

Pole elektromagnetyczne z pasma powyżej 40 GHz – zastosowanie i możliwości pomiarowe

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane aspekty związane z wykorzystaniem widma fal milimetrowych na częstotliwościach przekraczających 40 GHz oraz możliwości pomiarowe pola elektromagnetycznego (PEM) w tym paśmie. Opisano technologie bezprzewodowej transmisji danych pracujące na częstotliwościach przekraczających 60 GHz, wykorzystywane w sieciach WPAN i WLAN, a także podano przykłady różnych innych zastosowań, jak np. broń elektromagnetyczna. Zbadano możliwości pomiarowe pól z zakresu częstotliwości 60-90 GHz komercyjnych mierników PEM o nominalnym zakresie częstotliwościowym poniżej tego pasma.

Abstract. This paper presents the selected aspects related to the upper part of microwave spectrum usage (above 40 GHz) and its measurement possibilities. Described commercial technologies used in WPAN and WLAN networks and presented couple others examples of wireless solutions operating at frequencies above 60 GHz, such as electromagnetic weapons. Also examined the possibility of measuring the fields in the frequency range 60-90 GHz of commercial EMF meters with a nominal frequency range below this band. (The electromagnetic field of the bands above 40 GHz - applications and measurement possibilities).

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, PEM, pasmo E, metrologia PEM

Keywords: electromagnetic field, EMF, E-band, metrology

Wprowadzenie

Rozwój techniki mikrofalowej pozwala na wykorzystywanie coraz szerszego spektrum częstotliwości i całkiem realnie wydaje się wykorzystanie całego „przypisanego” elektromagnetycznemu promieniowaniu niejonizującemu pasma do 300 GHz. Ostatnie lata to przekroczenie w zastosowaniach cywilnych granicy częstotliwości 60 GHz. Zakres fal milimetrowych nie był zbyt chętnie wykorzystywany w radiokomunikacji ze względu na niezbyt sprzyjające warunki propagacyjne. W tym zakresie częstotliwości występuje bardzo duże tłumienie w atmosferze spowodowane rezonansem z cząsteczkami tlenu w niektórych pasmach [1], gwałtownie rosnące w przypadku mgły lub opadów atmosferycznych [2]. Można tu zauważyć podobieństwo do łączy optycznych FSO (ang. *Free Space Optics*), które także cechuje konieczność bezpośredniej widoczności oraz wrażliwość na warunki pogodowe. Ponadto wielodrogowość i przesunięcie dopplerowskie wynikające z odbić oraz efekt zacieniania przez ludzkie ciało to kolejne ograniczenia w zastosowaniu. Zaletą tego pasma to przede wszystkim duże przepływności, małe anteny oraz wąskie wiązki promieniowania (co odgrywa istotną rolę w sieciach WPAN). Nie mniej istotne są również ograniczenia technologiczne. Układów elektronicznych pracujących w tym paśmie nie można już traktować jako układy o stałych skupionych i każdy element powinien być projektowany z zachowaniem restrykcyjnych zasad dopasowania, przy czym w pasmach powyżej 60 GHz nie używa się już typowych złącz koncentrycznych, a jedynie falowody.

Niezależnie od powyższych trudności, pasma te są wykorzystywane w praktyce między innymi w radiokomunikacji (linie radiowe punkt-punkt), transmisji danych ale także w broni elektromagnetycznej. Rozwój i coraz szersze wykorzystanie źródeł pola elektromagnetycznego z pasm milimetrowych powoduje również konieczność rozwoju metrologii PEM i układów wzorcowego pola elektromagnetycznego w tym zakresie.

