



Politechnika
Wroclawska

Optymalizacja sieci komórkowych pod kątem oddziaływania na środowisko - możliwości i ograniczenia

Paweł Bieńkowski

Pracownia Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki

Politechnika Wroclawska



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

pawel.bienkowski@pwr.edu.pl

Plan prezentacji

1. Informacja a energia
2. Pole elektromagnetyczne stacji bazowych
3. Sieć komórkowa – czy można optymalizować pod kątem minimalizacji obciążenia środowiska?

Co rozumiem pod pojęciem **optymalizacji?**

Minimalizacja energii elektromagnetycznej emitowanej do środowiska przy zachowaniu zdolności sieci do przestania określonych ilości informacji w zadanym czasie



Informacja w radiokomunikacji

- Podstawowym celem działania systemów radiokomunikacyjnych jest przesyłanie wiadomości zawierających informacje
- Podstawową – najmniejszą – jednostką informacji w świecie cyfrowym jest **1 bit**
- Ale bit bitowi nierówny – zależnie od sytuacji każdy bit może mieć inną „**pojemność informacyjną**” – czyli ta sama liczba bitów może nieść wiadomości różniące się ilością informacji

Bit bitowi nierówny...

- Dlaczego? Bo informacje można przetwarzać – kompresować (bezstratnie i stratnie)
- Efekt – tą samą informację możemy przesłać z wykorzystaniem mniejszej liczby bitów – a więc jeden bit może mieć większą pojemność informacyjną
- Przykład – cyfrowy zapis audio:
 - Płyta CD – 700MB – 80 minut muzyki – **1MB CDA** ma pojemność informacyjną ok. **7sekund muzyki**
 - MP3 – typowa piosenka – 4 minuty – ok. 2,5MB – czyli **1MB MP3** na pojemność informacyjną ok. **96 sekund muzyki** czyli **13 razy większą** od **CDA**
- Podobne przykłady mamy dla obrazów – np. bitmapa i jpg, czy video – H.264 i H.265 i wiele, wiele innych

Dlaczego o tym mówimy?

- Bo postęp w przetwarzaniu danych pozwala nam przestać określać wiadomości przy użyciu mniejszej ilości jednostek informacji – czyli bitów
- Technologie kompresji cały czas się rozwijają zarówno dzięki coraz lepszym „oszustwom” naszych zmysłów jak i możliwościom obliczeniowym naszych komputerów
- Trend ten powinno się brać pod uwagę np. przy ocenie zapotrzebowania na przepustowość sieci – to, że chcemy przesyłać więcej plików multimedialnych o coraz lepszej jakości wcale nie musi oznaczać, że będzie trzeba przesyłać proporcjonalnie więcej danych...
- A mniej danych – mniejsza energia potrzebna do ich transmisji w systemach radiokomunikacyjnych, a to **pierwszy krok do optymalizacji obciążenia środowiska**

Energia w radiokomunikacji

- Informacja w systemach radiokomunikacyjnych przenoszona jest przez **energię elektromagnetyczną**
- Przesłanie każdego bita informacji wymaga emisji „w eter” określonej porcji energii elektromagnetycznej
- Wielkość tej energii zależy od sprawności transmisji energii na trasie nadajnik - odbiornik oraz sprawności wykorzystania tej energii do przekazywania informacji
- Sprawność energetyczną przekazywania informacji można np. określić miarą niezbędnej **mocy/bit** [W/bit]
- I tu znowu pojawia się pole do popisu...

Sprawność energetyczna transmisji

- Modulacje cyfrowe pozwalają na przesłanie w jednym symbolu (czyli najmniejszym „kwancie” danych modulacji) różnej liczby bitów – określa to tzw. wartościowość modulacji – czyli ile bitów informacji można przesłać w jednym symbolu modulacji
- Najprostsze – jeden symbol = 1 bit (np. BPSK, ale już QPSK -2 bity/symbol)
- „Najlepsze” – jeden symbol = 8 bitów (np. 256QAM)
- Oczywiście im bardziej skomplikowana modulacja tym większe wymagania dla jakości transmisji - można to przełożyć na potoczne określenie – „**im gorsze warunki – tym wolniejsza transmisja**” albo – jeżeli chcemy mieć taką samą przepustowość sieci – potrzeba więcej zasobów – np. szerszego pasma – i tu pojawia się kolejna sprawność – wykorzystanie widma – z miarą: **bity/Hz**
- Przykład – przejście z TV analogowej na DVBT – ta sama szerokość kanału – 8MHz – w TV analogowej – jeden program –w DVBT od 5 nawet do 10 programów

Sprawność energetyczna transmisji

- Podsumujemy:
- Przesłanie przez sieć komórkową jednej 4 minutowej piosenki
- Przypadek najgorszy – przesyłamy plik CDAudio – ok. 45MB z modulacją QPSK – potrzeba przesłać 11,25 Msymboli co wymaga przepustowości ok. **47 ksymboli/s**
- Przypadek najlepszy – przesyłamy tą piosenkę w MP3 – ok. 2,5MB z modulacją 256QAM – potrzeba przesłać ok. 10ksymboli co wymaga przepustowości **0,04 ksymbola/s**
- Nawet jeżeli przyjmujemy, że czas transmisji 1 symbolu 256QAM jest 5 razy dłuższy niż QPSK to i tak mamy ponad 200-krotną przewagę „optymalnej transmisji”
- **To jest pierwszy drogowskaz do optymalizacji**
- Ale idźmy krok dalej - przesłanie każdego symbolu **wymaga energii – ile?**

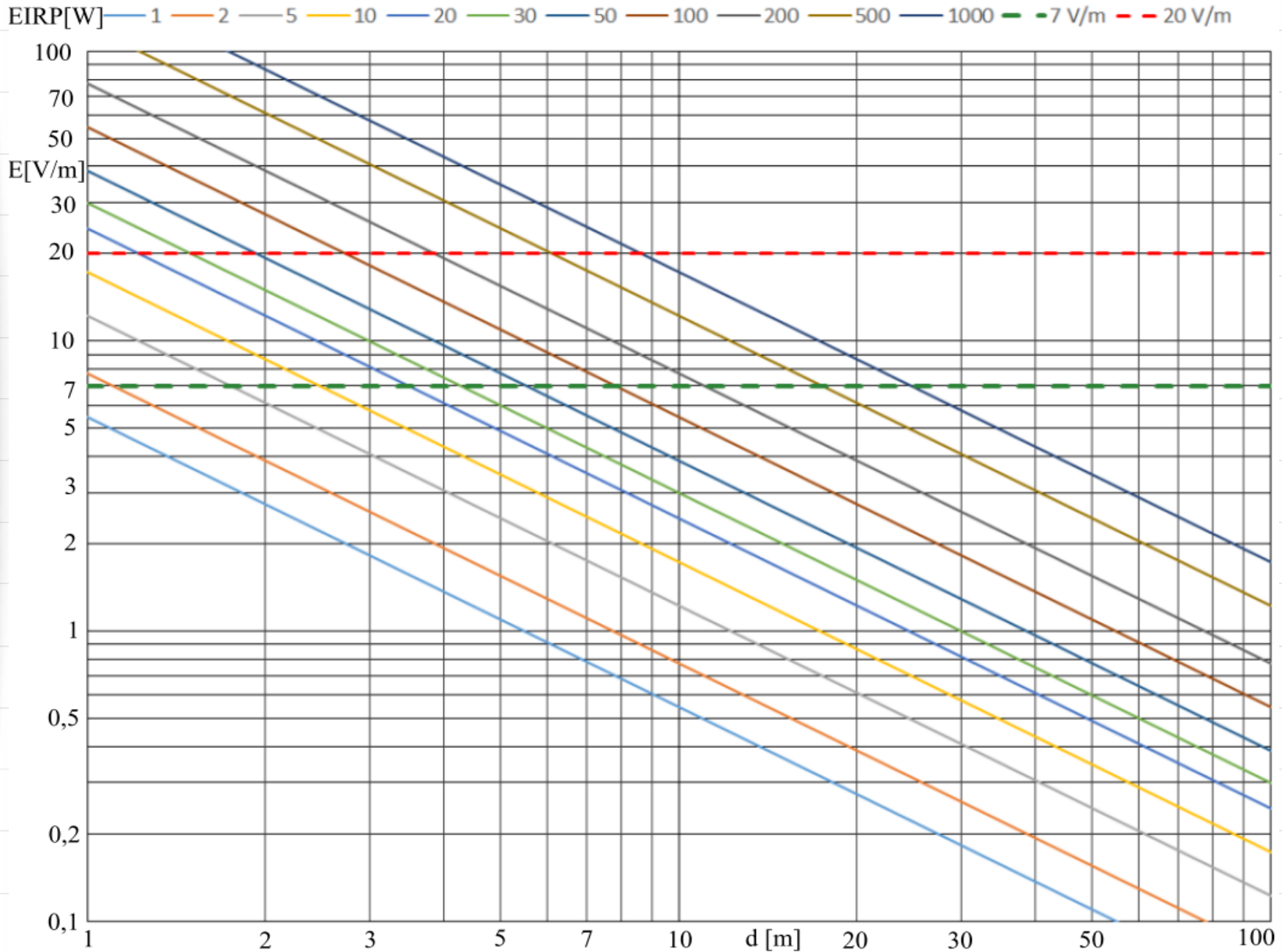
Energia emitowana przez anteny nadajników

