

Wyznaczanie rozkładu tłumienia fal radiowych w środowisku miejskim metodą wystrzału wiązek

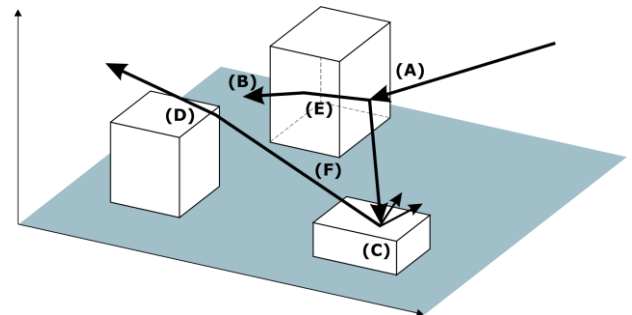
Streszczenie: W artykule przedstawiono opis deterministycznej metody wyznaczenia rozkładu tłumienia fal radiowych wykorzystującą metodę wystrzału wiązek opracowaną dla obszarów zurbanizowanych, gdzie modele zabudowy reprezentowane są w przestrzeni 2.5D. Opisano algorytm generowania, śledzenia oraz detekcji wiązek i jego implementację. Zamieszczono przykładowe uzyskane wyniki reprezentujące przestrzenny rozkład odebranego poziomu mocy wraz z charakterystykami czasowymi.

1. WSTĘP

Obecnie zauważalny wzrost transmisji danych [1] w telekomunikacyjnych sieciach bezprzewodowych powoduje podjęcie działań mających na celu zapewnienie użytkownikom odpowiedniej szybkości transmisji w radiowych sieciach dostępowych, czego skutkiem jest ciągły rozwój i wdrożenia nowych generacji systemów radiokomunikacyjnych [2], a także wprowadzanie nowych architektur takich jak sieci hierarchiczne (heterogeniczne) [3]. Tym samym w sieciach mobilnych dąży się do zwiększenia pojemności sieci poprzez wprowadzanie komórek o mniejszych wymiarach określanych jako macro-, pico-, femto-komórki [3]. Trend ten dotyczy przede wszystkim obszarów zurbanizowanych, w których gęstość zaludnienia jest wysoka, co wymaga zapewnienia wystarczająco dużej pojemności sieci. Jest to przesłanka, aby w czasie planowania sieci radiowych dysponować modelami propagacyjnymi, których stosowanie pozwoli na otrzymanie jak najbardziej wiarygodnych wyników. Wyniki te powinny przedstawiać poziom mocy odebranej w określonej lokalizacji, oraz charakterystyki czasowe obserwowanego sygnału, pozwalając tym samym na skuteczne planowanie sieci radiowych.

Znane i stosowane metody propagacyjne [4] [5] [6] [7] pozwalające na wyznaczenie tłumienia sygnału nie uwzględniają danych o zabudowie. Modele które je uwzględniają np. [8][9] wykorzystują te dane przede wszystkim do wprowadzania poprawek wynikających z tłumienia dyfrakcyjnego albo z empirycznie wyznaczonego wpływu rodzaju pokrycia terenu jak to ma miejsce w modelu Haty. Modele empiryczne powszechnie stosowane w symulacjach zasięgowych ponadto nie uwzględniają przy wyznaczaniu tłumienia sygnału w miejscu odbioru deterministycznego wpływu zjawisk fizycznych wpływających na propagację fal radiowych. Na rysunku 1 przedstawiono zjawiska jakie mogą wpływać na poziom sygnału w punkcie odbioru: odbicie (A), refrakcja (B), rozproszenie (C), dyfrakcja (D), absorpcja (E), depolaryzacja (F). W artykule opisywana jest metoda propagacyjna, która uwzględnia zjawiska absorpcji i odbicia oraz

przez tłumienie wolnej przestrzeni. Korzystając z dokładnego śledzenia wiązek jakie umożliwia opracowana metoda wyznaczono na ich podstawie końcową wartość rozkładu tłumienia sygnału oraz umożliwiono podgląd czasu propagacji między nadajnikiem a odbiornikiem oraz wyznaczenie wartości rozmycia opóźnienia sygnału.



Rys. 1. Zjawiska fizyczne wpływające na propagację fal radiowych w terenie miejskim.

