

Wyznaczanie precyzji i dokładności lokalizacji obiektu na przykładzie systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej Dimension4 firmy Ubisense

Streszczenie. Systemy umożliwiające lokalizację obiektu zdobywają coraz większą popularność. Kilka lat temu jedynym ogólnodostępnym systemem lokalizacyjnym był amerykański Navstar GPS, który niestety nie pracował w pomieszczeniach zamkniętych takich jak magazyny, czy hale produkcyjne. Postęp technologiczny i miniaturyzacja sprawiły, że systemy lokalizacyjne wkroczyły w nowy obszar. W artykule zaprezentowano wyniki testów precyzji i dokładności lokalizacji obiektów z użyciem systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej Dimension4 firmy Ubisense.

Abstract. Systems enabling the location of objects are gaining more and more popularity. A few years back, only the American localization system Navstar GPS has been available for commercial use. Unfortunately, this system does not perform well in enclosed spaces such as buildings, warehouses or production halls. Technological progress and miniaturization possibilities have made the localization systems enter the previously unavailable area. In this paper tests for determining the precision and accuracy of the Ubisense Dimension4 indoor location system are presented. (*Determining the accuracy and precision of the indoor location system based on the Ubisense Dimension4 system*).

Słowa kluczowe: ILS, RTLS, lokalizacja, precyzja, dokładność, niepewność pomiaru

Keywords: ILS, RTLS, localization, precision, accuracy, measurement uncertainty

Wstęp

Usługi związane z lokalizacją z roku na rok zyskują na popularności. Przemysł coraz śміiej inwestuje w firmy zajmujące się rozwojem technologii umożliwiających określanie pozycji osób, zwierząt, urządzeń produkcyjnych a nawet przedmiotów codziennego użytku. Systemy lokalizacyjne początkowo stosowane jedynie do celów militarnych i nawigacyjnych, znajdują obecnie zastosowanie także w sektorach związanych bezpośrednio z działalnością ludzką taką jak logistyka, opieka zdrowotna, czy hodowla zwierząt. Systemy lokalizacyjne, a w szczególności lokalizacji wewnątrzbudynkowej, mogą być bardzo przydatne w różnych sytuacjach awaryjnych, szczególnie w warunkach zagrożenia dla zdrowia i życia ludzkiego [19].

Systemy lokalizacyjne można podzielić na dwie podstawowe kategorie: zewnętrzne i wewnętrzne. Do najbardziej znanych systemów zewnętrznych można zaliczyć ogólnodostępny system GPS (*ang. Global Positioning System*). W tym przypadku twórcy systemu zdecydowali się na użycie sieci satelit krążących po eliptycznych orbitach wokół kuli ziemskiej, według których urządzenie segmentu użytkownika ustala własną pozycję. Ustalanie pozycji w tym przypadku opiera się o bardzo precyzyjny pomiar czasu, a precyzyjniej mówiąc na pomiarze opóźnienia kodu C/A lub P wysyłanego przez satelity do identycznego kodu generowanego przez odbiornik. Na podstawie opóźnienia obliczane są pseudo-odległości. Warunkiem jest dokładna synchronizacja zegarów: satelitarnego i odbiornika naziemnego. Następnie za pomocą trilateracji wyznaczane są współrzędne położenia odbiornika. Inną metodą wyznaczania pozycji jest wykorzystanie pomiarów fazowych. System GPS nie może pracować w środowiskach pomieszczeń zamkniętych, zadanych takich jak budynki, tunele, czy kopalnie. Znane są problemy określenia pozycji również w sytuacji gdy odbiornik znajduje się w tzw. Miejskim kanionie. W miejscach tych przemysł zaproponował stworzenie dedykowanych systemów określanych mianem ILS (*ang. Indoor Locating System*). Systemy ILS w celu wyznaczenia pozycji wykorzystują liczne mechanizmy, które różnią się znacząco pod względem kosztów, dokładności, precyzji, skalowalności, oraz bezpieczeństwa [1, 15, 20]. Mechanizmy te można podzielić na pięć głównych kategorii:

- czasowe (TOA – *ang. Time of Arrival*),

- kątowe (AOA – *ang. Angle of Arrival*),
- amplitudowe (RSS – *ang. Received Signal Strength*),
- różnicowe (TDOA – *ang. Time Difference of Arrival*),
- hybrydowe – łączące w sobie co najmniej dwie powyższe techniki.