- Do poprawnego odbioru wiadomości przez odbiornik niezbędny jest odpowiedni poziom sygnału reprezentowany np. przez **gęstość mocy w miejscu odbioru** (i dodatkowo odpowiedni stosunek moc sygnału/zakłócenia...)
- Najprościej **gęstość mocy** można zdefiniować jako moc emitowaną przez antenę podzieloną przez powierzchnię, na którą ta moc pada.
- Najprostszy model – stosowany dość powszechnie w prostych analizach radiowych opisuje zależność:
$$S = \frac{P \cdot G \cdot F^2(\theta, \phi)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \text{ [W/m}^2\text{]}$$
- Wniosek: energia docierająca do odbiornika maleje z kwadratem odległości – jeżeli chcemy uzyskać tą samą gęstość mocy – **dwukrotne oddalenie od stacji bazowej** skutkuje koniecznością **czterokrotnego zwiększenia mocy nadawanej**
- Wniosek: abonent blisko stacji bazowej jest mniej „energochłonny”

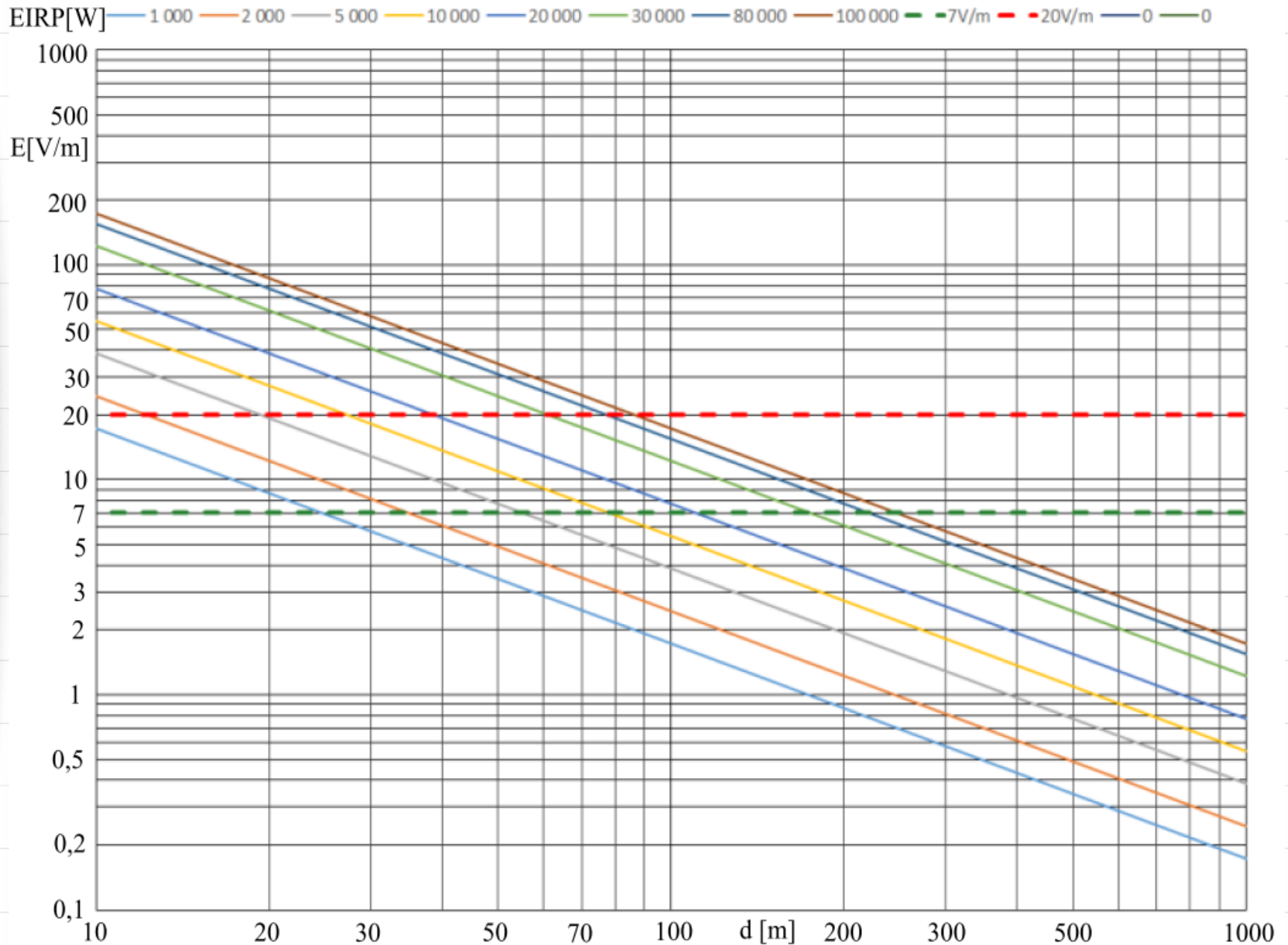
Moc nadawana a ochrona środowiska

- Z zależności na poprzednim slajdzie wynika, że im bliżej anteny – tym większa gęstość mocy (czy natężenie pola elektromagnetycznego)
- W pewnej odległości od anteny natężenie pola może być na tyle duże, że przekroczy wartości dopuszczalne ustanowione przepisami ochronnymi. Oczywiście w ocenie interesują nas tylko miejsca dostępne dla ludności – nie ma żadnego problemu, jeżeli np. taki obszar występuje powyżej naszego domu (uwaga: nie dotyczy Ikara, bo Dedal był rozsądniejszy...)
- Między innymi dlatego anteny stacji bazowych muszą być oddalone od miejsc dostępnych dla ludności – ale minimalna odległość nie zależy od wielkości anteny a od mocy przez nią emitowanej
- Póki co w Polsce dopuszczalny poziom pola elektromagnetycznego w pasmach stosowanych w systemach komórkowych $E=7V/m$ – czy to dużo czy mało?

