Konstrukcja zagłuszacza komunikacji radiowej ZKR-1. Prezentacja wyników prac badawczo-rozwojowych

Konrad Bożek
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: W artykule zaprezentowano modułowe urządzenia zagłuszające transmisję radiową opracowane przez konsorcjum Łukasiewicz-PIAP oraz ITTI sp. z o.o. w ramach realizacji projektu: „Zagłuszanie transmisji radiowej w wybranych obiektach Straży Granicznej". Urządzenia zapewniają w typowych warunkach eksploatacyjnych skuteczne blokowanie komunikacji radiowej (zapobieganie wycieku informacji, ochrona przez zdalną radiową detonacją ładunków wybuchowych) oraz analizę widma częstotliwości w paśmie od 25 MHz do 5.9 GHz. Przeznaczone są do wykorzystania przez profesjonalne służby państwowe, posiadają nowoczesny interfejs użytkownika oraz możliwość zdalnego sterowania. Scharakteryzowane zostały najważniejsze parametry i właściwości urządzeń oraz omówiono wyróżniające je niestandardowe tryby pracy, tj. tryb analizy widma oraz tryb zagłuszania responsywnego, który minimalizuje negatywne skutki ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne osób długotrwale przebywających w pobliżu pracujących urządzeń.

Słowa kluczowe: radio, zagłuszanie, walka radioelektroniczna, systemy antydronowe

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem technologii łączności bezprzewodowej oraz obszarów, w których taka łączność znajduje zastosowanie coraz większe znaczenie zyskują urządzenia, które służą do jej ograniczania, lub blokowania w określonych sytuacjach. Do niedawna tego typu urządzenia wykorzystywane były głównie podczas akcji pirotechnicznych, przejazdu konwoju na terenie nieprzyjaciela, transportu ważnych osób, a także podczas spotkań, na których mogło dojść do wycieku drogą radiową niejawnych informacji. Wzrost popularności i dostępności dronów oraz zwiększająca się liczba wydawanych licencji pilota bezzałogowego statku powietrznego spowodował, że sektor BSP stał się jednym z najszybciej rozwijających się segmentów rynku, a drony coraz częściej stawały się narzędziem nielegalnych lub balansujących na granicy prawa działań. Powstała tym samym potrzeba opracowywania rozmaitych systemów antydronowych, w których najczęściej stosowaną techniką neutralizacji jest właśnie zagłuszenie sterujących i nawigacyjnych sygnałów radiowych.

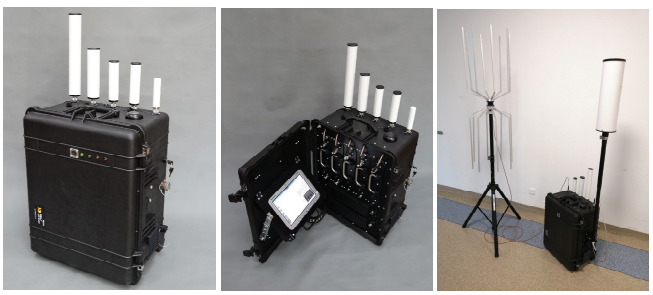
Zaprezentowane w artykule urządzenia zagłuszające powstały w wyniku współpracy Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP oraz firmy ITTI sp. z o.o., w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego pt. „Zakłócanie transmisji radiowej w wybranych obiektach Straży Granicznej" (umowa nr DOB-BIO7/15/04/2015) realizowanego na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) w ramach konkursu nr 7/2015.

Autor korespondujący:
Konrad Bożek, konrad.bozek@piap.lukasiewicz.gov.pl

Artykuł recenzowany
nadesłany 19.01.2022 r., przyjęty do druku 22.02.2022 r.