Tematyka ta jest szeroko poruszana w wielu pracach [2, 13, 22]. Nie jest możliwe wybranie mechanizmu uniwersalnego sprawdzającego się w każdym warunkach. W aplikacjach niewymagających wysokiej dokładności lokalizacji możliwe jest zastosowanie relatywnie tanich rozwiązań bazujących na sile sygnału radiowego, podczas gdy inne ILS mogą wymagać bardzo wysokiej dokładności i precyzji, co powoduje konieczność stosowania wyrafinowanych mechanizmów hybrydowych i odpowiednio podnosi ich cenę. Systemy ILS w celach lokalizacji obiektów mogą bazować na takich technologiach jak [4, 19, 21, 22]:

- ultradźwięki,
- podczerwień,
- identyfikatory radiowe RFID,
- siła sygnału Bluetooth lub bezprzewodowych sieci WLAN,
- siła sygnału stacji bazowych sieci komórkowych,
- obraz z kamer,
- stacje referencyjne i pseudolity,
- UWB (*ang. Ultra Wide Band*).

W tabeli 1 zestawiono podstawową charakterystykę technologii stosowanych w ILS wraz z uwzględnieniem wybranych metryk.

Dokonując przeglądu systemów lokalizacji można zauważyć, że w zależności od zastosowanej technologii pojawiają się znaczące różnice precyzji i dokładności określania pozycji lokalizowanego obiektu. Posiadając informację o słabych i mocnych stronach wybranej technologii, można wspierać się dodatkowymi algorytmami w celu poprawy pozycjonowania wybranego obiektu nawet w sytuacjach, gdy znajdzie się on poza obszarem działania systemu lokalizacyjnego. Znając ostatnią pozycję poruszającego się obiektu oraz prędkość z jaką się porusza, można wyznaczyć pozycję gdzie będzie się znajdował w następnym kroku [3,16].

Technologią, z którą obecnie wiązane są największe nadzieje w systemach ILS jest UWB. Na rynku istnieją rozwiązania takich systemów m.in. firm Ubisense, Decawave, Bespoon czy Zebra, lecz produktów w pełni gotowych do zastosowań przemysłowych jest niewiele.

Firma Ubisense [5,10] jest obecnie jednym z liderów rynku systemów ILS, stąd w niniejszym artykule zostaną przedstawione wyniki badań precyzji i dokładności ustalania pozycji systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej Dimension4 tejże firmy.

Tabela 1. Porównanie technologii stosowanych w ILS

Kategoria	Pokrycie terenu	Dokładność	Przenikalność przez objekty	Odporność na zakłócenia	Skalowalność
Ultradźwięki	Bardzo małe	Bardzo duża	Nie	Bardzo mała	Nie
RFID	Średnie	Średnia	Tak	Mała	Tak
Podczerwień	Małe	Średnia	Nie	Bardzo mała	Nie
WLAN RSS	Średnie	Mała	Tak	Duża	Tak
WLAN AoA + RSS	Średnie	Średnia	Tak	Duża	Tak
Bluetooth	Małe	Średnia	Tak	Duża	Nie
BLE	Duże	Średnia	Tak	Duża	Tak
Sieci komórkowe	Bardzo duże	Mała	Tak	Bardzo duża	Tak
Obrazowanie	Średnie	Duża	Nie	-	Tak
Pseudolity	Bardzo duże	Średnia	Tak	Średnia	Tak
UWB	Duże	Duża	Tak	Duża	Tak

Systemy lokalizacyjne oparte o UWB

Mianem UWB określamy sygnał radiowy którego widmo częstotliwościowe (μ_{-10}) jest większe niż 20% średniej częstotliwości nośnej (f_c) lub szerokość pasma (B_{-10}) jest większa niż 500 MHz [12]. UWB jest techniką transmisji sygnału radiowego, w której dane do przesłania są rozpraszane w dziedzinie częstotliwości poprzez emisję bardzo krótkich pikosekundowych impulsów. Pozwala to układom radiowym wykorzystującym UWB transmitować duże ilości danych, a jednocześnie zużywać niewielką ilość energii podczas transmisji. Ultraszerokopasmowa transmisja danych była poddawana standaryzacji poprzez organizację IEEE i grupę roboczą 802.15.3 [7], lecz członkowie grupy nie doszli do wspólnych wniosków i UWB nie została ustandaryzowana. Nie przeszkodziło to w wykorzystaniu UWB na potrzeby innych standardów bezprzewodowych stawiających na wysoką energooszczędność, takich jak: IEEE 802.15.1 [6], czy IEEE 802.15.4 [8]. Krótkie impulsy UWB są stosunkowo łatwe do wychwycenia przez detektory, dzięki czemu istnieje możliwość sprawdzenia czy sygnał pochodzi wprost od nadawcy, czy jest to sygnał odbity lub rozproszony. Dodatkowo, częstotliwości pracy UWB w zakresie 3 – 10 GHz powodują, że fale skutecznie przenikają przez niektóre materiały takie jak: szkło, beton, czy drewno. Wszystko to razem sprawia, że UWB można użyć do szacowania odległości, a co za tym idzie do systemów ILS działających w czasie rzeczywistym, tzw. RTLS (*ang. Real Time Location System*).

