LABORATORIUM
SYSTEMÓW KOMUNIKACJI RUCHOMEJ
Instytut Telekomunikacji PW

Ćwiczenie laboratoryjne

Projektowanie siatki komórek systemu telefonii komórkowej

Analiza ruchu i interferencji wspólnokanałowych

Opracowanie:
dr inż. Władysław Udrycki

Warszawa 1997

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP. 3

2. BUDOWA SIECI TELEFONII KOMÓRKOWEJ 3

3. PROJEKTOWANIE SIECI TELEFONII KOMÓRKOWEJ 5

3.1. Proces projektowania. 5
3.2. Zasady projektowania. 6
3.3. Wybór kształtu komórek. 7
3.4. Sporządzanie planu częstotliwościowego. 7

4. INTERFERENCJE WSPÓLNOKANAŁOWE 9

5. INTERFERENCJE NIEWSPÓLNOKANAŁOWE 10

5.1. Interferencje kanału następnego. 10
5.2. Interferencje kanału sąsiedniego. 10
5.3. Zasady grupowania kanałów radiowych. 11
5.4. Zasady przydzielania kanałów. 11

6. ANALIZA RUCHOWA SYSTEMU TELEFONII KOMÓRKOWEJ. 12

7. RZECZYWISTE ROZMIESZCZENIE STACJI BAZOWYCH. 13

8. RODZAJE ANTEN STACJI BAZOWYCH 13

9. PODSTAWOWE ANALIZY SYSTEMU TELEFONII KOMÓRKOWEJ. 14

9.1. Wpływ liczności zespołu komórek na zakłócenia interferencyjne wspólnokanałowe... 14
9.2. Wpływ rodzaju anten na zakłócenia interferencyjne wspólnokanałowe 17
9.3. Pojemność systemu telefonii komórkowej w zależności od liczności zespołu komórek. 18

10. OPIS UŻYTKOWY PROGRAMU CELLNET 19

10.1. Menu „Plik". 19
10.2. Menu „Parametry" 20
10.3. Menu „Analiza" 21

12. LITERATURA 23

1. WSTĘP

Obszar objęty siecią telefonii komórkowej jest podzielony na rozłączne strefy nazywane komórkami. Z każdą komórką o kształcie dwuwymiarowej figury geometrycznej związana jest pewna przestrzeń elektromagnetyczna opisana częstotliwością i natężeniem pola elektromagnetycznego. Projektant sieci komórkowej podejmuje decyzje dotyczące:

- podziału obszaru na siatkę rozłącznych komórek,
- przypisania każdej komórce zestawu częstotliwości roboczych.

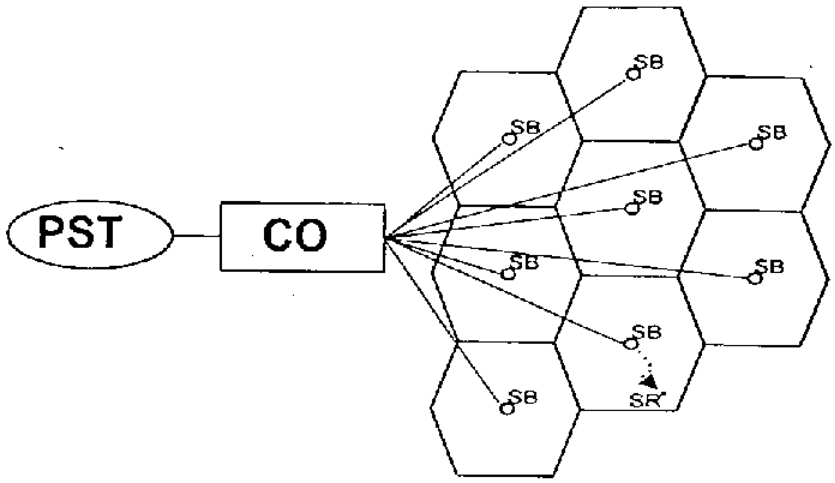
Projektant dysponuje pewnym pasmem częstotliwości podzielonym na odpowiednią liczbę kanałów częstotliwościowych. Dla zwiększenia pojemności systemu przypisuje się te same zestawy kanałów różnym komórkom, które nazywa się komórkami wspólnokanałowymi. Podczas projektowania siatki komórek ważne jest wystarczajco odległe rozmieszczanie wspólnokanałowych komórek by ograniczyć wpływ zakłóceń interferencyjnych. Naogół wymaga to działań iteracyjnych.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z procesem projektowania siatki komórek. Ćwiczący przeprowadzają analizę interferencji wspólnokanałowych oraz ruchu w systemie telefonii komórkowej.

2. BUDOWA SIECI TELEFONII KOMÓRKOWEJ

Operator decydujący się na zastosowanie systemu telefonii komórkowej, ma do dyspozycji ograniczone pasmo częstotliwości. Następstwem tego jest ograniczenie liczby kanałów radiowych, którymi dysponuje system. Liczba ta zależy od szerokości przydzielonego pasma oraz od szerokości pojedynczego kanału radiowego. W celu zwiększenia pojemności systemu zdecydowano się na podzielenie całego obszaru działania systemu na mniejsze fragmenty, tzw. komórki.

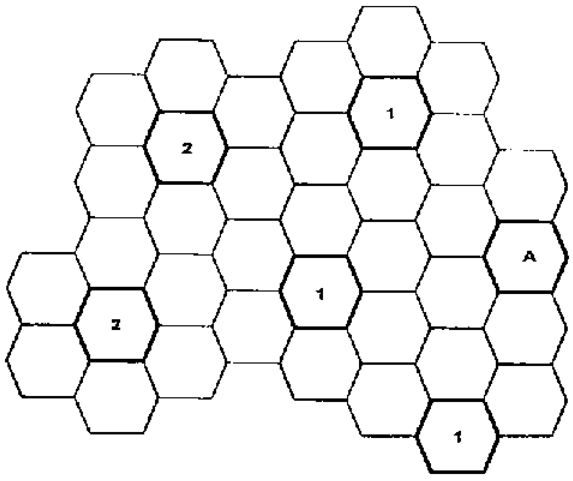
W każdej komórce znajduje się stacja bazowa SB, która drogą radiową komunikuje się z terminalami ruchomymi SR. Stacje bazowe zainstalowane na określonym obszarze są połączone, za pomocą łączy przewodowych lub radioliniowych, z centralami obszarowymi CO, a te z kolei są połączone z centralami publicznej sieci telekomunikacyjnej PST (rys. 1). Każdy abonent jest przypisywany na stałe do jednej centrali obszarowej, będącej jego centralą macierzystą i uprawniony jest do poruszania się po zbiorze obszarów działania wielu central obszarowych, tworzących daną sieć komórkową. Sieć komórkowa powinna realizować w sposób niezauważony dla abonenta funkcje przełączające w trakcie zestawionego połączenia.



Rys. 1 Sieć telefonii komórkowej

Abonent może komunikować się z innymi abonentami sieci komórkowej lub innej sieci telefonicznej przy pomocy terminala. Terminale korzystają z kanałów radiowych należących do zbioru kanałów danego systemu komórkowego i powinny być przystosowane do pracy we wszystkich dostępnych w systemie kanałach.

Każdej stacji bazowej przydzielany jest podzbiór kanałów stanowiący tylko część puli kanałów udostępnionych systemowi do użytku. Pozwala to pod pewnymi warunkami na wielokrotne wykorzystanie tego podzbioru kanałów w systemie telefonii komórkowej. Tak więc komórka, której przydzielono w fazie projektu dany zbiór kanałów radiowych posiada w innych częściach systemu tzw. repliki w postaci innych komórek wykorzystujących ten sam przedział częstotliwości (rys. 2).



