
Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Fernando Solano Donado

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2003.03.08 ukończone pięcioletnie studia inżynierskie na kierunku Informatyki w Universidad del Norte w Barranquilla, Kolumbia

2007.12.05 doktor w zakresie *techniki informacyjnych* – rozprawa doktorska nt. *Label Space Reduction in GMPLS and All-Optical Label Swapping Networks*, obroniona w Universitat de Girona, napisana pod kierunkiem prof. Jose Luiza Marzo oraz Ramona Fabregata.

Opracowanie badań i rozprawy doktorskiej zostało zrealizowane w ramach grantu rządu katalońskiego w Hiszpanii otrzymanego w 2004 roku i zakończonego wraz z obroną i nadaniem stopnia naukowego doktora.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Instytut Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej

Od 2008.02.01 do 2010.03.14 Asystent naukowy do prac badawczych związanych z realizacją projektu EUREKA – MANGON/CELTIC CP04-017 w Instytucie Telekomunikacji na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej.

Od 2010.03.15 do dzisiaj Adiunkt naukowo-dydaktyczny w Instytucie Telekomunikacji na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Prezentowane osiągnięcie naukowe to zrealizowane oryginalne osiągnięcie technologiczne, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 **podpunkt c)** ustawy z dn. 30 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Tytuł osiągnięcia naukowego:

Zaprojektowanie i Opracowanie Systemów Internetu Rzeczy do Monitorowania Nielegalnej Produkcji Narkotyków.

Osiągnięcie technologiczne wynikało z realizacji trzech jednolitych tematycznie projektów europejskich w obszarze bezpieczeństwa, z których dwoma kierowałem. W ramach tych projektów powstały systemy Internetu Rzeczy do monitorowania substancji będących narkotykami w Europejskich ściekach i na Kolumbijskich rzekach, nad którymi się odbywa poszukiwana przez policję nielegalna produkcja narkotyków.

Ze względu na poufny charakter opracowanych rozwiązań, projekty były objęte ochroną informacji niejawnych, co skutkowało ograniczeniem jawnych publikacji wynikających z rezultatów projektów do 6 powiązanych publikacji w czasopismach w ciągu ostatnich 14 lat. Pragnę przypomnieć, że art. 219 ust. 3 ustawy z dn. 30 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce wyjaśnia, że obowiązek publikacji nie dotyczy osiągnięć, których przedmiot jest objęty ochroną informacji niejawnych.

4.1 Wykaz powiązanych projektów europejskich i publikacji

Osiągnięcie technologiczne wynikało ze realizacji trzech jednolitych tematycznie projektów europejskich w obszarze bezpieczeństwa, które są podsumowane w poniższej tabelce.

FP7 Goldifsh	Realizowany od Listopada 2011 r. do Maja 2015 r. Finansowanie z KE na projekt: 2.1mln EUR Skład konsorcjum: 9 partnerów ze Szwecji, Francji, Kolumbii, Boliwii, Austrii, Chorwacji, Słowacji i Polski Rola kandydata w projekcie: koordynator, kierownik, główny badacz projektu oraz deweloper.
H2020 micromole	Realizowany od Września 2015 r. do Lutego 2019 r. Finansowanie z KE na projekt: 5.0mln EUR Skład konsorcjum: 11 partnerów ze Szwecji, Niemiec, Islandii, Belgii, Holandii, Francji i Polski Rola kandydata w projekcie: koordynator, kierownik, główny badacz projektu oraz deweloper.
H2020 SYSTEM	Realizowany od Listopada 2018 r. do Lutego 2022 r. Finansowanie z KE na projekt: 8.0mln EUR Skład konsorcjum: 20 partnerów z Niemiec, Szwecji, Polski, Włoch, Anglii, Słowacji i Belgii. Rola kandydata w projekcie: pomysłodawca projektu, lider work-package'a oraz deweloper

Wykaz publikacji wynikających z pracy nad tymi projektami jest podsumowany poniżej.

- [H1] C. Velasquez-Villada, F. Solano i Y. Donoso, „Algorithm, Routing Optimization for Delay Tolerant Networks in Rural Applications Using a Distributed,” *International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC)*, tom 10, nr 1, pp. 100-111, February 2015.
PA: 10%, IF: 2.6, 40 pkt MNiSW.
- [H2] Y. Donoso, G. Montoya i F. Solano, „An Energy-Efficient and Routing Approach for Position Estimation using Kalman Filter Techniques in Mobile WSNs,” *International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC)*, tom 10, nr 4, p. 500, 2015.

