

Innowacyjny system do lokalizacji zasobów dla poprawy efektywności i bezpieczeństwa w służbie zdrowia

Innovative assets localization system for improvement of effectiveness and security in the healthcare domain



Przedstawiono innowacyjne podejście do lokalizacji wewnątrzbudynkowej, które może zostać wykorzystane do podniesienia bezpieczeństwa i efektywności w służbie zdrowia. Opiera się ono na stacjach bazowych pracujących w standardzie Bluetooth Low Energy (BLE), wykorzystujących dedykowany moduł bezprzewodowy zawierający układ scalony Nordic Semiconductor nRF5284 oraz na antenach rekonfigurowalnych, w których możliwe jest elektryczne przełączanie kierunku wiązki głównej. Zaproponowany algorytm lokalizacji umożliwia odnajdywanie nieznanymi pozycji etykiet radiowych BLE, używając wyłącznie mocy sygnału odebranego bez wykonywania dodatkowych wcześniejszych kalibracji i wykorzystując tylko pojedynczą stację bazową oraz etykiety referencyjne BLE przyklejone do ścian. Pomiar wykonany w rzeczywistym środowisku wewnątrz budynku pokazuje, że zaproponowane podejście z powodzeniem może zostać wykorzystane w obszarze służby zdrowia i zapewnia wyniki lokalizacji na akceptowalnym poziomie przy jednoczesnym niskim poziomie całkowitych kosztów instalacji oraz utrzymania systemu w porównaniu do komercyjnie dostępnych systemów lokalizacji.



Słowa kluczowe: Internet rzeczy, antena rekonfigurowalna, antena typu ESPAR, lokalizacja wewnątrzbudynkowa, służba zdrowia

In this paper, we present an innovative approach to indoor localization that can be utilized in the healthcare domain in order to improve the overall security and operational efficiency. It relies on Bluetooth Low Energy (BLE) base stations that have integrated dedicated wireless modules using Nordic Semiconductor nRF5284 integrated circuits and reconfigurable antennas allowing for electrical changing of its main beam's direction. The proposed localization algorithm allows for finding unknown BLE tags positions relying solely on received signal strength without prior calibration and using only a single base station and reference tags attached to the walls. Measurements performed in a real indoor environment show that the proposed approach can successfully be used in the healthcare domain applications and provide acceptable positioning results while keeping the overall installation and maintenance costs at low levels when compared to commercially available localization systems.

Key words: Internet of Things, reconfigurable antenna, ESPAR antenna, indoor localization, healthcare domain

DOI: 10.15199/59.2021.3.6

W codziennej pracy personel medyczny napotyka wiele wyzwań o charakterze logistyczno-organizacyjnym. Są one spowodowane zarówno złożonością procedur medycznych, stopniem skomplikowania i różną dynamiką zadań, jak i możliwymi trybami pracy współpracujących ze sobą osób opiekujących się pacjentami [1]. Dodatkowo prawidłowa realizacja zadań i procedur wymaga różnorodnego sprzętu medycznego – zarówno prostych przyrządów i elementów ułatwiających pracę, jak i skomplikowanych urządzeń diagnostycznych. Niewystarczająco wysokie finansowanie służby zdrowia przekłada się w wielu krajach na silne ograniczenie liczby jednostek sprzętu służącego do transportu pacjentów oraz mobilnych urządzeń diagnostycznych, będących w dyspozycji konkretnej jednostki organizacyjnej. W połączeniu ze znaczną liczbą pomieszczeń i ogromną liczbą prowadzonych działań w naturalny sposób ogranicza to efektywność podejmowanych aktywności. Odpowiedzią na potrzeby placówek służby zdrowia w zakresie szybkiego odnajdywania sprzętu potrzebnego do realizacji procedur medycznych jest wykorzystanie systemów lokalizacji, umożliwiających znalezienie pozycji poszukiwanego obiektu wewnątrz pomieszczeń szpitala.