Jak daleko od anteny? Pikokomórki i mikrokomórki

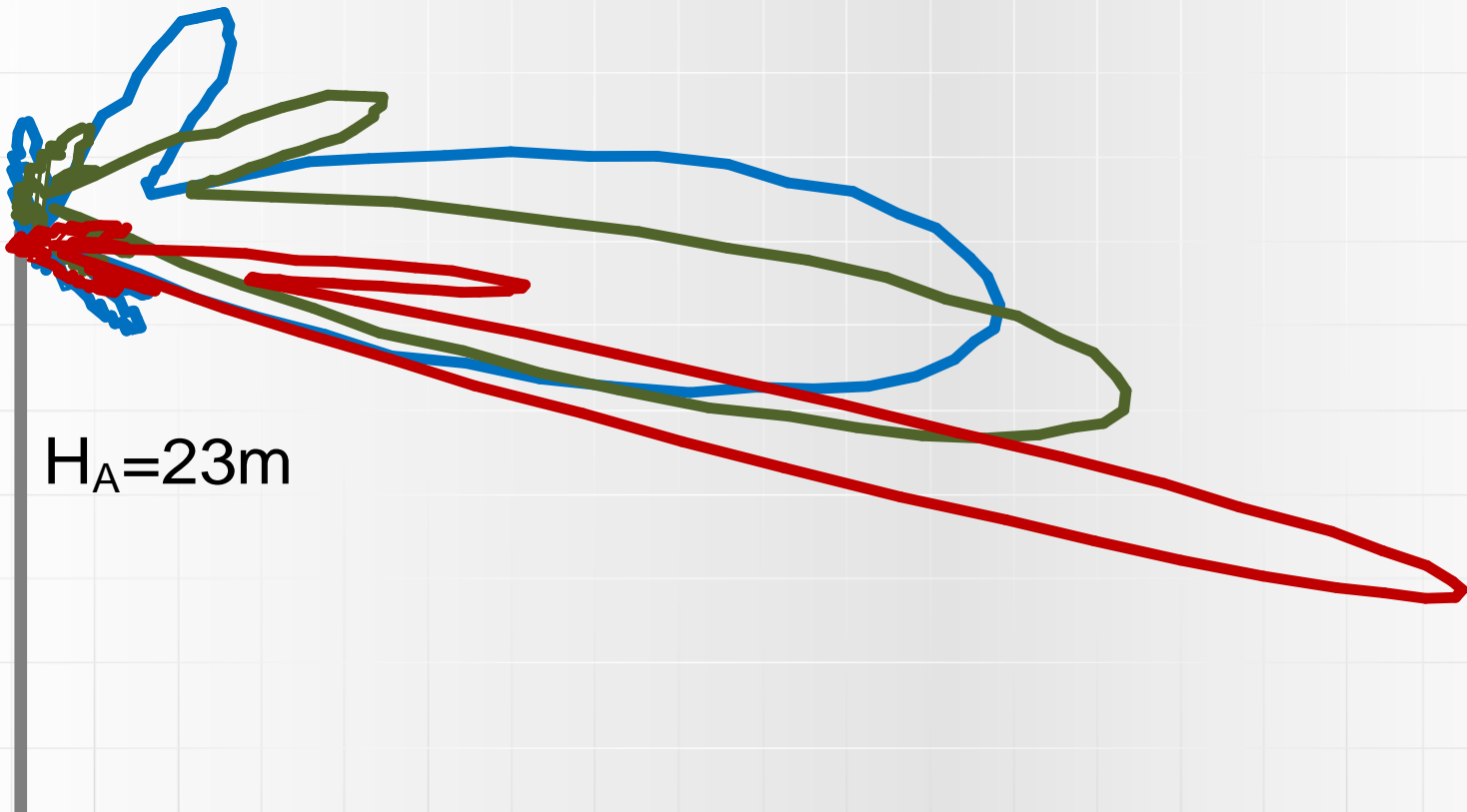


Jak daleko od anteny? Komórki o większej mocy



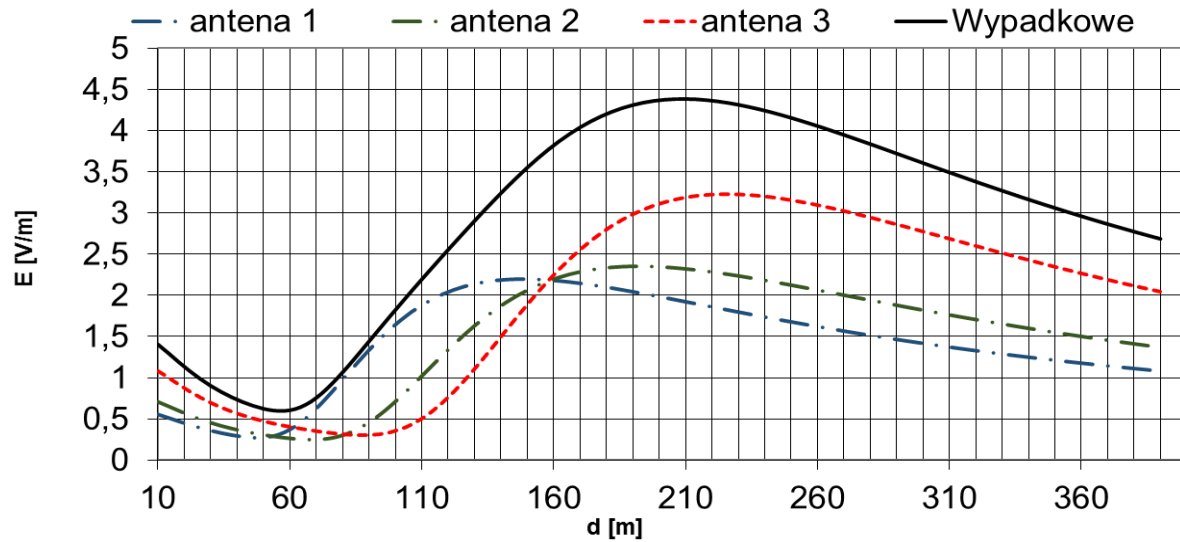
A jak to wygląda dla rzeczywistych stacji?

- Stacja wielosystemowa 2G-3G-4G-5G – na jeden sektor:
- Pasmo 700-800-900 – EIRP = 6000 W
- Pasmo 1800 – EIRP = 10 000W
- Pasmo 2100 – 2600 – 3400 EIRP = 23 000W



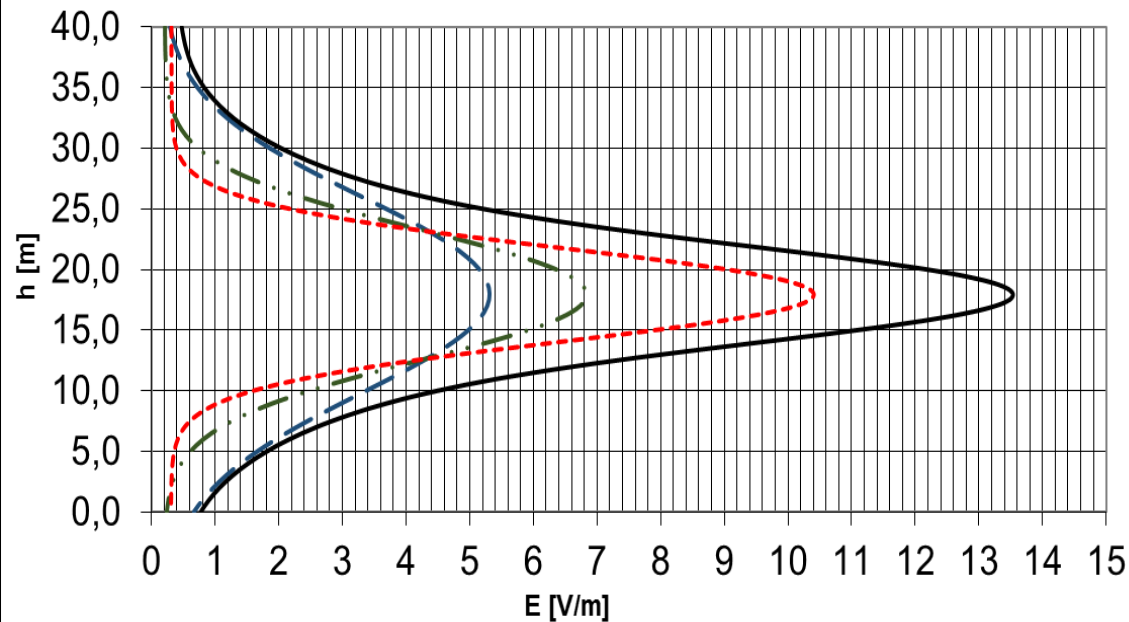
Natężenie pola E w funkcji odległości od stacji bazowej

