



NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND
TECHNOLOGY POLITEHNICA BUCHAREST

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Doctoral School of Electronics, Telecommunications
and Information Technology**

Decision No. XXX from DD-MM-YYYY

**REZUMAT TEZA DE
DOCTORAT**

Ekaterina Svertoka

ÎMBUNĂȚIREA PRECIZIEI DE LOCALIZARE A DISPOZITIVELOR PORTABILE
INDUSTRIALE CU LORAWAN

ENHANCING LOCALIZATION ACCURACY IN INDUSTRIAL WEARABLES WITH
LORAWAN

THESIS COMMITTEE

Prof. Mihai Ciuc, PhD
UNSTPB

President

Prof. Ion Marghescu, PhD
UNSTPB

PhD Supervisor

Assoc. Prof. Radim Burget, PhD
Brno University of Technology

PhD Supervisor

Prof. Simona Lohan, PhD
University of Tampere

Reviewer

Assoc. Prof., Angela Digulescu-Popescu, PhD
Military Technical Academy (MTA) Ferdinand I

Reviewer

Assoc. Prof. Jirý Hosek, PhD
Brno University of Technology

Reviewer

Assoc. Prof., Alexandru Martian, PhD
UNSTPB

Reviewer

BUCHAREST 2024

Table of contents

1	Introducere	1
1.1	Motivație	1
1.2	Probleme cercetate și contribuții	2
1.3	Structura tezei	2
2	Stadiul tehnologic de ultimă oră	4
2.1	Coexistența IoT, IIoT și a tehnologiei portabile	4
2.2	Industrial Wearables for work safety	5
2.3	Concluziile capitolului	10
3	Analiza tehnologiei LoRaWAN	12
3.1	Arhitectura LoRaWAN	13
3.2	Evaluarea teoretică a acoperirii LoRaWAN	14
3.3	Evaluarea acoperirii LoRaWAN pe bază de simulare	15
3.4	Concluziile capitolului	16
4	Analiza experimentală a localizării bazate pe LoRaWAN	18
4.1	Descrierea campaniei de măsurare	18
4.2	Campanie indoor supraterană	19
4.3	Indoor underground (iUG) campaign	22
4.4	Outdoor campaign	25
4.5	Rezultate numerice selectate	25
4.6	Concluziile capitolului	27
5	Îmbunătățirea preciziei de localizare LoRaWAN	29
5.1	Propunere de algoritm de acuratețe îmbunătățită	29
5.2	Rezultate numerice selectate	31
5.3	Concluziile capitolului	32
6	Concluziile tezei	33
6.1	Concluzii și contribuții ale cercetării	33
6.2	Lista publicațiilor originale	35
6.3	Perspective pentru dezvoltări ulterioare	35
	References	36

Chapter 1

Introducere

1.1 Motivație

La începutul acestei lucrări de cercetare, în 2019, numărul persoanelor care au fost rănite sau au murit la locul de muncă a fost estimat la câteva milioane [1], iar scăderea numărului de victime în următorii doi ani a fost explicată mai degrabă prin reducerea serioasă sau închiderea unităților de producție în timpul pandemiei, decât prin îmbunătățirea condițiilor de muncă sau prin creșterea măsurilor de siguranță la locul de muncă. Domeniul de cercetare al acestei lucrări, dispozitivele industriale portabile pentru asigurarea securității la locul de muncă, a apărut pentru a face față acestei probleme și se bazează pe dorința de a îmbunătăți lumea în care trăim.

Creșterea nivelului de siguranță în industrie, în fabrici periculoase și în întreprinderi mici este un proces pe termen lung, care afectează profund structura proceselor de lucru dintr-o companie. În prezent, acest proces ar putea fi susținut și accelerat semnificativ de tehnologiile moderne oferite în cadrul Industriei 4.0. Partea centrală a modificării și digitalizării industriilor include conceptul de Internet of Things (IoT) și una dintre direcțiile sale principale - tehnologiile bazate pe echipamente portabile.

În această lucrare, am explorat mai întâi dispozitivele portabile industriale de ultimă generație pentru siguranța la locul de muncă. Dintre diferitele contribuții aduse la abordarea acestui subiect, ne-am concentrat pe un grup de probleme nerezolvate legate de localizare, considerând că este unul dintre cele mai importante și mai extinse domenii de cercetare în domeniu. Combinația dintre piste de cercetare teoretică și practică ne-a condus la investigarea posibilității de a utiliza LoRaWAN pentru a localiza dispozitivele portabile în aplicații periculoase la locul de muncă. La acel moment, acest domeniu era slab studiat dintr-un motiv complex: LoRaWAN nu a fost conceput inițial în scopuri de localizare și avea limitări sub forma unei lățimi de bandă mici, ceea ce lasă să se întrevadă de la început o precizie scăzută. Pe de altă parte, mai multe caracteristici ar fi atractive pentru localizarea realizată prin *low-power* dispozitive IoT, astfel că ar fi posibil să se mărească precizia folosind metode suplimentare de preprocesare sau postprocesare

și să se economisească energie. În acest fel, societatea ar putea primi o soluție cu costuri reduse, cu consum redus de energie și cu rază largă de acțiune, care ar garanta o precizie de poziționare suficientă pentru dispozitivele portabile, în special pentru scenariile de siguranță la locul de muncă.

1.2 Probleme cercetate și contribuții

Teza pune în evidență 3 Întrebări de cercetare (RQ) (Tabelul 1.1).

Table 1.1 Principalele contribuții ale cercetării

Nr	Întrebare de cercetare	Tipul de contribuție
RQ1	Investigarea parametrilor și a funcțiilor dispozitivelor portabile care ajută întreprinderile să îmbunătățească nivelurile de siguranță la locul de muncă	Clasificare
RQ2	Determinarea parametrilor critici ai LoRaWAN din perspectiva localizării la planificarea unei campanii de măsurare și prelucrarea rezultatelor acesteia	Seturi de date deschise; Dependente
RQ3	Evaluarea potențialului de îmbunătățire a acurateței localizării bazate pe LoRaWAN prin optimizarea algoritmului de localizare	Dependente; Algoritmi

1.3 Structura tezei

Capitolul 2 se referă la prima întrebare de cercetare sau **RQ1**. Acesta discută paradigma IoT, rolul dispozitivelor portabile în cadrul acesteia, funcțiile și parametrii acestora. Capitolul se încheie cu alegerea direcției de cercetare - localizarea realizată de dispozitivele portabile industriale - și selectează LoRaWAN pentru o analiză ulterioară în acest domeniu.

RQ2 în această lucrare este abordată printr-o examinare cuprinzătoare atât din perspectivă teoretică, cât și practică, așa cum se poate observa în capitolele 3 și, respectiv, 4. Capitolul 3 discută raționamentul care a stat la baza selectării LoRaWAN pentru investigația legată de localizare. și aprofundează structura și arhitectura acestei tehnologii. Evaluările practice fac obiectul capitolului 4, care investighează perspectiva aplicației LoRaWAN ca soluție pentru localizare, utilizând seturi de date colectate la Universitatea de Tehnologie din Brno, Republica Cehă, și la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, România. Sunt descrise campaniile de realizare a măsurătorilor, sunt evaluate și prelucrate seturile de date și, în final este dată o evaluare a preciziei localizării bazate pe LoRaWAN pentru diferite tipuri de medii în anumite condiții.

Capitolul 5 abordează **RQ3**, procedând la căutarea posibilităților de creștere a acurateței localizării bazate pe LoRaWAN din punct de vedere algoritmic, propunând 2 modificări bazate pe k -NN. În cele din urmă, capitolul 6 concluzionează lucrarea prin

evidențierea rezultatelor, rezumând contribuțiile personale și evidențiind perspectivele pentru lucrările viitoare.

Chapter 2

Stadiul tehnologic de ultimă oră

Pornind de la concepte generale, cum ar fi IoT, mai concret varianta, IIOT, și dispozitivele portabile, acest capitol conduce cititorul la subiectul principal al lucrării actuale - aplicarea tehnologiei LoRaWAN pentru aplicații industriale care utilizează dispozitive portabile. Acesta abordează prima întrebare de cercetare, prezentând ca rezultat două clasificări – pe funcții și pe metrice colectate.

2.1 Coexistența IoT, IIoT și a tehnologiei portabile

Apariția paradigmei IoT datează de la sfârșitul secolului XX. În general, IoT este un sistem de lucruri interconectate care au identificatori unici și care comunică între ele. Nu există prea multe cerințe față de "lucru" (dispozitiv) în sine, acesta putând fi orice obiect fizic inanimat, indiferent de dimensiune sau material, care are acces la internet și la soluția de conectivitate, ceea ce face ca acesta să fie larg răspândit într-o varietate extraordinară de piețe, inclusiv în domeniul sănătății, industriei, sport, divertisment, siguranță la locul de muncă, și multe altele [2], și promițând să ajungă la 27 miliarde de dolari de dispozitive conectate până în 2027 [3].

Dintre varietatea de dispozitive IoT, acest studiu se concentrează în special pe dispozitivele portabile [4]. Un dispozitiv portabil este un dispozitiv electronic inteligent de diferite forme și dimensiuni care se poartă în interiorul/asupra/în apropierea corpului pentru a colecta și manipula anumite informații. Una dintre cele mai atractive caracteristici ale dispozitivelor portabile este multifuncționalitatea: un singur dispozitiv poate avea mai mulți senzori și poate îndeplini, de obicei, o gamă largă de sarcini. Cu toate acestea, funcționalitatea ridicată este obținută, în mod obișnuit, cu prețul altor caracteristici importante care caracterizează dispozitivul portabil cum ar fi: dimensiunile reduse, consumul redus de energie, mobilitatea, confortul pentru utilizator etc. Astfel, principala problemă de optimizare în domeniul tehnologiei portabile constă în compromisul dintre funcționalitatea sa și alte caracteristici practice.

2.2 Industrial Wearables for work safety

Conceptul de **dispozitiv portabil industrial** ar putea fi definit ca o subcategorie de dispozitive portabile axate pe proiectarea, întreținerea, monitorizarea, optimizarea și analiza proceselor de producție pentru a colecta date în timp real și pentru a asista administratorii/managerii de securitate în luarea deciziilor. Principala diferență care distinge dispozitivele portabile industriale într-o clasă separată este reprezentată de cerințele ridicate de soliditate: mediile industriale pot fi caracterizate de condiții nefavorabile, cum ar fi temperaturi foarte ridicate sau foarte scăzute, niveluri extreme de umiditate etc. [5, 6]. În plus, în industriile cu risc ridicat, există o probabilitate crescută de deteriorare fizică a dispozitivului. În continuare, unele medii de lucru impun modernizarea tehnologiilor existente pentru creșterea preciziei, a razei de acțiune, a timpului de răspuns și a rezistenței la acțiunea factorilor de mediu. Având în vedere caracterul unic al dispozitivelor industriale portabile, oamenii tind să fie mai puțin atenți atunci când se bazează pe tehnologie. Astfel, întreruperile, imprecizia sau întârzierile în activitatea unui dispozitiv portabil industrial pot provoca un accident fără urgențe sau condiții extreme.

Clasificare pe funcții

Prima întrebare de cercetare a acestei lucrări vizează identificarea funcționalității dispozitivelor de portabile industriale care permit întreprinderilor să crească nivelul de siguranță la locul de muncă. Având în vedere cadrul clasificării publicate [7], oferim o versiune extinsă și modernizată deja evidențiată de autor în [5]. Aceasta constă din 4 funcții principale, monitorizare, suport, instruire, urmărire și 10 subfuncții și este rezumată în tabelul 2.1.

În concluzie, numeroși factori de risc din industrie provoacă o creștere a numărului de decese la locul de muncă. În acest context, tehnologia portabilă oferă o gamă largă de funcționalități în cadrul sarcinilor industriale și, în mod normal, ridică standardele de siguranță la locul de muncă.

Clasificarea pe baza metricilor colectate

Este demn de remarcat faptul că dispozitivele portabile moderne se îndreaptă din ce în ce mai mult spre multifuncționalitate, astfel încât majoritatea acestora sunt echipate nu cu unul, ci cu mai mulți senzori. Tabelele 2.2 și 2.3 au evidențiat 23 de măsurători comune în tehnologia portabilă: 15 legate de corp și 8 legate de mediu. Cu toate acestea, nu toate sunt integrate în prezent în sectorul industrial.

Table 2.1 Clasificarea funcțiilor dispozitivelor cu aplicații industriale [5]

Funcția	Subfuncții & Descriere
Monitorizare (M) Dispozitive de urmărire pentru fitness, inele inteligente, ochelari inteligenți, plasturi/senzori fixați pe corp, îmbrăcăminte inteligentă, dispozitive portabile implantabile etc.	Monitorizarea și controlul parametrilor vitali ai lucrătorilor: măsurarea, sistematizarea și analiza parametrilor fizici (de exemplu, pulsul, rata de transpirație etc.) sau/și psihici (de exemplu, oboseală, somnolență) ai angajatului pentru a informa angajatul însuși și responsabilii cu securitatea în industrie despre pregătirea angajatului pentru procesul de lucru [8, 9]. Monitorizarea parametrilor de mediu la locurile de muncă: măsurarea, sistematizarea și analiza parametrilor de mediu (de exemplu, calitatea aerului, intensitatea luminoasă etc.) pentru a menține condițiile de siguranță pentru muncă, planificarea promptă a evacuărilor, prevenirea dezastrelor, asigurarea personalului cu echipament de protecție individuală (EPI). Monitorizarea în comun a parametrilor legați de om și de mediu vă permite să determinați gradul de influență a celui de-al doilea factor asupra primului [10, 11].
Sprijinirea (S) Exoscheleți, plasturi (pentru a controla poziția corpului atunci când se ridică obiecte grele), roboți portabili	Creșterea capacităților fizice ale lucrătorilor: sprijinirea capacităților fizice ale corpului pentru a preveni rănirea în timpul muncii fizice grele [12–14]. Facilitarea comunicării și gestionarea notificărilor: asigurarea unui schimb rapid de informații pe teritoriul șantierului de lucru fără a întrerupe procesul de lucru (microfoane hand-free, semnalizare digitală) [15, 16]. Simplificarea gestionării informațiilor: asigurarea transmiterii, stocării și afișării sigure a informațiilor, precum și accesul rapid la documente și notificări [17]. Facilitarea percepției designului industrial: crearea de diagrame și grafice virtuale pentru o percepție mai ușoară folosind căști AR/VR [18].
Formare (Tn) Ochelari inteligenți, căști de protecție, head-up display	Formația lucrătorilor: urmărirea și notificarea angajaților cu privire la corectitudinea acțiunilor (de exemplu, determinarea posturii corecte cu ajutorul analizei biomecanice). În plus, instruirea personalului în sarcini complexe în realitate virtuală și augmentată înainte de a începe lucrul efectiv reduce riscul de avarie [13, 18].
Tracking (Tc) Brățări inteligente, haine inteligente, cizme inteligente, pedometre digitale etc.	Monitorizarea parametrilor de localizare a lucrătorilor: localizarea lucrătorilor permițând coordonarea eficientă a resurselor în cursul normal al activității și în caz de evacuare, precum și limitarea accesului ilegal la locul de muncă sau la echipamente [19]. Prevenirea loviturilor provocate de mașini în mișcare: urmărirea locațiilor obiectelor folosind senzori de detectare a proximității pentru a preveni coliziunile [10, 19]. Crearea unei imagini cuprinzătoare a întregului proces de producție: furnizarea unei hărți în timp real cu angajați, utilaje și echipamente pentru a facilita luarea deciziilor și distribuirea forței de muncă între locații [19].

