



## RADIOLOKACYJNY IMITATOR CELU RADAR TARGET IMITATOR

Stanisław ŻYGADŁO, Stanisław GRZYWIŃSKI, Krzysztof ACHTENBERG  
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46  
*Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego St., 00-908 Warsaw, Poland*  
*Author's e-mail address: szygadlo@wat.edu.pl; ORCID: 0000-0003-2019-5872*

DOI 10.5604/01.3001.0013.3771

**Streszczenie:** W artykule opisano zaprojektowany i wykonany praktycznie jednokanałowy imitator sygnałów radiolokacyjnych, który pozwala na generację sygnału odbitego od celu o zadanej trajektorii, dla pasma częstotliwości pośredniej. Przedstawione stanowisko może być wykorzystane do weryfikacji analogowego traktu przetwarzania sygnału radiolokacyjnego na częstotliwości pośredniej oraz algorytmów DSP wykorzystywanych do estymacji współrzędnych imitowanego celu.

**Słowa kluczowe:** sygnał radiolokacyjny, bezpośrednia synteza cyfrowa, DSP

### 1. Wprowadzenie

Weryfikacja poprawności działania radiolokacyjnego, analogowego traktu odbiorczego dla sygnału o częstotliwości pośredniej jest zadaniem wymagającym wykorzystania zaawansowanego sprzętu pomiarowego. Podstawowymi parametrami, które charakteryzują możliwości odbiornika są czułość szumowa i sygnałowa oraz zakres dynamiki przetwarzania. Sprawdzenia tych parametrów pozwalają określić ogólne możliwości odbiornika. W przypadku weryfikacji poprawności przetwarzania sygnału odbitego od celu i późniejszej estymacji jego współrzędnych, a także algorytmów wykorzystywanych w procesie maksymalizacji stosunku sygnału do szumu niezbędna jest możliwość generacji sygnału o parametrach za-

**Abstract:** The paper describes a single channel imitator for radar signals, operating on the intermediate frequency band, which was designed and made practically to generate the signal reflected from an aerial target with given trajectory. Presented setup can be used to verify the analog channel for radar signal processing at intermediate frequencies and the DSP algorithms used to estimate coordinates of the imitated target.

**Keywords:** Radar signal, direct digital synthesis, DSP (digital signal processing)

### 1. Introduction

Verification of efficiency of radar analog receiver channel for intermediate frequency signals demands the application of complex measurement equipment. Receiver's sensitivities to noise and signal and the dynamical range of processing are the basic parameters describing its capacities. Examinations of these parameters can evaluate the receiver's general performance. The verification of processing efficiency for signals reflected from the target and later estimation of its coordinates, and the algorithms deployed for the optimisation of signal to noise ratio, requires the generation of signals with parameters depending on the

leżnych od kinematyki ruchu celu i przyjętych parametrów sygnałowych radaru. Symulacja rzeczywistego sygnału odbitego od celu jest zadaniem trudnym, wymagającym zastosowania kilku generatorów sygnałowych zestawionych w postaci rozbudowanego stanowiska, które i tak ma ograniczone możliwości generacji niezbędnych sygnałów. Biorąc pod uwagę powyższe trudności, zaprojektowano oraz wykonano praktycznie imitator sygnału radiolokacyjnego odbitego od celu, pozwalający na wygenerowanie sygnału o parametrach, które są zależne od trajektorii i kinematyki celu oraz parametrów traktu nadawczo-odbiorczego radaru. Opracowane stanowisko przeznaczone jest do generacji sygnałów o częstotliwości pośredniej modulowanych impulsowo, imitujących sygnał sondujący wyemitowany przez monostatyczną stację radiolokacyjną oraz sygnał odebrany od nieruchomego i ruchomego celu. Parametry wejściowe imitatora są wprowadzane przez użytkownika i mogą być zmieniane podczas pracy układu. Użytkownik może wprowadzić: częstotliwość nośną oraz częstotliwość powtarzania, czas trwania impulsu, początkową odległość i prędkość celu. Na podstawie wprowadzonych parametrów wyznaczone są parametry sygnału sondującego oraz sygnału odbitego od celu. W podstawowym trybie pracy imitator jest skonfigurowany do generacji sygnału sondującego z liniową modulacją częstotliwości zgodnie z zależnością:

$$u_t(t) = \begin{cases} U_t \cdot \cos \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{\mu t}{2} \right) t \right] & \text{dla } 0 \leq t \leq t_i \\ 0 & \text{dla } 0 > t > t_i \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$U_t$  – amplituda sygnału;

$f_0$  – częstotliwość początkowa sygnału;

$\mu$  – nachylenie liniowej funkcji modulacji częstotliwości;

$\Delta f$  – dewiacja częstotliwości;

$t_i$  – czas trwania impulsu.