Warto podkreślić obecny wzrost powszechności cyfrowych modeli zabudowy miejskiej (2.5D, 3D) stworzonych przez podmioty publiczne oraz przedsiębiorstwa, a także możliwość wykorzystania wydajnych stacji roboczych, serwerów obliczeniowych oraz serwerów danych, co umożliwia implementację algorytmów modelujących zjawiska propagacyjne w akceptowalnym i przewidywalnym czasie z oczekiwaną rozdzielczością.

W artykule opisano implementację opracowanej przez autora deterministycznej metody propagacyjnej wykorzystującej mechanizm wystrzału wiązek. Artykuł powstał w oparciu o pracę [10]. W kolejnych rozdziałach przedstawiono: metodę wystrzału wiązek (rozdział 2), metodę generowania wiązek (rozdział 3), śledzenie wiązek (rozdział 4), wyznaczenie tłumienia fal radiowych (rozdział 5), wyznaczenie charakterystyk czasowych (rozdział 6) oraz podsumowanie (rozdział 7).

2. METODA WYSTRZAŁU WIĄZEK

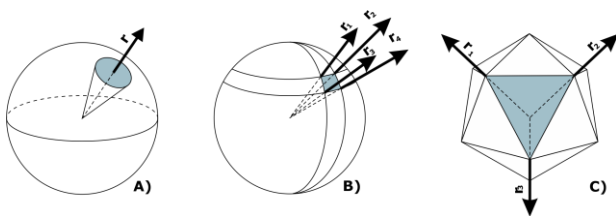
Opracowanie opisywanego algorytmu jest pewną modyfikacją metody wystrzeliania promieni przedstawioną m.in w [11][12] polegająca na generowaniu równomiernie rozchodzących się promieni z określonego punktu, którym pierwotnie jest lokalizacja anteny nadawczej. Wystrzelianie promieni opisane jest przez kierunek i zwrot oraz porcję mocy odwrotnie proporcjonalną do łącznej ich liczby. Każdy z promieni jest śle-

dzony i jednostkowo wykorzystywany przy obliczeniach związanych z poszczególnymi zjawiskami rozchodzenia się fal radiowych. Technika ta znana jest jako algorytm SBR (*Shooting-and-Bouncing Ray*). Wykorzystanie wystrzeliwania promieni wymusza wygenerowanie dostatecznie dużej ich liczby, aby w czasie symulacji nie została pominięta żadna modelowana przeszkoda. Ze względu na dobranie nieodpowiedniego kąta bryłowego pomiędzy poszczególnymi promieniami może dojść do pominięcia przeszkód - znanego jako *aliasing*.

Opisywana implementacja rozszerza mechanizm generowania promieni tak, by zostały one zamienione przez generowanie i śledzenie wiązek, co określane jest jako technika wystrzału wiązek (*beams launching*) [13][14][15]. W przeciwieństwie do promieni posiadają one wymiar przestrzenny co może przyczynić się do redukcji liczby nieuwzględnionych modelowanych przeszkód będących w obszarze analizy. W opisywanej implementacji przyjęto kształt wiązki będącej geometrycznym odzwierciedleniem ostrosłupa. Wierzchołek każdego ostrosłupa (wiązki) pierwotnie znajduje się w miejscu lokalizacji anteny nadawczej.

3. GENEROWANIE WIĄZEK

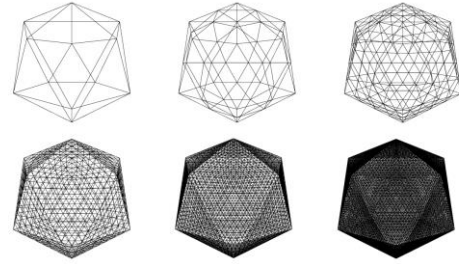
Dla zachowania warunków bilansu energetycznego oraz równomiernego rozłożenia mocy promieniowanej przez antenę nadawczą należy we wstępnym etapie analizy wyznaczyć taki rozkład wiązek, aby można było je traktować jako równo odległe we wszystkich wymiarach. Można założyć taką implementację, która będzie wykorzystywała wiązki opisane jako stożki (*cones*) lub ostrosłupy [16] (rysunek 2). Te pierwsze nie pozwalają na pełne pokrycie (wypełnienie) obszaru, ze względu na okrągły kształt czoła modelowanej fali. Stosując ostrosłupy istnieje pewna swoboda zarówno w doborze liczby ścian, jak i algorytmie ich generowania. Zastosowanie jednego z pięciu znanych wielościanów foremnych, którego krawędzie można opisać przez równoodległe półproste zapewnia ich równomierne rozłożenie przestrzenne [11][17][18]. W opisywanej implementacji wykorzystano dwudziestościan foremny (ikosaedr), którego rzut wraz z krawędziami r_1 - r_3 został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Wiązki tworzone na bazie stożka (a), dobrania stałego kąta elewacji i azymutu (b), użycia dwudziestościanu foremnego (c).