Table 2.2 Human body-related metrics (NA – Accuracy is not specified for metric groups) [5]

Metric	Description	Example Accuracy	Examples
Saturația oxigenului în sânge	Procentul de hemoglobină oxigenată în raport cu hemoglobina totală din sânge (valoare normală: 90-100%).	70-100% [20]	puls-oximetre [21], plasturi pentru piele [22]
Tensiunea arterială	Presiunea pe care sângele o exercită asupra pereților vaselor de sânge. Există tensiune arterială sistolică sau superioară (valoare normală: mai mică de 120 mmHg) și diastolică sau inferioară (valoare normală: mai mică de 80 mmHg). Intervalul mediu de lucru al senzorilor de tensiune arterială este de 0–320 mmHg.	86% [23]	Manșete pentru braț cu senzori atașați [24], senzori de tensiune arterială fără manșetă [25]
Calorie	O unitate este egală cu căldura necesară pentru a crește temperatura unui gram de apă cu un grad Celsius. Există mai multe moduri de a calcula numărul de calorii (de exemplu, pe baza numărului de pași sau a ritmului cardiac [26]), rezultând o gamă largă de dispozitive portabile care oferă această funcție.	>91% (mers); >90% (aler-gare) [27]	Accelerometre, senzori de presiune în brățările de fitness, pantofi inteligenți [26], etc.
Electro-cardiograma (ECG)	Activitatea electrică a inimii [24], (Volți). Este unul dintre principalele instrumente de detectare a problemelor cardiace (de exemplu, boala cardiacă ischemică, aritmie) [28].	>90% [29]	Electrozi de piele [24] în haine [30], curele de piept [31], etc.
Electroencefalograma (EEG)	Activitatea electrică a creierului [32] (Volți). EEG identifică și prezice bolile legate de creier (de exemplu, boala Alzheimer, epilepsia, demența) [33]. În plus, este utilizat și pentru detectarea emoțiilor [34, 35].	>86% [34], [35]	Căști [32, 36]
Electromiografie (EMG)	Activitatea electrică a mușchilor [24] (Volți). EMG este folosit pentru a urmări oboseala musculară și pentru a determina cât de repede se recuperează mușchii în urma unor leziuni [37, 38]	>90% [39]	Electrozi de piele [24] încorporați în brățări, curele de talie [40], haine [41].
Clipiri ale ochilor	Metrică ce prevede măsurători ale vitezei și amplitudinii cu care o persoană deschide ochii. Măsurătorile privind clipitul ochilor sunt utilizate pentru a identifica nivelul de somnolență folosind, de exemplu, Johns Drowsiness Scale [8] sau Stanford Sleepiness Scale [42].	NA	ochelari [8, 43, 42].

Continued on next page

Table 2.2 – continued from previous page

Metric	Description	Example Accuracy	Examples
Glucoza	Nivelul de zahăr din sânge (grame pe litru sau moli pe litru). Un nivel ridicat de glucoză identifică diabetul, ale cărui simptome sunt destul de largi, de la tulburări de vedere până la oboseală crescută și episoade depresive [44, 45]	>95% [46]	Strip-base [47], senzori de glucoză implantabili [48], tatuaje inteligente [49]
Ritmul cardiac și pulsul	Ritmul cardiac este numărul de bătăi ale inimii pe minut. Pulsul este numărul de vibrații ale pereților aortici. Pulsul poate fi o caracteristică mai puțin precisă în cazul patologiilor (de exemplu, extrasistole), deoarece nu toate bătăile inimii duc la formarea unei unde de puls [50]. Limitele critice variază de obicei între 40-200 de bătăi pe minut și depind de activitatea curentă, sex, vârstă, stare de sănătate, tip de activitate etc.	>76% [51]	Oximetru de puls [52], curele de piept [53] și de încheietura mâinii [47], brățări de fitness
Sunete cardiace (murmure)	Sunete care apar din cauza unei modificări a fluxului sanguin, a vibrației țesuturilor cardiace înconjurătoare și a vaselor mari. Sunetele cardiace pot semnaliza mai multe probleme diferite, inclusiv defecte cardiace.	>80% [54]	Bandă de încheietura mâinii [54]
Metrice legate de localizare	Metrice legate de identificarea poziției obiectului: acoperire, precizie, consum de energie, prețul tehnologiei wireless etc.	NA	Gamă largă de dispozitive portabile
Metrice legate de mișcare	Această metrică se referă la identificarea parametrilor mișcărilor umane (în contextul acestei lucrări) care sunt, de asemenea, numite analiză biomecanică [55, 56]. Analiza biomecanică include o gamă largă de funcții, cum ar fi determinarea vitezei de mișcare, parametrii aparatului respirator, corectitudinea desfășurării activității fizice etc.	NA	Accelerometru, giroscop [57], exoschelete, tălpi de presiune, e-textile [55]
Transpirație	Lichid excretat de glandele sudoripare ale pielii [58]. Transpirația este al doilea fluid corporal după sânge care conține cea mai bogată gamă de biomarkeri, cum ar fi glucoza, pH-ul, cortizolul etc. [59].	>99% [60]	Colectoare de transpirație, plasturi pentru piele [59], ceasuri inteligente [61].
Frecvența respiratorie (RR)	Numărul de inhalări și expirații pe minut. Pentru un adult, RR medie este de 16-20 de respirații pe minut [62]. Importanța monitorizării RR care ajută la indicarea bolilor respiratorii, inclusiv a pneumoniei, apneei în somn etc., a crescut foarte mult în ultimii ani datorită pandemiei COVID-19 [63].	>95% [63]	accelerometre, giroscop, senzori piezorezistivi RR [63] [63] plasturi pentru piele [22].

Continued on next page

Table 2.2 – continued from previous page

Metric	Description	Example Accuracy	Examples
Temperatura	O măsură a capacității corpului de a genera căldură [24]. Cu toate acestea, intervalul normal de temperatură pentru un om sănătos este de 36,16–37,02 °C [64], iar cel mai larg interval înregistrat este de 24–44 °C [65], de obicei intervalul aparatelor portabile care măsoară temperatura este mai larg.	>99% [66]	Senzori de temperatură [67, 68] și plasturi pentru piele [69]

Table 2.3 Măsurători legate de mediu [5]

Metric	Descriere	Exemple
Air Quality Index (AQI)	Un indice arată gradul de poluare a aerului într-o anumită zonă [70]. Acest indicator este determinat de concentrațiile înregistrate de poluanți în aer și variază de la 0 la 500. Pe baza valorii indicatorului, mediului i se atribuie una dintre cele 5 (sau 6) clase de pericol: de la bun la periculos. În funcție de caracteristicile fizice ale unei persoane, un nivel de poluare mai mare de 101 poate provoca deja daune semnificative pentru sănătate, crescând riscul de a dezvolta pneumonie, cancer pulmonar etc. [70]	Senzori de gaz (de exemplu, senzor CO2 [71])
Presiunea atmosferică	Presiunea exercitată de greutatea atmosferei asupra suprafeței de sub ea [72] (hectopascali, hPa). Pentru profesiile în condiții de presiune barometrică scăzută sau ridicată (de exemplu, piloții și, respectiv, scafandrii), acest parametru este esențial, deoarece, dintr-o perspectivă pe termen lung, acestea pot fi asociate cu apariția unor modificări respiratorii, cardiace, neurologice, boli de decompresie etc. [73, 74] În medie, domeniul de măsurare al senzorilor de presiune este cuprins între 300 și 1100 hPa, cu o eroare de 0,5 hPa.	Grupul de senzori BMPxxx [71], barometre încorporate în benzi, ceasuri inteligente, ochelari [75] etc.
Intensitatea luminii	Puterea luminii produse de o anumită sursă de lumină măsurată în lux [76]. National Optical Astronomic Observatory [77] a publicat recomandări pentru intensitatea luminii în diferite situații. Iluminarea necorespunzătoare poate afecta în mod negativ siguranța lucrătorilor atât în mod direct (tulburări de vedere, cancer, tulburări de somn etc. [78, 79]), cât și indirect (creșterea șanselor de accidente în locurile de muncă slab iluminate, cum ar fi minele și tunelurile [80]).	Senzori de mișcare, de trafic, de lumină ambientală [81], de exemplu [82]
Nivelul de zgomot	Nivelul de amplitudine al sunetului de fond nedorit [83] (dBA). Un sunet constant de peste 80 dBA duce la efecte fiziologice, iar peste 100 dbA - la deteriorarea auzului, [84].	Senzori de sunet, microfoane dinamice [81].

Continued on next page

Table 2.3 – continued from previous page

Metric	Descriere	Exemple
Radiație	Energie provenită dintr-o reacție nucleară [85] (Sievert (Sv) sau echivalent om roentgen (rem)). Chiar și o doză relativ sigură de radiații (<5 rem sau 0,05 Sv [86]) cu timpul poate provoca probleme de sănătate permanente, cum ar fi cancerul. Dozele mari duc la vărsături, arsuri ale pielii, moarte [87]	Detectoare de radiații [88]
Umiditatea relativă	Cantitatea de apă prezentă în aer în comparație cu cea mai mare cantitate pe care ar fi posibil ca aerul să o rețină la acea temperatură [89]. Norma igienică a umidității relative pentru oameni este de 30-60%. Umiditatea scăzută determină deshidratarea organismului și crește posibilitatea ca bacteriile să invadeze corpul uman. Umiditatea ridicată poate duce la supraîncălzire, la creșterea transpirației și la apariția alergenilor (mucegai, ciuperci, acarieni) [90, 91].	Senzori de temperatură/umiditate [92]
Temperatura	Temperatura ambiantă, care este cel mai adesea exprimată în grade Celsius. Intervalul tipic al senzorilor de temperatură este de –40 până la 125 de grade Celsius °C [59]. Limita de supraviețuire a persoanei se situează între –40 °C [93] și 48 °C. Pentru cele mai bune performanțe, temperatura ambiantă optimă este de 22–26 °C [94].	Senzori de temperatură/umiditate [59, 92]
Ultraviolet index (UVI)	O doză de radiații ultraviolete de la soare la un anumit moment și într-un anumit loc. În prezent, UVI poate fi identificat pe baza scalei liniare împărțite în 5 intervale: scăzut (UV: 1–2), moderat (3–5), ridicat (6–7), foarte ridicat (8–10), extrem (11+) [95]. Expunerea la soare la raze UV mai mari de 7 poate duce la afecțiuni grave ale ochilor (de exemplu, orbire din cauza zăpezii), ale pielii (arsuri, cancer de piele, îmbătrânirea pielii) și ale sistemului imunitar general [96].	Radiometre și dozimetre UV încorporate în brățări, ceasuri inteligente, clipuri etc. [97]

Condițiile industriale definesc alegerea dispozitivelor portabile și, în consecință, parametrii care pot fi colectați. Astfel, atunci când vorbim despre date legate de mediu, cei mai solicitați parametri din literatura de specialitate sunt temperatura, umiditatea relativă și calitatea aerului.

2.3 Concluziile capitolului

Acest capitol prezintă cititorului o scurtă introducere în domeniul dispozitivelor portabile industriale, dezvăluind principalele concepte și propunând două clasificări - privind funcțiile (Tabelul 2.1) și metricile (Tabelele 2.2– 2.3) dispozitivelor portabile industriale, abordând prima întrebare de cercetare stabilită pentru această lucrare.

Având în vedere provocările actuale din domeniu pe care le-am publicat în [5], am selectat zona de interes de top la intersecția dintre clusterelor de localizare și conectivitate ca fiind una dintre cele mai bine conturate probleme. Urmând această cale, activitatea ulterioară a fost orientată spre investigarea tehnologiilor LPWAN, în special a unuia dintre cei mai importanți reprezentanți ai săi, LoRaWAN, care este utilizat pe scară largă ca soluție de conectivitate, însă este considerat nesatisfăcător în scopuri de localizare. Direcția de cercetare, astfel, se restrânge la explorarea potențialului LoRaWAN ca soluție unificată pentru sectorul IIoT.

Chapter 3

Analiza tehnologiei LoRaWAN

Acest capitol reamintește principalele concepte care stau la baza tehnologiei LoRaWAN, discută principalele direcții de utilizare a acesteia în aplicațiile moderne și o compară cu alte tehnologii LPWAN, justificând alegerea sa pentru studiu și utilizare în domeniul IIoT în această lucrare. În continuare, se investighează cazuri practice și perspective teoretice de aplicare a tehnologiei LoRaWAN ca soluție de comunicare și ca soluție pentru localizare, atingând prima parte a RQ2.

Tehnologiile LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) sunt o alegere populară pentru aplicațiile IoT care necesită comunicare pe distanțe lungi cu un consum redus de energie. Pe măsură ce industria IoT crește, crește și numărul de tehnologii LPWAN disponibile: conform estimărilor din [98], în următorii 7 ani, piața LPWAN promite să crească cu un CAGR semnificativ de 64,7%. Punctele cheie care stimulează expansiunea acestui grup de tehnologii sunt străduința de a acoperi zone îndepărtate și interesul crescând pentru conceptul de contorizare inteligentă și de orașe inteligente, care exploatează Fiecare tehnologie LPWAN are caracteristicile, avantajele și dezavantajele sale unice, ceea ce face esențială înțelegerea diferențelor dintre ele pentru a alege cea mai bună soluție pentru o anumită aplicație IoT.