na wysokości $h=2\text{m}$ nad poziomem terenu

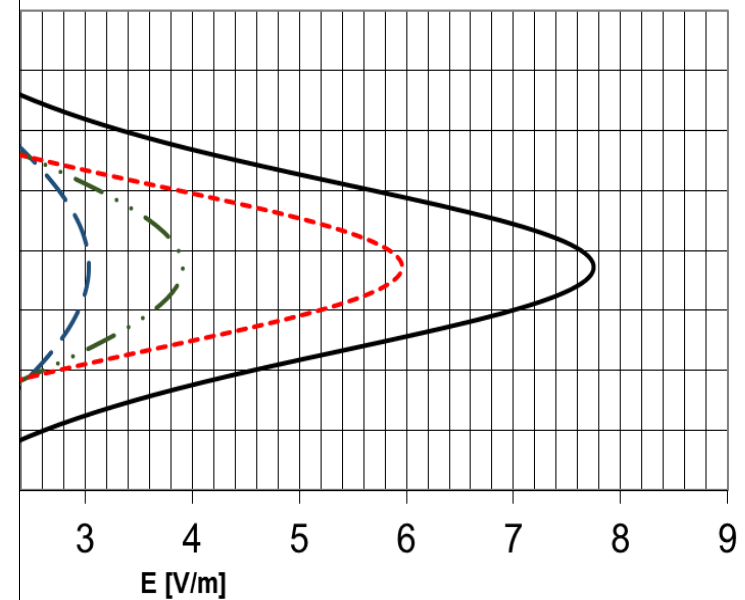


Tilty **-2**, **-2**, **-2**

Natężenie pola E w funkcji wysokości nad poziomem terenu w odległości $d=80\text{m}$ od anteny

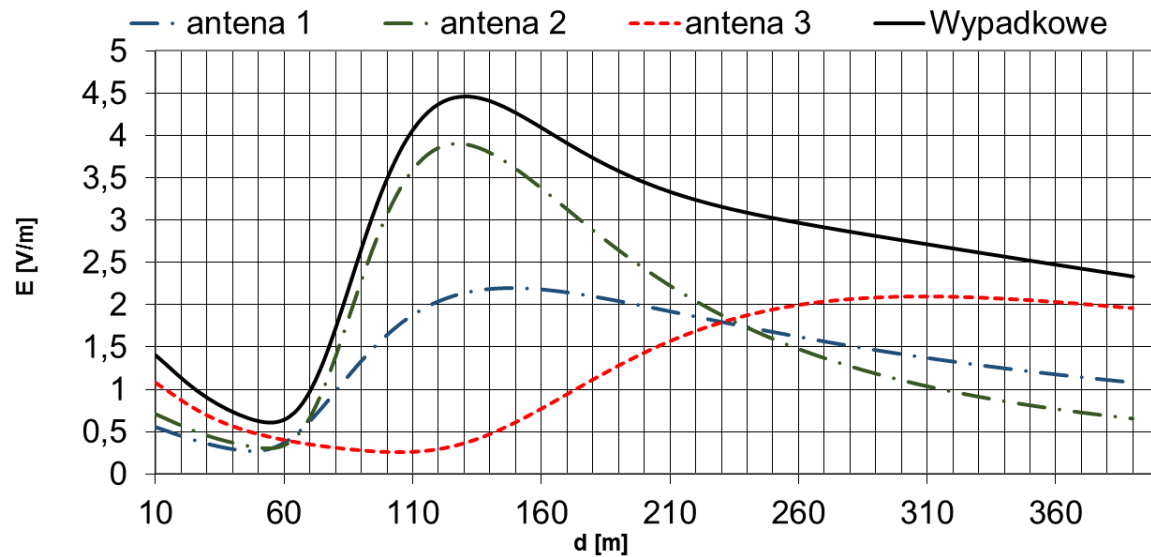


Natężenie pola E w funkcji wysokości nad poziomem terenu w odległości $d=140\text{m}$ od anteny



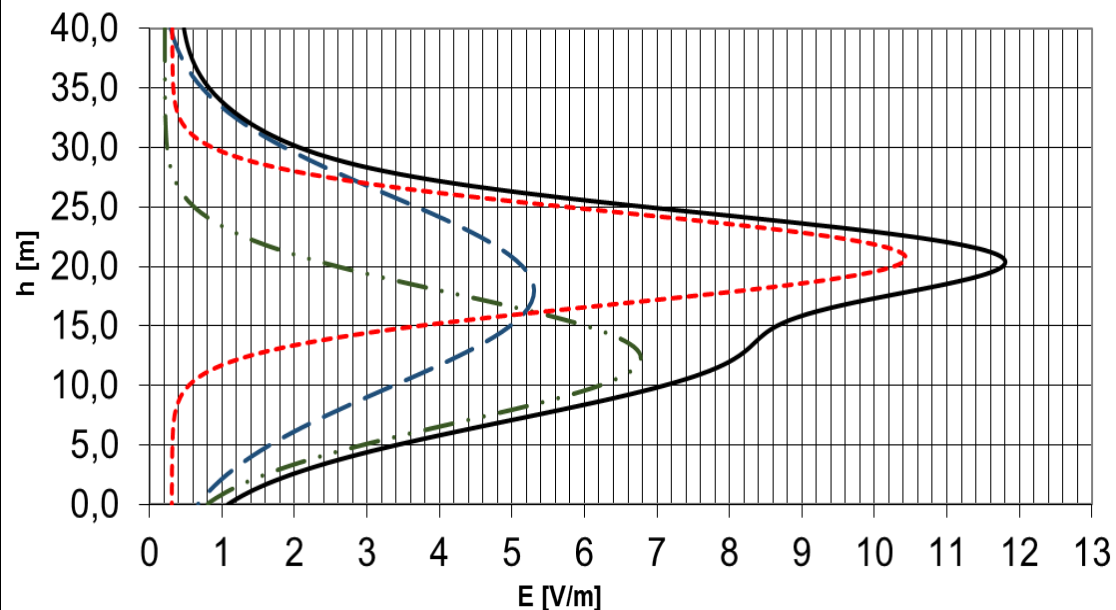
Natężenie pola E w funkcji odległości od stacji bazowej

na wysokości $h=2\text{m}$ nad poziomem terenu

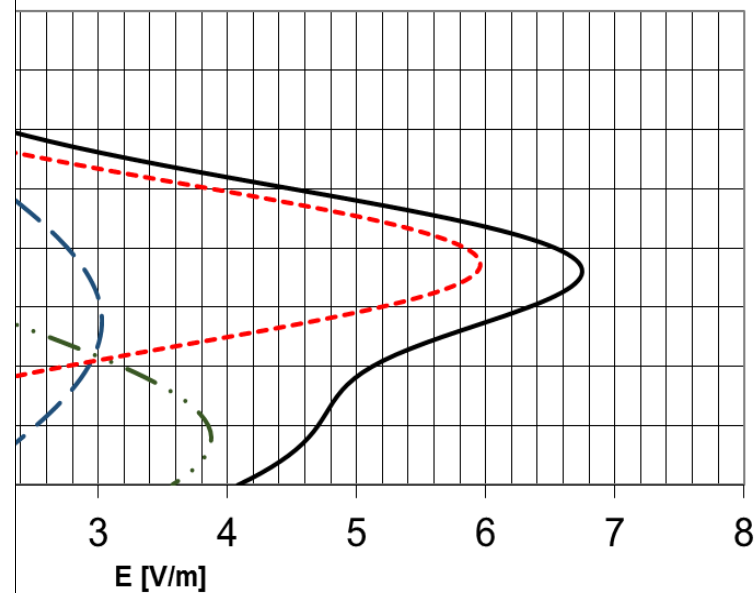


Tilty **-4**, **-8**, **0**

Natężenie pola E w funkcji wysokości nad poziomem terenu w odległości $d=80\text{m}$ od anteny



Natężenie pola E w funkcji wysokości nad poziomem terenu w odległości $d=140\text{m}$ od anteny



Obciążenie środowiska PEM od stacji bazowych

Wspomnieliśmy już wcześniej, że do przestania każdego bitu informacji niezbędne jest wyemitowanie do środowiska „kwantu” energii – pytanie – czy wielkość tego „kwantu” zależy od topologii sieci?

