



NIELINIOWA PROPAGACJA WIĄZKI ULTRASONOGRAFICZNEJ W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRÓW OŚRODKA TLUMIĄCEGO

Dependence of non-linear ultrasound beam propagation on
acoustic parameters of attenuating media

T. Kujawska, J. Wójcik

Zakład Ultradźwięków, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
tkujaw@ippt.gov.pl

STRESZCZENIE

Technika wizualizacji harmonicznej tkanek (THI), coraz szerzej stosowana ostatnio w praktyce klinicznej do badań ultrasonograficznych, wykorzystuje zjawisko nieliniowej propagacji fali ultradźwiękowej w strukturach biologicznych w celu polepszenia jakości obrazowania diagnostycznego. Dlatego tak ważna jest znajomość nieliniowych własności tych struktur, a w szczególności parametru nieliniowości. W pracy przedstawiono wyniki badań zależności nieliniowej propagacji wiązki ultradźwiękowej od liniowych oraz nieliniowych właściwości tłumiącego ośrodka. Zbadano zależność rozkładów harmonicznych wiązki od gęstości, prędkości akustycznej, współczynnika tłumienia oraz jego zależności od częstotliwości, a także parametru nieliniowości ośrodka. Analizę przeprowadzono na podstawie szeregu numerycznych symulacji przestrzennych rozkładów harmonicznych osiowosymetrycznej (2D) nieliniowej wiązki ultradźwiękowej propagującej się w dwuwarstwowej strukturze zawierającej wodę i standardową ciecz lub wodę i tkankę biologiczną. Woda występuje jako ośrodek odniesienia o znanym parametrze nieliniowości $B/A = 5.2$. Narzędziem do szybkiej symulacji numerycznej, pozwalającej przewidzieć zachowanie się nieliniowej wiązki dla zadanych warunków brzegowych, posłużył użytkowy program komputerowy (2D solver) opracowany przez drugiego autora na bazie numerycznego rozwiązania nieliniowego równania falowego dla skalarnego potencjału akustycznego. Równanie to uwzględniła wpływ efektów dyfrakcji, nieliniowości oraz termo-lepkiej absorpcji ośrodka na formowaną wiązkę. Dyfrakcja jest zawarta w przybliżeniu parabolicznym, nieliniowość i absorpcja – w aproksymacji kwazi-płaskiej fali. Analiza otrzymanych wyników symulacji numerycznych dla różnych warunków brzegowych pozwoliła stwierdzić, że dla ośrodka biologicznego dominujący wpływ na rozkład wyższych harmonicznych wiązki ma słabosygnalowy współczynnik tłumienia oraz jego zależność od częstotliwości. Im mniejszy jest słabosygnalowy współczynnik tłumienia ośrodka oraz częstotliwość promieniowania, tym większy wpływ na propagację wyższych harmonicznych wiązki ma wartość jego parametru nieliniowości.

1. WPROWADZENIE

Poziom pobudzenia niektórych ultrasonograficznych aparatów diagnostycznych jest wystarczająco wysoki, żeby generowały one do badanej struktury impulsy ultradźwiękowe o wysokiej amplitudzie ciśnienia. Wypromieniowane fale akustyczne są zniekształcane w trakcie propagacji w ośrodku stratnym dzięki samoistnej generacji harmonicznych

początkowej częstotliwości promieniowanej przetwornikiem piezoelektrycznym. Tak więc zniekształcenia przebiegów czasowych fali ciśnienia podczas propagacji w ośrodku stratnym wskazuje na obecność dodatkowych wyższych harmonicznych w jej widmie. Dlatego do opisu nieliniowej propagacji takiej fali w polu bliskim źródła promieniowania zastosowano nieliniowe równanie falowe dla skalarnego potencjału akustycznego [4]. Równanie to uwzględnia wpływ efektów dyfrakcji, nieliniowości oraz termo-lepkiej absorpcji ośrodka na propagację wiązki akustycznej. Dyfrakcja uwzględniona jest w przybliżeniu parabolicznym, natomiast nieliniowość oraz absorpcja w przybliżeniu kwazi-płaskiej fali.