- PA: 10%, IF: 2.6, 40 pkt MNiSW.
- [H3] F. Solano, „On the Optimal Calculation of the Rice Coding Parameter,” *MDPI Algorithms*, nr 13, p. 181, 2020.
PA: 100%, IF: 2.3, 40 pkt MNiSW.
- [H4] F. Solano, S. Krause i C. Wollgens, „An Internet-of-Things Enabled Smart System for Wastewater Monitoring,” *IEEE Access*, tom 10, pp. 4666-4685, 2022.
PA: 70%, IF: 3.4, 100 pkt MNiSW.
- [H5] N. Kokle, F. Solano, T. Knepper i T. Fromel, „Unraveling the dynamics of organic micropollutants in wastewater: Online LC-MS/MS analysis at high temporal resolution,” *Environmental Pollution*, tom 310, p. 119807, October 2022.
PA: 15%, IF: 7.6, 100 pkt MNiSW.
- [H6] M. P. Buras i F. Solano, „Identifying and Estimating the Location of Sources of Industrial Pollution in the Sewage Network,” *MDPI Sensors*, tom 21, nr 10, p. 3426, 14 May 2021.
PA: 30%, IF: 3.7, 100 pkt MNiSW.
- [H7] Sikorski Arkadiusz, Kozdrowski Stanisław, Solano Donado Fernando: IoT Device Deployment for Optimal Wastewater Network Coverage, W: Proceedings of the 2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) / Begušić Dinko[i in.](red.), 2021, Galesnik, ISBN 978-953-290-109-2, s. 222-227, DOI:10.23919/SoftCOM52868.2021.9559098,
PA: 10%, IF: NA, 70 pkt MNiSW.
- [H8] Sikorski Arkadiusz, Solano Donado Fernando, Kozdrowski Stanisław: Cost-Efficient Coverage of Wastewater Networks by IoT Monitoring Devices, Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 22, nr 18, 2022, Numer artykułu: 6854, s. 1-19, DOI:10.3390/s22186854
PA: 10%, IF: 3.7, 100 pkt MNiSW.
- [H9] Chachuła Krystian, Nowak Robert Marek, Solano Donado Fernando: Pollution Source Localization in Wastewater Networks, Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 21, nr 826, 2021, s. 1-16, DOI:10.3390/s21030826
PA: 10%, IF: 3.7, 100 pkt MNiSW.

Projekty oraz wynikające z nich publikacje są zaprezentowane poniżej w trzech podrozdziałach: podrozdział 4.2 Osiągnięcia Podczas Realizacji Projektu FP7 Goldfish, podrozdział 4.3 Osiągnięcia Podczas Realizacji Projektu H2020 Micromole oraz podrozdział 4.4 Osiągnięcia Podczas Realizacji Projektu H2020 SYSTEM, który był kontynuacją projektu H2020 Micromole.

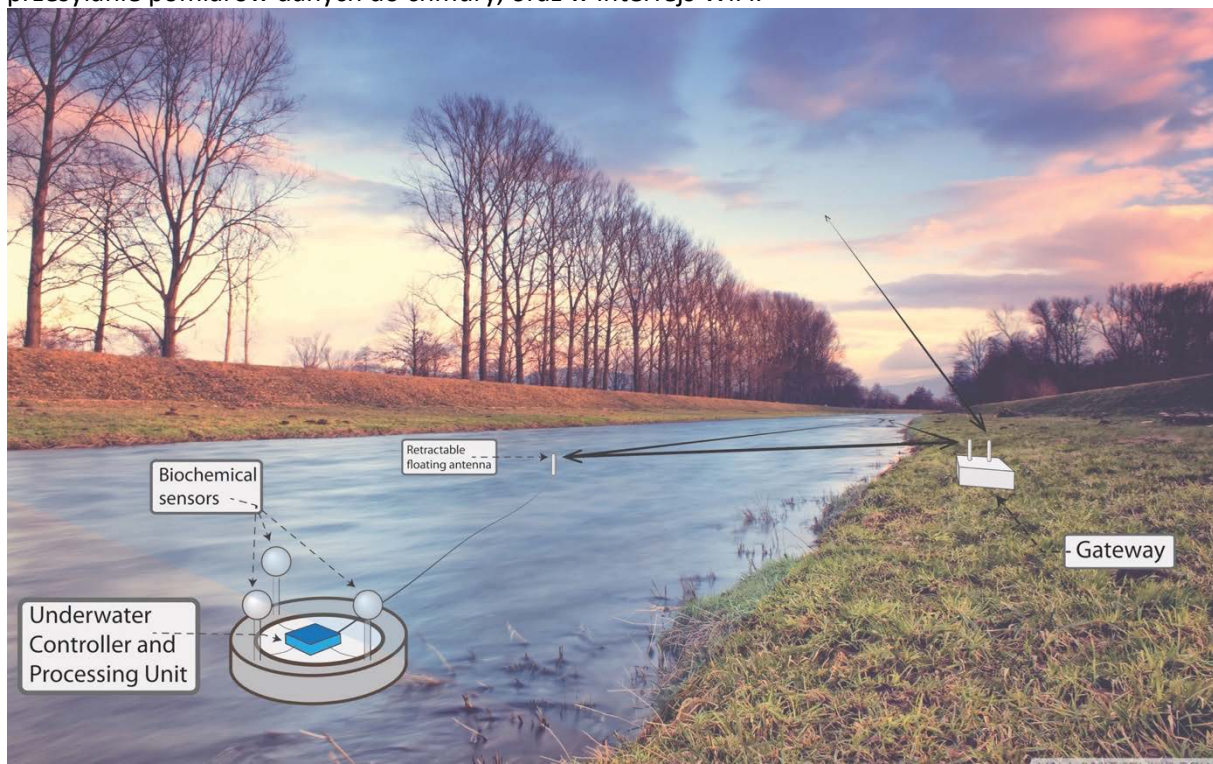
4.2 Osiągnięcia podczas realizacji projektu FP7 Goldfish