W następstwie przyjęcia stosowania większej liczby wiązek niż pierwotne dwadzieścia generowanych za pomocą ikosaedru zastosowano n -krotną teselację [11][18] każdego z nich, co pozwala na uzyskanie większej ich liczby. Teselacja bazuje na podziale danej wiązki na cztery mniejsze, biorąc pod uwagę, że podstawą ostrosłupa (czołem) jest trójkąt równoboczny. Podział

ten wiąże się z wyznaczeniem nowych wierzchołków opisujących czoło nowych wiązek, tak by każdy z nich był równoodległy od środka bryły. Rysunek 3 przedstawia przestrzenne rzuty kolejnych podziałów ikosaedru.

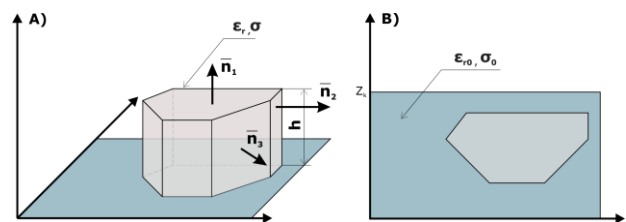


Rys. 3. Kolejne teselacje (od $n = 0$ do $n = 5$) dwudziestościanu foremnego [10].

Zaprezentowany powyżej podział obrazuje położenie wierzchołków bryły po kolejnym podziale każdej ze ścian. Docelowo każdy z nich w kolejnym etapie zostaje przesunięty liniowo, tak by każdy z nich był oddalony o tą samą odległość od środka bryły.

4. ŚLEDZENIE WIĄZEK

Każda z wygenerowanych wiązek poddawana jest śledzeniu i testowi przecięć czy na jej drodze znajduje się przeszkoda. Przeszkodami są wielościany reprezentujące grunt oraz zabudowa miejska tj. zbiór pojedynczych modeli budynków. Każdy budynek opisany jest przez wielokąt, stanowiące jego podstawę, oraz ściany o danej wysokości względnej. Tym samym śledzenie wiązek odbywa się w przestrzeni określonej jako 2.5D. Na tej podstawie generowany jest sumaryczny zbiór ścian i podstaw dla każdego budynku, opisany w implementacji przez wierzchołki, płaszczyzny i wektory normalne (rysunek 4) definiujący strony ścian (wewnętrzne i zewnętrzne). Przyjęto, że od ścian wewnętrznych nie następuje odbicie wiązki. Dodatkowo każdy budynek opisany jest przez względną przenikalność elektryczną ϵ_r i konduktywność σ . Te parametry fizyczne wykorzystywane są do wyznaczania współczynnika odbicia.



Rys. 4. Modelowany budynek. Rzut przestrzenny (a) przekrój (b).

Dla każdej wiązki wykonywane są testy kolizji z przeszkodami. Jeżeli wiązka całą swoim czołem przecina tylko jedną ścianę następuje odbicie biorąc pod uwagę wyznaczony współczynnik odbicia na podstawie kąta padania i zespolonej przenikalności elektrycznej zdefiniowanej przez zależność (1), gdzie λ jest długością fali. Odbiciu również towarzyszy przejście fali przez budynek. Wartość tłumienia w budynku zdefiniowany jest jako parametr wejściowy

$$\varepsilon_{rp} = \varepsilon - j60\lambda \quad (1)$$

W przypadku gdy kolizja czoła fali następuje z większą liczbą ścian (tego samego lub różnych budynków) następuje teselacja fali lub zaprzestanie jej śledzenia. Mechanizm ten bezpośrednio pozwala zwiększyć dokładność obliczeń. W celu ograniczenia czasu symulacji oraz wariantowania dokładności wyników, jako parametry wejściowe analizy podawana jest dopuszczalna liczba odbić, podziałów na krawędziach oraz penetracji budynków każdej wiązki.