Najpopularniejsze obecnie systemy lokalizacji, umożliwiające wyznaczenie pozycji obiektu wewnątrz budynku, a więc w sytuacji, w której nie można polegać na systemach nawigacji satelitarnej, wykorzystują sieć odpowiednio rozmieszczonych stacji bazowych rejestrujących sygnał radiowy wysyłany przez

miniaturowe moduły bezprzewodowe przymocowane do sprzętu medycznego. Do prawidłowego wyznaczenia pozycji systemy te używają różnych metod analizy sygnału radiowego, takich jak czas i kierunek nadejścia sygnału, metoda dopasowywania sygnatur mocy sygnału (*fingerprinting*) czy trilateracja [2]. Wyznaczenie nieznanego pozycji miniaturowego modułu bezprzewodowego (etykiety radiowej) wymaga, w przypadku użycia popularnych stacji bazowych wyposażonych w anteny dookólne, zarejestrowania sygnału radiowego przez co najmniej 3 lub 4 stacje bazowe. W efekcie przekłada się to na znaczną liczbę stacji bazowych wymaganych do zainstalowania na terenie obiektu. Ich pozycja musi być odpowiednio wyznaczona na etapie projektowania kompletnego systemu, aby wskazania systemu były wystarczająco dokładne. Konieczność rozmieszczenia wielu stacji bazowych już na etapie planowania systemu wymusza związane z tym znaczące nakłady finansowe, obejmujące zarówno zakup i instalację samych stacji bazowych, jak również urządzeń pełniących funkcję etykiet radiowych, których sumaryczny koszt może być znaczny. Dodatkowo część systemów lokalizacji opartych na informacji o mocy sygnału radiowego wymaga przeprowadzania czasochłonnych okresowych kalibracji [3]. W ich trakcie etykieta radiowa umieszczana jest w kolejnych równo odległych punktach wewnątrz całego obszaru działania systemu. W rezultacie sumaryczny wysoki koszt zakupu systemu lokalizacji i jego utrzymania, ograniczona skalowalność systemu, rozumiana jako możliwość wdrożenia nie-

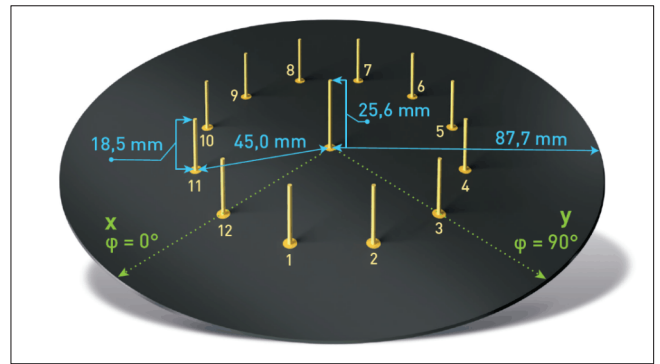
* Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: mateusz.rzymowski@pg.edu.pl; mateusz.groth@pg.edu.pl; krzysztof.nyka@pg.edu.pl; lukasz.kulas@pg.edu.pl

wielkiej instalacji i przeprowadzanie jej później łatwiej i taniej rozbudowy, a także brak wystarczająco wysokiego finansowania służby zdrowia, sprawiają, że polskie podmioty branży medycznej rzadko podejmują decyzję o instalacji systemów lokalizacji mogących usprawnić ich pracę.

