

Arkadiusz DOBRZYCKI\*  
Krzysztof SKÓRCZ\*  
Andrzej TOMCZEWSKI\*

## ZASTOSOWANIE METODY MONTE CARLO DO MINIMALIZACJI LICZBY ŹRÓDEŁ SYGNAŁU W SIECIACH 802.11

W artykule przedstawiono algorytm optymalizacji liczby i rozmieszczenia punktów dostępowych sieci bezprzewodowej pracującej w standardzie 802.11 w obiekcie budowlanym. Omówiono podstawy ustalania poziomu sygnału w obszarze oddziaływania sieci 802.11 z zastosowaniem wytycznych zawartych w zaleceniu ITU-R P.1238-6. Do praktycznej realizacji zadania wykorzystano stochastyczną metodę Monte Carlo. Na podstawie opracowanego algorytmu w języku C# zaimplementowano aplikację umożliwiającą definiowanie geometrii i parametrów materiałowych obiektu oraz minimalizację przyjętej funkcji celu.

### 1. WPROWADZENIE

W społeczeństwie informacyjnym istnieje wysokie zapotrzebowanie na nieograniczony czasem i miejscem dostęp do danych. Powoduje to poszukiwanie nowych oraz rozwój istniejących technologii teleinformatycznych, szczególnie w obszarze technik bezprzewodowych. Jedną ze stosowanych, ale jednocześnie intensywnie rozwijanych technologii są sieci radiowe pracujące w standardzie 802.11. Jego ewolucja doprowadziła do kilkusetkrotnego zwiększenia przepływności dla wersji 802.11n w stosunku do pierwszej specyfikacji 802.11, dla której parametr ten wynosił 1 Mb/s. Przyczyniło się do tego wykorzystanie wielu technologii, a w tym modulacji cyfrowej z ortogonalnym rozpraszaniem widma OFDM (ang. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) oraz jednoczesne wykorzystanie wielu anten nadawczych i odbiorczych MIMO (ang. Multiple Input Multiple Output) pozwalające uwzględnić wielodrogowość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej. Właściwości fizyczne materiałów jakie napotyka propagujący sygnał powodują znaczne straty i skutkują ograniczeniem zasięgu transmisji. W przypadku wolnej przestrzeni spadek poziomu sygnału jest na tyle niewielki, że wg standardu 802.11n dla anten bezprzewodowych kart

---

\* Politechnika Poznańska.

sieciowych osiągnięty zasięg wynosi do 250 metrów. Model matematyczny jaki uwzględniany jest w tym wypadku pozwala szybko ocenić poziom sygnału i ewentualne warunki wymagane do poprawnej transmisji danych. Inna sytuacja występuje w przypadku wewnątrz budynków, w których elementy konstrukcyjne (ściany, stropy, przegrody budowlane) prowadzą do szczególnie silnego tłumienia promieniowania elektromagnetycznego i ograniczenia zasięgu sieci [1, 2, 5].

## 2. STANDARD SIECI RADIOWYCH 802.11

### 2.1. Ogólna charakterystyka standardu 802.11

Dokumentami określającymi parametry sprzętowe i programowe komputerowych sieci bezprzewodowych jest zbiór standardów 802.11. Zawarto w nich między innymi wartości parametrów transmisyjnych jakie muszą spełniać stosowane urządzenia. Takie rozwiązanie pozwala w szybki sposób ocenić zaawansowanie technologiczne sprzętu. Różnice pomiędzy standardami dotyczą częstotliwości pracy sieci (2,4 lub 5 GHz), mocy nadajników (10 lub 20 dBm) oraz maksymalnej prędkości i teoretycznego zasięgu sieci. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie parametrów standardów sieci radiowych. W zestawieniu tym brakuje standardu 802.11ac, gdyż jak dotychczas istnieje niewiele tego typu urządzeń, a sam standard jest nadal w fazie projektu. Zakładane parametry są szczególnie interesujące w obszarze maksymalnej przepustowości, która ma wynosić 1.3 Gbps [4].