. Rys. 2 Repliki stacji bazowej „A" (Cyframi zaznaczono komórki wspólnokanałowe pierwszego i drugiego rzędu.)

Ze względu na małe oddziaływanie komórek dalszych rzędów, w analizach uwzględnia się jedynie wpływ pierwszego rzędu na rozważaną komórkę.

W systemach telefonii komórkowej dysponujących dużą liczbą kanałów radiowych rezerwuje się specjalne kanały tylko do wywołań. Zgłoszenie abonenta jest obsługiwane początkowo w kanale wywoławczym, a następnie realizowane jest w kanale rozmównym. Taki system obsługi nazywa się dwufazowym lub dwuetapowym.

3. PROJEKTOWANIE SIECI TELEFONII KOMÓRKOWEJ

3.1. Proces projektowania

Proces projektowania sieci telefonii komórkowej można podzielić na cztery następujące etapy [10]:

Etap 1: Wstępna lokalizacja stacji bazowych

Na etapie tym punktem wyjścia są wyniki analiz i studiów marketingowych dotyczących przewidywanego rozkładu przyszłego ruchu telekomunikacyjnego na terenie, który ma zostać objęty działaniem systemu. Brane są także po uwagę znane dogodne miejsca usytuowania stacji bazowych. Wynikiem tego etapu jest wstępny plan rozmieszczenia stacji bazowych.

Etap 2: Ocena pokrycia radiowego

Jako wynik etapu drugiego podaje się ocenę jakości pokrycia obszaru systemu sygnałami radiowymi. Mimo że początkowa lokalizacja stacji bazowych oparta jest najczęściej na strukturach regularnych, którym odpowiada w zasadzie równomierne pokrycie terenu zasięgiem poszczególnych stacji bazowych, jednak jest to prawdą jedynie w warunkach propagacji w wolnej przestrzeni. Rzeczywisty zasięg poszczególnych stacji bazowych zależy od ukształtowania terenu, typu i rozmieszczenia budynków, rodzaju roślinności, a nawet pory roku. Wynikiem tej fazy są tzw. mapy pokrycia terenu przedstawiające strefy różnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego.

Etap 3: Przydział częstotliwości oraz analiza interferencji

Podczas trzeciego etapu definiowane są wiązki kanałów częstotliwościowych, które będą wykorzystywane w poszczególnych komórkach, tworząc siatkę wielokrotnego wykorzystania częstotliwości. Wyniki obliczeń pozwalają utworzyć mapy interferencji, na których zaznaczone są obszary odpowiadające określonym poziomom zakłóceń. Jeżeli wyniki na tym etapie nie są zadowalające, dokonywane są modyfikacje, najczęściej tylko planu częstotliwości, a gdy to nie przyniesie spodziewanej poprawy wówczas także parametrów stacji bazowych, a w ostateczności także planu rozmieszczenia stacji bazowych.

Etap 4: Pomiary w działającym systemie

Po zainstalowaniu stacji bazowych możliwe staje się wykonanie pomiarów w warunkach rzeczywistej pracy systemu. Dokonuje się pomiaru poziomu mocy odbieranego sygnału, wielkości interferencji, sprawdza się granice komórki oraz poziom sygnału, przy którym następuje przełączenie kanałów. W wielu przypadkach, zwłaszcza dla małych

komórek, wyniki obliczeń przeprowadzonych w etapach 2 i 3 nie są wystarczająco dokładne. Możliwe jest wówczas dokonanie modyfikacji ustalonych wcześniej parametrów systemu.

3.2. Zasady projektowania

Ważnym etapem projektowania sieci telefonii komórkowej jest projekt siatki komórek pokrywającej cały teren objęty działaniem systemu. Istnieje tzw. kryterium pokrycia, określające zależność pomiędzy rozmiarem komórki (określonym przez najmniejszą odległość między środkami komórek - M) i zasięgiem użytkowym d_u zastosowanych nadajników. Moduł M siatki regularnej jest ograniczony od góry wartością zasięgu użytkowego w sposób następujący [9]:

$$M \le \sqrt{3} d_u \text{ - dla strefy sześciokątnej,}$$
$$M \le \sqrt{2} d_u \text{ - dla strefy kwadratowej.}$$

Innym warunkiem stosowanym na etapie projektowania siatki komórek jest kryterium kompatybilności współnokanałowej [9]:

$$D \ge D_{min},$$

gdzie D oznacza najmniejszą odległość między strefami wykorzystującymi ten sam podzbiór kanałów radiowych, tzw. odległość koordynacyjną.

Problemy na jakie napotykają projektanci dotyczą pokrycia danego obszaru komórkami w ten sposób, aby komórki niepotrzebnie na siebie nie zachodziły oraz aby nie powstawały obszary nie obsługiwane przez żadną z komórek systemu. Korzystne jest, gdy projektowana siatka systemu jest równomierna. W praktyce okazuje się, że zarządzanie systemami zbudowanymi w oparciu o siatki nieregularne jest dużo trudniejsze i podczas rekonfiguracji przysparza dużo kłopotów. Natomiast przyjęcie regularnego kształtu komórek sieci telefonii komórkowej ma istotne znaczenie jedynie na etapie rozmieszczania przestrzennego zbiorów kanałów radiowych w celu ich wielokrotnego wykorzystania. Już podczas analizy wielkości współczynnika zakłóceń interferencyjnych zakłada się, że zasięg urządzeń nadawczych każdej stacji bazowej ma kształt koła. Natomiast w rzeczywistości, po uwzględnieniu warunków klimatycznych i terenowych, komórki przyjmują nieregularne kształty [11].

Metody analizy siatek regularnych stsowane są do analizy rzeczywistych systemów o strukturze nieregularnej, w których lokalizacja stacji bazowych różni się od lokalizacji w strukturze regularnej [9]. Siatkę nieregularną charakteryzują dwa zbiory odległości: modułowych $\{M_j\}$ i koordynacyjnych $\{D_i\}$, i=1, 2, 3,...; oraz liczba No komórek w zespole. Warunki pokrycia i kompatybilności powinny być spełnione odpowiednio przez każdy element tych zbiorów:

$$D_{min} N_0^{-1/2} < M_i < \sqrt{\{2,3\}} d_u \text{ - kryterium pokrycia,}$$

$$D_i > D_{min} \text{ - kryterium kompatybilności.}$$

3. 3. Wybór kształtu komórek

Zastsowanie regularnych struktur siatkowych w telefonii komórkowej wiąże się wyborem kształtu komórek obsługiwanych przez stacje bazowe. Właściwy dobór kształtu komórki, jako regularnej figury geometrycznej, powinien prowadzić do prostego i precyzyjnego zakreślenia granic obszarów obsługiwanych przez stacje bazowe. Pozwala to, już w trakcie projektowania sieci, na wstępną eliminację możliwości zakłóceń wspólnokanałowych w sąsiadujących ze sobą komórkach.

W celu równomiernego pokrycia danego terenu siecią systemu telefonii komórkowej stosuje się dwa typy komórek: kwadratowe oraz sześciokątne. W obecnie realizowanych publicznych sieciach radiokomunikacji ruchomej lądowej przyjęło się używać w modelach siatkowych podstawową komórkę o postaci sześciokąta foremnego, nazywaną także komórką heksagonalną. Wybór takiego kształtu komórki ma swoje uzasadnienie ekonomiczne i techniczne.

