

Oddziaływanie systemów radiokomunikacyjnych piątej generacji na ciało człowieka – symulacje komputerowe

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z analizą oddziaływania systemów radiokomunikacyjnych piątej generacji na ciało człowieka. Przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem metody różnic skończonych w dziedzinie czasu oraz numerycznych modeli ciała człowieka. Przedstawiono wyniki symulacji uzyskane dla częstotliwości 28 GHz za pomocą modelu antropomorficznego i modelu uproszczonego wykazując, że zastosowanie modelu uproszczonego pozwala znacznie ograniczyć czas symulacji.

Abstract. In the paper a selected issues on interaction of 5 generation wireless systems with human body are presented. The research was based on computer simulations with finite difference time domain method and numerical models of human body. The results obtained for the frequency equal to 28 GHz with anthropomorphic and simplified model of human body are presented. It was shown that utilization of simplified body model can reduce significantly the computational cost of simulation. (**Interaction of 5 generation wireless systems with human body- computer simulations issues**).

Słowa kluczowe: systemy piątej generacji, SAR, FDTD, symulacje komputerowe

Keywords: 5-generation systems, SAR, FDTD, computer simulations.

Wstęp

Bezprzewodowe systemy telekomunikacyjne piątej generacji - 5G - to nowy standard telekomunikacyjny, który w przyszłości ma zastąpić technologie czwartej generacji 4G/LTE oraz LTE-Advanced. Jego podstawowe cechy użytkowe to zwiększona szybkość transmisji danych (do 10 Gb/s) oraz dużo większa liczba użytkowników w stosunku do systemów stosowanych obecnie (liczba aktywnych urządzeń nawet 100 razy większa niż w przypadku systemów 4 generacji), jak również zmniejszona energochłonność (pięciokrotnie wydłużony czas działania z wykorzystaniem akumulatora) [1-3]. Dzięki tak korzystnym cechom, systemy piątej generacji mogą znaleźć wiele nowych zastosowań, które były niedostępne dla stosowanych obecnie systemów radiokomunikacyjnych np. w motoryzacji i transporcie, gdzie konieczne będzie przesyłanie wielu danych od pojazdów autonomicznych [4]. Ponadto wiele zastosowań mogą znaleźć systemy 5G w ochronie zdrowia do monitorowania parametrów życiowych pacjentów przebywających w domach, dzięki czemu możliwe będzie diagnozowanie na odległość lub automatyczne wzywanie pomocy w sytuacjach nagłych [5]. Aby zrealizować wysokie wymagania funkcjonalne stawiane przed systemami piątej generacji, takie jak zwiększona przepływność danych oraz liczba aktywnych urządzeń, systemy tego rodzaju będą integrować zarówno technologie przewodowe o dużej przepustowości (światłowody), jak również technologie bezprzewodowe funkcjonujące w nowych pasmach częstotliwościowych. Znaczne zwiększenie liczby danych przesyłanych w systemie od terminali ruchomych, wymaga wykorzystania szerszych zakresów częstotliwości w interfejsie radiowym oraz zastosowania nie używanych do tej pory w systemach radiokomunikacji ruchomej technologii takich jak np. wieloelementowe, sterowane szyki antenowe [6].

Systemy piątej generacji wykorzystywać będą nowe pasma częstotliwości, które nie były stosowane dotąd w systemach łączności mobilnej. Rozważane są obecnie pasma w zakresie od 3,4 do 3,8 GHz, z kanałem o szerokości 400 MHz, jak również pasmo 700 MHz gwarantujące większy zasięg stacji bazowej. W celu realizacji planowanego zwiększenia przepływności danych (nawet 100 krotnie w porównaniu z systemami 4 generacji) konieczne jest zastosowanie kanałów częstotliwościowych o szerokości do 1GHz. W tym celu rozważane jest wykorzystanie zakresu fal milimetrowych w pasmach 28 -

30GHz, 60 GHz, a nawet zakresów bardzo dużych częstotliwości 71 – 76 GHz, 81 – 86 GHz i 92 – 95 GHz [7-8].

Wprowadzenie nowego systemu radiokomunikacyjnego wymaga przeprowadzenia badań oddziaływania tego systemu na ludzi i środowisko. Obecnie, w przypadku terminali bezprzewodowych pracujących w zakresie częstotliwości od 800 MHz do 2,5 GHz stosowane są do tego celu symulacje komputerowe wykorzystujące numeryczne modele ciała. Typowo są to programy bazujące na metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu – FDTD lub metodzie elementów skończonych - FEM.

