



System lokalizacji pracowników w środowisku przemysłowym: testy funkcji lokalizacji

mgr inż. Marcel Maj^{a,b,d} (ORCID: 0009-0009-3277-5971)

mgr inż. Tomasz Molenda^{a,c,d} (ORCID: 0000-0002-4240-8675)



Fot. grapestock/Bigstockphoto

W artykule przedstawiono główne aspekty implementacji funkcji lokalizacji w systemie bezpieczeństwa, przeznaczonym do monitorowania pracownika, zwłaszcza w środowisku przemysłowym. Opisano strukturę systemu (w tym beacons Bluetooth, urządzenie osobiste i system nadrzędny) oraz techniki zastosowane do realizacji funkcji lokalizacji pracownika. Przedstawiono metodykę przeprowadzonych testów i ich wyniki wraz z interpretacją.

Słowa kluczowe: beacon, Bluetooth, lokalizacja, monitorowanie pracowników

Worker localization system in industrial area: functionality tests

This article presents aspects of implementing the location function in a security system designed to monitor an employee, especially dedicated to applications in industrial environment. The description includes structure of the system and the technology used to implement the worker localization function, moreover Bluetooth beacons, a personal device and a master system, the hardware and software used. The methodology and results of the tests conducted and the interpretation of these results are presented

Keywords: beacon, Bluetooth, localization, worker monitoring

^a Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG.

^b Kontakt: marcel.maj@emag.lukasiewicz.gov.pl.

^c Kontakt: tomasz.molenda@emag.lukasiewicz.gov.pl

^d Praca wykonana w ramach niniejszego artykułu została podzielona w następujący sposób: 30% Marcel Maj, 70% Tomasz Molenda.

Wstęp

W systemach przemysłowych pracownik jako ich główny użytkownik odpowiada za nadzorowanie, obsługę i utrzymanie maszyn wykonujących różnorodne zadania. W koncepcji przemysłu 4.0 jego rola ewoluje więc od wykonawcy zadań do nadzorca maszyn [1]. Dzięki automatyzacji liczba osób zatrudnionych w fabrykach może być mniejsza, ponieważ jeden pracownik może nadzorować pracę wielu urządzeń jednocześnie [2–4]. Jednak w przypadku dużych przestrzeni produkcyjnych, o wielkości kilku boisk piłkarskich, praca niewielkiej liczby osób, które nie mają ze sobą kontaktu wzrokowego, wiąże się z poważnym zagrożeniem. Gdyby bowiem jeden z pracowników uległ wypadkowi i stracił przytomność, wtedy skuteczne udzielenie mu pomocy będzie praktycznie niemożliwe, ponieważ współpracownicy nie będą świadomi, że doszło do wypadku, oraz nie będą mieli informacji o tym, gdzie dokładnie znajduje się poszkodowany pracownik.

Rozwiązanie pozwalające na ograniczenie skutków takich sytuacji polega na monitorowaniu stanu pracownika i stałym rejestrowaniu jego położenia. Istnieją technologie, np. radiowe lub wizyjne, służące do określania położenia obiektu lub osoby. W przypadku systemów wizyjnych głównym komponentem jest kamera. Z kolei systemy lokalizacji wykorzystujące sygnały radiowe bazują na urządzeniach typu beacon [5, 6] – w artykule skupiono się właśnie na takim rozwiązaniu. Lokalizowanie obiektu za pomocą sieci beaconów odbywa się poprzez pomiar sygnałów nadawanych przez te urządzenia. Określenie stanu pracownika można ustalić za pomocą pomiaru podstawowych parametrów życiowych, np. pulsu [7].

Obecnie w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Techniki Innowacyjnych EMAG opracowywany jest system, który będzie odpowiadał za lokalizację poszczególnych pracowników na zadanym obszarze oraz monitorował ich stan na podstawie pomiarów biomedycznych – dzięki temu znacząco zwiększy się bezpieczeństwo pracowników w sytuacji zagrożenia. Systemy pozwalające na monitorowanie pracowników były opisywane m.in. przez G. Gralewicza, L. Morzyńskiego i J. Bargiela [8–10]. Ten artykuł koncentruje się natomiast na mechanizmie lokalizacji oraz testach przeprowadzonych w celu weryfikacji działania modułu do lokalizacji pracownika.

Komponenty systemu lokalizacji

Główną ideą opracowywanego systemu jest monitorowanie pracownika za pomocą tzw. elektroniki noszonej (ang. *wearables/wearable devices*). Zgodnie z koncepcją system ma się składać z trzech części: urządzeń osobistych (elektroniki noszonej), urządzeń odniesienia i urządzenia nadrzędnego. Aby zapewnić wygodę użytkownika, urządzenie osobiste zostało zaprojektowane do noszenia na nadgarstku. Strukturę systemu przedstawiono na rys. 1.

