

Mirosław ŁAZORYSZCZAK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY, WYDZIAŁ INFORMATYKI,
ul. Żołnierska 52, 71-210 Szczecin

Eksperymentalna platforma rekonfigurowalna w zastosowaniach syntezy i przetwarzania dźwięku

Dr inż. Mirosław ŁAZORYSZCZAK

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, obronił pracę doktorską w 2005 r. na Wydziale Informatyki Politechniki Szczecińskiej. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Architektury Komputerów i Telekomunikacji na Wydziale Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jest członkiem IEEE. Zainteresowania naukowe dotyczą układów rekonfigurowalnych, systemów wbudowanych oraz przetwarzania dźwięku.



e-mail: mlazoryszczak@wi.zut.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję platformy rekonfigurowalnej, której głównym zastosowaniem jest testowanie sprzętowych algorytmów syntezy dźwięku oraz implementacja efektów dźwiękowych. Istotnym elementem systemu jest także wykorzystanie sieci opartej na technologii Ethernet do transmisji zarówno sygnałów sterujących np. MIDI jak i dźwięku cyfrowego. Ponadto istotną cechą proponowanej platformy jest modularność w zakresie np. liczby obsługiwanych kanałów dźwiękowych jak i wewnętrznych torów przetwarzających.

Słowa kluczowe: synteza dźwięku, efekty dźwiękowe, FPGA.

An experimental reconfigurable platform for sound processing applications

Abstract

In this paper, the outline of an experimental platform for sound synthesis and sound processing is presented. The main idea of a reconfigurable synthesizer is to integrate different blocks and functions typically present in several devices. Most important design assumptions are hardware FPGA plug-ins, flexible configuration of analog inputs, sophisticated graphical user interface. One of the goals of this system is to build a system for testing synthesis and sound effects algorithms. Hardware FPGA "inserts" allow easy replacement of the processing method on the hardware level. Configurable input analog modules provide a flexible way for adjusting external channels on demand. A distributed, intelligent graphical user interface makes adjusting the parameters of sound by several performers at the same time possible. Such a feature is very useful especially by live performances. Another important part of the proposed solution is communication between the system modules and external devices. Besides a separate MIDI interface intended for data transfer including notes and control information, the wired and wireless standards for MIDI over Ethernet, digital sound, control data etc. are necessary. Selected aspects regarding implementation of a part of the reconfigurable synthesizer, including simple waveform synthesis and envelope modifier, are presented in the paper. Standard development boards were used as a test environment. The implemented blocks are the basis for future development of the system.

Keywords: sound synthesis, sound effects, FPGA.

1. Wstęp

Dźwięk cyfrowy stanowi jeden z istotnych kanałów komunikacji, szeroko pojętej diagnostyki oraz rozrywki. W ramach samej tylko rozrywki istnieje szereg potrzeb w zakresie przetwarzania oraz generowania dźwięku. Możliwość generowania dźwięku cyfrowego przede wszystkim wykorzystywana jest w instrumentach elektronicznych. Instrumenty te od wielu już dziesięcioleci są jednym z filarów muzyki różnych gatunków: od rozrywkowej różnych rodzajów, aż po muzykę eksperymentalną. Rozwój instrumentów elektronicznych odzwierciedla w naturalny sposób zmiany technologii elektronicznej, ze szczególnym uwzględnieniem techniki

cyfrowej. Elementami składowymi instrumentów elektronicznych poza modułami syntezy są także często procesory efektów, których zadaniem jest modyfikacja dźwięku syntetycznego bądź naturalnego. Motywacją do podjęcia pracy w zakresie niniejszego tematu jest próba integracji różnych funkcji w ramach jednej platformy sprzętowej, umożliwiającej testowanie i rozwój sprzętowych algorytmów z zakresu syntezy i przetwarzania dźwięku.

Implementacja syntezy dźwięku w układach reprogramowalnych nie jest szczególnie nowatorska, istnieje szereg rozwiązań prezentowanych zarówno w literaturze naukowej, popularnonaukowej, jak i na portalach hobbystycznych. W pracy [1] przedstawiono projekt syntezy w FPGA wraz z porównaniem zalet rozwiązań rekonfigurowalnych w porównaniu do syntezy programowych czy procesorów DSP. Możliwości obliczeniowe FPGA pozwalają na generowanie dźwięku oparte na modelach fizycznych, w tym na równaniu falowym [2]. Intuicyjnym zastosowaniem układów rekonfigurowalnych w kontekście dźwięku cyfrowego jest proces przełączania i miksowania sygnałów [3], który może stanowić integralną część syntezy. Na przeciwnym biegunie prac nad syntezy sprzetowymi znajdują się realizacje polegające na obniżeniu kosztu podsystemu realizującego syntezę [4]. Wybrane aspekty implementacji syntezy rekonfigurowalnego przedstawiono także w pracach [5] oraz [6].