W artykule omówiono ograniczenia metody różnic skończonych w dziedzinie czasu w przypadku zastosowania jej do symulacji oddziaływania systemów bezprzewodowych piątej generacji wykorzystujących fale milimetrowe (pasmo 28 GHz). Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych z wykorzystaniem antropomorficznych, heterogenicznych modeli ludzkiego ciała oraz modeli uproszczonych.

Symulacje oddziaływania systemów bezprzewodowych na ludzi za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu

Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) jest bardzo uniwersalną metodą modelowania zagadnień elektromagnetycznych. Ze względu na wykorzystanie równań sformułowanych w dziedzinie czasu, metoda FDTD jest szczególnie przydatna do symulacji szerokopasmowych ponieważ zastosowanie transformaty Fouriera do analizy wyników symulacji w dziedzinie czasu pozwala obliczyć parametry obiektu w szerokim przedziale częstotliwości na podstawie jednej symulacji [9-10].

Opisane w niniejszym artykule symulacje oddziaływania systemów radiokomunikacyjnych na ciało człowieka przeprowadzone zostały z wykorzystaniem programu XFDTD firmy Remcom [11], w którym zaimplementowano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu. Pozwala ona na symulacje różnorodnych obiektów, które dzielone są na sześciennie elementy objętościowe (woksele) zgodnie z metodą zaproponowaną przez Yee [12]. Program dokonuje podziału symulowanego obiektu na woksele o wymiarach dostosowanych do długości fali elektromagnetycznej w analizowanym obiekcie. Odpowiedni dobór wymiarów elementarnych komórek, na które dzielony jest obiekt ma znaczący wpływ na dokładność obliczeń. Często stosowaną regułą jest przyjęcie długości boku komórki równego jednej

dziesiątej długości najkrótszej fali elektromagnetycznej analizowanej w symulacjach λ_{min} :

$$(1) \lambda_{min} = \frac{c_0}{f_c \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}$$

gdzie: λ_{min} - długość najkrótszej fali w modelu, c_0 - prędkość światła w próżni, f_c - częstotliwość fali, μ_r - maksymalna względna przenikalność magnetyczna modelowanego obiektu, ϵ_r - maksymalna względna przenikalność elektryczna modelowanego obiektu.

Program XFDTD umożliwia podział symulowanego obiektu na elementy o identycznych wymiarach lub na lokalne zagęszczenie siatki dla wybranych przedziałów zmiennych przestrzennych (x,y i z w kartezjańskim układzie współrzędnych). Umożliwia to odwzorowanie struktur znacznie mniejszych od dziesiątej części najkrótszej fali λ_{min} .

Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu umożliwia symulacje obiektów zbudowanych z bardzo różnorodnych materiałów. Dzięki temu jest rekomendowana do badania oddziaływania fal elektromagnetycznych na ciało człowieka [13]. Opracowano wiele modeli numerycznych ciała człowieka na potrzeby symulacji komputerowych za pomocą metody FDTD, które różnią się liczbą modelowanych tkanek oraz dokładnością odwzorowania budowy anatomicznej ciała [14]. Do badań przedstawionych w tym artykule wykorzystano model NMR Hershey (rys. 1a), który dostępny jest w programie XFDTD w kilku wariantach, różniących się wielkością woksela od 1mm do 10 mm.

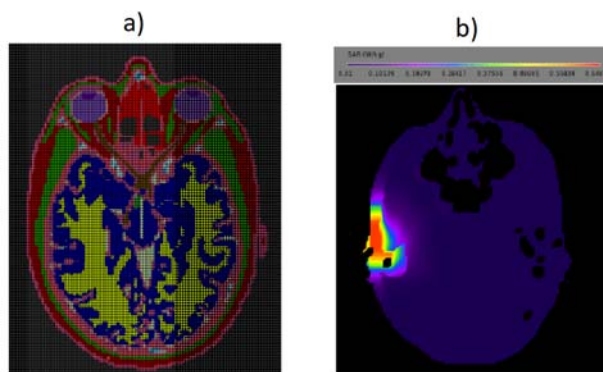
Do badania oddziaływania fali elektromagnetycznej na ciało często stosowany jest parametr SAR (ang. Specific Absorption Rate) określający szybkość pochłaniania właściwego energii:

$$(2) SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2$$

gdzie: SAR - szybkość pochłaniania właściwego energii, σ - przewodność materiału, ρ - gęstość materiału, E - natężenie pola elektrycznego.

