

Stanowisko laboratoryjne do generowania i przetwarzania sygnałów echolokacyjnych

Laboratory stand for echolocation signal generating and processing

MATEUSZ KASZYŃSKI
STANISŁAW GRZYWIŃSKI
DARIUSZ RODZIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.71>

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z przetwarzaniem sygnałów echolokacyjnych. Opisano prowadzone badania symulacyjne dotyczące wpływu wybranych parametrów układowych i metod przetwarzania sygnałów na możliwości detekcyjne oraz dokładność określanych współrzędnych echolokatora. Szczególną uwagę poświęcono prezentacji rozwiązań sprzętowo-programowych opracowanego stanowiska laboratoryjnego, przeznaczonego do generowania sygnałów echolokacyjnych odbitych od imitowanych obiektów.

SŁOWA KLUCZOWE: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, echolokacja obiektów

The paper presents issues related to the generation and processing of echolocation signals. The conducted simulation studies on the influence of selected system parameters and signal processing methods on the detection capabilities and the accuracy of the determined echolocation coordinates have been described. Particular attention was paid to the presentation of hardware and software solutions for the laboratory stand developed, involving the generation of echolocation signals reflected from imitated objects.

KEYWORDS: digital signal processing, echolocation

Wprowadzenie

Wykrycie sygnału odbitego od obiektu na tle zakłóceń, z uwzględnieniem ograniczeń i uwarunkowań sprzętowych toru sygnałowego, oraz określenie współrzędnych na podstawie parametrów sygnału użytecznego w paśmie ultradźwiękowym jest trudnym zadaniem. Zapewnienie możliwości detekcji obiektów o niewielkiej skutecznej powierzchni odbicia, przy zachowaniu znacznego zasięgu instrumentalnego echolokatora oraz wysokiej dokładności określanych współrzędnych, wymaga opracowania wydajnego i skutecznego rozwiązania układowego toru nadawczo-odbiorczego, jak również efektywnych algorytmów przetwarzania sygnałów i algorytmów układu określania współrzędnych [4].

Zapewnienie wymaganych parametrów sygnałowych – ze sprzętowego punktu widzenia – może zostać zrealizowane poprzez zwiększenie energii sygnału z wykorzystaniem nadajnika o większej mocy. Okazuje się to jednak problematyczne, biorąc pod uwagę wymogi bezpieczeństwa oraz ograniczenia układowe toru nadawczego. Zwiększenie całkowitej energii nadawanego sygnału przez wydłużenie czasu trwania impulsu sondującego – przy założeniu braku dodatkowej manipulacji sygnału sondującego oraz przy zachowaniu szczytowej wartości ciśnienia generowanego sygnału – pozwala również na zwiększenie stosunku sygnału do szumu. Ta operacja po-

prawia zasięg detekcji kosztem rozróżnialności obiektów w przestrzeni [2]. Dlatego też konstruktorzy projektujący rozwiązania układowe echolokatora opartego głównie na detekcji amplitudowej często muszą pójść na kompromis, a więc zmniejszyć zasięg urządzenia na korzyść utrzymania wymaganej rozdzielczości odległościowej.

Rozwój układów cyfrowych, zwłaszcza układów generowania sygnałów DDS (*direct digital synthesis*) i DAC (*digital analog converter*) oraz procesorów sygnałowych i metod cyfrowego przetwarzania sygnałów stosowanych w systemach echolokacyjnych, zapewnił wysokie parametry echolokatora przez wykorzystanie złożonej manipulacji parametrami sygnału sondującego oraz cyfrową obróbkę sygnału użytecznego. Jednym z przykładów jest zastosowanie złożonej modulacji częstotliwości i fazy sygnału sondującego oraz algorytmów filtracji dopasowanej [1]. Gwarantuje to skuteczne zwiększenie stosunku sygnału do szumu i tym samym – zwiększenie maksymalnego zasięgu z zachowaniem wymaganej rozdzielczości odległościowej.

Do opracowania rozwiązań echolokatora konieczna jest ich szczegółowa analiza – zarówno metodami symulacji komputerowej, jak i metodami doświadczalnymi.