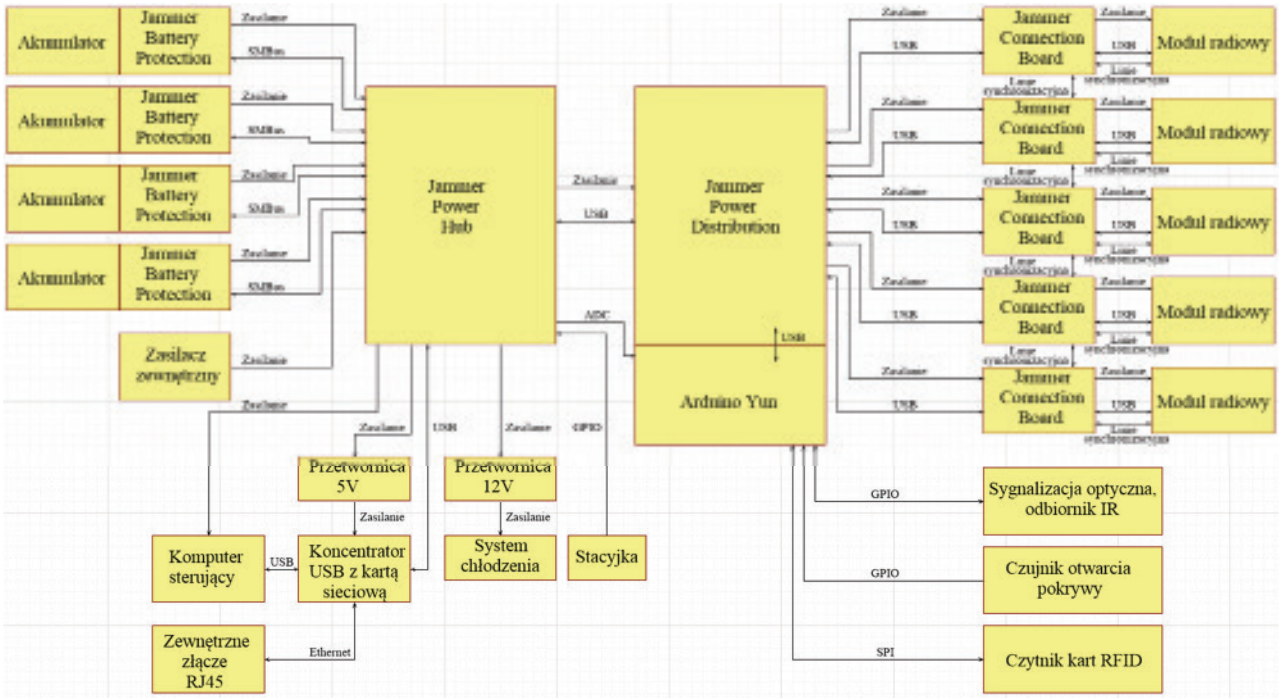
2. Budowa urządzenia w wersji przenośnej

Urządzenie zagłuszające w wersji przenośnej (rys. 1) wykonane zostało w formie walizki wyposażonej w kółka i wysuwaną rączkę, co ułatwia jej transport.



Rys. 1. Urządzenie zagłuszające w wersji przenośnej
Fig. 1. Portable jammer

Urządzenie ma wewnętrzne źródło zasilania w postaci akumulatorów litowo-polimerowych (dwa banki, po dwa akumulatory w każdym) w konfiguracji umożliwiającej nieprzerwaną pracę podczas ich wymiany. Do ładowania akumulatorów służy zewnętrzna ładowarka. Gdy dostępne jest zewnętrzne źródło



Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia zagłuszającego w wersji przenośnej
Fig. 2. Block diagram of portable jammer

energii urządzenie może być zasilane z sieci 230 V AC za pośrednictwem zewnętrznego zasilacza, lub ze źródła napięcia stałego 24–36 V. Na wieku obudowy znajdują się cztery diody LED sygnalizujące stan pracy urządzenia oraz odbiornik podczerwieni umożliwiający sterowanie wybranymi funkcjami za pomocą pilota. Po wewnętrznej stronie wieka znajduje się dotykowy wyświetlacz stanowiący interfejs użytkownika oraz czytnik kart RFID. Dla zapewnienia lepszej ergonomii pracy istnieje możliwość regulacji kąta wyświetlacza poprzez odchylenie go ku górze. W zależności od potrzeb, możliwe jest zamontowanie w obudowie maksymalnie pięciu modułów radiowych w dowolnej konfiguracji częstotliwościowej. Anteny obsługujące częstotliwości od 470 MHz montowane są bezpośrednio na znajdujących się na obudowie złączach współosiowych, zaś anteny na niższe pasma montowane są na maszcie mocowanym do obudowy urządzenia, lub na statywie. Na wierzchu obudowy znajduje się odbiornik GNSS. Do załączenia urządzenia służy znajdująca się na bocznej ściance obudowy stacyjka, obok której zlokalizowane są złącza RJ45 służące do podłączenia sieci Ethernet oraz złącze zasilania dodatkowego. Wymiary urządzenia bez zainstalowanych anten to 55 cm (szerokość) × 62 cm (wysokość) × 36 cm (głębokość), zaś jago masa (bez anten, akumulatorów i modułów radiowych) wynosi 35 kg. Chłodzenie odbywa się za pomocą wymuszonego obiegu powietrza.

Schemat blokowy urządzenia w wersji przenośnej został zaprezentowany na rys. 2.