Podobne systemy monitorowania pracowników, wykorzystujące elektronikę noszoną, przedstawiali już E. Svrtoka czy F. Wu ze współpracownikami [11, 12]. System opisywany w tym artykule wykorzystuje jednak inne rozwiązanie związane z lokalizacją. Do realizowania tej funkcji będą bowiem wykorzystywane beacons jako urządzenia odniesienia, rozmieszczone w obsługiwanym obiekcie w znanej i stałej konfiguracji przestrzennej. Zdecydowano się na beacons w standardzie Bluetooth (ze względu na ich dostępność oraz możliwość własnych implementacji), które stanowią bezprzewodowe, jednokierunkowe nadajniki sprzętowe o niskim zużyciu energii, wysyłające sygnał radiowy do urządzeń osobistych. Urządzenia osobiste będą skanować otoczenie w poszukiwaniu sygnałów

wysyłanych przez beacons (urządzenia odniesienia). Sygnały te mają postać tzw. ramek rozgłoszeniowych o ustandaryzowanej strukturze i konfigurowalnej zawartości. Na potrzeby opracowywanego systemu zastosowano standard Eddystone. Odebrane ramki rozgłoszeniowe beaconów i wskaźnika mocy sygnału odbieranego (ang. *received signal strength indication* – RSSI) przez urządzenia osobiste z poszczególnych beaconów będą przesyłane do systemu nadrzędnego, a aplikacja w systemie nadrzędnym zlokalizuje daną osobę na podstawie najsilniejszego dostarczonego sygnału.

Platforma sprzętowa i parametry techniczne

Podczas testów model urządzenia osobistego, odbierający ramki rozgłoszeniowe Bluetooth i wysyłający odebrane dane do systemu nadrzędnego poprzez interfejs Wi-Fi, stanowił zestaw startowy [13] z układem typu system na czipie (ang. *system on a chip* – SoC) ESP32 [14]. Na potrzeby testów ten odpowiednik urządzenia osobistego realizował wyłącznie opisaną wyżej funkcję, jaką docelowo wraz z pozostałymi funkcjami będzie realizowało urządzenie osobiste. W przypadku testów urządzenie odbierające stanowiło zatem model realizujący jedną z funkcji docelowego urządzenia osobistego. Aby zapewnić reprezentatywność wyników testów, zastosowany moduł ESP32 jest układem tego samego typu, jaki stanowi podstawę konstrukcji urządzenia T-Wristband (LilyGO), które w finalnej wersji systemu będzie pełnił rolę urządzenia osobistego. Według informacji podanych przez producenta układu ESP32 czułość odbiornika Bluetooth LE (BLE) przy 30,8% PER (ang. *packet error rate* – odsetek pakietów odebranych przez łącze bezprzewodowe, zawierających jeden błąd lub więcej) wynosi: minimalnie – 94 dBm, typowo – 93 dBm, maksymalnie – 92 dBm. Maksymalny poziom odbieranego sygnału przy 30,8% PER wynosi minimalnie 0 dBm. Takie parametry determinują zakres RSSI sygnału Bluetooth, możliwy do wykorzystania dla celów lokalizacji, obejmujący ok. 93 dB.

