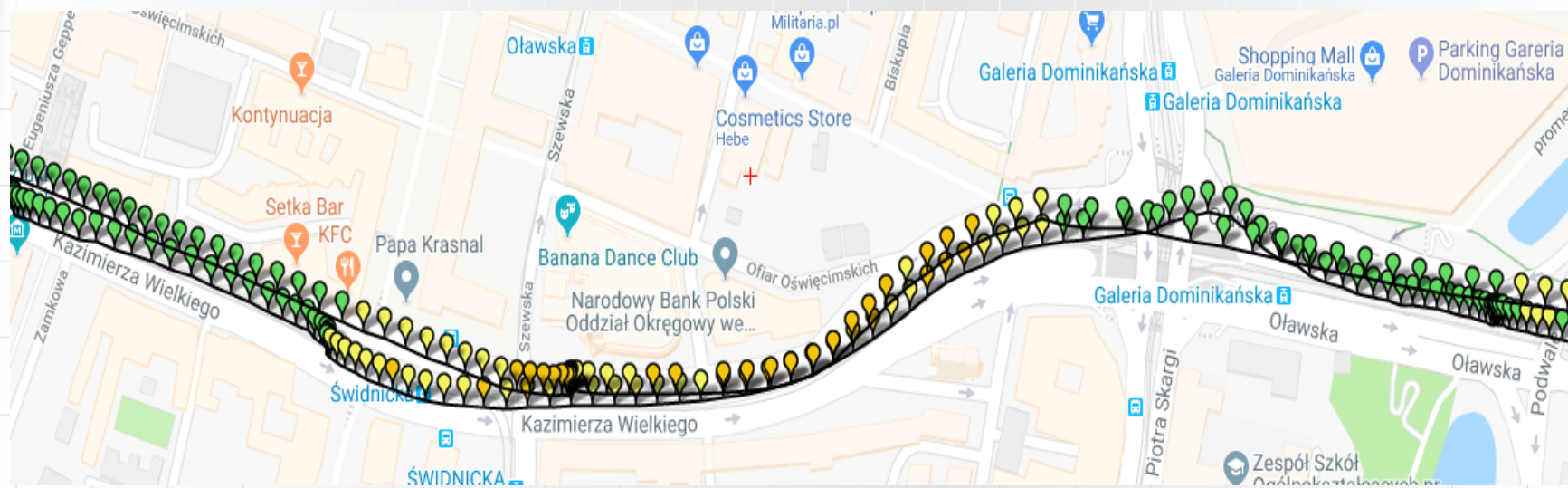
Pomiary w terenie

- Weryfikację systemu przeprowadzono we Wrocławiu w okolicach centrum miasta.
- Temperatura powietrza wynosiła 15°C, a wilgotność 55%.
- Trasę dobrano tak, by przebiegała w otoczeniu stacji bazowych telefonii komórkowej
- Wybrane odcinki trasy pokonano dwukrotnie, celem sprawdzenia, czy wskazania będą się zbliżone.

Monitoring mobilny

Pomiary w terenie – w wyniku weryfikacji pomiarowej uzyskano:

- Względną powtarzalność wyników przy przejeździe w obie strony tą samą trasą
- Brak błędnych wskazań podczas hamowania i przyspieszania
- Stabilne wskazania w trakcie postoju (np. na światłach)

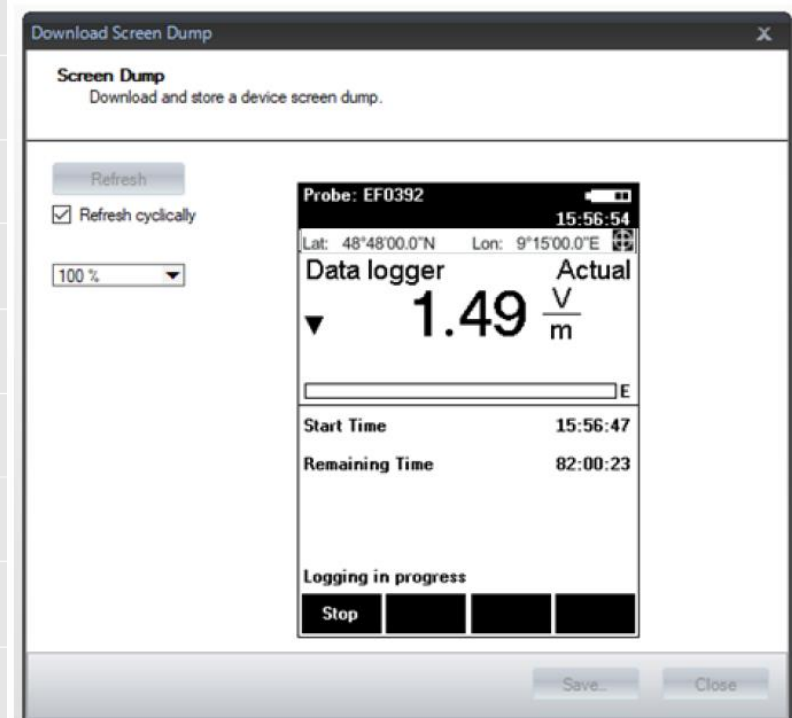


Monitoring mobilny

Wnioski:

- Specjalizowane oprogramowanie znacznie rozszerza możliwości przyrządów pomiarowych (pomimo faktu, że posiadają możliwość podłączenia odbiornika GPS i tryb rejestratora)
- Wykorzystanie tabletu czy komputera PC pozwala na bieżąco obserwować i analizować rejestrowane dane, a co za tym idzie modyfikować trasę w czasie rzeczywistym czy monitorować na bieżąco poprawność pracy całego systemu

Można też skorzystać z wewnętrznego loggera miernika, a wskazania obserwować na firmowej aplikacji „ekranu wirtualnego”



Najważniejsze pytanie – jak dobrać trasę pomiarową? - propozycje....

- Pomiaru należy prowadzić wzdłuż wyznaczonej trasy przez określony czas – np. 30 min lub 1 godzina. Zaleca się taką trasę przejechać co najmniej dwukrotnie – jeżeli jest taka możliwość w różnych godzinach – np. w czasie szczytu ruchu telekomunikacyjnego i poza nim.
- Obszar podlegający pomiarom należy dobrać tak, by obejmował takie miejsca, jak:
 - Centra miast - Osiedla mieszkaniowe - Miejsca gromadzenia się ludzi (markety, centra handlowe, biurowce itp.) – Obiekty specjalne (żłobki, przedszkola, szkoły, szpitale, itp.)
- Trasę przejazdu dobiera się tak, żeby możliwie równomiernie pokryć cały obszar pomiarów – realizując pomiary wzdłuż ulic metodą meandra lub spirali przyjmując, że odległość między kolejnymi liniami pomiarów powinna zawierać się w przedziale od 100 do 200 m.

Najważniejsze pytanie – jak dobrać trasę pomiarową? - propozycje c.d.