Zimą 2009/2010 roku przeczytałem raport na temat wpływu nielegalnych upraw koki w lasach deszczowych Amazonii w moim rodzinnym kraju Kolumbii. Od tego momentu rozpocząłem pracę nad przygotowaniem wniosku o finansowaniu projektu badawczego o nazwie *Goldfish*, mającego na celu zaprojektowanie i implementację systemu Internetu Rzeczy do lokalizacji laboratoriów produkcji kokainy w dżunglach tropikalnych Ameryki Łacińskiej.

Dwa z czterdziestu sześciu (4,34%) wysłanych wniosków zostały wybrane przez Komisję Europejską (KE) do finansowania w ramach siódmego programu ramowego (7PR). Projekt otrzymał od KE 2.1 milionów euro dofinansowania na jego działanie od listopada 2011 r. do maja 2015 r – numer umowy 269985. Byłem pomysłodawcą, koordynatorem i głównym badaczem (ang. *Principal Investigator*) projektu FP7 Goldfish przez cały okres jego trwania. W składzie konsorcjum znalazły się: Biuro ds. Narkotyków i Przestępczości Organizacji Narodów Zjednoczonych, uczelnia oraz firma z Francji, uczelnia oraz firma ze Szwecji, uczelnia z Kolumbii, uczelnia z Boliwii, uczelnia z Chorwacji, akademia nauki ze Słowacji oraz Politechnika Warszawska. Lista nazw partnerów konsorcjum, strona projektu i wyniki projektu były zastrzeżone przez konsorcjum.

Z raportów kolumbijskiej policji wynikało, że transformacja liści koki w kryształki kokainy odbywała się w dżunglach w pobliżu rzek z dwóch powodów: 1) proces transformacji chemicznej wymagał dużych ilości wody oraz 2) toksyczne odpady będące wynikiem transformacji chemicznej były regularnie usuwane do rzek. Projekt Goldfish zakładał, że toksyczne odpady chemiczne występują w wyższych stężeniach w pobliżu tajnego laboratorium i miał na celu opracowanie systemu umożliwiającego śledzenie stężenia takich odpadów za pomocą biosensora specyficznego dla procesu produkcji kokainy.

System Goldfish składał się z węzłów sensorowych oraz z bram komunikacyjnych – patrz Rysunek 1. Węzły sensorowe tworzyły barierę ułożoną na dnie rzeki z antenami pływającymi nad powierzchnią wody. Bramy były zlokalizowane na każdym brzegu rzeki. Węzły czujników i bramy łączyły się za pośrednictwem Wi-Fi, tworząc sieć kratową. Bramy wyposażone były w modem GSM, umożliwiając przesyłanie pomiarów danych do chmury, oraz w interfejs WiFi.