Na skutek tłumienia atmosfery, zmiennej skutecznej powierzchni odbicia oraz parametrów kinematycznych celu na wyjściu liniowej części odbiornika ulegają zmianie: amplituda, częstotliwość oraz faza sygnału echa. Znając trajektorię celu, a przez to odle-

target movement kinematics and on accepted signal radar parameters. Simulation of a real signal reflected from the target is difficult and even if a set of signal generators may be used to build a complex setup it finally represents limited capacities in generation of required signals. Considering the above difficulties the imitator of radar signal reflected from a target was designed and made in practice to generate the signal with parameters depending on target's trajectory, and kinematics and on radar transmission-receiving channel. Developed setup is designated to generate signals of intermediate frequency with pulsed modulation imitating a probing signal transmitted by a monostatic radar station, and a signal received from an unmoving or moving target. Input parameters of the imitator are entered by the user and may be changed at its operation. The user may enter the carrier frequency, the rate of repetition, the pulse duration, the initial range to the target and its velocity. Basing on the entered parameters the characteristics of probing and target reflected signals are determined. For the basic operation mode the imitator is configured for generation of the probing signal with the linear modulation of frequency according to relation:

where:

$U_t$  – signal amplitude;

$f_0$  – initial signal frequency;

$\mu$  – declination of frequency linear modulation function;

$\Delta f$  – frequency deviation;

$t_i$  – pulse duration time.

The amplitude, frequency and phase of the echo signal are changeable in the output of receiver linear part due to changes of atmosphere absorption, effective radar cross section and target kinematic parameters. Assuming the lossless environment

głość od monostatycznego radaru, w środowisku bezstratnym, przy mocy impulsu  $P_t$  możemy określić moc otrzymaną na wyjściu liniowej części odbiornika zgodnie ze wzorem:

$$P_r = \frac{L \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot K \cdot \lambda^2 \cdot \sigma(\alpha_{ob}, \varepsilon_{ob})}{4 \cdot \pi^3 \cdot R^4} \quad (2)$$

gdzie:

$P_t$  – moc pojedynczego nadajnika;

$L$  – liczba nadajników;

$G_t$  – zysk kierunkowy anteny nadawczej;

$G_r$  – zysk kierunkowy pojedynczej anteny odbiorczej;

$K$  – wzmocnienie odbiornika;

$\lambda$  – długość fali;

$\sigma$  – skuteczna powierzchnia odbicia;

$\alpha_{ob}, \varepsilon_{ob}$  – kąty obserwacji celu;

$R$  – odległość.

Amplituda napięcia na wyjściu liniowej części odbiornika wynosi:

and power of the pulse  $P_t$ , and knowing the target trajectory and by the same the range to the monostatic radar the power received at the output of the receiver linear part may be defined by formula:

where:

$P_t$  – the power of a single transmitter;

$L$  – number of transmitters;

$G_t$  – transmitting antenna directional gain;

$G_r$  – directional gain of a single receiving antenna;

$K$  – receiver's amplification;

$\lambda$  – wavelength;

$\sigma$  – effective radar cross section;

$\alpha_{ob}, \varepsilon_{ob}$  – angles of target observation;

$R$  – range.

Amplitude of voltage in the output of receiver linear part is:

$$U_r = \sqrt{P_r \cdot R_{ob}} \quad (3)$$

gdzie:  $R_{ob}$  – obciążenie odbiornika.

Praca imitatora uwzględnia zmianę częstotliwości dopplerowskiej w funkcji wprowadzonej prędkości ruchu celu oraz zmianę fazy w funkcji bieżącej odległości do niego zmieniającej się w czasie. Zależność częstotliwości dopplerowskiej w funkcji odległości przedstawia poniższy wzór:

where:  $R_{ob}$  – the receiver's load.