- Na terenie przewidzianym do wykonania pomiarów identyfikuje się instalacje radiokomunikacyjne i szacuje miejsca, w których można spodziewać się największych wartości natężenia PEM.
- Trasa przejazdu powinna przebiegać w odległości 50–150 m, 150–300 m i 300–600 m w rzucie poziomym od lokalizacji anten.
- Wynik pomiarów do statystyk – wartość średnia z całej trasy, wartość maksymalna – wyznaczona jako średnia z pięciu punktów pomiarowych w otoczeniu punktu maksymalnego, procent trasy w zadanych przedziałach natężenia pola – np. $<0,5$ V/m, 0,5–2 V/m, 2–4 V/m, 4–7 V/m i >7 V/m.
- Pełne wyniki z całej trasy mogą posłużyć do zobrazowania zmian natężenia pola w badanym obszarze. Nałożenie tras pomiarowych na mapę (np. w systemie typu GIS) z zaznaczonymi instalacjami radiokomunikacyjnymi będzie dodatkową zaletą i pozwoli na szacowanie zmienności natężenia pola w otoczeniu np. stacji bazowych.



Jak

prosto, szybko

i wystarczająco dokładnie

oszacować natężenia PEM

w otoczeniu anten

np. stacji bazowych ?

Szacowanie natężenia PEM w otoczeniu anten np. stacji bazowych

- Na etapie projektowania instalacji jak i w trakcie jej eksploatacji, jako uzupełnienie pomiarów dla zgrubnej oceny oddziaływania na środowisko, określenia wpływu na wypadkowe natężenie pola poszczególnych instalacji czy też określenia obszaru, gdzie np. można spodziewać się największych poziomów PEM
- Rygorystyczne metody wyznaczania rozkładu PEM wymagają szczegółowej znajomości parametrów źródła, systemów antenowych i warunków propagacji ze szczegółową topografią terenu oraz parametrami elektrycznymi terenu i materiałów, z których zbudowane są budynki i inne obiekty

Szacowanie natężenia PEM w otoczeniu anten np. stacji bazowych

- W praktyce, nawet w profesjonalnych rozwiązaniach, często stosuje się uproszczone modele analityczne, oparte na bezstratnej propagacji w swobodnej przestrzeni z założeniem warunków **poła dalekiego**:

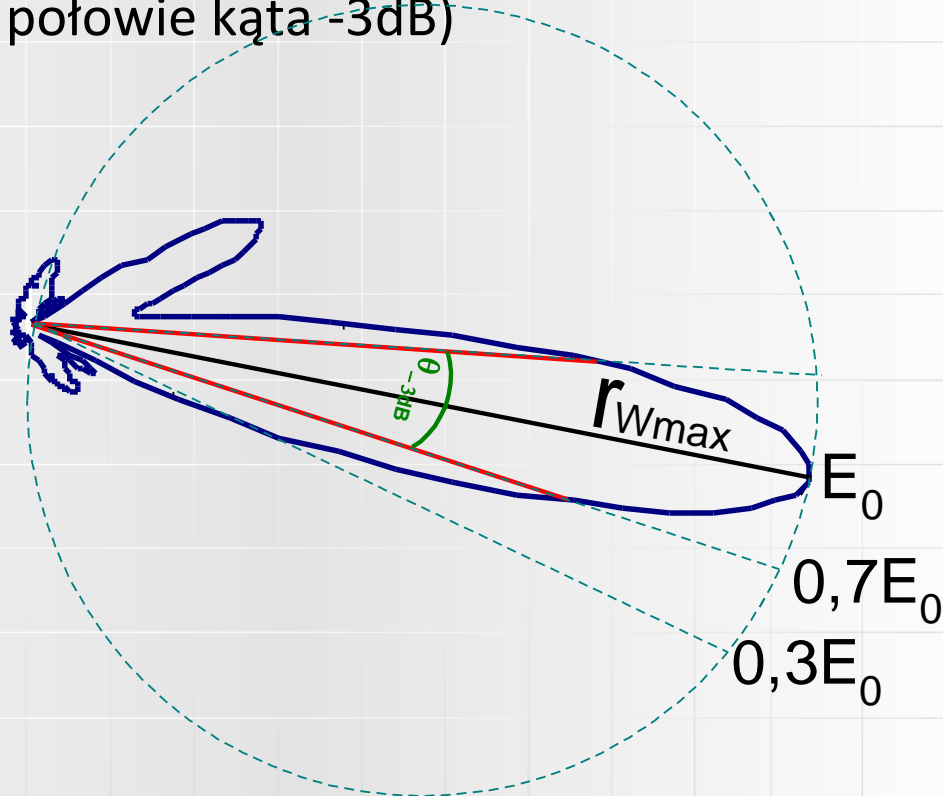
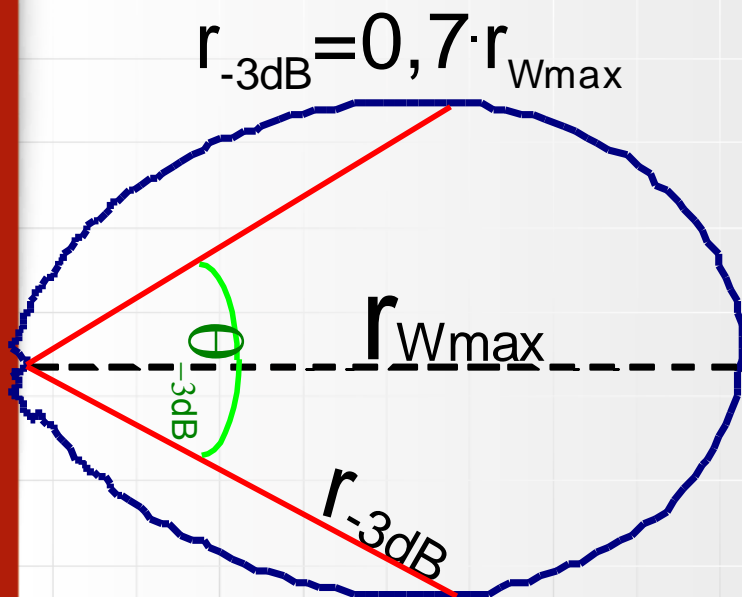
$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G} \cdot F(\theta, \phi)}{r} \text{ [V/m]}$$