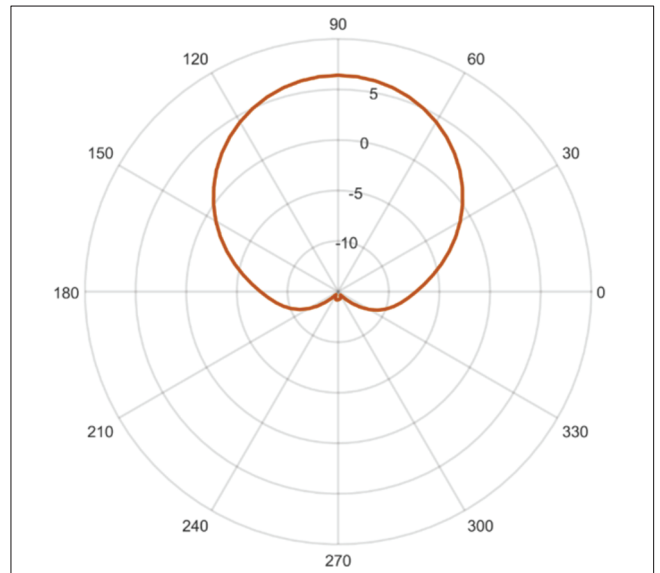
LOKALIZACJA PRZY WYKORZYSTANIU ANTENY Z ELEKTRONICZNIE STEROWANĄ WIĄZKĄ

Jednym z rozwiązań, mogących poprawić dokładność lokalizacji, jest zastosowanie anten z elektronicznie przełączaną lub sterowaną wiązką [4]. Anteny z elektronicznie przełączaną wiązką **SBA** (*Switched-Beam Antenna*) tworzy się zazwyczaj, używając wielu promienników antenowych, mających kierunkową charakterystykę promieniowania, umieszczonych w taki sposób, aby charakterystyki tych anten obejmowały różne kierunki w zakresie półsfery. Wykorzystując jedynie pojedynczą stację bazową podłączoną do anteny SBA zapewniającej uzyskanie sześciu przełączeń, możliwe jest uzyskanie pozycji nieznanego obiektu metodami opartymi na pomiarze mocy sygnału radiowego ze średnim błędem wyznaczania pozycji, wynoszącym 2,32 metra [5]. Niestety, w rozwiązaniach tego typu za przełączanie anten odpowiada drogie, zazwyczaj mikrofalowe, urządzenie przełączające (*microwave switch*). Dodatkowo, ze względu na konieczność odpowiedniego ustawienia promienników, antena zajmuje znaczną przestrzeń. Z tego powodu szczególnie atrakcyjne, ze względu na koszt i możliwości łatwej integracji z węzłami sieci IoT, są kołowe szyki antenowe, zapewniające kierunkową charakterystykę promieniowania zaproponowane przez Harringtona [6]. Szyki tego rodzaju mają umieszczone na okręgu w równych odległościach od siebie elementy pasywne, podłączane do obciążen o charakterze reaktancyjnym oraz centralnie umieszczony promieniujący element aktywny, który może zostać podłączony do układu radiowego. Przez zmianę wartości reaktancji każdego z obciążen możliwe jest uformowanie charakterystyki kierunkowej takiej anteny, a w konsekwencji także obrót wiązki głównej wokół elementu centralnego. Najbardziej popularna realizacja tego typu anteny, nosząca nazwę **ESPAR** (*Electronically Steerable Parasitic Array Radiator*), oparta jest na kołowym szyku monopoli pasywnych umieszczonych nad płaszczyzną przewodzącą i umożliwia sterowanie kierunkiem wiązki głównej anteny przy wykorzystaniu diod waraktorowych sterowanych za pomocą zmiennego napięcia [7], [8]. Przez długi czas główną przeszkodą, powodującą niewykorzystanie anten z elektronicznie sterowaną wiązką typu ESPAR do lokalizacji obiektów, był brak odpowiednich konstrukcji anten tego typu, mogących mieć zastosowanie w systemach lokalizacji, zwłaszcza w przypadku stacji bazowych, wykorzystujących niedrogie i łatwo dostępne układy scalonych modułów radiowych, wraz z odpowiednio dopasowanymi algorytmami lokalizacji opartymi na mocy odebranego sygnału radiowego.

W wyniku prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez pracowników Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki (WETI) Politechniki Gdańskiej (PG) powstała oryginalna konstrukcja anteny z elektronicznie sterowaną wiązką typu ESPAR. Zamiast diod waraktorowych sterowanych za pomocą zmiennego napięcia, co wymagało użycia dodatkowych układów przetworników cyfrowo-analogowych, wykorzystano w niej proste zintegrowane klucze mikrofalowe **SPDT** (*Single-Pole Double-Throw*) oparte na tranzystorach **FET** (*Field-Effect Transistor*). Wykorzystanie kluczy SPDT, podłączonych do elementów pasywnych, umożliwia przełączanie pomiędzy dwiema wartościami obciążen o charakte-



■ Rys. 1. Projekt anteny typu ESPAR. Centralnie umieszczony element aktywny podłączony jest do układu komunikacji radiowej, podczas gdy elementy pasywne umożliwiają sterowanie kierunkiem wiązki głównej anteny