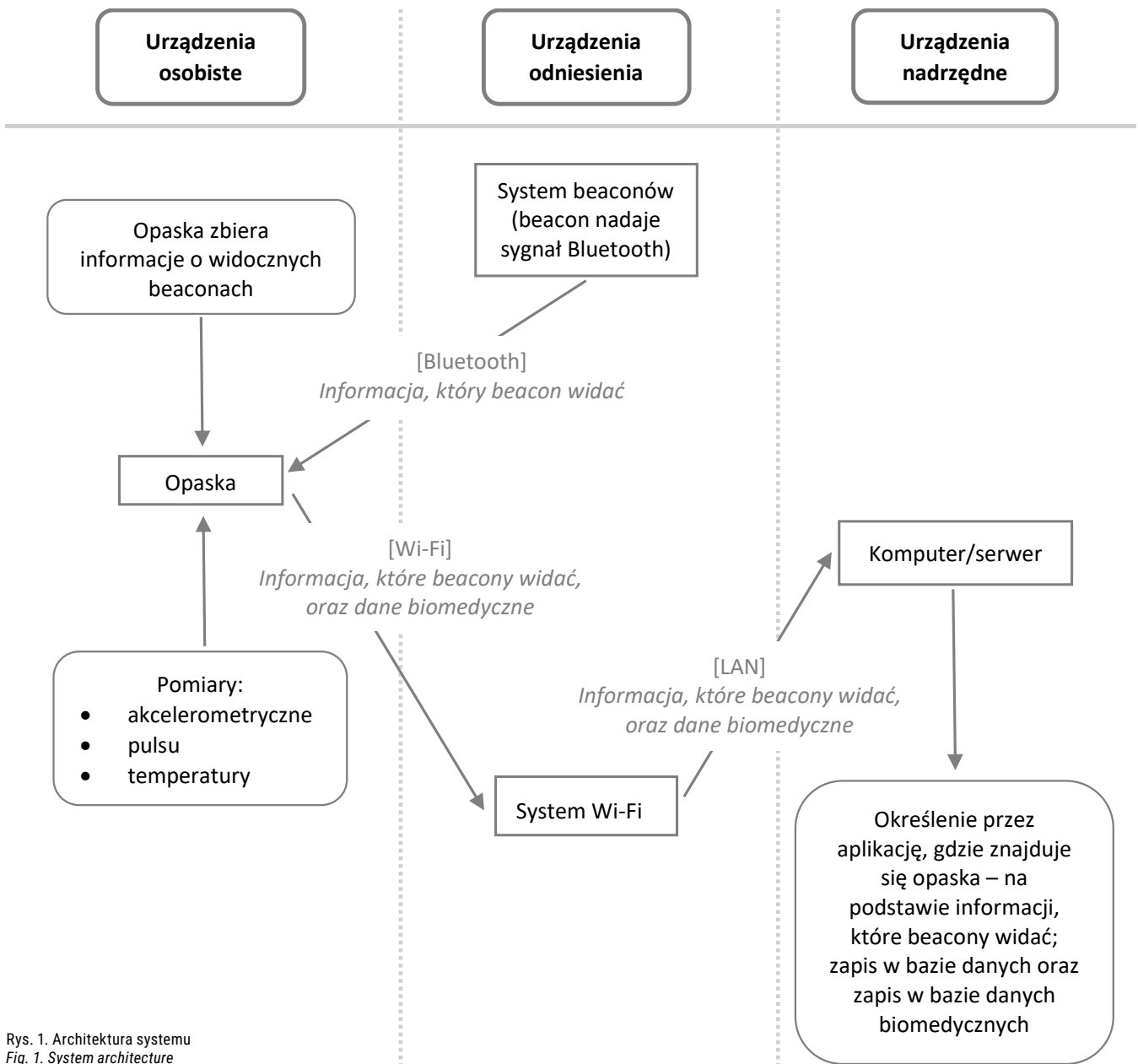
Jako urządzenia odniesienia wykorzystano beacons przewidziane do zastosowania wraz z docelowym urządzeniem typu H2 [15] (MOKOSmart). Do testów ustawiono następujące parametry beaconów: standard Eddystone, interwał wysyłania 1000 ms, poziom mocy 0 dBm.

Oprogramowanie

Oprogramowanie, które na potrzeby testów zaimplementowano w urządzeniu odbierającym, zapewniało ciągły odbiór sygnału Bluetooth i przekazywanie na bieżąco do urządzenia nadrzędnego (serwera) odebranych danych – poprzez interfejs Wi-Fi i infrastrukturę sieciową obiektu. Przetwarzanie odebranych danych było realizowane przez serwer, na którym znajdowała się baza adresów MAC (ang. *media access control*) wszystkich beaconów przypisanych do systemu. Adres MAC stanowi unikalny identyfikator przydzielany sprzętowi sieciowemu (np. karcie bezprzewodowej lub karcie Ethernet) przez producenta. Na podstawie adresów MAC serwer dokonywał identyfikacji źródeł sygnału Bluetooth odebranych przez urządzenie odbiorcze i umieszczał w bazie danych wyłącznie dane pochodzące z beaconów przypisanych do systemu.

Metodyka testów

Zgodnie z założeniami dotyczącymi opracowywanego systemu dokładność funkcji lokalizacji pracownika powinna umożliwić szybkie dotarcie do niego i udzielenie mu pomocy, gdy dane biomedyczne będą wskazywać na zagrożenie jego



Rys. 1. Architektura systemu
Fig. 1. System architecture

zdrowia lub życia. Ta dokładność, wyrażona w wartościach bezwzględnych, będzie się różnić w zależności od cech obiektu, w którym będzie funkcjonował system lokalizacji, tj. w zależności od wielkości i kształtu pomieszczeń oraz sposobu ich zagospodarowania i wyposażenia, a także od rozmieszczenia infrastruktury i stanowisk pracy. W przypadku niewielkich pomieszczeń o prostym kształcie (zbliżonym do prostokąta) lub pomieszczeń większych, które jednak bezpośrednio po wejściu do nich pozwalają na wizualne zlokalizowanie pracownika wymagającego pomocy, wystarczy lokalizacja z dokładnością do obrębu pomieszczenia. W razie braku takiej możliwości konieczna jest lokalizacja z dokładnością np. do stanowiska pracy.

W celu analizy i oceny możliwości zastosowania w opracowywanym rozwiązaniu wybranych beaconów Bluetooth i układu SoC (zastosowanego w urządzeniu osobistym) – biorąc pod uwagę wymagania dotyczące dokładności lokalizacji – przeprowadzono testy polegające na wyznaczeniu poziomu RSSI w zależności od odległości pomiędzy beaconem a urządzeniem

odbierającym. Otrzymane wyniki wykorzystano następnie do wyznaczenia parametrów przyjętego modelu teoretycznego propagacji fal radiowych – by oszacować zgodność wyników testów z tym modelem. Stopień zgodności pozwala wnioskować, że testowane rozwiązania – układ ESP32 i beacony typu H2 – są odpowiednie do zastosowania w opracowywanym rozwiązaniu.

