

Anna Witenberg
Maciej Walkowiak
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

Odpowiedzi prądowe w układzie dwóch anten liniowych ze szczególnym uwzględnieniem redukcji późnoczasowych niestabilności

Słowa kluczowe: anteny liniowe, całkowite równanie pola elektrycznego, metoda postępu w czasie (MOT), równanie Hallena w dziedzinie czasu

1. Wprowadzenie

Technologia szerokopasmowa (UWB) jest atrakcyjnym rozwiązaniem w nowoczesnych systemach komunikacji bezprzewodowej. Charakteryzuje ją, między innymi, emisja i odbiór ciągu modulowanych ultrakrótkich impulsów o czasie trwania rzędu kilku nanosekund. Ma to bezpośrednie przełożenie na obniżenie kosztów w układzie nadawanie - odbiór, zmniejsza prawdopodobieństwo zniekształceń transmitowanych informacji oraz ogranicza do minimum możliwość zakłócania procesu przesyłania danych.

Jest wiele dziedzin z możliwością zastosowania tej formy komunikacji:

- technika radiowa, telewizyjna i radarowa,
- szeroko rozumiane obrazowanie w medycynie,
- systemy ochrony i bezpieczeństwa,
- techniki sterowania i identyfikacji [20, 21].

Ze względu na bardzo szerokie pasmo częstotliwości transmitowanych sygnałów, prowadzone obecnie prace koncentrują się na modelowaniu i badaniu właściwości układów antena nadawcza – antena odbiorcza w dziedzinie czasu. Taki stan rzeczy jest naturalną konsekwencją analizy i zachowania się pól elektromagnetycznych, które przecież są procesami, a więc naturalnymi funkcjami czasu. Jest to szczególnie ważne przy projektowaniu i określaniu właściwości systemów antenowych, a szerzej – kanałów komunikacyjnych [22].

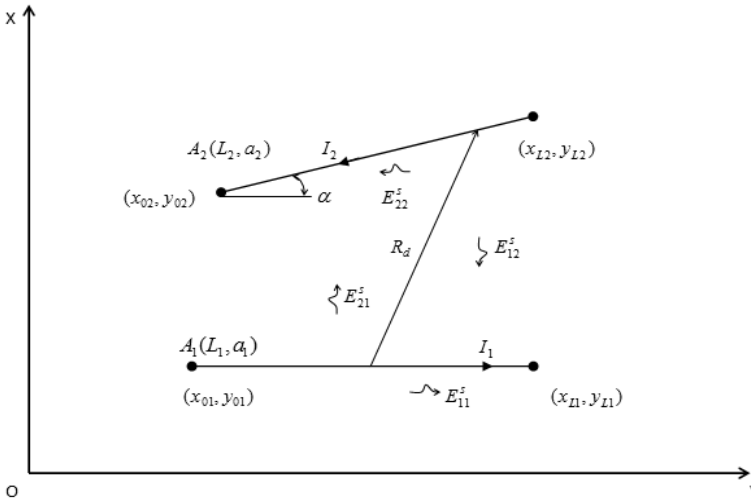
W artykule przedstawiono wyniki modelowania w dziedzinie czasu układu dwóch anten liniowych oświetlonych impulsem pola elektrycznego o kształcie krzywej Gaussa.

Zbadano wpływ długości kroków czasowych przyjętych w obliczeniach oraz wzajemnego położenia anten na wielkość późnoczesowych niestabilności powstających w procesie modelowania [10, 12].

Punktem wyjścia analizy tych zjawisk jest układ całkowych równań Hallena, których rozwiązanie opiera się na odpowiedniej dyskretyzacji w czasie i w przestrzeni. W procesie rozwiązywania równań wykorzystano powszechnie stosowaną w numerycznej analizie zjawisk elektromagnetycznych metodę MOT (marching-on in time) oraz schemat Bubnova-Galerkina [25].