3. Budowa urządzenia w wersji stacjonarnej

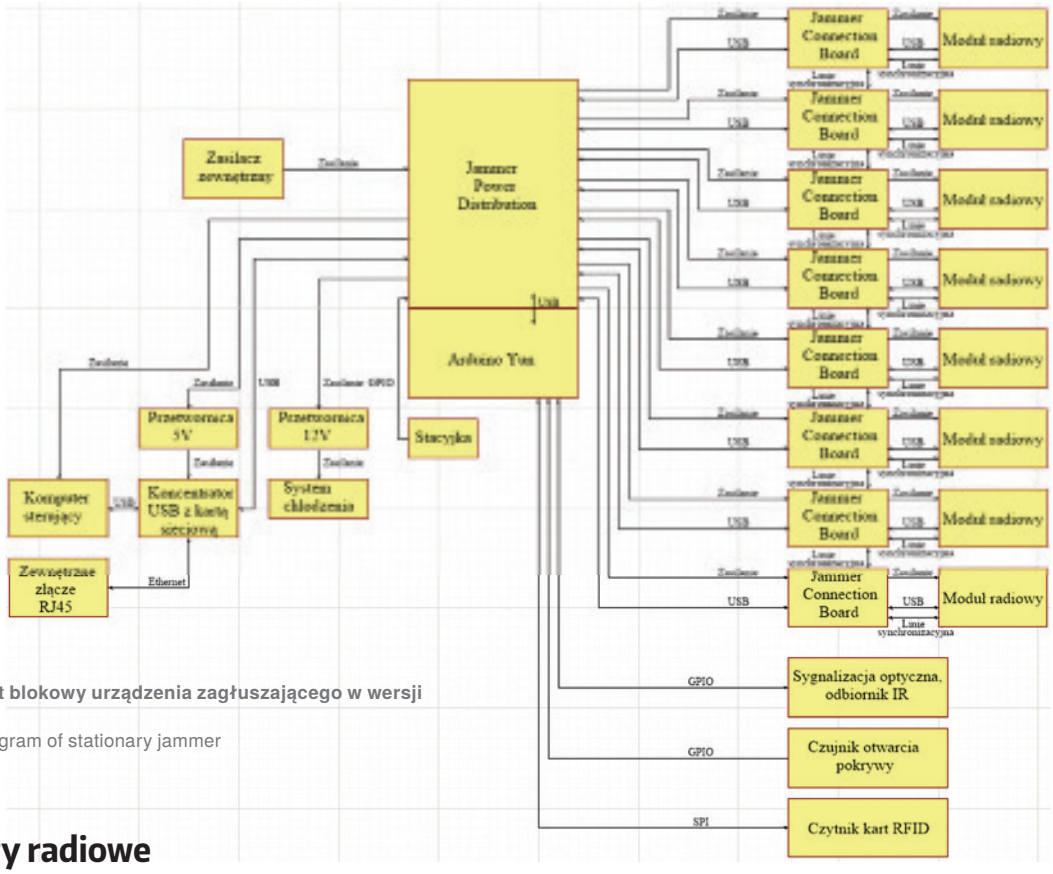
W ramach prac projektowych opracowano również wersję stacjonarną urządzenia (rys. 3).

Urządzenie wykonane zostało w formie standardowej szafy rack 19'' o wymiarach 60 cm (szerokość) × 77 cm (wysokość) × 56 cm (głębokość). Jego schemat blokowy został zaprezentowany na rys. 5. Urządzenie zasilane jest z sieci 230 V AC przez różnicowoprądowy wyłącznik przeciwporażeniowy. Po otwarciu szklanych drzwiczek szafy użytkownik ma dostęp do znajdującego się na panelu czołowym ekranu dotykowego, gdzie również znajdują się diody sygnalizacyjne, odbiornik podczerwieni, stacyjka, czytnik kart RFID oraz osiem slotów służących do zainstalowania w nich modułów radiowych.

Rys. 3. Urządzenie zagłuszające w wersji stacjonarnej
Fig. 3. Stationary jammer

Rys. 4. Szafka antenowa
Fig. 4. Antenna box

Kable antenowe wprowadzane są do obudowy poprzez otwór kablowy i podłączane bezpośrednio do znajdujących się na modułach radiowych złączy współosiowych. Chłodzenie odbywa się za pomocą wymuszonego obiegu powietrza. W instalacji wykonanej w ramach realizacji projektu anteny zabudowane zostały w szafce maskującej (rys. 4) wykonanej z materiału drewnopodobnego, znajdującej się w pomieszczeniu przeznaczonym do objęcia osłoną radioelektroniczną.