Testy przeprowadzono w dwóch konfiguracjach:

- test 1: pojedynczy beacon był umieszczany kolejno w różnych odległościach od urządzenia osobistego, które pozostawało w stałym miejscu;
- test 2: pięć beaconów działających jednocześnie, których położenie zmieniano w sposób rotacyjny, było umieszczanych w różnych odległościach od urządzenia osobistego, pozostającego w stałym miejscu.

Testy przeprowadzono w korytarzu o szerokości 1,8 m i wysokości 2,2 m. Urządzenie osobiste było umieszczone w stałym miejscu korytarza – na wysokości 0,5 m od podłoża oraz w odległości 0,5 m od ściany.

Zmian odległości pomiędzy urządzeniem rejestrującym i urządzeniem osobistym dokonywano zawsze w jednej osi, równoległej do osi korytarza.

Podczas testu 1 pojedynczy beacon umieszczany był na wysokości 0,5 m od podłoża i w odległości: od ściany korytarza – 0,5 m, od urządzenia osobistego – 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m i 30 m. W każdej z tych lokalizacji beaconu rejestrowano poziom RSSI.

W przypadku testu 2 w korytarzu znajdowało się pięć beaconów działających jednocześnie, które umieszczano na wysokości podłoża i w odległości: od ściany korytarza – 0,5 m, od urządzenia osobistego – 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m i 30 m. W kolejnych iteracjach testu położenie beaconów zmieniano w sposób rotacyjny i rejestrowano poziom RSSI.

Podczas obu testów zwrócono szczególną uwagę na precyzyjne umieszczenie beaconów w korytarzu (z zachowaniem przyjętych odległości i orientacji przestrzennej). Miało to zapewnić powtarzalność wyników oraz wyeliminować wpływ ewentualnych niedokładności usytuowania beaconów względem urządzenia osobistego na rejestrowany poziom sygnału. Elementy wsporcze, służące do umieszczenia urządzenia odbierającego (w obu testach) i beaconu (w teście 1) ponad podłożem, dobrano tak, aby ich wpływ na wyniki był nieistotny. W związku z tym elementy te nie zawierały części przewodzących i były wykonane z materiałów o pomijalnej wartości przenikalności względnej magnetycznej i elektrycznej.

Model

W celu oceny przydatności zaproponowanego rozwiązania sprawdzono, czy otrzymywane dla niego wyniki są przewidywalne i porównywalne z wynikami dla uznanego modelu podstawowego, który pozwala na wyznaczenie poziomu odbieranego sygnału w zależności od odległości. Wyniki testów porównano więc z wynikami uzyskanymi dla modelu (jego parametry dobrano na podstawie wyników testów). Do oszacowania tłumienia sygnału w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem odbierającym a beaconem przyjęto model wykorzystujący równanie Friisa [16]:

$$P_r = P_t \frac{G_r G_t}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{d} \right)^\gamma \quad (1)$$

gdzie: P_r – moc odbierana; P_t – moc nadawana; G_r – zysk anteny odbiornika; G_t – zysk anteny nadajnika; L – straty systemowe (tłumienie), np. tłumienie wtrącone, tłumienie spowodowane niedopasowaniem impedancji; d – odległość między anteną odbiornika i nadajnika, λ – długość fali w wolnej przestrzeni; γ – wykładnik tłumienia.

W rozpatrywanym przypadku parametr P_r wyznaczono przy następujących założeniach:

- $P_t = 1 \text{ mW}$ (0 dBm);
- G_r , G_t , L – niewyspecyfikowane w dokumentacji – przyjęte jako składowe parametry modelu;
- d – wartość zmienna;
- $\lambda = c/f = 0,123 \text{ m}$ (c – prędkość światła, którą ze względu na minimalny wpływ ośrodka przyjęto jako prędkość światła w próżni, tj. $c = 299792458 \text{ m/s}$; f – częstotliwość, którą dla standardu Bluetooth przyjęto jako częstotliwość środkową wykorzystywanego pasma, tj. $f = 2,44 \text{ GHz}$);
- γ – parametr modelu.

Przy tych założeniach zależność (1) w skali logarytmicznej, odniesionej do mocy 1 mW, przyjmuje postać:

$$P_r[\text{dBm}] = 10 \log \left(\frac{G_r G_t}{L} \right) - 40,19 - 10\gamma \log(d) = D - 40,19 - 10\gamma \log(d) \quad (2)$$

W równaniu (2) występuje składowa niezależna od odległości ($D - 40,19 \text{ dB}$), przy czym część D tej składowej pozostaje nieokreślona (zyski anten i tłumienie systemowe), oraz składowa zależna od odległości i wykładnika tłumienia [$10\gamma \log(d)$], który zależy z kolei od lokalizacji i środowiska propagacji (np. przyjmuje wartości: 2 – w wolnej przestrzeni, 2–4 – w budynkach, 3–4 – na terenach wiejskich, 4–5 – na terenach miejskich [17]).

