

Krzysztof Marasek, dr hab.  
Polsko-Japońska Wyższa Szkoła  
Technik Komputerowych  
ul. Koszykowa 86  
02-008 Warszawa

Warszawa, 10 maja 2009 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr Marcina Lewandowskiego  
pt. „*Ultrasonografia kodowana: transmisja i kompresja w czasie rzeczywistym*”

1. Uwagi wstępne

Postęp technik medycznych jest zaiste zdumiewający. Na przestrzeni ostatniego półwiecza skonstruowano wiele przyrządów umożliwiających nieinwazyjne wniknięcie w głąb ludzkiego ciała i wizualizację *in vivo* organów wewnętrznych. Wśród tych technik ultrasonografia odgrywa wiodącą rolę, dostarczając informacji o strukturze i kształcie tkanek oraz przepływach płynów w organizmie. Ultrasonografia wykorzystywana jest w diagnostyce medycznej, ale także w terapii (od higieny do litotrypsji). Rozwój ultrasonografii odbywa się na wielu frontach, powstają ulepszone metody pobudzenia ultradźwiękowego tkanek, algorytmy przetwarzania i recepcji ech, wizualizacji. Wśród nich szczególnie interesująca jest ultrasonografia wykorzystująca wyższe niż dotychczas stosowane częstotliwości, umożliwiającą obserwacje małych struktur kryjących się płytko pod skórą. Należy z uznaniem stwierdzić, że praca p. mgr Marcina Lewandowskiego wpisuje się w nowoczesne badania, których praktyczne znaczenie trudno przecenić. Tym bardziej, że praca ma charakter naukowy i inżynierski, i wskazuje konkretne rozwiązania elektroniczno-informatyczne pozwalające na budowę ultrasonografu wysokiej częstotliwości z tzw. transmisją kodowaną.

2. Temat i zakres rozprawy

Zasadniczymi zagadnieniami w omawianej pracy były opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i wykonanie prototypowego urządzenia ultrasonografu wysokiej częstotliwości (20-30 MHz) z transmisją kodowaną. W skład tego urządzenia wchodzi: głowica ultradźwiękowa pobudzana sygnałami kodowanymi, układy odbiorcze w.cz., układy konwersji A/C, przetwarzania cyfrowego i wizualizacji. Jego zasadniczą zaletą jest możliwość przetwarzania i obrazowania w czasie rzeczywistym, co przy przerzuceniu znacznej części przetwarzania sygnału do domeny cyfrowej stwarza niebagatelne problemy realizacyjne. Praca pana Lewandowskiego zawiera zatem aspekty elektroniczne, związane z konstrukcją urządzenia, ale też informatyczne, ze względu na implementacje oprogramowania, a w szczególności na konieczne do rozwiązania zagadnienia związane z wydajnością obliczeniową i synchronizacją pracy poszczególnych modułów. Podkreślić należy, że ze względu na wymagania wydajnościowe wykorzystano wyjątkowo nowoczesne elementy elektroniczne, ale także umiejętnie skorzystano z rozwiązań przewidzianych do innych zastosowań, np. użyto procesorów graficznych.

Zakres pracy jest bardzo szeroki i obejmuje zarówno zagadnienia teoretyczne (np. jak zwiększyć zakres penetracji tkanek bez konieczności podnoszenia mocy sygnału), jak i zdecydowanie praktyczne (np. jak zapewnić przetwarzanie obrazu w czasie rzeczywistym).

W pracy nie sformułowano niestety tezy głównej, ani też pomocniczych.

### 3. Ogólna charakterystyka pracy

Praca składa się z 6 rozdziałów, w sumie o objętości 163 stron wliczając w to 15-stronicowy dodatek A, gdzie zamieszczono schematy ideowe systemu oraz 1-stronicowy dodatek B podsumowujący oryginalne osiągnięcia autora.

Wyniki pracy są rzeczowo udokumentowane i przedstawione w postaci 67 rysunków, 9 tabel oraz 15 schematów ideowych zamieszczonych w Dodatku A. Cytowanych jest 157 pozycji bibliograficznych.