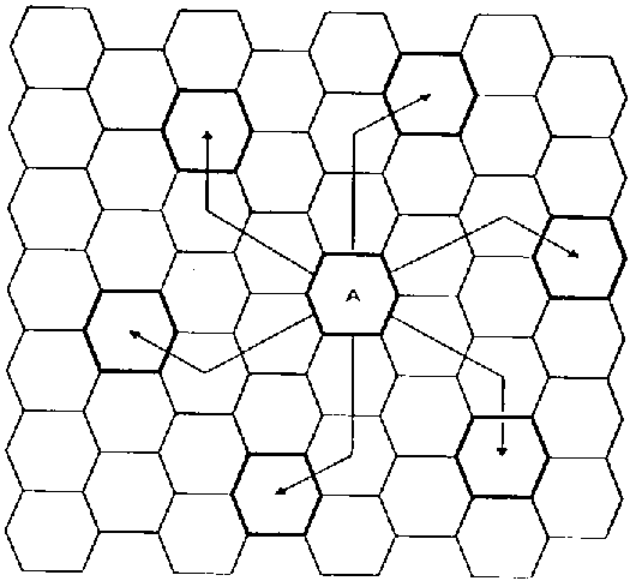
Gdy komórki kwadratowa i heksagonalna mają jednakowe odległości od środka wierzchołków to komórka heksagonalna ma większe pole powierzchni. Tak więc komórki heksagonalne umożliwiają pokrycie konkretnego obszaru sieci mniejszą liczbą stacji bazowych o ustalonym zasięgu użytkowym. Takie rozwiązanie z kolei prowadzi do mniejszych nakładów finansowych, związanych z praktyczną realizacją sieci komórkowej.

Z wyborem kształtu komórki wiążą się także zagadnienia przełączania rozmów wynikające z ruchliwości abonentów. W sieci zbudowanej z komórek sześciokątnych, w momencie przygotowywania przełączania, wystarczy wprowadzić w stan nasłuchu tylko 6 stacji bazowych. Dla porównania sieć złożona z komórek kwadratowych wymaga nasłuchu 8 stacji bazowych, co może oznaczać znaczne zwiększenie ruchu sterującego w sieci [11].

3. 4. Sporządzanie planu częstotliwościowego

Algorytm tworzenia siatki przy zastosowaniu komórek heksagonalnych można podzielić na następujące etapy [11]:

1. Nałożenie na dany obszar geograficzny siatki identycznych komórek heksagonalnych. (Siatka systemu jest zbiorem ponumerowanych punktów na płaszczyźnie, które odpowiadają rzeczywistym położeniom stacji bazowych.)
2. Wyznaczanie wspólnokanałowych stacji bazowych. Wybierając komórkę odniesienia (ang. reference cell) przydziela się jej określony zbiór kanałów radiowych. Wyznaczanie położenia stacji wspólnokanałowych prowadzi się w sześciu kierunkach prostopadłych do boków komórki odniesienia. Po kolei w każdym z sześciu kierunków odlicza się „i" komórek przylegających do siebie bokami i następnie po wykonaniu obrotu o 60 stopni odlicza się dalsze „j" komórek (rys. 3). Wielkości „i" oraz „j" nazywane są współrzędnymi skośnokątnymi (ang. shift parameters).
   W ten sposób wyznacza się sześć nowych komórek - najbliżej usytuowanych względem komórki odniesienia, którym przydziela się ten sam zbiór kanałów co komórce odniesienia.
3. Następnie wyznacza się nową komórkę odniesienia, przydziela się jej kolejny podzbiór kanałów, inny od poprzedniego i powtarza czynności opisane w punkcie drugim. Postępowanie to prowadzi się tak długo, aż zapełni się kanałami całą projektowaną siatkę.



Rys. 3 Ilustracja algorytmu tworzenia planu częstotliwościowego sieci

Sposób wyznaczania stacji wspólnokanałowych w siatce kwadratowej jest bardzo podobny do algorytmu przytoczonego dla siatki heksagonalnej. Jedyną istotną różnicę stanowi to, że komórek wspólnokanałowych poszukuje się w czterech kierunkach prostopadłych do boków komórki kwadratowej, a obrotu dokonuje się o kąt 90 stopni.

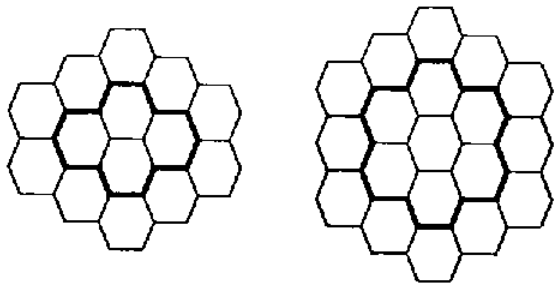
Komórki, którym przydzielono, w oparciu o przedstawiony wyżej algorytm, różne wzajemnie rozłączne zbiory kanałów radiowych, tworzą tzw. zespoły komórek (ang. clusters). Liczba N komórek heksagonalnych w zespole związana jest ze współrzędnymi skośnokątnymi „i" oraz „j" sieci następującym równaniem [3]:

$$N = i^2 + ij + j^2 \qquad [1]$$

W sieci złożonej z komórek kwadratowych liczba K komórek w zespole powiązana jest ze współrzędnymi „i" oraz „j" modelu siatkowego następującą zależnością:

$$K = i^2 + j^2 \qquad [2]$$

Przykładowe konstelacje zespołów komórek przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4 Zespoły komórek sześciokątnych o N=4 oraz o N=7.

4. INTERFERENCJE WSPÓLNOKANAŁOWE

Powtórne używanie tego samego kanału radiowego jest ograniczone przez występowanie zjawiska interferencji współnokanałowych pomiędzy komórkami. W rozdziale tym określona zostanie minimalna odległość komórek współnokanałowych. W celu zastosowania inżynierskich metod analizy należy przyjąć, że rozmiar komórek na całym terenie objętym zasięgiem działania sieci komórkowej jest taki sam. Można wówczas przyjąć, że poziom interferencji współnokanałowych jest niezależny od mocy transmitowanych przez każdą z komórek. Poziom ten charakteryzowany jest współczynkiem zakłóceń interferencyjnych współnokanałowych zdefiniowanym jako [11]:

$$q = \frac{D}{R}, \qquad [3]$$

stosunek odległości D pomiędzy najbliższymi komórkami wykorzystującymi te same częstotliwości do promieniowania komórki R. Nazywany jest on również współczynnikiem redukcji poziomu zakłóceń interferencyjnych współnokanałowych (ang. cochannel interference reduction factor). Z zależności tej wynika, że im współczynnik redukcji poziomu zakłóceń interferencyjnych jest większy, tym poziom zakłóceń współnokanałowych zmniejsza się.

Drugim ważnym współczynnikiem służącym do analiz zakłóceń interferencyjnych współnokanałowych jest stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy zakłóceń interferencyjnych. Parametr ten wyraża się następującą zależnością [4, 5]:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{i=1}^{K} D_i^{-\gamma}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{K} \left(\frac{D_i}{R}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{K} (q_i)^{-\gamma}}, \qquad [4]$$

gdzie γ oznacza warunki propagacji określane przez warunki terenowe. Naogół przyjmuje się $\gamma = 4$.

Analizując geometryczną budowę regularnej sieci komórek można otrzymać kilka interesujących zależności. Z twierdzenia kosinusów wynika, że odległość koordynacyjna D związana jest z promieniem R komórki heksagonalnej następującą zależnością:

$$D = \sqrt{(jR\sqrt{3})^2 + (iR\sqrt{3})^2 - 2(jR\sqrt{3})(iR\sqrt{3})\cos 120} = R\sqrt{3N} \qquad [5]$$

Natomiast dla siatek kwadratowych odległość koordynacyjna D związana jest z promieniem komórki następującym równaniem:

$$D = \sqrt{(iR\sqrt{2})^2 + (jR\sqrt{2})^2} = R\sqrt{2}\sqrt{i^2 + j^2} = R\sqrt{2K} \qquad [6]$$

5. INTERFERENCJE NIEWSPÓLNOKANAŁOWE

Pojedynczy kanał radiowy wykorzystywany przez system charakteryzuje się pewną szerokością zajmowanego pasma. Szerokość kanału zależy głównie od zastosowanego systemu telefonii komórkowej. Mechanizm interferencji niewspólnokanałowych polega na oddziaływaniu sygnałów transmitowanych w jednym kanale na transmisję sygnałów w kanale o innej częstotliwości.