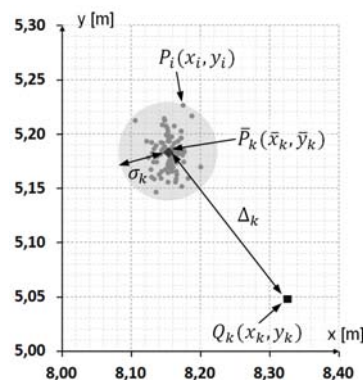
Metody wyznaczania pozycji są ściśle chronioną tajemnicą producentów systemów RTLS, ale w ogólnym przypadku wiadomym jest, że pozycja obliczana zostaje w dwóch etapach na podstawie analizy czasowej sygnałów radiowych emitowanych przez lokalizowany obiekt oraz węzły odniesienia. Etap pierwszy to wyodrębnienie i analiza sygnałów ze znaczników umieszczonych na lokalizowanym obiekcie przez sensory, które je odebrały. Na tym etapie estymowane są odległości pomiędzy sensorami, a znacznikami. W tym celu stosowane są mechanizmy wspomniane we wcześniejszej sekcji bazujące na mocy

odebranego sygnału radiowego (RSS), kącie padania sygnału (AOA) oraz czasie (TOA).

Druga faza to określenie położenia lokalizowanego obiektu względem bardzo precyzyjnie znanych położen sensorów, które odebrały wcześniej sygnały ze znaczników. W tym celu stosowane są techniki multilateracji oparte na pomiarach odległości i/lub kątów, z których sygnały pochodziły. Dodatkowo, na tym etapie należy odfiltrować szumy i wszelkiego rodzaju sygnały niepożądane np. poprzez stosowanie filtracji Kalmana [16, 17].

Definicje dokładności i precyzji w systemach lokalizacyjnych

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna, ISO [11] definiuje **precyzję** (*ang. precision*) jako stopień zgodności serii niezależnych wyników pomiaru uzyskanych w ustalonych warunkach. Precyzja zależy jedynie od rozkładu błędów losowych i nie odnosi się do wartości rzeczywistej. Miara precyzji jest obliczana jako odchylenie standardowe wyników testu. Im większa wartość odchylenia standardowego σ tym mniejsza precyzja. Określenie poziomu precyzji systemu lokalizacyjnego z metrologicznego punktu widzenia, jest więc tożsame z określeniem niepewności standardowej typu A (u_A).



Rys. 1. Precyzja i dokładność dla pozycji k -tego punktu na płaszczyźnie

Postępując zgodnie z zaleceniami przewodnika JCGM [14] wartość odchylenia standardowego σ , w odniesieniu do sytuacji przedstawionej na rysunku 1, określono bazując na danych otrzymanych z zależności 1

$$(1) \quad \sigma_x(P_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_k)^2}{(n-1)}}, \quad \sigma_y(P_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_k)^2}{(n-1)}}$$

gdzie: n to liczba zebranych pomiarów położenia punktu P_k ; x_i, y_i to współrzędne pojedynczego pomiaru punktu P_i ; \bar{x}_k, \bar{y}_k to wartość średniej arytmetycznej współrzędnych x i y punktu P_k . Wartość odchylenia standardowego dla punktu P_k wyznaczono za pomocą średniej geometrycznej z zależności

$$(2) \quad \sigma_k(P_k) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2},$$

a liczbę stopni swobody DOF określono na podstawie zależności

$$(3) \quad v = n - 1.$$

Niepewność standardowa typu A dla m -punktów referencyjnych wyrażona została zależnością

$$(4) \quad u_A = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m v_k \sigma_k}{\sum_{k=1}^m v_k}},$$

gdzie m to liczba punktów referencyjnych w hali magazynowej. Przy założeniu, że DOF jest taka sama dla każdego z punktów, wyrażenie 4 przyjmuje postać

$$(5) \quad u_A = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \sigma_k}{m}}$$