Rys. 5 Schemat blokowy urządzenia zagłuszającego w wersji stacjonarnej
Fig. 5. Block diagram of stationary jammer

4. Moduły radiowe

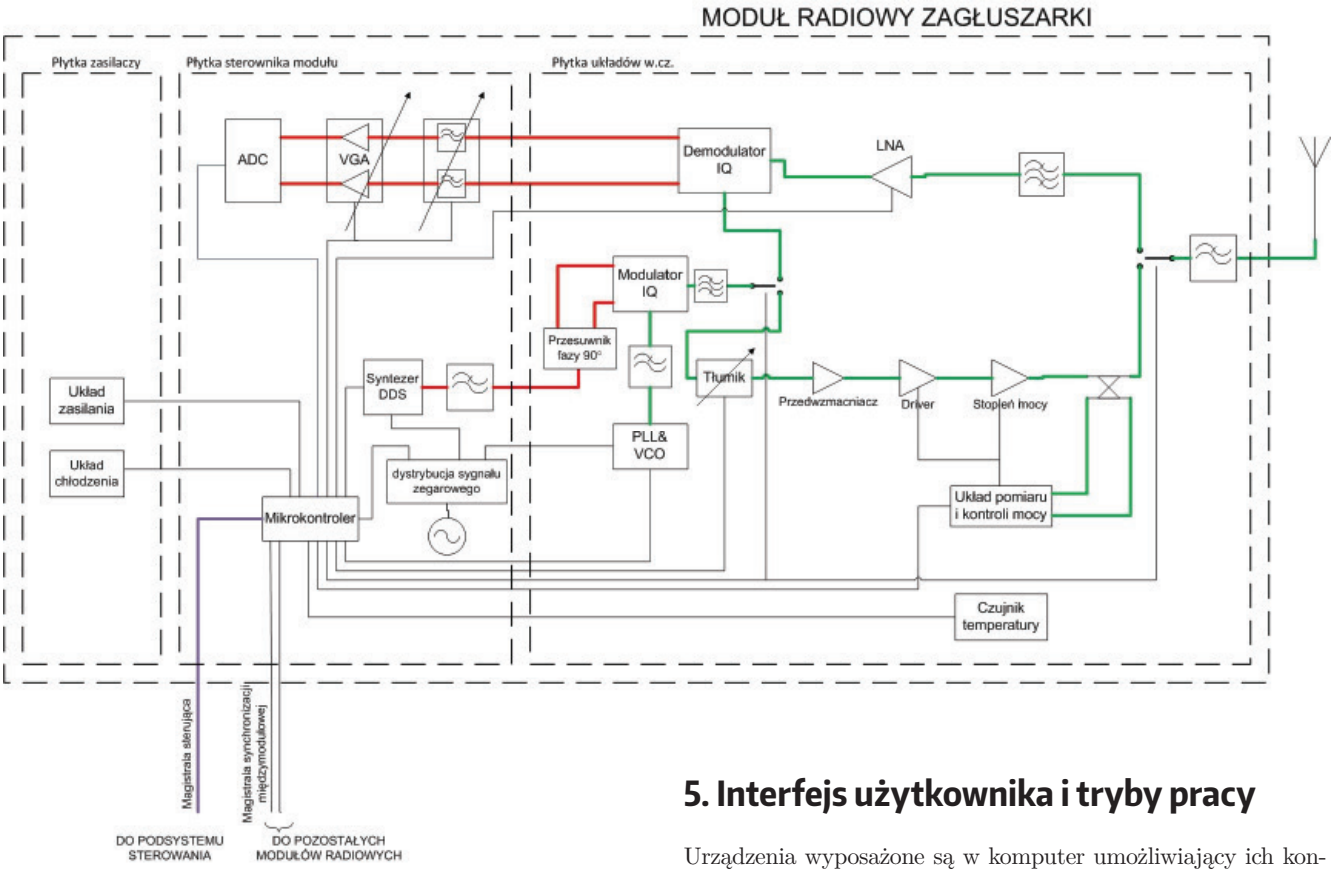
Moduły radiowe (rys. 6) stanowią część wykonawczą systemu. Znajdują się w nich wszystkie bloki funkcjonalne torów nadawczo-odbiorczych (rys. 7). Komplet piętnastu modułów zapewnia pokrycie podzielonego na piętnaście podpasm zakresu 25–5900 MHz. Graniczne częstotliwości pracy poszczególnych modułów radiowych zostały ustalone w oparciu o istniejący podział częstotliwości dla poszczególnych systemów radiowych (np. dolna częstotliwość graniczna modułu 87,5–230 MHz pokrywa się z dolnym krańcem pasma radiofonii UKF, górna częstotliwość graniczna modułu 470–960 MHz pokrywa się z górnym krańcem pasma GSM900 itd.) z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z maksymalnej szerokości pasma obsługiwanego przez jeden moduł radiowy (ograniczony zakres częstotliwości generowanych przez układ DDS, ograniczone pasmo pracy układów dopasowujących, szczególnie w układach mocy nadajników). Tak przyjęty podział zakresów zapewnia możliwość zagłuszenia jak największej liczby systemów przy użyciu jak najmniejszej liczby modułów radiowych.

