



ULTRADŹWIĘKI KODOWANE ZA POMOCĄ SEKWENCJI CIĄGÓW GOLAY'A - ZASTOSOWANIE DO DENSYTOMETRII KOŚCI GĄBCZASTEJ

Golay coded ultrasound – application in trabecular bone densitometry

Jerzy Litniewski, Andrzej Nowicki, Igor Trots

Zakład Ultradźwięków IPPT– PAN, Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa
jlitn@ippt.gov.pl

Streszczenie

Zastosowanie sygnałów kodowanych w ultradźwiękach medycznych umożliwia podwyższenie stosowanych częstotliwości oraz zwiększenie zakresu penetracji fal przy zachowaniu rozdzielczości i bez potrzeby zwiększania amplitudy nadawanego sygnału. Takie podejście nie zwiększa prawdopodobieństwa wystąpienia niebezpiecznych dla organizmów żywych efektów biologicznych mimo, że całkowita ilość wypromieniowanej do tkanki energii jest znacznie większa. Celem pracy było zbadanie własności i przydatności sygnałów kodowanych za pomocą sekwencji kodu Golaya do pomiarów tłumienia tkanek charakteryzujących się dużą absorpcją i współczynnikiem rozproszenia tak jak ma to miejsce w przypadku tkanki kości gąbczastej. Doświadczenia przeprowadzone z użyciem kodowania do wyznaczania parametrów tłumieniowych kości za pomocą sygnału wstecznie rozproszonego dowodzą, że zastosowanie sygnału nadawczego w postaci kodu Golaya umożliwi zwiększenie częstotliwości pomiarowej oraz rozszerzy obszar zastosowań densytometrii ultradźwiękowej o głęboko położone i jednostronnie dostępne kości.

1. Wstęp

Celem pracy było wykazanie, że kodowane za pomocą sekwencji Golaya fale ultradźwiękowe mogą być z powodzeniem stosowane do pomiaru *in vivo* własności tłumienia tkanki kości gąbczastej w zakresie częstotliwości powyżej 0.5 MHz. W ramach pomiarów i obliczeń wyznaczana była wartość współczynnika BUA (Broadband Ultrasonic Attenuation) ponieważ współczynnik ten jest ważnym i powszechnie akceptowanym wyznacznikiem gęstości kości gąbczastej [2], bardzo pomocnym w diagnozie osteoporozy.

2. Komplementarne ciągi Golaya

Sygnały kodowane, których własności były badane w tej pracy, opierają się na komplementarnych sekwencjach Golaya, po raz pierwszy zaproponowanych w 1961 roku

[1]. Sekwencje te składają się z par kodów binarnych i należą do szerszej grupy ciągów zwanych parami komplementarnymi. Każda z par składa się z dwóch ciągów o tej samej długości N . Funkcje autokorelacji tych ciągów charakteryzują się tym, że ich listki boczne mają taką samą amplitudę a różnią się znakiem. Suma obu funkcji pozwala na otrzymanie złożonej funkcji autokorelacji z maksimum równym $2N$ i całkowicie wykasowanymi listkami bocznymi.

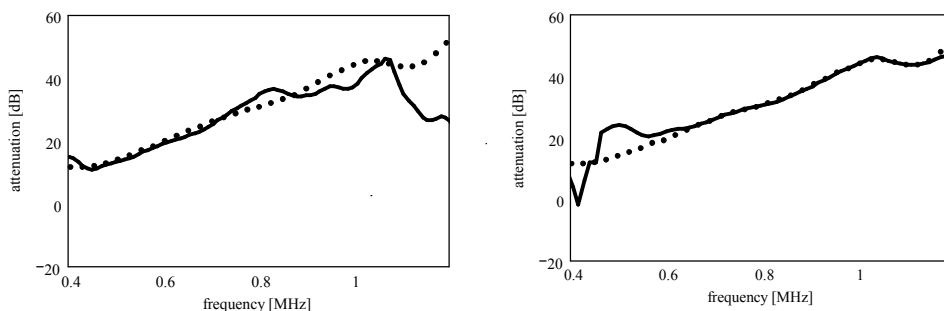
3. Metoda badawcza

W skład części elektroniczno-ultradźwiękowej systemu pomiarowego służącego do wyznaczania współczynnika BUA wchodziły cztery pary szerokopasmowych, ogniskowanych głowic piezoelektrycznych pracujących na częstotliwości 0,5MHz, 1MHz, 2MHz i 3MHz (pasmo $-6\text{dB} = 60\%$, ogniskowa = 50 mm). Sekwencje kodu Golaya o częstotliwości podstawowej głowic były syntetyzowane za pomocą generatora funkcyjnego (Arbitrary Function Generator, LeCroy 9109, USA) a następnie wzmacnione za pomocą wzmacniacza mocy (ENI 3100LA, USA) i przesyłane do przetwornika głowicy nadawczej. Sygnały z głowicy odbiorczej były wzmacniane za pomocą wzmacniacza Ritec Broadband Receiver RB-640 i zapamiętywane oscyloskopem cyfrowym Infinium HP 54810A. Dekodowanie sygnałów odbywało się off-line.