Maksymalna wartość parametru SAR od wielu lat była parametrem, który wykorzystywano do kontroli ekspozycji ludzi na promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące np. od telefonów komórkowych. Z tego powodu oprogramowanie wykorzystywane do symulacji elektromagnetycznych umożliwia łatwe wyznaczenie wartości maksymalnych tego parametru oraz jego rozkładów we wnętrzu ciała, co pokazano na rysunku 1b. W obowiązujących obecnie regulacjach prawnych dotyczących maksymalnych ekspozycji ludzi na promieniowanie elektromagnetyczne określa się limity miar oddziaływania bezpośredniego pola-EM, jako limity Granicznych Poziomów Oddziaływania „limity GPO”. Parametr SAR występuje jako limit GPO jedynie w zakresie częstotliwości od 100kHz do 6 GHz [15]. Dla częstotliwości z przedziału 6GHz – 300GHz określone jest maksymalne natężenie pola elektrycznego padającego na powierzchnię ciała, którego wartość skuteczna nie może przekroczyć 140 V/m.

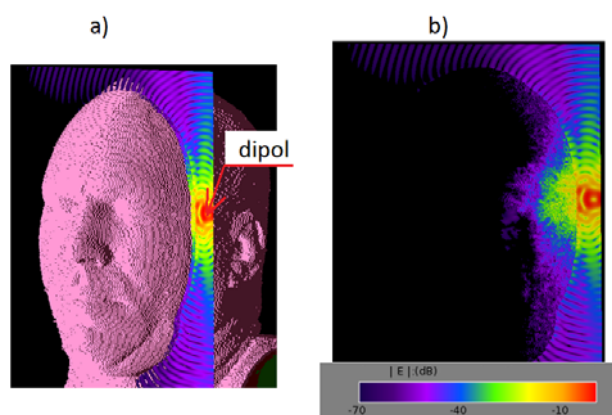
Parametr SAR w przypadku systemów piątej generacji funkcjonujących w pasmach powyżej 6GHz nie jest wymagany przez prawo parametrem do wyznaczania w sensie granicznego poziomu oddziaływania. Mimo to został on przyjęty w dalszych badaniach jako wskaźnik ilustrujący penetrację energii w głąb ciała, który dobrze ilustruje efekt termiczny oddziaływania fali elektromagnetycznej na człowieka.



Rys.1. Heterogeniczny model głowy: a – widok struktury wewnętrznej, b – przykładowe wyniki symulacji SAR

Symulacje z wykorzystaniem modelu heterogenicznego

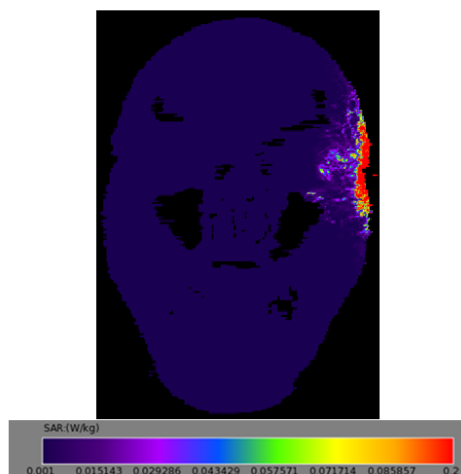
W pierwszym etapie prac zbadano możliwość wykorzystania heterogenicznego modelu ciała do symulacji oddziaływania systemów piątej generacji na człowieka. Zastosowano model NMR Hershey o wielkości woksela równej 1mm. Założono, że częstotliwość fali w eksperymencie wynosi 28GHz. Dla tej częstotliwości, maksymalna względna przenikalność elektryczna tkanek wynosi $\epsilon_r=50,7$ (dla płynów ustrojowych). Wynikająca z niej długość najkrótszej fali wynosi $\lambda_{min}=1,8$ mm, a zatem długość boku woksela użytego do modelowania ciała powinna wynosić około 0,18 mm. Ze względu na tak małe rozmiary woksela do zamodelowania sylwetki człowieka (o wymiarach 1877 mm na 571 mm na 340 mm) należałoby wykorzystać około $4,5 \cdot 10^{10}$ woksela, a rozmiar pamięci operacyjnej wymaganej do uruchomienia obliczeń wyniosłby około 1,3 TB. Ze względu na tak duże wymagania dotyczące pamięci operacyjnej nie można było uruchomić obliczeń modelu obejmującego całe ciało, a jedynie obszar głowy o wymiarach 181 mm na 277 mm na 299 mm. Również w tym przypadku zastosowanie woksela o długości boku równej 0,2mm nie było możliwe ponieważ $1,8 \cdot 10^9$ woksela wymagałoby użycia 55 GB pamięci operacyjnej. Aby umożliwić wykonanie symulacji komputerowych na dostępnym komputerze, zastosowano woksela o boku wynoszącym 0,4 mm dla których wymagana wielkość pamięci operacyjnej wyniosła 15 GB.