W Rozdziale 1 przedstawiono tematykę rozprawy, jej ogólny zakres i cel oraz opisano podstawowe zagadnienia związane z ultrasonografią wysokiej częstotliwości. Jako główny temat rozprawy zaproponowano konstrukcję i praktyczną realizację ultrasonograficznego aparatu diagnostycznego na potrzeby obrazowania małych struktur anatomicznych na głębokościach do kilkunastu milimetrów pod powierzchnią skóry. Celem pracy jest zatem realizacja obrazowania ultradźwiękowego w zakresie 20-40 MHz z transmisją kodowaną i przetwarzaniem w czasie rzeczywistym. Podkreślić należy praktyczne aspekty wykorzystania nowych metod transmisji sygnałów – zwiększenie głębokości obrazowania, poprawę dynamiki, a w konsekwencji poprawę kontrastu tworzonego obrazu. Istotną częścią tego rozdziału jest przegląd zagadnień związanych z ultrasonografią wysokiej częstotliwości. Autor starannie przedstawił zależności istniejące między mocą sygnału a głębokością penetracji tkanek przez falę ultradźwiękową oraz standardy, moce i dawki sygnałów ultradźwiękowych dopuszczonych do stosowania w diagnostyce medycznej w Europie i USA. Dość dokładnie przedstawiono sposób obliczania indeksu mechanicznego, jednakże nie podano jego typowych wartości. Zabrakło też podania typowych wartości parametru  $P_p$  używanego w obliczeniach indeksu termicznego (dla różnych kombinacji tkanek). Obszerną część rozdziału zajmuje wnikliwy przegląd zastosowań ultrasonografii w.cz. w działach medycyny (dermatologia i oftalmologia) i innych badaniach struktur biologicznych. Moja wiedza medyczna nie pozwala na zweryfikowanie twierdzeń autora w odniesieniu do zastosowań UBM (mikroskopii ultradźwiękowej) w dermatologii, ale na podstawie artykułu [1], wydaje się, że zakres zastosowań medycznych jest już obecnie dużo większy (w szczególności pomiary rozmiarów guzów nowotworowych)

Rozdział 2 poświęcono zagadnieniom transmisji kodowanej. Przedstawiono w nim cel kodowania sygnałów (poszerzenie widma impulsu niezależnie od czasu jego trwania), stosowane modulacje i kody. Omówiono podstawowe kody począwszy od sygnałów chirp, kodów Barkera i Golaya do kodów MLS, przedstawiono ich zalety i wady. Wzór (2.6), choć prawidłowy, nie uwypukla podstawowej zalety kodu MLS – jego funkcja autokorelacji jest zbliżona do delty Kroneckera, dzięki czemu uzyskuje się zupełnie płaskie widmo, a to z kolei przydaje się choćby do wyznaczania odpowiedzi impulsowej w akustyce. Po przedstawieniu filtracji dopasowanej autor przechodzi do istotnego dla całej pracy opisu zastosowań kodów w ultrasonografii. Wskazuje tu słusznie na zalety kodów Golaya, sygnalizując jednak podstawowe problemy tej metody – słabą odporność na przesunięcie obiektu powodujące dekorelację sygnału oraz na efekty związane z pasmem głowicy ultradźwiękowej. Interesująca jest także dyskusja aspektów technicznych związanych z kodowaniem transmisji i kompresji czasowej ech. Jasno wykazano zalety wczesnej cyfryzacji sygnału (w.cz.) a także, co jest cennym nowatorskim wkładem pracy, zbadano doświadczalnie rozkłady pól akustycznych dla pobudzeń kodowanych (sinusoidalnych, chirp, kody Barkera i Golaya).