Przy badaniach w transmisji używana była standardowa procedura wyznaczania współczynnika BUA polegająca na porównywaniu amplitudy widm sygnału przepuszczonego przez kość - A i sygnału odniesienia - B (przepuszczonego przez wodę) a następnie wyznaczeniu współczynnika nachylenia krzywej powstałej w wyniku podzielenia B przez A [3].

4. Wyniki pomiarów w transmisji

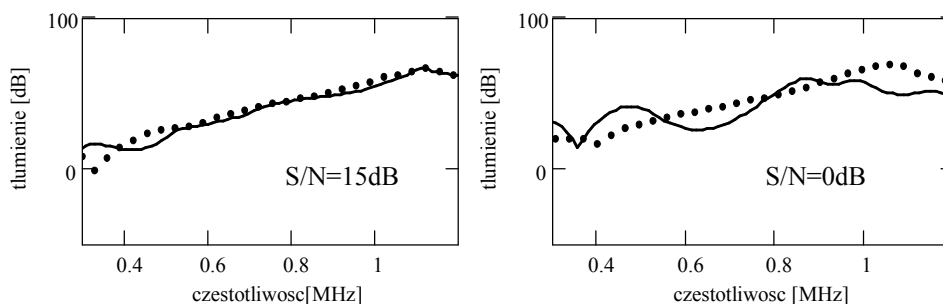
Wyniki pomiarów otrzymane dla pobudzenia przetwornika 16 bitową sekwencją kodu Golaya były porównywane z wynikami otrzymanymi przy pobudzeniu tradycyjnym to znaczy za pomocą dwóch okresów sinusoidy. Przy pobudzaniu przetwornika na częstotliwości środkowej 0.5 MHz współczynnik BUA był obliczany dla zakresu częstotliwości 0.3MHz – 0.7MHz a dla pobudzenia 1MHz w zakresie 0.6MHz – 1.2MHz.



Ryc.2 Krzywe opisujące zmiany tłumienia z częstotliwością dla dwóch rodzajów pobudzenia. Krzywa kropkowana – pobudzenia sekwencją kodu Golaya przy częstotliwości 1MHz, krzywa ciągła – pobudzenie sinusoidalne odpowiednio przy częstotliwości 0.5 MHz (lewa) i 1 MHz (prawa).

Znaleziono wysoką korelację pomiędzy wynikami otrzymanymi przy pobudzeniu tradycyjnym i pobudzeniu sygnałem kodowanym ($r = 0.95$ dla 0.5MHz i $r = 0.93$ dla 1MHz). Jednocześnie stwierdzono że wyniki otrzymane przy kodowanym pobudzeniu 1MHz ale obliczane dla pasma 0.5MHz ($0.3\text{MHz} - 0.7\text{MHz}$) dobrze korelują ($r = 0.91$) z wynikami dla pobudzenia sinusoidalnego o średniej częstotliwości 0.5MHz .

Jedna krzywa tłumienie-częstotliwość (Ryc.2) w przypadku sygnałów kodowanych dokładnie pokrywa się w odpowiednich zakresach częstotliwości z krzywymi otrzymanymi przy pobudzeniu tradycyjnym przy częstotliwości 0.5 i 1MHz .