Rysunek 1 - Wizualizacja prototypu Goldfish w rzece

Każdy z węzłów sensorycznych Goldfish składał się z 3 modułów: modułu czujnika elektrochemicznego, modułu głównego i modułu komunikacyjnego. Moduł elektrochemiczny został zbudowany w oparciu o kontroler Cortex-M4 i przetwornik ADC o wysokiej rozdzielczości do pomiarów pojemnościowych biosensora. Na płycie głównej znajdował się mikrokontroler PIC24F o małej mocy, który odpowiadał za zbieranie pojedynczych pomiarów pojemności z płytki elektrochemicznej, włączanie/wyłączanie modułu komunikacyjnego, oraz przekazywanie do modułu komunikacyjnego serii pomiarów pojemności. Moduł komunikacyjny został opracowany w oparciu o płytę Raspberry Pi z kartą WiFi i wyposażony w system Linux utworzony przy użyciu buildroot. Moduł elektrochemiczny i główny moduł procesora komunikowały się za pomocą autorskiego protokołu wykorzystującego I2C. Główny moduł procesora i moduł zasilania komunikowały się poprzez piny GPIO.

Dwie publikacje [H1] i [H2] powstały we współpracy z partnerami konsorcjum z uniwersytetu w Kolumbii. W tych dwóch publikacjach analizowano, w jaki sposób można by przeprowadzić przekierowanie ruchu (ang. *routing*) pomiędzy węzłami Goldfish, gdyby te węzły pływały z prądem rzeki. Artykuł w [H1] rozważa podobny scenariusz i skupia się na aspektach związanych z sieciami odpornymi na opóźnienia, gdy komunikacja pomiędzy ruchomymi węzłami i bramami jest sporadyczna (ang. *Delay Tolerant Networks*). Artykuł [H2] rozważa podobny scenariusz i proponuje

rozwiązanie problemu routingu przy założeniu, że położenie węzłów można przewidzieć za pomocą filtra Kalmana. Pomimo pozytywnych wyników przedstawionych w tych publikacjach, partnerzy Policji zdecydowali, że prototyp Goldfish powinien składać się z nieruchomych węzłów Goldfish, aby uniknąć podejrzeń ze strony organizacji przestępczych.

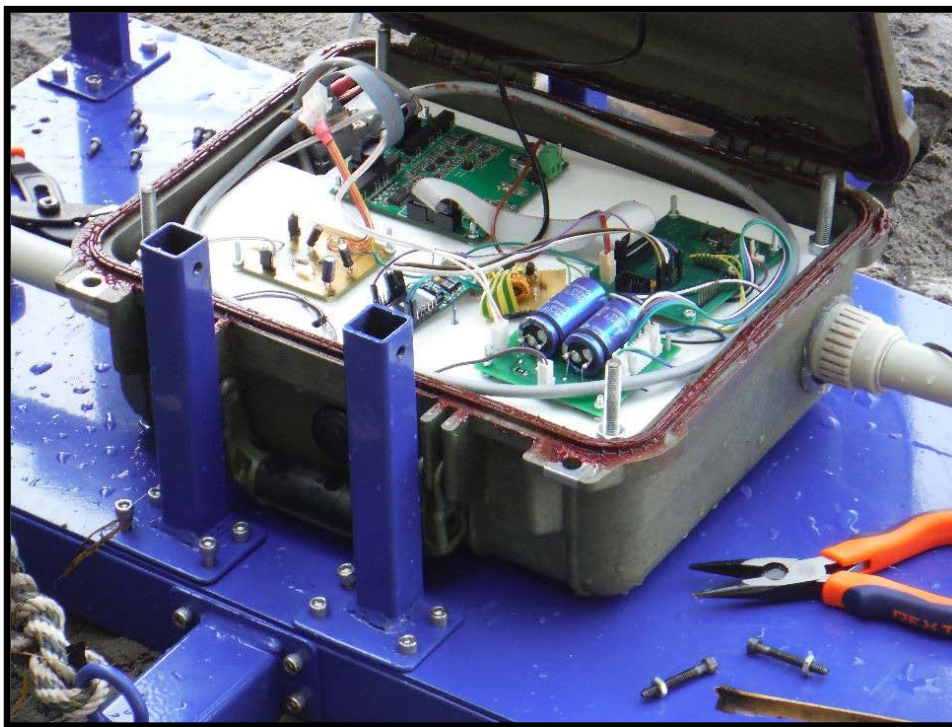
Po pierwszych 18 miesiącach działania projektu gotowy był pierwszy zintegrowany prototyp wszystkich modułów – nazywany *prototyp Goldfish*. Pomiary użytej energii wykazały, że moduł komunikacyjny potrzebował dużej ilości czasu i mocy na uruchomienie, włączanie interfejsów Wi-Fi i konfigurowanie połączenia Wi-Fi, a tylko kilka sekund na transmisję danych. Z tego powodu postanowiłem przeprojektować system Goldfish aby uzyskać zwiększoną efektywność energetyczną.