W obecnej pracy do rozwiązania równania nieliniowego zastosowano podejście numeryczne opracowane przez drugiego autora. Algorytm numeryczny polegał na obliczaniu zmian widmowych (transformat Fouriera-Bessela) propagującej się fali akustycznej po jej przemieszczeniu się wzdłuż kierunku propagacji z na odległość Δz .

2. METODA OBLICZENIOWA

Na bazie numerycznego rozwiązania w dziedzinie częstotliwości nieliniowego równania dla przypadku okresowych sygnałów akustycznych promieniowanych przez okrągłe źródło do ośrodka stratnego opracowano użytkowy program komputerowy (2D solver) o dużej mocy obliczeniowej. Powyższy solver umożliwił dokonywanie szybkiej symulacji rozkładów ciśnienia harmonicznego w przestrzeni dla nieliniowej wiązki promieniowanej przez osiowosymetryczne źródło do warstwowego ośrodka tłumiącego dla zadanych warunków brzegowych. Jedną z zalet powyższego solvera jest przystosowanie do rozwiązywania tak skomplikowanego zagadnienia korzystając tylko ze środowiska systemu operacyjnego WINDOWS powszechnie dostępnych komputerów osobistych PC. Dlatego wykorzystywano go jako narzędzia do przewidywania zachowania się wiązki w zależności od warunków brzegowych. Do przeprowadzenia symulacji przestrzennego rozkładu harmonicznego pola dla jednego przypadku propagacji niezbędne jest wprowadzenie do solvera następujących warunków brzegowych, które są jego parametrami wejściowymi:

- 1) parametrów źródła zaburzenia (promienia przetwornika, jego ogniskowej);
- 2) funkcji apodyzacji (poprzecznego rozkładu ciśnienia na powierzchni promieniującej);
- 3) amplitudy, częstotliwości nośnej, czasu trwania, częstotliwości powtarzania oraz kształtu obwiedni początkowego impulsu akustycznego promieniowanego źródłem;
- 4) zakresu penetracji wzdłuż oraz w poprzek osi promieniowania wiązki;
- 5) ilości warstw badanego ośrodka, ich grubości, liniowych i nieliniowych parametrów akustycznych każdej warstwy (gęstości, prędkości akustycznej, współczynnika tłumienia oraz wykładnika b jego zależności od częstotliwości, parametru nieliniowości ośrodka).

3. WARUNKI BRZEGOWE

Wykorzystując powyższy solver przeprowadzono szereg symulacji numerycznych propagacji nieliniowej wiązki ultradźwiękowej promieniowanej przez płaskie okrągłe źródło do dwuwarstwowej struktury zawierającej wodę i badaną ciecz (olej kukurydziany, glikol etylinowy, glicerynę) lub wodę i badaną tkankę miękką (krew świni, homogenizowaną wątrobę świni) o liniowych i nieliniowych parametrach znanych z literatury [1] (Tabela 1). Grubość warstwy wody i badanej struktury wybierano na podstawie wyników symulacji numerycznych, przedstawionych w pracy [3] i dotyczących osiowych rozkładów harmonicznego 2D wiązki, promieniowanej do wody przez okrągłe płaskie źródło w zależności od jego parametrów geometrycznych oraz amplitudy i częstotliwości propagującego się początkowego impulsu akustycznego. Warstwa wody w dwuwarstwowej

strukturze miała grubość równą odległości od źródła promieniowania, w której zaczynał się gwałtowny wzrost drugiej harmonicznej wiązki propagującej się w wodzie przy założeniu identycznych pozostałych warunków brzegowych.