Operation of the imitator takes into account changes of Doppler frequency as a function of entered velocity of the target, and the change of the phase as time running function of the range to it. Dependence of the Doppler frequency on the range describes the following formula:

$$f_d = \frac{2 \cdot v_c}{\lambda} \quad (4)$$

gdzie:

$v_c$  – prędkość celu względem stacji;

$\lambda$  – długość fali nadanej przez stację.

Faza sygnału impulsu odebranego przez stację jest określana z zależności:

where:

$v_c$  – target velocity against station;

$\lambda$  – wavelength transmitted by station.

The phase of the pulse signal received by the station is determined by:

$$\theta_0 = \frac{2 \cdot R_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{c} \quad (5)$$

gdzie:

$R_0$  – odległość celu od stacji;

$f$  – częstotliwość fali nadanej przez stację;

$c$  – prędkość fali.

where:

$R_0$  – distance between target and station;

$f$  – signal frequency sent by station;

$c$  – signal velocity.

Dodatkowo w opracowanym rozwiązaniu założono możliwość podłączenia do dodatkowego wejścia addytywnego szumu o określonych parametrach. Sygnał wprowadzonego szumu symuluje uzyskaną w realnych warunkach ścieżkę szumową na wejściu liniowej części odbiornika. Z teoretycznego punktu widzenia szum można wyrazić poprzez jego spektralną gęstość mocy. Można stwierdzić, że moc szumów jest związana z pasmem przenoszenia odbiornika radaru B, a uwzględniając moc termiczną związaną z generowaniem szumów można zapisać zależność jako:

$$N_t = k_B T_s B \quad (6)$$

gdzie:

$N_t$  – szum na wyjściu układu;

$k_B$  – stała Boltzmana  $1.38 \times 10^{-23}$  [J/K];

$T_s$  – całkowita efektywna temperatura pracy [K].

Zasadnicza część imitatora składa się z modułu generatora z układem DDS (z ang. Direct Digital Synthesis) oraz modułu sterownika opartego o mikrokontroler z rodziny STM32F4. Do komunikacji pomiędzy układami wykorzystano szeregowy interfejs SPI. Poszczególne moduły tworzą zaprojektowane w programie EDA, a następnie wykonane dwustronne obwody drukowane. Interfejs użytkownika tworzą: monochromatyczny wyświetlacz graficzny o rozdzielczości 240 x 128 pikseli, klawiatura matrycowa oraz enkoder obrotowy. Oprogramowanie sterownika zostało napisane w dedykowanym dla mikrokontrolerów ARM środowisku Keil  $\mu$ Vision 4. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy budowy imitatora.

The developed solution also has a predicted possibility for connecting an additive noise source with specific parameters into an additional input. A noise track received in real conditions in the input of the receiver linear part is simulated by the entered noise signal. The noise theoretically may be expressed by its spectral power density. It may be stated that the noise power relates to the pass band B of radar's receiver, and considering the thermal power connected with the generation of noises the following dependence may be written:

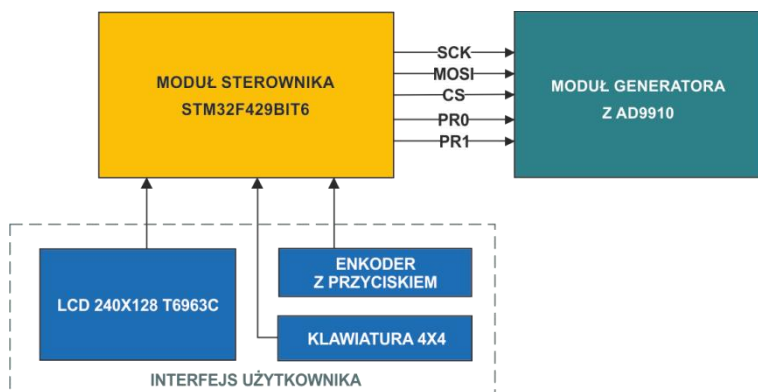
where:

$N_t$  – noise at the unit output;

$k_B$  – Boltzmann constant  $1.38 \times 10^{-23}$  [J/K];

$T_s$  – effective temperature of operation [K].