Moje dwa główne osiągnięcia w trakcie działania projektu Goldfish 7PR:

- Zaprojektowanie i wdrożenie drugiej wersji prototypu Goldfish eliminującego komunikację WiFi – nazwanego *prototyp Goldfish-light*,
- Zaprojektowanie i implementacja algorytmu kompresji danych

4.2.1 Prototyp Goldfish-light

Prototyp systemu Goldfish-light (patrz Rysunek 2 poniżej) usunął obsługę komunikacji Wi-Fi w celu zwiększenia efektywności energetycznej. W zamian, każdy węzeł sensorowy został wyposażony w modem GSM podłączony bezpośrednio do płyty głównej. W rezultacie został usunięty moduł komunikacyjny pierwotnego węzła sensorowego Goldfish, a bramy Goldfish Gateway przestały być potrzebne. W systemie Goldfish-light każdy węzeł był w stanie bezpośrednio przesyłać swoje pomiary do chmury, pod warunkiem, że na powierzchni rzeki, gdzie unosiła się antena, dostępny był zasięg GSM.



Rysunek 2 główne komponenty elektroniczne prototypu goldfish-light

System Goldfish-light umożliwił również znacznie łatwiejsze wdrożenie, ponieważ każdy węzeł był niezależny i nie wymagał dodatkowego urządzenia (np. Bramy) do transmisji danych. Co więcej, system Goldfish-light był również mniej podatny na ataki fizyczne, ponieważ na powierzchni rzeki nie było widoczne żadne urządzenie, a jedynie antena GSM o wysokości 10 cm. System Goldfish-light nie był też podatny na awarie bramy, co zwiększało niezawodność całego systemu.

Aby zaimplementować system Goldfish-light, konieczne było rozszerzenie oprogramowania wbudowanego modułu głównego. W tym celu, dodałem dwa nowe komponenty oprogramowania:

sterownik modemu GSM, moduł zarządzania próbkami i komponent zdalnego zarządzania węzłem. Driver GSM odpowiadał za włączanie i wyłączenie modułu GSM, nawiązywanie połączenia internetowego oraz otwieranie/zamykanie połączenia przez gniazdo TCP w celu transmisji danych. Komponent zarządzający próbkami odpowiadał za tworzenie szeregu czasowego pomiarów pojemności i jego transmisję przez gniazdo TCP.

Urządzenie Goldfish-light dzięki eliminacji komunikacji za pomocą technologii Wi-Fi, zużywało średnio połowę mocy oryginalnego urządzenia węzła sensorowego Goldfish. Co więcej, urządzenie Goldfish-light było w stanie przesyłać wszystkie pomiary zebrane w ciągu godziny pracy czujnika (~1600 pomiarów) w ciągu 1 minuty i 25 sekund, czyli co najmniej trzykrotnie szybciej niż w przypadku oryginalnego urządzenia węzła sensorycznego Goldfish. Podsumowując, węzeł Goldfish-light zużywał jedną szóstą energii wymaganej przez urządzenie węzła sensorowego Goldfish.

Efektywność energetyczna prototypu Goldfish-light pozwoliła na ładowanie akumulatora węzła z odnawialnych źródeł energii, co wyeliminowało regularną wymianę akumulatora węzła. Koledzy z Instytutu Systemów Elektronicznych PW współpracowali z chorwacką uczelnią nad zaprojektowaniem i zbudowaniem prototypu turbiny wodnej wytwarzającej energię (patrz Rysunek 3 z prawej), zdolnej do pełnego zasilania systemu przy prędkości przepływu wody powyżej 6 m/s.

4.2.2 Kompresja danych do transmisji pomiarów przez urządzenia końcowe IoT

Moduł czujnika elektrochemicznego tworzył szereg czasowy pomiarów stężenia wybranego markera chemicznego na potrzeby projektu Goldfish. Stężenie w nmol/l w normalnych warunkach wynosiło 0, a w przypadku przedostania się do wody poszukiwanej substancji osiągało wartość dodatnią. Po wylaniu odpadów z produkcji kokainy do rzeki, stężenie poszukiwanej substancji w punkcie pomiarowym malało w zależności od przepływu i objętości wody.