Tabela 1. Parametry akustyczne badanych ośrodków w temperaturze 22°C

Ośrodek	Gęstość (kg/m ³)	Prędkość akustyczna (m/s)	Współczynnik tłumienia (Np/m · Hz ^b)	<i>B/A</i> (literatura)	<i>b</i>
Destylowana odgazowana woda	997	1497	$2.8 \cdot 10^{-14}$	5.2	2
Glikol etylinowy	1110	1660	$18 \cdot 10^{-14}$	9.9	2
Olej kukurydziany	920	1470	$70 \cdot 10^{-14}$	10.5	2
Gliceryna	1260	1890	$570 \cdot 10^{-14}$	9.4	2
Krew świni	1080	1600	$16 \cdot 10^{-7}$	6.2	1.1
Homogenizowana wątroba świni	1060	1550	$78 \cdot 10^{-7}$	6.6	1

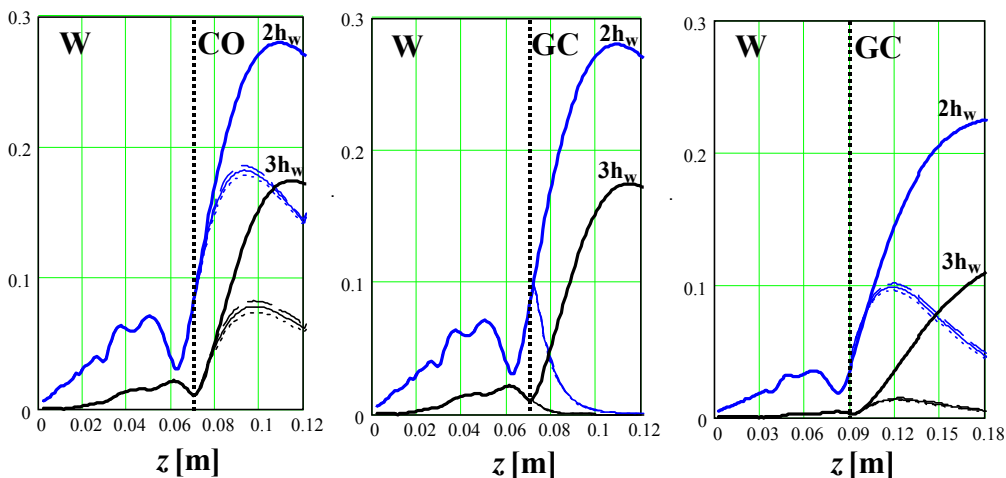
b – wykładnik zależności współczynnika tłumienia od częstotliwości

Obliczenia przeprowadzono dla impulsów fali akustycznej zawierających 8 okresów częstotliwości nośnej, wynoszącej $f_0 = 1, 2, 3$ MHz, o wartości amplitudy ciśnienia początkowego $p_0 = 0.4$ MPa przy założeniu, że stosunek długości promieniowanego impulsu do okresu jego powtarzania pozostaje niezmienny dla każdej z powyższych częstotliwości f_0 i wynosi 0.4. Obwódka przyjętego do obliczeń początkowego impulsu oraz analityczna funkcja apodyzacji apertury są przedstawione w publikacji [2]. Dla rozpatrzonych przypadków przeanalizowano zależność rozkładów harmonicznych wiązki od parametru nieliniowości badanego ośrodka. Zbadano również wpływ wartości wykładnika *b* (zależności współczynnika tłumienia w ośrodku od częstotliwości) na rozkład harmonicznych wiązki. Dla ośrodków ciekłych wartość $b = 2$, natomiast dla tkanek biologicznych znajduje się w granicach 1÷1.4. W obliczeniach zakładano 3 wartości parametru nieliniowości *B/A* badanego ośrodka - znaną z literatury oraz $B/A \pm 10\%$. Odgazowana destylowana woda występowała jako ośrodek odniesienia o znanym parametrze nieliniowości, równym 5.2.

4. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Analiza wyników symulacji osiowych rozkładów harmonicznych nieliniowej wiązki propagującej się w dwuwarstwowej strukturze woda-ciecz oraz woda-tkanka miękka dla szeregu warunków brzegowych pozwoliła stwierdzić, że im większy jest współczynnik tłumienia badanego ośrodka oraz parametr *b*, tym mniejszy wpływ na rozkład 2-giej oraz wyższych harmonicznych wiązki ma wartość jego parametru nieliniowości *B/A*. W tej sytuacji dla silnie tłumiącego ośrodka dokładność wyznaczania jego parametru nieliniowości w granicach $\pm 5\%$ metodą porównawczą, zaproponowaną w pracy [2], można osiągnąć obniżając częstotliwość promieniowania źródła, zwiększając jego średnicę lub amplitudę ciśnienia początkowego. Na Rys. 1 (z lewej) przedstawiono obliczony rozkład osiowy 2-jej i 3-jej harmonicznej wiązki o początkowej amplitudzie ciśnienia 0.4 MPa oraz częstotliwości 3 MHz, promieniowanej przez okrągłe płaskie źródło o średnicy 15 mm do dwuwarstwowej struktury składającej się z 7 cm wody + 5 cm oleju kukurydzianego przy założeniu wartości parametru nieliniowości oleju $(B/A)_{co} = 10.5 \pm 10\%$. Maksymalne różnice w rozkładzie harmonicznych dla tych 3-ch wartości $(B/A)_{co}$ są rzędu kilku setnych, jednak dokładność akwizycji danych nowoczesnych oscyloskopów wynosi co najmniej 10^{-4} , co zapewnia wystarczającą rozdzielczość przy porównywaniu mierzonych rozkładów harmonicznych z rozkładami symulowanymi dla wartości parametru *B/A* oscylujących wokół wartości

nominalnej o kilka %. Natomiast w przypadku gliceryny, dla której wartość współczynnika tłumienia jest 8 razy większa niż w oleju kukurydzianym, przy zachowaniu takich samych warunków brzegowych nie otrzymamy wychwytywalnej różnicy w rozkładach harmonicznych dla 3-ch rozpatrywanych wartości $(B/A)_{gc} = 9.4 \pm 10\%$ (Rys.1, środek). Wykrywalne różnice amplitud symulowanych rozkładów harmonicznych dla tych samych wartości $(B/A)_{gc}$ można otrzymać zmniejszając częstotliwość promieniowanej wiązki przy jednoczesnym zwiększeniu średnicy źródła (Rys.1, z prawej).



Rys.1. Symulowane osiowe rozkłady 2-giej ($2h_w$) oraz 3-ciej ($3h_w$) harmonicznej wiązki generowanej przez płaskie źródło promieniujące impulsy o amplitudzie początkowej 0.4 MPa do wody (linie grube) oraz do dwuwarstwowej struktury: 7 cm wody + 5 cm oleju kukurydzianego (z lewej); 7 cm wody + 5 cm gliceryny (środek); 9 cm wody + 9 cm gliceryny (z prawej). W pierwszych dwóch przypadkach średnica źródła wynosiła 15 mm, a częstotliwość promieniowania 3 MHz przy założeniu 3-ch różnych wartości parametru nieliniowości $B/A \pm 10\%$ (linie cienkie: ciągła, przerywana, kropkowana). W trzecim przypadku średnica źródła wynosiła 30 mm, a częstotliwość promieniowania 1 MHz.

5. WNIOSKI

Analiza otrzymanych wyników pozwoliła stwierdzić, że tłumienie w badanych ośrodkach oraz częstotliwość promieniowania mają dominujący wpływ na propagację harmonicznych wiązki w porównaniu z wartością ich parametru nieliniowości.

LITERATURA

1. F. DONG, E. MADSON, M. MACDONALD, J. ZAGRZEBSKI, Nonlinearity parameter for tissue-mimicking materials, *Ultrasound in Med. & Biol.*, 25, 5, 831-838, 1999
2. T. KUJAWSKA, A new method for determination of the acoustic non-linearity parameter B/A in multi-layer biological media, *Proc. of the World Congress on Ultrasound*, 81-84, 2003
3. T. KUJAWSKA, J. WÓJCIK, Harmonic ultrasound beams forming by means of radiating source parameters, *Hydroacoustics*, vol. 7, 135-143, 2004
4. J. WÓJCIK, A new theoretical basis for numerical simulations of nonlinear acoustic fields, *Proceedings of the 15th ISNA*, Ed. Am. Soc. of Physics, 524, 141-144, 2000.