Rys.2. Symulacja ekspozycji ciała na falę elektromagnetyczną promieniowaną przez dipol półfalowy: a - usytuowanie anteny w stosunku do głowy, b - wyniki symulacji natężenia pola elektrycznego

Przeprowadzone symulacje obejmowały przypadek, w którym człowiek poddany był ekspozycji na falę elektromagnetyczną, której źródłem był dipol półfalowy zasilany sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 28 GHz i

napięciu o amplitudzie 10 V, usytuowany przy lewej skroni. Usytuowanie anteny w stosunku do głowy przedstawiono na rysunku 2a, a wyniki natężenia pola elektrycznego na rysunku 2b. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki symulacji parametru SAR.



Rys. 3. Wyniki symulacji SAR z wykorzystaniem modelu heterogenicznego

Maksymalna wartość SAR uśredniona dla 1g masy tkanki wyniosła w tym przypadku 2 W/kg. Maksymalne wartości SAR występowały na powierzchni skóry. Na głębokości 6mm od powierzchni modeli wartość parametru SAR wynosi 0.05 W/kg.

Czas symulacji z wykorzystaniem komputera wyposażonego w 2 czterordzeniowe procesory Intel Xeon E5620 wyniósł 16 godzin. Ze względu na duże wymagania dotyczące pamięci operacyjnej (15 GB) nie można było w tym przypadku zastosować dostępnych dla autora kart przyspieszających obliczenia, które wykorzystują procesory graficzne (GPU).

Symulacje z wykorzystaniem modelu uproszczonego, jednowarstwowego

Uproszczone modele ciała człowieka znajdują wiele zastosowań w elektromagnetyzmie obliczeniowym [17-19]. Właściwe dobranie parametrów modelu uproszczonego pozwala znacznie zredukować czas symulacji. Z tego względu podjęto próbę opracowania modelu uproszczonego na potrzeby badania oddziaływania systemów wykorzystujących fale wielkiej częstotliwości na ludzi.

Wyniki symulacji otrzymane za pomocą modelu heterogenicznego ilustrują niewielką głębokość wnikania fali w głąb ciała. Zarówno natężenie pola elektrycznego (rys. 2) jak i SAR (rys. 3) mają bardzo małe wielkości na głębokości wynoszącej 30 mm od powierzchni skóry. W przypadku SAR wartość zmalała w eksperymencie do 0,03 W/kg, a natężenie pola o ponad 20 dB. W bardziej oddalonych od źródła obszarach modelu ciała energia fali pochłoniętej jest pomijalnie mała. Na podstawie tej obserwacji, opracowanie modelu o zredukowanej wielkości i złożoności w stosunku do modelu heterogenicznego wydaje się uzasadnione.

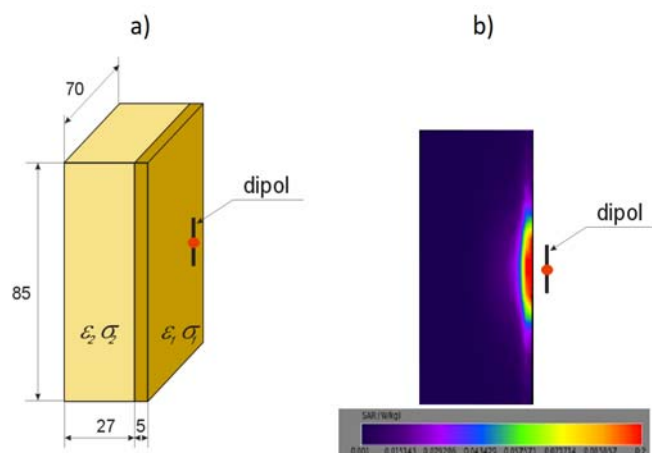
Redukcja rozmiarów modelu uproszczonego może ograniczyć czas wykonywania obliczeń, zależny od liczby wokseli tworzących model.