Poszczególne moduły radiowe komunikują się z podsystemem sterowania po magistrali USB z wykorzystaniem dedykowanego protokołu opartego na standardzie IEEE 488.2 (SCPI). Wyposażone są w dodatkową magistralę synchronizującą ich cykle pracy w trybie zagłuszania responsywnego, za pomocą której na czas podjęcia przez urządzenie akcji zagłuszającej przez co najmniej jeden moduł, wstrzymywany jest przez pozostałe moduły proces skanowania widma, aby uniknąć niepożądanych skutków wpływu bardzo silnego sygnału z nadajnika na pracę odbiorników w tych modułach.

Rys. 6. Moduł radiowy
Fig. 6. RF module

Za sterowanie pracą poszczególnych układów wewnątrz modułu radiowego odpowiada mikrokontroler o architekturze ARM, w którym zaimplementowane zostało oprogramowanie niskopoziomowe. Po dokonaniu konfiguracji poszczególnych układów i uruchomieniu jednego z trzech trybów pracy mikrokontroler rozpoczyna przestrajanie generatora DDS przez cykliczne przesyłanie do niego po równoległej szynie danych wartości częstotliwości i amplitudy (uprzednio przesłanych za pomocą odpowiedniej komendy z komputera sterującego do pamięci mikrokontrolera), a w trybach skanera i responsywnym dodatkowo dokonuje odczytów wartości próbek z przetwornika analogowo-cyfrowego znajdującego się na końcu toru odbiorczego.

Sygnał zagłuszający generowany jest w układzie bezpośredniej syntezy cyfrowej DDS (ang. *Digital Direct Synthesis*), co zapewnia szybkie i precyzyjne przestrajanie w szerokim zakresie częstotliwości oraz sterowanie jego amplitudą w kolejnych krokach przestrajania. W omawianym urządzeniu wartości częstotliwości i amplitudy aktualizowane są co 0,4 µs. Częstotliwość taktująca zastosowanego układu DDS wynosi 2,5 GHz, a zatem maksymalna częstotliwość sygnału przezeń generowanego praktycznie ograniczona jest do 1 GHz. W związku z tym w modułach obsługujących pasma od 960 MHz sygnał z DDS konwertowany jest do pasma pracy w układzie modulatora kwadraturowego (sygnał heterodyny modulatora pochodzi z generatora stabilizowanego pętlą PLL). Po odfiltrowaniu niepożądanych szczątkowych produktów modulacji (głównie o częstotliwościach lustrzanych), gdy urządzenie pracuje w trybie zagłuszania ciągłego oraz w trybie responsywnym w cyklu nadawania, sygnał kierowany jest do toru nadawczego, w którym



Rys. 7. Schemat blokowy modułu radiowego
Fig. 7. Block diagram of RF module

przechodzi przez regulowany tłumik, a następnie w kolejnych stopniach wzmacniaczy uzyskuje pożądaną moc. Wzmacniacze mocy na niższe pasma częstotliwości (do 960 MHz) zbudowane zostały w oparciu o lateralne tranzystory MOSFET ze wzbogacanym kanałem, natomiast dla częstotliwości powyżej 960 MHz zastosowano tranzystory polowe HEMT wykonane na bazie azotku galu (GaN). Na wyjściu stopnia mocy znajduje się sprzęgacz kierunkowy, który odsprzęgając niewielką część mocy do detektorów pozwala monitorować poziomy mocy fali padającej i odbitej, a tym samym kontrolować, czy nie nastąpił stan awaryjny skutkujący powstaniem fali stojącej i mogący doprowadzić do uszkodzenia stopnia mocy. Tuż przed złączem antenowym znajduje się oparty na diodach pin przełącznik torów nadawczego i odbiorczego.

W trybach skanera i responsywnym, gdy urządzenie jest w cyklu skanowania, sygnał z anteny kierowany jest do toru odbiorczego, w którym przechodząc przez filtr pasmowo przepustowy, a następnie niskoszumny wzmacniacz, trafia do demodulatora kwadraturowego. Sygnał z generatora DDS (na wyższych pasmach przesunięty do pasma pracy w modulatorze kwadraturowym) jest sygnałem heterodyny lokalnej demodulatora. Sygnały z wyjść demodulatora w kanałach synfazowym (I) i kwadraturowym (Q) poddawane są następnie filtracji dolnoprzepustowej. Zastosowano przełączane filtry o różnych częstotliwościach granicznych, co zapewnia możliwość zmiany rozdzielczości częstotliwościowej odbiornika – parametru RBW (ang. *Resolution Bandwidth*). Odfiltrowane sygnały są wzmacniane we wzmacniaczu o regulowanym wzmocnieniu VGA (ang. *Variable Gain Amplifier*), a następnie doprowadzone zostają do dwukanałowego przetwornika analogowo cyfrowego zapewniającego ich symultaniczne próbkowanie.