Parametry D i γ modelu dobrano tak, aby wyniki modelowania pokrywały się w jak największym stopniu z wynikami testów.

Wyniki

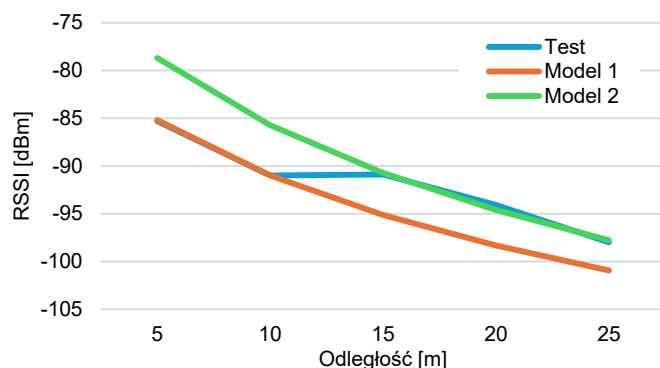
Poziom odbieranego sygnału – zmierzony w testach 1 i 2 oraz wyznaczony na podstawie modelu – w funkcji odległości pomiędzy urządzeniem odbierającym a beaconem przedstawiono na rys. 2.

W przebiegu zależności wyznaczonej w teście 1 można wyodrębnić trzy charakterystyczne fragmenty dla zakresów odległości: 5–10 m, 10–15 m (w tym zakresie RSSI zmienia się w niewielkim stopniu) oraz 15–30 m. Z tego względu dobrano różne zestawy parametrów D i γ modelu:

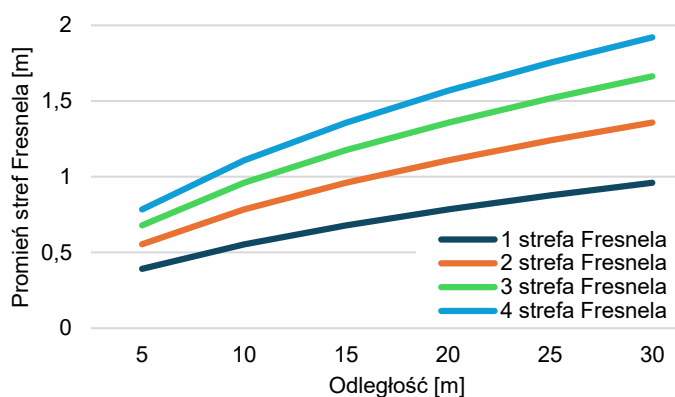
- dla zakresu odległości 5–10 m: $D = -12 \text{ dB}$, $\gamma = 3,3$ (model 1 na rys. 2);
- dla zakresu odległości 15–30 m: $D = 1,5 \text{ dB}$, $\gamma = 4$ (model 2 na rys. 2).

Widoczna wyraźna różnica przebiegu charakterystyki dla różnych zakresów odległości prawdopodobnie jest efektem zjawiska propagacji wielodrogowej, które mogło wystąpić w miejscu przeprowadzania testów (w otoczeniu urządzenia odbierającego i beaconu).

Wielodrogowość propagacji polega na tym, że sygnał (w tym wypadku radiowy) przesyłany z nadajnika do odbiornika dociera do niego więcej niż jedną drogą – bezpośrednio lub z odbiciem od różnych obiektów znajdujących się w otoczeniu. Zjawisko odbicia ma wpływ na fazę i amplitudę sygnału, a czas, po jakim sygnał dociera od nadajnika do odbiornika, zależy od długości drogi. Ponieważ poszczególne drogi mają różną długość, ten sam sygnał będzie docierał do anteny odbiornika w różnych fazach. W najbardziej niekorzystnym przypadku fala bezpośrednia i fala odbita od przeszkody będą miały przeciwną fazę, a wskutek interferencji nastąpi znaczące zmniejszenie amplitudy odbieranego sygnału. Dzieje się tak, gdy różnica faz fali padającej bezpośrednio i fali odbitej jest równa połowie nieparzystej liczby całkowitej wielokrotności okresu fali – $(2n+1)/2$, gdzie $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ – przy czym dla każdej kolejnej wielokrotności rośnie odległość, na jaką propaguje fala odbita. Ze względu na coraz dłuższą trasę propagacji fali odbitej dla każdej kolejnej wielokrotności maleje (z powodu tłumienia) amplituda sygnału docierającego do anteny odbiornika w przeciwnej fazie względem sygnału docierającego bezpośrednio, wnosząc coraz mniejszy udział w interferencji powodującej zmniejszenie amplitudy odbieranego sygnału. Aby mogło zachodzić odbicie fali spełniające opisaną zależność, przy danej odległości pomiędzy antenami odbiornika i nadajnika oraz długości fali przeszkoda musi się znajdować



Rys. 2. Poziom RSSI w funkcji odległości – wyniki testu 1 oraz wyniki modelowania
Fig. 2. RSSI level as a function of distance – test 1 results and modeling results