Opracowany model uproszczony składał się z prostopadłościanu o wymiarach 35 mm x 70 mm x 85 mm i podobnie jak model heterogeniczny zbudowany był z wokseli o długości boku równej 0,4 mm. Przenikalność elektryczna względna materiału z którego wykonano model wyniosła $\epsilon=38,5$, a przewodność właściwa $\sigma=2,4$ S/m. Są to

wartości typowe dla modeli stosowanych do badania terminali systemów komórkowych [20]. Do obliczeń wykorzystano 470 MB pamięci RAM dzięki czemu możliwe było wykorzystanie akceleratorów obliczeniowych typu Nvidia Tesla 2070. Czas symulacji wyniósł ok. 5 min. W wyniku obliczeń uzyskano maksymalną wartość parametru SAR uśrednioną dla 1 g tkanki równą 1.5 W/kg na powierzchni modelu, a na głębokości 6mm SAR wyniósł 1.1 W/kg.

Symulacje z wykorzystaniem modelu uproszczonego, dwuwarstwowego

Wyniki symulacji uzyskane dla uproszczonego modelu składającego się z jednorodnego prostopadłościanu odbiegają od wyników uzyskanych dla modelu heterogenicznego, który uznano za referencyjny. Ze względu na to, że penetracja energii jest ograniczona do niewielkiego obszaru pod powierzchnią skóry (rys.3), istotne może być odwzorowanie w modelu uproszczonym warstwy tkanki skóry i tkanki podskórnej. W tym celu opracowano dwuwarstwowy model uproszczony złożony z 2 przylegających do siebie prostopadłościanów, których wymiary podano na rysunku 4a.



Rys. 4. Uproszczony model dwuwarstwowy: a – wymiary, b – wyniki symulacji SAR.

Opracowany model podzielony został na woksele o długości krawędzi 0,4 mm. Parametry materiałów tworzących model dobrano eksperymentalnie tak, aby uzyskać jak największą zgodność wyników symulacji SAR z wynikami uzyskanymi dla modelu heterogenicznego. Przenikalność elektryczna względna materiału z którego wykonano prostopadłościan po stronie dipola wyniosła $\epsilon_1=4$, a przewodność właściwa $\sigma_1=0,25$ S/m. Przenikalność elektryczna względna materiału z którego wykonano szerszy prostopadłościan wyniosła $\epsilon_2=38,5$, a przewodność właściwa $\sigma_2=2,4$ S/m.

Podobnie jak w przypadku modelu uproszczonego jednowarstwowego do obliczeń wykorzystano 470 MB pamięci RAM dzięki czemu możliwe było wykorzystanie akceleratorów obliczeniowych typu Nvidia Tesla 2070. Czas symulacji wyniósł ok. 5 min. W wyniku obliczeń uzyskano maksymalną wartość parametru SAR uśrednioną dla 1 g tkanki równą 2,05 W/kg na powierzchni modelu, a na głębokości 6mm SAR wyniósł 0,6 W/kg. Są to wartości zbliżone do uzyskanych za pomocą modelu heterogenicznego.

Podsumowanie i wnioski

Systemy radiokomunikacyjne piątej generacji będą wykorzystywały fale elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu od 28 GHz do nawet 100 GHz.

Dla tak dużych częstotliwości wykorzystanie heterogenicznych modeli numerycznych ciała człowieka dostępnych w programach do symulacji elektromagnetycznych metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu wymaga zaangażowania bardzo dużych zasobów sprzętowych oraz jest bardzo czasochłonne. Dla przypadku opisanego w artykule, symulacja obszaru głowy dla częstotliwości 28 GHz przeprowadzona za pomocą 2 czterordzeniowych procesorów Intel Xeon wymaga użycia 15GB pamięci i trwa około 16 godzin.

Analiza wyników symulacji rozkładów pola elektrycznego i parametru SAR przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu heterogenicznego wykazała niewielką penetrację energii fali w głąb ciała. Na podstawie tej obserwacji opracowano uproszczony model ciała obejmujący jedynie niewielki obszar tkanek wokół źródła promieniowania, jakim był dipol półfalowy. Skłoniło to autora do poszukiwania modelu o zredukowanym rozmiarze oraz uproszczonej budowie, który mógłby zostać wykorzystany do symulacji tego zjawiska.