Zagadnienie powstawania zakłóceń interferencyjnych niewspólnokanałowych obejmuje dwa mechanizmy [6]:

- zjawisko interferencji pochodzących od kanału następnego (ang. next-channel interference), tj. kanału sąsiedniego w pasmie częstotliwości względem rozpatrywanego kanału,
- zjawisko interferencji pochodzących od kanału sąsiedniego (ang. neighboring-channel interface), tj. kanału oddalonego o conajmniej jeden kanał radiowy od rozpatrywanego kanału.

5. 1. Interferencje kanału następnego

Ten typ interferencji charakteryzuje się tym, że praca terminala ruchomego zakłócana jest przez niewspólnokanałowe stacje bazowe. Wynika to ze sposobu przydzielania kanałów radiowych dla poszczególnych komórek zespołu, według którego wiązka kanałów składa się z kanałów oddalonych od siebie w dziedzinie częstotliwości.

Niekorzystny wpływ tego typu interferencji eliminowany jest poprzez stosowanie układów filtrujących o odpowiednich charakterystykach. Przyjęto stosować filtry o nachyleniu zbocza charakterystyki 6dB/okt [3].

Miarą występowania interferencji niewspólnokanałowych pochodzących z kanału następnego jest tłumienie sygnału pochodzącego z kanału następnego w rozważanym kanale. Tłumienie to można wyznaczyć - znając nachylenie charakterystyki filtra i częstotliwości środkowe badanych kanałów - z następującej zależności [5]:

$$A = K\log_2\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = \frac{K}{0.3}\log_{10}\left(\frac{f_2}{f_1}\right), \qquad [7]$$

gdzie f_2 jest częstotliwością środkową kanału następnego, f_1 oznacza częstotliwość środkową rozpatrywanego kanału, a K opisuje nachylenie zbocza charakterystyki filtra.

Z równania tego wynika, iż w przypadku docierania sygnałów interferencyjnych o poziomie większym niż AdB, sygnały te będą zakłócać rozpatrywany sygnał.

5. 2. Interferencje kanału sąsiedniego

Każdej stacji bazowej systemu telefonii komórkowej przydzielana jest co najmniej jedna wiązka kanałów radiowych. Przy założeniu, że pewna liczba tych kanałów obsługiwana jest jednocześnie, wymagane jest zapewnienie odstępu pomiędzy kanałami. Niekorzystny

wpływ tego zjawiska na jakość usług oferowanych przez sieć telefonii komórkowej redukowany jest poprzez odpowiednie zgrupowanie i przydział kanałów radiowych w komórkach zespołu [3].

Grupowanie kanałów radiowych w wiązki kanałów nazywa się zarządzaniem częstotliwościami (ang. frequency management). W procesie tym każdy kanał dostępny dla systemu otrzymuje swój unikalny numer wybrany spośród liczb naturalnych. Z puli kanałów wydziela się kanały wywoławcze oraz kanały rozmówne.

Przydzielanie kanałów (ang. channel assignment) oznacza alokowanie danych kanałów w odpowiednich stacjach bazowych. W wyniku tego działania stacjom bazowym przydzielane zostają wiązki kanałów radiowych.

5. 3. Zasady grupowania kanałów radiowych

Najprostszy sposób numeracji kanałów oraz tworzenia wiązek kanałów radiowych polega na przydzieleniu kolejnym kanałom radiowym kolejnych liczb ze zbioru liczb naturalnych [3]. W praktyce przyjęto, że każdej komórce przydzielany jest jeden kanał wywoławczy. W celu maksymalnej eliminacji interferencji współnokanałowych oraz niewspólnokanałowych należy grupować w wiązki kanały odpowiednio oddalone od siebie. Jeżeli kolejne kanały będą przydzielane kolejnym wiązkom, to okaże się, że sąsiednie kanały w wiązce są oddalone od siebie o liczbę kanałów stanowiącą liczność zespołu komórek. W przypadku stosowania anten kierunkowych liczba wiązek kanałów zwiększa się odpowiednio 3 razy (dla anten 120°) oraz 6 razy (dla anten 60°). W praktyce przyjmuje się, że odstęp pomiędzy kanałami w wiązce powinien wynosić 21 kanałów. Minimalnie, odstęp ten może wynosić od 8 do 10 kanałów.

5.4. Zasady przydzielania kanałów

Wyróżnia się dwa ich rodzaje kanałów przydzielanych komórkom sieci [3]:

- kanały wywoławcze.
  W przypadku stosowania w stacjach bazowych anten o charakterystykach dookólnych, wystarczające jest przydzielenie każdej komórce zespołu tylko jednego kanału wywoławczego. W przypadku wykorzystania anten kierunkowych, liczba kanałów wywoławczych, w które wyposażona zostaje dana komórka wzrasta do 3 (dla anten 120°) lub do 6 (dla anten 60°).
- kanały rozmówne.
  Przydział komórkom sieci wcześniej utworzonych wiązek kanałów bazuje na zasadzie powstawania możliwie najmniejszych interferencji niewspólnokanałowych.

Podczas przydziału sąsiednich kanałów rozmównych należy przestrzegać następujących dwóch reguł:

1. W systemach wyposażonych w anteny dookólne, jeśli jeden kanał przyporządkowany jest danej komórce, to kanał następny nie może być przydzielony do tej samej komórki. Także kanał ten nie powinien być przydzielony do żadnego sąsiada danej komórki.

2. W systemach z antenami kierunkowymi, jeśli jeden kanał zostanie przydzielony do danego podzbioru kanałów wiązki przydzielonej rozważanej komórce, kanał następny nie może być przydzielony do tego samego podzbioru, ani do pozostałych podzbiorów pokrywających daną komórkę. Kanał ten nie może być również przydzielony do żadnego z podzbiorów kanałów obsługiwanych przez daną stację bazową.

6. ANALIZA RUCHOWA SYSTEMU TELEFONII KOMÓRKOWEJ

Można powiedzieć, że system radiotelefoniczny składa się z obiektów dwóch rodzajów: abonentów oraz organów obsługi transmisyjnej [9]. Abonenci stanowią źródła ruchu i jego ujścia. Inicjatywę abonenta wyrażającą zapotrzebowanie na obsługę nazywamy zgłoszeniem. Ciąg zgłoszeń występujących losowo w okresie czasu stanowi strumień zgłoszeń. Ze względu na wahania dobowe, przyjęło się analizować ruch oferowany w godzinie największego ruchu.

Organy obsługi są zwykle w stanie obsłużyć znaczną większość zgłoszeń. W przypadku chwilowej zajętości wszystkich organów obsługi (stan blokady) następuje strata zgłoszenia (systemy ze stratami) lub wprowadzenie abonenta wywołującego do kolejki oczekiwania (systemy z oczekiwaniem). Jedynie w przypadku zajętości lub nieobecności abonenta wywoływanego rozmowa nie dochodzi do skutku, co jednak w teorii elementarnej nie jest uwzględniane.