Zastosowanie PEM z pasma powyżej 40 GHz

Pasmo z zakresu fal milimetrowych znalazło zastosowanie w systemach łączności z wykorzystaniem linii radiowych, zarówno w transmisji punkt-punkt jak i punkt-wielopunkt. Wykorzystywano je dotychczas na

częstotliwościach 32, 38 i 42 GHz. Gwałtowna ekspansja usług telekomunikacyjnych oraz zapotrzebowanie na coraz lepszą jakość i większe przepływności spowodowała, że tradycyjne systemy przestały być dostatecznie wydajne i zaczęto eksplorację wyższych pasm częstotliwości – Pasma E. Mieści się ono w tzw. „atmosferycznym oknie mikrofalowym” (Rys 1. – minima lokalne na charakterystyce odzwierciedlają położenie okien atmosferycznych) od ok. 70 do 100 GHz zajmując dwa podpasma 71-76 GHz i 81-86 GHz. Przy zasięgu od kilkuset metrów do ok. 1,5 km zapewnia przepływność rzędu gigabitów/s [3]. Nie bez znaczenia w jego rosnącej popularności jest również fakt, że w wielu państwach pasmo to jest nielicencjonowane, a korzystanie z niego – bezpłatne. Tabela 1 przedstawia możliwości, jakie oferują urządzenia pracujące w Paśmie E w porównaniu ze standardowymi systemami używanymi dotychczas.

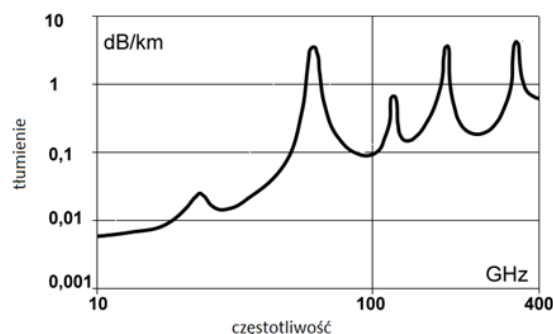


Tabela 1. Porównanie parametrów systemów pracujących w Paśmie E ze standardowymi systemami do 40 GHz

	Pasmo E	Tradycyjne systemy poniżej 40 GHz
Pasmo	2 GHz	10 GHz
Szerokość kanału	56 MHz	250 MHz
Przepływność	do 470 Mb/s	do 5 Mb/s
Ilość kanałów	18	2 × 19

Pasmo 60 GHz znalazło także wykorzystanie w sieciach WPAN – do tej pory powstało kilka standardów, z których najważniejsze to WirelessHD [4], IEEE 802.15.3c [5] i ECMA 387 [6]. Pozwalają one na strumieniowanie danych

wideo w wysokiej rozdzielczości bezpośrednio między urządzeniem odtwarzającym a ekranem (bezprzewodowe monitory i rzutniki), stosowane są w tzw. kioskach danych (zakup gier, filmów czy danych z szybkim bezpośrednim transferem bezprzewodowym) czy prysznicach danych (ang. *data showers*), które umożliwiają bardzo szybki przesył danych do terminala, który porusza się w jakimś obiekcie lub korytarzu – np. elektroniczny przewodnik po muzeum lub po mieście, który w wybranych punktach błyskawicznie przesyła informacje o oglądanym obiekcie.

Bezprzewodowe sieci lokalne nowej generacji także wykorzystują pasmo 60 GHz – urządzenia wspierające standardy IEEE 802.11ad [7] oraz WiGig [8] (wcześniej znane jako NGmS) od dawna są już dostępne na rynku (WiGig zostało niedawno skonsolidowane z Wi-Fi). Tabela 2 przedstawia porównanie wymienionych standardów, które oferują między innymi takie usługi, jak: bezprzewodowy monitor, transmiter HDTV, szybki transfer rzędu 7 Gbps czy bezprzewodowe dokowanie.

Tabela 2. Porównanie systemów WLAN i WPAN pracujących w paśmie 60 GHz.