Rozdział 3 opisuje techniki i układy cyfrowego przetwarzania sygnałów wykorzystywanych w ultrasonografii w.cz. Ze względów praktycznych metody przetwarzania

sygnałów podzielono na sprzętowe (tu przedstawiono implementacje z wykorzystaniem programowalnych układów logicznych FPGA) i programowe (wykorzystanie procesorów graficznych i uniwersalnych). Jak wskazano, projektowanie układów FPGA jest procesem złożonym i wymaga solidnej wiedzy inżynierskiej i dużej staranności w przygotowaniu i testowaniu układów. Następnie autor przechodzi do opisu układów używanych w programowym przetwarzaniu sygnałów - procesorów sygnałowych, uniwersalnych i graficznych, porównuje ich architektury i szybkości przetwarzania. W rozdziale 3.1.3 stwierdza między innymi, że większość produkowanych obecnie procesorów ogólnego przeznaczenia to jednostki wykorzystujące architekturę RISC, z czym bym polemizował, biorąc pod uwagę fakt, że najpopularniejsze procesory Intel (Pentium) i AMD (Athlon) bazują na instrukcjach x86, zwykle uważanych za CISC (precyzyjniej: instrukcje są dekodowane na mikro-operacje, ich wykonanie jest zrównoleglane i cache'owane). Autor natomiast słusznie zauważa zalety, ale i problemy wynikające ze zrównoleglenia instrukcji, wątków lub danych we współczesnych procesorach. Recenzent z własnego doświadczenia wie, jak trudne jest uruchamianie i testowanie programów wielowątkowych na procesorach graficznych. Przy okazji omawiania procesorów graficznych, w rozdziale 3.1.4.1 autor zamieszcza także informacje o potoku przetwarzania grafiki, co wyjaśnia taką a nie inną ich architekturę. Opis uważam za wystarczający, choć szybki rozwój techniki spowodował, że część informacji jest już nieco przestarzała (są już nowe procesory NVidii, do stycznia 2009 powstało ich już 10 generacji, mamy język CUDA 2.0, nie wspomniano o PhysX – wsparciu symulacji fizycznych). Warto też wspomnieć, że produkowane już są karty z procesorem graficznym służące tylko do akceleracji obliczeń, a nie do wyświetlania grafiki (Tesla C1060), a ich moc obliczeniowa wystarcza do symulowania obrazów ultrasonograficznych na podstawie skanów CT [3]. W rozdziale 3 zawarto także opis, charakterystyki rozwiązań oraz pomiarów jakości przetwarzania analogowo-cyfrowego. Wywód jest klarowny i obejmuje te elementy, które są istotne z punktu widzenia rozprawy. Zgadza się z autorem, że jitter jest szczególnie istotny z punktu widzenia jakości przetwarzania, zwracam jednak uwagę, że niekiedy to zjawisko (przy pełnej kontroli wahań podstawy próbkowania) może być wykorzystane również do rozszerzenia zakresu częstotliwości przetwarzanych przez układ A/D (metoda DASP, [2]). Rozdział kończy się opisami schematów funkcjonalnych ultrasonografu z demodulacją analogową i cyfrową, wskazującymi na konieczność stosowania konwersji geometrii tworzonego obrazu (z sektorowej do kartezyjskiej) i kompresji dynamiki.

Rozdział 4 opisuje tworzony system: jego architekturę i części składowe – moduł digitizera, część analogową, układ zasilania, panel sterujący, głośnicę ultradźwiękową i oprogramowanie całego systemu. Wskazano na wymóg liniowości odbiornika i wzmacniacza mocy, arbitralności generatora sygnałów kodowanych, dużej dynamiki przetwornika A/D i wydajnego korelatora ech z sygnałem nadawczym. Zaproponowane przez autora pracy rozwiązanie spełnia te wymagania. Wykorzystano w nim te elementy, które opisano w poprzednich rozdziałach: FPGA, 12-bitowy przetwornik A/D o bardzo wysokiej częstotliwości próbkowania oraz podsystem wizualizacji wykorzystujący procesor graficzny komputera, do którego poprzez interfejs USB-2 podłączany jest zaprojektowany układ. Stworzone oprogramowanie jest zgodne z zasadami inżynierii oprogramowania, wykorzystuje zewnętrzne komponenty i przetwarza dane potokowo. Zoptymalizowano algorytmy przetwarzania danych na potrzeby detekcji obwiedni i kompresji kodów Golaya oraz wykorzystano shadery do konwersji geometrii ze współrzędnych biegunowych na prostokątne (interpolacja biliniowa) jako mapowanie tekstur. Z uznaniem należy podkreślić, że w pracy przedstawiono niektóre podstawowe zagadnienia percepcji skali szarości w wyświetlanym obrazie, choć niestety nie uwzględniano istnienia profili ICC dostosowujących własności wyświetlania konkretnego monitora. Generalnie podrozdział 4.7.3.3 przedstawia wskutek