5. TLUMIENIE FAL RADIOWYCH

Zbiór wszystkich N wiązek reprezentuje całkowitą moc P promieniowaną przez izotropową antenę nadawczą. Jednej wiązce przypisana jest proporcjonalna moc P_i zgodnie z wzorem (2).

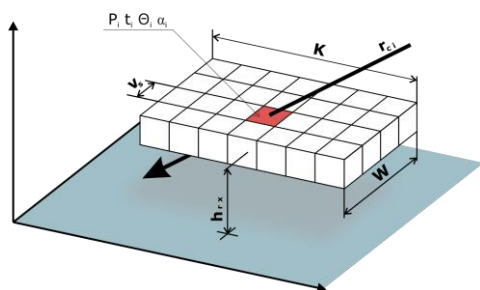
$$P_i = S \sum_i \frac{A}{N} \quad (2)$$

Gdzie S jest powierzchniową gęstością mocy wokół anteny, a stosunek A/N elementarną powierzchnią reprezentowaną przez daną wiązkę. Moc reprezentowana przez daną wiązkę śledzoną algorytmem SBR poddawana jest tłumieniu na skutek odbić, przejść przez budynki L_b oraz rozchodzeniu się w wolnej przestrzeni L_f . Łączne straty L i-tej wiązki przedstawione są przez zależności 3:

$$L_i = L_f \prod_n T(\theta_{ji}) \prod_m \Gamma(\theta_{ki}) \prod_n L_b \quad (3)$$

Przy czym T jest współczynnikiem transmisji, a Γ współczynnikiem odbicia. Liczby n, m określają kolejno maksymalną dopuszczalną w analizie liczbę przejść wiązki przez budynek i jej odbicia.

Wynik obliczeń uzyskiwany jest dla odbiornika, którego wysokość zawieszenia anteny nadawczej h definiowana jest jako parametr analizy. Uzyskanie rozkładu przestrzennego wyników umożliwiło zastosowanie płyty detekcyjnej zaproponowanej w [11]. Każdorazowo gdy następuje obsługa śledzenia danej wiązki wykonywany jest test jej kolizji z płytą detekcyjną, określoną jako zbiór uszeregowanych woksli, o szerokości K i długości W . Każdy z woksli jest sześcianem o określonym wymiarze boku v_s dzięki czemu bezpośrednio odpowiada za rozdzielczość prowadzonej analizy. Ułożenie płyty detekcyjnej przedstawiono na rysunku 5.

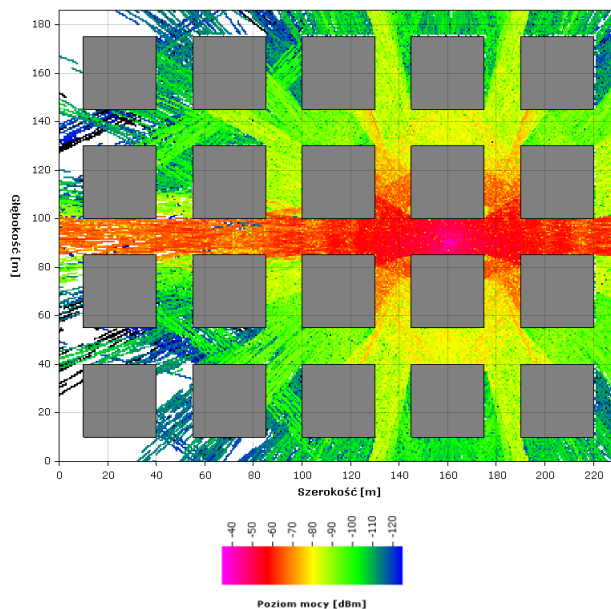


Rys. 5. Płyta detekcyjna zorientowana w przestrzeni.