Termin **dokładność** (*ang. accuracy*) przez organizację ISO został zdefiniowany jako zgodność wyników pomiaru z wartością odniesienia. Termin ten stosuje się do wyników badań obciążonych zarówno składnikiem losowym jak i błędami systematycznymi [11]. Oznacza to, że precyzja jest jednym ze składników służących do wyznaczenia dokładności. Drugim ze składników jest wskaźnik **prawdziwości** (*ang. trueness*) charakteryzujący błąd statystyczny opisywany przez niepewność typu B (u_B), a miarę dokładności jako niepewność całkowitą u_C . W przypadku klasycznych przyrządów pomiarowych, wartość błędu systematycznego jest podawana przez producenta w karcie katalogowej i jest uznawana za wartość stałą. W przypadku systemów lokalizacyjnych nie istnieje możliwość oszacowania wartości błędu systematycznego a priori, gdyż system musi być każdorazowo kalibrowany na działającym obiekcie. Stąd do oszacowania błędu systematycznego pojedynczego punktu pomiarowego użyto formuły 7 określając błąd pomiaru w punkcie jako średnia geometryczna pomiędzy położeniem punktu odniesienia (Q_k), a punktem wynikającym z wartości średniej wyników uzyskanych z systemu lokalizacji (P_k)

$$(6) \quad \Delta x_k(Q_k) = \bar{x}_k - x_k, \quad \Delta y_k(Q_k) = \bar{y}_k - y_k,$$

$$(7) \quad \Delta_k(Q_k) = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta y_k^2},$$

zaś błąd graniczny (ΔX_G) systemu oszacowano jako średnią arytmetyczną z m -punktów pomiarowych

$$(8) \quad \Delta X_G = \overline{\Delta_k(Q_k)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta_k.$$

Następnie wyznaczono wskaźnik charakteryzujący błąd systematyczny jako

$$(9) \quad u_B = \frac{\Delta X_G}{\sqrt{3}}.$$

Ostatecznie przy pomocy zależności 10 wyznaczono dokładność jako niepewność całkowitą

$$(10) \quad u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

Dodatkowo wyznaczono niepewność rozszerzoną U dla poziomu ufności $\alpha = 0,95$ przyjmując wartość współczynnika $k_\alpha = 2$ dla rozkładu Gaussa zgodnie z zaleceniem przewodnika JCGM

$$(11) \quad U = k_\alpha u_C$$

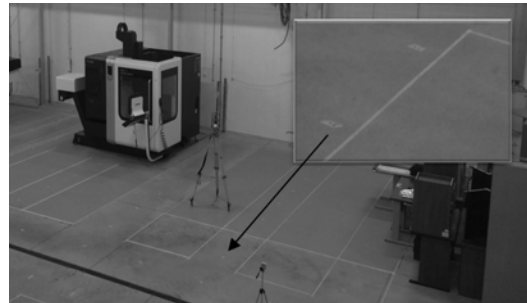


Rys. 2. Umieszczenie sensorów w hali

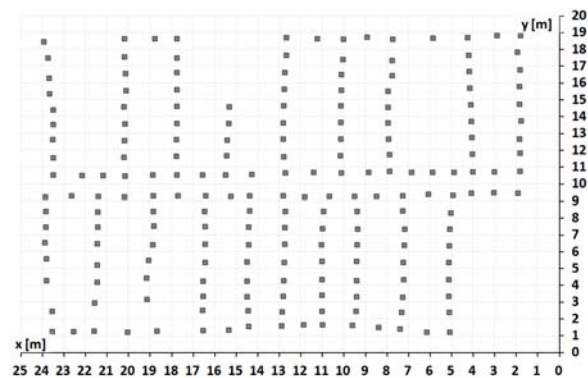
Wyniki badań

Badaniom poddano bazujący na technologii UWB system Dimension4 firmy Ubisense. System składał się z znaczników emitujących sygnały UWB oraz sensorów, które je odbierały. Instalację zrealizowano w pomieszczeniu o powierzchni 500 m². Sensory umieszczono na elementach konstrukcyjnych (rys. 2), a na posadzce zaznaczono 196

punktów referencyjnych (rys. 3, 4), w których dokonywany był odczyt pozycji znacznika. Pozycja sensorów oraz punktów referencyjnych została określona za pomocą tachimetru firmy KOLIDA [9] KTS 442R6L z dokładnością do 1 mm. W każdym z punktów referencyjnych dokonano odczytu 100 wartości położenia znacznika przez system lokalizacyjny. Następnie dokonano wyznaczenia precyzji i dokładności każdego z punktów pomiarowych niezależnie, oraz wyznaczono oba parametry dla systemu jako całości.