Podstawowym pojęciem teorii ruchu telefonicznego jest natężenie ruchu stanowiące stosunek sumy czasów zajętości organów obsługi w pewnym okresie obserwacji do długości tego okresu. Średnie natężenie ruchu od jednego abonenta, generującego zgłoszenia z częstością λ, jest równe [7]:

$$a=\lambda h, \qquad [8]$$

gdzie h oznacza średni czas trwania obsługi w godzinie największego ruchu. Dla grupy takich abonentów natężenie ruchu wynosi:

$$A=Sa, \qquad [9]$$

gdzie A oznacza średnią częstość zgłoszeń od wszystkich abonentów. Jednostką natężenia ruchu jest erlang; jeden erlang odpowiada ciągłej zajętości jednego organu bez przerw w czasie obserwacji.

W systemach z komutacją automatyczną zajętość wszystkich organów obsługi najczęściej powoduje stratę zgłoszenia nieobsłużonego. Prawdopodobieństwo blokady P_b wszystkich organów obsługi wyraża pierwszy wzór Erlanga [7]:

$$P_b(A,C)=\frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{i=0}^{C}\left(\frac{A^i}{i!}\right)}, \qquad [10]$$

gdzie A oznacza średnie natężenie ruchu grupy S abonentów, a C stanowi liczbę wszystkich organów obsługi.

Analizę strat w systemie dwufazowym można przeprowadzić przy założeniu niezależnej dostępności do kanału wywoławczego i rozmównego. Prawdopodobieństwo dostępu P_d definiowane jest jako dopełnienie prawdopodobieństwa blokady do jedności [9]:

$$P_d(A,C) \stackrel{\Delta}{=} 1 - P_b(A,C) \qquad [11]$$

Realizacja połączenia następuje po sukcesywnym i niezależnym udostępnieniu kanału wywoławczego (z ruchem A_w w wiązce C_w) i kanału rozmównego (z ruchem A_r w wiązce C_r). Na podstawie reguły mnożenia prawdopodobieństw zdarzeń niezależnych łączne prawdopodobieństwo strat w systemie z kanałami wywoławczymi wynosi [9]:

$$P_b(A_w,C_w;A_r,C_r) = 1 - P_d(A_w,C_w)P_d(A_r,C_r) \qquad [12]$$

7. RZECZYWISTE ROZMIESZCZENIE STACJI BAZOWYCH

Model siatkowy regularnej siatki stacji bazowych precyzuje bardzo dokładnie miejsca, w których należy postawić maszty antenowe. W praktyce jednak może okazać się, że nie da się wybudować masztu antenowego w wyznaczonym przez siatkę miejscu. Okazuje się, że zmiana lokalizacji masztu antenowego stacji bazowej w największym stopniu oddziaływuje na odstęp mocy sygnału użytecznego od mocy zakłóceń interferencyjnych wspólnokanałowych C/I w poszczególnych kanałach rozmównych sieci komórkowej. Praktycznie przyjmuje się, że zmiana położenia masztu antenowego stacji bazowej nie powinna pogorszyć jakości transmisji więcej niż o 10%. Pozwala to na umieszczenie masztów antenowych stacji w stosunku do optymalnego z tolerancją 1/4 wartości promienia komórki [11].

8. RODZAJE ANTEN STACJI BAZOWYCH.

Wybór odpowiedniego typu anteny będącej wyposażeniem stacji bazowej jest bardzo ważnym zagadnieniem. Bardzo często stacje bazowe wyposażane są w anteny o charakterystykach dookólnych (ang. omnidirectional antennas) ze względu na niższy koszt. Jednak system z antenami kierunkowymi (ang. directional antennas) zapewnia lepsze wartości odstępu mocy sygnału użytecznego od mocy zakłóceń interferencyjnych C/I, przez wykorzystywanie właściwości kierunkowych tych anten. Takie rozwiązanie prowadzi do mniejszej liczby komórek w zespole, co pozwala na przydzielenie każdej komórce większej liczby kanałów rozmównych, a w efekcie na obsługę większego ruchu telefonicznego (przy tej samej wartości prawdopodobieństwa blokady rozmowy) [11].

9. PODSTAWOWE ANALIZY SYSTEMU TELEFONII KOMÓRKOWEJ

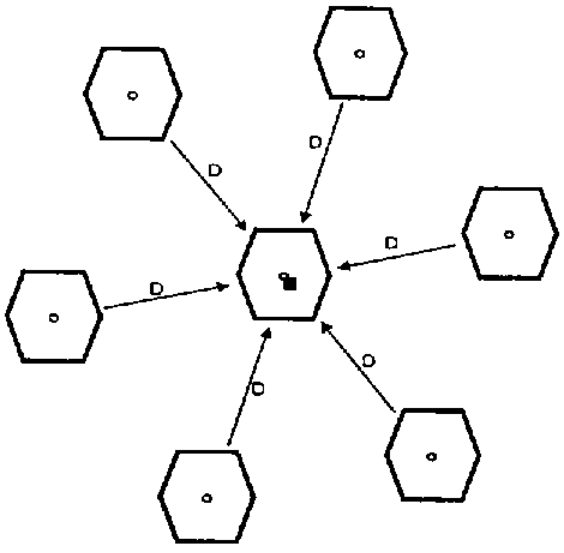
9.1. Wpływ liczności zespołu komórek na zakłócenia interferencyjne współnokanałowe

Praktyka projektowa pokazuje, że liczbę N komórek w zespole w sieciach komórkowych przyjmuje się tak, by w jak największym stopniu osłabić wpływ zakłóceń interferencyjnych sąsiednich współnokanałowych stacji bazowych oraz obsługiwanych przez nie stacjach abonenckich. Im większa będzie liczba N komórek w zespole, tym wpływ zakłóceń interferencyjnych od sąsiednich stacji bazowych (pracujących w oparciu o ten sam zbiór kanałów radiowych) na jakość transmisji będzie mniejszy. Inaczej mówiąc większy odstęp mocy sygnału nośnej od mocy zakłóceń interferencyjnych C/I w kanale rozmównym uzyskuje się dla większych wartości N. Z drugiej jednak strony zbytnie zwiększenie liczby komórek w zespole jest nieekonomiczne, ponieważ zmniejsza liczbę kanałów w pojedynczej komórce, ograniczając tym samym liczbę użytkowników sieci oraz podraża koszty jej budowy i eksploatacji. Należy jednak pamiętać, że wybór optymalnej wartości stosunku D/R jest zawsze kompromisem między wysoką jakością transmisji, a dużą pojemnością sieci.

Podczas analizy wpływu zakłóceń interferencyjnych współnokanałowych na pracę systemu, należy rozpatrzyć dwa następujące przypadki [3]:

a) gdy terminal ruchomy odbiera sygnał użytkowy i oddziałowujący nań sygnał zakłóceń interferencyjnych.
b) gdy stacja bazowa odbiera sygnał użytkowy i oddziałowujący nań sygnał zakłóceń interferencyjnych.

Gdy współczynnik C/I odbierany przez stację bazową jest taki sam jak współczynnik C/I odbierany przez terminal ruchomy, system, w którym zachodzi takie zjawisko nazywany jest systemem zbalansowanym (ang. balanced system). W systemie zbalansowanym (rys. 5) do analizy można wybrać dowolny z wyżej przytoczonych przypadków - rezultaty otrzymywane z analizy pierwszego przypadku są identyczne jak w przypadku analizy drugiego.



Rys. 5 Uproszczone warunki analizy

Dla uproszczenia analizy przyjmuje się równe odległości D_i dla wszystkich komórek współnokanałowych. W związku z tym można powiedzieć, że $D=D_i$ oraz $q=q_i$ (wg wzorów 3 i 5). Dodatkowym założeniem jest przyjęcie faktu wyposażenia stacji bazowych w anteny o charakterystykach dookólnych. Wniosek z przyjęcia drugiego założenia jest taki, iż moc średnia sygnału nośnej na wejściu odbiornika stacji ruchomej jest proporcjonalna do R^{-4}, a moc zakłóceń do D^{-4} [11].