Oczekiwano, że przez większość czasu stężenie będzie wynosiło 0 nmol/l. W rezultacie zaprojektowałem algorytm kompresji danych, który w normalnych warunkach – czyli gdy pomiar wynosił 0, lub pomiar był zbliżony do 0 - zmniejszał rozmiar przesyłanych danych.

Zacząłem od analizy kodów Golomba-Rice'a pod kątem zakodowania różnicy między poprzednim a bieżącym pomiarem. Kodowanie Golomba-Rice'a zostało początkowo wybrane ze względu na jego prostotę i niskie wymagania obliczeniowe, co ułatwiało zastosowanie w kontrolerach o ograniczonych zasobach w IoT.

Kodowanie Golomba-Rice'a to parametryzowalny schemat kodowania danych zaproponowany przez Roberta F. Rice'a. Algorytm Golomba-Rice'a potrafi kodować liczbę całkowitą (pomiar czujnika w przypadku systemu Goldfish-light) na kod binarny o zmiennej długości zależnej od wartości wybranego parametru r algorytmu. Dla danego parametru r i pomiaru wejściowego n obliczane są dwie wartości q i m , w następujący sposób:

$$q = \lfloor n/2^r \rfloor$$

oraz



Rysunek 3 prototyp goldfish-light wyposażony w turbinę wodną do generowania energii

$$m = n \bmod 2^r$$

Wartość q jest zakodowana jako szereg q bitów, wszystkich ustawionych na wartość 1, po których występuje dodatkowy bit ustawiony na wartość 0. Wartość m jest zakodowana naturalnie przy użyciu r bitów.

Wybór wartości parametru r ma kluczowe znaczenie w długości skompresowanego kodu, gdyż zbyt mała wartość r może zwiększyć liczbę bitów używanych do zakodowania q , natomiast zbyt duża wartość r może zwiększyć długość kodu dla m . Opracowałem algorytmy mające na celu szybkie oszacowanie optymalnej wartości parametru r dla urządzeń IoT o ograniczonych zasobach. Podczas testów algorytmów na urządzeniu Goldfish-light uzyskałem średnio ~40% stopień kompresji, co pozwoliło na skrócenie czasu nadawania modemem GSM o ~20% (w porównaniu do przesyłania pomiarów przez oryginalny węzeł bramy Goldfish bez kompresji danych).

Algorytmy oraz wyniki algorytmów zostały opublikowane w [H3]. W tamtej publikacji pokazywałem, że znalezienie najlepszego parametru kodowania Golomba-Rice'a jest problemem programowania całkowito-liczbowego.

Projekt Goldfish zakończył się 31 maja 2015 r. Wszystkie wyniki naukowe i techniczne projektu zostały ocenione przez dwóch niezależnych recenzentów zewnętrznych i zaakceptowane. Dwa miesiące później zorganizowano pokaz na żywo dla niezależnych recenzentów na rzece Bug w pobliżu Warszawy. Prototypy Goldfish i Goldfish-light osiągnęły 6 poziom gotowości technologicznej (TRL6).

4.3 Osiągnięcia podczas realizacji projektu H2020 Micromole

W semestrze letnim 2014 roku kierowałem konsorcjum zajmującym się przygotowaniem wniosku o dofinansowanie projektu europejskiego o nazwie Micromole¹ pod tytułem "SEWAGE MONITORING SYSTEM FOR TRACKING SYNTHETIC DRUG LABORATORIES" w ramach programu Komisji Europejskiej Horyzont 2020.

Trzy z czternastu (21,43%) wysłanych wniosków zostały wybrane przez Komisję Europejską do dofinansowania w ramach programu Horyzont 2020. Projekt Micromole otrzymał od KE ok. 5 milionów euro dofinansowania na jego działania od września 2015 roku do lutego 2019 roku - numer umowy 653626. Byłem pomysłodawcą, koordynatorem i głównym badaczem (ang. *Principal Investigator*) projektu Micromole przez cały okres jego trwania.

Utworzone do realizacji projektu konsorcjum składało się z 11 organizacji o uzupełniających się kompetencjach: organy ścigania, specjaliści w zakresie hydrotechniki, specjaliści od czujników biochemicznych, inżynierowie elektronicy o różnych specjalizacjach (zapewnienie energii, mikrointegracja, wykrywanie jakości wody), projektanci przemysłowi, specjaliści ds. niezawodności systemów cyber-fizycznych, twórcy oprogramowania wbudowanego, projektanci systemów mikroprzepływowych, oraz inżynierowie telekomunikacji.

