

SZYMON ŁUKASIK¹, MATEUSZ WICHA², PIOTR KULCZYCKI¹

¹Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk

²Katedra Automatyki i Technik Informacyjnych, Politechnika Krakowska

ALGORYTM SYMULOWANEGO WYŻARZANIA DLA PROBLEMU PRZYDZIAŁU CZĘSTOTLIWOŚCI RADIOWYCH

Streszczenie

Współczesne sieci teleinformatyczne w coraz większym stopniu wykorzystują metody transmisji radiowej. Pozwalają one na zmniejszenie kosztów związanych z budową infrastruktury sieciowej, a rosnąca wydajność łączności bezprzewodowej umożliwia jej zastosowanie także w przypadkach, gdy wymagana jest wysoka sprawność przesyłu informacji. Pasma użytecznych częstotliwości radiowych jest jednak ograniczone, dlatego ważne jest efektywne jego wykorzystanie, przy jednoczesnym zapewnieniu niezakłóconego przepływu danych. Przedmiotem rozważań niniejszego artykułu jest algorytm przydziału częstotliwości radiowych oparty o metaheurystykę symulowanego wyżarzania. Zapewnia on minimalizację liczby zablokowanych w skutek interferencji komunikatów w sieci o układzie komórkowym. Efektywność proponowanego algorytmu została potwierdzona w trakcie przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych, także w odniesieniu do istniejących heurystycznych algorytmów przydziału częstotliwości.

Słowa kluczowe: symulowane wyżarzanie, przydział częstotliwości radiowych, telefonia komórkowa, metaheurystyki.

1. Wprowadzenie

Transmisja radiowa stanowi obecnie bardzo istotną metodę przesyłu informacji. Obszarami jej zastosowań są między innymi: radio i telewizja, telefonia komórkowa, a także bezprzewodowe sieci komputerowe. Użycie łączności radiowej pozwala zmniejszyć koszty związane z budową infrastruktury sieciowej, a nieustanny rozwój technik komunikacji bezprzewodowej powoduje, że staje się ona coraz wydajniejsza i niezawodna. Z tą metodą transmisji danych wiążą się jednak wciąż istotne kwestie techniczne, takie jak właściwe rozmieszczenie nadajników oraz przydział częstotliwości dla urządzeń odbiorczych. W związku ze wspomnianym wyżej wzrostem zapotrzebowania na niezawodną, masową komunikację bezprzewodową zwłaszcza ta ostatnia zasługuje na podkreślenie. Pasma użytecznych częstotliwości radiowych jest bowiem istotnie ograniczone, stąd ważne jest efektywne jego wykorzystanie z zapewnieniem niezakłóconego przepływu informacji.

Problem przydziału częstotliwości radiowych (ang. Frequency Allocation Problem, w skrócie: FAP) zaczął być rozważany w telekomunikacji w latach 1960–1970. Dynamiczny rozwój radiowych metod transmisji danych pod koniec XX wieku spowodował, że był on tego czasu podejmowany wielokrotnie, w rozmaitych aspektach i stosowanych metodach jego rozwiązywania. Szczególne znaczenie ma tu problem przydziału częstotliwości w sieci o topologii komórkowej. W sieci takiej obszar świadczenia usług telekomunikacyjnych dzielony jest na struktury (zwane komórkami), a każda z nich obsługiwana przez co najmniej jedno urządzenie nadawczo-odbiorcze

tw. stację bazową. Najpowszechniejszą siecią tego typu jest sieć telefonii komórkowej typu GSM lub UMTS, jednak model komórkowy znajduje swe zastosowanie również w bezprzewodowych sieciach komputerowych czy wyspecjalizowanych sieciach wojskowych. W sieci o takiej rozproszonej architekturze przydział częstotliwości powinien uwzględniać wiele uwarunkowań takich jak: zapotrzebowanie na usługi w każdej z komórek, interferencje między kanałami komórek sąsiadujących ze sobą czy też wreszcie techniczne ograniczenia płynące z zastosowanego medium transmisyjnego. Z racji wysokiej złożoności wyżej przedstawionego problemu, zarówno jego sformalizowanie jak i efektywne rozwiązywanie było i jest obecnie przedmiotem intensywnych badań. Obszerne omówienie współczesnego stanu wiedzy w tym zakresie, uwzględniające także zastosowanie w zagadnieniach FAP szerokiej gamy algorytmów iteracyjnych, stanowi praca [1].