Wciąż rosnące możliwości układów FPGA inspirują do umieszczania w sprzęcie nowych rozwiązań w celu np. zwiększenia wydajności lub efektywności urządzenia, które mogą być obserwowane jako zwiększenie liczby równoległe generowanych tonów (polifonia) czy też bardziej dokładne odwzorowanie dźwięków będących wynikiem zastosowania dokładniejszych algorytmów syntezy.

W artykule przedstawiono także ideę dotyczącą ogólnego sposobu komunikacji pomiędzy modułami platformy oraz zarys podstawowych i innowacyjnych funkcji interfejsu służących do sterowania procesem generowania dźwięku.

2. Proponowane funkcje i architektura syntezy

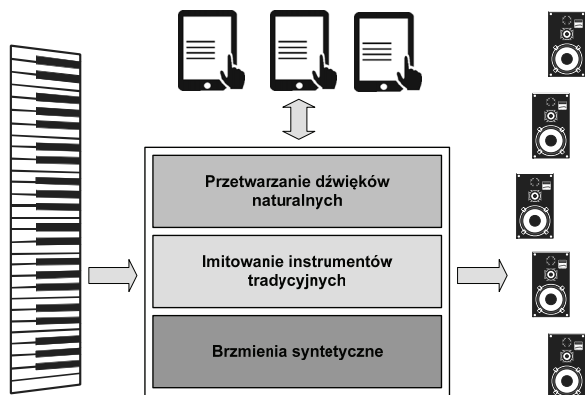
Najbardziej popularnym kontrolerem wysokości dźwięku od dawna pozostaje klawiatura muzyczna, tzw. fortepianowa. Pozostałe parametry syntezy dźwięku mogą być nastawiane za pomocą dedykowanych elementów sterujących (przyciski, pokręta), a ich wartości obserwowane są na różnego rodzaju wyświetlaczach.

Bardzo często producenci instrumentów oferują specjalne oprogramowanie, którego zadaniem jest uproszczenie obsługi syntezy oraz umożliwienie wykorzystania pełnej palety brzmień. Współczesny trend polega także na wykorzystaniu ekranów dotykowych. Wobec powyższego jednym z celów projektowanego rozwiązania jest integracja różnego rodzaju sposobów sterowania parametrami syntezy oraz komunikacją pomiędzy modułami wykonawczymi. Ogólną ideę przedstawiono na rys. 1.

Zastosowanie „inteligentnych” ekranów dotykowych np. w postaci tabletów zapewnia z jednej strony wszechstronne i elastyczne sterowanie parametrami syntezy, co jest niezwykle przydatne czy wręcz pożądane w trakcie wykonaniu muzyki podczas koncertu, z drugiej zaś strony, dzięki możliwości komunikowania się pomiędzy kontrolerami w formie przewodowej lub bezprzewodowej, otwiera zupełnie nowe możliwości w kształtowaniu dźwięku.

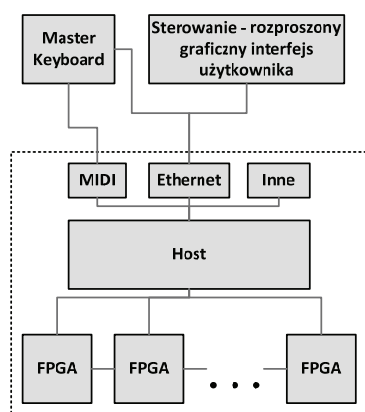
Rozproszenie interfejsu użytkownika stwarza nowe, ograniczone jedynie wyobraźnią, pole do kreowania poszczególnych dźwięków i muzyki jako całości jednocześnie przez zespół wykonawców, którzy w tym samym momencie mogą korzystać z jednego, rozbudowanego instrumentu muzycznego. Funkcje i możliwości

projektowanego instrumentu mogą być zrealizowane w różny sposób. Możliwe jest wykorzystanie istniejących urządzeń i ich integracja za pomocą oprogramowania.