2. Model badanego układu dwóch anten liniowych

Układ poddany modelowaniu w dziedzinie czasu składa się z dwóch doskonale przewodzących anten liniowych A_1 i A_2 o długościach i promieniach odpowiednio równych: (L_1, a_1) i (L_2, a_2) , przy czym $a_1 \ll L_1$ i $a_2 \ll L_2$, co spełnia założenie przybliżenia cienkoprzewodowego. Położenie anten w przestrzeni może być dowolne, ale dla większej przejrzystości przyjęto dwuwymiarowy układ współrzędnych XY z anteną A_1 położoną równoległe do osi OX . Modelowany układ pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Model badanego układu dwóch anten liniowych; $A_1(L_1, a_1)$ - antena A_1 o długości L_1 i promieniu a_1 ; $A_2(L_2, a_2)$ - antena A_2 o długości L_2 i promieniu a_2 ; odległość R_d opisana zależnością (3)

Antena A_1 oświetlona jest impulsem pola elektrycznego o natężeniu \mathbf{E}_1^i , pochodzącego z lokalnego generatora umieszczonego w środku anteny. Pola elektryczne w układzie spełniają następujące równania

$$\begin{aligned} \mathbf{1}_{n1} \times (\mathbf{E}_1^i + \mathbf{E}_{11}^s + \mathbf{E}_{12}^s) &= 0 \\ \mathbf{1}_{n2} \times (\mathbf{E}_{22}^s + \mathbf{E}_{21}^s) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

w których:

$\mathbf{1}_{n1}$ i $\mathbf{1}_{n2}$ - wektory normalne do powierzchni anteny pierwszej i drugiej

\mathbf{E}_1^i - pole elektryczne lokalnego generatora pobudzającego antenę A_1 w środku,

\mathbf{E}_{11}^s - składowa pola elektrycznego na antenie A_1 pochodzącego od prądu na A_1 ,

\mathbf{E}_{12}^s - składowa pola elektrycznego na antenie A_1 pochodzącego od prądu na A_2 ,

\mathbf{E}_{22}^s - składowa pola elektrycznego na antenie A_2 pochodzącego od prądu na A_2 ,

\mathbf{E}_{21}^s - składowa pola elektrycznego na antenie A_2 pochodzącego od prądu na A_1 .

Impulsową (w dziedzinie czasu) odpowiedź modelowanych anten opisuje następujący układ równań Hallena [19, 25]:

$$\begin{aligned} \int_{x_{01}}^{x_{L1}} \frac{I_1(x', t - R_{a1}/c)}{4\pi R_{a1}} dx' + \int_{x_{02}}^{x_{L2}} \frac{I_2(x', t - R_d/c - \tau) \cos \alpha}{4\pi R_d} dx' = \\ = F_{01} \left(t - \frac{x - x_{01}}{c} \right) + F_{L1} \left(t - \frac{x_{L1} - x}{c} \right) + \\ + \frac{1}{2\eta_0} \int_{x_{01}}^{x_{L1}} E_1^i(x', t - \frac{|x - x'|}{c}) dx' \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \int_{x_{01}}^{x_{L1}} \frac{I_1(x', t - R_d/c - \tau) \cos \alpha}{4\pi R_d} dx' + \int_{x_{02}}^{x_{L2}} \frac{I_2(x', t - R_{a2}/c)}{4\pi R_{a2}} dx' = \\ = F_{02} \left(t - \frac{x - x_{02}}{c} \right) + F_{L2} \left(t - \frac{x_{L2} - x}{c} \right) \end{aligned}$$

w którym:

I_1 i I_2 są natężeniami prądów płynących odpowiednio w antenach 1 i 2,

η_0 - impedancja falowa próżni; $\eta_0 = 120\pi$,

c - prędkość fali elektromagnetycznej w próżni; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Odległości między punktami obserwacji a punktami całkowania na antenach dane są wzorami:

$$\begin{aligned} R_{a1} &= \sqrt{(x - x'_1)^2 + a_1} \\ R_{a2} &= \sqrt{(x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2 + a_2^2} \\ R_d &= \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Czas opóźnienia τ w oświetlaniu elementów x' jest równy

$$\tau = \frac{x' \cdot \sin \alpha}{c} \quad (4)$$

Funkcje $F_{Om}(t)$ i $F_{Lm}(t)$ ($m=1,2$) opisujące wielokrotne odbicia fal prądowych na końcach anten wyrażają się przez pewne funkcje pomocnicze $K_{Om}(t)$ i $K_{Lm}(t)$ zdefiniowane w [23, 25], następująco:

$$F_{Om}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} K_{Om}\left(t - \frac{2 \cdot n \cdot L_m}{c}\right) - \sum_{n=0}^{\infty} K_{Lm}\left(t - \frac{(2n+1) \cdot L_m}{c}\right) \quad (5)$$