Algorytm symulowanego wyżarzania (ang. Simulated Annealing, w skrócie: SA) jest jedną z najczęściej używanych obecnie technik heurystycznych, zarówno w zakresie optymalizacji ciągłej, jak i dyskretnej [2]. Jej idea opiera się o analogię do procesu wyżarzania znanego z metalurgii. Algorytm symulowanego wyżarzania bazuje na technice iteracyjnego lokalnego przeszukiwania oraz na indywidualnym kryterium akceptacji rozwiązań. Kryterium to pozwala określić rozwiązanie aktualne w danym kroku dla opisywanego algorytmu, zwykle wykorzystując przy tym wartość wskaźnika jakości z poprzedniej i bieżącej iteracji oraz zmienny, malejący w czasie parametr zwany temperaturą wyżarzania. Dopuszcza się przy tym możliwość przyjęcia rozwiązania aktualnego gorszego od poprzedniego, co pozwala na uniknięcie sytuacji, w której algorytm „utyka” w lokalnym minimum.

Przedmiotem niniejszej pracy jest opracowanie nowego algorytmu opartego o strategię symulowanego wyżarzania dla zagadnienia przydziału częstotliwości w radiowej sieci komórkowej. Kolejny rozdział zawiera sformułowanie rozważanego tutaj problemu w dziedzinie optymalizacji kombinatorycznej. W następnych przedstawiono szczegółowe informacje na temat algorytmu symulowanego wyżarzania, a także jego dostosowania do problemu przydziału częstotliwości radiowych, zarówno w zakresie strategii generacji rozwiązania początkowego, sąsiedniego jak i schematu zmian temperatury. W ostatniej części pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla powszechnie używanych zbiorów testowych. Główny nacisk kładziony jest tu nie tylko na demonstrację potencjału stworzonego algorytmu, ale także na właściwy dobór tworzących go komponentów. W zakończeniu podsumowano stan bieżących prac, a także wskazano kierunki możliwych dalszych badań.

2. Przydział częstotliwości radiowych jako problem optymalizacji

Niech $[f_{min}, f_{max}]$ oznacza dostępne pasmo częstotliwości, podzielone na kanały o szerokości pasma Δ . Przez N oznacza się liczbę kanałów w danej sieci transmisji radiowej. Związana jest ona z pasmem częstotliwości następującą relacją: $N=(f_{max} - f_{min})/\Delta$. Niech $\{1, 2, \dots, N\}$ określa zatem zbiór indeksów dostępnych kanałów dla nadajnika każdej z M komórek sieci o strukturze komórkowej. Przypisanie kanałów do poszczególnych komórek można opisać przez dwuwymiarową binarną macierz F :

$$F = [f_{ij}], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

przy czym wartość f_{ij} jest równa 1 gdy kanał i został przydzielony dla nadajnika w komórce j , natomiast równa 0 gdy kanał ten w komórce nie może być wykorzystany. Równoważnie, macierz F można zapisać w postaci listy L kanałów przypisanych do każdej komórki:

$$L = [l_i], \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

gdzie l_i stanowi wektor p_i indeksów kanałów dostępnych w danej komórce:

$$l_i = [ch_1^{(i)}, ch_2^{(i)}, \dots, ch_{p_i}^{(i)}], \quad ch_j^{(i)} \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (3)$$

Zarówno macierz binarna F jak i lista L stanowią w istocie rozwiązanie problemu przydziału częstotliwości.

Wymagania dotyczące liczby dostępnych kanałów radiowych w poszczególnych komórkach są określane przez wektor zapotrzebowania D :

$$D = [d_1, d_2, \dots, d_M], \quad d_i \in \mathbb{N}. \quad (4)$$

Rozróżnia się przypadki gdy zapotrzebowanie to nie zmienia się w czasie - wtedy problem przydziału częstotliwości określa się mianem statycznego przydziału częstotliwości (ang. Fixed Channel Assignment) a także, gdy zapotrzebowanie to jest zmienne (ang. Dynamic Channel Assignment). W toku badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy rozważany był pierwszy z wyżej wymienionych problemów.