tego nieco uproszczony model wyświetlania i percepcji odcieni. Rozdział 4 kończy się opisem panelu i oprogramowania interfejsu użytkownika.

Kolejny, piąty rozdział pracy, podsumowuje wyniki pracy ze opracowanym i wykonanym urządzeniem. Przeprowadzono szereg testów: szybkości transmisji danych, jakości przetwarzania A/C, układów nadawczo-odbiorczych, geometrii obrazowania, wydajności oprogramowania. Wszystkie z nich wykazały zgodną z założeniami sprawność aparatury, co pozwoliło na porównanie efektywności kodów i przeprowadzenie badań *in vivo*. Zastosowanie kodów Golaya pozwala uzyskać lepszy kontrast, mniejsze szумы, głębszą penetrację tkanek i dzięki wyższej częstotliwości skanowania lepszą rozdzielczość obrazu. Wskazano też na duże potencjalne zastosowania kliniczne nowego urządzenia. Sądząc po zamieszczonych ilustracjach, ma ono istotną przewagę nad innymi – dzięki wysokiej jakości obrazowania pozwala np. na wizualizację i pomiar geometrii drobnych naczyń krwionośnych występujących w palcach, co dotychczas nie było możliwe.

Rozdział szósty podsumowuje osiągnięcia zaprezentowanej w pracy konstrukcji i zawiera dyskusję na temat jej potencjalnych zastosowań. Wydaje się, że proponowany aparat ma szanse na komercjalizację i wdrożenie do produkcji.

### 3. Uwagi szczegółowe

Uważam, że przedstawiona od recenzji rozprawa doktorska mgr Marcina Lewandowskiego jest napisana bardzo dobrze i z małą ilością błędów rzeczowych, stylistycznych i edytorskich.

Moje uwagi, oprócz komentarzy do treści przedstawionych w poprzednim punkcie recenzji dotyczą rzeczy raczej marginalnych:

- w p.4.2.4 autor stwierdza, że ma zamiar zastosować układ AD 9517 w torze generacji zegara, wydaje się że sensowne byłoby zastosowanie układów z serii LMK firmy National Semiconductor (lepsze parametry);

- zastosowanie łącza USB-2 do komunikacji z komputerem jest niewątpliwie poprawne, obiegowa opinia wskazuje jednak na lepsze parametry łącz typu FireWire, szczególnie w przypadku stałej transmisji o dużej szybkości (dzięki lepszemu mechanizmowi rozwiązywania konfliktów w dostępie do szyny danych komputera);

- w p.3.2.2 w opisie architektur przetworników A/C stwierdzono, że przetworniki w architekturze Flash nie przekraczają rozdzielczości 8 bitów: dzięki zastosowaniu technik interpolacyjnych można zredukować liczbę komparatorów i skonstruować przetworniki o wyższej rozdzielczości (np. 10-bitowy Analog Devices AD9410 200 MSPS)

- w p. 3.2.3.1 na stronie 73 podano, że przy założeniu nieskorelowanego i jednorodnego szumu stosunek sygnał szum przetwornika wynosi  $6,02 * N + 1,76$  [dB] nie wyjaśniając, co to jest N i jak ta zależność została wyliczona. Jest to tym bardziej istotne, że zależność podana przez Benetta dotyczy też sygnałów o ograniczonym paśmie, co koryguje tę zależność o składnik  $10 \log_{10} f_s / 2BW$  oraz zależy od amplitudy sygnału wejściowego ( $20 * \log_{10}(\text{full\_scale\_amp}/\text{input amp})$ ). Trzeba też pamiętać o tym, że zależność ta nie obowiązuje w przypadku sygnałów, których częstotliwość pozostaje w stosunku harmonicznym z częstotliwością próbkowania. Zależność ta wpływa istotnie na wyznaczone w pracy miary jakości przetwornika A/C (np. ENOB, patrz 3.2.4.1 i 5.1.2);