$$F_{Lm}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} K_{Lm}\left(t - \frac{2 \cdot n \cdot L_m}{c}\right) - \sum_{n=0}^{\infty} K_{Om}\left(t - \frac{(2n+1) \cdot L_m}{c}\right) \quad (6)$$

i wyznaczane są dla warunków granicznych na końcach anten

$$I_m((x_{Om}, y_{Om}); t) = I_m((x_{Lm}, y_{Lm}); t) = 0.$$

Zakładamy również, że anteny nie są wzbudzone przed czasem $t=0$, tzn. $I_m(t)=0$ dla $t \leq 0$.

Układ równań (2) rozwiązujemy metodą momentów [12] zamieniając go na układ równań macierzowych.

Prąd $I_m(x, t)$ w równaniach (2) aproksymujemy zależnością [24]

$$I_m(x, t) = \sum_{n=1}^N I_{m,n}(t_k) \cdot f_{m,n}(x) \quad (m=1,2) \quad (7)$$

w której $I_{m,n}(t_k)$ jest nieznaną wartością natężenia prądu na n -tym segmencie m -tej anteny, a $f_{m,n}(x)$ jest pewną przestrzenną funkcją bazową. Innymi słowy, rozwiązując numerycznie układ równań (7) do dyskretyzacji przestrzeni wykorzystujemy procedurę Galerkin-Bubnova oraz schemat MOT do dyskretyzacji w czasie.

3. Specyfikacja założeń przyjętych do obliczeń numerycznych

Analizie poddano stabilność późnoczasowej odpowiedzi prądowej anten, tzn. wartości prądów zaindukowanych na antenach w funkcji długości (wartości) kroków czasowych Δt dla anteny A_1 i wartości kątów α pod jakimi impuls pola elektrycznego pobudza antenę A_2 .

Obliczenia przeprowadzono dla trzech wartości Δt :

- $\Delta t_1 = \frac{\Delta x}{c} = 0,1667ns$,
- $\Delta t_2 = 2 \cdot \frac{\Delta x}{c} = 0,3334ns$,
- $\Delta t_3 = 2,5 \cdot \frac{\Delta x}{c} = 0,4168ns$

oraz dwóch wartości α :

- $\alpha_1 = 30^\circ$,
- $\alpha_2 = 60^\circ$.

Odpowiedzi prądowe na antenach pokazano w punktach będących ich geometrycznym środkiem i odległych od siebie o $d = 2m$.

Przyjęto następujące parametry geometryczne anten:

- $2L_1 = 2L_2 = 1m$,
- $a_1 = a_2 = 0,002m$.

Każdą z anten podzielono na 20 segmentów o jednakowej długości $\Delta x = 0,05m$.

Antenę A_1 pobudzo w środku impulsem pola elektrycznego E_1^i o kształcie krzywej Gaussa

$$E_1^i = \frac{4E_0}{cT\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{4}{T}(t-t_0)\right)^2\right] \quad (8)$$

gdzie:

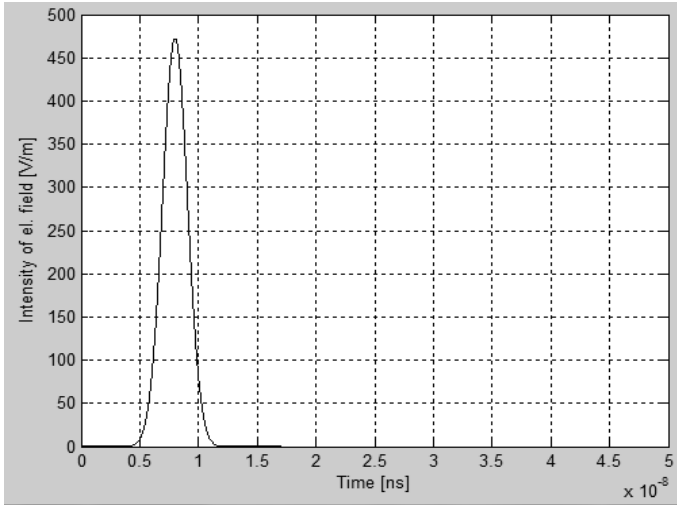
E_0 - wartość natężenia pola elektrycznego; $E_0 = 120\pi$,