În prezent, LPWAN este reprezentat pe piață în principal de patru tehnologii de vârf: LoRaWAN, Sigfox, LTE și NB-IoT. Alegerea între tehnologiile LPWAN este dificilă și depinde de aplicații. Din punctul de vedere al localizării, toate cele patru tehnologii LPWAN de top se află la același nivel - începând de la 100 de metri. Prin urmare, în procesul de alegere a unei tehnologii pentru continuarea cercetărilor, s-a decis să se pună accentul în primul rând pe frecvența de aplicabilitate a tehnologiei în scopuri industriale. Astfel, accentul a fost restrâns la Sigfox și LoRaWAN, iar alegerea a fost făcută în favoarea celei din urmă datorită disponibilității mai mari și a conveniențelor generale (lățime de bandă mai mare, scalabilitate mai bună, protocol deschis, personalizare mai ușoară a rețelei, comunitate mai mare).

3.1 Arhitectura LoRaWAN

LoRa

LoRa înseamnă Long Range (rază lungă de acțiune) și se referă la stratul fizic al LoRaWAN sau la tehnologia de modulație brevetată de Semtech. Aceasta se bazează pe metoda clusterului de modulație cu spectru împrăștiat, cunoscută sub numele de Chirp Spread Spectrum (CSS).

În general, putem vorbi despre patru parametri specifici pentru inițializarea LoRa:

- **Frecvența centrală.**
- **Lățime de bandă (BW).**
- **Factor de răspândire (SF).** Conform documentației Semtech, SF este logaritmul în baza 2 al numărului de cipuri pe simbol. LoRa permite configurarea a șase SF-uri: 7, 8, 9, 10, 11 și 12.
- **Code Rate (CR).** Există 4 CR utilizate în mod obișnuit în LoRa: CR1 sau 4/5 (4 biți de informație și 1 bit de corecție a erorilor), CR2 sau 4/6, CR3 sau 4/7 și CR4 sau 4/8.

Pe scurt, atunci când vorbim despre LoRa, ne referim fie la metoda de modulare, fie la stratul fizic al tehnologiei LoRaWAN. Cea de-a doua parte esențială a stivei tehnologiei, protocolul LoRaWAN, va fi prezentată în subsecțiunea următoare.

LoRaWAN

LoRaWAN este un protocol deschis construit pe baza LoRa PHY. Specificația LoRaWAN nu definește o anumită tehnologie de modulație. Cu toate acestea, se poate spune cu siguranță că LoRa este cea mai utilizată [99]. Infrastructura unei rețele LoRaWAN cuprinde mai multe componente principale: dispozitive finale (ED), gateway-uri (GW) și servere de rețea (NS). Elementele suplimentare pot include un server specializat de conectare la rețea (NJ) pentru a facilita roaming-ul în rețea. GW și NS sunt în mod obișnuit conectate printr-o interfață bazată pe IP. Funcționalitatea NS și interfețele de programare a aplicațiilor pentru utilizatori (API) pot varia în funcție de operatorul de rețea. Arhitectura de rețea LoRaWAN adoptă o topologie în stea, în care dispozitivele finale comunică exclusiv cu gateway-urile LoRaWAN și nu au o comunicare directă de la egal la egal între ele.

Pe scurt, rețeaua LoRaWAN ar putea fi descrisă după cum urmează: transmisia este inițiată de ED-uri folosind un mecanism de acces la canal de tip Aloha. Cu alte cuvinte, DE inițiază comunicarea în orice moment, respectând în același timp restricțiile operaționale ale canalului radio selectat. ED-urile trimit datele colectate către GW-uri,

care, la rândul lor, trimit datele către un NS. O rețea LoRaWAN de bază constă, de obicei, dintr-un singur GW și un NS care poate fi integrat în GW. Serverul de rețea analizează datele primite și elimină pachetele redundante. Doar pachetele de date alese sunt apoi transmise către serverul de aplicații.

3.2 Evaluarea teoretică a acoperirii LoRaWAN

Estimarea acoperirii este o parte esențială a lucrării, care oferă o idee despre puterea semnalului care poate fi așteptată la o anumită distanță. După cum s-a menționat anterior, LoRaWAN este una dintre cele mai lungi tehnologii de comunicare, susținând că are o rază de acoperire de până la 50 km în zonele rurale. Această subsecțiune vizează furnizarea unei evaluări teoretice a acoperirii LoRaWAN, utilizând 4 modele de pierdere de cale larg răspândite: Okumura-Hata, Okumura-Hata COST 231 [100], 3GPP UMa [101], și 3GPP 3D-UMA [102].

Pentru evaluarea teoretică a razei de acțiune, am ales parametrii implicați ai dispozitivelor LoRaWAN (8 GWs, 7 MPs, SF7/12, 14 dBm de putere nominală Tx/Rx, 2,15 dBi de câștig al antenei Tx/Rx, antenă dipolară), am identificat limitele comune de aplicabilitate pentru toate cele 4 modele și am calculat dependența RSSI de distanță (a se vedea figura 3.1).

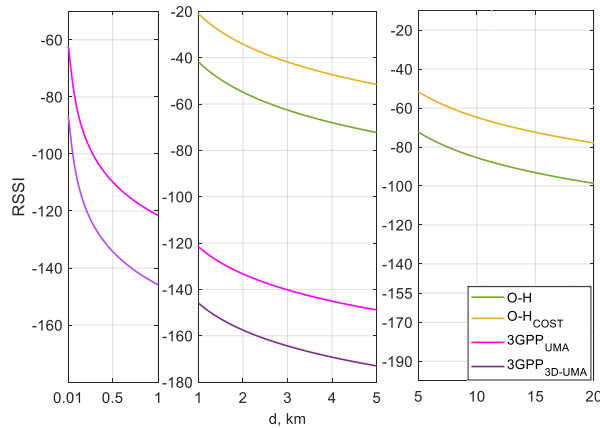


Fig. 3.1 Evaluarea teoretică a razei de acțiune a LoRaWAN ($h_{TX} = 1.5m$, $h_{RX} = 30m$, $SF = 12$)

Graficul arată că, în ciuda dinamicii identice a modelelor studiate de pierdere a traseului pe secțiunea comună (o scădere de 30 dBm între 1 și 5 km), modelele Okumura-Hata evaluează potențialul LoRaWAN ca fiind cu 80-100 dBm mai optimist decât modelele UMa. Astfel, conform cazului Okumura-Hata, ne putem aștepta la o transmisie de recepție până la distanțe de 20 km cu cel mai mic SF7 (sensibilitate RX maximă – 123 dBm) lăsând o anumită marjă. Pe de altă parte, calculele efectuate pe baza modelelor UMa și 3D-UMA susțin că comunicarea va fi posibilă doar pe distanțe de 0,5–1 kilometru

la cel mai mare SF (sensibilitate RX maximă -137 dBm). Astfel, care dintre modele este mai aproape de realitate rămâne o întrebare deschisă și va fi abordată în acest cadru în timpul evaluării practice a acoperirii tehnologiei.

3.3 Evaluarea acoperirii LoRaWAN pe bază de simulare

Pentru a oferi o imagine cuprinzătoare a evaluării acoperirii pentru tehnologia LoRaWAN, această subsecțiune explorează capacitățile unor simulatoare bine cunoscute și prezintă rezultatele simulării cu ajutorul mediului software HTZ Communications, un instrument complex care estimează acoperirea celor mai utilizate tehnologii de comunicații, folosind peste 50 de tehnologii de propagare pentru scenarii de interior și exterior.

Pentru simulări a fost selectată o zonă în aer liber în apropierea clădirilor A și B de la UNSTPB, cu 5 transmițătoare LoRaWAN. RSSI va fi înregistrat la 8 puncte RSSI distribuite în interiorul universității în diferite puncte de la etajele unde vor fi amplasate receptoarele LoRaWAN (GW). Configurația este prezentată în figura 3.2), în timp ce pentru parametrii de simulare am folosit 8 GWs, 7 MPs, SF7/12, 14 dBm de putere nominală Tx/Rx, 2,15 dBi de câștig Tx/Rx al antenei, antenă dipolară, model de propagare Okumura-Hata COST 231. În timpul simulării nu au fost luați în considerare parametri suplimentari, cum ar fi vremea sau ora din zi.

Figura 3.3 prezintă o analiză RSSI la punctele de control - locații în care vor fi instalate gateway-urile pentru experimentele practice - care arată o medie RSSI de ~ -90 dBm pentru SF7 față de ~ -50 dBm pentru SF12.

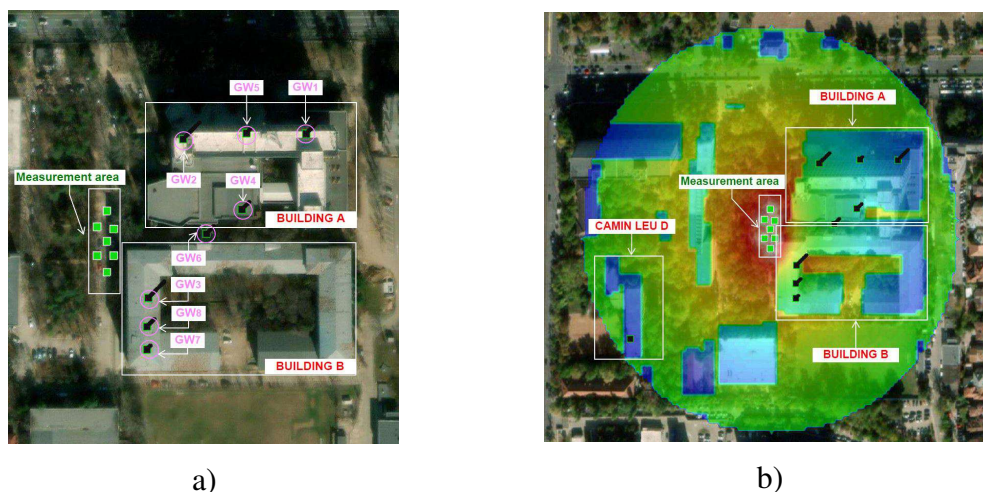


Fig. 3.2 LoRaWAN simulation: a) setup, b) simulation (radius = 150 m)

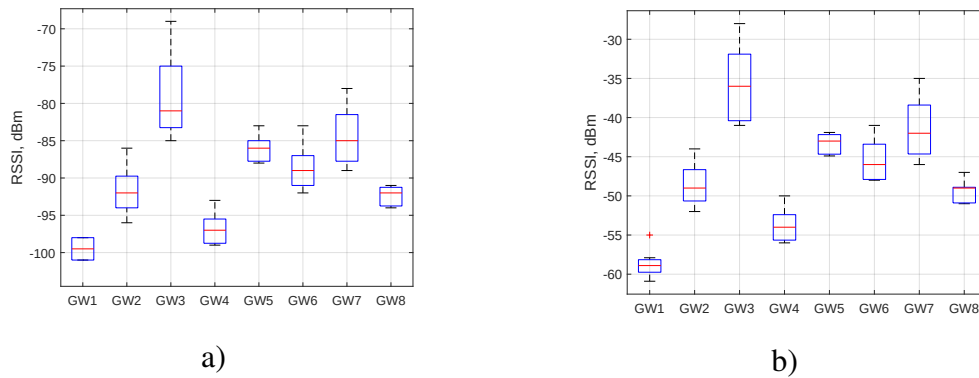


Fig. 3.3 HTZ, Distribution of RSSI: a) SF7 (125 kHz), b) SF12 (125 kHz)

În lipsa posibilității de a compara direct rezultatele simulării la punctele de trecere cu evaluarea teoretică a propagării semnalului utilizând modelele Okumura-Hata, vom utiliza modelele 3GPP UMa pentru comparație. Deoarece simularea prezentată este limitată la 150 m, conform analizei teoretice UMa/3D-UMa (Figura 3.1), ar trebui să ne așteptăm la un semnal la graniță de aproximativ -90/-110 dBm la SF12, respectiv. În același timp, practic, zona verde de la marginea zonei simulate din figura 3.1 corespunde la RSSI $\sim$ -50dBm, adică cu 40/60 dBm mai mare decât în cazul modelelor UMa/3D-UMa, respectiv.

3.4 Concluziile capitolului

Acest capitol deschide discuția celei de-a doua întrebări de cercetare: determinarea parametrilor critici ai LoRaWAN din perspectiva de localizare atunci când se planifică o campanie de măsurători și se procesează rezultatelor acesteia. În primul rând, se dezvoltă alegerea tehnologiei LoRaWAN pentru problema enunțată; apoi se încearcă evaluarea acoperirii rețelei LoRaWAN din punct de vedere teoretic și al simulării:

- Pentru **evaluarea teoretică a acoperirii rețelei**, lucrarea oferă o estimare nuanțată a intensității semnalului pe distanțe diferite, utilizând modele cunoscute de pierdere a traseelor, cum ar fi Okumura-Hata, Okumura-Hata COST 231, 3GPP UMa și 3GPP 3D-UMa. Analiza indică faptul că, deși toate modelele studiate de pierdere a semnalului pe traseu prezintă tendințe similare, modelele Okumura-Hata oferă o evaluare mai optimistă a potențialului LoRaWAN, prezicând comunicații posibile până la 20 km în condiții specifice, în comparație cu modelele UMa, care au o rază de acțiune de 0,5-1 km.
- Pentru **evaluarea acoperirii rețelei pe bază de simulare**, lucrarea utilizează mediul de comunicare HTZ - un instrument complex care permite proiectarea rețelei pe un spectru larg de frecvențe, de la 1 kHz la 1 THz. Configurația de simulare a fost planificată și executată pe o suprafață de 50 000 de metri pătrați, în

București, România, cu intenția de a fi reprodusă ulterior în timpul experimentului practic. A fost selectat modelul Okumura-Hata COST 231, care a dat cele mai optimiste rezultate în analiza teoretică, ținând cont de faptul că modelele 3GPP UMa nu sunt disponibile în prezent în HTZ.