Wiązka przecinająca woksel pobudza go - na podstawie przecięcia woksła i promienia środkowego wiązki - co wywołuje przypisanie do niego czasu jej nadejścia t_i , kąta nadejścia w płaszczyźnie poziomej α_{Hi} , przesunięcia

fazowego θ_i , oraz poziomu mocy odebranej Pr_i . W opracowanym algorytmie założono model odbiornika wykorzystujący antenę izotropową.

Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą omawianej metody dla teoretycznej zabudowy typu Manhattan (rysunek 6). Podstawowe parametry wejściowe: częstotliwość 500 MHz, moc EIRP 0 dBm, wysokość zawieszenia anteny nadawczej 10 m n.p.t., wysokość zawieszenia anteny odbiorczej 5 m n.p.t.



Rys. 6. Rozkład poziomu mocy odebranej [10].

Uzyskane wyniki przedstawiają rozkład poziomu odebranej mocy uwzględniając maksymalnie 2 odbicia, 2 przejścia przez budynki oraz jedną dodatkową teselację wiązki na krawędziach budynku. Kolor czarny odpowiada wartościom wychodzącym poza zakres legendy. Białe obszary oznaczają brak detekcji wiązki przez płytę detekcyjną wynikający z braku ich wystąpienia lub z powodu niedostatecznego jej podziału - czoło wiązki jest na tyle duże, że przecina kilka woksli, a pobudzony jest tylko ten, który przecina promień środkowy.

6. CHARAKTERYSTYKI CZASOWE

Dla każdej z pośród śledzonych wiązek istnieje możliwość wskazania jej czasu opóźnienia t_i znając łączną długość rozchodzenia się w wolnej przestrzeni d_{fs} oraz łączną długość propagacji w budynkach d_{bk} i jego bezwzględną przenikalność elektryczną (5).

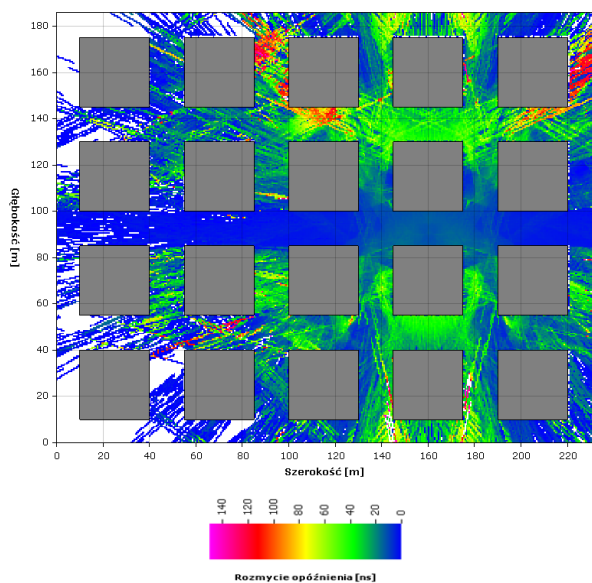
$$t_i = \frac{d_{fs}}{c} + \sum_k \frac{d_{bk} \sqrt{\varepsilon_{t_b}}}{c} \quad (4)$$

Przyjęto, że prędkość propagacji fali w wolnej przestrzeni równa się prędkości światła. Wykorzystując wyznaczony czas propagacji określono rozkład rozmycia opóźnienia τ_{RMS} (5), znając średnioważone opóźnienie sygnału τ_m .

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\tau^{-2} - (\tau_m)^2} \quad (5)$$

Wartość ta pozwala na ocenę wpływu wielodrogowości powstałej na skutek odbić oraz opóźnienia sygnałów wnoszonego m.in. przez ośrodki stratne. Na rysunku 7

przedstawiono rozkład rozmycia opóźnienia dla parametrów analizy jak w rozdziale 5.



Rys. 7. Rozkład rozmycia opóźnienia [10].

Uzyskany rozkład pozwala zaobserwować wzrost wartości czasu rozmycia opóźnienia wraz z większym wpływem wielodrogowości powstałym na skutek odbić. Omawiana implementacja opracowanej metody umożliwia również wygenerowanie rozkładu minimalnego czasu opóźnienia sygnału na określonym obszarze, jednak wynik ten nie wydaje się bardzo istotny z punktu widzenia planowania sieci radiowych.