- w p.4.1.2. na str. 85 opisując biblioteki Intel IPP podane zostało odwołanie do pracy autora rozprawy, wskazane jednak byłoby podanie odwołania bezpośrednio do opisu bibliotek;

- rysunki A.6 i A.7 w Dodatku I wskazują pp. Bogusława Zienkiewicza i Ryszarda Tymkiewicza jako autorów układów wzmacniacza nadajnika i wzmacniacza odbiorczego, o czym nie wspomniano w tekście rozprawy (p.4.3.1 i 4.3.2);

#### 4. Ocena edytorska pracy

Jak na rozprawę doktorską recenzowana praca ma nieszablonową formę – brakuje w niej na początku rozprawy jasnej specyfikacji tez pracy. Tezy te, jak i cele oraz sposób ich realizacji, stają się stopniowo jasne w trakcie czytania pracy, stąd mój zarzut wobec rozprawy ma charakter bardziej formalny niż merytoryczny.

Praca jest napisana w przejrzysty i staranny sposób, liczba błędów językowych, czy edytorskich jest mała. Tok wywodu jest jasny, a poprzedzenie każdego rozdziału krótką prezentacją omawianych w nim zagadnień ułatwia znacznie poznanie pracy, zastosowanych w niej rozwiązań i analizę przyjętych metod. Na wyjątkowe uznanie zasługują niezwykle czytelne i informatywne ilustracje, doskonale uzupełniające tok pracy. Edycja pracy jest niezwykle staranna, a literatura wyczerpująca. Jako recenzent zwracam też uwagę na to, że autor uniknął w pracy wyrażen slangowych, będących nieudolnymi polskimi kalkami terminów angielskich, tak częstych w pracach z pogranicza elektroniki i informatyki.

#### 5. Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedłożoną pracą, uważam że rozprawa doktorska mgr Marcina Lewandowskiego jest napisana na bardzo wysokim poziomie naukowym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i inżynierskiego. Autor wykazał się zarówno dużą wiedzą teoretyczną z dziedziny cyfrowego przetwarzania sygnałów jak i imponującymi umiejętnościami praktycznymi w konstrukcji i oprogramowaniu sprzętu elektronicznego.

Praca zawiera ważne wyniki eksperymentalne i konstrukcyjne, które w istotny sposób rozszerzyły wiedzę o ultrasonografii wysokiej częstotliwości. Uzyskane wyniki mogą prowadzić również, moim zdaniem, do bardzo ważnych zastosowań praktycznych w diagnostyce medycznej i biologii i choćby z tego powodu bardzo zachęcam autora rozprawy do opublikowania jej w czasopiśmie naukowym.

W konkluzji stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymogi stawiane przez ustawę o stopniach i tytułach naukowych dla prac doktorskich, a jej autor w pełni zasługuje na przyznanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony.

Dodatkowo, wnioskuję do Komisji Doktorskiej Elektroniki i Inżynierii Materiałowej Rady Naukowej IPPT PAN o przyznanie wyróżnienia p. mgr Marcinowi Lewandowskiemu.

#### **Literatura**

- [1] Monika-Hildegard Schmid-Wendtner, MD; Walter Burgdorf, MD, Ultrasound Scanning in Dermatology, downloaded from [www.archdermatol.com](http://www.archdermatol.com), 7.05.09
- [2] I.Bilinskis. Digital Alias-free Signal Processing, WILEY, 2007
- [3] O. Kutter, et al., Visualization and GPU-accelerated simulation of medical ultrasound from CT images, Comput. Methods Programs Biomed. (2009), doi:10.1016/j.cmpb.2008.12.011