Standard	Przeływność	Zastosowanie
WirelessHD	4 Gbps	Nieskompresowany obraz wideo w HD
ECMA-387	6,35 Gbps	Transfer danych i strumieniowanie wideo w HD
802.15.3c	5,7 Gbps	Transfer punkt-punkt, transfer plików i strumieniowanie wideo dla urządzeń przenośnych
802.11ad	>1 Gbps	Szybki odczyt/zapis, bezprzewodowe monitory, transmisja sygnału HDTV
WiGig	7 Gbps	Szybki transfer plików, bezprzewodowe monitory, bezprzewodowe dokowanie, strumieniowanie wideo w HD

Częstotliwości powyżej 60 GHz wykorzystywane są także w komunikacji wewnątrz pojazdowej – w tzw. systemach *in-cabin* (system komunikacji wewnątrz samolotu pasażerskiego lub w autobusie dalekobieżnym), w [9] przedstawiono realizację systemu łączności a w [10] koncepcję systemu multimedialnego w samolotach. W literaturze wykazano także możliwości prowadzenia w tych pasmach łączności satelitarnej [11].

Zastosowania militarne różnych technologii zazwyczaj znacznie wyprzedzają pojawienie się ich w wydaniu cywilnym i nie inaczej jest z falami milimetrowymi. Jedno z bardziej znanych zastosowań, to techniki radarowe oraz systemy obrony przeciwrakietowej CIWS (ang. *Close-in weapon system*) [13] oraz techniki HPM (ang. *High Power Microwaves*) wykorzystujące promieniowanie mikrofalowe wielkiej mocy. Szczególnie ciekawa (choć całe życie budząca kontrowersje) jest technologia ADS (ang. *Active Denial System*) [14]. Urządzenie ADS to nieśmiertelna broń mikrofalowa emitująca ukierunkowane fale o częstotliwości ok. 95 GHz. Ze względu na bardzo małą głębokość wnikania w tkankę ludzką fal milimetrowych, cała energia pochłaniana jest przez skórę i nawet chwilowe oddziaływanie wiązki o dużej gęstości mocy uczucie bólu podobnego pieczenia lub poparzenia. Zadaniem tej broni jest zmuszenie przeciwnika do ucieczki bez spowodowania żadnego uszczerbku na zdrowiu - co jednak poddane jest w wątpliwość, zwłaszcza jeżeli chodzi o ochronę oczu[15], co nie stanowiło przeszkody, by system ten użyć m.in. jako jedno z zalecanych przez NATO rozwiązań w celu przeciwdziałania ataku piratów z Somalii [16], z którymi borykano się w ostatnich latach.

Inny przykład zastosowania wysokich mikrofal, to obrazowanie falami milimetrowymi, które może mieć różnorodne zastosowanie, począwszy od wykrywania pęknięć w ścianach i stropach [17] lub skanowania bagaży przez skanery osobiste na lotniskach [18], kamery na fale milimetrowe[19], aż po systemy wykrywania organizmów żywych przez ściany budynków [20]. W literaturze znaleźć można również doniesienia o terapeutycznym wykorzystaniu fal milimetrowych i ich skutecznym stosowaniu w leczeniu różnych schorzeń [21].

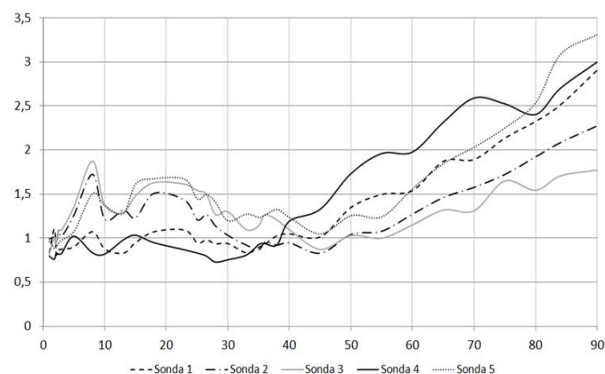
Możliwości pomiarowe PEM z pasma częstotliwości powyżej 40 GHz

Pasma powyżej 40 GHz nie było do tej pory wykorzystywane komercyjnie, stąd też nie było konieczności wykonywania pomiarów PEM w tym paśmie. Rynek sprzętu metrologicznego był odzwierciedleniem potrzeb użytkowników, więc producenci oferowali mierniki szerokopasmowe o paśmie pracy do 40 GHz lub do 60 GHz.