Rozpatrując zagadnienie przydziału częstotliwości należy uwzględnić interferencje pomiędzy kanałami przydzielonymi w pojedynczej komórce, czyli zakłócenia wewnątrzkomórkowe (ang. co-cell separation constraints), a także interferencje pomiędzy kanałami komórek sąsiednich (ang. co-channel constraints). Minimalna separacja między dwoma kanałami w komórkach i oraz j zapewniająca niezakłócony przebieg transmisji jest oznaczana przez c_{ij} :

$$|ch_k^{(i)} - ch_l^{(j)}| \geq c_{i,j} \quad (5)$$

$$ch_k^{(i)}, ch_l^{(j)} \in \{1, 2, \dots, N\} \text{ oraz } i, j \in \{1, 2, \dots, M\}; k \in \{1, 2, \dots, p_i\}, l \in \{1, 2, \dots, p_j\}$$

i zapisywana, wraz z pozostałymi ograniczeniami tego typu w macierzy kompatybilności C :

$$C = [c_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

Problem przydziału częstotliwości można rozważać w różnorodnych wariantach, związanych z wymaganiami stawianymi wobec oczekiwanego rozwiązania. Często rozważany jest on jako generalizacja problemu kolorowania grafów [4]. W literaturze przedmiotu można spotkać następujące podstawowe odmiany FAP:

– przydział częstotliwości zapewniający możliwie bliski zapotrzebowaniu zdefiniowanemu wektorem (4) – Maximum Service FAP (Max-FAP),

- przydział częstotliwości zapewniający minimalizację użytych kanałów N – Minimum Order FAP (MO-FAP),
- przydział częstotliwości zapewniający minimalizację różnicy pomiędzy największym, a najmniejszym indeksem w zbiorze kanałów użytych we wszystkich komórkach sieci – Minimum Span FAP (MS-FAP),
- przydział częstotliwości zapewniający minimalizację występujących interferencji – Minimum Interference FAP (MI-FAP).

Przedmiotem rozważań niniejszej pracy będzie problem przydziału częstotliwości, dla przyjętego, jak najmniejszego zbioru dostępnych kanałów, z uwzględnieniem zarówno danego zapotrzebowania, jak i ograniczeń płynących z interferencji między- i wewnątrzkomórkowych. Problem ten można zaklasyfikować do grupy MS-FAP i do klasy problemów NP-zupełnych [5]. Jako wskaźnik kosztu g uzyskanego rozwiązania, reprezentowanego przez macierz F lub listę L , użyto następującej funkcji:

$$g(L) = w_1 b(L) + w_2 f_{used}(L)^r \quad (7)$$

przy czym w_1 , w_2 stanowią wagi poszczególnych składników, $b(L)$ reprezentuje łączną liczbę połączeń zablokowanych w skutek interferencji, czyli przypadków złamania ograniczenia (5), natomiast $f_{used}(L)$ oznacza liczbę użytych kanałów, a $r = \{-1, 1\}$ – dodatkowy parametr. Pozwala on na uwzględnienie dwóch wariantów: minimalizacji ($r = 1$) i maksymalizacji ($r = -1$) liczby użytych kanałów w ramach dostępnego zbioru $\{1, 2, \dots, N\}$.

Zadaniem opisywanego algorytmu jest zatem minimalizacja wskaźnika jakości (7) dla ustalonej liczby kanałów N . Przedmiotem rozważań następnego rozdziału niniejszej pracy będzie charakterystyka użytej w tym celu heurystyki symulowanego wyżarzania.

3. Algorytm symulowanego wyżarzania

Metodę symulowanego wyżarzania zaproponowali w 1983 roku Scott Kirkpatrick, Charles Gelatt i Mario Vecchi [3]. Algorytm symulowanego wyżarzania działa iteracyjnie, w zamierzeniu zbliżając się do rozwiązania optymalnego wraz ze wzrostem liczby wykonanych iteracji. W każdej iteracji k na podstawie bieżącego rozwiązania L_k generowane jest nowe rozwiązanie, tzw. sąsiad L_k^s . Jeżeli „sąsiednie” rozwiązanie jest lepsze od poprzednika, czyli wartość funkcji kosztu $g(L_k^s)$ jest mniejsza od $g(L_k)$, to staje się ono aktualnym. Natomiast, jeśli nowa propozycja jest gorsza to jej akceptacja odbywa się z prawdopodobieństwem:

$$p = e^{-\frac{g(L_k^s) - g(L_k)}{T_k}} \quad (8)$$

wynikającym z tzw. zasady Metropolis [2]. Zmienny w toku działania algorytmu parametr T_k nazywany jest temperaturą przez analogię do procesu metalurgicznego wyżarzania. Temperatura jest obniżana zgodnie z wybranym schematem chłodzenia. Oznacza to, że w kolejnych krokach szansa akceptacji rozwiązania gorszego maleje. Najczęściej używanymi schematami zmian temperatury są schemat logarytmiczny (tzw. schemat Boltzmanna):