W przypadku zastosowania komórek heksagonalnych stosunek C/I, wyrażony w mierze liczbowej (wg wzoru 4), wynosi:

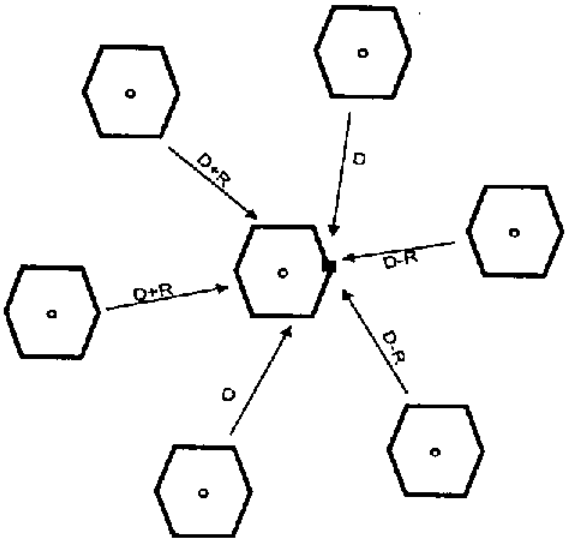
$$C/I = \frac{R^{-\gamma}}{6D^{-\gamma}} = \frac{R^{-4}}{6D^{-4}} = \frac{1}{6q^{-4}} = \frac{q^4}{6} \qquad [13]$$

Dla sieci komórek kwadratowych stosunek C/I, wyrażony w mierze liczbowej (wg wzoru 4), wynosi:

$$C/I = \frac{R^{-\gamma}}{4D^{-\gamma}} = \frac{R^{-4}}{4D^{-4}} = \frac{1}{4q^{-4}} = \frac{q^4}{4} \qquad [14]$$

Dla zapewnienia w sieci wymaganej jakości transmisji sygnałów telefonicznych przyjmuje się, że wartość stosunku C/I powinna być co najmniej równa 18dB [11]. Po prostych przekształceniach wyżej podanych zależności otrzymuje się wartość współczynnika q, którego wartość związana jest z liczbą komórek w zespole zależnościami $q = \sqrt{3N}$ dla komórek heksagonalnych oraz $q = \sqrt{2K}$ dla komórek kwadratowych (wg wzorów 3 i 5). Zatem można określić z tych zależności liczbę komórek. Następnie z odpowiednich szeregów dla odpowiednich rodzajów komórek określa się liczebność zespołu komórek, oblicza się wartość współczynnika redukcji poziomu zakłóceń współnokanałowych a następnie określa się wartość stosunku C/I.

Wyżej przeprowadzona analiza zakłada występowanie idealnych warunków. Jednak w rzeczywistości terminal ruchomy może się znajdować w miejscu, w którym sygnał pochodzący od jego stacji bazowej jest najsłabszy, a sygnały pochodzące z komórek zakłócających są silne (rys. 6) [3].



Rys. 6 Krytyczne warunki analizy

W opisywanym, najgorszym przypadku, stacja ruchoma znajduje się na granicy komórki. Przybliżone odległości pomiędzy stacjami zakłócającymi w sieci zbudowanej w oparciu o komórki heksagonalne a terminalem ruchomym wynosi odpowiednio: D-R, D, D+R. W związku z tym odstęp mocy sygnału nośnej od mocy sygnałów interferencyjnych C/I na wejściu odbiornika stacji ruchomej wg wzoru 4 wynosi [11]:

$$C/I = \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2D^{-4} + 2(D+R)^{-4}} = \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(q+1)^{-4}} \qquad [15]$$

Przyjkmując za najgorszy przypadek sytuację, w której zasięgi zakłóceniowe wszystkich sześciu stacji wspólnokanałowych są równe (D-R), to krytyczna wartość współczynnika C/I wynosi:

$$C/I = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}} \qquad [16]$$

Dla sieci komórek kwadratowych powyższe rozumowanie przebiega podobnie. Poniżej podany zostanie jedynie wynik przeprowadzonj analizy dla sieci komórek kwadratowych, z którego wynika, że wartość współczynnika C/I w warunkach krytycznych wynosi:

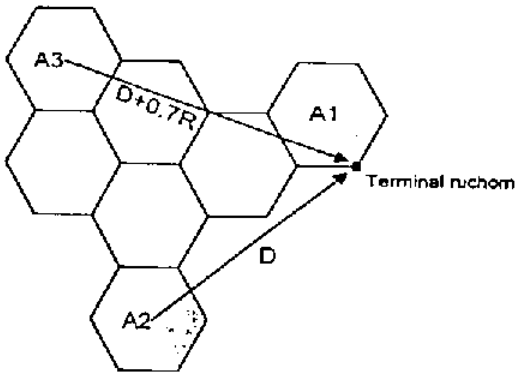
$$C/I = \frac{R^{-4}}{4(D-R)^{-4}} = \frac{1}{4(q-1)^{-4}} \qquad [17]$$

9. 2. Wpływ rodzaju anten na zakłócenia interferencyjne współnokanałowe

Stacje bazowe mogą być wyposażone w dwa typy anten:

- dookólne,
- kierunkowe.

Konsekwencją stosowania anten kierunkowych jest podział komórki na 3 (120°) oraz na 6 (60°) sektorów, a co za tym idzie, podział liczby kanałów przydzielonych stacji bazowej na 3 lub 6 rozłącznych podzbiorów. Z analizy dla komórek sektorowych 120 stopni wynika (rys. 7), że stacja ruchoma znajdująca się w danej komórce zakłócana jest jedynie przez dwie współnokanałowe stacje bazowe [3].

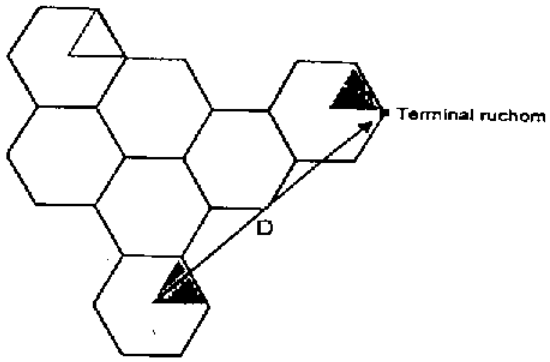


Rys. 7 Zakłócenia interferencyjne współnokanałowe dla przypadku wyposażenia stacji bazowych w anteny o kącie połowy mocy 120 stopni

W przypadku najgorszej pozycji, z punktu widzenia zakłóceń interferencyjnych, odstęp mocy C/I na wejściu odbiornika stacji ruchomej wyraża zależność:

$$C/I = \frac{R^{-4}}{(D+0{,}7R)^{-4} + D^{-4}} = \frac{1}{(q+0{,}7)^{-4} + q^{-4}} \qquad [18]$$

W sieci złożonej z komórek sektorowych 60 stopni (rys. 8) ta sama stacja ruchoma zakłócana jest tylko przez jedną stację bazową.



Rys. 8 Zakłócenia interferencyjne wspólnokanałowe dla przypadku wyposażenia stacji bazowych w anteny o kącie połowy mocy 60 stopni

W tym przypadku odstęp mocy C/I na wejściu odbiornika stacji ruchomej wynosi:

$$C/I = \frac{R^{-4}}{(D+0{,}7R)^{-4}} = \frac{1}{(q+0{,}7)^{-4}} \qquad [19]$$

Dalszą część analizy przeprowadza się jak w poprzednio omawianych przypadkach.

Analizy dotyczące sieci złożonej z komórek kwadratowych dają identyczne wyniki jak w przypadku powyżej omówionych analiz dla sieci złożonej z komórek heksagonalnych[1].