Tabela 1. Podstawowe parametry sieci radiowych standardu 802.11

Standard	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Zasięg wewnątrz / na zewnątrz [m]	20/100	35/120	38/140	38/140	70/250
Maksymalna prędkość transmisji [Mbit/s]	2	54	11	54	600
Częstotliwość [GHz]	2,4	5	2,4	2,4	2,4/5
Maksymalna moc nadajnika [mW]	1000	1000	100	100	100/1000
Typ modulacji	FHSS, DSSS, IR	OFDM	HR-DSSS, CCK	HR-DSSS, CCK, OFDM	OFDM

Bez względu na stosowany standard pracy sieci bezprzewodowej jej przepustowość uzależniona jest od mocy sygnału, przy czym kluczowym parametrem nie jest moc nadajnika, a moc sygnału na wejściu odbiornika. Producenci urządzeń podają, z reguły w formie tabelarycznej, zależność pomiędzy przepustowością a poziomem sygnału na wejściu określonego typu i modelu urządzenia odbiorczego [5].

## 2.2. Metoda ustalania poziomu sygnału we wnętrzach

Zgodnie z przedstawionymi w zaleceniu ITU-R P.1238-6 zapisami przy projektowaniu sieci bezprzewodowych mających pracować wewnątrz budynków, należy stosować model propagacyjny. Można w nim wyróżnić trzy podstawowe przypadki rozchodzenia się fali elektromagnetycznej, wpływające bezpośrednio na zasięg sieci [1, 2, 5]:

- w planowanym zasięgu sieci jedynym czynnikiem tłumiącym jest powietrze (nie występują przeszkody o większych tłumiennościach),
- sygnał na swej drodze napotyka przeszkody o wielokrotnie większych tłumiennościach od powietrza takie jak: ściany, przegrody, filary itp. (bez stropów),
- planowana sieć będzie obejmować kilka kondygnacji, a sygnał będzie musiał przechodzić przez stropy.

Ustalenie strat sygnału wewnątrz budynku w odległości  $d$  od nadajnika, zgodnie z podstawowym modelem propagacyjnym zalecanym przez organizację ITU (International Telecommunication Union) [1], odbywa się przy uproszczonym uwzględnieniu dwóch ostatnich z wymienionych powyżej przypadków. Wówczas zależność, na podstawie której obliczane są całkowite straty sygnału ma postać:

$$L_{\text{total}} = 20 \cdot \lg(f) + N \cdot \lg(d) + L_f(n) - 28 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość sygnału [MHz],  $N$  – odległościowy współczynnik tłumienia,  $d$  – odległość między nadajnikiem i odbiornikiem (większa od 1 m) [m],  $L_f$  – wskaźnik zależny od liczby stropów przez które przechodzi sygnał.

Współczynniki  $N$  oraz  $L_f$  wyznaczone są eksperymentalnie a ich wartości podawane są w tablicach (przyjęte wartości zależą od rodzaju materiałów z jakich typowo wykonuje się budynki o określonym przeznaczeniu i od częstotliwości sygnału). Przy czym rekomendacja wyróżnia zastosowania: mieszkalne, biurowe, handlowe.

Model podany zależnością (1) ma charakter empiryczny i w sposób uśredniony uwzględnia elementy wewnętrzne budynków (ściany, słupy, stropy itp.) tłumiące falę elektromagnetyczną o częstotliwościach stosowanych w standardzie 802.11. Wnętrza, w których w praktyce wykorzystywane są sieci bezprzewodowe, to bardzo często złożone obiekty budowlane z wieloma przegrodami wykonanymi z różnych materiałów i o różnych grubościach. Skutkuje to zróżnicowanymi wartościami tłumienia sygnału radiowego w różnych obszarach obiektu. W związku z powyższym w wykorzystywanym zaleceniu podano również zależności pozwalające w sposób dokładniejszy jak pozwala na to zależność (1) wyznaczyć straty przy przejściu sygnału przez pionowe przeszkody (ściany). W tym przypadku uwzględniane są konduktywność  $\sigma$  oraz przenikalność elektryczna materiału  $\epsilon_i$ , a także długość przebytej przez falę drogi. W rozpatrywanym zaleceniu zamieszczono opis przybliżonego sposobu ustalania wymienionych parametrów materiałowych zależnie od częstotliwości transmitowanego sygnału.