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{1+\log(k)} \quad (9)$$

oraz schemat geometryczny

$$T_{k+1} = \alpha T_k. \quad (10)$$

W praktycznych zastosowaniach algorytm symulowanego wyżarzania może być modyfikowany w zależności od rozważanego problemu optymalizacji. Niezależnie od tego wymaga on jednak szczegółowego określenia poszczególnych komponentów, takich jak: generowanie rozwiązania początkowego, schematu wyboru rozwiązań sąsiednich, wartości temperatury początkowej i procedury jej zmiany oraz warunku zatrzymania algorytmu. Odpowiednie określenie wszystkich wyżej wymienionych parametrów ma znaczący wpływ na końcowe rezultaty działania algorytmu. Przedmiotem kolejnego rozdziału pracy będzie opis wyżej wymienionych elementów w odniesieniu do rozważanego tu problemu przydziału częstotliwości radiowych.

4. Przydział częstotliwości radiowych z użyciem algorytmu SA

Rozwiązanie początkowe dla algorytmu symulowanego wyżarzania w ramach opracowanej metody może być generowane dwojako: losowo lub z użyciem strategii o charakterze pseudodeterministycznym.

W pierwszym przypadku początkowy przydział kanałów do odpowiednich komórek odbywa się drogą losowania kanału ze zbioru $\{1, 2, \dots, N\}$, z równomiernym rozkładem prawdopodobieństwa, tak by zrealizowane było zapotrzebowanie dane przez wektor (4).

Druga strategia generacji rozwiązania początkowego polega na iteracyjnym losowaniu przydziału kanałów z zakresu $\{1, 2, \dots, N\}$ kolejno, rozpoczynając od komórek z największą liczbą rozmów do komórek, w których liczba ta jest najmniejsza. Przydzielany kanał losowany jest w pojedynczej komórce dotąd, aż nie będzie on powodował interferencji, zarówno wewnątrzkomórkowych, jak i z kanałami komórek sąsiednich, jednak nie więcej niż 100 razy. Opisany generator umożliwia rozwiązanie prostych zagadnień FAP już na etapie generowania rozwiązania początkowego. Takie podejście nosi w literaturze przedmiotu nazwę wyczerpującego przydziału częstotliwości (ang. frequency exhaustive assignment) [5].

W ramach prezentowanej pracy opracowano pięć, używanych naprzemiennie metod tworzenia rozwiązania sąsiedniego:

Algorytm 1

Polega na wybraniu losowo komórki i zamianie stanu losowo wyselekcjonowanego kanału: na wyłączony, gdy dotąd kanał ten był w danej komórce użytkowany oraz na włączony gdy kanał ten nie był w tej komórce dotychczas w użyciu.

Algorytm 2

Polega na zamianie wybranego losowo kanału przypisanego do zablokowanego przez interferencję połączenia na kanał nieużywany w tej samej komórce (wyznaczony również losowo), tak aby

liczba wykorzystanych kanałów w komórce się nie zmienia. Jeśli aktualne rozwiązanie nie zawiera interferujących połączeń to realizowany jest Algorytm 1.

Algorytm 3

Polega na zamianie wybranego losowo kanału przypisanego do zablokowanego przez interferencję połączenia na kanał, który jest najczęściej użytkowany w komórkach znajdujących się poza obszarem interferencji, wyznaczonym dla komórki, w której dane połączenie zostało zablokowane. Jeżeli znaleziony w ten sposób kanał jest już w tej komórce używany, to należy wyznaczyć go ponownie w sposób losowy.

Algorytm 4

Polega na zamianie wybranego losowo kanału przypisanego do zablokowanego przez interferencję połączenia na losowo określony kanał, który nie jest wykorzystywany w obszarze interferencji wyznaczonym dla komórki w której dane połączenie zostało zablokowane. Sprawdzanie wykonywane jest N razy, z założeniem, że gdy znalezienie takiego kanału jest niemożliwe, to należy użyć dowolnie wybranego, dotąd nie użytkowanego w komórce kanału.