Simularea acoperirii LoRaWAN pentru o zonă vizată cu SF7 și SF12 pe o rază de 150 m a arătat, printr-o hartă colorată, că SF7 are o penetrare limitată în clădiri, iar în unele zone nu prezintă acoperire. Diferența pe scara de culori indică faptul că RSSI pentru SF12 este semnificativ mai mare (30-40 dBm) decât pentru SF7, ceea ce sugerează că un SF mai mare este mai potrivit pentru aplicații de interior.

Din cauza imposibilității de a compara rezultatele simulării cu cele teoretice pentru modelele Okumura-Hata (indisponibile la distanțe mai mici de 1 km), le-am comparat cu modelele teoretice 3GPP UMa. Compararea a evidențiat o discrepanță substanțială în ceea ce privește nivelurile de semnal: analiza teoretică a sugerat -90/-110 dBm, în timp ce rezultatele simulării au indicat -50 dBm. În general, acuratețea modelelor inspectate, în special pentru distanțe scurte și medii urbane, rămâne să fie validată prin evaluări practice.

Chapter 4

Analiza experimentală a localizării bazate pe LoRaWAN

Acest capitol acoperă partea practică a RQ2 și dezvăluie detaliile organizării și desfășurării campaniilor de măsurare, analizează rezultatele, calculează și susține precizia localizării bazate pe LoRaWAN pentru cazuri particulare în cele trei tipuri de medii: interior suprateran (iAG), interior subteran (iUG) și exterior.

4.1 Descrierea campaniei de măsurare

Două campanii de măsurare (MC) comparabile în BUT, Republica Cehă, și în UNSTPB, România (Figura 4.1) au fost înființate pentru a identifica precizia de localizare care poate fi obținută cu ajutorul tehnologiei LoRaWAN. Împreună, campaniile acoperă cele mai comune scenarii industriale, furnizând seturi de date pentru mediile indoor Above-Ground (iAG), indoor Underground (iUG) și outdoor.

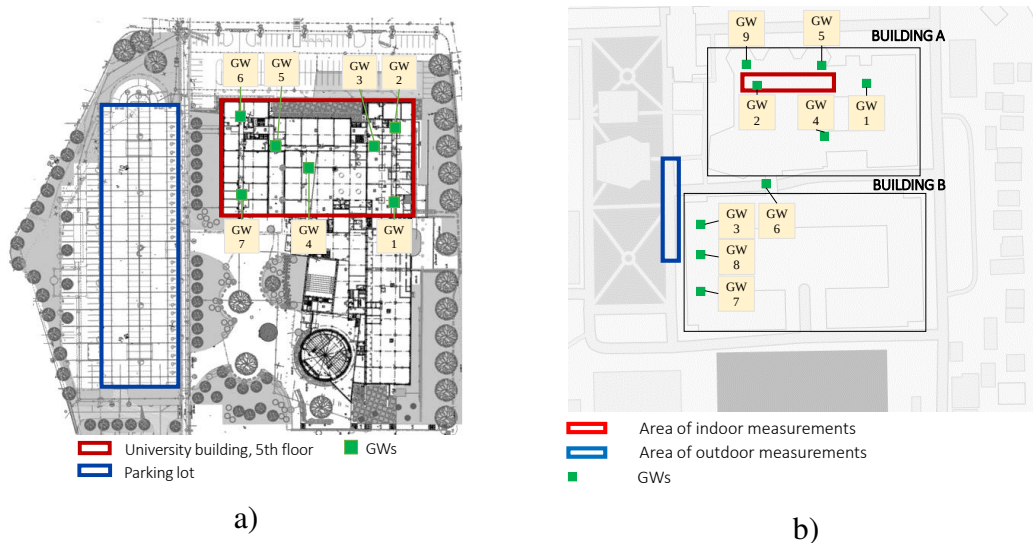


Fig. 4.1 Mediul de măsurare: a) BUT, b) UNSTPB

Primul MC a fost organizat la BUT, Republica Cehă. Acesta ia în considerare două cazuri: iAG colectate la etajul 5 al clădirii Facultății de Inginerie Electrică și Comunicații (FEEC) (dreptunghiular roșu în Figura 4.1 (a)) și iUG colectate în parcare subterană (dreptunghiular albastru în Figura 4.1 (a)) ¹.

Universitatea Politehnică din București (UNSTPB) a fost selectată ca a doua locație. Acest MC analizează un alt caz de interior suprateran, folosind clădirile Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației (ETTI) (clădirile A și B din Figura 4.1 (b)) și un caz de exterior amenajat pe alea din fața clădirilor (dreptunghiularul albastru din Figura 4.1 (b)).

Ambele MC au fost planificate în mod similar, adică au implicat același tip de echipament și aceeași procedură. Ca echipamente am folosit LoRaWAN GW LG308 (9 bucăți), Field Test Device (FTD) [103] (2 bucăți) și echipamente auxiliare, cum ar fi routere (pentru conectarea la internet a LoRaWAN GW) și extensii de cablu. În această lucrare, am colectat cinci seturi de date de amprentare cu acces liber folosind tehnologia LoRaWAN pentru două campanii de măsurare. Toate cazurile și parametrii aferenți sunt enumerate în tabelul ??.

Table 4.1 Scenarii investigate

Locul	Măsurători	Echipament	MPs	Spațiere, m	SFs	GWs	Mediu
BUT	Clădire	Clădire	203	1	7, 9, 10, 12	7	iAG
BUT	Parcare (2 etaje)	Clădire	147	2.5	7,12	7	iUG
BUT	Parcare (2 etaje)	Parcare	147	2.5	7,12	6	iUG
UNSTPB	Clădire	Clădire	155	1	7,12	9	iAG
UNSTPB	Alee	Clădire	155	1	7,12	8	outdoor

Partea următoare a capitolului este dedicată scenariilor prezentate în tabelul ??: se descriu sistemele de coordonate, zona și amplasarea echipamentelor, se analizează natura seturilor de date colectate, se calculează erorile medii de localizare și se discută perspectiva tehnologiei LoRaWAN ca soluție de localizare.

4.2 Campanie indoor supraterană

BUT indoor aboveground (iAG) dataset

Localizare: instalația de măsurare a fost amplasată la etajul 5 al clădirii FEEC cu șapte etaje din BUT (Figura 4.1).. Pereții interiori din beton au o lățime de 150 mm. Figura 4.2 prezintă **mapa de măsurare** elaborată pentru acest scenariu. MP au fost distribuite pe 4

¹Harta este disponibilă online: <https://en.mapy.cz/s/davubejanu>

coridoare: coridoarele similare din stânga și din dreapta ($50 \times 1,8$ m), coridorul central ($36 \times 1,8$ m) și coridorul orizontal ($75 \times 1,8/3,2$ m). De-a lungul pereților fiecărui coridor se află bănci de fier, iar coridorul orizontal are două secțiuni separate cu scări și lifturi.

MC parametri: există 203 MP, separate de o distanță de 1 metru. 3 semnale UL au fost trimise de la fiecare MP utilizând FTD configurat pentru un anumit SF (7, 9, 10 sau 12) către 7 GW disponibile cu numerele de identificare 1-7. GW-urile au fost plasate pe podea. În total, realizarea hărților de semnal pentru 4 SF-uri a durat 4 zile: seturile de date pentru SF7 și SF12 au fost colectate în timpul serii, iar pentru SF9 și SF10 – în timpul dimineții.

Analiză statistică. Figura 4.3 prezintă distribuțiile RSSI și nivelul mediu RSSI pentru SF7 și SF12. La valorile RSSI medii fluctuează în jurul valorii de -86 dBm (SF7: -83,5 dBm; SF9: -86,4 dBm; SF10: -85,7 dBm; SF12: -88,1 dBm).

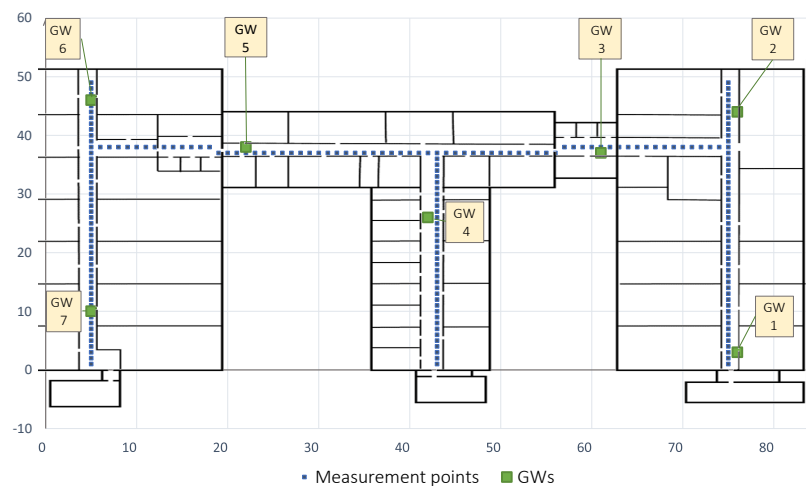


Fig. 4.2 MC în BUT, birou: sistem de coordonate

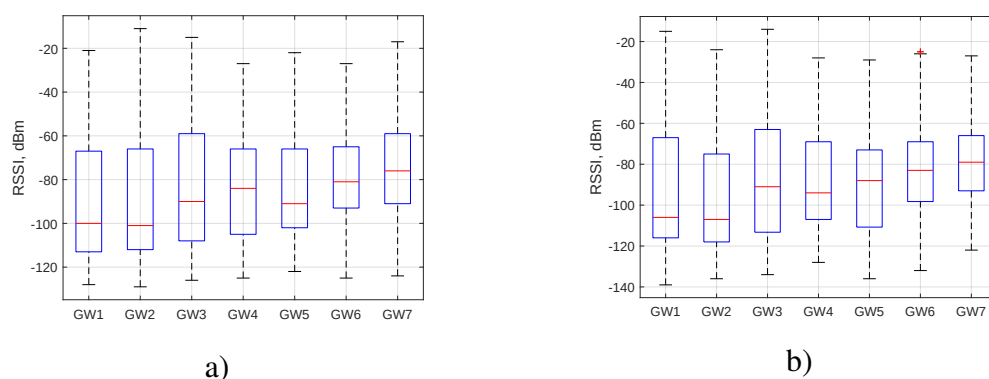


Fig. 4.3 Distribuția RSSI: a) SF7, b) SF12

UNSTPB indoor aboveground (iAG) dataset

Un MC comparabil a fost efectuat în București, România, pentru a avea date mai fiabile pentru analiză și concluzii solide.

Localizare: spațiul deschis a fost amenajată o zonă de măsurare dreptunghiulară (5×31 m) la parterul clădirii A a Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației (Figura 4.1). GW-urile au fost distribuite în clădirile A cu opt etaje și în clădirile B cu patru etaje cu pereți din beton. Harta **mapă de măsurare** este prezentată în Figura 4.4.

Parametrii CM. În acest caz, zona a fost împărțită între 155 de parlamentari. La fel ca în cazul precedent, distanța este egală cu 1 metru și s-au trimis 3 semnale de la fiecare MP. Deoarece analiza cazului anterior nu a arătat o dependență semnificativă a preciziei de localizare de SF, s-a decis să se reducă investigarea SF doar la valorile extreme posibile - 7 și 12. În schimb, pentru a studia mai bine dependența preciziei de GW, numărul acestora a fost mărit de la 7 la 9. Distribuția GW-urilor în zona luată în considerare este prezentată în figura 4.1 și în tabelul 4.2. Această campanie de măsurare a durat 3 zile.

Table 4.2 Distribuția GW-urilor (MC în UNSTPB)

GW	Locație
1	Clădire A, 3rd etaj
2	Clădire A, 3rd etaj
3	Indoor: Clădire A, parter; Outdoor: –
4	Clădire A, parter
5	Clădire A, 1st etaj
6	Pasaj între clădirile A și B, etajul 1
7	Clădire B, parter
8	Clădire B, 3rd etaj
9	Clădire B, 1st etaj



Fig. 4.4 Campanie de măsurare în UNSTPB: mediu indoor

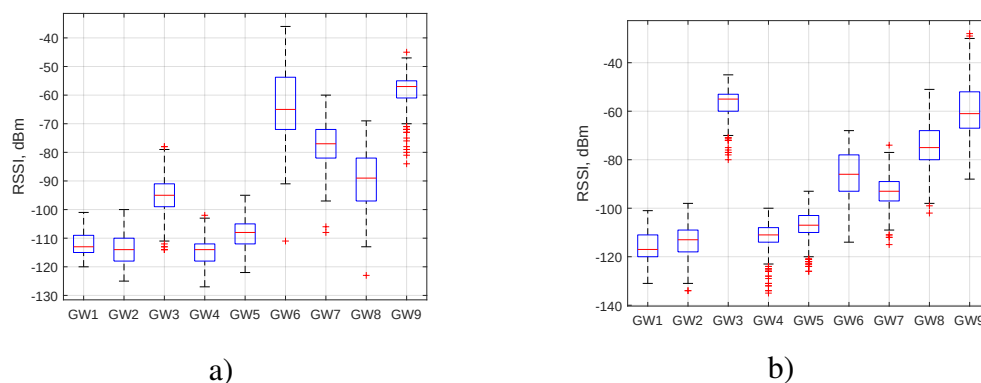


Fig. 4.5 Distribuția RSSI (MC în UNSTPB, indoor): a) SF7, b) SF12

Analiza statistică. Probabilitatea medie de acceptare pentru acest set de date este egală cu 92,6%. Acest rezultat este comparabil cu scenariul anterior din interior (94%): chiar dacă în acest caz aveam de-a face cu un spațiu deschis, spre deosebire de coridoarele din scenariul anterior, GW-urile erau situate mult mai departe).

Figura 4.5 prezintă distribuțiile RSSI și nivelul mediu RSSI pentru fiecare SF. În medie, valorile RSSI fluctuează în jurul valorii de -90 dBm (SF7: -89,8 dBm; SF12: -90,6 dBm), ceea ce este, de asemenea, comparabil cu scenariul anterior (-86 dBm, a se vedea Figura 4.8). În ciuda faptului că cazurile au parametrii inițiali diferiți (a se vedea Tabelul 4.1), acest lucru ne oferă mai multe drepturi pentru a le compara.