Zgodnie z zaleceniami strata sygnału wyznaczana jest jako suma strat cząstkowych na wszystkich przeszkodach oraz w wolnej przestrzeni. Uwzględniając przejście sygnału przez  $M$  ścian opisanych zależnościami materiałowymi,  $n$  stropów oraz rozprzestrzenianie się fali w wolnej przestrzeni całkowite straty sygnału na drodze nadajnik – punkt obliczeniowy mogą zostać opisane zależnością [1]:

$$L'_{\text{total}} = 20 \cdot \lg(f) + \sum_{k=1}^M 1636 \cdot \left( \frac{\sigma^{(k)}(f)}{\varepsilon_i^{(k)}(f)} \right) \cdot d^{(k)} + L_f(n) - 28 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – indeks ściany,  $d^{(k)}$  – droga jaką przebywa fala przechodząc przez ścianę o indeksie  $k$ ,  $\sigma^{(k)}$  – konduktywność materiału ściany o indeksie  $k$ ,  $\varepsilon_i^{(k)}$  – przenikalność elektryczna materiału ściany o indeksie  $k$ .

### 3. MINIMALIZACJA LICZBY PUNKTÓW DOSTĘPOWYCH

#### 3.1. Deterministyczne a stochastyczne metody optymalizacji

Proces optymalizacji polega na poszukiwaniu rozwiązania, które spełnia warunek ekstremum przyjętego kryterium oceny jakości zwanego funkcją celu. W przypadku optymalizacji układów elektrycznych stosowane mogą być zróżnicowane kryteria zawierające wskaźniki techniczne związane bezpośrednio z analizowanym zadaniem lub ekonomiczne (często koszty) związane z układem w sposób pośredni (np. ceny materiałów, produkcji, projektu itp.). Większość tego typu zadań obejmujących układy techniczne rozwiązywanych jest z zastosowaniem algorytmów optymalizacyjnych z ograniczeniami. Wynika to z braku technicznych możliwości realizacji pewnych rozwiązań, co związane jest z dostępnymi aktualnie technologiami, materiałami oraz maszynami wykorzystywanymi w procesie produkcji.

Odpowiednie wykorzystanie metod optymalizacyjnych w zagadnieniach technicznych pozwala osiągnąć znaczną poprawę parametrów użytkowych analizowanych układów, obniżyć koszty ich wytworzenia i eksploatacji, podwyższyć trwałość itp., w stosunku do układów nieoptymalnych, chociaż technicznie poprawnych (spełnione wymagania normatywne, zalecenia itp.). Zastosowanie w tym celu metod deterministycznych pozwala osiągnąć wysoką dokładność i powtarzalność rozwiązań, dotyczy jednak zadań opisanych analitycznie, zdefiniowanych w jednomodalnej przestrzeni poszukiwań oraz o ograniczonej liczbie zmiennych decyzyjnych. Tak ograniczone warunki stosowalności powodują, że coraz częściej wykorzystywane są algorytmy stochastyczne (Monte Carlo, wspinaczkowe, symulowanego wyżarzania, populacyjne i inne) umożliwiające rozwiązanie zadań optymalizacji globalnej, ze zmiennymi o zróżnicowanych typach (całkowite, logiczne, rzeczywiste) i ich liczbą ustalaną w setkach. Wady wymienionej grupy metod w postaci obniżenia jakości rozwiązań w stosunku do wartości dokładnej oraz problemów z ich

powtarzalnością nie stanowią w większości zastosowań inżynierskich przeszkody w wykorzystaniu. Zwiększenie praktycznego stosowania metod stochastycznych związane jest także z uzyskaniem wysokiej mocy obliczeniowej procesorów dedykowanych dla komputerów osobistych (procesory wielordzeniowe) oraz skutecznością wymienionej grupy algorytmów w przypadku optymalizacji szczególnie złożonych układów technicznych.

Każda metoda, w której do rozwiązania zadania wykorzystywane są elementy liczb losowych (w systemach komputerowych najczęściej pseudolosowych) należy do grupy metod Monte Carlo (MC) [6]. Przyjmując, że przez  $S$  oznaczone jest rozwiązanie analizowanego problemu (pojedyncza liczba, zbiór wartości) oszacowanie wyniku z zastosowaniem metody MC opisywane jest zależnością:

$$\hat{S} = f(\{r_1, r_2, \dots, r_n\}, \dots) \quad (3)$$

gdzie:  $r_1, r_2, \dots, r_n$  - jest zbiorem liczb losowych (pseudolosowych) wykorzystanych w realizowanych obliczeniach.