Tabela 3. Szacunkowy budżet niepewności stanowiska wzorcowego PEM w paśmie 60-90 GHz

Parametr	Niepewność
Niepewność wzorcowania detektorów	1,0 dB
Zafalowania charakterystyki częstotliwościowej sprzęgacza	0,8 dB
Wyznaczenie zysku anten	0,9 dB
RAZEM:	2,7 dB

Brak sprzętu pomiarowego na to pasmo, skłonił autorów do sprawdzenia czy istniejące mierniki PEM posiadają zdolność do pomiaru pola elektromagnetycznego poza pasmem pracy deklarowanym przez producenta. Badania przeprowadzono na stanowisku pola wzorcowego w zakresie 1-90 GHz analogicznego do opisanego w [22]. Tabela 3 przedstawia szacunkowy budżet niepewności wzorcowania w paśmie powyżej 60 GHz. Ostateczna całkowita niepewność rozszerzona ($k=2$) wyznaczonych parametrów pola wynosi do 2,7 dB. Uzyskane poziomy niepewności są akceptowalne w tym zakresie częstotliwości.



Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe komercyjnych sond pomiarowych w paśmie 1-90 GHz.

Przetestowano kilka popularnych egzemplarzy i wyniki przedstawione na Rys. 2 potwierdziły, że współczynniki korekcyjne rzędu 2,7 przy progu detekcji miernika rzędu 0,5–1 V/m pozwalają na wyznaczenie granic pola elektromagnetycznego odpowiadających strefom ochronnym zdefiniowanym w [23,24] oraz wartości granicznej z normy środowiskowej [25]. Rezultaty badań pokazały także, że sondy tego samego producenta oraz typu posiadają inne charakterystyki metrologiczne poza

pasmem pracy i nie zawsze posiadają akceptowalne parametry do pomiarów poza pasmem nominalnym. Należy więc indywidualnie rozpatrywać każdą sondę pomiarową.

Podsumowanie

Widmo elektromagnetyczne jest coraz bardziej zatłoczone i coraz intensywniej wykorzystywane. Umożliwia to rozwój techniki mikrofalowej, dla którego napędem jest zapotrzebowanie na coraz szersze usługi radiokomunikacyjne, transmisję danych czy też zastosowania przemysłowe i militarne. Coraz więcej systemów transmisji bezprzewodowej i telekomunikacyjnych wykorzystuje pasmo częstotliwości powyżej 40 GHz, co skutkuje zapotrzebowaniem na sprzęt pomiarowy będący w stanie mierzyć PEM z pasma fal milimetrowych. Na dzień dzisiejszy, istniejące przyrządy są w stanie wykonać pomiar takiego PEM z akceptowalnym błędem, który pozwala oszacować ekspozycje do celów BHP oraz ochrony środowiska zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami, jednak należy się spodziewać, że w najbliższych latach eksplorowane będą coraz wyższe pasma częstotliwości, co pociągnie za sobą kolejne, bardziej wymagające zapotrzebowanie na sprzęt pomiarowy. Autorzy przewidują, że w konsekwencji tych poszukiwań możliwe będzie płynne przejście od mikrofal ($0,3 < f < 300$ GHz) do techniki terahercowej ($0,3 < f < 10$ THz).

Praca zrealizowana w ramach prac badawczych finansowanych przez MNiSW (prace statutowe) zlecenie PWr S40036.