Algorytm 5

Polega na zamianie wybranego losowo kanału przypisanego do zablokowanego przez interferencję połączenia na losowo określony kanał, którego użycie nie skutkuje powstaniem interferencji. Sprawdzanie wykonywane jest po kolei dla wszystkich kanałów nie użytkowanych w danej komórce, z założeniem, że gdy znalezienie takiego kanału jest niemożliwe, to należy użyć dowolnie wybranego, dotąd nie użytkowanego w komórce kanału.

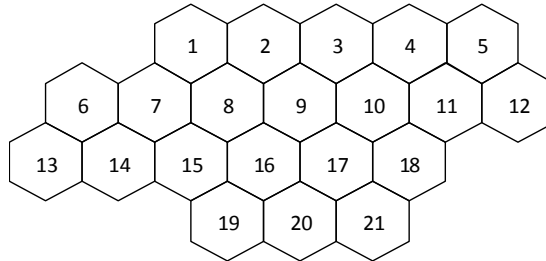
Jako schemat zmian temperatury zastosowano dobrze uzasadniony teoretycznie schemat logarytmiczny (9). Temperaturę początkową T_0 w ramach opracowanego algorytmu wyznacza się na podstawie wygenerowania pewnej niewielkiej ilości (1% ogółu iteracji) przejść testowych z rozwiązania początkowego, tak by zapewnić na wstępie akceptację rozwiązania gorszego z ustalonym prawdopodobieństwem P_0 [2]. Aby ustalić wartość T_0 należy obliczyć średnią zmianę funkcji celu $\overline{\Delta g}$ i przy założonym prawdopodobieństwie skorzystać ze wzoru:

$$T_0 = -\frac{\overline{\Delta g}}{\ln(P_0)}. \quad (11)$$

Algorytm kończy pracę gdy osiągnięto określoną a priori liczbę iteracji lub gdy znaleziono rozwiązanie bez blokad.

5. Wyniki eksperymentów numerycznych

Zaproponowana procedura została przetestowana dla wybranych problemów przydziału częstotliwości określonych dla historycznej 21-komórkowej sieci komórkowej miasta Philadelphia [6] o topologii przedstawionej na Rys. 1. Zagadnienia z nimi związane były w przeszłości przedmiotem intensywnych badań [1], a uzyskane wyniki stanowią dogodne źródło informacji porównawczych, pozwalających ocenić wydajność opracowanej metody w relacji do procedur konkurencyjnych.



Rys. 1. Struktura sieci komórkowej Philadelphia.

W sieci pokazanej na Rys. 1 definiuje się dwa warianty wektorów zapotrzebowania przypisanego do poszczególnych komórek:

$$D_1 = [8,25,8,8,8,15,18,52,77,28,13,15,31,15,36,57,28,8,10,13,8] \quad (12a)$$

$$D_2 = [5,5,5,8,12,25,30,25,30,40,40,45,20,30,25,15,15,30,20,20,25]. \quad (12b)$$

Dodatkowo formułuje się (za [5]) również cztery klasy ograniczeń interferencyjnych reprezentowanych przez macierz C , o elementach przedstawionych w Tabeli 1. Przyjęto przy tym, że $dist(i, j)$ oznacza odległość między komórkami i oraz j mierzona w komórkach na najkrótszej drodze z komórki i do j .

Tab. 1. Warianty ograniczeń interferencyjnych dla sieci Philadelphia.