- Przeanalizujemy następującą sytuację. Przyjmijmy typowy sektor obecnie eksploatowanych stacji bazowych – z anteną o kącie połowy mocy równym 60° w azymucie i 12° z tiltem -2° w elewacji . Przyjmijmy, że sektor ma zasięg ograniczony obszarem wyznaczonym spadkiem sygnału o 6 dB (połowa natężenia pola) w azymucie i elewacji. Promień takiej komórki wyniesie ok. 400 m przy szerokości ok. 90° w azymucie. Powierzchnię tak zdefiniowanej komórki można oszacować na ok. $p = 120 \text{ tys. m}^2$

Obciążenie środowiska PEM od stacji bazowych – typowa komórka

- Dla uproszczenia analizy przyjmijmy, że energia sygnału potrzebna do przeprowadzenia transmisji w dowolnym punkcie komórki jest stała.
- Energię pojedynczej transmisji (dla 1 użytkownika) można opisać przez wymaganą gęstość mocy w punkcie odbioru.
- Przyjmijmy, że wynosi ona $S_1=1 \text{ mW/m}^2$.
- Ponieważ energia transmitowana jest przez antenę do całego sektora – to znaczy, że wymagana moc promieniowana opisana przez $EIRP_1 = S_1 \cdot p = 120 \text{ W}$ na jedno połączenie.
- Jeżeli w komórce znajduje się 100 użytkowników – EIRP stacji wzrośnie do $EIRP_{100}=12 \text{ 000 W}$, a gęstość mocy w dowolnym punkcie komórki do $S_{100}=100 \text{ mW/m}^2$.

Obciążenie środowiska PEM od stacji bazowych – rekonfiguracja – podział na 4 mniejsze

- „Stary” sektor dzielimy na 4 mniejsze – każdy o takiej samej powierzchni, bez zmiany pozostałych parametrów.
- W każdym z nowych sektorów wymagana gęstość mocy nadal wynosi $S_{1n}=1 \text{ mW/m}^2$, więc pozornie nic się nie zmienia.
- Zauważmy jednak, że jeżeli w obszarze starego sektora mamy tylko jednego abonenta – to energię elektromagnetyczną musimy teraz wyemitować tylko do jednego z nowych sektorów, których powierzchnia wyniesie $p_n=30\,000 \text{ m}^2$, czyli wymagane **EIRP = 30 W** i mimo, że w sektorze, w którym aktualnie przebywa abonent gęstość mocy jest taka sama, jak dla pojedynczej dużej komórki, to do trzech pozostałych nie jest już emitowana żadna energia PEM.

Rekonfiguracja – co zyskujemy?

- Jeżeli zwiększymy liczbę abonentów do 100 rozmieszczonych równomiernie w czterech nowych sektorach – w każdym sektorze będzie trzeba zapewnić $S_{25}=25 \text{ mW/m}^2$ a tym samym $\text{EIRP}_{25n}=25 \cdot 30\,000 = 750\,000 \text{ mW} = 750 \text{ W}$, a w efekcie $4 \cdot 750 = 3000 \text{ W}$ sumarycznie we wszystkich sektorach – co daje 4-krotne zmniejszenie energii emitowanej do środowiska (było 12000 W) i 4-krotne zmniejszenie gęstości mocy w miejscach gdzie przebywają abonenci (było 100 mW/m^2)
- Oczywiście – jeżeli wszyscy abonenci zgromadzą się w jednym małym sektorze – gęstość mocy w tym sektorze będzie taka sama jak w „starej” komórce przed podziałem – ale na $\frac{3}{4}$ powierzchni starej komórki nie będzie w ogóle emisji energii elektromagnetycznej.

Wniosek „optymalizacyjny”

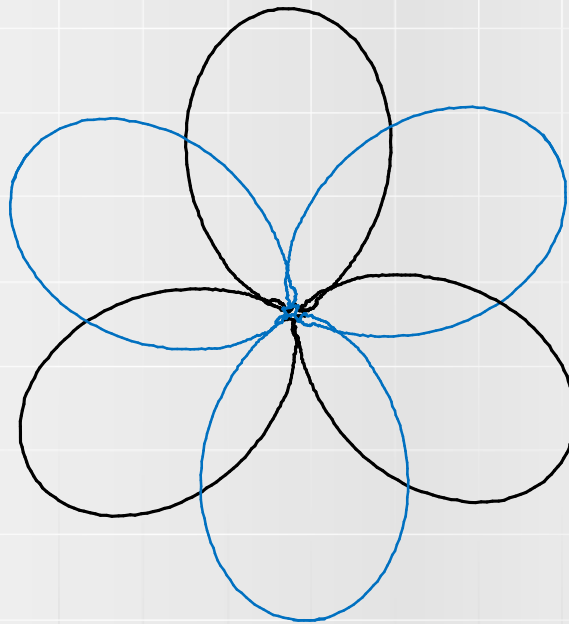
- Podsumowując – **n-krotne** zmniejszenie powierzchni komórki pozwala na **n-krotne** zmniejszenie obciążenia środowiska energią elektromagnetyczną albo – przy zachowaniu tych samych standardów środowiskowych – możliwość **n-krotnego** zwiększenia energii promieniowanej – co można przełożyć na **n-krotne** zwiększenie ilości przesyłanych informacji
- W rzeczywistości ten wzrost może być jeszcze większy – bo mając mniejsze komórki – mniejsze tłumienia – mniejsza wymagana moc „kwantu” energii – szacuję, że ten „zysk” będzie dążył nawet do **n^2**
- Ale pojawia się pytanie – czy zmniejszenie powierzchni sektorów wymaga zagęszczenia stacji bazowych?

Czy zmniejszenie powierzchni sektorów wymaga zagęszczenia stacji bazowych?

- Zagęszczenie to generalnie najprostsza metoda...
- W tym kontekście podstawowe założenia standardu 5G – planowanie dużej liczby małych komórek – można określić mianem podejścia proekologicznego
- Z technicznego punktu widzenia tworzenie mniejszych komórek wymaga anten o węższych wiązках promieniowania i nie wdając się w szczegóły techniczne – jest to łatwiejsze do zrealizowania przy wyższych częstotliwościach – stąd w standardzie 5G planuje się wykorzystywanie częstotliwości powyżej 3GHz do nawet kilkudziesięciu GHz – i taka sieć dopiero będzie spełniała powyższe kryteria – np. pasmo 700MHz raczej nadaje się do tworzenia komórek „zasięgowych” a nie „pojemnościowych”
- Ale czy zawsze trzeba będzie budować nowe stacje bazowe?