$$E_C = \sqrt{\sum_n E_n^2}$$

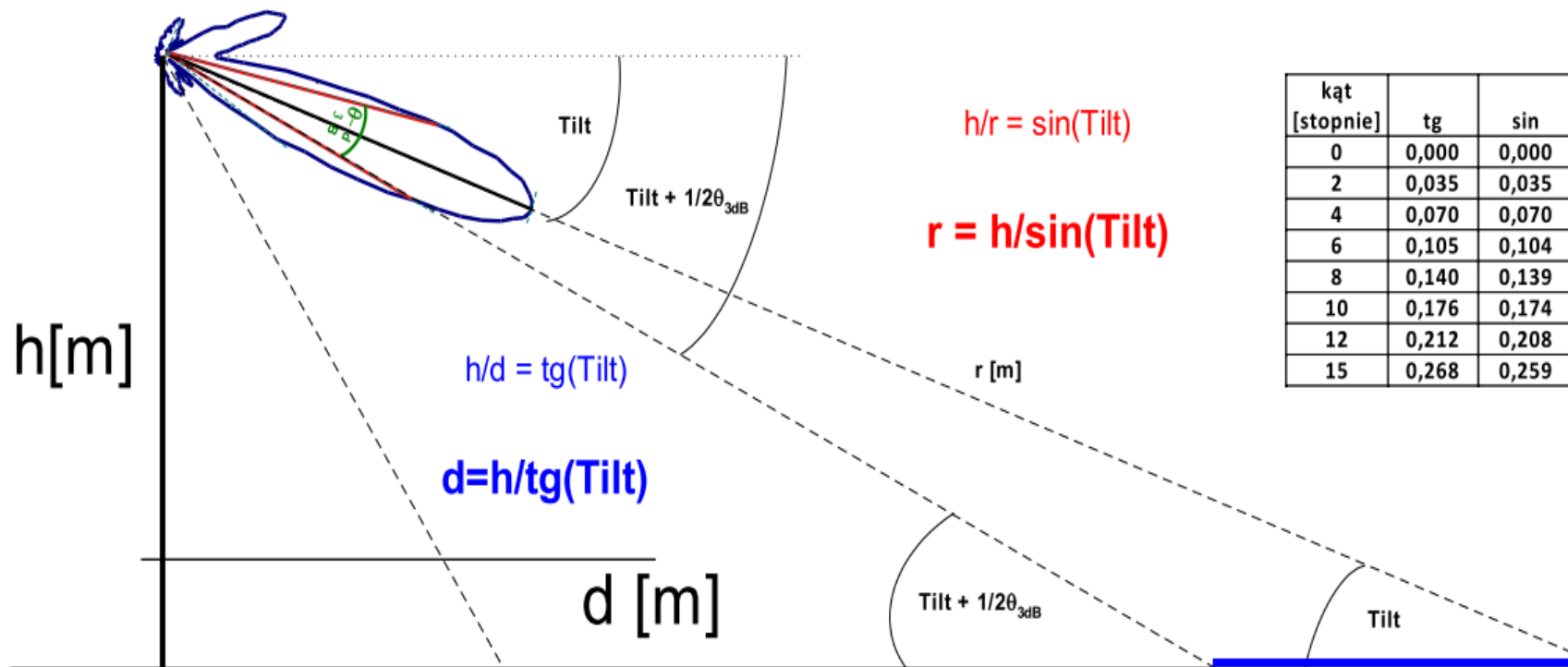
- $P \cdot G = \text{EIRP}$
- $F(\theta, \phi)$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie poziomej i pionowej [V/V],

Charakterystyka promieniowania i kąt połowy mocy (inne oznaczenia: HP, -3dB)

- Kąt między punktami charakterystyki promieniowania, w których moc promieniowana spada o 3dB w stosunku do mocy promieniowanej na kierunku maksymalnej mocy (uwaga – dla charakterystyk symetrycznych odchylenie od osi głównej do „połowy mocy” odpowiada połowie kąta -3dB)



Gdzie będzie maksimum natężenia pola?

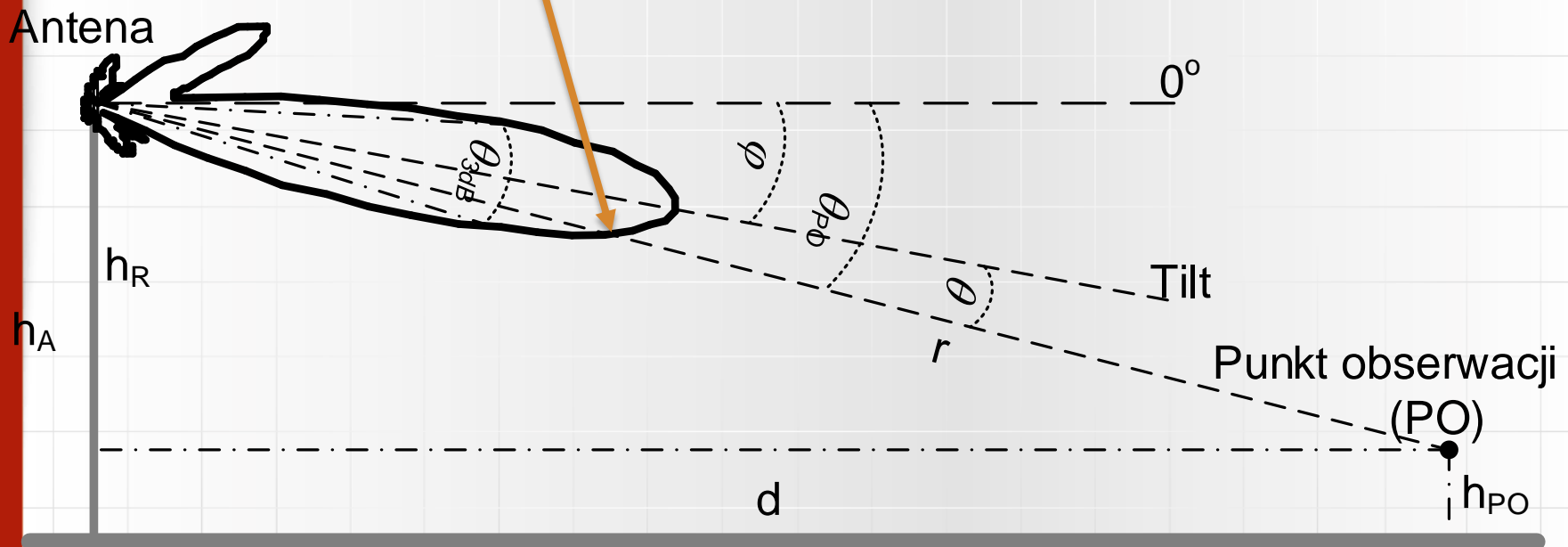
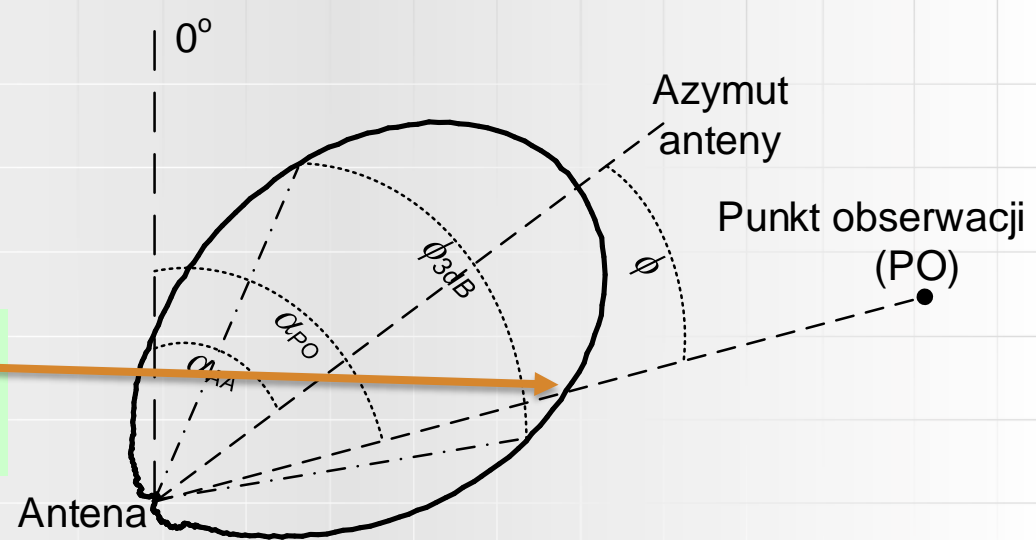


- Maksymalny zasięg 7V/m dla $F(\theta) = F(\phi) = 1$ czyli w osi głównej anteny:

$$r_{max} = 0,8 \cdot \sqrt{P \cdot G}$$

Dowolny punkt przestrzeni....