Rys. 3. Punkty referencyjne w hali magazynowej

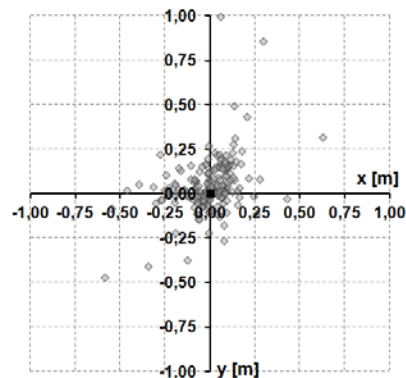


Rys. 4. Położenie punktów referencyjnych w hali magazynowej

Uzyskane wyniki końcowe zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki zbiorcze precyzji i dokładności analizowanego systemu lokalizacji

Precyzja DOF = 99	Błąd systematyczny	Dokładność DOF = 195	Niepewność rozszerzona dla $\alpha = 0,95$
0,045 m	0,100 m	0,109 m	0,219 m



Rys. 5. Rozrzut błędów estymacji pozycji systemu ILS

Jak wspomniano powyżej, błąd systematyczny został wyznaczony na podstawie zależności 9, w której należało oszacować wartość błędu granicznego ΔX_G . Przeważnie

wartość tą można było znaleźć w dokumentacji przyrządu pomiarowego. Niestety, w przypadku systemów lokalizacyjnych nie ma możliwości założenia jaka będzie wartość tegoż błędu. Wpływ na jego wartość ma przede wszystkim proces kalibracji realizowany każdorazowo przez wyspecjalizowaną osobę w miejscu gdzie system ma docelowo funkcjonować. Z tego też powodu po skalibrowaniu systemu w hali magazynowej zdecydowano się prześledzić jak wygląda rozrzut estymowanej przez system Dimension4 pozycji znacznika dla każdego z 196 punktów pomiarowych. Na rysunku 5 przedstawiono jak wygląda na płaszczyźnie xy rozrzut estymowanych przez system ILS pozycji znacznika w stosunku do punktów referencyjnych.

Jak można zauważyć na powyższym rysunku, rozrzut wyznaczania pozycji w przypadku systemu Dimension4 miał charakter losowy, stąd też przy pomocy formuły 12 dokonano próby opisanie błędu systematycznego poprzez odchylenie standardowe i wyniki (tabela 3) porównać z wcześniej uzyskanymi na podstawie błędu granicznego (tabela 2).

$$(12) \quad \sigma_{\Delta k} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (\Delta_k - \bar{\Delta})^2}{(m-1)}}$$

Tabela 3. Błąd systematyczny systemu lokalizacyjnego

Metoda	Błąd systematyczny	Dokładność	Niepewność rozszerzona dla $\alpha = 0,95$
ΔX_G	0,100 m	0,109 m	0,219 m
$\sigma_{\Delta k}$	0,104 m	0,113 m	0,227 m

Analizy zostały przeprowadzone dla jednakowej liczby stopni swobody DOF = 196. Przeprowadzone badania wyraźnie pokazują, że w przypadku systemu lokalizacji, w którym nieznaną jest błąd systematyczny, dokładność można wyznaczyć podobnie jak precyzję, traktując całość jako zmienną losową. Różnice w wynikach są niewielkie, rzędu 3,5%. Rozwiązanie takie nie jest co prawda zgodne z zaleceniami JCGM i ścisłą definicją dokładności wg ISO 5725-1, ale może stanowić formę alternatywną i w przypadku systemów lokalizacyjnych pozwala wszystkie błędy traktować jako błędy losowe.

Podsumowanie

Firmy produkujące systemy lokalizacyjne, w broszurach i notach katalogowych, bardzo często nie podają jakiego poziomu precyzji oraz dokładności należy się spodziewać kupując ich produkt. Bardzo często parametry te są uważane za tożsame i określane są zbiorczo jako dokładność. Podyktowane jest to przede wszystkim tym, że detektory wykorzystywane w systemach lokalizacyjnych są najpierw montowane na określonej przestrzeni, a dopiero później uruchamiane i kalibrowane. Sam proces kalibracji też może się składać z kilku etapów i to w głównej mierze od tego procesu zależy jak dobrze system lokalizacyjny będzie funkcjonował. Przeprowadzone testy systemu lokalizacji oraz uzyskane wyniki potwierdziły wysoki poziom usług wyznaczania pozycji. Precyzja na poziomie 5 cm, dokładność rzędu 11 cm pokazują, że testowane rozwiązanie jest bardzo dojrzałe. Na jego bazie można budować rozwiązania nadające się do bardzo szczegółowego wyznaczania położenia poruszającego się obiektu w halach magazynowych, czy też innych pomieszczeniach zamkniętych.