7. WNIOSKI

W artykule przedstawiono deterministyczną metodę propagacyjną wykorzystującą generowanie i śledzenie wiązek. Rozwój sieci w obszarach zurbanizowanych może wymagać w przyszłości prowadzenia szczegółowych analiz zasięgowych na etapie opracowywania systemów oraz wdrażania. Wydaje się zatem zasadne prowadzenie prac badawczych związanych ze szczegółowym modelowaniem zjawisk propagacyjnych.

Uzyskane wyniki, częściowo przedstawione w artykule, pozwalają na ocenę poprawności implementacji opracowanego algorytmu. Na wyznaczone - omawianą metodą - rozkłady tłumienia fal radiowych oraz opóźnień wpływają parametry wejściowe modelu takie jak m.in. liczba wygenerowanych wiązek, ich wymiar oraz wymiar wokli wchodzących w skład płyty detekcyjnej. Rzutują one na wyliczony poziom mocy odebranej. Naturalnym krokiem wydaje się podjęcie dalszych prac związanych z potwierdzeniem słuszności otrzymanych wyników w drodze pomiarów w rzeczywistym terenie. Istnieje jednak trudność jaką jest stosowanie deterministycznych metod propagacyjnych wynikająca z potrzeby pozyskania danych związanych z parametrami fizycznymi takimi jak przenikalność elektryczna i konduktywność mimo posiadania danych wysokościowych. Należy oczekiwać, że postępy prac prowadzonych w tym obszarze pozwolą na coraz dokładniejsze zbliżanie wyników teoretycznych modeli do tych obserwowanych w pracujących sieciach w rzeczywistym środowisku.

SPIS LITERATURY

- [1] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology; 2010–2015, CISCO, 2011
- [2] P. Sharma, *Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network*, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, vol. 2, str. 47-53, 2013
- [3] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, 2nd Edition*, Wiley, 2011
- [4] H. Bogucka, *Projektowanie i obliczenia w radiokomunikacji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
- [5] ITU-R SM.2028-1 Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems, 2002.
- [6] J. Kołakowski, J. Cichocki, *UMTS System telefonii komórkowej trzeciej generacji*, WKiŁ, Warszawa 2007
- [7] K. Wesołowski, *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Warszawa: WKiŁ, 2006
- [8] Rekomendacja: ITU-R P.1546-5 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz, Genewa 2013
- [9] Rekomendacja: ITU-R P.452-13 Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz, Genewa 2013
- [10] D. Wypiór, *Opracowanie i implementacja deterministycznej metody propagacyjnej do wyznaczania tłumienia fal radiowych w obszarze zurbanizowanym Praca magisterska*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2012
- [11] K. Staniec, *Modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych we wnętrzach budynków w pasmach ISM wykorzystywanych przez szerokopasmowe systemy bezprzewodowe - Rozprawa Doktorska*, Wrocław: Politechnika Wrocławska, 2006
- [12] K. Staniec, *Deterministyczny model propagacji fal elektromagnetycznych w budynkach*, Krajowa Konferencja Radiotelekomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Gdańsk 2007
- [13] A. Verstak, L. T. Watson, T. S. Rappaport, C. R. Anderson, *Globally Optimized Design of Wireless Communication Systems*, Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2002
- [14] D. Ghazanfarpour i J. Hasenfratz, *A Beam Tracing with Precise Antialiasing for Polyhedral Scenes* Computer Graphics - New York - Association for Computing Machinery, tom 22, nr 1, str. 103-115, 1998.
- [15] P. S. Heckbert i P. Hanrahan, *Beam Tracing Polygonal Objects*, Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, tom 18, nr 3, str. 119 - 127, 1984.
- [16] C. Saeidi i A. Fard, *New Tube-Based Shooting and Bouncing Ray Tracing method*, The 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications, str. 269-273 2009.
- [17] M. Lott, *On the Performance of an Advanced 3D Ray Tracing Method*, In Proc. of European Wireless & ITG Mobile Communication, 1999.
- [18] G. Durgin, N. Patwari i T. Rappaport, *An advanced 3D ray launching method for wireless propagation prediction*, Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47th, tom 2, nr 2, str. 785-789, 1997.
- [19] S. Chen, S. Jeng, *An SBR/image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture*, IEEE Transactions, Antennas and Propagation, str. 98-106, 1997