

doi:10.15199/48.2021.10.29

## Szerokopasmowa sonda pola elektromagnetycznego

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zaprojektowaną szerokopasmową sondę do pomiaru pola elektromagnetycznego. Sonda ta ma strukturę logoperiodyczną. Zaprezentowano i omówiono otrzymane charakterystyki promieniowania sondy w systemie 3D oraz jej dopasowanie.

**Abstract.** The paper presents a designed broadband probe for measuring the electromagnetic field. This probe has a logoperiodic structure. The obtained radiation characteristics of the probe in the 3D system and its fitting were presented and discussed. **"Broadband electromagnetic field probe"**Słowa

**kluczowe:** sonda pola, struktura logoperiodyczna, charakterystyki promieniowania, dopasowanie anteny  
**Keywords:** field probe, logoperiodic structure, radiation pattern, matching antenna.

### Wstęp

Rzeczywista współczesnej cywilizacji wiąże się z zapotrzebowaniem na coraz to większą ilość energii. Energia ta ma zastosowanie w użytecznych w technologiach, nauce, medycynie, a także w gospodarstwie domowym. Następuje gwałtowny wzrost popularności systemów bezprzewodowych w komunikacji lokalnej (telefony bezprzewodowe, telefonia komórkowa, radiotelefony, CB, urządzenia zdalnego sterowania) oraz zastosowań urządzeń generujących PEM, zwłaszcza w gospodarstwie domowym (kuchnie mikrofalowe, grzejniki dielektryczne i indukcyjne, monitory ekranowe). Powoduje to narażenie całej populacji na przebywanie w takim środowisku elektromagnetycznym. Pola elektromagnetyczne w przeciwieństwie do innych czynników szkodliwych dla środowiska, np. hałasu, nie są z reguły rejestrowane przez zmysły człowieka, dlatego niemożliwe jest intuicyjne dostosowanie sposobu postępowania człowieka do stopnia zagrożenia

Zatem wykrywanie PEM oraz wszelkie związane z nim prace i badania wymagają stosowania narzędzi do jego pomiaru. Ponieważ PEM nie jest mierzalne wprost, konieczna jest więc jego zamiana na inne wielkości fizyczne, które potrafimy zmierzyć. Taką zamianę możemy przeprowadzić stosując technikę antenową.

Jednak wcześniej należy stwierdzić że do dnia dzisiejszego toczą się dyskusje o metodach pomiaru pól elektromagnetycznych jak i stosowanych przyrządach w tym zastosowanych w nich sondach. Problem pierwszy sprowadza się do stwierdzenia w jakiej strefie wykonywane są pomiary. Drugim zagadnieniem jest pytanie czy mierzyć pole promieniowania tylko od danego źródła promieniowania czy pole elektromagnetyczne w otaczającej przestrzeni. No i trzecia sprawa to czy i jak uwzględniać że w większości przypadków mamy do czynienia z polami impulsowymi. Przy pomiarach których należy powinno się uwzględniać czasy trwania impulsów [L6].

### Pomiar pola elektromagnetycznego

W przypadku badań ochrony przed niepożądanym promieniowaniem pomiar składowych pola elektromagnetycznego E, H i S nie jest całkowicie wystarczający, ponieważ wymagane jest uściślenie parametrów, które charakteryzują te składowe. Jednymi z kryteriów badania oddziaływania pola elektromagnetycznego na dany obiekt jest ilość energii lub mocy w jednostce masy, jedną z powszechnie uznanych miar jest przyrost temperatury oraz pomiar prądu zaindukowanego w badanym obiekcie. Dla podejścia o

charakterze nietermicznym można zastosować metodę polegającą na pomiarze amplitud i ich rozkładu w przestrzeni występujących składowych w polu elektromagnetycznym oraz częstotliwość przebiegu lub modulującą.

### Pomiar E, H i S

Cel w jakim przeprowadzane są badania ułatwia określenie wielkości składowych, ponieważ pomiary przeprowadzane w celach inspekcyjno-kontrolnych są określone w odpowiednich normach i przepisach, natomiast podczas badań laboratoryjnych powinno się zmierzyć wartości od jak najmniejszych do jak najwyższych w jak najszybszym paśmie pracy.