Nazwa organizacji	Typ organizacji	Kraj
Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Polskiej Policji	Policja	Polska
Bundeskriminalamt	Policja	Niemcy
Fraunhofer Inst.	Instytut Badawczy	Niemcy
Capsenze	Firma	Szwecja
Blue Technologies	Firma	Polska
JGK	Firma	Islandia
Politechnika Warszawska	Akademia	Polska
Universiteat der Bundeswehr Muenchen	Akademia	Niemcy
Universite Lyon 1 Claude-Bernard	Akademia	Francja
Tilburg University	Akademia	Holandia
Ghent University	Akademia	Belgia

¹ <https://cordis.europa.eu/project/id/653626>

Całkowity wysiłek poświęcony na ten projekt pod moją koordynacją wyniósł 618 osobo-miesięcy (co odpowiada 51,5 osobolat lub 14,7 osobom pracującym na pełnym etacie) w ciągu 42 miesięcy jego realizacji.

Projekt Micromole miał na celu zaprojektowanie i pilotaż autonomicznego systemu rozproszonych czujników bezprzewodowych do pomocy w szybkim wykrywaniu nielegalnej produkcji narkotyków syntetycznych na obszarach miejskich oraz w przechowywaniu fizycznych i cyfrowych dowodów kryminalistycznych, które mogłyby być dalej wykorzystywane przez organy ścigania w sądzie.

System Micromole osiągnął ten cel dzięki monitorowaniu chemicznych produktów ubocznych z syntezy prekursorów chemicznych. Te produkty uboczne, zwane również odpadami syntezowymi, są zazwyczaj wlewane do sieci kanalizacyjnej przez nielegalne organizacje przestępcze działające na obszarach miejskich.

Za zgodą dyrektora Instytutu Telekomunikacji i dziekana WEiTI, w trakcie trwania projektu moje obowiązki dydaktyczne zostały ograniczone, co pozwoliło mi na poświęcenie blisko 80% mojego czasu na zarządzanie i rozwój projektu Micromole H2020, z czego około 2/3 czasu poświęconego było zadaniom badawczym, rozwojowym i walidacyjnym dla prototypu mikromola H2020.

Moje osiągnięcia podczas realizacji projektu Micromole H2020 były następujące:

- Analiza wymagań i rozwiązania dla systemu H2020 Micromole
- Projektowanie, wdrażanie i testowanie oprogramowania wbudowanego H2020 Micromole w laboratorium i sieciach kanalizacyjnych
- Wzorzec architektury IoT dla autonomicznego wykrywania zdarzeń i wyzwalania elementów wykonawczych systemu

Osiągnięcia te przedstawiam w kolejnych trzech podrozdziałach (4.2.1 do 4.2.3).

4.3.1 Analiza wymagań i rozwiązania systemu H2020 Micromole

Moim głównym zadaniem w początkowej fazie projektu było zebranie od członków konsorcjum i przeanalizowanie wymagań systemowych, w celu określenia optymalnej architektury i budowy systemu. W tym podrozdziale podsumowuję te wymagania i analizę, która pomogła w dalszej specyfikacji systemu Micromole.

Początkowo organy ścigania w konsorcjum – działające jako użytkownicy końcowi systemu Micromole – przedstawiły wymagania związane z wykorzystaniem systemu Micromole do wspomagania dochodzeń kryminalnych. Funkcjonariusze z niemieckiej i polskiej policji wyjaśnili, że są zainteresowani monitorowaniem wybranego budynku mieszkalnego przy użyciu systemu Micromole. Obiekt monitoringu miał zostać wytypowany przez funkcjonariuszy organów ścigania na podstawie wcześniej zweryfikowanych wskazań nielegalnej produkcji, takich jak doniesienia o silnych zapachach dostarczane przez sąsiadów, lub dane wywiadowcze dostarczone przez zaufanych, tajnych informatorów. Podstawową zaletą systemu Micromole nie miała być sama możliwość lokalizacji tajnych laboratoriów, a raczej dostarczenie niepodważalnych dowodów sądowych dotyczących produkcji narkotyków syntetycznych. W tym celu, system Micromole musiał być w stanie: 1) zbierać dowody fizyczne (odpady z syntezy w ściekach) produkcji narkotyków syntetycznych usuwanych z monitorowanego obiektu oraz 2) szybkie zgłaszanie nielegalnej produkcji narkotyków syntetycznych organom śledczym. W opinii organów ścigania, natychmiastowy przekaz informacji systemem Micromole pozwolił by organom ścigania na zabezpieczenie na miejscu przestępstwa gotowych narkotyków i środków chemicznych w trakcie trwającej nielegalnej produkcji. Bez takich niepodważalnych dowodów sądowych, oskarżeni przestępcy zazwyczaj bronią swojej sprawy przed sądem, twierdząc, że przechowują zakazane substancje chemiczne, ale odrzucają oskarżenia o produkcję narkotyków syntetycznych (za co kary są surowsze).