4.3 Indoor underground (iUG) campaign

Utilizarea LoRaWAN ca tehnologie de comunicare pentru siturile subterane a fost explorată în mai multe lucrări, cum ar fi [104–106]. Lucrarea publicată în [107] investighează performanța tehnologiei LoRaWAN și a NB-IoT în medii dificile, inclusiv în cele subterane. Cu toate acestea, după cunoștințele autorului, este necesar un studiu care să investigheze posibilitățile tehnologiilor LoRaWAN pentru localizarea în mediul subteran. În timpul cercetării, s-a decis să se acorde atenție acestui fapt și să se utilizeze două niveluri de parcare subterană în apropiere de BUT, Republica Cehă, ca un analog aproximativ al mediului subteran utilizat în industria minieră.

În cadrul lucrării, am folosit aceeași zonă de măsurare de două ori pentru configurații diferite: în primul caz, GW-urile au fost distribuite la fel ca în cazul BUT indoor - la etajul 5 al clădirii de birouri (a se vedea figura 4.2), în cel de-al doilea caz GW-urile au fost plasate local - la etajul inferior al parării. Compararea acestor două cazuri ne permite să analizăm modul în care probabilitatea de acceptare a semnalului și precizia localizării depinde de distanța dintre GW-uri și zona de măsurare.

Localizare. 30 cm lățime pereții parării sunt din beton. În parcare care ne interesează există două niveluri, situate unul sub celălalt și înalte de 2,8 metri fiecare.

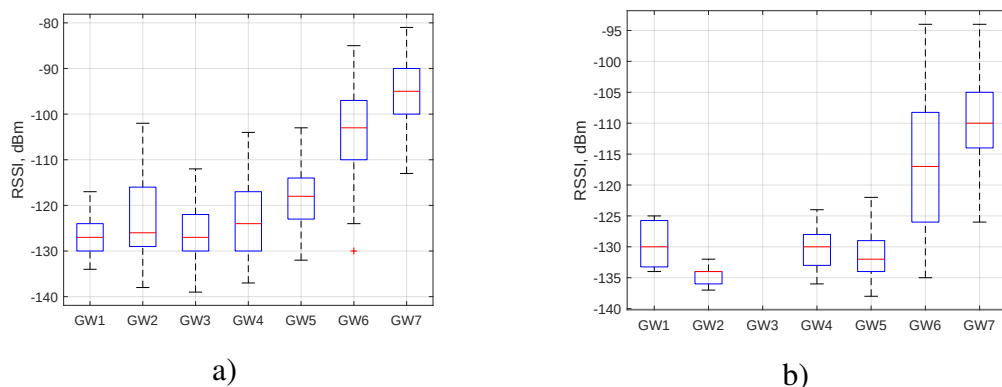


Fig. 4.6 Distribuția RSSI (MC în BUT, interior, GW-uri în clădire): a) etaj superior etaj (2), b) etaj inferior (3)

În timpul măsurătorilor, etajele de sus și de jos au fost umplute în proporție de 74 și, respectiv, 10

Indoor underground dataset: GW instalate în clădire

Parametrii MC. Așa cum s-a menționat, configurația este aceeași ca în scenariul BUT iAG. FTD-ul a fost configurat pentru două SF-uri: 7 și 12. **mapa de măsurare** pentru acest scenariu a fost descrisă parțial în lucrarea noastră [108]: constă din 49 de MP plasate în linie cu o distanță de 1 m (a se vedea figura 4.7).

Analiza statistică.. Diferența de 1 etaj a dus la o diferență de 30% în ceea ce privește probabilitatea de acceptare a semnalului (58,9% și 28,8% în medie pentru etajele subterane superioare și, respectiv, inferioare). În plus, în acest experiment, datorită mediului subteran specific greu penetrabil, putem observa mai clar diferența dintre SF 7 și 12: în acest din urmă caz, probabilitatea de acceptare în medie mai mare cu 10-15%. Distribuția RSSI pentru acest caz este prezentată în figurile 4.6 (pentru SF12).

Indoor underground (iUG) dataset: GW instalate la nivel local

MC parametrii. Următorul experiment a utilizat aceeași zonă de măsurare, dar GW a fost amplasat direct în parcare, la ultimul etaj. S-a folosit aceeași hartă de măsurare **mapă de măsurare** ca în cazul precedent: aceasta are 49 de MP amplasate la 1 m unul de celălalt. Configurația subterană a fost considerabil mai greu de organizat din cauza specificului infrastructurii. Prin urmare, acest caz a implicat doar 6 GW din cele 7 disponibile (a se vedea figura 4.7).

Analiza statistică. Probabilitatea de a recepționa un semnal, în acest caz, este mai comparabilă cu scenariile de interior și este egală cu 95,2% și 90,1% pentru etajele superioare și, respectiv, inferioare.

Figura 4.8 prezintă distribuțiile RSSI pentru ambele etaje, superior (SF7: -78,8 dBm; SF12: -79,2 dBm) și inferior (SF7: -67,7 dBm; SF12: -66,9 dBm). După cum se anticipa,

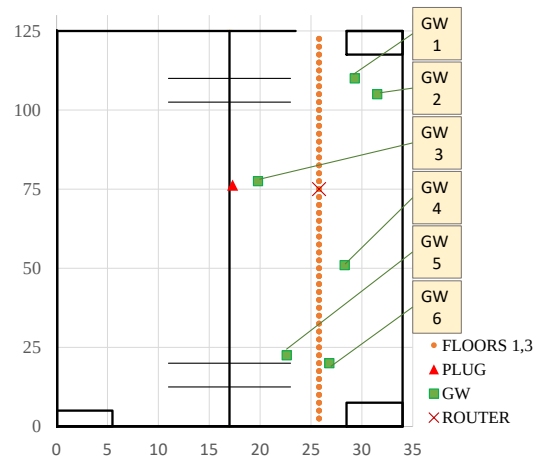


Fig. 4.7 Sistem de coordonate pentru MC în BUT, parcare

diferența dintre nivelurile medii RSSI obținute cu ajutorul SF7 și SF12 devine mai puțin evidentă la distanțe mai mici: mai puțin de 1 dBm în acest exemplu față de 3-4 dBm – în cel anterior descris în subsecțiunea 4.3 (a se vedea figura 4.6).

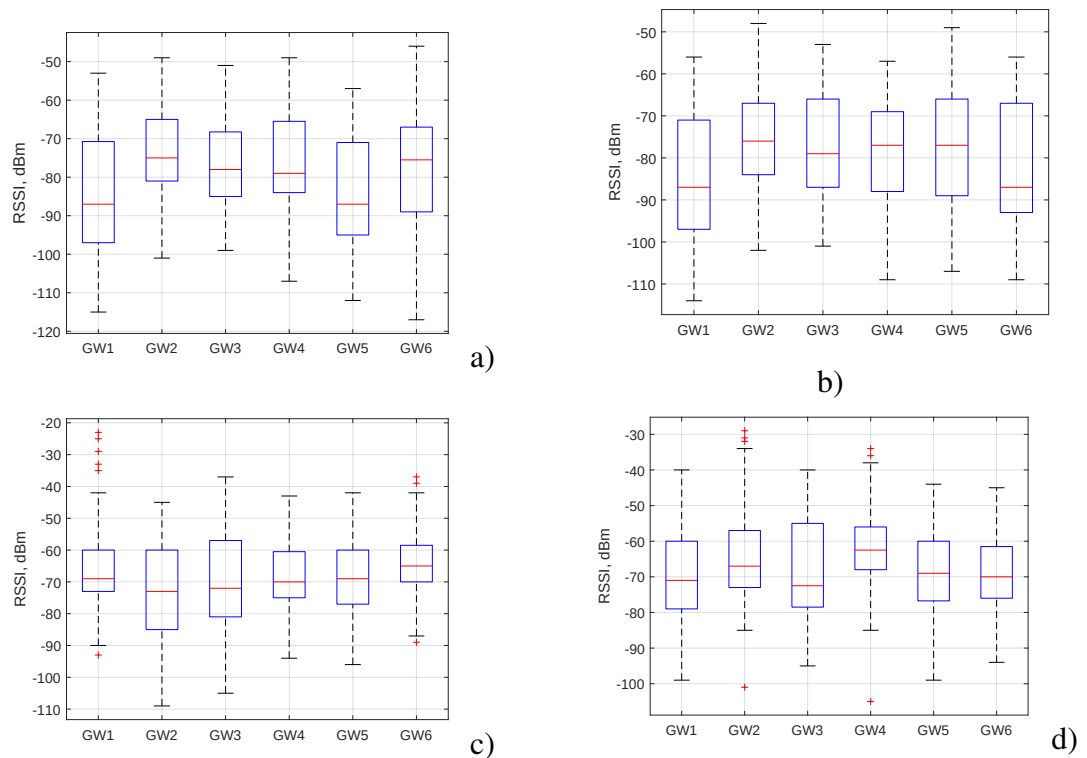


Fig. 4.8 Distribuția RSSI (MC în BUT, interior): a) SF7, etajul superior (2), b) SF12, etajul superior (2), c) SF7, etajul inferior (3), d) SF12, etajul inferior (3)

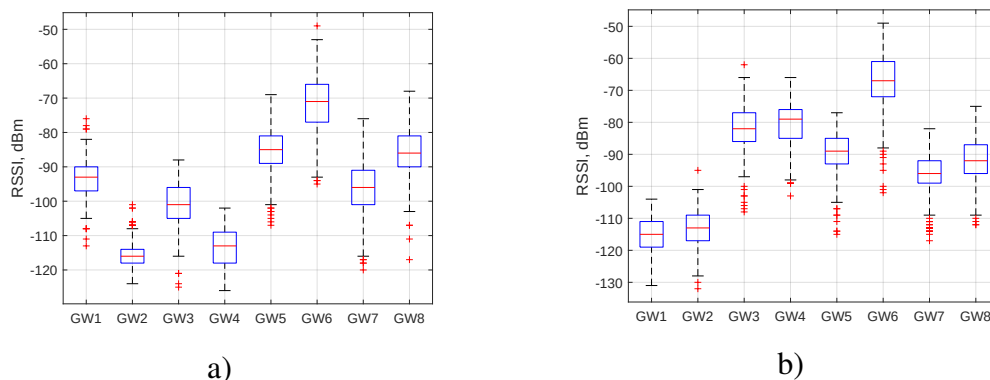


Fig. 4.9 Distribuția RSSI (MC în UNSTPB, outdoor): a) SF7, b) SF12

4.4 Outdoor campaign

Localizare. În lucrarea noastră, avem în vedere doar un singur scenariu care implică un mediu exterior - zona de spațiu deschis din fața departamentului ETTI al UNSTPB. **mapa de măsurare** este aceeași ca și în cazul măsurătorilor în interior la suprafață în BUT (a se vedea subsecțiunea 4.2): 5 rânduri de 31 de MP fiecare, cu o distanță de 1 m între ele (figura 4.4). Singura excepție este amplasarea GW5, care a fost mutată într-o clădire mai îndepărtată, în spatele unui mic parc și a unei alte clădiri. Procesul de măsurare în sine a durat 2 zile.

Analiză statistică. Probabilitatea medie de acceptare pentru acest set de date este egală cu 91%, ceea ce este puțin mai puțin (cu 1,6%) decât pentru aproape aceeași configurație în scenariul iAG UNSTPB. Un astfel de rezultat confirmă așteptările: configurația echipamentelor este aproape aceeași, iar zonele sunt situate la aproximativ 50 m una de cealaltă.

Întorcându-ne la comparația cu cazul de interior, trebuie remarcat faptul că forma distribuției RSSI pare a fi mai normalizată decât în cazul de interior, în ciuda faptului că nivelul RSSI mediu este aproape același (SF7: -92,6 dBm; SF12: -90,5 dBm) (a se vedea figura 4.9).).

4.5 Rezultate numerice selectate

Pentru seturile de date colectate descrise în subsecțiunile 4.2-4.4, am calculat eroarea de localizare folosind Root Mean Square Error (RMSE).

Cele mai valoroase rezultate au fost combinate în figura 4.10, care prezintă estimarea preciziei localizării LoRaWAN pentru toate scenariile investigate. După cum se poate observa, trilaterarea și WCA oferă o precizie foarte scăzută, în limitele a câteva zeci de metri, ceea ce face ca aceste metode să fie inutile în scopul localizării. Nivelurile de trilaterare și WCA sunt prezentate doar pentru primul set de date pentru a evita supraîncărcarea graficului. În același timp, k -NN/ k -NN-W oferă rezultate mult mai bune

și, în general, relativ optimiste pentru majoritatea scenariilor, în special pentru ambele scenarii de interior supraterrane (ds1 și ds6), înregistrând o precizie de 2-3 metri - de 10 ori mai mică decât cea oferită de trilaterare. Figura ?? integrează cele mai reușite, din punct de vedere al unei erori de localizare minime, combinații ale parametrilor (algoritm (k -NN/ k -NN-W), strategie de reducere a redundanței (maxim/mijlocuire)) pentru toate cazurile.