T - szerokość impulsu; $T = 6ns$,

t_0 - przesunięcie maksimum impulsu; $t_0 = 8ns$,

c - prędkość fali elektromagnetycznej; $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

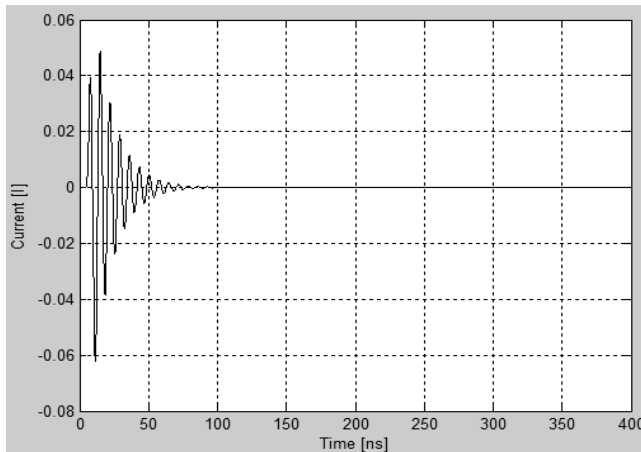
Przebieg impulsu Gaussa (8) pokazano na rysunku 2.



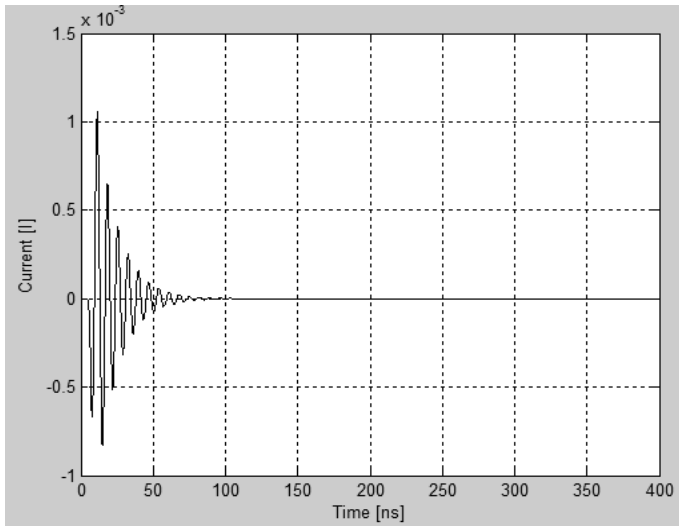
Rys. 2. Impuls fali elektromagnetycznej E_1^i opisany równaniem (8)

4. Symulacje komputerowe i analiza wyników

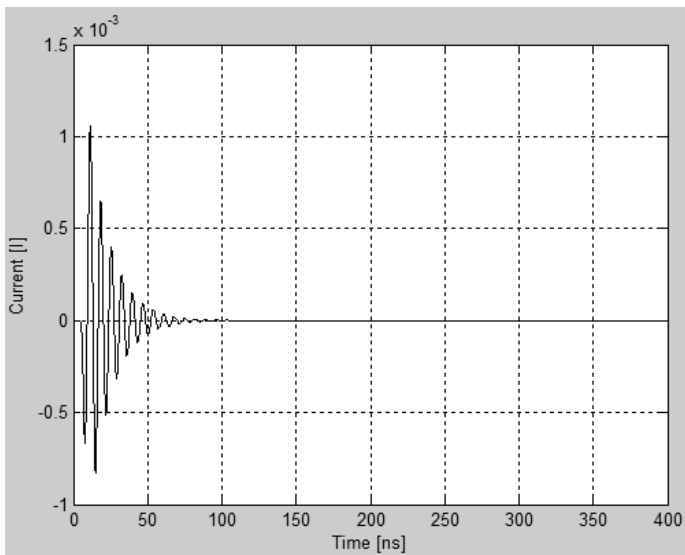
Na rysunkach 3-11 przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, tzn. prądy w środku anten A_1 i A_2 w modelu jak na rysunku 1. Dla kroku czasowego $\Delta t_1 = 0,1667 \text{ ns}$:



Rys. 3. Odpowiedź prądowa anteny A_1

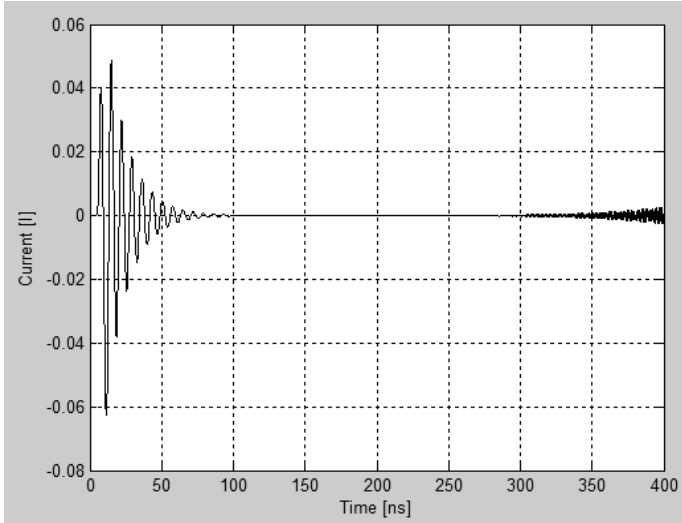


Rys. 4. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 30^\circ$

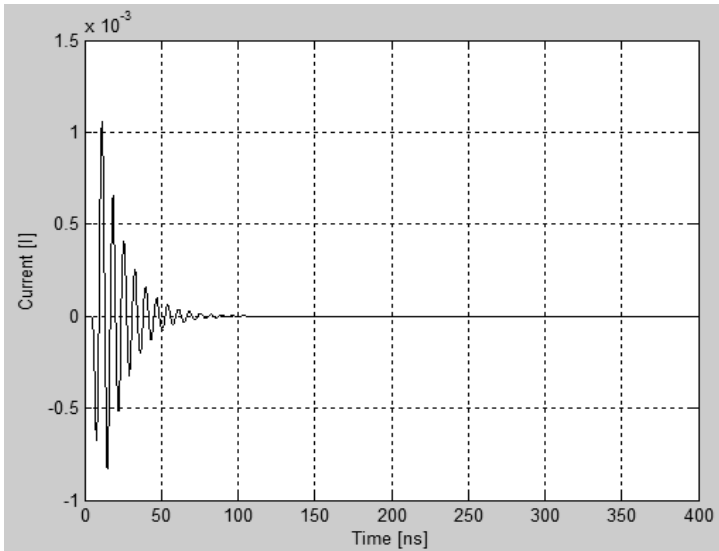


Rys. 5. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 60^\circ$

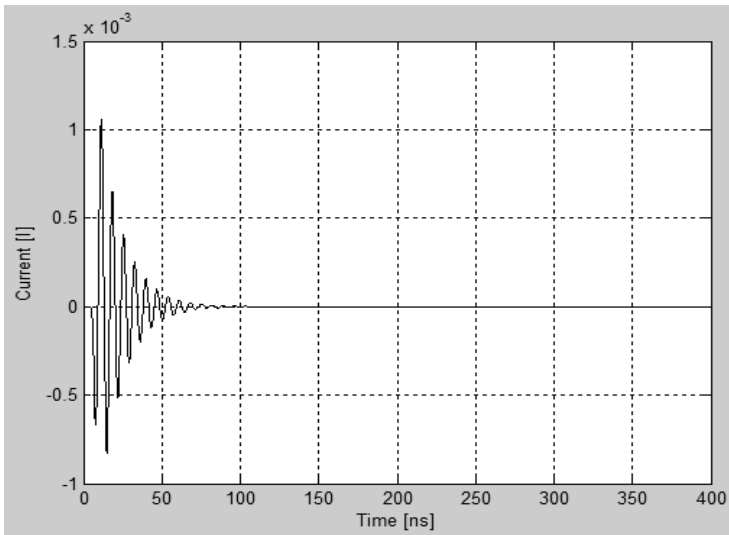
Dla kroku czasowego $\Delta t_2 = 0,3334 \text{ ns}$:



Rys. 6. Odpowiedź prądowa anteny A_1

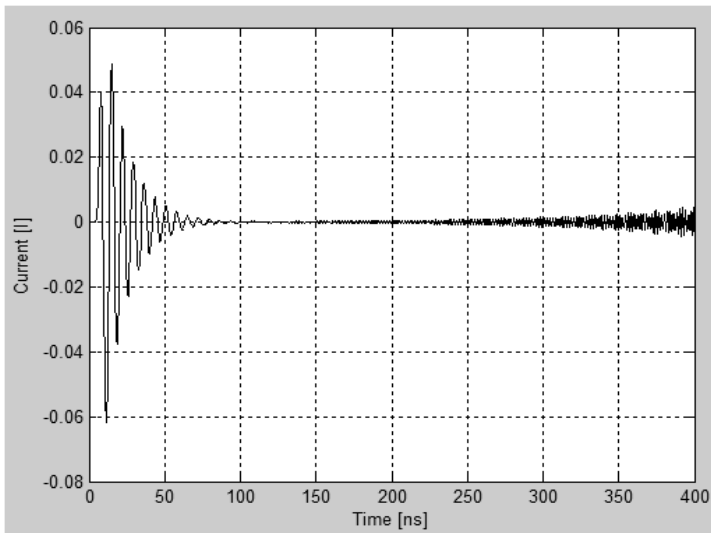


Rys. 7. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 30^\circ$

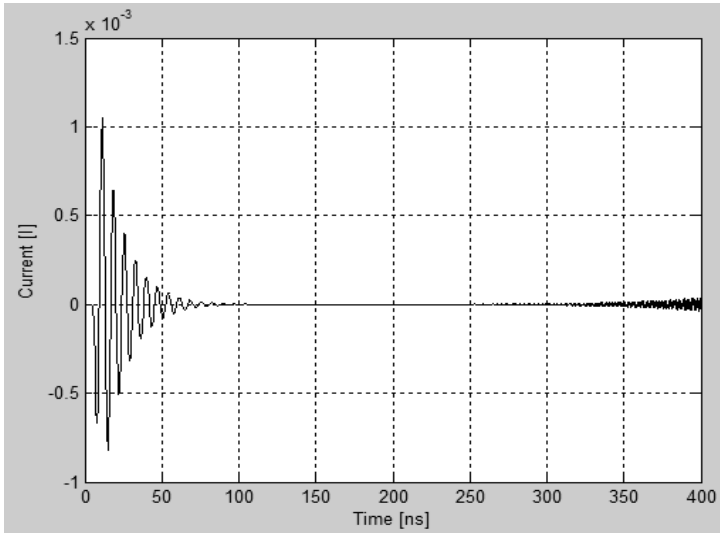


Rys. 8. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 60^\circ$

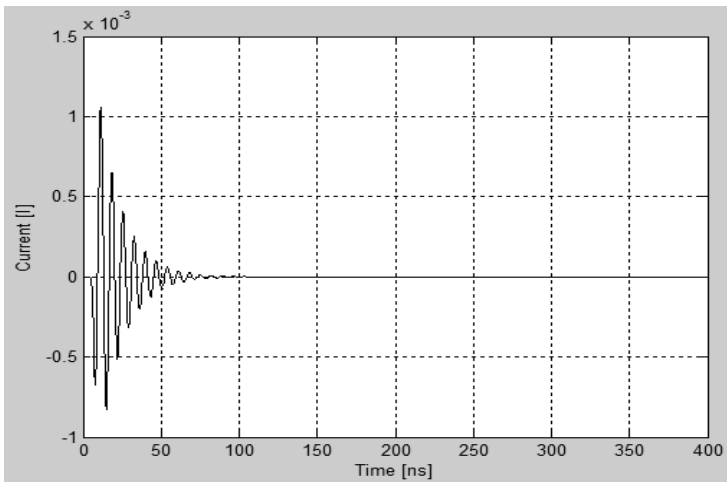
Dla kroku czasowego $\Delta t_3 = 0,4168$ ns :



Rys. 9. Odpowiedź prądowa anteny A_1



Rys. 10. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 30^\circ$



Rys. 11. Odpowiedź prądowa anteny A_2 dla kąta $\alpha = 60^\circ$

W tabeli 1 zebrano wyniki symulacji komputerowych. Uwzględniono w niej późniejsze odpowiedzi anten pod względem pojawienia się niestabilności.