Częstotliwość (widmo) zmierzonego pola elektromagnetycznego, zakłada się, że w dowolnym czasie, dla wybranego punktu w przestrzeni istnieje jeden wektor E i jeden wektor H, które są spolaryzowane liniowo oraz ich wielkość określa się sumą wszystkich prążków widmowych składowych przestrzennych. Można przedstawić to za pomocą poniższego wzoru:

$$E = E_0 + \sum_{i=1}^N E_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

gdzie:  $E_0$  – natężenie pola elektrostatycznego;  $E_i$  – natężenie i-tego prążka;  $\omega_i$  – pulsacja i-tego prążka;  $\varphi_i$  – faza i-tego prążka,

Wzór jest uniwersalny do wykorzystania, można w nim zamienić składową E na składową H, wtedy otrzymamy wzór określający czasową zmienność pola magnetycznego. Powyższy wzór jest sumą skończoną, przeważnie ilość N nie przekracza kilku. Nawet dla takiego prostego przypadku zmierzenie wszystkich składowych widmowych pola elektromagnetycznego, może okazać się bardzo trudne lub niemożliwe do wykonania z technicznego punktu widzenia.

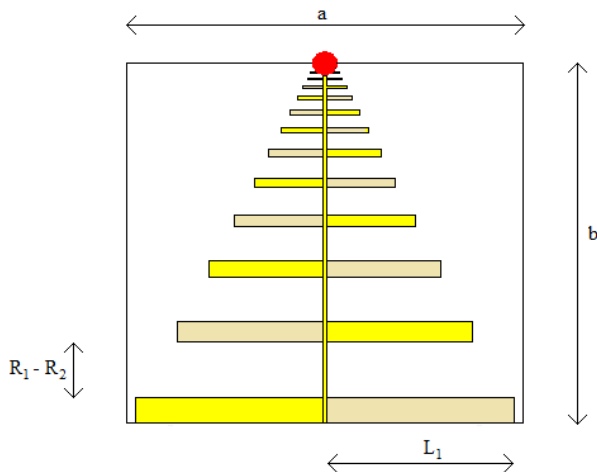
Podczas pomiarów pola elektromagnetycznego należy zwrócić uwagę w jakim polu dokonywany jest pomiar.

### Koncepcja i projekt sondy do pomiaru pola elektromagnetycznego

Zaprojektowana sonda służąca do pomiaru właściwości pola elektromagnetycznego powinna cechować się takimi parametrami jak: kierunkowość, zysk energetyczny, impedancja wejściowa oraz szerokość pasma.

W tym przypadku jako sondę pomiarową zastosowano antenę logarytmiczno-periodyczną [L3] która jest częstotliwościowo niezależna, jej impedancja charakterystyczna  $Z_0$  ulega zmianie w sposób logarytmiczny w funkcji częstotliwości. Zgodnie z zasadą

wzajemności Rayleigha-Helmholtza uogólniona przez Carsona [L1] na przypadek anten określa się związek między parametrami anteny pracującej w warunkach nadawania i odbioru. Ważnym wnioskiem wynikającym z zasady wzajemności jest możliwość zmierzenia parametrów anteny nadawczej przy wykorzystaniu jej jako anteny odbiorczej. Zaprojektowana mikropaskowa antena LPDA wykorzystuje dwie zasilane powierzchnie promieniujące, które znajdują się po obydwóch stronach laminatu. Elementy anteny (rys. 1) są rozmieszczone poprzecznie i naprzemiennie, tworzą one dipole, do zasilania których wykorzystywany jest przewód symetryczny posiadający stałą impedancję falową w taki sposób, że pomiędzy sąsiadującymi ze sobą dipolami występuje przysunięcie fazy o  $180^\circ$  [L4].