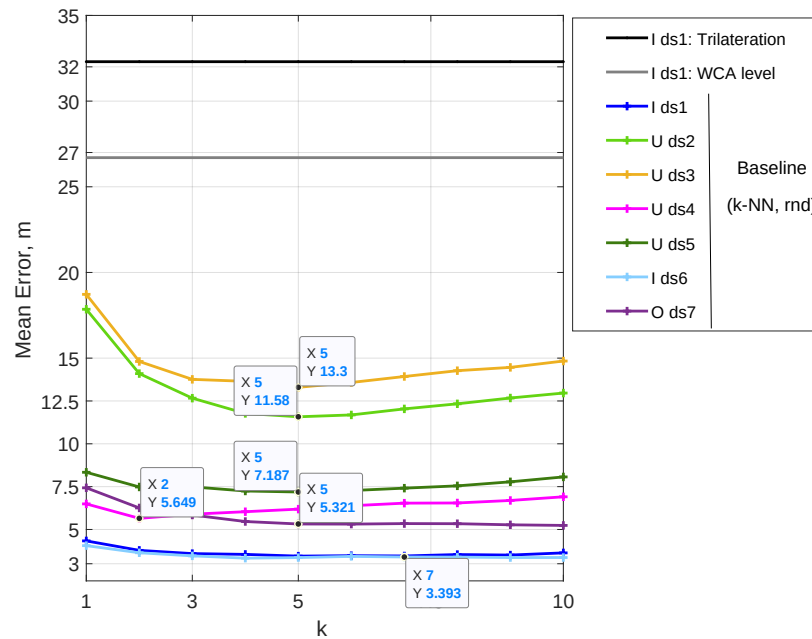


Fig. 4.10 Precizia localizării pentru linia de bază (k -NN convențional fără preprocesare)

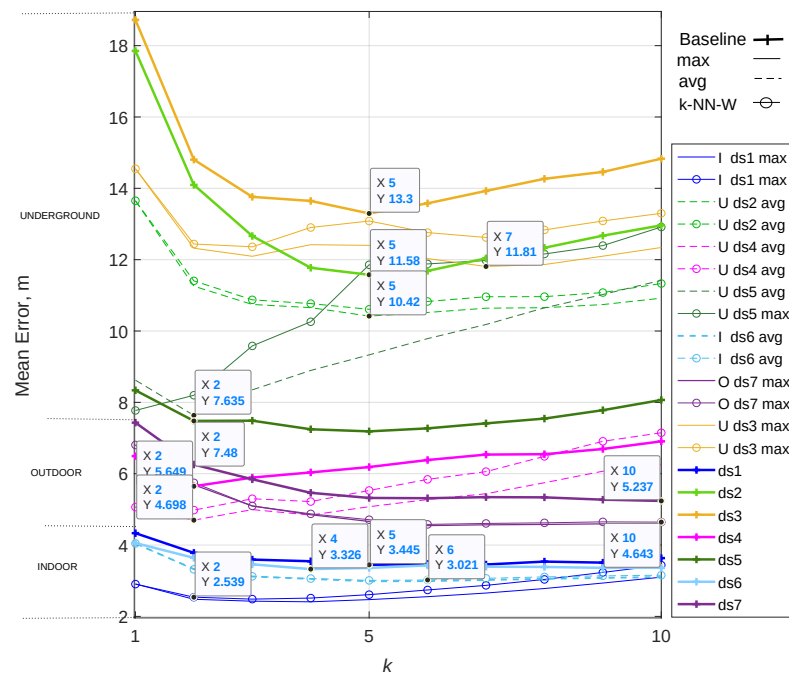


Fig. 4.11 Precizia localizării pentru comparație k -NN-W și k -NN

Rezumatul rezultatelor prezentate în tabelul ?? arată o precizie medie de 2,7 m pentru mediul interior și de 4,56 – pentru mediul exterior.

Table 4.3 Erorile medii minime de localizare pentru scenariile investigate (strategia de reducere a redundanței prin calcularea mediei)

Place	Măsurători	Echipament	Spațiere, m	GWs	Med.	ds ^N	Eroare medie minimă, m	Metoda
BUT	Clădire	Clădire	1	7	iAG	ds1	2.54	<i>k</i> -NN/ <i>k</i> -NN-W
BUT	Parcare	Clădire	~ 3	7	iUG	ds2; ds3	10.42 (fl. 2); 11.81 (fl. 3)	<i>k</i> -NN
BUT	Parcare	Parcare	2.5	6	iUG	ds4; ds5	4.70 (fl. 2); 7.63 (fl. 3)	<i>k</i> -NN
UNSTPB	Clădire	Building	1	9	iAG	ds6	3.02	<i>k</i> -NN/ <i>k</i> -NN-W
UNSTPB	Aleea	Clădire	1	8	outdoor	ds7	4.64	<i>k</i> -NN/ <i>k</i> -NN-W

4.6 Concluziile capitolului

Rezumând acest capitol și combinându-l cu concluziile făcute anterior în [109], putem desprinde următoarele puncte cheie:

- **Abordare de localizare.** Trilaterarea și WCA s-au dovedit a fi nepotrivite, oferind o eroare de 27-32 m, în timp ce *k*-NN și *k*-NN-W pot reduce acest număr de până la 10 ori, în funcție de setul de date. Comparând *k*-NN cu *k*-NN-W, se poate observa că, în medie, o opțiune de bază a depășit ușor performanța unei opțiuni extinse.
- **Reducerea redundanței.** Linia de bază *k*-NN, adică *k*-NN cu selectarea aleatorie a unei amprente, este depășită în mod evident de calcularea mediei și selectarea amprenteii cu RSSI maxim. La rândul său, strategia de maximizare a fost depășită marginal de medierea unei amprente.
- **Mediu.** Dintre toate opțiunile studiate, cea mai mare acuratețe este observată pentru setul de date de interior, urmat de seturile de date de exterior și subterane.
- **Model de propagare.** Compararea practicii cu teoria și simularea efectuate în capitolul 3 nu a oferit un răspuns clar cu privire la care dintre cele patru modele studiate se potrivește cel mai bine. Din perspectiva dinamicii schimbării nivelului semnalului de la un GW la altul, modelul Okumura-Hata pare a fi destul de precis, dar supraestimează nivelul general al RSSI. Pe de altă parte, modelul UMA corespunde așteptărilor generale privind nivelul RSSI.

Pentru a ajunge la o concluzie mai coerentă cu privire la posibilitatea de a utiliza LoRaWAN în scopuri de localizare folosind RSSI, ar trebui realizat un studiu mai detaliat legat de etapa de procesare, și anume, de abordările de localizare. Această problemă și, concomitent, cea de-a treia întrebare de cercetare a acestei lucrări este abordată în capitolul următor.

Chapter 5

Îmbunătățirea preciziei de localizare LoRaWAN

Discuția privind perspectivele localizării bazate pe LoRaWAN RSSI pentru utilizarea în sectorul industrial al dispozitivelor portabile continuă în acest capitol: Acesta se concentrează asupra celei de-a 3-a întrebări de cercetare, explorând faza de procesare (adică compararea mai multor abordări de localizare) și prezentând 2 modificări ale abordării k -NN menite să îmbunătățească precizia.

5.1 Propunere de algoritm de acuratețe îmbunătățită

Modificarea 1: Reevaluarea de la origine

Prima strategie de modificare propune reevaluarea relevanței celor mai apropiați vecini aleși pe baza distanței euclidiene dintre aceștia și punctele de origine. Ca punct de origine, se poate alege unul dintre colțurile perimetrului zonei de măsurare. Ideea care stă la baza acestei strategii este că grupul celor mai apropiați vecini ar trebui să fie mai mult sau mai puțin în aceeași zonă. Astfel, propunerea este de a estima distanțele euclidiene de la origine la fiecare vecin, de a identifica o zonă de localizare aproximativă pe baza valorii medii a distanței și de a neglija punctele periferice, adică acele puncte vecine din afara acestei zone.

Dezavantajul evident al acestei strategii este că distanța față de origine nu definește o valoare specifică, ci trasează un cerc, fiecare punct al acestuia reprezentând o valoare posibilă. Am introdus cel de-al doilea punct de origine pentru a reduce aria de localizare și, în consecință, pentru a diminua probabilitatea de a alege un vecin nerelevant.

Un alt punct care ar trebui discutat este minimul k , pentru care această strategie ar putea fi utilă: evident, pentru un grup mic de vecini, propunerea nu va funcționa, deoarece ia media statistică ca bază de evaluare. În această lucrare, k_{min} va fi determinat empiric: urmând același scenariu ca în capitolul 4, vom calcula eroarea medie de localizare pentru $k = [1, 10]$ și vom compara rezultatele cu k -NN original.

Rezumând informațiile de mai sus, să formalizăm algoritmul:

1. Calculul lui k-NN (-W).
2. Calcularea distanțelor euclidiene între fiecare dintre cei k vecini și punctele de origine:

$$dist_{o1,2k} = \sqrt{(x_{o1,2} - x_k)^2 + (y_{o1,2} - y_k)^2}, \quad (5.1)$$

unde (x_o, y_o) sunt coordonatele punctului de origine și (x_k, y_k) - coordonatele celui de-al k -lea cel mai apropiat vecin.

3. Calcularea valorilor medii $\bar{dist}_{o1k}$ și $\bar{dist}_{o2k}$:

$$\bar{dist}_{o1,2k} = \frac{\sum^k dist_{o1,2k}}{k}, \quad (5.2)$$

4. Setarea frontierelor pentru a limita zona de localizare: $\bar{dist}_{ok} \pm \Delta$, unde Δ este o toleranță. În această lucrare $\Delta = 30$ (modificarea 1) și 50% (modificarea 1.1), unde σ este o abatere standard.
5. Identificarea vecinilor care nu se află în zona de localizare. În cazul în care nu a fost găsit nici un vecin, algoritmul iese. Rezultatul algoritmului este ultima evaluare a poziției.
6. Eliminarea schițelor.
7. Actualizarea poziției: calcularea coordonatelor medii ale vecinilor rămași.

Modificare 2: Reevaluare de la valoarea estimată

A doua modificare este similară cu prima. Cu toate acestea, calculul distanței euclidiene se efectuează de la fiecare vecin nu până la punctul de origine, ci până la valoarea preliminară estimată dată de k -NN. Zona de localizare, în acest caz, va fi determinată de o singură frontieră și se va întinde între 0 și valoarea medie a distanțelor euclidiene plus indemnizația.

Atunci, algoritmul general este următorul :

1. Calculul lui k-NN (-W).
2. Calcularea distanțelor euclidiene între fiecare vecin k și punctul de origine:

$$dist_{ek} = \sqrt{(\hat{x} - x_k)^2 + (\hat{y} - y_k)^2}, \quad (5.3)$$

unde $(\hat{x}, \hat{y})$ sunt coordonatele valorii estimate prin abordarea k -NN și (x_k, y_k) - coordonatele celui mai apropiat vecin k_{th} .

Table 5.1 Avantajele relative ale strategiilor propuse fără preprocesare față de linia de bază

Strategie	ds1	ds2	ds3	ds4	ds5	ds6	ds7	$\bar{x}$
1	+1.0%	-	-	-	-	+2.0%	+9.0%	+4.0%
1.1	+3.2%	-	-	-	-	+0.8%	+10.5%	+4.8%
2	+4.4%	-	-	-	-	+4.1%	+9.5%	+6.0%
2.1	+1.2%	-	-	-	-	+1.6%	+2.9%	+1.9%

3. Calcularea valorii medii $\bar{dist}_{ek}$.
4. Setarea frontierei pentru a limita zona de localizare: $[0, \bar{dist}_{ek} + \Delta_2]$, unde Δ_2 este o toleranță. În această lucrare, $\Delta_2 = 5\%$.
5. Identificarea vecinilor care nu se află în zona de localizare.
6. Eliminarea de outlineri dacă numărul lor, n , îndeplinește condiția: $n \in [0, k/2]$. În caz contrar, algoritmul iese. Rezultatul algoritmului este ultima evaluare a poziției.
7. Actualizarea poziției: calcularea coordonatelor medii ale vecinilor rămași.

Pentru cea de-a doua modificare, această lucrare investighează ambele opțiuni: cu k instabil (modificarea 2, când numărul de vecini eliminați n este suplimentat de următorii vecini din matricea de distanțe d) și k stabil (modificarea 2.1)..

5.2 Rezultate numerice selectate

În primul rând, strategiile propuse au fost testate față de linia de bază - cu alte cuvinte, față de un k-NN de bază cu o alegere aleatorie a uneia dintre cele trei amprente digitale luate pentru o locație. Între timp, strategiile în sine au fost, de asemenea, utilizate fără preprocesare, ceea ce înseamnă că datele au fost selectate, de asemenea, prin alegere aleatorie. Rezultatele testării strategiilor fără preprocesare față de linia de bază sunt enumerate în tabelul 5.1. După cum se vede, câștigul mediu de precizie atinge un maxim de 6% pentru strategia 2. Restul versiunilor s-au dovedit a fi mai puțin reușite: 4,8%, 4% și 1,9% din creșterea medie a acurateții pentru strategiile 1, 1.1 și, respectiv, 2.1.

Pentru a estima câștigul general al modificărilor propuse în această lucrare, este necesar să se compare strategiile cu linia de bază care utilizează preprocesarea, adică reducerea redundanței prin calcularea mediei, care s-a dovedit a fi cea mai eficientă (a se vedea capitolul 4). Rezultatele pentru această rundă de calcule rezumate în tabelul 5.2 arată că strategia 2 rămâne cea mai reușită, cu ajutorul căreia a fost posibilă obținerea unei îmbunătățiri a calității localizării cu 17,2% în medie pentru toate seturile de date, în timp ce pentru seturile de date 1 și 5 acest număr depășește 25%. Dintre seturile de date,

îmbunătățirea acurateței depășește 13% pentru toate seturile de date, cu excepția ds2 și ds3 - două seturi de date subterane cu plasare nelocală a GW-urilor.

Table 5.2 Avantajele relative ale strategiilor propuse cu preprocesare față de linia de bază

Strategy	ds1	ds2	ds3	ds4	ds5	ds6	ds7	$\bar{x}$
1	+25.2%	+7.3%	+6.0%	+19.0%	+23.5%	+15.1%	+21.6%	+16.8%
1.1	+25.2%	+7.3%	+5.7%	+19.0%	+24.2%	+12.2%	+21.5%	+16.4%
2	+25.9%	+7.3%	+10.3%	+19.0%	+25.6%	+13.4%	+19.1%	+17.2%
2.1	+15.9%	+4.2%	+5.3%	+19.0%	+25.6%	+13.4%	+21.6%	+15.0%
$\bar{y}$	+23.1%	+6.5%	+6.8%	+19.0%	+24.7%	+13.5%	+21.0%	-

Analizând graficele obținute, se poate concluziona că, prin utilizarea unei tehnici simple de reducere a redundanței în combinație cu algoritmi propuși, este posibilă creșterea notabilă a acurateței localizării LoRaWAN (până la 17,2 % în medie).

5.3 Concluziile capitolului

Acest capitol s-a concentrat pe investigarea **RQ3**, mai exact, pe modul în care este posibil, din punct de vedere algoritmic, să se mărească acuratețea localizării bazate pe LoRaWAN. Din acest capitol și din cercetările noastre conexe pot fi trase următoarele concluzii:

- Dintre strategiile propuse **strategii de creștere a gradului de acuratețe**, și anume, reevaluarea de la origine (strategiile 1 ($\Delta = 30\%$) și 1.1 ($\Delta = 50\%$)) și reevaluarea de la valoarea estimată (strategiile 2 (k nestabil) și 2.1 (k stabil)), cea de-a doua strategie care ia în considerare $k/3$ cu k schimbător s-a dovedit a fi cea mai reușită: utilizând preprocesarea, aceasta asigură o creștere medie a preciziei de 17,2%.
- Dintre **seturile de date**, cea mai mare reducere a erorilor este observată pentru ds1 (interior), ds7 (exterior), ds4 și ds5 (subteran), în timp ce pentru restul, acest număr este mai mare de 6%.