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G \cdot F(\theta, \phi)}}{r} \text{ [V/m]}$$



Charakterystyki promieniowania – gdzie znaleźć?

- Katalogi producenta
- Propozycja upraszczająca - aproksymacja głównej wiązki promieniowania funkcją analityczną:

$$F(\theta) = \cos^n(\theta)$$

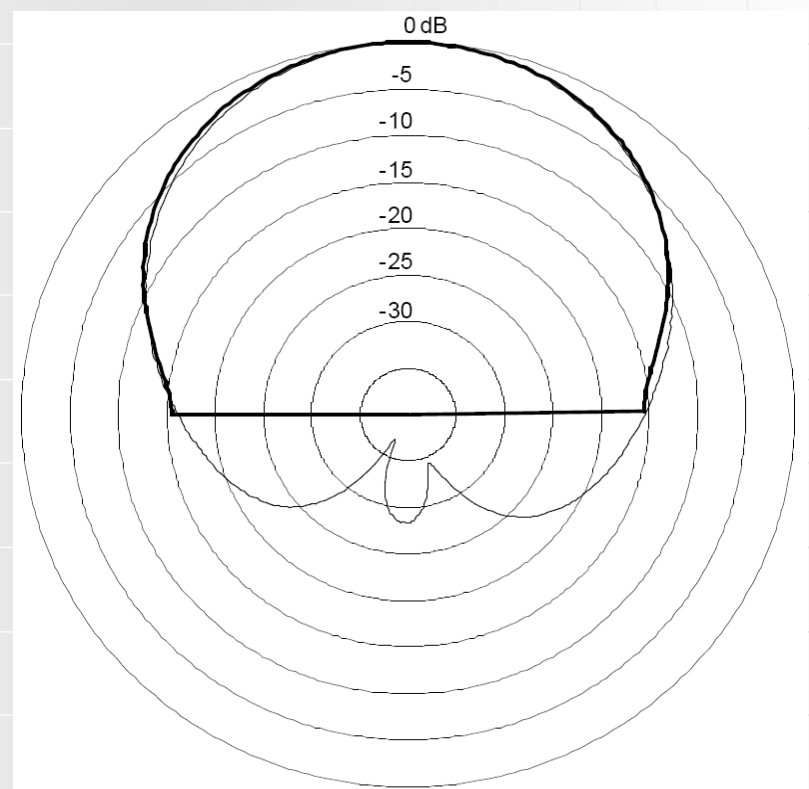
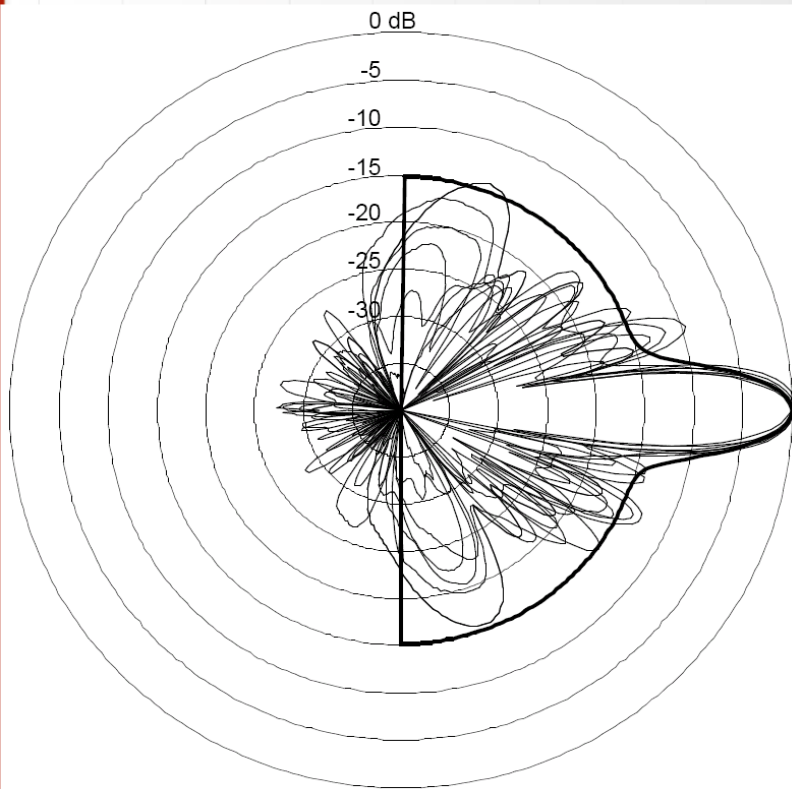
- Możliwość uwzględnienia poziomu listków bocznych S_L [dB]

$$F(\theta) = 10^{\frac{S_L}{20}} + \left(1 - 10^{\frac{S_L}{20}}\right) \cdot \cos^n(\theta)$$

$$F\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$n = \frac{\lg\left(F\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) - 10^{\frac{S_L}{20}}\right) - \lg\left(1 - 10^{\frac{S_L}{20}}\right)}{\lg\left(\cos\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right)\right)}$$