Rys. 1. Antena LPDA z oznaczeniami wymiarów

Na czerwono zaznaczono miejsce zasilania anteny. Siła elektromotoryczna, która indukuje się w antenie jest określana za pomocą prawa Faradaya:

$$(2) \quad \mathcal{E}_H = -j2\pi n \mu_0 f \int_S \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$$

gdzie:  $\mathcal{E}_H$  – oznacza siłę elektromotoryczną indukowaną w sondzie pomiarowej,  $\mu_0$  – oznacza stałą magnetyczną

Za długość dipoli i ich odległość między sobą odpowiadają trzy zmienne, są to: współczynnik skali  $\tau$ , współczynnik odległości  $\sigma$  i kąt  $\alpha$  – rozwarcia struktury mikropaskowej. Współczynnik odległości definiuje odległość mierzona w długości fali pomiędzy kolejnymi dipolami [L5].

Związek pomiędzy  $\tau$  a  $\sigma$  określa poniższa zależność:

$$(3) \quad \sigma = \frac{1}{4}(1 - \tau) \operatorname{ctg} \alpha$$

Z zależności tej możemy określić kąt rozwarcia sondy  $\alpha$ :

$$(4) \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{4\sigma}{1 - \tau}$$

W celu dokonania obliczeń należało wyznaczyć wartość współczynników, korzystając z krzywej stałej kierunkowości w tym przypadku przyjęto współczynnik  $\tau = 0,78$ . Następnie obliczono wartość współczynnika  $\sigma$ . Te wartości dobrano tak aby uzyskać założony zysk energetyczny anteny wynoszący co najmniej 5.5 dBi, w naszym przypadku wynosi  $\sigma = 0,139$  zgodnie z założeniem antena powinna pracować w paśmie od  $f_{\min}=500$  MHz, do  $f_{\max}=7,6$  GHz. Tym samym współczynnik pokrycia, wynosi:

$$(5) \quad B = \frac{7,2 \text{ GHz}}{0,5 \text{ GHz}} = 15,2$$

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń została wyznaczona minimalna ilość dipoli wynosi:  $N = 12,71 \approx 13$  Aby móc pokryć efektywniej pasmo liczba dipoli została zwiększona 14 dipoli.

Kolejnym krokiem było obliczenie długości dipoli i odległości między nimi.

Otrzymane wyniki to tylko wielkości geometryczne wyznaczone dla wolnej przestrzeni i nie uwzględniające parametrów dielektryka. Dielektryk użyty do budowy anteny ma kluczowy wpływ na jej parametry. Dlatego też, przy jego wyborze należy zwrócić baczną uwagę na jego grubość ( $t$ ), wysokość podłoża ( $h$ ) oraz względną przenikalność dielektryczną ( $\epsilon_r$ ), a także stratność materiału dielektrycznego ( $\operatorname{tg} \delta$ ) [L2]. Zastosowanym na podłożu laminatem było podłoże FR-4, którego grubość  $h=1,6$  mm, współczynnik przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r=4,3$ . Natomiast grubość ścieżek miedzi 0,035 mm, a  $\operatorname{tg} \delta < 0,001$

W celu uwzględnienia w obliczeniach parametrów i charakterystyk anteny konieczna jest zastosowanie metody analitycznej opartej o modelowanie elektrodynamiczne. Odpowiedni wybór metody analitycznej jest wymuszony poprzez model konstruowanej lub analizowanej anteny. Ze względu na połączenie problematyki polowej wraz z obwodową w tych antenach wymagają one stosowania złożonych metod analitycznych.

Taką metodą pozwalającą na obliczenia z dużą dokładnością poszukiwanych wielkości jest metoda FDTD (Finite-difference time-domain method), metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu. Za pomocą transformaty Fouriera pola w otoczeniu anteny (strefa bliska) jest obliczana charakterystyka promieniowania w strefie dalekiej.

Metoda ta zastosowana jest w programie symulacyjnym CST Microwave Studio.