Rys. 3. Promienie stref Fresnela w funkcji odległości dla łącza beaconów Bluetooth
Fig. 3. Fresnel zone radii in the distance function for the Bluetooth beacon link

w określonym punkcie przestrzeni względem anten nadajnika i odbiornika. Zbiory takich punktów przestrzeni, w których odbicie fali spełnia tę zależność dla kolejnych wielokrotności ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$), stanowią kolejne strefy Fresnela. Ze względu na zależności geometryczne strefy te mają kształt elipsoid obrotowych z ogniskami w punktach umieszczenia anten nadajnika i odbiornika. Każda kolejna strefa Fresnela obejmuje większą przestrzeń, ale umieszczone w niej obiekty mają mniejszy wpływ na interferencję. Im wyższa jest częstotliwość, tym kształt stref Fresnela jest smuklejszy. Na rys. 3 przedstawiono promienie stref Fresnela (od pierwszej do czwartej) w zależności od odległości pomiędzy antenami urządzenia odbierającego i beaconu, wyznaczone dla długości fali odpowiadającej środkowej częstotliwości zakresu wykorzystywanego przez standard Bluetooth. Promień pierwszej strefy Fresnela, o największym wpływie na poziom odbieranego sygnału, w odległości powyżej 10 m jest porównywalny z wysokością nad podłożem i odległością od ściany, w jakich umieszczono urządzenie odbierające i beacon. Uzyskany w teście 1 przebieg poziomu RSSI w funkcji odległości (rys. 2) może być spowodowany tym, że powyżej odległości 10 m rośnie udział składowych fali odbitych od elementów otoczenia i osiagających punkt odbioru różnymi drogami oraz w różnych fazach względem składowej bezpośredniej.

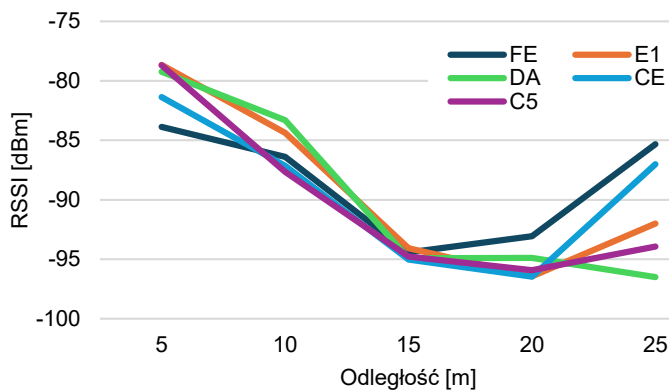
Wyniki testu 2, tj. zmierzone poziomy odbierany sygnał RSSI w funkcji odległości pomiędzy urządzeniem osobistym a każdym z pięciu beaconów, zaprezentowano na rys. 4. Wykresy te są opisane częścią adresu MAC poszczególnych beaconów (FE, E1, DA, CE, C5), aby można je było odróżnić. Poziom sygnału emitowanego przez każdy z beaconów ustawiono

na jednakową wartość – 0 dBm. Największe zróżnicowanie poziomu RSSI sygnału pochodzącego od poszczególnych beaconów występuje w przypadku małej odległości i maleje wraz z jej zwiększaniem. Przy odległości 5–10 m rozstęp wartości RSSI sygnału pochodzącego od poszczególnych beaconów nie przekracza 5 dB (co jest wartością o 2 dB większą od typowo przyjmowanego zakresu tolerancji mocy wyjściowej, wynoszącego 3 dB). Te wartości mieszczą się natomiast w zakresie zdefiniowanym w specyfikacji Bluetooth Low Energy, w której został określony parametr tolerancji mocy anteny (ang. *antenna power tolerance*), zdefiniowany jako: tolerancja między deklarowaną maksymalną mocą anteny a zmierzoną maksymalną i minimalną mocą anteny. Uwzględniając rzeczywiste warunki prowadzenia testów (istotnie odbiegające od warunków laboratoryjnych) zaobserwowana różnica nie stanowi zatem znaczącego odstępstwa. W przypadku odległości 15 m rozstęp poziomu RSSI sygnału pochodzącego od poszczególnych beaconów wynosi ok. 1 dB, co może wskazywać, że większe różnice poziomu RSSI dla mniejszych odległości nie wynikają głównie z rzeczywistego poziomu mocy sygnału beaconów, a np. z większego wpływu specyfiki lokalizacji testów. Dla odległości powyżej 15 m w rzeczywistości następował dalszy spadek poziomu RSSI, natomiast widoczny na rys. 4 wzrost wynika z działania algorytmu programu zaimplementowanego w urządzeniu odbierającym. Algorytm ten w razie nieodebrania od danego beaconu pojedynczej spodziewanej ramki jako wynik przyjmował wartość odebraną ostatnio i dopiero po czwartym z kolei nieodebraniu ramki sygnalizował trwałą utratę połączenia. Taki sposób działania algorytmu powodował znaczne zawyżanie średnich wartości poziomu RSSI dla dużych odległości, przy których nie były już odbierane wszystkie ramki. Po podłączeniu urządzenia osobistego bezpośrednio do debuggera, zapewniającego podgląd danych przetwarzanych przez program, można było zaobserwować dalszy spadek wartości RSSI wraz ze zwiększaniem odległości powyżej 15 m, przy czym dotyczyło to wartości chwilowych, natomiast wyniki zaprezentowane na rys. 4 opierają się na wartościach uśrednionych, przetworzonych przez system, ponieważ wyniki niepoddane działaniu algorytmu były bardziej zróżnicowane i mniej czytelne. Aby uniknąć tego problemu, w docelowej aplikacji planuje się modyfikację algorytmu, polegającą na pozostawieniu uśredniania, ale bez przypisywania wartości poziomu RSSI ostatnio odebranej ramki w przypadku krótkotrwałej utraty połączenia.