Rys. 1. Poglądowy schemat elementów syntezatora
Fig. 1. Schematic view of selected capabilities of the synthesizer

W projekcie przedstawionym w niniejszym artykule zdecydowano się położyć nacisk na rozwiązanie sprzętowe oparte na technologii układów rekonfigurowalnych, co nie oznacza rezygnacji z rozwiązań programowych. Dzięki elementom programowym korzystać będzie można z dostępnych rozwiązań bibliotecznych w zakresie obsługi transmisji danych czy też sprzętowych elementów interfejsu użytkownika. Na schemacie blokowym (rys. 2) przedstawiono moduły sprzętowe realizujące podstawowe funkcje syntezatora. W centralnej części schematu znajduje się host, którego zadania mogą być realizowane np. za pomocą samodzielnego, bądź umieszczonego w strukturze FPGA mikrokontrolera, a którego zadaniem jest zarządzanie przepływem danych w syntezatorze oraz nadzorowanie komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi, w tym z klawiaturami (tzw. *Master Keyboard*) oraz rozproszonym, graficznym interfejsem użytkownika, za pomocą różnych interfejsów.



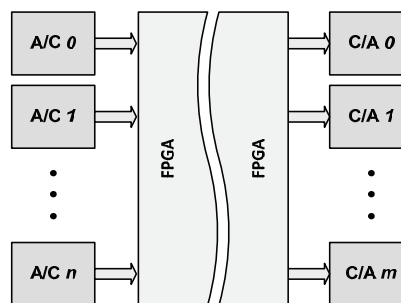
Rys. 2. Schemat blokowy syntezatora rekonfigurowalnego
Fig. 2. Block diagram of the reconfigurable synthesizer

Standardowym interfejsem do przekazywania komunikatów muzycznych od pierwszej połowy lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku jest MIDI (ang. *Musical Instrument Digital Interface*). Wraz z różnego rodzaju rozszerzeniami i modyfikacjami jest z powodzeniem stosowany praktycznie w większości współczesnych instrumentów elektronicznych i urządzeń współpracujących. Jedną z zalet interfejsu MIDI jest możliwość łączenia łańcuchowego wielu urządzeń, czego nie zapewnia np. interfejs USB. Zważywszy, że prędkość transmisji danych muzycznych nie wzrasta znacząco na przestrzeni lat, funkcja wymiany danych pomiędzy kilkoma instrumentami przeważa nad możliwościami innych interfejsów. Dlatego też MIDI jest obowiązkowym elementem instrumentów muzycznych.

Konieczność integracji różnych rodzajów danych (poza MIDI) wraz z rosnącą ich ilością powoduje zwiększenie wymagań co do sposobu przekazywania ich pomiędzy urządzeniami. Standard studyjny zakłada w zakresie dźwięku cyfrowego 24-bitową rozdzielczość oraz częstotliwości próbkowania na poziomie do 192 kHz. Przy wielu jednoczesnych kanałach dźwiękowych staje się niezbędne stosowanie dedykowanych rozwiązań w zakresie transmisji danych. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie technologii Ethernet, a właściwie protokołu TCP/IP w różnych warstwach fizycznych (przewodowych i bezprzewodowych) do przesyłania danych zawierających próbkowany, cyfrowy dźwięk, komunikaty MIDI, informacje dotyczące synchronizacji urządzeń czy też polecenia graficznego interfejsu użytkownika. Sama idea przekazywania danych MIDI za pomocą sieci TCP/IP nie jest nowa, została opisana w dokumencie RFC 6295 [7] i zastosowana np. przez Apple, ale także zdobywa popularność wśród producentów instrumentów muzycznych.

Kluczowe zadanie układów FPGA polega na syntezie i przetwarzaniu dźwięków. Umożliwia to przedstawiona powyżej konfiguracja oraz połączenia magistralowe, które obejmują zarówno hosta z układami FPGA jak i układy FPGA pomiędzy sobą. Taki sposób przepływu danych umożliwia realizację wtyczek sprzętowych na zasadzie analogii do wtyczek programowych (ang. *plug-in*). Przy stałej liczbie modułów FPGA w systemie można włączać lub wyłączać (pomijając) z toru przetwarzania poszczególne moduły.