W związku ze stochastycznym charakterem realizowanych operacji w miejsce wartości dokładnej ustalana jest wartość oczekiwana  $E(S)$ , która reprezentowana jest przez całkę  $I$  o postaci:

$$I = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (4)$$

Taka postać metody pozwala algorytm stosować w różnych obszarach obliczeniowych, z czego najważniejszymi są: rozwiązywanie układów równań liniowych, różniczkowych, całkowych, całkowanie funkcji wielu zmiennych, symulacje w teorii gier, samodzielny algorytm optymalizacyjny oraz składowa innych stochastycznych metod optymalizacyjnych tzw. heurystyk i metaheurystyk. Metoda Monte Carlo ze względu na stochastyczny charakter nadaje się do rozwiązywania zadań wielomodalnych, należy jednak pamiętać, że podniesienie dokładności rozwiązań wiąże się ze zwiększeniem liczby losowań, a często również modyfikacją procedur obliczeniowych stosowanych w obszarze ustalania wartości funkcji celu i skutkuje znacznym wydłużeniem globalnego czasu realizacji zadań.

### **3.2. Cel, kryterium i charakterystyka optymalizacji liczby i rozmieszczenia punktów dostępowych we wnętrzu**

W referacie podjęto tematykę optymalizacji liczby i rozmieszczenia punktów dostępowych wewnątrz zdefiniowanego obiektu budowlanego (znane są jego parametry konstrukcyjne: geometria, wewnętrzne podziały, materiały itp.). Założono, że kryterium oceny jakości rozwiązania jest minimalna liczba oraz sposób rozmieszczenia punktów dostępowych pozwalające na uzyskanie ustalonego, zgodnie z zaleceniem ITU-R P.1238-6, poziomu sygnału wymaganego przy transmisji danych z określoną przepływnością. Dodatkowo, w przypadku

rozwiązań o identycznej liczbie punktów dostępowych, porównywana jest równomierność poziomu sygnału na całej powierzchni użytkowej budynku. Preferowane są rozwiązania o wyższych wartościach równomierności.

Do realizacji algorytmu optymalizacyjnego zastosowano klasyczną metodę Monte Carlo z liczbą losowań zależną od wielkości i stopnia złożoności struktury geometrycznej i fizycznej analizowanego obiektu. Metoda MC pozwala na przeszukiwanie wielomodalnej przestrzeni rozwiązań, a więc nie dopuszcza do utknięcia algorytmu w obszarze przyciągania ekstremum lokalnego, pod warunkiem wykonania odpowiednio dużej liczby losowań. Dla każdego losowania wykonywana jest, zgodnie z modelem podanym zależnością (2), analiza rozkładu poziomu sygnału. Obliczenia prowadzone są w punkcie środkowym elementarnego sześciangu wydzielonego poprzez węzły siatki ustalonej dla kierunków  $x$ ,  $y$  i  $z$ , przy ogólnym założeniu, że odległości między węzłami wynoszą od 0.5 m do 1.5 m. Tak ustalona wartość kroku siatki gwarantuje wystarczającą, ze względów technicznych, dokładność, a zastosowanie szybkich procesorów wielordzeniowych skraca czas obliczeń do poziomu akceptowalnego przez użytkownika (1-15 min. zależnie od geometrii obiektu oraz liczby punktów dostępowych).

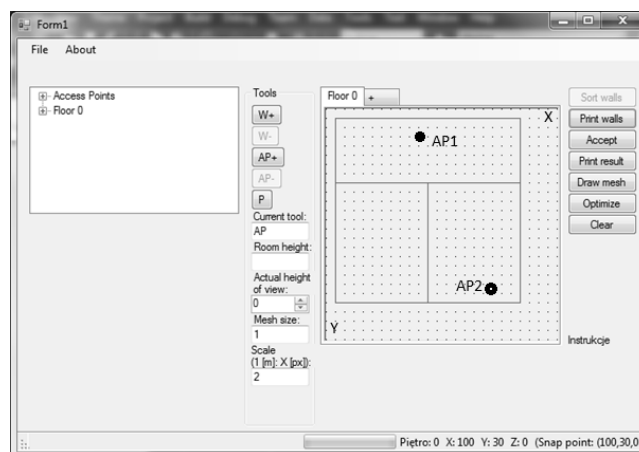
W trakcie realizowanej analizy założono, że podlegające rozmieszczeniu punkty dostępne mają identyczne parametry techniczne we wszystkich prowadzonych losowaniach. Do obliczeń wykorzystano dane punktu dostępowego typu TL-WA801ND [3]. Algorytm zakłada jednakową moc wyjściową nadajnika oraz izotropową charakterystykę zewnętrzną zastosowanych anten. Wylosowane położenia punktu dostępowego określają numery węzłów siatki. Dodatkowo, celem uproszczenia analizy przyjęto stałe w czasie parametry pracy nadajnika oraz brak wpływu sąsiednich sieci typu radiowego.