Głównym celem artykułu jest zaprezentowanie wykonanego symulatora oraz stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do generowania sygnałów odbitych od wirtualnych obiektów, a także weryfikacja algorytmów przetwarzania sygnałów echolokacyjnych.

Symulator systemu echolokacyjnego

Zweryfikowanie skuteczności manipulacji parametrami sygnału sondującego, poprawności przetwarzania sygnału odbitego od obiektów oraz algorytmów wykorzystywanych w procesie maksymalizacji stosunku sygnału do szumu i późniejszej estymacji współrzędnych wymaga przeprowadzenia złożonych badań symulacyjnych, uwzględniających kinematykę ruchu obiektu i przyjęte parametry sygnałowe echolokatora. Zastosowanie modulacji pozwala na poszerzenie widma niezależnie od czasu jego trwania, a więc na możliwy wzrost stosunku sygnału do szumu, uzyskany po kompresji czasowej i zależny od zysku filtracji dopasowanej [5]. Do przetestowania skuteczności detekcji sygnału użytecznego niezbędna jest m.in. ilościowa ocena intensywności sygnału odbitego od celu. W środowisku Matlab opracowano więc symulator przeznaczony do symulacji sygnałów odbitych od wirtualnych obiektów oraz do testowania metod przetwarzania sygnałów.

Oprogramowanie symulacyjne pozwala na sprawdzenie możliwości detekcyjnych i określenie współrzędnych

* Mgr inż. Mateusz Kaszyński, mateusz.kaszynski@wat.edu.pl – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, Polska

Dr inż. Stanisław Grzywiński, stanislaw.grzywinski@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3061-608x> – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, Polska

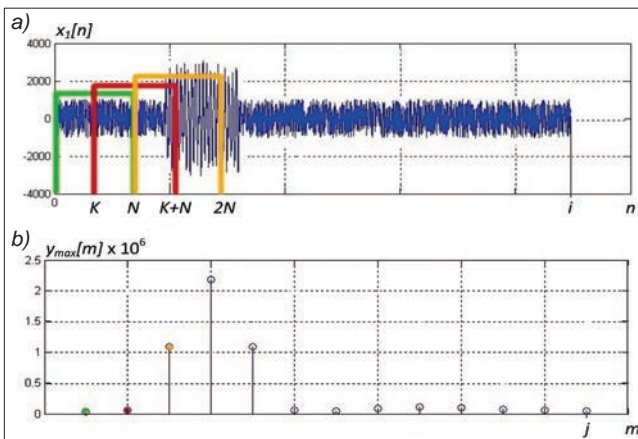
Dr inż. Dariusz Rodzik, dariusz.rodzik@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-1697-8874> – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, Polska

echolokatora z uwzględnieniem: parametrów modulacji sygnału sondującego, odchylenia standardowego szumów σ_x , częstotliwości próbkowania sygnału f_{pr} , czasu trwania okna czasowego τ , w którym jednorazowo pobieranych jest N próbek sygnału do operacji splotu ($N = \tau \cdot f_{pr}$), czasu opóźnienia okna czasowego względem przetwarzanego sygnału t_0 , określanego dla sygnałów dyskretnych jako wielkość przesunięcia okna czasowego względem pobranego sygnału k .

Badania symulacyjne prowadzono, pobierając kolejno próbki sygnału użytecznego występującego na tle szumów, zawartego w tablicy i -elementowej, do bufora pamięci o wielkości N . Następnie próbki były poddawane operacji splotu z odpowiedzią filtru dopasowanego, zgodnie z zależnością:

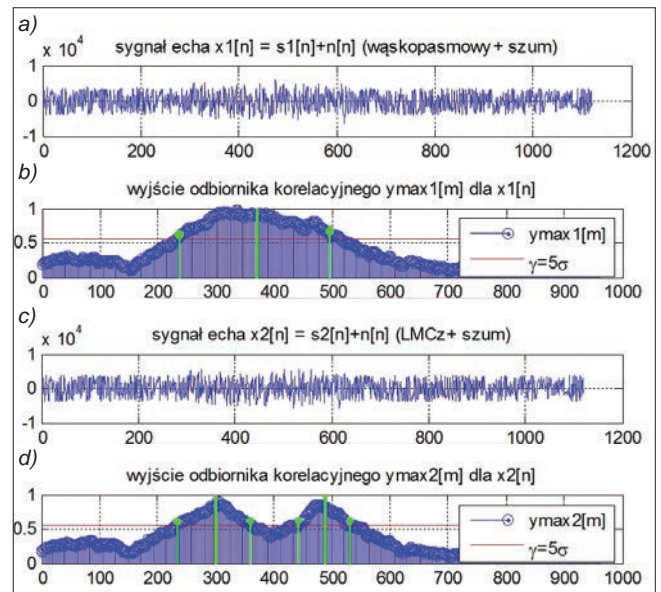
$$y(n) = x(n) \cdot s(n) = \sum_{m=0}^N x(m) s(n - m)$$

W wyniku tego działania z otrzymanej tablicy o rozmiarze $(2N - 1)$, zawierającej wynikowe wartości splotu sygnału z m -tego pobrania, wyznaczano wartość $y_{max}(m)$ i zapisywano do tablicy o wymiarze $j = i/k$. Badano wpływ opóźnienia okna czasowego o przyjętej liczbie próbek sygnału k . Przykładowe wyniki symulacji pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Sposób pobierania próbek i poddawania ich operacji splotu z odpowiedzią filtru dopasowanego: a) zobrazowanie okien czasowych, b) wynik filtracji dopasowanej

Oprogramowanie symulacyjne wykorzystano do analizy możliwości zwiększenia rozróżnialności odległościowej – przeprowadzono badania wpływu parametrów sygnału sondującego oraz zmiany przesunięcia okna czasowego przy filtracji dopasowanej. Wybrane wyniki dotyczące zwiększenia możliwości rozróżnialności odległościowej obiektów z wykorzystaniem zmian parametrów sygnału i algorytmów cyfrowej obróbki przedstawiono na rys. 2.

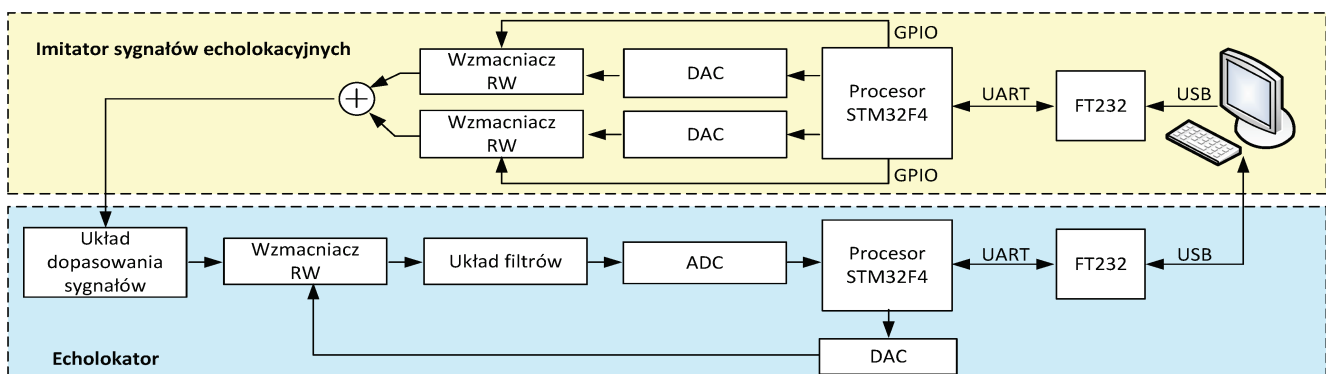


Rys. 2. Porównanie możliwości detekcyjnych przetwarzania sygnału echa: a)-b) wąskopasmowego, c)-d) z modulacją LMCz

Stanowisko laboratoryjne

Symulacja rzeczywistego sygnału odbitego od obiektu wymaga zastosowania m.in. generatorów sygnałowych zestawionych w postaci rozbudowanego stanowiska. Zaprojektowano i wykonano echolokacyjny imitator obiektu, pozwalający na generowanie sygnału o parametrach, które są zależne od kinematyki obiektu i parametrów toru nadawczo-odbiorczego. Stanowisko zapewnia generowanie sygnałów odbitych od obiektów, których parametry są określane za pomocą opracowanego symulatora. Stanowisko to odzwierciedla pracę systemu echolokacyjnego poprzez imitację obiektów, z uwzględnieniem warunków propagacji fali akustycznej w powietrzu. Wykorzystano tu możliwości procesora STM32F4, który realizuje zadania komunikacji z oprogramowaniem symulacyjnym oraz imitacji obiektów poprzez generację sygnałów echa.