Istotne różnice w poziomach RSSI i przebiegach charakterystyk podczas testów 1 i 2 wynikają również z wysokości, na której umieszczono beacony: na tej samej wysokości co urządzenie odbierające (w teście 1) lub na wysokości podłoża (w teście 2).

Podsumowanie

Dokładność wyznaczania lokalizacji, narzucona potrzebami opracowywanego rozwiązania, nie jest wysoka, co wynika bezpośrednio z jego przeznaczenia. W sytuacji zagrożenia życia lub zdrowia pracownika wystarczająca do podjęcia odpowiednich działań jest bowiem przybliżona znajomość jego lokalizacji. Ostatecznie i tak konieczne będzie nawiązanie kontaktu wzrokowego z osobą poszkodowaną, a opracowywany system ma jedynie przyspieszyć wstępne określenie miejsca przebywania pracownika, np. pojedynczego pomieszczenia lub jego części (w przypadku rozległych, zamkniętych pomieszczeń). Sama zasada (technika) lokalizacji, jak również wyniki przeprowadzonych testów wskazują, że bardzo ważnymi parametrami są: poziom sygnału emitowanego przez beacony, ich wzajemne położenie (odległości) oraz właściwości w miejscu (obiekty),



Rys. 4. Poziom RSSI w funkcji odległości dla testu 2 przeprowadzonego z wykorzystaniem pięciu beaconów (oznaczonych jako: FE, E1, DA, CE, C5)

Fig. 4. RSSI level as a function of distance for test 2 conducted using five beacons (marked as: FE, E1, DA, CE, C5)

w którym rozmieszczono te beacony. W przypadku większej gęstości rozmieszczenia beaconów w danej przestrzeni powinny one emitować sygnał o niższym poziomie mocy, by dla znajdującego się w ich zasięgu urządzenia osobistego poziomy mocy sygnału od poszczególnych beaconów były bardziej zróżnicowane w zależności od lokalizacji tego urządzenia względem beaconów. Z kolei w przypadku większych odległości pomiędzy beaconami poziomy mocy emitowanego przez nie sygnału powinny być wyższe (kosztowność dokładności lokalizacji). Należy oczekiwać, że istotnym czynnikiem będzie miejsce (obiekt), w którym system miałby zostać wykorzystywany, i jego wpływ na propagację sygnału Bluetooth. Materiały i elementy wnoszące znaczne tłumienie z jednej strony ograniczają odległości, z których sygnał od beaconów może być odebrany, a z drugiej – ułatwiają dość dokładne przypisanie beaconów do poszczególnych lokalizacji, np. pomieszczeń. Pod tym względem można się spodziewać większych trudności w przypadku względnie dużych przestrzeni, wypełnionych przeszkodami wnoszącymi niewielkie tłumienie, ale ograniczającymi widoczność – np. przestrzeni typu *open space* ze strefami pracy wydzielonymi z wykorzystaniem płyt z laminatu, płyt gipsowo-kartonowych czy paneli z materiałów drewnopochodnych. W przypadku ciężkich, zbrojonych zabudowań, wnoszących większe tłumienie bezpośredniej składowej sygnału radiowego, mogą jednak występować odbicia, mimo potencjalnie korzystniejszej sytuacji umożliwiającej przypisanie beaconów do poszczególnych miejsc. Każdy obiekt będzie więc wymagał indywidualnego podejścia – zależnie od rozległości i struktury danego obiektu i precyzji lokalizacji wymaganej w jego poszczególnych częściach. Przewidywany czynnik o potencjalnie dużym wpływie na poziom mocy odbieranych przez urządzenie osobiste sygnałów beaconów stanowi przyjęty sposób jego noszenia – urządzenie ma mieć formę opaski umieszczonej na nadgarstku. Wahanie poziomu mocy odbieranych sygnałów beaconów mogą być duże, ponieważ urządzenie osobiste będzie się przemieszczało wraz z noszącym je pracownikiem, a poza tym pracownik ten może przesłaniać drogę propagacji sygnału. Autorzy rozwiązania zdecydowali się jednak na ten kompromis, ponieważ urządzenie osobiste ma być pojedynczym elementem, zapewniającym komfort użytkownika i możliwość wykonywania pomiarów biomedycznych. Dostępne są wprawdzie techniki skutecznej lokalizacji, możliwe do zaadaptowania w środowisku odpowiadającym docelowemu zastosowaniu opracowywanego systemu [19], jednak ich wykorzystanie w tej konkretnej aplikacji jest ograniczone ze względu na fakt, że jako urządzenie osobiste