LITERATURA

- [1] ITU-R P.676-6, "Attenuation by Atmospheric Gases," 2005
- [2] ITU-R P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," 2005, ITU-R P.840-3, "Attenuation Due to Clouds and Fog," 1999
- [3] Complete Millimeter-wave Solutions for Today's Most Demanding Networks, broszura Eband Communications
- [4] "WirelessHD Specification Overview," WirelessHD Std. Overview, Aug. 2009, <http://www.wirelesshd.org/>
- [5] IEEE Std 802.15.3c-2009 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2003), vol., no., pp. c1-187, Oct. 12, 2009
- [6] ECMA International, "High Rate 60 GHz Phy, MAC and HDMI PAL," Standard ECMA-387, 1st Edition, Dec. 2008. <http://www.ecmainternational.org>
- [7] Amendments in ieee 802.11a enable multi-gigabit data throughput and groundbreaking improvements in capacity <http://standards.ieee.org/news/2013/802.11ad.html>
- [8] WiGig White Paper: Defining the Future of Multi-Gigabit Wireless Communications," July 2010, <http://wirelessgigabitalliance.org>
- [9] 60 GHz in-Cabin Real-Time Channel Sounding, A.P. Garcia, W. Kotterman, R.S. Thomä, U. Trautwein, D. Brückner, W. Wimitzer, J. Kunisch
- [10] J. Luo, W. Keusgen, A. Kortke, and M. Peter, "A design concept for a 60 GHz wireless in-flight entertainment system," IEEE 68th
- [11] Vehicular Technology Conference - VTC 2008-Fall, 2008
- [12] Comparison of UWB approaches applied to EHF satellite communications, Daniela Valente*, Ernestina Cianca*, SandeepMukherjee*, Tommaso Rossi*, Marina Ruggieri* and RamjeePrasad
- [13] The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems, Norman Friedman
- [14] The Active Denial System A Revolutionary, Non-lethal Weapon for Today's Battlefield Susan LeVine Center for Technology and National Security Policy National Defense University June 2009
- [15] Czy broń elektromagnetyczna zagraża zdrowiu człowieka?, Sobiech J., Kieliszek J., Przegląd Elektrotechniczny, R. 85 NR 12/2009
- [16] NATO NAVAL ARMAMENTS GROUP Workshop on Counter Piracy Equipment and Technologies, Shawn Miller, 2009
- [17] Latest trends in millimeter-wave imaging technology, S. Oka, H. Togo, N. Kukutsu, and T. Nagatsuma, Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 1, 197-204, 2008
- [18] L3 SECURITY & DETECTION SYSTEMS <http://www.sds.l-3com.com/forms/English-pdfdownload.htm?DownloadFile=PDF-21>
- [19] http://www.esa.int/ESA_in_your_country/Ireland/Bat_inspires_s_pace_tech_for_airport_security
- [20] Through-the-Wall Radar Life Detection and Monitoring Victor M. Lubecke, Olga Boric-Lubecke, Anders Host-Madsen, and Aly E. Fathy, 1-4244-0688-9/07/\$20.00 C 2007 IEEE
- [21] Millimeter waves in biology and medicine <http://www.benran.ru/Magazin/EI/13/N71320.HTM>
- [22] Bieńkowski P., Zubrzak B. Algorytmy ustalania zadanych wartości w układzie ze sprzężeniem zwrotnym na przykładzie automatycznego stanowiska wzorcowego pola elektromagnetycznego z antenami tubowymi. Przegląd Elektrotechniczny. 2011, R. 87, 9a, 160-165
- [23] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2, Część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz - 300 GHz. (Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833 z późniejszymi zmianami). Zgodnie z projektem rozp. MPiPS z 18.06.2013 w najbliższym czasie utraci moc prawną i będzie zastąpione przez nowe rozporządzenie, bez zmian merytorycznych w zakresie dotyczącym zagrożeń elektromagnetycznych.
- [24] PN-T-06580-3: 2002. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 3. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.
- [25] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów utrzymania tych poziomów (Dz. U. 62. Poz. 627 z późniejszymi zmianami).

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Bieńkowski prof. PWr, Politechnika Wrocławska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl;
mgr inż. Bartłomiej Zubrzak, Politechnika Wrocławska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: bartlomiej.zubrzak@pwr.edu.pl;
mgr inż. Paweł Cała, Politechnika Wrocławska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.cala@pwr.edu.pl;
mjr. dr n. tech. Jaromir Sobiech, Zakład Ochrony Mikrofalowej, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii im. gen. Karola Kaczkowskiego, ul. Kozielska 4, 01-163 Warszawa, E-mail: jaromirsobiech@gmail.com