9.3. Pojemność systemu telefonii komórkowej w zależności od liczności zespołu komórek

Zakładając wartość stosunku mocy sygnału użytkowego do mocy sygnału interferencji można wyznaczyć liczność zespołu komórek danej sieci komórkowej. Pod względem pojemności można porównać np. systemy zbudowane w oparciu o różne typy komórek. I w ten sposób okazuje się, iż wartość współczynnika zakłóceń interferencyjnych wspólnokanałowych dla sieci komórek kwadratowych, spełniających warunek (wg wezoru 4):

$$10\lg\frac{q4}{4} \geq 18dB \qquad [20]$$

wynosi q>3,99. Najmniejszą liczbą całkowitą, dla której q>3,99 jest liczba K=8. Przy ośmiu komórkach w zespole siatki kwadratowej współczynnik C/I przyjmuje wartość 18.06dB. Dla porównania, w sieci złożonej z komórek heksagonalnych żądany odstęp mocy C/I uzyskuje się już przy N=7 komórkach w zespole. Wówczas współczynnik C/I jest równy 18.72dB.

Następstwem ograniczonej obciążalności ruchowej wiązki kanałów przydzielonych danej komórce są straty ruchu, które najczęściej opisywane są wartościami prawdopodobieństw blokady generowanych zgłoszeń. Dla ustalonej wartości gęstości ruchu

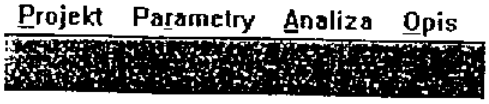
[1] Wniosek na podstawie analiz przeprowadzonych przez autora pracy dyplomowej [17]

telefonicznego straty te są tym większe, im mniej liczne są zbiory rozmównych kanałów radiowych przydzielone komórkom w sieci. W związku z tym mniejsza liczba komórek w zespole oznacza liczniejsze wiązki kanałów w komórce i przy zadanym natężeniu ruchu telefonicznego oznacza mniejsze straty.

10. OPIS UŻYTKOWY PROGRAMU CellNET

Program CellNET napisany w ramach pracy [17] w języku Borland Delphi 1.0, będącym obiektową wersją Borland Pascal'a 7.0 działa w środowisku Windows (zarówno pod Windows 3.xx jak i Windows'95). Program wywoływany jest przez uruchomienie pliku **cellnet.exe** znajdującego się w katalogu **c:\cellnet** (domyślna ścieżka dostępu programu instalacyjnego).

Po uruchomieniu programu na ekranie komputera pojawia się okno zawierające pasek menu (rys. 22).



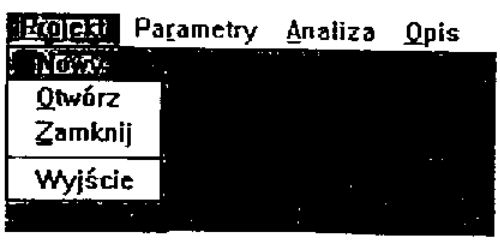
Rys. 21 Menu główne programu CellNET.

Menu główne programu udostępnia użytkownikowi następujące opcje: „Projekt", „Parametry", „Analiza", „Opis".

10.2.1. Menu „Projekt"

Menu „Projekt" (rys. 23) oferuje kilka opcji zarządzających przeprowadzanym projektem. Do opcji tych należą:

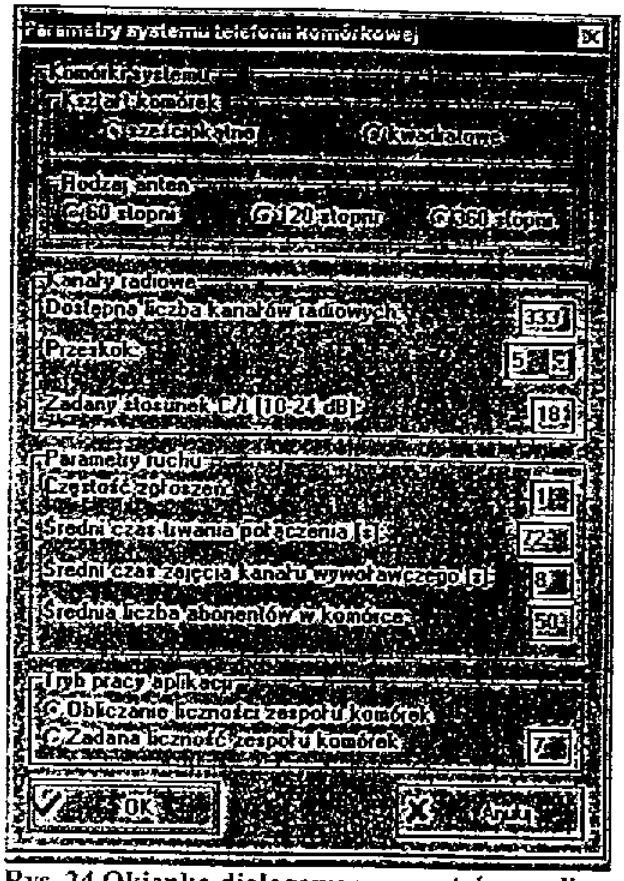
- „Nowy projekt" - otwieranie nowego projektu. Ustawiane są domyślne parametry analiz.
- „Otwórz projekt" - odczytanie z podanego przez użytkownika pliku parametrów analiz.
- „Zapisz projekt" - zapisanie do podanego przez użytkownika pliku aktualnie tworzonego projektu.
- „Wyjście" - zakończenie pracy programu CellNET.



Rys. 23 Menu „Projekt"

10.2.2. Menu „Parametry"

Wybranie tej opcji menu głównego programu powoduje wyświetlenie okna dialogowego (rys. 24) umożliwiającego użytkownikowi modyfikację parametrów przeprowadzanych analiz.



Rys. 24 Okienko dialogowe parametrów analizy.

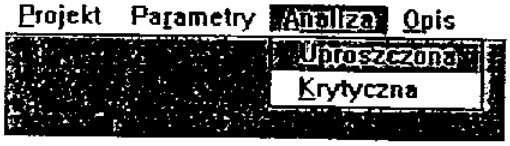
W okienku tym użytkownik może dokonać modyfikacji następujących parametrów:

- kształt komórek - dostępne są dwa rodzaje komórek: sześciokątne (wybrane domyślnie) oraz kwadratowe.
- rodzaj anten - można wybrać system anten dookólnych (360) lub kierunkowych (60, 120).
- liczba kanałów radiowych dostępnych dla systemu - domyślnie wartość tego parametru ustawiona jest na 333.
- przeskok - liczba kanałów odstępu między kanałami radiowymi przydzielanymi jednej komórce zespołu.
- zadany stosunek C/I - ten parametr może przyjmować wartości z zakresu 10-24dB. Domyślnie wartość ta wynosi 18dB.
- częstość zgłoszeń
- średni czas trwania połączenia
- średni czas zajęcia kanału wywoławczego
- średnia liczba abonentów w komórce

Dodatkowo oprogramowanie umożliwia pracę w dwóch trybach. Pierwszy z nich polega na obliczaniu zespołu komórek i innych parametrów systemu na podstawie wcześniej zadanych parametrów. Drugi tryb umożliwia obliczenie parametrów systemu dla zadanej liczby zespołu komórek. W przypadku wybrania tego trybu blokowane jest pole parametru „zadany stosunek C/I".