The main part of the imitator includes the modules of a generator with Direct Digital Synthesis (DDS) system and a controller based on STM32F4 family microcontroller. Communication between the systems is provided by a serial interface SPI. Particular modules consist of two-side printed circuits designed by EDA computer code. The user's interface includes a monochromatic graphical display with resolution of 240 x 128 pixels, a matrix keyboard and a rotating encoder. The controller's code was prepared in Keil  $\mu$ Vision 4 environment dedicated for ARM microcontrollers. The block diagram of the imitator is shown in Fig. 1.



**Rys. 1. Schemat blokowy imitatora sygnału radiolokacyjnego odbitego od celu**

*Fig. 1. Block diagram of radar imitator for signal reflected from target*

MODUŁ STEROWNIKA / CONTROLLER MODULE  
 MODUŁ GENERATORA Z AD9910 / GENERATOR MODULE WITH AD9910  
 ENKODER A PRZYCISKIEM / ENCODER WITH BUTTON  
 KLAWIATURA 4X4 / 4X4 KEYBOARD  
 INTERFEJS UŻYTKOWNIKA / USER'S INTERFACE

## 2. Działanie imitatora

Podstawą działania imitatora jest wykorzystanie funkcji wbudowanych w postaci profili generatora AD9910. Umożliwiają one skokowe przestrajanie generatora DDS na zaprogramowane wcześniej ustawienia. Układ AD9910 ma możliwość wprowadzenia 8 różnych ustawień, z których każde zawiera amplitudę, częstotliwość oraz fazę początkową sygnału. Taktowanie układu DDS odbywa się z wykorzystaniem generatora kwarcowego oraz wewnętrznej pętli synchronizacji fazowej PLL. Takie rozwiązanie pozwala na taktowanie rdzenia układu DDS z częstotliwością 1GHz.

Jako sterownik modułu generatora wykorzystano mikrokontroler ARM STM32F4. Aby zapewnić jak najlepszą stabilność częstotliwości wewnątrz impulsu, czasu powtarzania oraz czasu trwania impulsów wykorzystano wbudowany w mikrokontroler licznik 32-bitowy. Do jego wyjściowych wyprowadzeń OCx (z ang. Output Compare) podłączono wejścia sterujące profilami układu AD9910. Takie rozwiązanie pozwala na sprzętową realizację sterowania generatorem z wykorzystaniem dedykowanych kanałów licznika. Po uruchomieniu imitatora, do układu DDS przesyłane są następujące ustawienia profili:

- PROFIL NR 0 – amplituda, częstotliwość nośna oraz faza początkowa,
- PROFIL NR 1 – amplituda, częstotliwość oraz faza impulsu nadanego,
- PROFIL NR 2 – amplituda, częstotliwość oraz faza impulsu odebranego.

Wszystkie ustawienia są obliczane na podstawie parametrów wejściowych. Oprócz ustawień generatora, mikrokontroler konfiguruje również dodatkowy sprzętowy układ licznikowy, który pozwala na uzyskanie odpowiedniej rozdzielczości czasowej generowanych sygnałów. Podczas konfiguracji ustawiane są trzy kanały typu „Output Compare”. Pierwszy w trybie PWM1 odpowiada za wyzwolenie impulsu nadawanego przez stację. Drugi skonfigurowany do pracy w trybie „Toggle” odpowiada za generację impulsu echa. Trzeci kanał określa moment, w którym do rejestrów profilu nr 2, przesyłane są nowe

## 2. Operation of the Imitator

The operation of the imitator is based on functions embedded in the form of profiles of AD9910 generator. They provide a jumping adjusting of DDS generator into pre-programmed settings. Unit AD9910 can accept 8 different settings and each of them contains the amplitude, frequency and original phase of the signal. Timing of DDS unit takes place by using a quartz generator and internal loop of phase synchronisation PLL. Such solution secures 1GHz timing for DDS unit core.