Maksymalne moce wyjściowe nadajników modułów radiowych w zależności od pasma pracy wynoszą od 5 W (pasmo 5440–5900 MHz) do ok. 30 W w pasmach poniżej 3 GHz.

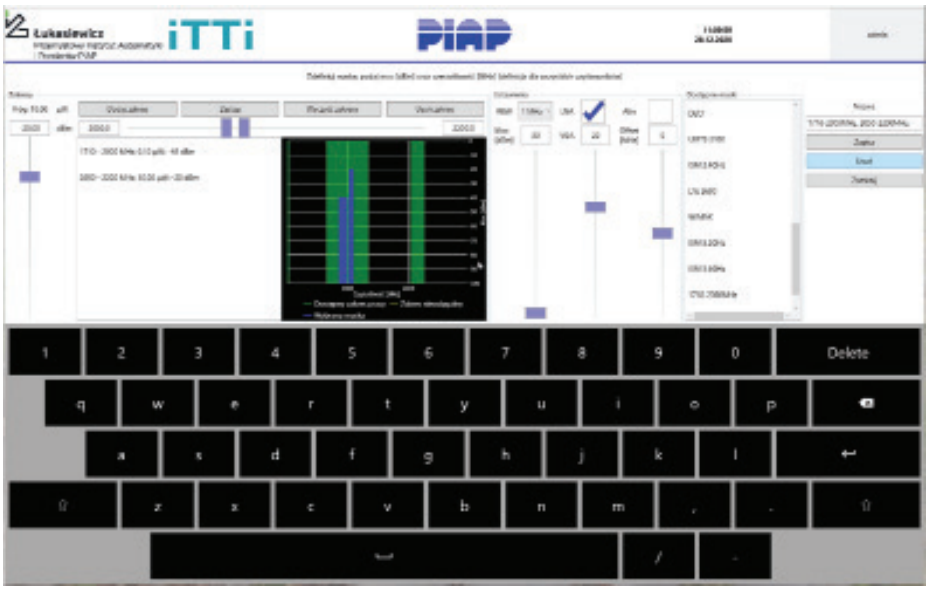
5. Interfejs użytkownika i tryby pracy

Urządzenia wyposażone są w komputer umożliwiający ich konfigurację, sterowanie oraz logowanie zdarzeń. Podstawowym interfejsem użytkownika w obu urządzeniach jest wysokokontrastowy ekran dotykowy o przekątnej 10”. Sterowanie urządzeniami, zarówno przenośnym, jak i stacjonarnym, może odbywać się zdalnie, poprzez interfejs Ethernet, lub w ograniczonym zakresie, za pomocą pilota IR.

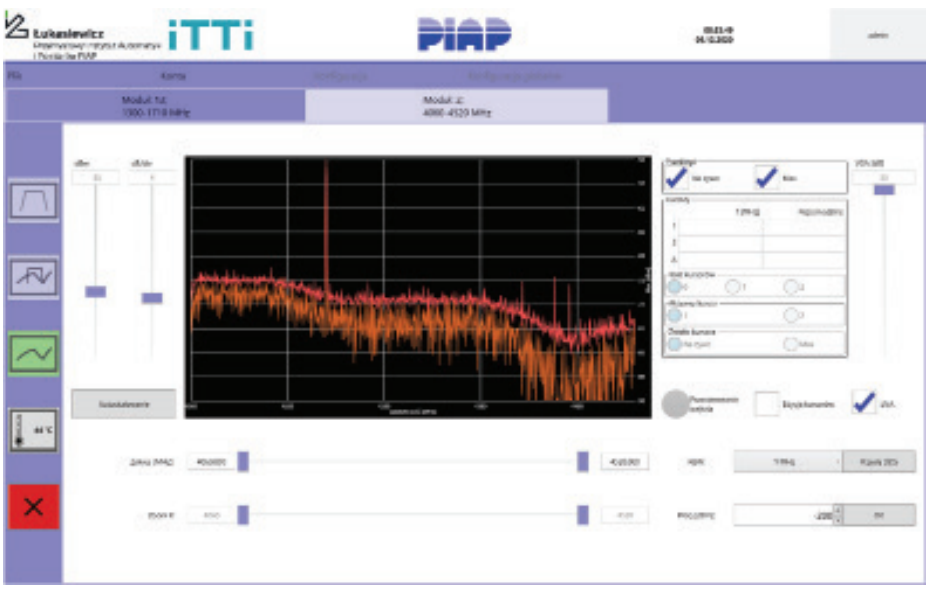
Uruchomienie aplikacji sterującej urządzeniem wymaga autoryzacji polegającej na podaniu nazwy użytkownika i hasła lub zbliżeniu autoryzowanej karty RFID do znajdującego się na urządzeniu czytnika. Urządzenia mogą pracować w trzech trybach: zagłuszanie ciągłe, zagłuszanie responsywne oraz analizator widma. W ramach konfiguracji urządzenia, w zależności od posiadanych uprawnień, użytkownik ma możliwość dodawania i usuwania kont, edytowania profili i uprawnień użytkowników, regulacji mocy wyjściowej nadajników, definiowania szablonów widm sygnałów zagłuszających dla trybu zagłuszania ciągłego, masek wrażliwości dla trybu responsywnego oraz ograniczeń emisji poprzez oznaczanie zakresów częstotliwości jako pasma wrażliwe, chronione lub zabronione. Funkcja ta umożliwia definiowanie częstotliwościowych „okien ochronnych”, wyłączonych spod zagłuszania, służących np. do zapewnienia ochrony komunikacji własnej, lub sterowania robotem mobilnym, na którym zamontowane jest urządzenie zagłuszające, nawet w sytuacji, gdy użytkownik przez nieuwagę zawarł te pasma w szablonie zakłóceń.