■ Rys. 2. Kierunkowa charakterystyka promieniowania anteny typu ESPAR w płaszczyźnie horyzontalnej

rze reaktancyjnym – bliskiej elektrycznemu rozwarciu i zwarcia – za pomocą prostego układu scalonego mikrokontrolera. W efekcie, za pomocą elementów pasywnych zwartych do masy, nazywanych reflektorami (*reflectors*) oraz elementów pasywnych rozwartych, nazywanych direktorami (*directors*), możliwe jest uformowanie wiązki głównej anteny, a także jej obrót wokół osi anteny z krokiem zależnym od liczby elementów pasywnych. W przypadku opracowanego przez zespół WETI PG projektu anteny ESPAR, w którym zastosowano 12 elementów pasywnych, uzyskuje się 12 charakterystyk promieniowania obracanych z krokiem 30° [9]. Projekt tej anteny przedstawiono na rys. 1. Na rys. 2 przedstawiono natomiast kierunkową charakterystykę promieniowania anteny, której szerokość 3 dB wiązki głównej w płaszczyźnie horyzontalnej wynosi 73,2°, uzyskaną przez rozwarcie elementów pasywnych o numerach od 1 do 5 i zwarcie elementów o numerach od 6 do 12.

Wykorzystanie 12 kierunkowych charakterystyk anteny ESPAR umożliwia wyznaczenie nieznanego położenia lokalizowanego obiektu już przy wykorzystaniu jednej stacji bazowej zintegrowanej z tego typu anteną dzięki użyciu zmodyfikowanej metody dopasowywania sygnałów mocy sygnału radiowego [10]. W metodzie tej wykorzystuje się pomiar referencyjny mocy sygnału radiowego wewnątrz pomieszczenia, w którym zainstalowana jest stacja bazowa, na regularnej siatce punktów referencyjnych dla wszystkich rozwa-

żanych przełączeń charakterystyk promieniowania anteny ESPAR. Na tej podstawie może zostać łatwo ustalona nieznaną pozycją modułu radiowego, umieszczonego wewnątrz pomieszczenia, przez pomiar mocy sygnału pochodzącego z tego modułu dla każdej z 12 charakterystyk anteny stacji bazowej, a następnie możliwe jest odnalezienie takiego punktu referencyjnego, dla którego różnice w pomierzonych wartościach mocy będą najmniejsze. Wykorzystanie pierwszej wersji prototypu zaproponowanej anteny ESPAR w tego typu systemie lokalizacji zapewniło uzyskanie średniego błędu wyznaczania pozycji wynoszącego 1,61 m. Stanowi to wynik o około 25% lepszy, niż w przypadku użycia anteny SBA zawierającej 6 promienników, a więc dysponującej jedynie 6 różnymi charakterystykami promieniowania.

W odróżnieniu od podejścia stosowanego w standardowych systemach lokalizacji wewnątrzbudynkowej, w których do wyznaczenia nieznaną pozycją modułu radiowego wykorzystuje się poziom mocy odebranej przez co najmniej 3 lub 4 stacje bazowe wyposażone w anteny dookólne, użycie jednej stacji bazowej zintegrowanej z anteną ESPAR zapewni kilkakrotne obniżenie kosztów instalacji. Jest to spowodowane nie tylko zmniejszoną liczbą urządzeń (stacji bazowych) koniecznych do zainstalowania na obszarze planowego działania systemu, lecz również znacznie mniejszymi kosztami pracy związanymi z wykonaniem całej instalacji. Należy przy tym zauważyć, iż w przypadku obu systemów wymagane jest przeprowadzenie wstępnej kalibracji zainstalowanego systemu, a także późniejsze prowadzenie regularnych jego kalibracji. Oznacza to dodatkowe koszty działania systemu związane z zaangażowaniem personelu placówki medycznej. Jednak w przypadku systemu wykorzystującego anteny ESPAR zintegrowane wewnątrz stacji bazowych możliwe są usprawnienia działania systemu przez użycie algorytmu wyznaczania nieznaną pozycją modułu radiowego, który nie wymaga przeprowadzania procesu kalibracji [11].

REALIZACJA PROTOTYPU STACJI BAZOWEJ ZINTEGROWANEJ Z ANTENĄ ESPAR

W celu praktycznego wykorzystania anteny ESPAR w systemach lokalizacji działających wewnątrz placówek medycznych, konieczne jest opracowanie kompletnego urządzenia, będącego stacją bazową, zintegrowanego z anteną ESPAR, pracującego z etykietami radiowymi działającymi w standardzie BLE (*Bluetooth Low Energy*). Standard ten wybrano ze względu na niskie zużycie energii zasilanych baterijnie urządzeń końcowych, pracujących w standardzie BLE jako znaczniki radiowe (*beacons*) okresowo wysyłające sygnał radiowy [12], a także bardzo niski koszt gotowych urządzeń tego typu, co jest jednym z ważnych parametrów umożliwiających wdrożenie systemu.