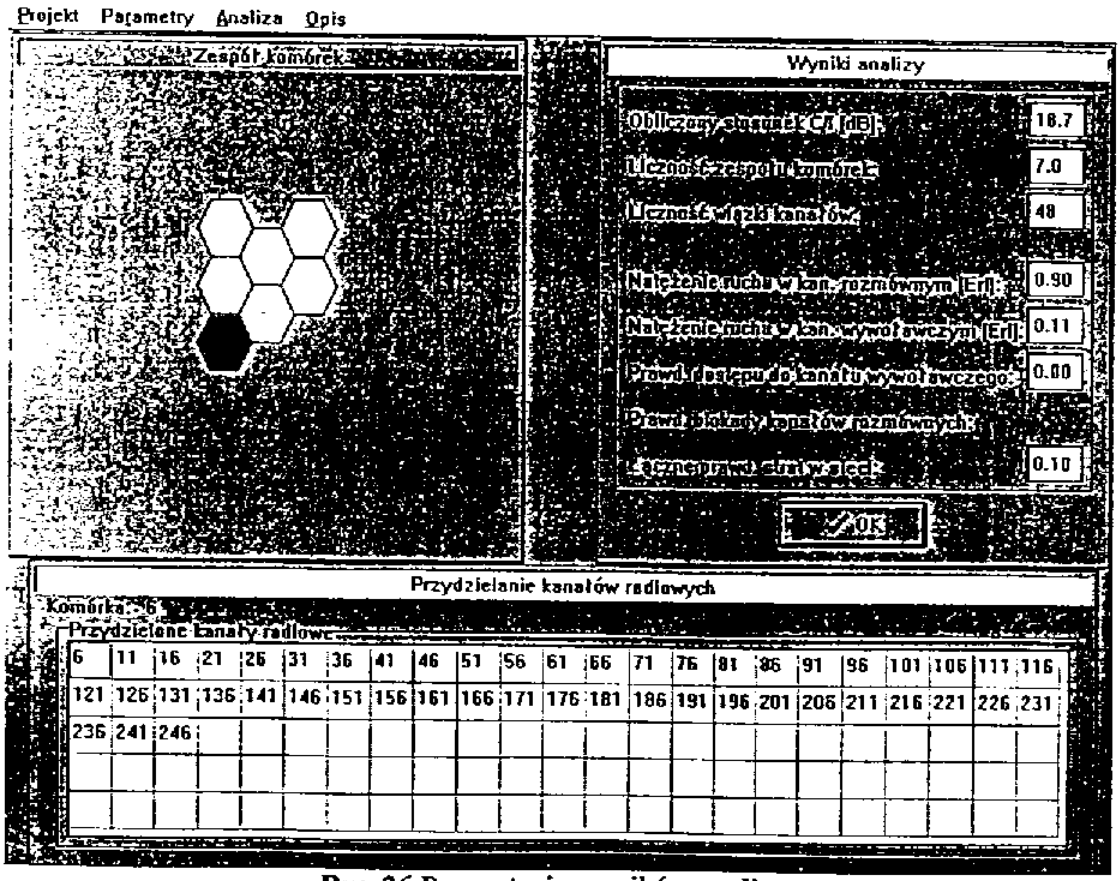
10.2.3. Menu „Analiza"

W menu „Analiza" (rys. 25) dostępne są dwie metody obliczeniowe: uproszczona i krytyczna. Obie metody zostały opisane wcześniej.



Rys. 25 Menu „Analiza".

Po wybraniu metody obliczeniowej komputer analizuje wcześniej zadane przez użytkownika parametry. Podczas obliczeń na ekranie monitora ukazuje się pasek statusu. Po kilku sekundach ukazują się wyniki przeprowadzonych obliczeń (rys. 26).



Rys. 26 Prezentacja wyników analizy.

Wyniki analizy przedstawione są w trzech okienkach: „Zespół komórek", „Wyniki analizy", „Przydzielanie kanałów radiowych". W pierwszym z nich przedstawiany jest zaprojektowany zespół komórek. Gdy w jednej z komórek zespołu znajdzie się kursor myszki, komórka zostaje podświetlona, a w okienku „Przydzielanie kanałów radiowych" pojawiają się informacje o kanałach radiowych przydzielonych do danej komórki. W okienku „Wyniki analizy" wyświetlane są informacje o systemie:

- obliczony stosunek C/I,
- liczność zespołu komórek,
- liczność wiązki kanałów,
- natężenie ruchu w kanale rozmównym,
- natężenie ruchu w kanale wywoławczym,
- prawdopodobieństwo dostępu dla kanału wywoławczego,
- prawdopodobieństwo blokady kanałów rozmównych,
- łączne prawdopodobieństwo strat w sieci.

11. ĆWICZENIE LABORATORYJNE

W ramach niniejszego ćwiczenia należy wykonać serię zadanych przez prowadzącego ćwiczenie obliczeń przy pomocy programu CellNet.

Zmieniając parametry programu uzyskuje się informacje na temat zmian poszczególnych parametrów sieci telefonii komórkowej. Poniżej przedstawiono analizy możliwe do wykonania przy pomocy programu:

- zależność liczności zespołu komórek od zadanego stosunku C/I, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność obliczonej wartości współczynnika C/I od zadanego stosunku C/I, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność liczności wiązki kanałów radiowych od zadanego stosunku C/I, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność obliczonej wartości współczynnika C/I od liczności zespołu komórek, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność liczności wiązki kanałów radiowych od liczności zespołu komórek, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność wartości prawdopodobieństwa straty wywołania od częstości zgłoszeń, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność wartości prawdopodobieństwa straty wywołania od czasu zajęcia kanału wywoławczego, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.
- zależność wartości prawdopodobieństwa straty wywołania od średniej liczby abonentów w komórce, kształtu komórki oraz od rodzaju zastosowanych anten.

Program CellNET dokonuje graficznej prezentacji niektórych wyników obliczeń, np.: struktury zespołu komórek i przyporządkowania komórkom kanałów radiowych.

12. LITERATURA

1. Cox D. C.: Cochannel interference considerations in frequency reuse small-coverage-area radio systems. IEEE Trans. Communic., vol. COM-30, no 1, 1982
2. Wojnar A.: Solved, unsolved and missolved problems of dense radiocommunication networks. Proc. of 3-rd World Telecommunication Forum, 1979.
3. Lee W. C. Y.: Mobile cellular telecommunications systems. McGraw-Hill Book Company, 1989.
4. Lee W. C. Y.: Mobile communications design fundamentals. John Wiley&Sons, Inc. 1993.
5. Walker J.: Mobile information systems. Artech House, 1990.
6. Hess G. C.: Land-Mobile radio system engineering. Artech House, 1993.
7. Kuhn S., Klimontowicz A.: Zagadnienia ruchu telefonicznego. WKŁ 1971
8. Załącznik nr 15 do Rozporządzenia Ministra Łączności: Podstawowe wymagania techniczne i eksploatacyjne dla sieci radiokomunikacji ruchomej lądowej o strukturze komórkowej zakładanej i eksploatowanej w pasmie częstotliwości 450 Mhz, oraz warunków jej współpracy z siecią telekomunikacyjną użytku publicznego. Warszawa 1993.
9. A. Wojnar: Systemy radiokomunikacji ruchowej lądowej. WkiŁ, Warszawa 1989.
10. W. Hołubowicz, P. Płóciennik: GSM cyfrowy system telefonii komórkowej. EFP, Poznań 1995.
11. W.Ludwin: Telefonia komórkowa. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, 1994.
12. A. Marciniak: Turbo Pascal 5.5. Nakom, 1991.
13. Delphi user's guide. Borland Int., 1995.
14. Delphi component writer's guide. Borland Int., 1995.
15. Delphi database application developers. Borland Int., 1995.
16. Database desktop user's guide. Borland Int., 1995.
17. Igor Michał Szwedziński: Analiza ruchu i interferencji wspólnokanałowych systemu telefonii komórkowej. Praca dyplomowa. Instytut Telekomunikacji PW, 1996.