Autorzy: dr inż. Dariusz Eljasz, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: D.Eljasz@imei.uz.zgora.pl, dr inż. Jacek Tkacz, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona

Góra, E-mail: J.Tkacz@imei.uz.zgora.pl, dr inż. Tomasz Gratkowski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: T.Gratkowski@imei.uz.zgora.pl, dr inż. Michał Doligalski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: M.Doligalski@imei.uz.zgora.pl.

Prace zrealizowano w ramach projektu pt. „Smart OMNICHANNEL – Rozwiązanie IT dla wielokanałowego handlu” (nr projektu RPLB.01.01.00-08-0009/16), współfinansowanego ze środków EFRR w ramach działania 1.1 Regionalnego Programu Operacyjnego – Lubuskie 2020.

LITERATURA

- [1] Alarifi A., Al-Salman A. M., Alsaleh M., Alnafessah A., Al-Hadhrami S., Al-Ammar M. A., Al-Khalifa H. S.: UltraWideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances, Sensors 2016.
- [2] B. Guan, X. Li, An Rssi-based wireless sensor network localization algorithm with error checking and correction, International Journal of Online Engineering (iJOE) 13 (12) (2017) pp. 52–66.
- [3] Beaugard S., Haas H. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning; Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication; Hannover, Germany. 16 March 2006; pp. 27–35.
- [4] De Blasio G., Quesada-Arencibia A., García C. R., Molina-Gil J. M., Caballero-Gil C.: Study on an Indoor Positioning System for Harsh Environments Based on Wi-Fi and Bluetooth Low Energy, Sensors 2017.
- [5] Eljasz D., Test dokładności systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej Ubisense Dimension4, Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle – SP 2018, Łagów, Polska. Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2018, pp. 35-38
- [6] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html> - specyfikacja standardu IEEE 802.15.1
- [7] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3.html> - specyfikacja standardu IEEE 802.15.3
- [8] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> - specyfikacja standardu IEEE 802.15.4
- [9] <http://www.kolida.it> – strona firmy Kolida
- [10] <http://www.ubisense.net> - strona firmy Ubisense.
- [11] ISO 5725-1:1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions.
- [12] ITU-R SM.1755, Characteristics of ultra-wideband technology.
- [13] Jachimczyk, B., Dziak, D., Kulesza, W.J. Customization of UWB 3D-RTLS Based on the New Uncertainty Model of the AoA Ranging Technique. Sensors 2017.
- [14] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [15] Kelner J., Ziółkowski C., Zastosowanie technologii SDF do lokalizowania źródeł emisji BPSK i QPSK, Przegląd Elektrotechniczny, No. 3, 2015, pp. 61–65
- [16] Konatowski S., Kaczmarek B., Efektywność estymacji położenia w algorytmach filtracji nieliniowej, Przegląd Elektrotechniczny No. 03, 2009, pp. 15-21
- [17] Kraszewski T., Czopik G., Technologia szerokopasmowa UWB w lokalizacji obiektów w pomieszczeniach zamkniętych, Przegląd Elektrotechniczny, No. 8, 2014, pp. 186-191
- [18] Li J., Yue X., Chen J., Deng F.: A Novel Robust Trilateration Method Applied to Ultra-Wide Bandwidth Location Systems, Sensors 2017.
- [19] Ma X., Liu T.: The application of WiFi RTLS in automatic warehouse management system. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL), Chongqing, China 2011, pp. 64-69
- [20] Mautz R. Ph.D. Thesis. ETH Zürich; Zürich, Switzerland: 2012. Indoor Positioning Technologies.
- [21] Nguyen V.-H., Pyun J.-Y.: Location Detection and Tracking of Moving Targets by a 2D IR-UWB Radar System, Sensors 2015.
- [22] Yin Z., Cui K., Wu Z., Yin L.: Entropy-Based TOA Estimation and SVM-Based Ranging Error Mitigation in UWB Ranging Systems, Sensors 2015