W celu wykonania docelowej stacji bazowej, na podstawie wcześniejszych projektów anteny ESPAR [11], [13], opracowano nowy prototyp anteny ESPAR do pracy z etykietami BLE w paśmie 2,4 GHz. Antena została zrealizowana na laminacie FR4 o grubości 1,55 mm. Elementy pasywne wykonano z posrebrzanego miedzianego przewodu o długości 18,5 mm i średnicy 2 mm. Element aktywny o długości 25,6 mm został wykonany w ten sam sposób, a jego koniec przylutowano do wewnętrznego przewodu złącza SMA przymocowanego bezpośrednio do spodniej strony laminatu. Do przełączania charakterystyk anteny ESPAR wykorzystano układy scalone NJG1681MD7, będące zintegrowanymi mikrofalowymi przełącznikami SPDT na tranzystorach FET. Układy te podłączono do każdego z zakończeń elementów według projektu umieszczonego w [13]. Dodatkowo na spodniej warstwie płytki

PCB (*Printed Circuit Board*) umieszczona została płytka rozszerzeniowa Arduino w celu wygodnego podłączenia modułu BLE oraz 12 diod LED (*Light-Emitting Diode*), wskazujących, które elementy pasywne pracują jako direktory, a które jako reflektory. Kompletny wytworzony prototyp anteny ESPAR gotowy do zintegrowania wewnątrz stacji bazowej przedstawiono na rys. 3.

W celu realizacji kompletnego prototypu stacji bazowej, zaprojektowany i wytworzony został dedykowany moduł oparty na zintegrowanych układach scalonych Nordic nRF52840 SoC i ESP32, które umożliwiają modułowi pracę z sygnałami w standardach BLE, WiFi, NFC oraz Thread. Ma on dwa złącza antenowe, zapewniające pracę z zewnętrznymi antenami. Moduł wyposażono w dedykowany układ zasilający, który umożliwia mu pracę z zasilaniem zewnętrznym oraz baterijnym wykorzystującym akumulatory Li-Po wraz z możliwością ich ładowania. Urządzenie zawiera także układ inercyjny, zapewniający określenie jego

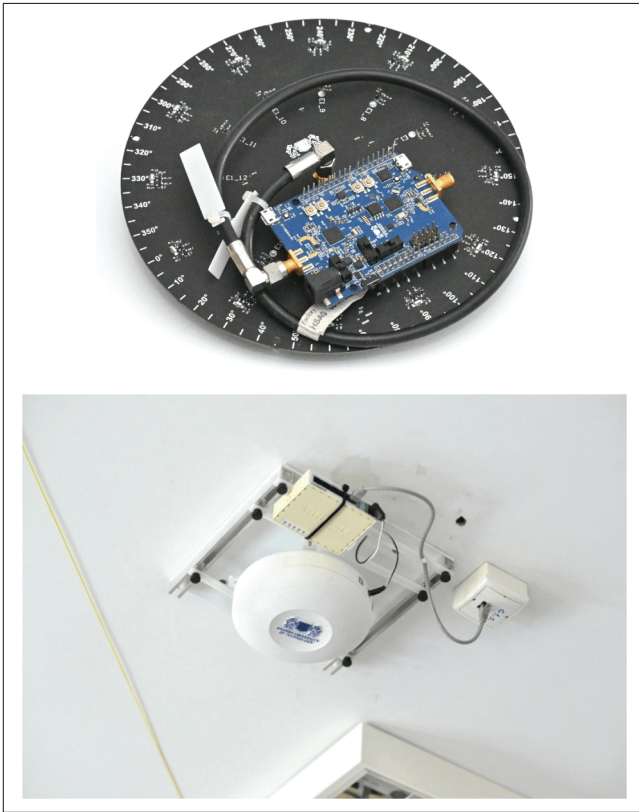


■ Rys. 3. Wytworzony prototyp (górną i dół) anteny typu ESPAR przeznaczony do integracji wewnątrz stacji bazowej pracującej w systemie Bluetooth Low Energy

orientacji oraz zegary czasu rzeczywistego RTC (*Real-Time Clock*) umożliwiające przejście modułu w tryb uśpienia i wydłużenie czasu pracy na baterii. Wyjście antenowe stworzonego modułu podłączone jest do wyjścia antenowego opracowanej anteny ESPAR, a sterowanie charakterystykami anteny odbywa się za pośrednictwem wyjść GPIO (*General-Purpose Input/Output*), co pokazano na rys. 4. Dla zintegrowanej stacji bazowej przygotowano dedykowaną obudowę wytworzoną metodą druku 3D, która zapewni sprawny montaż stacji bazowych na suficie.