În ciuda tehnicilor de îmbunătățire a preciziei propuse în acest capitol, localizarea bazată pe LoRaWAN nu poate concura cu tehnologiile de vârf. Cu toate acestea, tehnologia ar putea fi încă aplicabilă în anumite scenarii. Mai exact, ar putea fi utilă în sectoare precum logistica, agricultura sau fabricile inteligente, unde LoRaWAN este deja utilizat ca metodă de comunicare și unde precizia ridicată a localizării nu este esențială.

Chapter 6

Concluziile tezei

6.1 Concluzii și contribuții ale cercetării

Pentru această lucrare au fost stabilite trei întrebări de cercetare, prin prisma cărora aș dori să sintetizez pe scurt rezultatele și contribuțiile obținute.

RQ1: Investigarea parametrilor și funcțiilor dispozitivelor portabile care ajută întreprinderile în îmbunătățirea nivelului de siguranță la locul de muncă.

Începând cu o explorare a domeniului dispozitivelor portabile industriale prin intermediul unui SLR [5], această lucrare a efectuat o examinare aprofundată a parametrilor și funcțiilor dispozitivelor portabile care au ca scop sprijinirea întreprinderilor în îmbunătățirea siguranței la locul de muncă. Ca urmare, cercetarea a sintetizat două clasificări: una pe funcțiile prezentate în tabelul 2.1 și alta pe metricile demonstrate în tabelele 2.2 și, respectiv, 2.3.

RQ2: Determinarea parametrilor critici ai LoRaWAN din perspectiva localizării la planificarea unei campanii de măsurători și prelucrarea rezultatelor acestora.

Două capitole au abordat această problemă și a fost realizată o investigație cuprinzătoare din perspectivă practică. S-a decis să se organizeze mai multe campanii de măsurători folosind diferite medii (interior, exterior, subteran). În rezumat, au fost recapitulate rezultatele calitative și cantitative obținute pe parcursul cercetării cu privire la parametrii investigați, care afectează acuratețea localizării bazate pe LoRaWAN. Din punctul de vedere al campaniei de măsurare:

- **Mediu:** Dintre toate cazurile studiate, cea mai mare precizie se observă pentru mediul interior (~ 3 m), urmat de cel exterior ($\sim 4\text{--}5$ m) și subteran ($\sim 6\text{--}12$ m).
- **Factorul de răspândire:** Lucrarea concluzionează că utilizarea unor factori de împrăștiere mai mari asigură o precizie sporită a localizării prin furnizarea unui semnal mai stabil și mai fiabil.

Din punctul de vedere al prelucrării datelor:

- **Strategia de reducere a redundanței:** S-a dovedit că alegerea strategiei influențează semnificativ precizia localizării: selecția aleatorie a amprentelor este mult mai puțin eficientă (în medie cu 12%) decât celelalte două, între care metoda de calcul al mediei depășește ușor strategia de selectare a amprentei RSSI maxime.
- **Abordare de localizare:** Metodele care depind de poziția GW-urilor, și anume Trilateration și WCA, au fost considerate inadecvate, având ca rezultat erori între 27-32 m. Cu toate acestea, s-a dovedit că aplicarea algoritmilor ML poate reduce semnificativ aceste cifre. O analiză comparativă a arătat că metoda k -NN de bază asigură o precizie mai mare.

Cercetarea acestei întrebări a avut ca rezultat mai multe contribuții. În primul rând, există seturi de date LoRaWAN deschise colectate pentru diferite medii. De aceste seturi de date ar putea beneficia o gamă largă de părți interesate, de la cercetătorii care explorează tehnologia până la liderii din industrie care optimizează implementările de rețele. Alte contribuții mai puțin semnificative, dar totuși valoroase, sunt erorile medii de precizie declarate pentru localizarea bazată pe LoRaWAN pentru diferite medii.

RQ3: Evaluarea potențialului de îmbunătățire a preciziei localizării bazate pe LoRaWAN prin optimizarea algoritmului de localizare.

În cadrul ultimei întrebări de cercetare, am luat în considerare rezultatele comparației abordărilor de localizare, care au evidențiat k -NN ca fiind cea mai eficientă, și am propus două modificări, bazate pe această metodă, care vizează excluderea cu mai mult succes a valorilor aberante din numărul de vecini la estimarea poziției. Prima strategie utilizează reevaluarea de la origine (strategiile 1 ($\Delta = 30\%$) și 1.1 ($\Delta = 50\%$)), în timp ce cea de-a doua – reevaluarea de la valoarea estimată (strategiile 2 (variabilă k) și 2.1 (constantă k)). Comparându-le, s-a constatat că cea din urmă abordare de utilizare a $k/3$ cu o variabilă k a fost cea mai eficientă. Această strategie, atunci când este combinată cu preprocesarea (strategia de reducere a redundanței prin calcularea mediei), a asigurat o îmbunătățire medie a acurateței de 17,2% în comparație cu versiunea de bază k -NN și a ajuns până la 92,2% și, respectiv, 90,7% în comparație cu trilaterarea și WCA. Deși algoritmi propuși sunt testați doar pe seturile de date LoRaWAN, aceștia ar putea contribui la orice alt caz de utilizare care utilizează abordarea k -NN.

Astfel, cu cele mai mari precizii înregistrate de $\sim 2,6$ m în interior și ~ 4 m în exterior, această lucrare presupune că localizarea bazată pe LoRaWAN este fezabilă pentru ambele medii în condiții specifice [109]. Deși tehnicile de îmbunătățire a preciziei dezvoltate în cadrul acestei cercetări nu permit localizarea bazată pe LoRaWAN să se compare cu tehnologiile de precizie de vârf, ideea rămâne viabilă pentru scenarii specifice. În special, aceasta pare promițătoare în sectoare precum logistica, agricultura sau fabricile inteligente, în care LoRaWAN este deja utilizat pentru comunicații și în care precizia extremă a localizării nu este crucială.

6.2 Lista publicațiilor originale

1. **Conference:** Svertoka, E., Rusu-Casandra, A. and Marghescu, I., 2020. "State-of-the-Art of Industrial Wearables: A Systematic Review". In Proc. of 13th International Conference on Communications (COMM) (pp. 411-415). IEEE (WOS:000612723900073).
2. **Journal:** Svertoka, E., Bălănescu, M., Suciu, G., Pasat, A. and Drosu, A., 2020. "Decision Support Algorithm Based on the Concentrations of Air Pollutants Visualization". Sensors, 20(20), p.5931 (Q2, JIF: 3.9, WOS:000585663900001).
3. **Journal:** Ometov, A., et al., 2021. "A Survey on Wearable Technology: History, State-of-the-Art and Current Challenges". Computer Networks, 193, p.108074 (Q1, JIF: 5.6, WOS:000774738600002).
4. **Journal:** Svertoka, E., Saafi, S., Rusu-Casandra, A., Burget, R., Marghescu, I., Hosek, J. and Ometov, A., 2021. "Wearables for Industrial Work Safety: A sSurvey". Sensors, 21(11), p.3844 (Q2, JIF: 3.9, WOS:000660663600001).
5. **Journal:** Masek, P., Stusek, M., Svertoka, et al., 2021. "Measurements of LoRaWAN Technology in Urban Scenarios: A Data Descriptor". Data, 6(6), p.62 (JIF: 2.6, WOS:000665561400001).
6. **Conference:** Svertoka, E., Marghescu, I., Rusu-Casandra, A., Burget, R., Hosek, J., Masek, P. and Ometov, A., 2022. "Evaluation of Real-Life LoRaWAN Localization: Accuracy Dependencies Analysis Based on Uutdoor Measurement Datasets". In Proc. of 14th International Conference on Communications (COMM) (pp. 1-7). IEEE.
7. **Journal:** Svertoka, E., Rusu-Casandra, A., Burget, R., Marghescu, I., Hosek, J. and Ometov, A., 2022. "LoRaWAN: Lost for localization?". IEEE Sensors Journal, 22(23), pp.23307-23319 (Q2, JIF: 4.3, WOS:000893571900102).

6.3 Perspective pentru dezvoltări ulterioare

Revenind la lucrarea efectuată, aceasta a deschis multe direcții care ar putea fi subiect de interes pentru lucrările viitoare. Printre aceste direcții, este posibil să evidențiem rafinarea parametrilor de simulare pentru a lua în considerare mediul interior în mediul HTZ Communication și testarea altor modele de propagare pentru a găsi cel care reflectă cel mai exact realitatea. De asemenea, ar fi interesant să investigăm alte seturi de date subterane pentru a confirma ipoteza despre inaplicabilitatea tehnologiei în spațiile de lucru subterane. Cu toate acestea, consider că munca mea de cercetare a aplicabilității LoRaWAN pentru scopuri de localizare este completă.

References

- [1] International Labor Organization, “World Statistics.” Available online: https://www.ilo.org/moscow/areas-of-work/occupational-safety-and-health/WCMS_249278/lang--en/index.htm (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [2] S. Ketu and P. K. Mishra, “Internet of healthcare things: A contemporary survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 192, p. 103179, 2021.
- [3] IoT Business News, “State of IoT 2022.” Available online: <https://iotbusinessnews.com/2022/05/19/70343-state-of-iot-2022-number-of-connected-iot-devices-growing-18-to-14-4-billion-globally/#:~:text=supply> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [4] A. Ometov, S. V. Bezzateev, J. Kannisto, J. Harju, S. Andreev, and Y. Koucheryavy, “Facilitating the Delegation of Use for Private Devices in the Era of the Internet of Wearable Things,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 843–854, 2016.
- [5] E. Svertoka, S. Saafi, A. Rusu-Casandra, R. Burget, I. Marghescu, J. Hosek, and A. Ometov, “Wearables for industrial work safety: A survey,” *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3844, 2021.
- [6] A. Hinze, J. Bowen, and J. L. König, “Wearable technology for hazardous remote environments: Smart shirt and rugged iot network for forestry worker health,” *Smart Health*, vol. 23, p. 100225, 2022.
- [7] J. Khakurel, H. Melkas, and J. Porras, “Tapping into the Wearable Device Revolution in the Work Environment: A Systematic Review,” *Information Technology & People*, 2018.
- [8] Optalert, “Eagle Industrial.” Available online: <https://www.optalert.com/explore-products/eagle-industrial/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [9] Qoowear, “Boosting The Safety Of Workers In Sub-Zero Environments.” Available online: <http://qoowear.com/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [10] Eleksen, “Smart Workforce Safety.” Available online: <https://eleksen.com/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [11] MyExposome, “Lightweight Simple Wristbands.” Available online: <http://www.myexposome.com/approach> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [12] Laevo Exoskeletons, “Our Wearable Chest and Back Support.” Available online: <https://www.laevo-exoskeletons.com/en/laevo-v2> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).

References

- [13] DIGI, “Kinetic Creates An Innovative Wearable That Reduces Workplace Injuries And Increases Safety Using Digi IoT Solutions.” Available online: <https://www.digi.com/customer-stories/kinetic-wearable-reduces-workplace-injuries> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [14] J. Masood, A. Dacal-Nieto, V. Alonso-Ramos, M. I. Fontano, A. Voilqué, and J. Bou, “Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process,” in *Proc. of International Symposium on Wearable Robotics*, pp. 234–238, Springer, 2018.
- [15] Codered, “Signal 21 Speaker Microphone.” Available online: <https://www.code-redheadsets.com/Signal-21-Speaker-Microphone-p/signal21.htm> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [16] Spectro:o, “Spectro:o Digital Signage Platform.” Available online: <https://spectroo.eu/?lang=en> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [17] Realwear, “RealWear – Digital Workflow with Industrial Wearable.” Available online: <https://www.gitex.com/video-gallery/realwear-digital-workflow-with-industrial-wearable> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [18] Capgemini, “Augmented and Virtual Reality.” Available online: <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2018/09/AR-VR-in-Operations1.pdf> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [19] Solepower, “Powering The Future One Step At A Time.” Available online: <http://www.solepowertech.com/#solepower> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [20] M. Santos, S. Volla, M. A. Pimentel, C. Areia, L. Young, C. Roman, J. Ede, P. Piper, E. King, M. Harford, *et al.*, “The use of wearable pulse oximeters in the prompt detection of hypoxemia and during movement: diagnostic accuracy study,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 24, no. 2, p. e28890, 2022.
- [21] Y. Fu and J. Liu, “System design for wearable blood oxygen saturation and pulse measurement device,” *Procedia manufacturing*, vol. 3, pp. 1187–1194, 2015.
- [22] CardioMedive, “CardioMedive.” Available online: <https://cardiomedive.eu/?ref=ab-romania#/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [23] G. S. Stergiou, B. Alpert, S. Mieke, R. Asmar, N. Atkins, S. Eckert, G. Frick, B. Friedman, T. Graßl, T. Ichikawa, *et al.*, “A Universal Standard for the Validation of Blood Pressure Measuring Devices: Association for the Advancement of Medical Instrumentation/European Society of Hypertension/International Organization for Standardization (AAMI/ESH/ISO) Collaboration Statement,” *Hypertension*, vol. 71, no. 3, pp. 368–374, 2018.
- [24] A. Pantelopoulos and N. G. Bourbakis, “A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 40, no. 1, pp. 1–12, 2009.
- [25] D. M. Bard, J. I. Joseph, and N. van Helmond, “Cuff-less Methods for Blood Pressure Telemonitoring,” *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 6, p. 40, 2019.