### **3.3. Implementacja informatyczna systemu optymalizacyjnego, przykładowe wyniki obliczeń**

Na podstawie przedstawionego powyżej algorytmu optymalizacyjnego oraz modelu propagacyjnego podanego zależnością (2) opracowano aplikację przeznaczoną do:

- wprowadzenia geometrii wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego,
- ustalenie położenia i materiału wewnętrznych przegród budowlanych (ściany, słupy itp.),
- rozmieszczenia punktów dostępowych sieci 802.11,
- wyznaczenia rozkładu poziomu sygnału na założonej wysokości poszczególnych kondygnacji obiektu,
- optymalizacji (algorytm Monte Carlo) liczby i sposobu rozmieszczenia punktów dostępowych.

Jej implementację zrealizowano w języku C# z wykorzystaniem możliwości technologicznych udostępnionych przez platformę .NET, a szczególnie poprzez wykorzystanie techniki programowania zorientowanego obiektowo oraz zasobów biblioteki .NET Framework. Do utworzenia struktury aplikacji zaprojektowano zbiór specjalizowanych klas oraz wykorzystano dostępne w bibliotekach platformy kontrolki, struktury, klasy, interfejsy i typy wyliczeniowe, a także mechanizmy przeznaczone do zrównoleglenia realizacji wydzielonych procesów (klasy *Theard* i *BackgroundWorker*) [7]. Ostatnie z wymienionych elementów programowych wykorzystano do uruchomienia obliczeń rozkładu poziomu sygnału w wątku pobocznym oraz do synchronizacji informacji o ich postępie z zastosowaniem kontrolek formularza głównego aplikacji (obsługa przez wątek główny). W obszarze przechowywania danych i wyników zastosowano obiekty klasy listy generycznej *Dictionary* umożliwiającej przechowywanie par obiektów  $\langle \text{Model}, \text{Calculator} \rangle$ , gdzie *Model* reprezentuje model budynku, natomiast *Calculator* zawiera większość mechanizmów obliczeniowych [7]. Na rysunku 1 przedstawiono interfejs graficzny opracowanej aplikacji.



Rys. 1. Interfejs opracowanej aplikacji z zaznaczonymi punktami dostępowymi po realizacji procesu optymalizacyjnego

Z wykorzystaniem opracowanej aplikacji przeprowadzono przykładowy proces optymalizacji liczby i rozmieszczenia punktów dostępowych we wnętrzu jednopiętrowego budynku typu biurowego o wymiarach 100x100 metrów i wysokości 2.7 m. Przyjęto, że węzły siatki obliczeniowej rozmieszczone są z krokiem 1 metra w kierunku składowej x i y, natomiast 0.9 metra dla składowej z. Ściany budynku wykonano z betonu. Przyjęto warunek utrzymania poprawnej transmisji z prędkością 6 Mbps, co dla zastosowanego typu punktu dostępowego wymaga uzyskania strat sygnału na poziomie nie wyższym od 88 dB.