Efekt tłumienia fali akustycznej w powietrzu oraz symulację intensywności sygnału odbitego zrealizowano poprzez programową zmianę amplitudy sygnału echa z użyciem wzmacniaczy z regulacją wzmocnienia 40 dB. Do imitacji dwóch obiektów zastosowano dwa niezależne tory sygnałowe, aby móc prowadzić badania związane z rozróżnialnością w odległości dla zadanych parametrów sygnału sondującego i wybranych algorytmów przetwarzania. Generowany sygnał echa jest przetwarzany przez echolokator wyposażony w układy dopasowania oraz taki sam procesor z zaimplementowanymi algorytmami przetwarzania sygnałów (rys. 3).



Rys. 3. Schemat funkcjonalny stanowiska laboratoryjnego

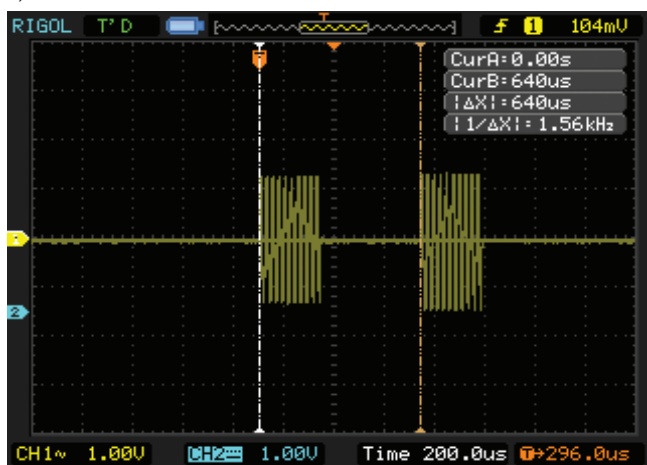
Przykładowe oscylogramy dla sygnału sondującego oraz sygnału echa przedstawiono na rys. 4a, a na rys. 4b – oscylogramy impulsów synchronizujących echolokator ze stanowiskiem laboratoryjnym.

Implementację oprogramowania procesora STM32F4 zrealizowano w środowisku Keil z pakietem μ Vision. Inicjacja dowolnego układu peryferyjnego z wykorzystaniem bibliotek SPL (*standard peripherals library*) sprowadza się do:

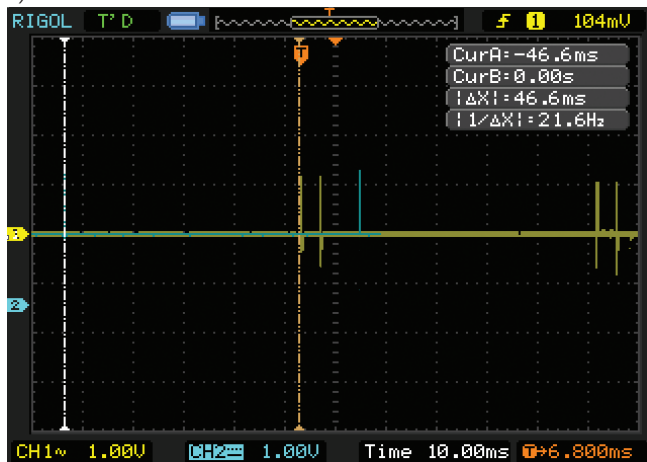
- wywołania funkcji ustawiającej w rejestrze procesora wartość, od której zależy opóźnienie sygnału taktowania zegara do danego układu peryferyjnego, w celu jego włączenia;
- wprowadzenia ustawień dotyczących trybu pracy i parametrów inicjalizowanego układu peryferyjnego poprzez przypisanie wartości rejestrów do odpowiednich zmiennych należących do struktury obiektu;
- wywołania funkcji inicjacyjnej, w której następuje wprowadzenie do rejestrów procesora wybranych ustawień.