Tabela 1. Wyniki symulacji komputerowych dla przyjętego modelu anten liniowych, „-” oznacza brak niestabilności w późnoczasowej odpowiedzi anteny, „+” oznacza pojawienie się niestabilności w późnoczasowej odpowiedzi anteny

Antena					
A_1		A_2			
		$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 60^\circ$	
krok czasowy	niestabilności	krok czasowy	niestabilności	krok czasowy	niestabilności
0,1667 ns	-	0,1444 ns	-	0,0834 ns	-
0,3334 ns	+	0,2887 ns	-	0,1667 ns	-
0,4168 ns	+	0,3609 ns	+	0,2084 ns	-

5. Podsumowanie

Wyniki badań odpowiedzi prądowych w układzie dwóch anten liniowych prowadzą do wniosków:

- brak niestabilności w późnoczasowej odpowiedzi anteny bezpośrednio oświetlonej impulsem Gaussa (antena A_1) dla długości kroku czasowego $\Delta t = \Delta x / c$ i obecność niestabilności dla $\Delta t > \Delta x / c$,
 - dla $\Delta t = 2\Delta x / c$ po około 300 ns,
 - dla $\Delta t = 2,5\Delta x / c$ po około 150 ns,
- brak niestabilności w późnoczasowej odpowiedzi anteny A_2 dla długości kroków czasowych $\Delta t = \Delta x / c$ i $\Delta t = 2\Delta x / c$ (antena A_1) i wartościach kąta $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 60^\circ$,
- obecność niestabilności w odpowiedzi anteny A_2 dla długości kroku czasowego $\Delta t = 2,5\Delta x / c$ (antena A_1) i $\alpha = 30^\circ$ (po około 300 ns),
- brak niestabilności w odpowiedzi anteny A_2 dla długości kroku czasowego $\Delta t = 2,5\Delta x / c$ (antena A_1) i $\alpha = 60^\circ$.

Fakt pojawienia się oscylacji (lub ich brak) w późnoczesowej odpowiedzi anteny A_2 jest silnie skorelowany z długością kroku czasowego przyjętą w wyznaczaniu odpowiedzi prądowej anteny A_1 oraz wartością kąta α . Kąt α wpływa na zmniejszenie długości kroku czasowego przy wyznaczaniu odpowiedzi prądowej anteny A_2 (zależność odwrotnie proporcjonalna). Na skuteczniejsze tłumienie oscylacji w późnoczesowej części rozwiązania układu równań (2) metodą MOT może istotnie wpływać wartość kąta α zmniejszająca błędy systematyczne wprowadzane do rozwiązania. Udowodnienie tej tezy wymaga dalszych badań.

W uzupełnieniu dodajmy, że każda z odmian metody MOT ma swoje wady i zalety i nie jest wolna od niestabilności mających charakter narastających oscylacji o wysokiej częstotliwości, które pojawiają się w późnoczesowej części rozwiązania. Dokładność i stabilność rozwiązań całkowitych równań Hallena w dziedzinie czasu silnie zależy od długości (wartości) kroku czasowego Δt przyjętego w procesie obliczeń.

Bibliografia

1. Rao S. M.: *Time Domain Electromagnetics*, Academic Press, London, 1999.
2. Jung B. H., Sarkar T. K.: *Time-domain electric-field integral equation with central finite difference*, Microwave and Optical Technology Letters, 2001, vol.31, no.6, pp. 429-434.
3. Manara G.: *A space-time discretization criterion for a stable time-marching solution of the electric field integral equation*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, vol.45, no.3, pp. 527-532.
4. Weile S. D., Pisharody G., Chen N. Y., Shanker B., Michielssen E.: *A novel scheme for the solution on the time-domain integral equations of electromagnetics*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, vol.52, no.1, pp. 283-295.
5. Chung Y. S.: *Solution of time domain electric field integral equation using the Laguerre polynomials*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, vol.52, no.9, pp. 2319-2328.
6. Vechinski A. D., Rao S. M.: *A stable procedure to calculate the transient scattering by conducting surfaces of arbitrary shapes*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, vol.40, no.6, pp. 661-665.
7. Sadigh A., Arvas E.: *Treating the instabilities in marching-on-in-time method from a different perspective*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, vol.41, no.12, pp. 1695-1702.
8. Wang X., Wildman R. A., Weile D. S., Monk P. A.: *A finite difference delay modeling approach to the discretization of the time domain integral equations of electromagnetics*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, vol.56, no.8, pp. 2442-2452.