wybrano gotową opaskę bazującą na konkretnym układzie SoC. W przyjętym rozwiązaniu urządzenie osobiste jedynie przesyła do urządzenia nadrzędnego informacje o poziomie mocy sygnałów odebranych od urządzeń odniesienia i właśnie na tym koncentrowały się badania opisane w niniejszym artykule. Sam algorytm określania lokalizacji, który zostanie zaimplementowany w urządzeniu nadrzędnym, prawdopodobnie będzie dalej modyfikowany.

Wyniki przeprowadzonych testów pozwalają na wstępne określenie poziomu mocy sygnałów beaconów (w zależności od zakładanej odległości, z której te sygnały powinny być odbierane) i mogą pomóc w ich odpowiednim rozmieszczeniu w obiekcie. Wyniki te mogą też stanowić punkt wyjścia do dalszych badań. Osiągnięcie wymaganej dokładności lokalizacji jest ważne w kontekście poprawy bezpieczeństwa pracowników.

Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr II.PN.07 pt. „Bezprzewodowy system monitorowania stanowiskowego pracowników wraz z pomiarem parametrów biometrycznych”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] de Assis Dornelles J., Ayala N.F., Frank A.G., *Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities*, „Computers & Industrial Engineering”, 2022, 163: 107804.
- [2] Ejsmont K., *The Impact of Industry 4.0 on Employees – Insights from Australia*, „Sustainability”, 2021, 13(6): 3095.
- [3] Taylor M.P. et al., *Operator 4.0 or Maker 1.0? Exploring the implications of Industrie 4.0 for innovation, safety and quality of work in small economies and enterprises*, „Computers & Industrial Engineering”, 2020, 139: 105486.
- [4] Cirillo V. et al., *Technology vs. workers: the case of Italy's Industry 4.0 factories*, „Structural Change and Economic Dynamics”, 2021, 56: 166–183.
- [5] Huh J.-H., *Bluetooth-Tracing RSSI Sampling Method as Basic Technology of Indoor Localization for Smart Grid*, [w:] *Research Anthology on Smart Grid and Microgrid Development*, IGI Global, 2022, s. 1013–1027.
- [6] Kajioka S. et al., *Experiment of indoor position presumption based on RSSI of Bluetooth LE beacon*, IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2014, s. 337–339. doi: 10.1109/GCCE.2014.7031308.
- [7] George A.H., Shahul A., George A.S., *Wearable Sensors: A New Way to Track Health and Wellness*, „Partners Universal International Innovation Journal”, 2023, 1(4): 15–34.
- [8] Gralewicz G., *Inteligentne rozwiązania techniczne w przemyśle. Cz. I*, „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka”, 2015, 7: 16–20.
- [9] Morzyński L., *Idea wykorzystania bezprzewodowej sieci sensorowej i Internetu rzeczy do monitorowania środowiska pracy i ostrzegania pracowników przed zagrożeniami*, „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka”, 2019, 1: 24–27.
- [10] Bargiel J., *Opracowanie oprogramowania serwerowego dla urządzenia osobistego w zakresie lokalizacji przebywania pracownika*, „Elektronika – Konstrukcje, Technologie, Zastosowania”, 2022, 1(9): 6–10.
- [11] Svertoka E. et al., *Wearables for Industrial Work Safety: A Survey*, „Sensors”, 2021, 21: 3844.
- [12] Wu F., Wu T., Yuce M., *Design and Implementation of a Wearable Sensor Network System for IoT-Connected Safety and Health Applications*, 2019, s. 87–90, doi: 10.1109/WF-IoT.2019.8767280.
- [13] ESP-WROOM-32 Datasheet, Espressif Systems, https://download.kamami.pl/p586693-ESP-WROOM-32_datasheet.pdf.
- [14] ESP32 Series Datasheet, Espressif Systems, https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_cn.pdf.
- [15] MOKO-Smart: H2/H2A Navigation Beacon, https://www.mokosmart.com/wp-content/uploads/2023/01/H2H2A-Navigation-Beacon-Product-Brief-V1.2_21052601.pdf.
- [16] Chaudhari B.S., Zennaro M., *LPWAN technologies for IoT and M2M applications*, Academic Press, 2020.
- [17] Sikora A., *Modeling and distributed simulation of mobile ad hoc networks*, PhD Thesis, The Institute of Control and Computation Engineering, 2015.
- [18] Bluetooth Low Energy – Regulatory Aspects Document (RAD), <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2023/03/bluetooth-le-regulatory-aspects-document.pdf>.
- [19] Yang S.H., *Wireless sensor networks*, Springer, 2014.