SYSTEM LOKALIZACJI Z WYKORZYSTANIEM ANTENY ESPAR NIEWYMAGAJĄCY KALIBRACJI

Najważniejszą zaletą decydującą o przewadze systemu lokalizacji, wykorzystującego stacje bazowe ze zintegrowanymi antenami ESPAR, nad systemami opartymi na pomiarze poziomu mocy



■ Rys. 4. Kompletny prototyp stacji bazowej pracującej w systemie Bluetooth Low Energy ze zintegrowaną anteną ESPAR (na górze) oraz dedykowaną obudową wytworzoną metodą druku 3D (na dole). Płytkę modułu podłączona jest do płytki rozszerzeniowej Arduino, podczas gdy wyjście sygnału RF modułu BLE podłączone jest do centralnego elementu anteny za pomocą czarnego przewodu SMA

odebranej przez co najmniej 3 lub 4 stacje bazowe wyposażone w anteny dookólne jest możliwość odnalezienia nieznanej pozycji modułu bezprzewodowego na podstawie mocy sygnału radiowego odebranego dla każdej z 12 kierunkowych charakterystyk promieniowania anteny. Umożliwia to wyznaczenie nieznanej pozycji lokalizowanego obiektu już przy wykorzystaniu jednej stacji bazowej zintegrowanej z tego typu anteną. Podejście to, podobnie jak w rozwiązaniach dostępnych komercyjnie, opiera się na użyciu zmodyfikowanej metody dopasowywania sygnatur mocy sygnału radiowego [10], [14], które wymaga czasochłonnej kalibracji systemu, polegającej na umieszczeniu wzorcowego modułu bezprzewodowego w określonych punktach odległych co 1 m lub 2 m. W przypadku rozległych instalacji przekłada się to na czas pracy personelu liczony w dziesiątkach godzin, a dodatkowo kalibracja systemu musi być okresowo powtarzana w celu utrzymania wymaganej dokładności wskazań systemu lokalizacji.

Jedną z najważniejszych cech systemu lokalizacji, opracowanego w ramach prac badawczo-rozwojowych kadry Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, jest możliwość przeprowadzenia procesu określania nieznanej pozycji etykiet BLE na podstawie pomiarów mocy sygnału radiowego w jednej stacji bazowej bez procesu kalibracji [11]. Metoda ta polega na umieszczeniu niedrogich modułów BLE w wybranych punktach wewnątrz obszaru instalacji systemu, których pozycja jest znana, a następnie na okresowym odczycie poziomu mocy sygnału od tych modułów dla wszystkich ustawień anteny i uwzględnieniu ich w procesie wyznaczenia nieznanej pozycji lokalizowanego obiektu. W tym celu, na podstawie odczytanych poziomów mocy

sygnału, obliczane są odpowiednie współczynniki wagowe, umożliwiające wyliczenie nieznanej pozycji etykiety BLE względem znanych pozycji referencyjnych modułów BLE umieszczonych w jego bezpośrednim otoczeniu. Dokładność nowej metody określono w ustawieniu charakterystycznym dla typowych pomieszczeń biurowych, co przedstawiono na rys. 5. Stacja bazowa umieszczona została na suficie w środku pomieszczenia o wymiarach 5,6 m × 6,6 m × 3 m. Na ścianach pomieszczenia na wysokości 1,5 m nad ziemią umieszczono 24 moduły referencyjne BLE, na które składają się moduły oparte na układzie scalonym Nordic nRF52840 zintegrowanym ze zintegrowaną anteną PCB pracującą w zakresie 2.4 GHz. W celu zminimalizowania wpływu potencjalnych różnic w konstrukcji etykiet na uzyskane wyniki pomiarów, do testów zastosowano taki sam układ, jak w etykietach lokalizowanych, mimo iż funkcjonalność tego układu scalonego przekracza wymagania prostych węzłów referencyjnych w opracowanym systemie lokalizacji. Układ nRF52840 zawiera integrowany 32-bitowy mikrokontroler na bazie ARM Cortex-M4F, odbiornik o czułości na poziomie -96 dBm oraz nadajnik, umożliwiający zmianę mocy wyjściowej w zakresie od 8 dBm do 20 dBm. W docelowym rozwiązaniu planowane jest użycie łatwo dostępnych i tanich węzłów referencyjnych i etykiet do lokalizacji, których cena wynosi od około 2\$ do 3\$.