Na rysunku 1 przedstawiono zrzut graficzny okna opracowanej aplikacji ze skonfigurowaną geometrią i zaznaczonymi (czarne punkty z opisami AP1 i AP2) zoptymalizowanymi współrzędnymi rozmieszczenia punktów dostępowych. Przy rozłożeniu źródeł sygnału zgodnym z rysunkiem w każdym z węzłów zastosowanej siatki dyskretyzacyjnej spełniony został założony warunek dopuszczalnych strat sygnału. Jednocześnie wybrane rozwiązanie gwarantuje najniższą liczbę punktów dostępowych (dwa) oraz najlepszy poziom równomierności sygnału wewnątrz całego budynku.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wyznaczenie liczby i sposobu rozmieszczenia punktów dostępowych w obiektach budowlanych jest zagadnieniem istotnym z punktu widzenia coraz wyższych wymagań użytkowników odnośnie zasięgu oraz dostępnej przepływności bezprzewodowej transmisji danych. Rozmieszczenie źródeł gwarantujące spełnienie wymagań dotyczących nieprzerwanej transmisji z założoną przepływnością możliwe jest z zastosowaniem metody wykorzystującej proces optymalizacji. Do zadań numerycznych jakie wymagane są do prawidłowej realizacji wymienionego zadania należą obliczenia rozkładu poziomu sygnału na powierzchni użytkowej analizowanego obiektu. Przyjęcie najprostszej postaci modelu propagacyjnego jaki zamieszczono w zaleceniu ITU-R P.1238-6, nie gwarantuje wystarczająco dokładnych wyników, szczególnie w przypadku obiektów o złożonej geometrii wewnętrznych elementów konstrukcyjnych oraz zróżnicowania materiałowego. W realizowanej pracy uwzględniono zatem grubość oraz materiał pionowych elementów konstrukcyjnych budynku, co istotnie wpływa na ustalenie wartości rzeczywistego zasięgu sieci radiowej.

Opracowany algorytm i jego komputerowa implementacja doprowadziły do uzyskania założonego poziomu i równomierności sygnału, przy minimalnej liczbie rozmieszczonych punktów dostępowych. Wzajemne ich położenie wynika z geometrii, grubości i materiałów wewnętrznych elementów konstrukcyjnych, na których następuje skokowa zmiana poziomu sygnału. Analizując inne aspekty przeprowadzonych obliczeń testowych należy zwrócić uwagę na obniżenie kosztów zakupu sprzętu sieciowego w stosunku do rozwiązań nieoptymalnych spełniających wszystkie założone warunki.

Dalsze prace w zaprezentowanym temacie powinny dotyczyć:

- rozbudowy algorytmu obliczeń poziomu sygnału w zakresie uwzględnienia stochastycznych zmian mocy nadajników w czasie,
- uwzględnienia wskaźników ekonomicznych w funkcji celu,
- uwzględnienia wpływu dodatkowych (zakłócających) sygnałów radiowych np. pracujących w pobliżu innych sieci typu radiowego,



- poprawy jakości wyników procesu optymalizacyjnego poprzez modyfikację zastosowanego algorytmu Monte Carlo lub jego zmianę na jedną z metod populacyjnych,
- zrównoleglenia algorytmu optymalizacyjnego z zastosowaniem odpowiednich technik programowych (np. elementy biblioteki TPL - ang. Task Parallel Library) oraz procesorów wielordzeniowych w celu skrócenia czasu analizy numerycznej.

### LITERATURA

- [1] Recommendation ITU-R P.1238.6, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz.
- [2] Katulski R., Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej, WKŁ, Warszawa, 2009.
- [3] Dokumentacja punktu dostępowego: 300Mbps Wireless N Access Point TL-WA801ND (producent TP Link).
- [4] 802.11n IEEE Standard for Information technology.
- [5] Dobrzycki A., Zasięg sieci bezprzewodowej w obiektach budowlanych, Proceedings of XVI Scientific Conference Computer Applications in Electrical Engineering, Poznań, kwiecień 2011, ss. 299-300.
- [6] Zieliński R., Neumann P., Stochastyczne metody poszukiwania minimum funkcji, WNT, Warszawa, 1986.
- [7] Perry S. C., C# I .NET, Wydawnictwo, Gliwice, 2006.

#### USING THE MONTE CARLO METHOD TO MINIMIZE NUMBER OF SIGNAL SOURCES IN 802.11 NETWORKS

This paper presents an algorithm for optimizing the number and distribution of wireless access points in 802.11 in buildings. Were discussed basis for determining the signal level in the area of 802.11 reacting with the guidelines contained in Recommendation ITU-R P.1238-6. For the practical realization of the tasks were used stochastic Monte Carlo method. On the basis of the algorithm an application was implemented. It was developed in C # language and enables to define the geometry and material parameters of the facility to minimize the objective function adopted.