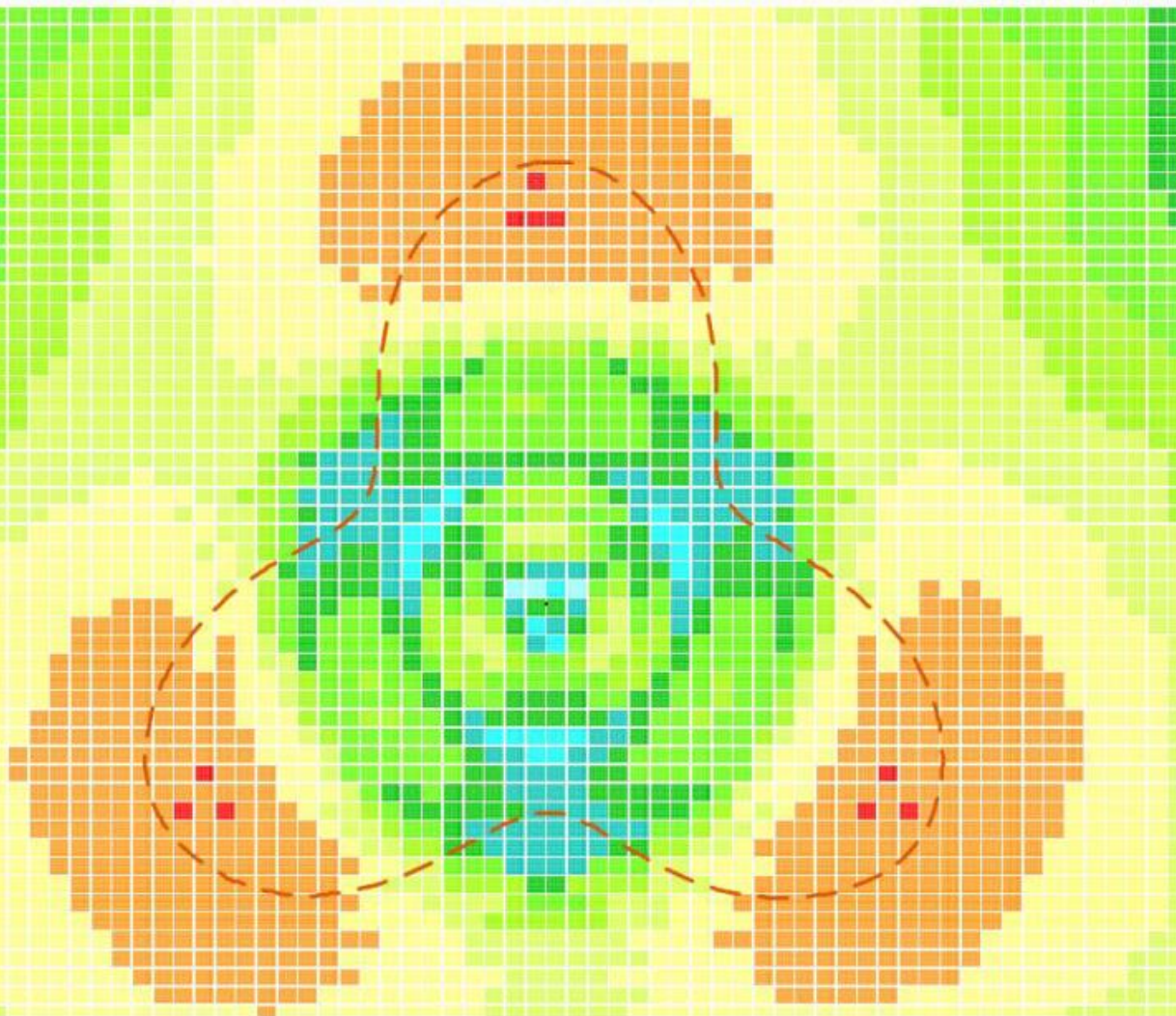
Optymalizacja „low cost”

- Zamiast budować nowe „zagęszczające” sieć stacje bazowe – można zwiększyć liczbę sektorów stacji istniejących...
- Jak? Przez podział obecnych sektorów – w azymucie zamiast powszechnie obecnie stosowanych 3 sektorów po 120° – np. 6 sektorów po 60°
- Albo sektory nowych systemów wstawić „między” istniejące sektory



Czy to zadziała?

- Stacja bazowa 2G-3G-4G

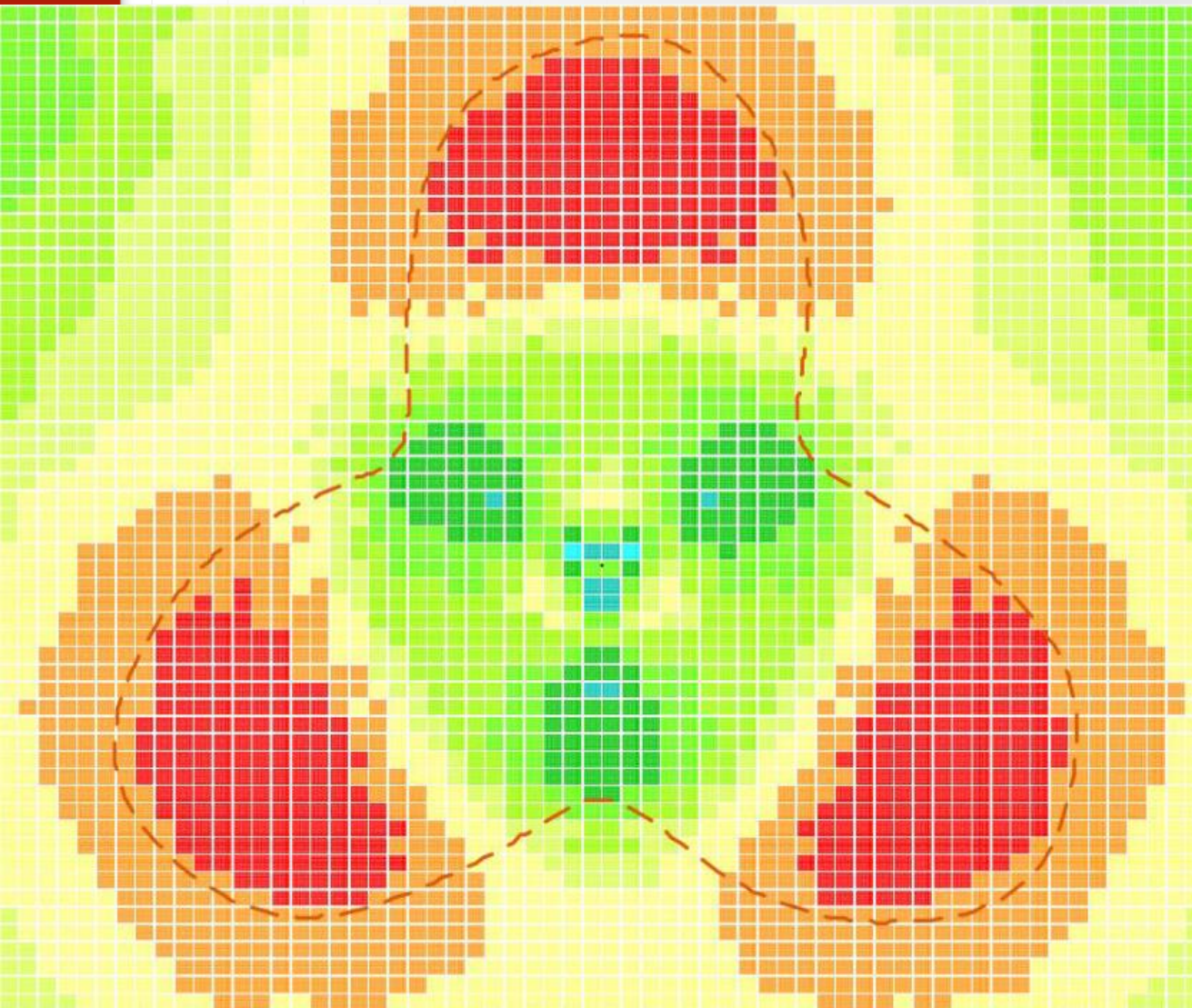


| Wyliczone wartości „S” | |
|---------------------------------|--------------|
| $\geq 3,2 \text{ W/m}^2$ | Black |
| $\geq 1,6 \text{ W/m}^2$ | Dark Grey |
| $\geq 0,8 \text{ W/m}^2$ | Dark Brown |
| $\geq 0,4 \text{ W/m}^2$ | Red-Brown |
| $\geq 0,2 \text{ W/m}^2$ | Red |
| $\geq 0,1 \text{ W/m}^2$ | Bright Red |
| $\geq 0,05 \text{ W/m}^2$ | Orange |
| $\geq 0,025 \text{ W/m}^2$ | Yellow |
| $\geq 0,0125 \text{ W/m}^2$ | Light Yellow |
| $\geq 0,00625 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,003125 \text{ W/m}^2$ | Green |
| $\geq 0,0015625 \text{ W/m}^2$ | Dark Green |
| $\geq 0,00078125 \text{ W/m}^2$ | Teal |
| $\geq 0,00036063 \text{ W/m}^2$ | Cyan |
| $\geq 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | Light Cyan |
| $< 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | White |

$S \text{ max} = 0,10344106 \text{ W/m}^2$

Czy to zadziała?