Kolejnym założeniem projektowym jest możliwość sprzętowej konfiguracji torów analogowych, przede wszystkim po stronie wejścia do systemu, ale także możliwość uzyskania dźwięku wielokanałowego po stronie wyjścia zarówno w postaci standardowej. Podobnie jak w przypadku pozostałych funkcji, kwestia wejść i wyjść analogowych może być rozwiązana różnymi metodami. Jednak technologia FPGA wydaje się być szczególnie przydatna w kontekście konfiguracji i liczby kanałów dźwiękowych (rys. 3).



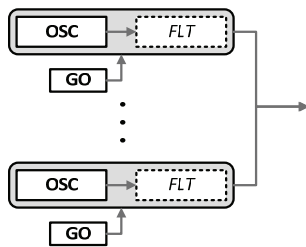
Rys. 3. Konfigurowalne bloki analogowych wejść i wyjść
Fig. 3. Configurable analog inputs and outputs

Niezbędne jest tu zastosowanie dodatkowego sprzętu w postaci przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych, ale wykonanie ich w postaci ujednoliconych modułów zawierających wzmacniacz z przetwornikiem, umożliwi skalowalność systemu w szerokim zakresie. Współczesne przetworniki do profesjonalnych zastosowań audio, jak np. PCM4204 Texas Instruments, produkowane są często w postaci czterokanałowej, zatem uzyskanie pożądanej liczby wejść analogowych wymagać będzie czterokrotnie mniejszej liczby modułów. Dodatkowym atutem stosowania układów FPGA jest elastyczna konfiguracja sposobu komunikacji pomiędzy przetwornikiem a modułem FPGA poprzez wybór rodzaju magistrali i parametrów dźwięku cyfrowego.

3. Implementacja wybranych elementów systemu

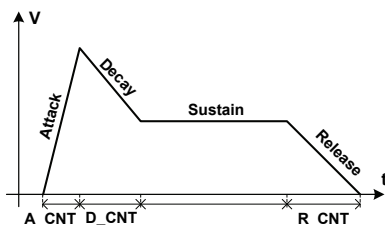
Przedstawione powyżej założenia systemu mają charakter koncepcyjny. Wybrane elementy są realizowane wielotorowo. Ich realizacja jest zaawansowana w różnym stopniu. Poniżej przedstawione zostały wybrane aspekty implementacyjne rekonfigurowalnego syntezatora. W ramach projektu wykonano podstawowy tor syntezy z możliwością generowania wielu dźwięków jed-

nocześnie (polifonia) oraz modyfikator obwiedni. Podstawowy tor syntezy dźwięku przedstawiono na rys. 4. Blok syntezy dźwięku o zadanej częstotliwości podstawowej składa się z szeregu bloków posiadających analogiczną budowę. Oscylator (OSC) generuje częstotliwość składową dźwięku, która następnie podlega opcjonalnej filtracji (FLT). Każdy z tonów składowych może zostać poddany działaniu generatora obwiedni (GO). Wynikowe współbrzmienie jest sumą dźwięków składowych. Powyższy sposób generowania podstawowych dźwięków może zostać wykorzystany do syntezy addytywnej dźwięków zawierających tony składowe.



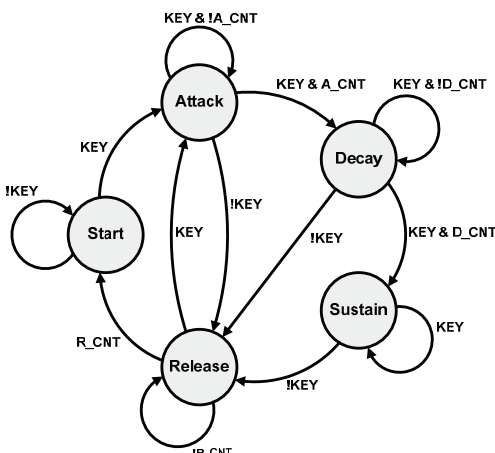
Rys. 4. Elementarny tor syntezy dźwięku
Fig. 4. Base sound synthesis lane

Jednym z elementów syntezy jest generator obwiedni wykorzystujący popularny model ADSR (rys. 5) – *Attack* (narastanie), *Decay* (opadanie), *Sustain* (podtrzymywanie), *Release* (zanikanie).