Przykład

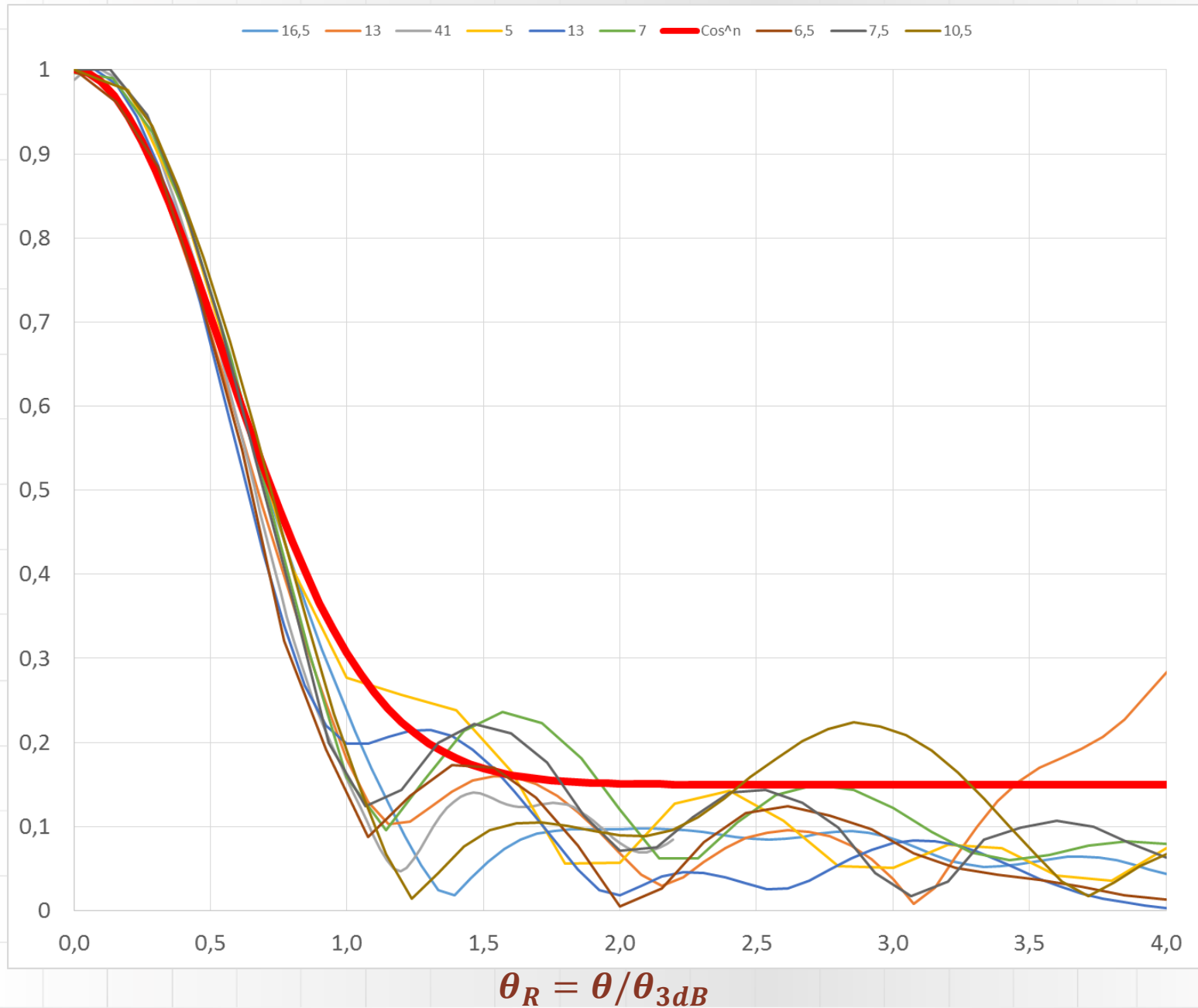


Unormowana charakterystyka promieniowania*

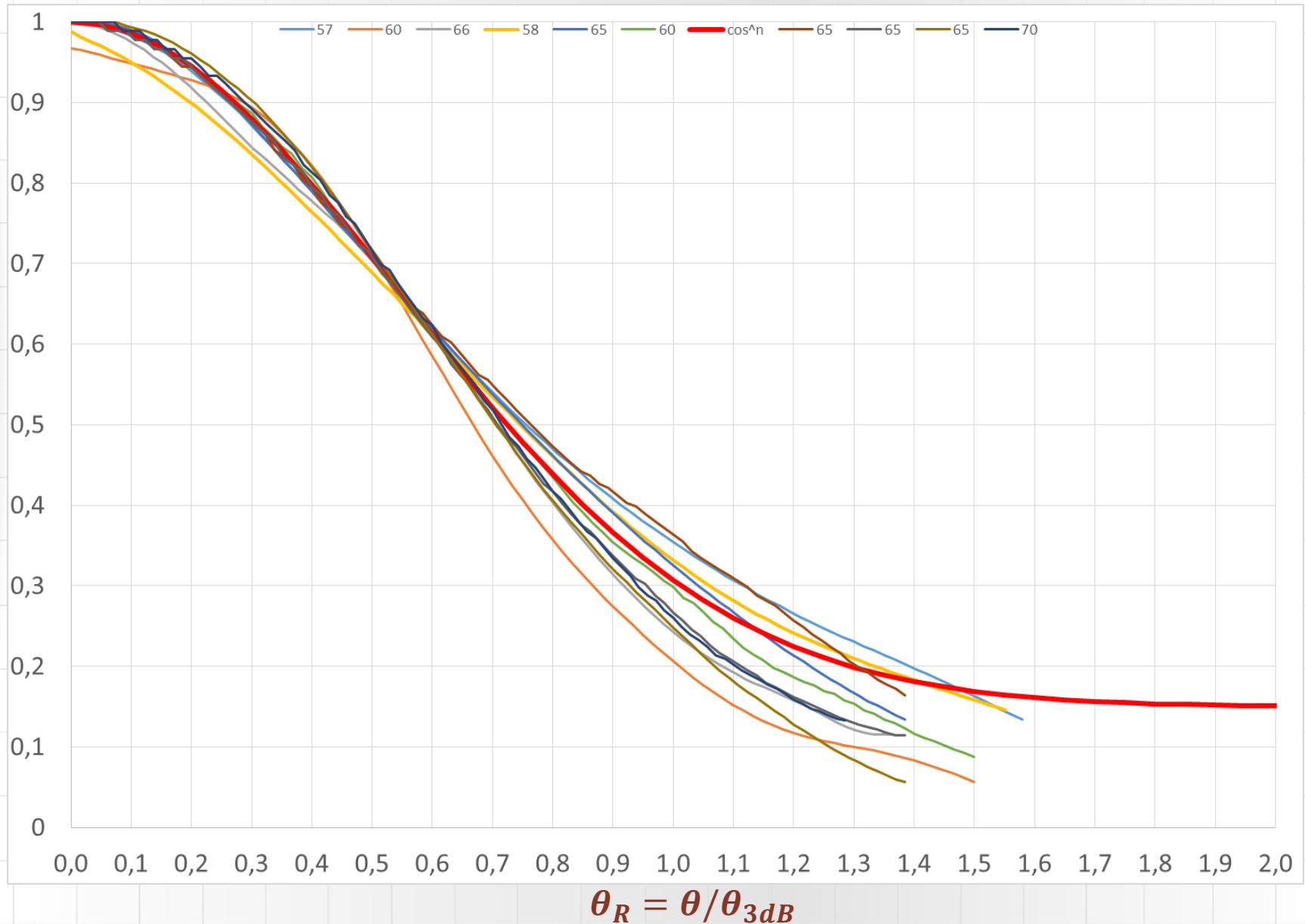
- Zauważmy, że parametrem różnicującym kształt charakterystyk promieniowania anten syntezyowanych zgodnie z przedstawionymi zależnościami jest tylko **kąt połowy mocy**
- Czyli charakterystyki dowolnych anten unormowane względem ich kątów połowy mocy powinny wyglądać identycznie
- Weryfikacja tej tezy – sprawdzenie dla kilkudziesięciu charakterystyk rzeczywistych anten stacji bazowych....
- Wniosek – zgadza się.....