- Stacja bazowa 2G-3G-4G + **5G**



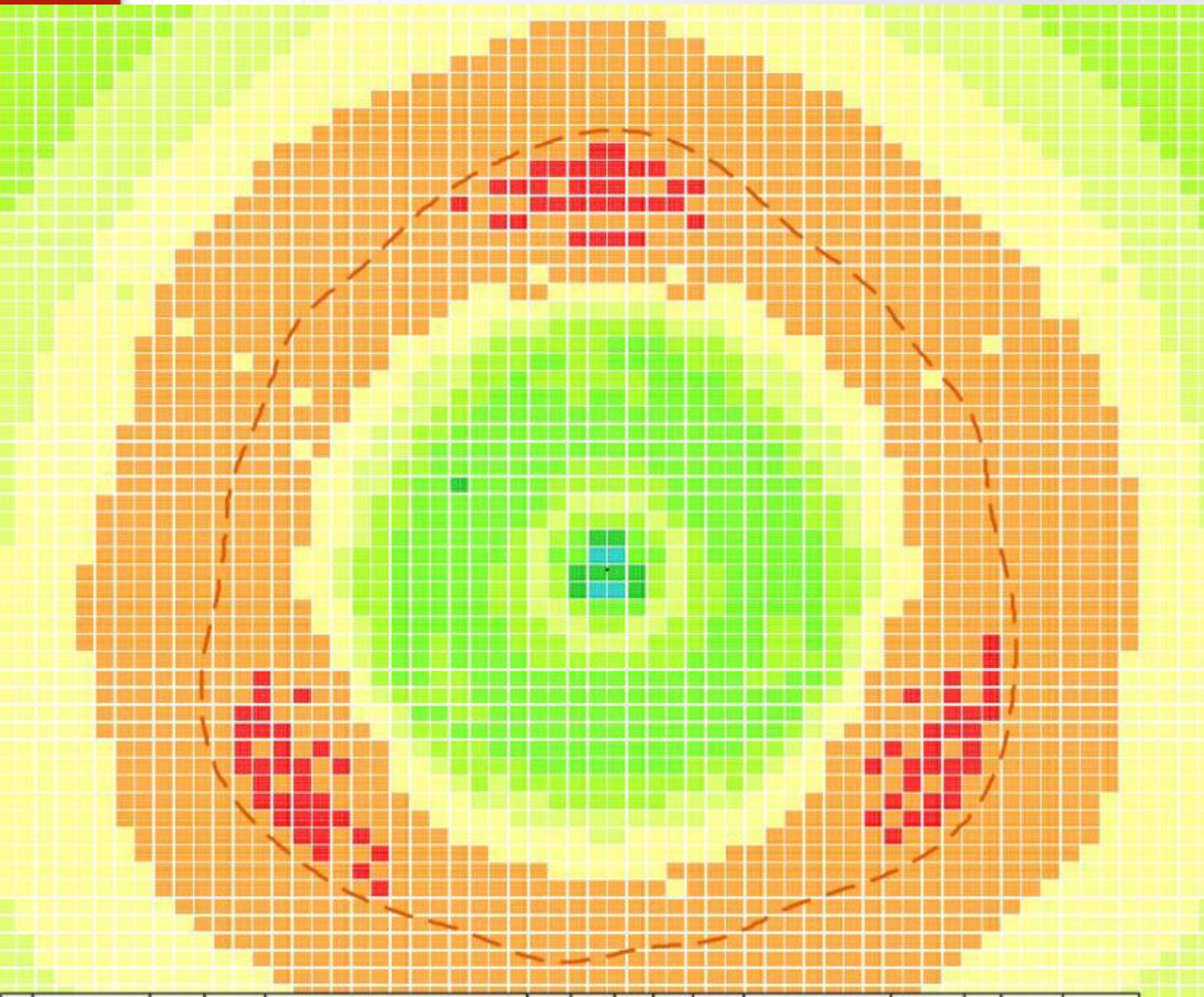
| Wyliczone wartości „S” | |
|---------------------------------|-------------|
| $\geq 3,2 \text{ W/m}^2$ | Black |
| $\geq 1,6 \text{ W/m}^2$ | Dark Grey |
| $\geq 0,8 \text{ W/m}^2$ | Dark Brown |
| $\geq 0,4 \text{ W/m}^2$ | Red-Brown |
| $\geq 0,2 \text{ W/m}^2$ | Red |
| $\geq 0,1 \text{ W/m}^2$ | Orange |
| $\geq 0,05 \text{ W/m}^2$ | Yellow |
| $\geq 0,0125 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,00625 \text{ W/m}^2$ | Green |
| $\geq 0,003125 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,0015625 \text{ W/m}^2$ | Green |
| $\geq 0,00078125 \text{ W/m}^2$ | Teal |
| $\geq 0,00036063 \text{ W/m}^2$ | Cyan |
| $\geq 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | Light Cyan |
| $< 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | White |

$S \text{ max} = 0,16957255 \text{ W/m}^2$



Czy to zadziała?

- Stacja bazowa 2G-3G-4G + **5G** - z przesuniętymi sektorami

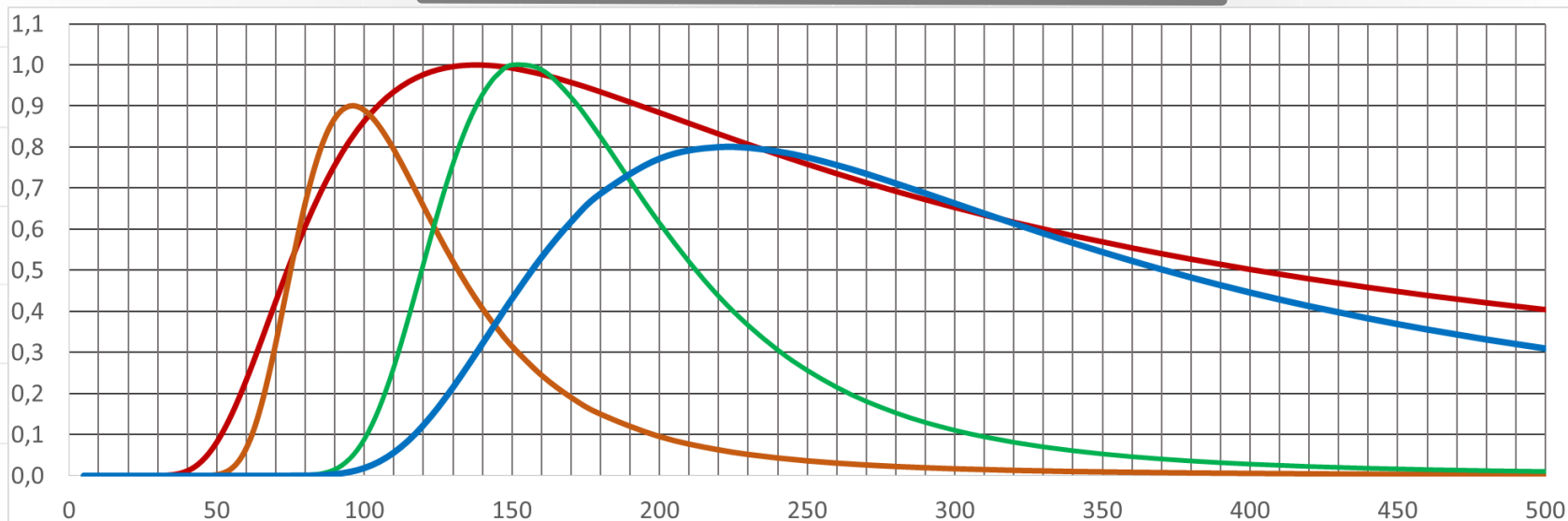
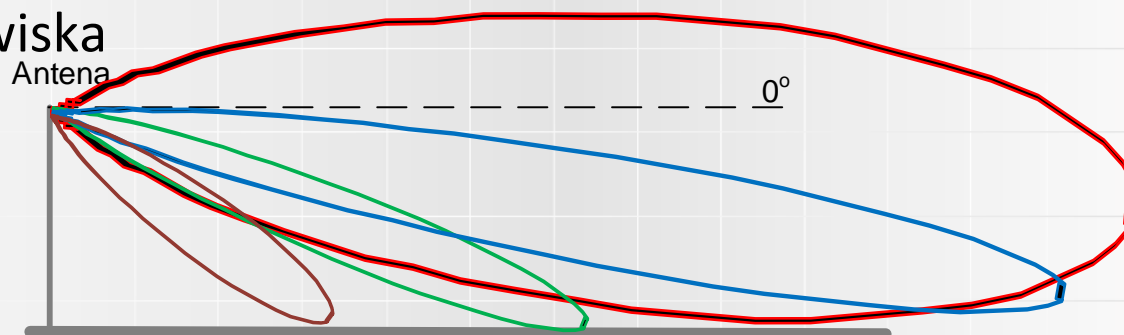