Rys. 5. Przykładowa obwiednia amplitudowa ADSR
Fig. 5. Sample ADSR envelope generator

Zadaniem generatora obwiedni jest modulacja amplitudy dźwięku w taki sposób, aby uzyskać zmianę jego głośności w funkcji naciśnięcia klawisza włączającego i wyłączającego generowanie dźwięku. Automat ilustrujący działanie generatora obwiedni przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Graf opisujący działanie generatora obwiedni
Fig. 6. State machine for the envelope generator

Sygnaly KEY oraz !KEY oznaczają stan klawisza, odpowiednio „wciśnięty” i „zwolniony”. Ze stanami Attack, Decay oraz Release związane są liczniki odmierające czas przebywania w każdym ze stanów (odpowiednio A_CNT, D_CNT i R_CNT). Stan Sustain jest pozbawiony licznika, ponieważ jest on utrzymywany

tak długo, jak długo wciśnięty jest klawisz. Ponadto możliwe są zmiany stanów pomiędzy Decay a Release oraz Attack i Release będące wynikiem zmiany stanu klawisza.

Implementacji opisanych bloków dokonano na platformie Xilinx CPLD CoolRunner II oraz FPGA Spartan 3E. W celach testowych zastosowano przetwornik 12-bitowy dostępny w module PmodDA2 wraz ze wzmacniaczem PmodAMP1. Dane do przetwornika dostarczane są za pośrednictwem magistrali SPI. Oczywiście różnice pomiędzy implementacjami wynikają z możliwości obu platform. Np. uzyskanie częstotliwości próbkowania na poziomie 44,1 kHz w Spartan jest możliwe dzięki układowi zarządzania sygnałem zegarowym (DCM), podczas gdy w CPLD można uzyskać częstotliwość jedynie przybliżoną. Wykorzystanie zasobów przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wykorzystanie zasobów logicznych
Tab. 1. The used resources

Platforma	Makrokomórki wykorzystane/maksimum	Wejścia bloków funkcyjnych wykorzystane/maksimum
XC2C512	300/512 (59%)	633/1280 (50%)
Platforma	Tablice LUT wykorzystane/maksimum	Bloki DCM wykorzystane/maksimum
XC3S500E	579/9312 (6%)	3/4 (75%)

Mimo trudności bezpośredniego porównania różnych platform należy zwrócić uwagę na fakt, iż w układzie Spartan wykorzystano blok mnożenia, który jest nieobecny w układzie CPLD.

4. Podsumowanie

Realizacja syntezy muzycznej w technologii rekonfigurowalnej jako taka nie jest szczególnie nowatorska, jednak zaproponowane rozwiązania umożliwiają większy stopień integracji funkcji i usług, zapewniając tym samym większy komfort posługiwania się instrumentem muzycznym przede wszystkim w warunkach koncertowych. Nie bez znaczenia jest także możliwość dalszego rozwoju zarówno samej platformy jak i poszczególnych składowych ze szczególnym uwzględnieniem algorytmów syntezy czy efektów dźwiękowych bez zmiany architektury całego systemu.

5. Literatura

- [1] Saito T., Maruyama T., Hoshino T., Hirano S.: A Music Synthesizer on FPGA, LNCS 2147, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, pp. 377-387.
- [2] Gibbons J. A., Howard D. M., Tyrell A. M.: FPGA implementation of 1D wave equation for real-time audio synthesis, IEE Proceedings - Computers and Digital Techniques, Vol. 152, No. 5, 2005, pp. 619-631.
- [3] Branco D. P., Skliarova I., Vieira J.: Reconfigurable Digital Audio Mixer for Electroacoustic Music. Proceedings of the International Conference on Reconfigurable Computing, Cancun, Mexico, 2010, pp. 132-137.
- [4] Martins G., Barata M., Gomes L.: Low Cost Method to Reproduce Sound with FPGA. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, United Kingdom, 2008, pp. 1932-1936.
- [5] Yoshida S., Yamaguchi Y.: A Study of an FPGA Synthesizer. Proceedings of the International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP 2010), pp. 1205-1210.
- [6] Ochiai S., Yamaguchi Y., Kodama Y.: The Flexible Sound Synthesizer on an FPGA. Proceedings of the First International Symposium on Computing and Networking, CANDAR'13, Matsuyama, Japan, 2013, pp. 104-111.
- [7] Lazzaro J., Wawrzynek J., RTP Payload Format for MIDI, Internet Engineering Task Force, Request for Comments: 6295, <http://tools.ietf.org/html/rfc6295>, dostęp 05/2014.