Zastosowany początkowo model składający się z jednego prostopadłościanu nie pozwolił na uzyskanie wyników zbliżonych do rezultatów symulacji za pomocą modelu heterogenicznego, które uznano za referencyjne. Wyniki symulacji SAR uzyskane dla uproszczonego modelu wyposażonego w 2 prostopadłościany są bardzo zbliżone do wyników uzyskanych za pomocą modelu heterogenicznego.

Opisany w artykule uproszczony model ciała człowieka, składający się z 2 warstw materiału, pozwala znacznie zredukować wielkość pamięci operacyjnej wymaganej do uruchomienia symulacji. W przypadku symulacji obszaru głowy dla częstotliwości 28 GHz uzyskano redukcję rozmiaru pamięci z 15 GB do 0,47 GB. Dzięki temu możliwe było wykorzystanie komputera wyposażonego w akcelerator obliczeniowy typu Nvidia Tesla 2070, który dysponuje pamięcią 6 GB. Dzięki temu czas obliczeń został zredukowany z 16 godzin do 5 minut.

Uproszczony model ciała może zostać wykorzystany do symulacji oddziaływania fal elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości na ciało człowieka. Należy zaznaczyć, że parametry materiałów tworzących model mogą różnić się w niewielkim stopniu w zależności od badanego obszaru ciała.

Autor: dr inż. Łukasz Januszkiewicz, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroniki, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: lukasz.januszkiewicz@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Shafi M. et al., 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35 (2017), no. 6, 1201-1221
- [2] Inoue T., 5G standards progress and challenges, *IEEE Radio and Wireless Symposium* (2017), 1-4
- [3] Luo F.-L., Zhang C., 5G Standard Development: Technology and Roadmap, *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*, Wiley-IEEE Press (2016), 616
- [4] Benedetti I., Giuliano R., Lodovisi C., Mazzenga F., 5G wireless dense access network for automotive applications: Opportunities and costs, *International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Torino*, (2017), 1-6
- [5] Borkar S., Pande H., Application of 5G next generation network to Internet of Things, *International Conference on Internet of Things and Applications*, (2016), 443-447
- [6] Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G. R., Molisch A. F., Mellios E., Zhang J., Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. PP no. 99 (2017), 1-1
- [7] Yu Q., 5G Development and Spectrum, *Forward Thinking for Spectrum – Getting ready for 5G workshop November 16th 2016 at ITU Telecom World, Bangkok*, (2016)
- [8] Wang S. et al., A novel method view to estimate 5G spectrum needs for land mobile service, *16th International Symposium on Communications and Information Technologies*, (2016), 402-406
- [9] Taflove A., Hagness S. C., Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, *Norwood, Artech House*, 2005.
- [10] Kunz K. S., Luebbers R. J., The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, *CRC Press*, (1993).
- [11] Remcom Inc., XFDTD 7.3 Reference Manual, 2014
- [12] Yee K., Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol 14, (1966), 302-307
- [13] C95.3-2002, Recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100kHz to 300GHz, *IEEE Standards and Coordinating Committee 28 on Non-ionizing Radiation Hazards*, (2002),
- [14] Clement C., Adult Reference Computational Phantoms, *Elsevier Annals of the ICRP*, vol. 39, (2009), no. 2
- [15] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne, *Dziennik Ustaw 2016, pozycja 950*
- [16] Andreuccetti D., Fossi R., Petrucci C., An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>. IFAC-CNR, Florence (Italy), (1997)
- [17] Januszkiewicz Ł., Hausman S., Simplified human phantoms for narrowband and ultra-wideband body area network modelling, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 34:2, (2015), 439-447
- [18] Januszkiewicz Ł., Simplified human body models for interference analysis in the cognitive radio for medical body area networks, *8th International Symposium on Medical Information and Communication Technology*, (2014), 1-5
- [19] Januszkiewicz Ł., Hausman S., Simplified human phantoms for wireless body area network modeling, *9th European Conference on Antennas and Propagation* (2015), 1-4,
- [20] Fukunaga K., Watanabe S., Yamanaka Y., Dielectric properties of liquid phantoms for evaluations of mobile phones, *Proceedings of EMC '04 SENDAI*, (2004), 805-808