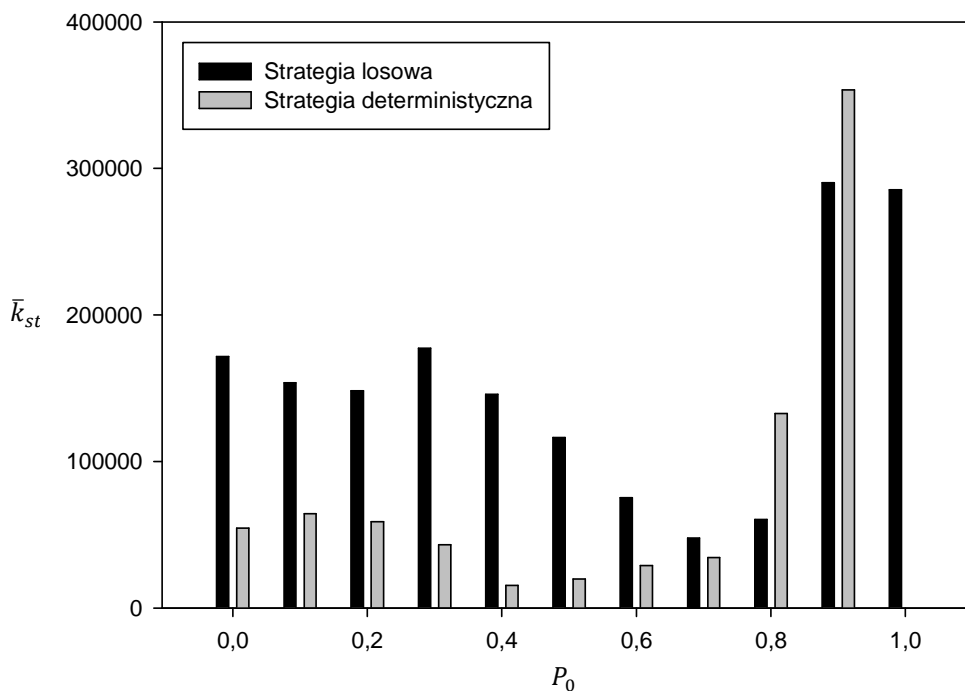
	c_{ij} $i = j$	c_{ij} $dist(i, j) = 1$	c_{ij} $dist(i, j) > 1$
C_1	5	1	0
C_2	5	2	0
C_3	7	1	0
C_4	7	2	0

Dla sieci o konfiguracji pokazanej na Rys.1 zdefiniowano – zgodnie z konwencją przyjętą w pracy [5] – 8 podstawowych problemów, oznaczonych P1–P8 i charakteryzujących się kombinacjami zapotrzebowania i ograniczeń interferencyjnych, zaprezentowanymi w Tab.2.

Tab. 2. Zestawienie instancji FAP dla sieci Philadelphia.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
<i>D</i>	D_1	D_1	D_1	D_1	D_2	D_2	D_2	D_2
<i>C</i>	C_1	C_2	C_3	C_4	C_1	C_2	C_3	C_4

W ramach przeprowadzonych eksperymentów zbadano na wstępie wpływ początkowego prawdopodobieństwa akceptacji rozwiązania gorszego na ostateczny wynik działania algorytmu w toku 500 000 iteracji. Przedmiotem rozważań był problem P6 z 252 dostępnymi kanałami. Użyto dwóch strategii generowania rozwiązania początkowego – losowej i deterministycznej – oraz $w_1=1$, $w_2=1$, $r=-1$ jako parametrów funkcji kosztu (6). Algorytm wykonano łącznie 10 razy. Wyniki, reprezentowane przez średnią liczbę iteracji \bar{k}_{st} wymaganych dla osiągnięcia rozwiązania bez blokad, przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Wpływ początkowego prawdopodobieństwa akceptacji rozwiązania gorszego i strategii generacji rozwiązania początkowego na efektywność algorytmu.

Strategia deterministyczna generacji rozwiązania początkowego wydaje się górować nad metodą wykorzystującą w tym celu jedynie losowy przydział kanałów. Należy jednak nadmienić, że pierwsza z wyżej wymienionych koncepcji wymaga znacznie większego nakładu obliczeń, ponadto może prowadzić do szybszego „utykania” algorytmu w lokalnym minimum funkcji kosztu. Można ponadto zauważyć, że jakość uzyskiwanego rozwiązania zależy istotnie od początkowego prawdopodobieństwa akceptacji rozwiązania gorszego. Konkretny dobór tego parametru zależy od rozważanego problemu optymalizacji – w analizowanym przypadku sugerowane byłoby ustalenie początkowego prawdopodobieństwa akceptacji rozwiązania gorszego na poziomie 0,4–0,7.

W ostatniej fazie badań porównano wyniki działania algorytmu w porównaniu z trzema istniejącymi technikami heurystycznymi opartymi o algorytmy genetyczne, sieci Hopfielda oraz wyspecjalizowany algorytm sekwencyjny. Były one dotąd używane w przedstawionych zagadnieniach przydziału częstotliwości zdefiniowanych dla sieci składającej się z 21 komórek, a z opracowaną w niniejszej pracy procedurą łączy je nadrzędny cel optymalizacji – minimalizacja zakresu użytych kanałów. Rozważano problemy P1–P8, a jako kryterium porównawcze zastosowano najmniejszą uzyskaną rozpiętość kanałów tj. różnicę między największym, a najmniejszym indeksem kanałów używanych w rozwiązaniu bez blokad. Wyniki testów przedstawiono w Tabeli 3.