References

- [26] F. Fotouhi-Ghazvini and S. Abbaspour, “Wearable Sireless Sensors for Measuring Calorie Consumption,” *Journal of Medical Signals and Sensors*, vol. 10, no. 1, p. 19, 2020.
- [27] J. Lester, C. Hartung, L. Pina, R. Libby, G. Borriello, and G. Duncan, “Validated Caloric Expenditure Estimation Using a Single Body-worn Sensor,” in *Proc. of 11th International Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 225–234, 2009.
- [28] S. K. Jain and B. Bhaumik, “An Energy Efficient ECG Signal Processor Detecting Cardiovascular Diseases on Smartphone,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 314–323, 2016.
- [29] D. Azariadi, V. Tsoutsouras, S. Xydis, and D. Soudris, “ECG Signal Analysis and Arrhythmia Detection on IoT Wearable Medical Devices,” in *Proc. of 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, pp. 1–4, IEEE, 2016.
- [30] M. Li, W. Xiong, and Y. Li, “Wearable measurement of ecg signals based on smart clothing,” *International Journal of Telemedicine and Applications*, vol. 2020, 2020.
- [31] QARDIO, “QARDIOCORE.” Available online: <https://www.getqardio.com/qardiocore-wearable-ecg-ekg-monitor-iphone/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [32] Y. Athavale and S. Krishnan, “Biosignal Monitoring Using Wearables: Observations and Opportunities,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 38, pp. 22–33, 2017.
- [33] D. P. Subha, P. K. Joseph, R. Acharya, and C. M. Lim, “EEG Signal Analysis: A Survey,” *Journal of Medical Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 195–212, 2010.
- [34] Y. Wei, Y. Wu, and J. Tudor, “A Real-time Wearable Emotion Detection Headband based on EEG Measurement,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 263, pp. 614–621, 2017.
- [35] J. W. Ahn, Y. Ku, and H. C. Kim, “A Novel Wearable EEG and ECG Recording System for Stress Assessment,” *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 1991, 2019.
- [36] Emotiv, “Brain Controlled Technology.” Available online: <https://www.emotiv.com/brain-controlled-technology/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [37] C. Hettiarachchi, J. Kodithuwakku, B. Manamperi, A. Ifham, and P. Silva, “A Wearable System to Analyze the Human Arm for Predicting Injuries due to Throwing,” in *Proc. of 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 3297–3301, IEEE, 2019.
- [38] Papakostas, Michalis and Kanak, Varun and Abujelala, Maher and Tsiakas, Konstantinos and Makedon, Fillia, “Physical fatigue detection through EMG wearables and subjective user reports: a machine learning approach towards adaptive rehabilitation,” in *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, pp. 475–481, 2019.
- [39] B. Milosevic, S. Benatti, and E. Farella, “Design challenges for wearable emg applications,” in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2017*, pp. 1432–1437, IEEE, 2017.

References

- [40] Shimmer, “Shimmer3 EMG Unit.” Available online: <https://www.emotiv.com/b/rain-controlled-technology/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [41] Myonetic, “Sports.” Available online: <https://www.myontec.com/sports> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [42] J. He, W. Choi, X. Wu, and Y. Yang, “Detection of operator drowsiness using google glass,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 59, pp. 1607–1611, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2015.
- [43] W.-J. Chang, L.-B. Chen, and Y.-Z. Chiou, “Design and implementation of a drowsiness-fatigue-detection system based on wearable smart glasses to increase road safety,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 461–469, 2018.
- [44] MedlinePlus, “Diabetes.” Available online: <https://medlineplus.gov/ency/article/001214.htm> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [45] P. S. Ciechanowski, W. J. Katon, J. E. Russo, and I. B. Hirsch, “The Relationship of Depressive Symptoms to Symptom Reporting, Self-Care and Glucose Control in Diabetes,” *General Hospital Psychiatry*, vol. 25, no. 4, pp. 246–252, 2003.
- [46] D. Rodin, M. Kirby, N. Sedogin, Y. Shapiro, A. Pinhasov, and A. Kreinin, “Comparative Accuracy of Optical Sensor-based Wearable System for Non-invasive Measurement of Blood Glucose Concentration,” *Clinical Biochemistry*, vol. 65, pp. 15–20, 2019.
- [47] WHOOP, “Overview of the Whoop Strap 3.0.” Available online: <https://www.whoop.com/thelocker/whoop-strap-3-0-overview/> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [48] T. Bobrowski and W. Schuhmann, “Long-Term Implantable Glucose Biosensors,” *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 10, pp. 112–119, 2018.
- [49] D. Meetoo, L. Wong, and B. Ochieng, “Smart Tattoo: Technology for Monitoring Blood Glucose in the Future,” *British Journal of Nursing*, vol. 28, no. 2, pp. 110–115, 2019.
- [50] B. Bellmann, C. Gemein, and P. Schauerte, “Regular Pulse Rate but Irregular Heart Rate?,” *Netherlands Heart Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 435–437, 2016.
- [51] Z. Ge, P. Prasad, N. Costadopoulos, A. Alsadoon, A. Singh, and A. Elchouemi, “Evaluating the Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors,” in *Proc. of 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA)(Fall)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [52] C. Hanning and J. Alexander-Williams, “Fortnightly Review: Pulse Oximetry: A Practical Review,” *Bmj*, vol. 311, no. 7001, pp. 367–370, 1995.
- [53] Myzone, “MZ-3.” Available online: <https://www.myzone.org/mz-3> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [54] A. K. Dwivedi, S. A. Imtiaz, and E. Rodriguez-Villegas, “Algorithms for Automatic Analysis and Classification of Heart Sounds—A Systematic Review,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8316–8345, 2018.

References

- [55] C. Wong, Z.-Q. Zhang, B. Lo, and G.-Z. Yang, “Wearable Sensing for Solid Biomechanics: A Review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2747–2760, 2015.
- [56] A. Ometov, D. Solomitckii, T. Olsson, S. Bezzateev, A. Shchesniak, S. Andreev, J. Harju, and Y. Koucheryavy, “Secure and Connected Wearable Intelligence for Content Delivery at a Mass Event: A Case Study,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, no. 2, p. 5, 2017.
- [57] M. Norris, R. Anderson, and I. C. Kenny, “Method Analysis of Accelerometers and Gyroscopes in Running Gait: A Systematic Review,” *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 228, no. 1, pp. 3–15, 2014.
- [58] M. Webster, “Sweat.” Available online: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/sweat> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [59] C. Legner, U. Kalwa, V. Patel, A. Chesmore, and S. Pandey, “Sweat Sensing in the Smart Wearables Ara: Towards Integrative, Multifunctional and Body-Compliant Perspiration Analysis,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 296, pp. 200–221, 2019.
- [60] M. Parrilla, T. Guinovart, J. Ferré, P. Blondeau, and F. J. Andrade, “A Wearable Paper-based Sweat Sensor for Human Perspiration Monitoring,” *Advanced Healthcare Materials*, vol. 8, no. 16, p. 1900342, 2019.
- [61] MyHealthyApple.com, “Top Four Sweat Sensor Telated Features Coming Soon to Your Smartwatches.” Available online: https://www.myhealthyapple.com/top-four-sweat-sensors-related-features-coming-soon-to-your-smartwatch/#What_are_sweat_sensors (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [62] The free dictionary, “Respiration Rate.” Available online: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/respiration+rate> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [63] R. De Fazio, M. Stabile, M. De Vittorio, R. Velázquez, and P. Visconti, “An overview of wearable piezoresistive and inertial sensors for respiration rate monitoring,” *Electronics*, vol. 10, no. 17, p. 2178, 2021.
- [64] I. I. Geneva, B. Cuzzo, T. Fazili, and W. Javaid, “Normal Body Temperature: A Systematic Review,” in *Open Forum Infectious Diseases*, vol. 6, p. ofz032, Oxford University Press US, 2019.
- [65] F. MacDonald, “This is How a Norwegian Woman Survived the Lowest Body Temperature Ever Recorded.” Available online: <https://www.sciencealert.com/his-woman-survived-the-lowest-body-temperature-ever-recorded> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [66] Thermometrics, “Accuracy Standards.” Available online: <https://www.thermometricscorp.com/rtd-accuracy.html> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [67] Maxim Integrated, “Max30205 Human Body Temperature Sensor.” Available online: <https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/sensor-interface/MAX30205.html> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [68] Workerbase, “First Smartwatch for Industrial Use.” Available online: <https://workerbase.com/industrial-smartwatch> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).

References

- [69] Z. Mohy-Ud-Din, S. H. Woo, J. H. Lee, S. H. Lee, P. S. Young, C. H. Won, and J. H. Cho, “Wireless skin temperature sensing patch,” in *2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 258–260, IEEE, 2008.
- [70] E. Svertoka, M. Bălănescu, G. Suci, A. Pasat, and A. Drosu, “Decision support algorithm based on the concentrations of air pollutants visualization,” *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5931, 2020.
- [71] E. Svertoka, A. Rusu-Casandra, and I. Marghescu, “State-of-the-art of industrial wearables: A systematic review,” in *Proc. of 13th International Conference on Communications (COMM)*, pp. 411–415, IEEE, 2020.
- [72] Cambridge Dictionary, “Atmospheric pressure.” Available online: <https://dictionary.cambridge.org/ru> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [73] Alex Yartsev. Deranged Physiology, “Physiological Effects of High and Low Barometric Pressure.” Available online: <https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/required-reading/respiratory-system/Chapter%20923/physiological-effects-high-and-low-barometric-pressure> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [74] Y. Melamed, A. Shupak, and H. Bitterman, “Medical problems associated with underwater diving,” *New England Journal of Medicine*, vol. 326, no. 1, pp. 30–35, 1992.
- [75] Vandrigo Inc, “Atheer Air Glasses.” Available online: <https://vandrigo.com/wearables/device/atheer-air-glasses.html> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [76] Maximum Yield, “Light Intensity.” Available online: <https://www.maximumyield.com/definition/2036/light-intensity> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [77] National Optical Astronomic Observatory, “Recommended Light Levels.” Available online: http://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY_Documents/Safety/LightLevels_outdoor+indoor.pdf (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [78] European Commission. Health and Consumers. Scientific Committees, “Health Effects of Artificial Light.” Available online: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/artificial-light/en/l-2/4-effects-health.htm#0 (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [79] E. E. K. Nang, G. Abuduxike, P. Posadzki, U. Divakar, N. Visvalingam, N. Nazeha, G. Dunleavy, G. I. Christopoulos, C.-K. Soh, K. Jarbrink, *et al.*, “Review of the Potential Health Effects of Light and Environmental Exposures in Underground Workplaces,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 84, pp. 201–209, 2019.
- [80] United States Department of Labor. Occupational Safety and Health Administration., “Standard 1926.56 – Illumination.” Available online: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.56> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [81] M. Mardonova and Y. Choi, “Review of Wearable Device Technology and Its Applications to the Mining Industry,” *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 547, 2018.

References

- [82] Texas Instruments, “OPT3006 Ultra-Thin Ambient Light Sensor.” Available online: <https://www.ti.com/product/OPT3006> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [83] The Free Dictionary, “Noise level.” Available online: <https://www.thefreedictionary.com/noise+level> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [84] M. Talukdar, “Noise Pollution and its Control in Textile Industry,” 2001.
- [85] Cambridge Dictionary, “Radiation.” Available online: <https://dictionary.cambridge.org/ru> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [86] U.S.NRC, “Information for Radiation Workers.” Available online: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/info.html> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [87] EPA. United States Environmental Protection Agency, “Radiation Health Effects.” Available online: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [88] A. Banafa, “The internet of everything,” 04 2014.
- [89] Cambridge Dictionary, “Relative Humidity.” Available online: <https://dictionary.cambridge.org/ru> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [90] J. Toftum and P. O. Fanger, “Air Humidity Requirements for Human Comfort,” *ASHRAE transactions*, vol. 105, p. 641, 1999.
- [91] A. Baughman and E. A. Arens, “Indoor Humidity and Human Health–Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants,” *ASHRAE Transactions*, vol. 102, pp. 192–211, 1996.
- [92] Sensirion, “Datasheet sht1x (sht10, sht11, sht15) Humidity and Temperature Sensor.” Available online: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [93] M. A. Milley and G. B. O’Keefe, “Mountain Warfare and Cold Weather Operations,” tech. rep., Headquarters Department of the Army Washington United States, 2016.
- [94] W. Cui, G. Cao, J. H. Park, Q. Ouyang, and Y. Zhu, “Influence of Indoor Air Temperature on Human Thermal Comfort, Motivation and Performance,” *Building and Environment*, vol. 68, pp. 114–122, 2013.
- [95] World Health Organization, “Radiation: The Ultraviolet (UV) Index.” Available online: [https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-the-ultraviolet-\(uv\)-index](https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-the-ultraviolet-(uv)-index) (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [96] K. Vanicek, T. Frei, Z. Litynska, and A. Schmalwieser, “UV-Index for the Public,” *Publication of the European Communities, Brussels, Belgium*, 2000.
- [97] S. Banerjee, E. G. Hoch, P. D. Kaplan, and E. L. Dumont, “A Comparative Study of Wearable Ultraviolet Radiometers,” in *Proc. of IEEE Life Sciences Conference (LSC)*, pp. 9–12, IEEE, 2017.

References

- [98] Vantage Market Research, “LPWAN market.” Available online: <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/low-power-wide-area-network-market-1127#:~:text=Global> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [99] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [100] Y. Singh, “Comparison of okumura, hata and cost-231 models on the basis of path loss and signal strength,” *International journal of computer applications*, vol. 59, no. 11, 2012.
- [101] “New SID on NR-Lite for Industrial Sensors and Wearables,” TDoc RP-191048, 3GPP, June 2019.
- [102] ETSI, “3GPP TR 36.873 V12.7.0 (2017-12).” Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2574> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [103] Adeunis, “FTD: network tester .” Available online: <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-network-tester/#zone-dl> (accessed on Tuesday 9th April, 2024).
- [104] M. Gineprini, S. Parrino, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, “Lorawan performances for underground to aboveground data transmission,” in *2020 IEEE international instrumentation and measurement technology conference (I2MTC)*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
- [105] G. Di Renzone, S. Parrino, G. Peruzzi, A. Pozzebon, and D. Bertoni, “Lorawan underground to aboveground data transmission performances for different soil compositions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–13, 2021.
- [106] C. Ebi, F. Schaltegger, A. Rüst, and F. Blumensaat, “Synchronous lora mesh network to monitor processes in underground infrastructure,” *IEEE access*, vol. 7, pp. 57663–57677, 2019.
- [107] S. Wilson and R. Laing, “Wearable technologies: Present and future,” in *91st World Conference of The Textile Institute. Leeds, UK*, 2018.
- [108] E. Svertoka, I. Marghescu, A. Rusu-Casandra, R. Burget, J. Hosek, P. Masek, and A. Ometov, “Evaluation of real-life lorawan localization: Accuracy dependencies analysis based on outdoor measurement datasets,” in *2022 14th International Conference on Communications (COMM)*, pp. 1–7, IEEE, 2022.
- [109] E. Svertoka, A. Rusu-Casandra, R. Burget, I. Marghescu, J. Hosek, and A. Ometov, “Lorawan: Lost for localization?,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 23, pp. 23307–23319, 2022.