9. Davis P. J.: *On the stability of time-marching schemes for the general surface electric field integral equation*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, vol.44, no.11, pp. 1467-1473.
10. Makarov S. N.: *Antenna and EM Modeling with Matlab*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
11. Rao S. M., Wilton D. R., Glisson A. W.: *Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, vol.30, no.5, pp. 409-418.
12. Jung B. H., Sarkar T. K., Ji Z., Chung Y.: *Time-domain analysis of conducting wire antennas and scatterers*, Microwave and Optical Technology Letters, 2003, vol.38, no.6, pp. 433-436.
13. Rao S. M., Sarkar T. K.: *An efficient method to evaluate the time-domain scattering from arbitrarily shaped conducting bodies*, Microwave and Optical Technology Letters, 1998, vol.17, pp. 321-325.
14. Liu T. K., Mei K. K.: *A time domain integral equation solution for linear antennas and scatterers*, Radio Sci., 1973, vol.8.
15. Smith P. D.: *Instabilities in time marching methods for scattering: cause and rectification*, Electromagn., 1990, vol.10, pp. 439-451.
16. Walkowiak M.: *Zjawiska przejściowe w antenach liniowych i rozpraszaczach*, WSP, Zielona Góra, 1994.
17. Witenberg A., Walkowiak M.: *Rozkład prądu wzdłuż anten liniowych – modele Pocklingtona i Hallena*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej, 2010, nr 2, s. 37-46.
18. Witenberg A., Walkowiak M.: *Wykorzystanie wielomianów Laguerre'a do rozwiązania równania Hallena w dziedzinie czasu*, Metody Informatyki Stosowanej, Szczecin, 2011, nr 1, s. 183-192.
19. Sagnard F., Uguen B., El-Zein G.: *Reception of an oblique electromagnetic plane wave by a linear-wire antenna: A time domain analysis*, Microwave and Optical Technology Letters, 2003, vol.38, no.4, pp. 281-291.
20. Sagnard F., El-Zein G.: *Waveform prediction of a pulse Communications link between antennas modeled by a combination of thin-wires*, Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2006, Cambridge, USA, pp. 137-142.
21. Smith G.: *Teaching antenna reception and scattering from a time – domain perspective*, AM. J. Phys., 2002, vol.70, pp. 829-844.
22. Immoreev I. J.: *Radiation of ultra-wideband (UWB) signals*, Radio Physics and Radio Astronomy, 2002, vol.7, no.4, pp. 389-393.
23. Gomez Martin R., Rubio Bretones A., Gonzales Garcia S.: *Some thoughts about transient radiation by straight thin wires*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine, 1999, vol.41, no.3, pp. 24-33.

24. Witenberg A., Walkowiak M.: *Rozwiązanie równania pola elektrycznego modelującego anteny liniowe w dziedzinie czasu*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej, 2011, nr 3, s. 123-132.
25. Poljak D., Antonijevic S., Drissi K., Kerroum K.: *Transient Response of Straight Thin Wires Located at Different Heights Above a Ground Plane Using Antenna Theory and Transmission Line Approach*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010, vol.52, no.1, pp. 108-115.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowania w dziedzinie czasu układu dwóch anten liniowych za pomocą układu całkowych równań Hallena. Do wyznaczenia odpowiedzi prądowych anten wykorzystano powszechnie stosowaną metodę postępu w czasie (metoda MOT) oraz schemat Galerkina-Bubnova. Wyniki modelowania potwierdzają słuszność przyjętych założeń o bezpośrednim wpływie długości kroków czasowych przyjętych w obliczeniach i położenia anten względem siebie na wielkość niestabilności pojawiających się w późnoczasowych odpowiedziach prądowych badanych obiektów.

Abstract

This article is focused on modeling of two interacting thin-wire antennas in time domain. The time-domain antenna theory formulation is based on a set of the space-time Hallen integral equations. We used the marching-on in time (MOT) method and Galerkin-Bubnov procedure to obtain a transient responses of antennas. An analytic formulation to study the reception process, at an oblique angle of incidence, of a wire antennas excited by a transient electric fields (short Gaussian pulses) is proposed. The length of time steps and angles of incidence influences the stability of the MOT algorithm. These facts are discussed and demonstrated in numerical results.

Keywords: linear antennas, electric field integral equation (EFIE), solution of time domain EFIE – late time instabilities, marching-on-in time method (MOT), Hallen's equation in time domain