W celu wykonania pomiarów, na podłodze pomieszczenia na obszarze 4,5 m × 4 m umieszczona została siatka punktów odległych od siebie o 0,5 m, co w rezultacie dało 90 punktów testowych wewnątrz pomieszczenia. Wszystkie etykiety referencyjne



■ Rys. 5. Środowisko testowania prototypu stacji bazowej pracującej ze zintegrowaną anteną ESPAR w systemie BLE. Na ścianie widoczne są moduły referencyjne BLE, które zastosowano w nadmiarowej liczbie w celu przeprowadzenia badań umożliwiających określenie ich optymalnej ilości i pozycji

i etykieta lokalizowana zostały ustawione w tryb rozgłoszeniowy (*advertising mode*) na 38 kanale Bluetooth z mocą wyjściową ustawioną na poziomie 0 dBm. Następnie moduł lokalizowany ustawiany był w każdym z 90 punktów siatki, a stacja bazowa odbierała 100 pakietów z modułu lokalizowanego i każdej etykiety referencyjnej dla wszystkich 12 charakterystyk anteny ESPAR. W sumie umożliwiło to odebranie 30 000 pakietów dla każdego z punktów siatki pomiarowej.

Wyniki wyznaczania pozycji modułu lokalizowanego metodą niewymagającą kalibracji, którą szczegółowo opisano w [11], zebrane zostały w tabeli 1. Można zauważyć, że najlepszy wynik uzyskuje się dla czterech etykiet referencyjnych umieszczonych pośrodku każdej z czterech ścian pomieszczenia. W tej konfiguracji

cji błąd średni wynosi 1,39 m, co daje wynik o 13,7% lepszy, niż w przypadku wykorzystania anteny ESPAR i wymagającego kalibracji algorytmu dopasowywania sygnatur radiowych w pomieszczeniu o podobnym rozmiarze [10]. Dodatkowo badania przeprowadzone w [11] pokazują, że uzyskany błąd średni pozostaje na zbliżonym poziomie, nawet gdy liczba pakietów odebranych z modułu lokalizowanego i etykiet referencyjnych zostaje ograniczona do 2. Umożliwia to zastosowanie zaproponowanej metody w rzeczywistych systemach lokalizacji instalowanych w placówkach medycznych.

■ **Tabela 1. Podsumowanie wyników lokalizacji za pomocą metody niewymagającej kalibracji**

Uwzględnione moduły referencyjne	Błąd maksymalny [m]	Błąd średni [m]
Narożne (4 moduły)	3,95	1,63
Na środku ścian (4 moduły)	3,58	1,39
Narożne i na środku ścian (8 modułów)	3,52	1,84
Wszystkie (24 moduły)	3,90	1,99

* * *

W niniejszym artykule zaprezentowano zasadę działania anteny typu ESPAR. Umożliwia ona sterowanie kierunkiem wiązki głównej anteny za pomocą prostych układów scalonych mikrokontrolera, a także sposób jej integracji z modułem bezprzewodowym pracującym w standardzie BLE, w celu opracowania stacji bazowej zintegrowanej z anteną ESPAR dla systemów lokalizacji wewnątrzbudynkowej. Po zainstalowaniu tego typu stacji bazowej w pomieszczeniach placówek medycznych, przez jej przymocowanie do sufitu w planowanych miejscach działania systemu lokalizacji, możliwe jest wyznaczanie nieznanych pozycji niewielkich modułów radiowych, które mogą być przymocowane do sprzętu medycznego w celu pozyskiwania bieżącej informacji o jego pozycji. Dodatkowo przedstawiono zasadę działania nowego algorytmu, który nie wymaga przeprowadzania okresowych kalibracji systemu. Zapewnia to znaczne usprawnienie procesu wyznaczania nieznanej pozycji sprzętu medycznego przez wykorzystanie niewielkiej liczby prostych i tanich etykiet BLE, pełniących rolę punktów referencyjnych odczytywanych okresowo przez stację bazową.