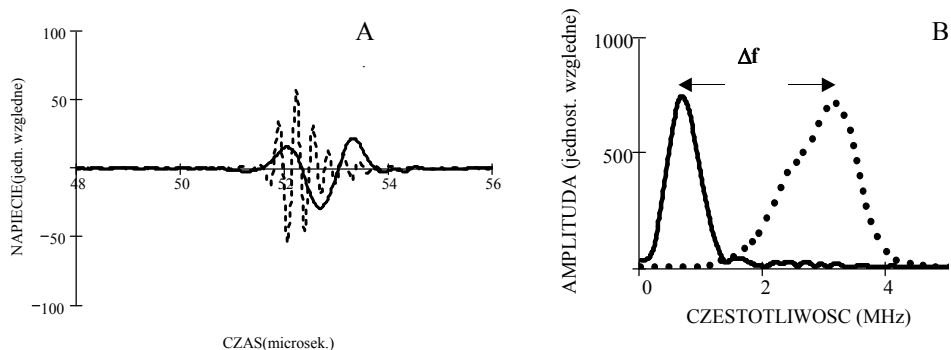
Ryc 3. Krzywe tłumienie-częstotliwość otrzymane przy $S/N = 15\text{dB}$ i 0dB . Krzywa kropkowana otrzymana dla pobudzenia sygnałem kodowanym, krzywa ciągła przy pobudzeniu wycinkiem sinusoidy.

Jednocześnie przeprowadzona analiza zachowania krzywych tłumienie-częstotliwość (Ryc.3) dla częstotliwości pobudzenia 1MHz wykazała, że przy niskich wartościach stosunku sygnału do szumu (S/N – signal to noise ratio) i pobudzaniu przetwornika tradycyjnym sygnałem sinusoidalnym nie możliwe jest prawidłowe znalezienie współczynnika BUA. Przy tych samych wartościach stosunku sygnału do szumu ale stosując kodowanie sygnału można prawidłowo wyznaczyć ten współczynnik.

5. Pomiary przy wyższych częstotliwościach

Kodowanie sygnałów ultradźwiękowych za pomocą sekwencji kodu Golaya pozwala na zwiększenie zakresu użytecznej penetracji. Stosując sygnały kodowane przy częstotliwościach 2MHz i 3MHz zarówno w badaniach *in vitro* jak i *in vivo* stwierdzono, że zrekonstruowany sygnał charakteryzuje się dobrym stosunkiem S/N co umożliwia dokładne wyliczenie widma sygnału przechodzącego przez tkankę kości gąbczastej.

Tłumienie w strukturze kości beleczkowej jest tak wysokie dla częstotliwości powyżej 2MHz , że w widmie sygnału przepuszczonego przez kość wyższe częstotliwości są praktycznie wycięte (Rys.7) w porównaniu do widma bardzo słabo tłumionego sygnału, przepuszczonego tylko przez wodę. Następuje pozorne przesunięcie widma w niższe częstotliwości. Określenie wartości wsp. BUA w zakresie częstotliwości 2MHz i więcej, w sposób tradycyjny jest w tym wypadku nie możliwe. Do badań stanu tkanki kostnej przy wyższych częstotliwościach trzeba zastosować inny wskaźnik, np. wielkość przesunięcia pomiędzy środkami ciężkości widm [3].



Ryc. 6 A/ Zrekonstruowane przebiegi z nadanego sygnału kodowanego(3MHz) po przejściu fali przez wodę (sygnał odniesienia) – krzywa kropkowana i po przejściu przez kość piętową- krzywa ciągła. Sygnał przechodzący przez kość wzmacniony 80dB oraz B/ Amplitudy widma sygnałów przedstawionych na ryc. A, przesunięcie częstotliwości środkowej widma - $\Delta f > 2\text{MHz}$

6. Wnioski

Wyniki badań dowodzą, że przy stosowaniu fali kodowanej informacja o tłumiących własnościach ośrodka jest zachowywana w całości. Jednocześnie stosowanie fal kodowanych poszerza dwukrotnie pasmo częstotliwości użytecznych przy pomiarach współczynnika BUA. Równocześnie, wykazano bardzo dużą odporność sygnałów kodowanych na szum. Przeprowadzone doświadczenia dowodzą, że zastosowanie sygnału nadawczego w postaci kodu Golaya umożliwia zwiększenie częstotliwości pomiarowej oraz rozszerza obszar zastosowań densytometrii ultradźwiękowej o głęboko położone i trudno dostępne kości.

LITERATURA

1. Golay M. J. E., "Complementary Series", IRE Trans. Inf. Theory, vol. IT-7, 82-87, (1961)
2. Laugier P., Giat P., Berger G., Bone Characterization with Ultrasound: State of the Art and New Proposal, Clinical Rheumatology, 13, 22-32,(1994)
3. Litniewski J., Nowicki A., Sawicki A., Detection of bone disease with ultrasound – comparison with bone densitometry, Ultrasonics,38, 693-697, (2000)
4. Trots I., Nowicki A., Secomski W., Litniewski J., „Golay sequences – side-lobe-canceling codes for ultrasonography, Archives of Acoustics, 29,1,87-97,(2004)

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2004 jako projekt badawczy.