* *P. Bieńkowski, J. Podlaska, B. Zubrzak: Pole elektromagnetyczne w środowisku – metody szacowania i monitoring – Medycyna pracy – w druku*

Charakterystyki pionowe anten sektorowych



Charakterystyki poziome anten sektorowych



Wnioski:

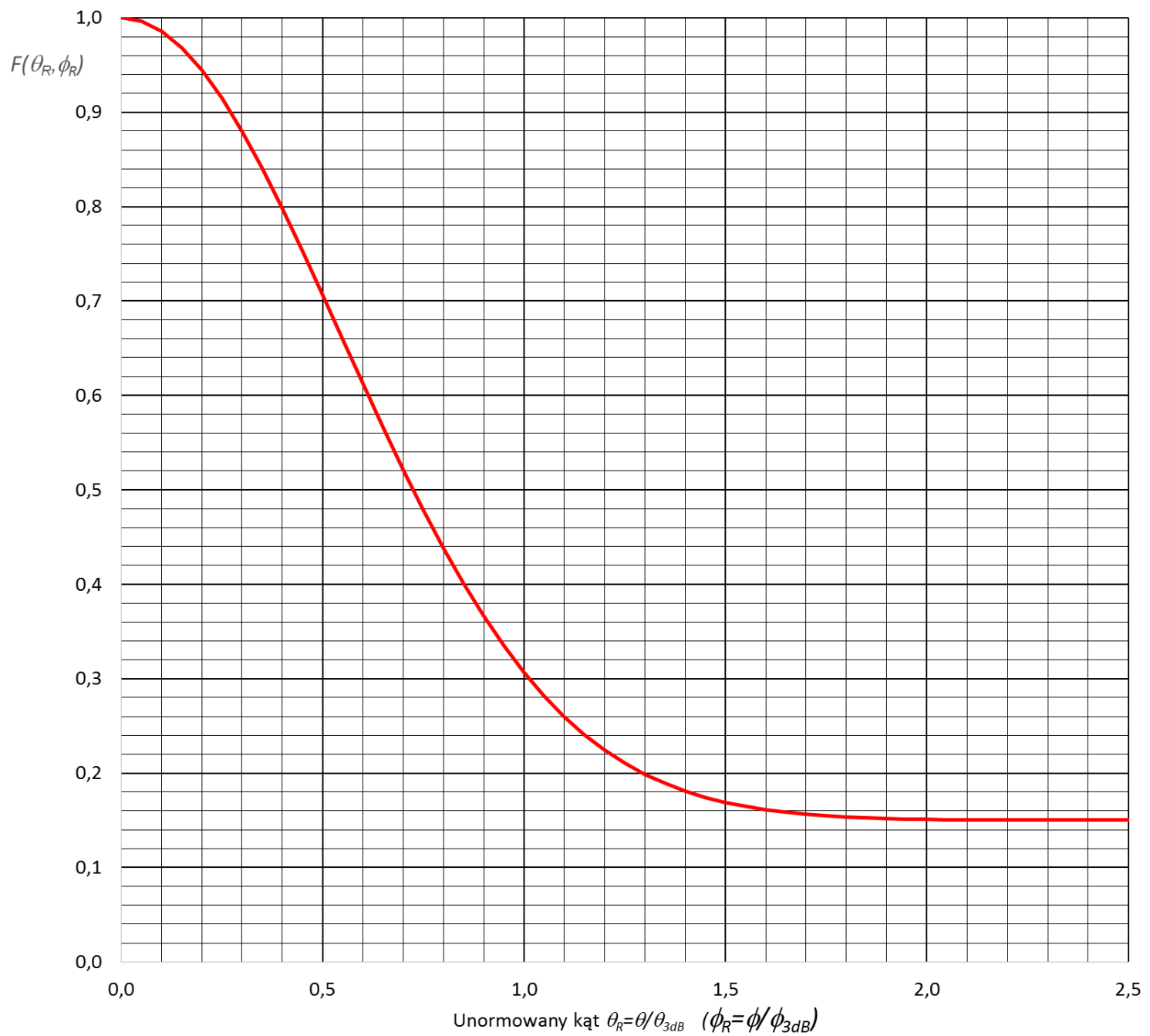
Wykorzystanie unormowanej charakterystyki promieniowania anten pozwala znacznie uprościć stosowanie zależności opisujących charakterystyki wyznaczone analitycznie

Zamiast każdorazowo wyznaczać wartość n i wyliczać wartość $F(\theta)$ dla danego kąta, można wprowadzić pojęcie unormowanego

kąta θ_R :

$$\theta_R = \theta / \theta_{3dB}$$

oraz skorzystać z uniwersalnej unormowanej charakterystyki anteny wyznaczając wartość $F(\theta_R)$ dla kąta unormowanego, albo jeszcze prościej – odczytując wymaganą wartość wprost z nomogramu przedstawiającego unormowaną charakterystykę anteny

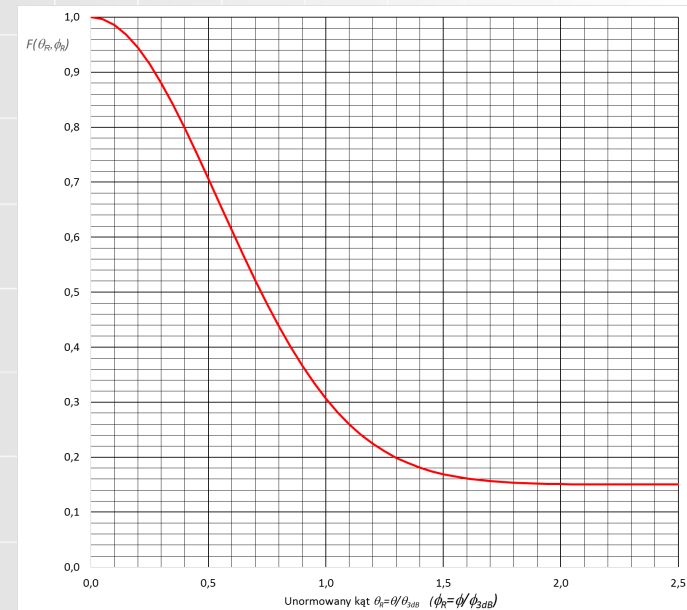
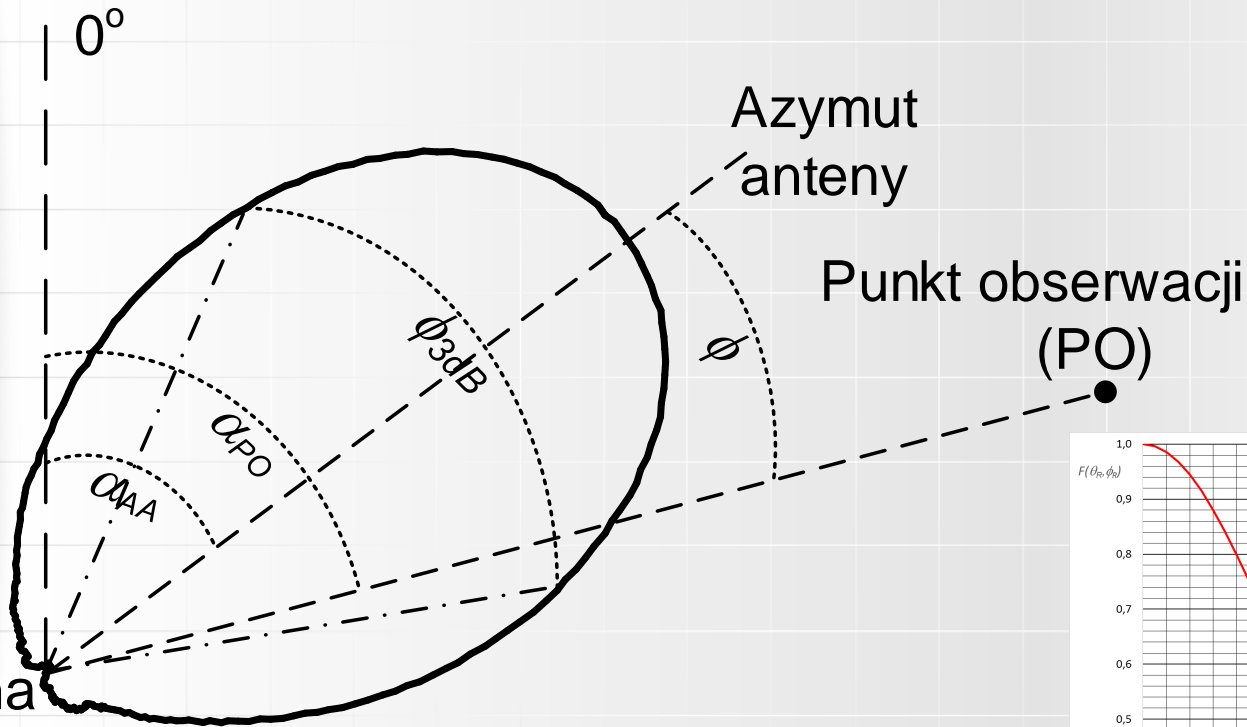