Na rys. 8 przedstawiony został widok okna podstawowego trybu pracy urządzenia – trybu zagłuszania ciągłego polegającego na ciągłej emisji sygnału zagłuszającego o określonej mocy wyjściowej i zdefiniowanym kształcie widma. W górnej części okna znajdują się zakładki symbolizujące aktualnie zainstalowane w urządzeniu moduły radiowe. Wybór danej zakładki powoduje wyświetlenie w oknie informacji dotyczących danego modułu i umożliwia sterowanie nim. Szablon sygnału zagłuszającego wybierany jest z rozwijanej listy spośród wcześniej zdefiniowanych. W polach tekstowych znajdują się parametry widma sygnału zagłuszającego (jego graficzne zobrazowanie widoczne jest w dolnej części ekranu) oraz ostrzeżenia o kolizji częstotliwości zdefiniowanego szablonu (i ich harmonicznych) z pasmami oznaczonymi jako wrażliwe lub zabronione. Na znajdującej się po pra-

Rys. 8. Okno trybu zagłuszania ciągłego
Fig. 8. Continuous jamming mode panel



Rys. 9. Menu definiowania masek dla trybu responsywnego
Fig. 9. Spectrum masks definition in the responsive jamming mode



Rys. 10. Okno trybu analizatora widma
Fig. 10. Spectrum analyzer panel

wej stronie okna mapce wyświetlany jest oszacowany promień, w jakim praca zagłuszarki może wpłynąć na zaburzenie łączności radiowej, według zdefiniowanego kryterium (nie oznacza to oczywiście, że każda emisja radiowa w tym obszarze zostanie skutecznie zagłuszona).

Kolejnym trybem pracy urządzenia jest zagłuszanie responsywne polegające na selektywnym zagłuszaniu częstotliwości, na których wykryta została emisja. Praca w tym trybie zalecana jest szczególnie w sytuacjach, gdy zagłuszanie ciągłe mogłoby narazić znajdujące się w pobliżu osoby na długotrwałą ekspozycję na działanie promieniowania elektromagnetycznego, a także w celu ograniczenia zużycia energii. Należy również zaznaczyć, że urządzenie pracujące w tym trybie jest o wiele trudniejsze do wykrycia, niż przy pracy w trybie zagłuszania ciągłego.

Przed rozpoczęciem pracy w trybie responsywnym użytkownik musi zdefiniować tzw. maski widmowe, czyli pasma częstotliwości wraz z progowymi poziomami mocy odbieranego sygnału (rys. 9), których przekroczenie na danej częstotliwości spowoduje emisję sygnału zagłuszającego, moc sygnału zagłuszającego oraz czas emisji sygnału zagłuszającego (HoldOff). Możliwe są także zdefiniowanie offsetu pomiędzy częstotliwościami wyzwalającymi zagłuszanie a częstotliwościami zagłuszanymi, co jest szczególnie przydatne do zagłuszania systemów telefonii komórkowej, dokonanie zmian selektywności odbiornika (wartości RBW: 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz) oraz regulacja wzmocnienia toru odbiorczego.