W celu zapewnienia synchronicznej pracy stanowiska oraz opracowanego echolokatora stosowano układy licznikowo-czasowe, umożliwiające pośrednio generowanie impulsów synchronizujących z określoną częstotliwością powtarzania f_i (rys. 4b). Wysłanie ramki danych z komputera PC, zawierającej informację na temat wybranych przez użytkownika parametrów imitowanych obiektów, rozpoczyna pracę imitatora sygnałów echolokacyjnych. Odpowiednią synchronizację oraz sekwencję działań realizowanych przez układy peryferyjne procesora zapewniono dzięki wykorzystaniu układu obsługi przerwań, w którym ustawiano flagi rozpoczynające kolejne procesy.

a)



b)



Rys. 4. Oscylogramy przedstawiające: a) sygnał sondujący wraz z sygnałem echa, b) sygnały synchronizujące

W opracowanym oprogramowaniu echolokatora wykorzystano układy DMA (*direct memory access*) do bezpośredniego transferu danych z przetwornika ADC do pamięci RAM (*random access memory*) [3]. W ten sposób umożliwiono jednoczesną obróbkę i filtrację dopasowaną sygnału z bieżącej podstawy czasu oraz transfer wyznaczonych danych o wykrytych obiektach z poprzedniego sondowania. Przy takim podejściu procesy akwizycji, przetwarzania, filtracji i transmisji danych mogą się odbywać w czasie rzeczywistym.

Podsumowanie

Opracowane stanowisko laboratoryjne do przetwarzania sygnałów echolokacyjnych jest przeznaczone do generowania sygnałów odbitych od wirtualnych obiektów przy zadanych parametrach. Parametry wejściowe opracowanego imitatora są wprowadzane przez użytkownika i mogą być zmieniane podczas pracy układu. Imitator umożliwia wprowadzenie:

- częstotliwości nośnej,
- częstotliwości powtarzania echolokatora,
- czasu trwania impulsu,
- parametrów imitowanych obiektów, tj. początkowej odległości oraz prędkości.

Na podstawie wprowadzonych parametrów wyznaczone są parametry sygnałów: sondującego i odbitego od wirtualnego obiektu.

Zaprezentowane w artykule stanowisko laboratoryjne wraz z dedykowanym oprogramowaniem pozwala na badania wpływu manipulacji parametrami sygnału sondującego oraz algorytmów przetwarzania na skuteczność detekcji oraz dokładność określanych współrzędnych wykrytych obiektów.

Stanowisko umożliwia testowanie algorytmów oraz generowanie sygnałów z nieliniową modulacją częstotliwości lub z dyskretną modulacją fazy za pomocą kodów algebraicznych (m.in. Barkera i Golaya). Imituje sygnały odbite od obiektów przy założonym sztucznym tłumieniu amplitudy, odzwierciedlającym sposób propagacji fali oraz właściwości odbijające obiektów. Opracowane algorytmy przetwarzania sygnałów są uniwersalne i mogą być stosowane również w innych systemach echolokacyjnych, z uwzględnieniem charakteru propagacji wykorzystywanych fal i dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych torów nadawczo-odbiorczych.

LITERATURA

- [1] Żygadło S., Grzywiński S., Achtenberg K. „Model generatora kontrolno-pomiarowego wybranych parametrów stacji radiolokacyjnej”. *Mechanik*. 89, 7 (2016): 880–881.
- [2] Salamon R. „Systemy hydrolokacyjne”. Gdańsk: Gdańskie Towarzystwo Naukowe, 2006.
- [3] Grzesiak A. „Teoretyczne podstawy radiolokacji. Część 1”. Warszawa: WAT, 1981.
- [4] Grzywiński S., Achtenberg K. „Wykorzystanie struktur FPGA do implementacji algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów”. *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*. 8, 3 (2017): 157–164.
- [5] STM32F407VG Datasheet, www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf (dostęp: 19.12.2017).