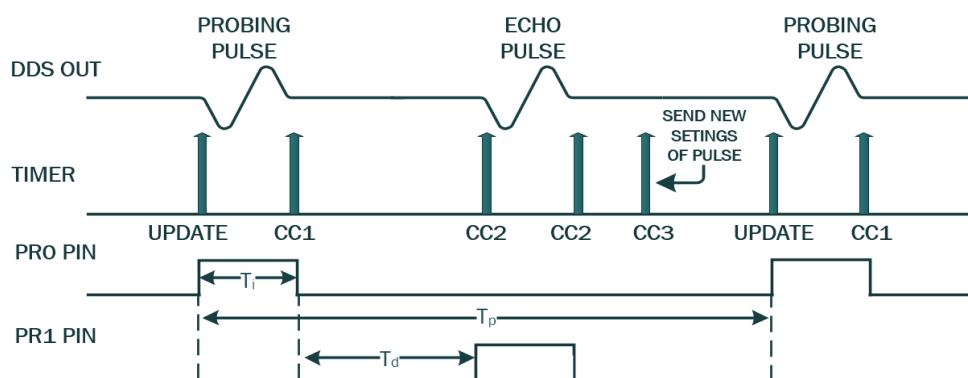
Microcontroller ARM STM32F4 is used to control the module of the generator. The 32 bit counter embedded into the microcontroller is used to secure the highest possible stabilities of frequency inside the pulse, of the repetition time and the pulse duration time. Its output terminals OCx (Output Compare) are connected to the AD9910 unit profile controlling inputs. Such solution provides a technical solution on controlling the generator by using dedicated channels of the counter. When the imitator is on, the following settings of profiles are sent to DDS unit:

- PROFIL NR 0 – amplitude, carrier frequency and original phase,
- PROFIL NR 1 – amplitude, frequency and phase of transmitted pulse,
- PROFIL NR 2 – amplitude, frequency and phase of received pulse.

Each setting is calculated on the base of input parameters. Apart of the settings for generator, the microcontroller also configures an additional hardware counting system providing required time resolution for generated signals. During the configuration the settings of three channels of „Output Compare” type are made. The first in the PWM1 mode is responsible for triggering the pulse transmitted by the station. The second one is configured to work in „Toggle” mode and is responsible for generation of an echo pulse. The third channel selects a time moment when the

ustawienia. Jest to konieczne dla zapewnienia ciągłej zmiany parametrów sygnału odbitego od celu w przypadku celu ruchomego. Nowe ustawienia o rozmiarze 8 bajtów wysyłane są w przerwaniu, które jest generowane trzecim kanałem układu licznikowego (pomiędzy impulsem echa, a kolejnym impulsem sondującym). Procedura obliczenia nowych parametrów sygnału echa oraz przesłania ich do układu DDS zajmuje  $25\mu\text{s}$ . Poglądowy wykres czasowy działania imitatora przedstawiono na rys. 2.

new settings are sent to the registers of profile No 2. It is needed to secure a continuous change of the reflected signal parameters for the moving target. New settings with the size of 8 bites are sent in a gap which is generated by the third channel of the counter's system (between an echo pulse and the next probing pulse). The procedure for calculation of new parameters of the echo signal and sending them to DDS unit takes  $25\mu\text{s}$ . Fig. 2 shows a time illustration of imitator operation.



**Rys. 2. Poglądowy wykres czasowy działania imitatora**

**Fig. 2. Time relations illustrating operation of the imitator**

Opracowany imitator umożliwia generowanie sygnałów impulsowych imitujących sygnały odbite od celu nieruchomego i ruchomego o następujących parametrach:

- częstotliwość powtarzania w zakresie od 200Hz do 2kHz;
- czas trwania impulsu od  $2\mu\text{s}$  do  $50\mu\text{s}$ ;
- prędkość celu od 0 do 1000m/s;
- częstotliwość pośrednia w zakresie od 1MHz do 50MHz;
- amplituda impulsów w zakresie od  $50\mu\text{V}$  do 500mV.