I algorytm obliczeniowy.....

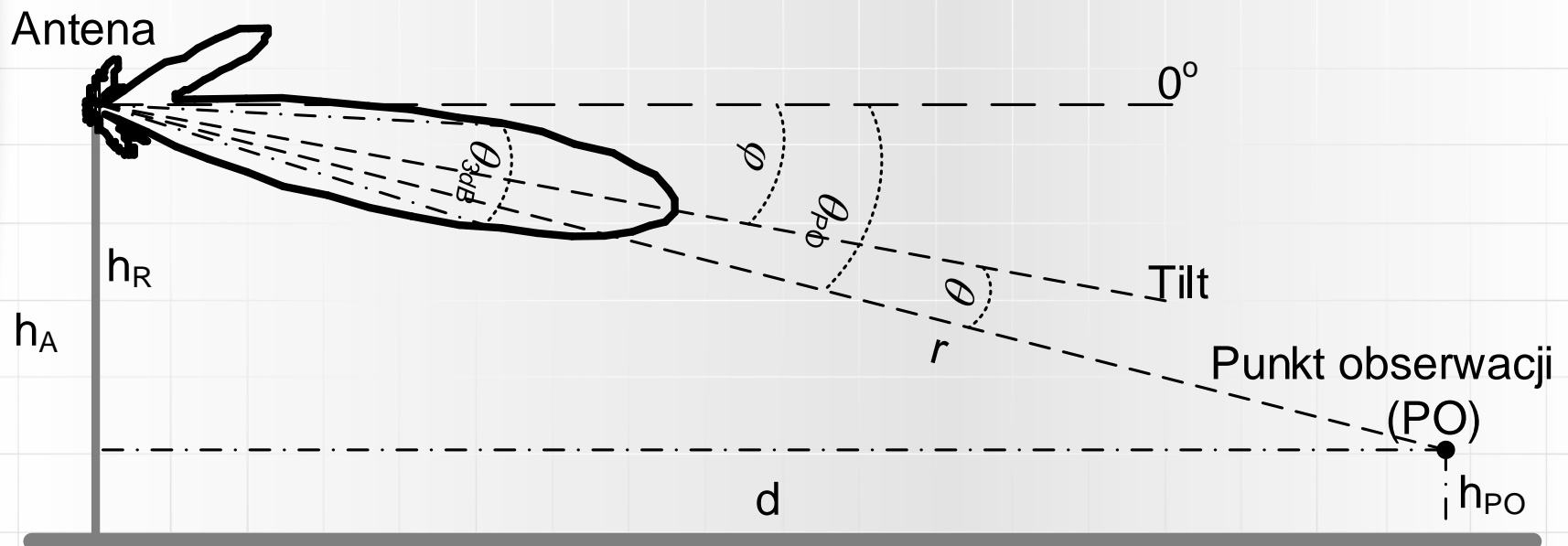
$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G \cdot F(\theta, \phi)}}{r} \text{ [V/m]}$$

1. Określić podstawowe parametry anteny: zysk G [dBi], kąt połowy mocy w płaszczyźnie poziomej ϕ_{3dBH} i pionowej θ_{3dBV} oraz tilt φ (pochylenie wiązki głównej anteny względem poziomu – tilt $\varphi=0$ odpowiada wiązce głównej anteny równoległej do powierzchni ziemi).
2. Wyznaczyć moc promieniowaną z anteny - na podstawie danych operatora (i/lub danych katalogowych zysku anteny) – albo z EIRP, albo z mocy doprowadzonej do anteny i zysku anteny.

3. Wyznaczyć azymut względny ϕ (odchylenie kątowe w płaszczyźnie poziomej PO od kierunku osi głównej anteny) oraz względny kąt $\phi_R = \phi/\phi_{3dB}$ i odczytać wartość $F(\phi_R)$ z nomogramu



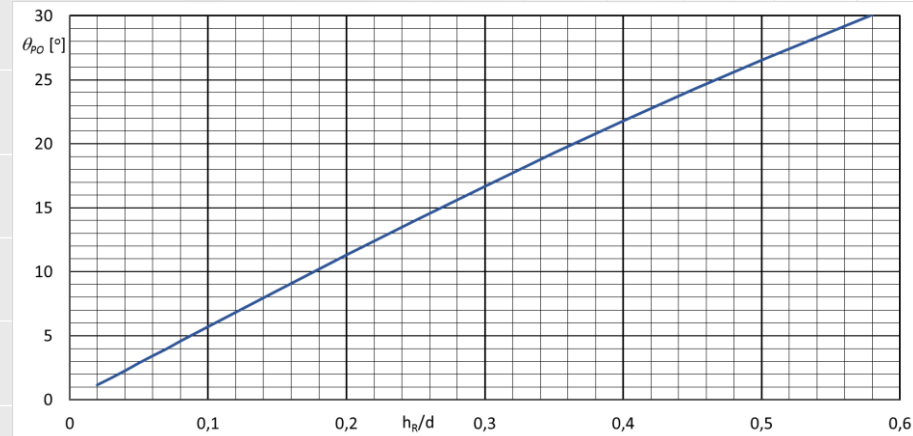
4. Określić odległość w rzucie poziomym między anteną a PO – d [m]
5. Wyznaczyć względną wysokość h_R punktu PO w stosunku do wysokości zawieszenia anteny typowo jest to różnica między wysokością zawieszenia anteny h_A a wysokością PO nad poziomem terenu – h_{PO}