Po dokonanych symulacjach optymalizacyjnych otrzymano następujące wymiary anteny, które są zamieszczone w tabeli 1

Tabela. 1 Wymiary geometryczne sondy pomiarowej

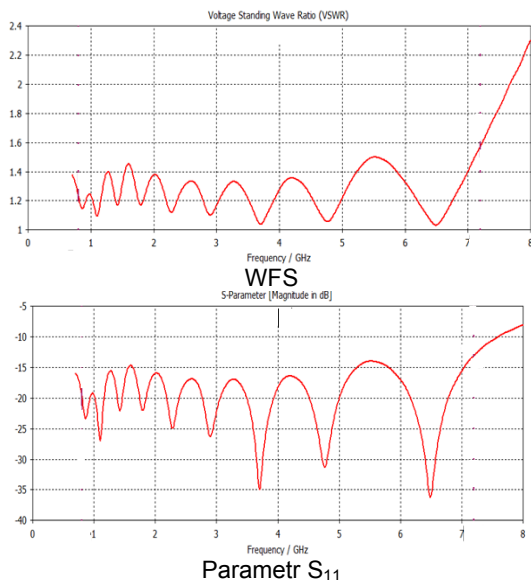
Dipol [N]	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Dipol [N]	Odległość [mm]
L <sub>1</sub>	93,27	12,79	R <sub>1</sub> -R <sub>2</sub>	28,4
L <sub>2</sub>	72,75	9,98	R <sub>2</sub> -R <sub>3</sub>	22,2
L <sub>3</sub>	56,75	7,78	R <sub>3</sub> -R <sub>4</sub>	17,3
L <sub>4</sub>	44,26	6,07	R <sub>4</sub> -R <sub>5</sub>	13,5
L <sub>5</sub>	34,52	4,73	R <sub>5</sub> -R <sub>6</sub>	10,5
L <sub>6</sub>	26,93	3,69	R <sub>6</sub> -R <sub>7</sub>	8,2
L <sub>7</sub>	21,00	2,88	R <sub>7</sub> -R <sub>8</sub>	6,4
L <sub>8</sub>	16,38	2,25	R <sub>8</sub> -R <sub>9</sub>	5,0
L <sub>9</sub>	12,78	1,75	R <sub>9</sub> -R <sub>10</sub>	3,9
L <sub>10</sub>	9,97	1,37	R <sub>10</sub> -R <sub>11</sub>	3,0
L <sub>11</sub>	7,77	1,07	R <sub>11</sub> -R <sub>12</sub>	2,4
L <sub>12</sub>	6,06	0,83	R <sub>12</sub> -R <sub>13</sub>	1,8
L <sub>13</sub>	4,73	0,65	R <sub>13</sub> -R <sub>14</sub>	1,4
L <sub>14</sub>	3,69	0,51		

### Analiza wykonanego modelu

Analiza wykonanego modelu została wykonana w programie CST Microwave Studio, oprogramowanie to pozwala na przeprowadzenie specjalistycznej symulacji z zakresu 3D EM dla wysokich częstotliwości. Program posiada dużą wydajność, dzięki temu jest on często wybierany do przeprowadzania tego typu symulacji, ponadto pozwala ono na dokładną i szybką analizę w zakresie wysokiej częstotliwości dla anten, o jedno- lub wielowarstwowych strukturach.

### Współczynnik fali stojącej i współczynnik odbicia $S_{11}$

Wielkością która świadczy o dopasowaniu do linii zasilającej jest współczynnik fali stojącej WFS jest zależny od stosunku impedancji obciążenia względem impedancji falowej. Drugą wielkością charakteryzującą antenę jest współczynnik odbicia, określa on, ile mocy, która została doprowadzona do anteny zostało odbite, a ile wypromieniowana Dla powszechnie stosowanych anten wartość współczynnika powinna wynosić mniej niż -10 dB, dla wartości poniżej określa się pasmo pracy anteny. Otrzymane wielkości zostały przedstawione na rys. 2



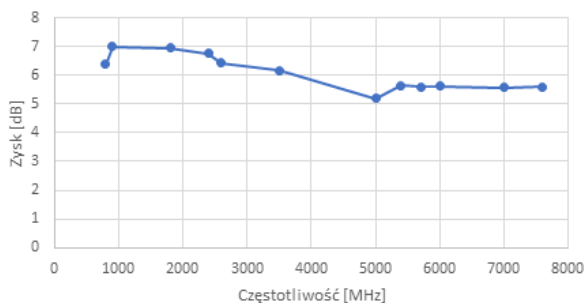
Rys.2. Współczynnik fali WFS i  $S_{11}$  sondy w paśmie 0.8–7.6 GHz.