Trzecim trybem pracy, jaki oferuje opisywane urządzenie zagłuszające, jest analizator widma (rys. 10). Pozwala on na przeprowadzenie skanowania widma elektromagnetycznego w celu wykrycia urządzeń nadawczych i określenia ich częstotliwości pracy. Parametry wykresu: zakres analizowanych częstotliwości oraz dynamika (zakres wyświetlanych poziomów mocy) ustawiane są za pomocą znajdujących się obok wykresu wirtualnych suwaków. Po załączeniu opcji „Max" na wykresie oprócz bieżącego widma wyświetlany jest także ślad jego wartości maksymalnych, co pozwala zarejestrować obecność krótkotrwałych i rzadko pojawiających się sygnałów. Precyzyjny odczyt częstotliwości i amplitudy poszczególnych komponentów widma możliwy jest za pomocą dwóch markerów. Ponadto w oknie

znajduje się pole wyboru rozdzielczości częstotliwościowej analizatora (10 kHz, 100 kHz i 1 MHz), suwak regulacji wzmocnienia wzmacniacza VGA, przycisk załączenia wejściowego wzmacniacza niskoszumnego (LNA) oraz sygnalizator przesterowania przetworników analogowo cyfrowych.

6. Podsumowanie

Urządzenia zagłuszające transmisję radiową będące wynikiem zrealizowanego projektu ze względu na swoją specyfikę są dedykowane dla służb realizujących zadania w zakresie obronności i bezpieczeństwa. Potencjalnymi użytkownikami są Siły Zbrojne, Policja, Straż Graniczna, Służba Kontrwywiadu Wojskowego, Agencja Bezpieczeństwa Wewnętrznego. Urządzenie może być wykorzystane do ochrony przed zdalną – radiową detonacją ładunków wybuchowych, zapobiegania wycieku informacji, czy uniemożliwiana operowania zdalnie sterowanymi pojazdami oraz środkami latającymi i pływającymi zarówno przez aktywne blokowanie komunikacji radiowej w sposób ciągły, lub responsywny, jak również poprzez pasywną analizę widma elektromagnetycznego, co niewątpliwie wyróżnia opisywane urządzenie na tle innych, dostępnych na rynku zagłuszarek.

Bibliografia

1. Bożek K., Zarzycki M., Kociel P., Aftyka A., Rajewski M., Hołubowicz W., Renk R., Gierszal H. *Konstrukcja zagłuszarki transmisji radiowej*, „Przegląd Telekomunikacyjny", Nr 6, 2018, 479–482, DOI: 10.15199/59.2018.6.75.
2. Grover K., Lim A., Yang Q., *Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: a survey*, "International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing", Vol. 17, No. 4, 2014, 197–215, DOI: 10.1504/IJAHUC.2014.066419.
3. Kearney M., Gash D., Dodson R., *Accessible Styles*, developers.google.com/web/fundamentals/accessibility/accessible-styles#multi-device_responsive_design, 2018.
4. Reed J.H., *Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering*, Prentice Hall Professional.
5. Mileusnić M., Petrović P., Pavić B., Marinković-Nedelicki V., Glišović J., Lebl A., Marjanović I., *The Radio Jammer Against Remote Controlled Improvised Explosive Devices*, 25th Telecommunications forum TELFOR 2017, Belgrad, Serbia, DOI: 10.1109/TELFOR.2017.8249309.
6. Wilgucki K., Urban R., Baranowski G., Grądzki P., Skarżyński P., *Automated Protection System Against RCIED*, Military Communications and Information Technology: A Comprehensive Approach Enabler, (red.) Marek Amanowicz, Redakcja Wydawnictw WAT, 2011, 594–601.

Implementation of ZKR-1 Wireless Communication Jammer. Presentation of the Results of Research and Development Projects

Abstract: The article presents two modular radio transmission jamming devices developed by the consortium of Łukasiewicz-PIAP and ITTI sp. z o.o. as part of the project: „Jamming of radio transmission in selected facilities of the Border Guard". In typical operating conditions the devices ensure effective blocking of radio communication (prevention of information leakage, protection against remote radio detonation of IED) and analysis of the frequency spectrum in the 25 MHz to 5.9 GHz band. Developed jammers are intended for use by professional state services, have a modern user interface and offer the possibility of remote control. The most important parameters and functionalities are characterized, as well as the distinguishing non-standard operating modes are discussed, i.e. the spectrum analysis mode and the responsive jamming mode, which minimizes the negative effects of user's exposure to electromagnetic radiation in the vicinity of working devices for a long time.

Keywords: radio, counter-IED, jamming, electronic warfare, anti-drone systems

mgr inż. Konrad Bożek
konrad.bozek@piap.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0003-0877-9285

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej – specjalność Radiokomunikacja, Radionawigacja i Radiolokacja (2004) oraz studiów podyplomowych na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej – specjalność Systemy i Urządzenia Telekomunikacyjne (2009). Od 2003 w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów, od 2017 kierownik Laboratorium Radiokomunikacji i Techniki Mikrofalowej. Koordynator i uczestnik projektów badawczych głównie z obszaru bezpieczeństwa i obronności.