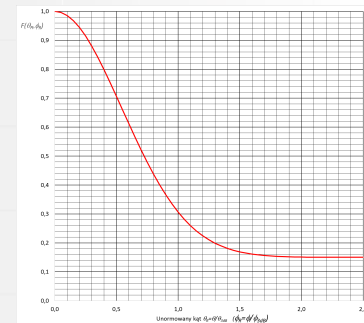
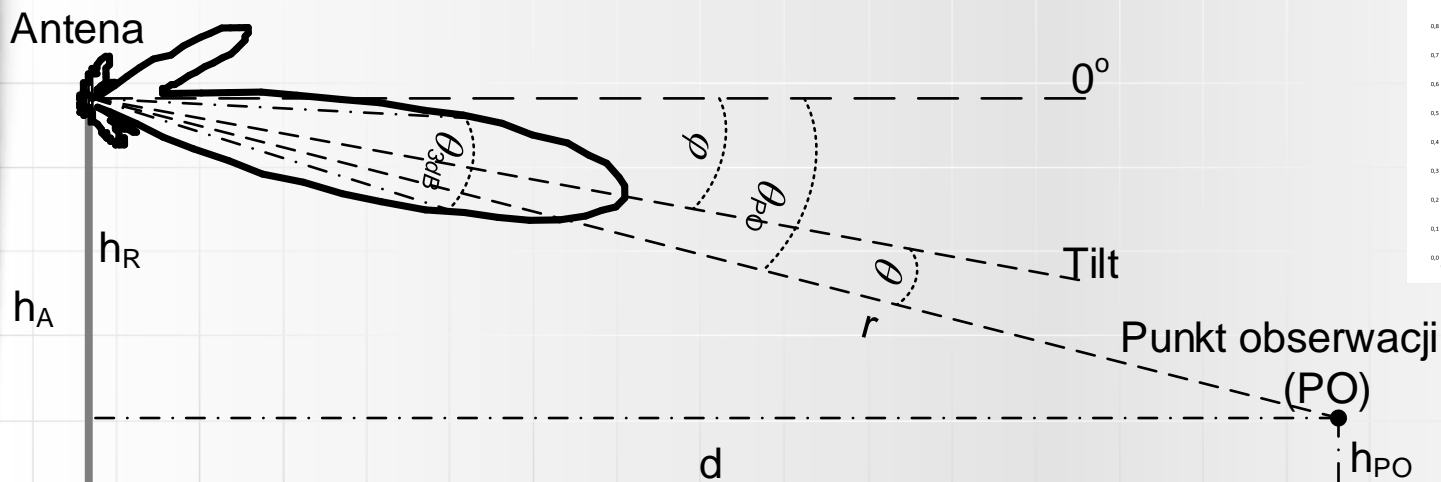
6. Wyznaczyć kąt θ_{PO} w pionie (elewacja), pod jakim antena widoczna jest z PO poprzez określenie stosunku h_R/d i odczytanie kąta θ_{PO} dla h_R/d ze wzoru

$$\theta_{PO} = \arctg\left(\frac{h_R}{d}\right)$$

albo z nomogramu:



7. Wyznaczyć **względny** kąt widoczności anteny z uwzględnieniem tiltu - $\theta = \theta_{PO} - \varphi$ (uwaga – jeżeli θ jest ujemne oznacza to, że anteną widać powyżej osi głównej – do dalszych analiz należy przyjąć θ bez znaku). Określić względny kąt $\theta_R = \theta / \theta_{3dBV}$ i odczytać $F(\theta_R)$ z nomogramu



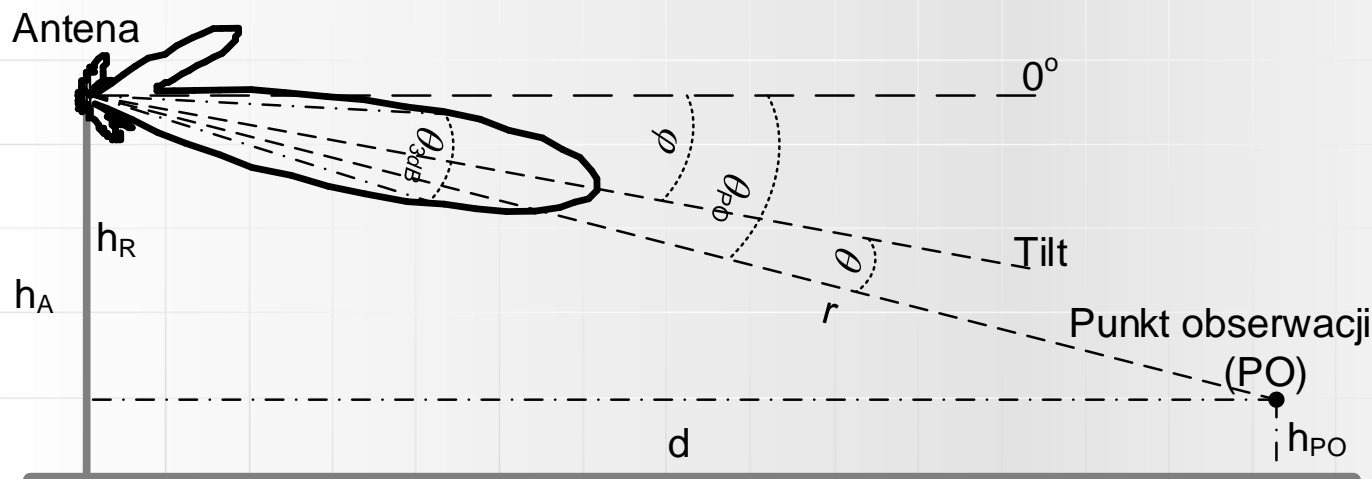
8. Wyznaczyć odległość r między środkiem anteny a punktem PO z zależności:

$$r = \sqrt{h_R^2 + d^2}$$

9. Uwaga – z dużym przybliżeniem można przyjąć $r = d$ zwłaszcza jeżeli $h_R/d < 1/4$

10. Wszystkie wyznaczone wartości podstawić do wzoru i wyliczyć

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G \cdot F(\theta, \phi)}}{r} \text{ [V/m]}$$



Podsumowanie

- Przedstawiony algorytm pozwala w sposób prosty i zrozumiały nawet dla „niespecjalistów” wyznaczyć natężenie PEM w dowolnym punkcie przestrzeni
- Jeżeli punkt oświetla pole kilku anten – operacje należy powtórzyć dla każdej z nich i wyznaczyć wypadkowe natężenie pola
- Szacowanie nie uwzględnia odbić i przeszkód, ale wydaje się wystarczająco dokładne - to jest tylko szacowanie....



Dziękujemy za uwagę

i zapraszamy do lektury (jak się tylko ukaże w druku):

P. Bieńkowski, J. Podlaska, B. Zubrzak:

„Pole elektromagnetyczne w środowisku – metody szacowania i monitoring” – Medycyna Pracy