Na powyższym rysunku przedstawione są wykresy współczynnika fali stojącej, oraz parametru  $S_{11}$  został on uzyskany w paśmie od 500 MHz do 7.6 GHz. Najniższa wartość została osiągnięta dla częstotliwości wynoszących 3,71; 4,77 i 6,5 GHz, a najwyższa dla częstotliwości wynoszącej 7,6 GHz. Wartości osiągnięte w całym paśmie są akceptowalne dla zaprojektowanej anteny.

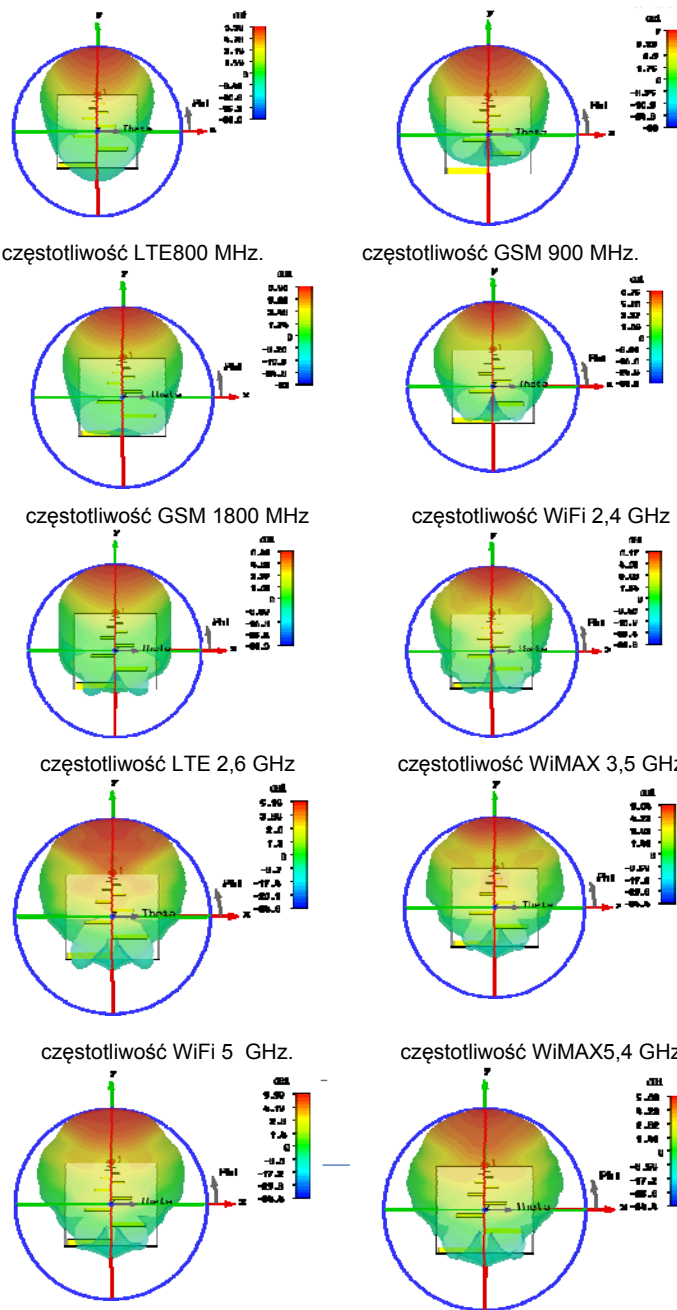
Zafalowania i liczne wcięcia wynikają z częstotliwości rezonansowych anteny, gdy antena pracuje na częstotliwości rezonansowej osiąga znacznie lepsze wartości parametru  $S_{11}$ .

### Charakterystyki promieniowania sondy pomiarowej

Charakterystyka promieniowania jest rozkładem energii wypromieniowanej w przestrzeń przez antenę, przedstawia rozkład natężenia pola elektrycznego W dalszej części pracy przedstawiono charakterystykę przestrzenną, a także charakterystyki w płaszczyźnie poziomej dla wybranych systemów, w których do pomiarów mogłaby być wykorzystana zaprojektowana sonda.