Tab. 3. Porównanie osiągnięć algorytmu z innymi strategiami heurystycznymi

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Opracowany algorytm	380	425	533	534	220	251	308	309
Algorytm genetyczny [5]	380	426	532	532	220	252	308	308
Sieć Hopfielda [7]	380	-	532	532	220	-	308	308
Algorytm sekwencyjny [8]	380	435	532	532	-	267	-	308

Zaproponowany algorytm oferuje zatem wysoką jakość uzyskiwanych rozwiązań, na poziomie zbliżonym do porównywanych metod rozwiązywania problemów przydziału częstotliwości. Warto podkreślić, że przy tym uzyskanie nowych optymalnych, pod względem rozpiętości kanałów, rozwiązań dla problemów P2 i P6.

6. Wnioski i uwagi końcowe

Przedmiotem rozważań niniejszej pracy był algorytm przydziału częstotliwości radiowych oparty o technikę symulowanego wyżarzania. Opracowana procedura oferuje wysoką efektywność którą zweryfikowano w toku eksperymentów obliczeniowych. Dzięki zastosowaniu prostej, a równocześnie elastycznej strategii przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, możliwe jest łatwe uzupełnienie algorytmu o dodatkowe elementy. Przedmiotem dalszych prac będzie zbadanie wpływu rozważanych metod generowania rozwiązania sąsiedniego na ostateczną wartość funkcji kosztu, użycie wyspecjalizowanych schematów zmian temperatury wyżarzania i wreszcie, przetestowanie opracowanego algorytmu dla instancji FAP zdefiniowanym w zbiorze testowym CELAR [1].

Podziękowania

Eksperymenty obliczeniowe związane z niniejszą pracą wykonano na klastrach Instytutu Informatyki Politechniki Krakowskiej oraz Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk.

7. Literatura

1. Aardal K.I., van Hoesel S.P.M., Koster A.M.C.A., Mannino C., Sassano A.: Models and solution techniques for frequency assignment problems. *Annals of Operations Research*, 153, Nr. 1, 2007, ss.79-129.
2. Sait S.M., Youssef H.: *Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering: Solving Combinatorial Optimization Problems*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1999.
3. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P.: Optimization by Simulated Annealing. *Science, New Series*, 220, Nr. 4598, 1983, ss. 671-680.
4. Kubale M. (red.): *Optymalizacja dyskretna. Modele i metody kolorowania grafów*, WNT, Warszawa, 2002.
5. Beckmann D., Killat U.: A New Strategy for the Application of Genetic Algorithms to the Channel-Assignment Problem. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 48, Nr. 4, 1999, ss. 1261-1269.
6. Anderson L.G.: A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system. *IEEE Transactions On Communications*, 21, Nr. 11, 1973, ss. 1294-1301.
7. Kim J.S., Park S.H., Dowd P.W., Nasrabadi N.M.: Cellular radio channel assignment using a modified Hopfield network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46, 1997, ss. 957–967.
8. Sung C.W., Wong W.S.: Sequential packing algorithm for channel assignment under cochannel and adjacent-channel interference constraint. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46, 1997, pp. 676–686.

RADIO FREQUENCY ASSIGNMENT USING SIMULATED ANNEALING

Summary

Modern communications networks more and more frequently employ methods of wireless radio transmission. They enable the reduction of costs associated with construction of network infrastructure. Growing efficiency of wireless connections allow its application in the cases where high performance of information transmission is required. Bandwidth consisting of usable radio frequency is limited however. Therefore it is important to use it effectively while guaranteeing non-interfering data flow at the same time. The subject of this paper is the algorithm of frequency assignment based on metaheuristic of simulated annealing. It ensures the minimization of blocked connections in the network with cellular structure which occur as a result of interference. The performance of proposed algorithm was verified in computer simulations. Obtained results prove its high efficiency, also when it is referenced to the performance of existing heuristic techniques used for frequency assignment.

Keywords: simulated annealing, radio frequency assignment, mobile telephony, metaheuristics.

SZYMON ŁUKASIK¹, MATEUSZ WICHA², PIOTR KULCZYCKI¹

¹Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk

²Katedra Automatyki i Technik Informatycznych, Politechnika Krakowska

e-mail: slukasik@ibspan.waw.pl

<http://www.ibspan.waw.pl/~slukasik>