| Wyliczone wartości „S” | |
|---------------------------------|-------------|
| $\geq 3,2 \text{ W/m}^2$ | Black |
| $\geq 1,6 \text{ W/m}^2$ | Dark Grey |
| $\geq 0,8 \text{ W/m}^2$ | Dark Brown |
| $\geq 0,4 \text{ W/m}^2$ | Red-Brown |
| $\geq 0,2 \text{ W/m}^2$ | Red |
| $\geq 0,1 \text{ W/m}^2$ | Orange |
| $\geq 0,05 \text{ W/m}^2$ | Yellow |
| $\geq 0,025 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,0125 \text{ W/m}^2$ | Green |
| $\geq 0,00625 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,003125 \text{ W/m}^2$ | Green |
| $\geq 0,0015625 \text{ W/m}^2$ | Light Green |
| $\geq 0,00078125 \text{ W/m}^2$ | Teal |
| $\geq 0,00036063 \text{ W/m}^2$ | Cyan |
| $\geq 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | Light Cyan |
| $< 0,00019531 \text{ W/m}^2$ | White |

$S_{\max} = 0,11308472 \text{ W/m}^2$

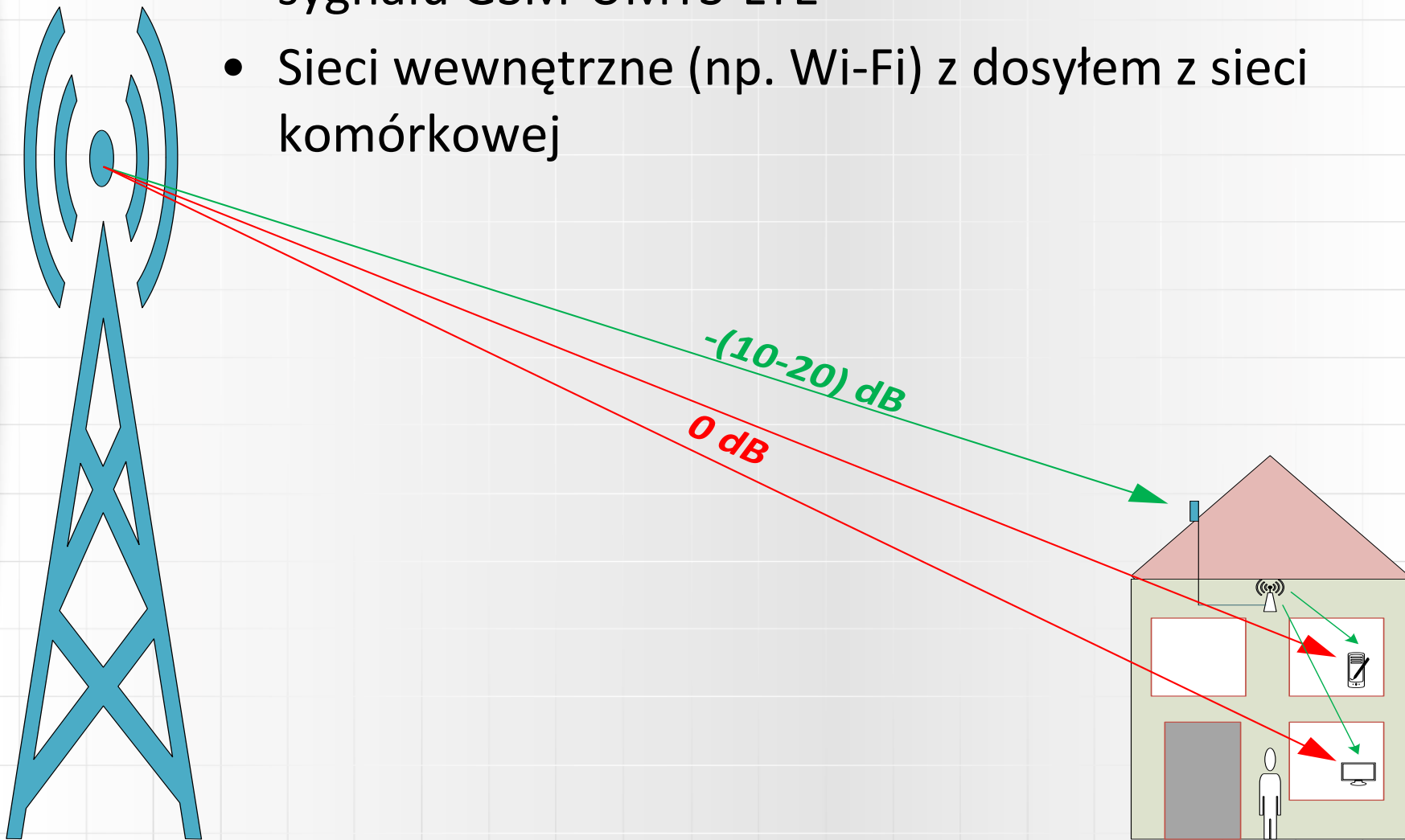
Druga droga do optymalizacji sektorów

- Sektoryzacja w płaszczyźnie pionowej
- Zastąpienie jednej stosunkowo szerokiej wiązki kilkoma węższymi – wtedy sektory będą miały kształty wycinków pierścieni....
- Oczywiście już obecnie stosuje się rozwiązanie z kilkoma antenami/systemami – ale nie optymalizuje się tego pod kątem ochrony środowiska



Ograniczenie mocy do transmisji

- **Femtokomórki** – oczywiście tylko rozwiązania profesjonalne – żadne „aktywne wzmacniacze sygnału GSM-UMTS-LTE”
- Sieci wewnętrzne (np. Wi-Fi) z dosyć z sieci komórkowej



Podsumowanie

- Optymalizacja systemów komórkowych pod kątem ograniczenia oddziaływania PEM na środowisko to proces wielotorowy
- Możliwość zwiększania przesyłanych informacji to nie tylko konieczność zwiększania przepustowości sieci – to też postęp technologiczny w kompresji informacji
- Rozbudowa sieci nie musi się wiązać ze znacznym **zwiększeniem obciążenia środowiska energią elektromagnetyczną** – nie tylko limity dopuszczalnego poziomu PEM o tym decydują.....
- Wszelkie rozwiązania minimalizujące energię promieniowaną do środowiska są jak najbardziej ekologiczne
- Szeroko pojęte zagęszczanie sieci z zachowaniem „dobrej praktyki inżynierskiej” jest także zjawiskiem proekologicznym – choć nie zawsze najtańszym...
- Żeby sieci mogły się rozwijać potrzeba prostych i jednoznacznych unormowań prawnych – bez możliwości i potrzeby „zabawy w kotka i myszkę” – ale to już temat na całkiem inną prezentację...

Dziękuję za uwagę



P. Bieńkowski: „Optymalizacja instalacji radiokomunikacyjnych pod kątem minimalizacji ekspozycji środowiska na PEM” Przegląd Elektrotechniczny 1/2020