### 3. Oprogramowanie

Oprogramowanie imitatora zostało napisane w języku C przy wykorzystaniu środowiska Keil uVision. Do opisanego funkcji konfigurującej sprzętowy licznik oraz wektor przerwań wykorzystano biblioteki standardowe dostarczane przez producenta procesora

Developed imitator provides generation of pulse signals imitating the signals reflected from unmoving or moving targets, and having following parameters:

- Repetition rate in the range from 200Hz to 2kHz;
- Pulse duration from  $2.0\mu\text{s}$  to  $50.0\mu\text{s}$ ;
- Target velocity from 0 to 1000m/s;
- Intermediate frequency on the range from 1MHz to 50MHz;
- Amplitude of pulses in the range from  $50\mu\text{V}$  to 500mV.

### 3. Computer Code

Computer code was prepared for the imitator in C language by using the Keil uVision environment. For descriptions of the function configuring the hardware counter and the vector of interruptions the standard libraries supplied by the manu-

STM.

Z powodu wykorzystania dedykowanych wyjść „Output Compare” linii GPIO posiadające tę właśnie funkcję dla wykorzystanego układu licznikowego zostały skonfigurowane do pracy w trybie funkcji alternatywnej. Poniżej na listingu 1 przedstawiono wybrane linie kodu odpowiadające za konfigurację licznika oraz jego pierwszego kanału porównania, który odpowiada za czas trwania impulsu sondującego.

factor of STM processor were used.

As the dedicated outputs „Output Compare” were used, then the lines GPIO, having just this function for the used counter unit, were configured to operate in a mode of an alternative function. The list No 1 below presents some selected code lines responsible for configuration of the counter and its first comparator channel responsible for the probing pulse duration time.

```
//konfiguracja licznika nr 8//
TIM_TimeBaseStructure.TIM_Prescaler = 15;
TIM_TimeBaseStructure.TIM_Period = period; //czestotliwosc powtarzania
TIM_TimeBaseStructure.TIM_ClockDivision = TIM_CKD_DIV1;
TIM_TimeBaseStructure.TIM_RepetitionCounter=0;
TIM_TimeBaseStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
TIM_TimeBaseInit(TIM8, &TIM_TimeBaseStructure);

//Konfiguracja kanału 1//
TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputNState = TIM_OutputNState_Disable;
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = pulse; //czas trwania impulsu nadawanego;

TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;
TIM_OCInitStructure.TIM_OCNPolarity = TIM_OCNPolarity_Low;
TIM_OCInitStructure.TIM_OCIdleState = TIM_OCIdleState_Reset;
TIM_OCInitStructure.TIM_OCNIdleState = TIM_OCNIdleState_Reset;
TIM_OC1Init(TIM8, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OC1PreloadConfig(TIM8, TIM_OCPreload_Disable);
```

#### 4. Część sprzętowa

Schematy oraz projekty obwodów drukowanych zostały wykonane przy pomocy programów EDA. Do zaprojektowania modułu sterownika wykorzystano środowisko Altium Designer w sposób umożliwiający wykorzystanie wszystkich dostępnych linii GPIO. Moduł posiada konwerter stanów logicznych oraz układ zabezpieczający przed uszkodzeniem w przypadku podłączenia niewłaściwego zasilania. Do zaprojektowania modułu generatora (rys.3) wykorzystano program Eagle w wersji Light. Moduł jest wyposażony w osobny obwód zasilania dla części analogowej i cyfrowej, wbudowany generator sygnału zegarowego o częstotliwości 40MHz oraz wyjściowy transformator dopasowujący.

#### 4. Hardware

Circuit diagrams and designs of printed circuits were prepared by using EDA computer codes. The controller module was designed in the Altium Designer environment which allowed to deploy each available GPIO line. The module has a converter of logical states and a protecting unit in the case if a wrong supply is connected to. The module of generator (Fig. 3) was designed by the Eagle computer code in version Light. The module is equipped with separate supplying circuits for the analog and digital parts, and with the embedded 40MHz clock signal generator, and the output matching transformer.