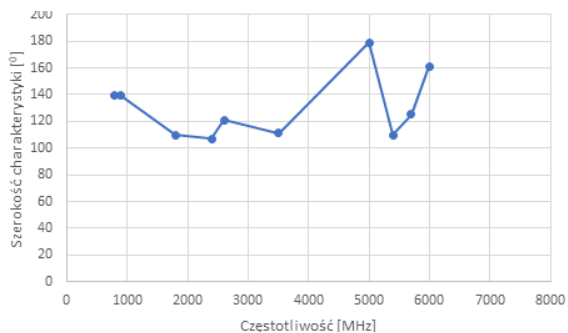
Rys. 4. Zysk sondy w funkcji częstotliwości



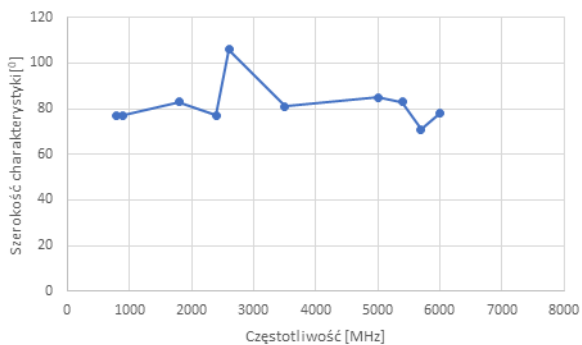
częstotliwość radiolinii 5,7 GHz. częstotliwość radiolinii 6 GHz.  
Rys. 3. Charakterystyka przestrzenna sondy pomiarowej

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono sondę pomiarową która może pracować w od 500 MHz do 7,6 GHz, szerokość pasma pracy wynosi 7,1 GHz, Zakładana wartość współczynnika fali nie przekracza w całym paśmie wartości 2. Sonda cechuje się zyskiem wynoszącym powyżej 5 dBi, przedstawione charakterystyki pokazują, że dla większości przypadków wartość zysku wynosi powyżej 6 dBi, najniższą zaobserwowaną wartością zysku była wartość 5,19 dBi uzyskana dla częstotliwości 5 GHz. Antena posiada dużą wartość kąta połowy mocy, co oznacza, że będzie bardzo dobrze odbierać pole elektromagnetyczne docierające do niej, w przypadku wykorzystania jej jako sondy pomiarowej spowoduje to znaczne uproszczenie pomiarów, ponieważ nie trzeba będzie bardzo dokładnie nakierowywać anteny na badany obiekt, a jedynie zgrubnie skierować ją w kierunku obiektu. Następnym krokiem w tej pracy jest opracowanie układu pozwalającego na uwzględnianie w pomiarach czasu trwania impulsu.



Płaszczyzna pozioma



Płaszczyzna pionowa

Rys.5 Szerokości charakterystyk promieniowania sondy pomiarowej

Maksymalna różnica zysku wynosi 1.81 dB jest to dla częstotliwości odpowiednio 0.9 [GHz] i 5.0 [GHz].

Autor: prof. dr hab. inż. Marian Wnuk Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [marian.wnuk@wat.edu.pl](mailto:marian.wnuk@wat.edu.pl)

#### LITERATURA

- [1] Balanis, C. A. (2005). "Antenna theory analysis and design". New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [2] Casula, G. A., Maxia, P. i Montisci, G. (2012). "Design of a Printed Wide Band Log-Periodic Antenna". *6th European Conference on Antennas and Propagation*. Cagliari: University of Cagliari.
- [3] Lo, Y. T. i Lee, S. W. (1993). "Antenna Handbook". New York: Van Nostrand Reinhold.
- [4] K, Behera, "Design of Microstrip Log Periodic Antenna for Wireless Applications", National Institute of Technology Rourkela, May, 2013
- [5] Shruthi, A. i Menon, K. (2016). "Design and Analysis of Modified Log Periodic Dipole Antenna with". Shanghai. 2019 Piers
- [6] Z. Chudy, M. Wnuk : "Pomiar mocy impulsu elektromagnetycznego zakresu mikrofal" Przegląd Elektrotechniczny 2014 | R. 90, nr 8 | 239-242