Kluczowe zalety zaproponowanego systemu w stosunku do rozwiązań istniejących to między innymi około czterokrotnie niższe koszty instalacji całego systemu, wysoka skalowalność przez użycie techniki lokalizacji; wymagającej pojedynczej stacji bazowej oraz bardzo niskie koszty utrzymania systemu ze względu na brak konieczności jego okresowego kalibrowania. Cechy te spowodowały zainteresowanie możliwościami rozwoju systemu ze strony podmiotów działających na rynku europejskim, a także podmiotu leczniczego COPERNICUS sp. z o.o.. Pozyskanie znacznego dofinansowania w ramach projektu H2020 *InSecTT – Intelligent Secure Trustable Things* umożliwiło opracowanie kompletnej wersji systemu lokalizacji i przeprowadzenie wdrożenia pilotażowego. Warto przy tym wspomnieć, że zarówno nowe konstrukcje anten, jak i algorytmy zapewniające przeprowadzanie lokalizacji za pomocą tylko jednej stacji bazowej zintegrowanej z anteną ESPAR i bez konieczności wykonywania okresowych kalibracji systemu stanowią autorskie rozwiązanie PG. Stworzony w wyniku prac B+R system zdobył już zainteresowanie zagranicznych firm – m.in. Philips Healthcare i AIRBUS.

This paper is a result of the InSecTT project which has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 876038. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Austria, Sweden, Spain, Italy, France, Portugal, Ireland, Finland, Slovenia, Poland, Netherlands, Turkey". The document reflects only the authors' view and the Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

LITERATURA

- [1] Axisa F., P. M. Schmitt, C. Gehin, G. Delhomme, E. McAdams and A. Dittmar, "Flexible technologies and smart clothing for citizen medicine, home healthcare, and disease prevention," in *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 3, pp. 325-336, Sept. 2005, doi: 10.1109/TITB.2005.854505.
- [2] Obeidat H., W.Shuaib, O Obeidat et al. *A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies*. Wireless Pers Commun 119, 289–327 (2021), doi.org/10.1007/s11277-021-08209-5.
- [3] Khanbashi N.Al et al., "Real time evaluation of RF fingerprints in wireless LAN localization systems," *2013 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPNC.2013.6533273.
- [4] Brás L., N. B. Carvalho, P. Pinho, L. Kulas, K. Nyka, "A Review of Antennas for Indoor Positioning Systems," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, Article ID 953269, 14 pages, 2012.
- [5] Giorgetti G., A. Cidronali, S. Gupta and G. Manes, "Single-anchor indoor localization using a switched-beam antenna," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp.58-60, Jan. 2009.
- [6] Harrington R., "Reactively controlled directive arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-26, no. 3, pp. 390-395, May 1978.
- [7] Gyoda K. and T. Ohira, "Design of electronically steerable passive array radiator (ESPAR) antennas," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Symp.*, vol. 2, Salt Lake City, UT, Jul. 2000, pp. 922-925.
- [8] Taillefer E., A. Hirata and T. Ohira, "Direction-of-arrival estimation using radiation power pattern with an ESPAR antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 2, pp.678–684, Feb. 2005.
- [9] Kulas L., "RSS-Based DoA Estimation Using ESPAR Antennas and Interpolated Radiation Patterns," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 25-28, Jan. 2018.
- [10] Rzymowski M., P. Woznica, L. Kulas, "Single-Anchor Indoor Localization Using ESPAR Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1183-1186, 2016.
- [11] Groth M., K. Nyka, and L. Kulas, "Calibration-Free Single-Anchor Indoor Localization Using an ESPAR Antenna," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3431, May 2021, doi: 10.3390/s21103431.
- [12] Dementyev A., S. Hodges, S. Taylor and J. Smith, *Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario*, 2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS), 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWS-IWS.2013.6616827.
- [13] Groth M., M. Rzymowski, K. Nyka and L. Kulas, "ESPAR Antenna-Based WSN Node With DoA Estimation Capability," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91435-91447, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994364.
- [14] Giorgetti G., A. Cidronali, S. K. S. Gupta and G. Manes, "Single-anchor indoor localization using a switched-beam antenna," in *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 58-60, January 2009, doi: 10.1109/LCOMM.2009.081584.