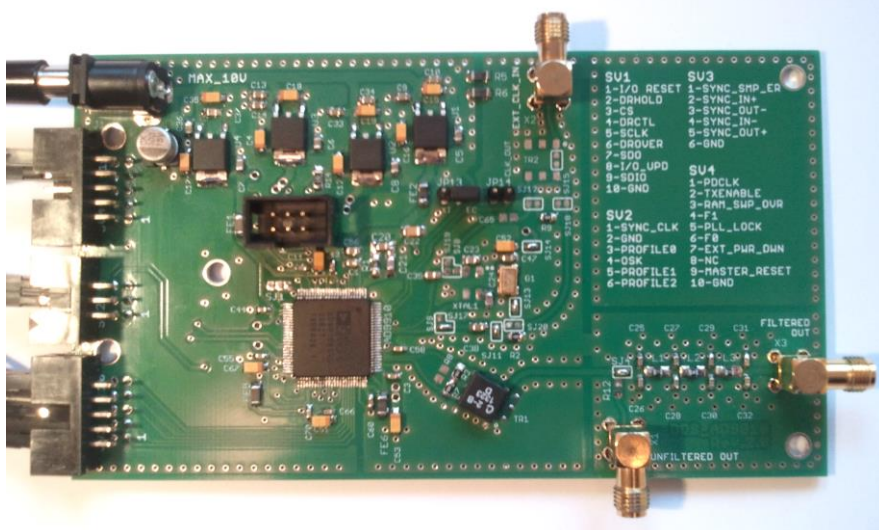


## 5. Podsumowanie

Imitator jest przyjazny dla użytkownika, który za pomocą klawiatury matrycowej ma możliwość wyboru parametrów sygnałów generowanych przez opracowany imitator oraz wyboru sytuacji powietrznej. Przykładowy oscylogram obrazujący jego pracę pokazano na rys.4. Widoczne impulsy prostokątne to sygnały wyjściowe z układu licznika mikrokontrolera, wyzwalające generację impulsów sinusoidalnych. Na oscylogramie pokazano sytuację dla celu ruchomego poruszającego się z określoną prędkością w kierunku stacji. Pierwszy impuls imituje sygnał nadany przez stację (o stałej fazie), drugi (o zmiennej fazie) jest sygnałem odebranym po odbiciu od celu.

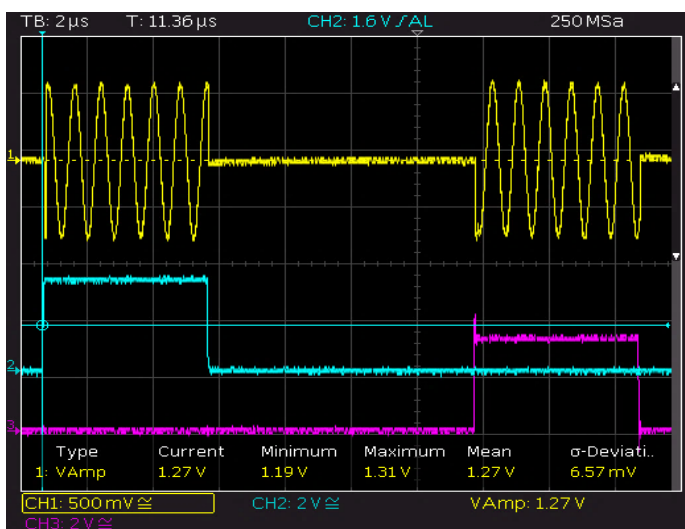
## 5. Summary

The imitator is easy in handling for the user who can select the parameters of generated signals and the aerial situation by the matrix keyboard. An exemplary oscillogram illustrating its operation is shown in Fig. 4. Rectangular pulses are the output signals from the unit of microcontroller counter triggering the generation of sinusoid pulses. The oscillogram shows a situation of a target moving with a given velocity towards the station. The first pulse imitates the signal transmitted by the station (with permanent phase) and the second signal (with changeable phase) is received after reflection from the target.



Rys. 3. Widok modułu generatora

*Fig. 3. View of the generator module*



Rys. 4. Przykładowy oscylogram obrazujący działanie imitatora

*Fig. 4. Exemplary oscillogram illustrating the operation of the imitator*



### **Literatura / Literature**

Stępień, R. (2011). *Syntezy DDS. Podstawy dla konstruktorów*. Legionowo: BTC.

*1 GSPS, 14-Bit, 3.3 V CMOS Direct Digital Synthesizer AD9910*. (2012). Analog Devices, Norwood U.S.A.

*Reference Manual, STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 Advanced ARM-based 32-bit MCUs*. (2015). STMicroelectronics.