Poniżej wymieniam szczegółowe wymagania stawiane przez funkcjonariuszy organów ścigania w konsorcjum.

- (R1) Skład ścieków z monitorowanego obiektu powinien być monitorowany bez naruszania własności prywatnej (tzn. unikania montażu sprzętu w prywatnych liniach kanalizacyjnych).

- (R2) Fizyczne dowody produkcji nielegalnych narkotyków (ścieki z docelową substancją chemiczną) musiały być zbierane automatycznie, a każda próbka powinna zawierać co najmniej 1,5 ml objętości zebranych ścieków, co wystarcza do przeprowadzenia dalszych analiz metodą spektrometrii mas metodą chromatografii gazowej w laboratoriach kryminalistycznych.
- (R3) Autonomiczny monitoring ścieków powinien trwać co najmniej trzy dni
- (R4) Instalacja systemu powinna być możliwa z odległości co najmniej 500 metrów od podejrzanego gospodarstwa domowego korzystającego z sieci kanalizacyjnej, aby uniknąć podejrzeń ze strony przestępców.
- (R5) Powiadomienie o wykryciu w ściekach odpadów syntezowych powinno być automatycznie wysyłane przez system Micromole do organów ścigania w ciągu kilku minut od jego wystąpienia.
- (R6) Czujniki systemu Micromole powinny charakteryzować się dużą swoistością w stosunku do substancji chemicznych będących niewątpliwymi identyfikatorami odpadów powstałych w wyniku syntezy nielegalnych narkotyków syntetycznych.

Ze względu na wymóg (R1), nie było możliwe zaprojektowanie jednego urządzenia do bezpośredniego monitorowania prywatnego odpływu podejrzanego domu. Zamiast tego konsorcjum przyjęło użycie (co najmniej) dwóch monitorujących urządzeń Micromole: jednego umieszczonego za, a drugiego przed monitorowanym prywatnym odpływem. Te dwa urządzenia monitorujące, analizując różnice we wzorcach sygnału w swoich lokalizacjach, miały określać skład ścieków z prywatnego odpływu.

Ponadto specjaliści z zakresu hydrotechniki przedstawili dodatkowe wymagania związane ze środowiskiem sieci kanalizacyjnej i jej bezpieczną eksploatacją, które podsumowano poniżej.

- (R7) Urządzenia Micromole nie mogą być zasilane z gniazd elektrycznych, ponieważ w sieci kanalizacyjnej nie ma sieci energetycznej ze względu na bezpieczeństwo.
- (R8) Rury kanalizacyjne, w których można zamontować urządzenia Micromole, miały mieć minimalną średnicę 200 mm (najmniejsza średnica rury w kanalizacji publicznej).
- (R9) System nie powinien posiadać wystających elementów i przewodów, aby uniknąć zatykania się dużymi ciałami stałymi (takimi jak papier toaletowy) przepływającymi w ściekach.
- (R10) System nie powinien zajmować więcej niż 15% przekroju danej rury, aby uniknąć możliwości zablokowania przepływu ścieków w rurach kanalizacyjnych przez obecność urządzenia.

Z (R7) i (R9) wywnioskowano, że system Micromole powinien być bezprzewodowy i zasilany bateryjnie lub generować własną energię z urządzeń do pozyskiwania energii. W obu przypadkach wymagania te oznaczają ograniczenia w zużyciu energii dla urządzeń Micromole.

W wyniku (R10) zdecydowano, że system powinien być ukształtowany w formie pierścienia tak, aby pasował do wewnętrznych ścian rur kanalizacyjnych. Co więcej, biorąc pod uwagę (R8), oszacowano całkowitą objętość, którą można wykorzystać do przechowywania komponentów elektronicznych, czujników, komponentów płynowych i akumulatorów.

Konsorcjum miało na celu zaprojektowanie czujnika elektrochemicznego o wysokiej swoistości – opartego na pomiarach pojemności elektrod z nadrukowanymi polimerami molekularnymi – do markerów produkcji narkotyków syntetycznych – spełniającego wymagania (R6). Wkrótce podczas realizacji projektu dostarczono szkic modułów czujnikowych. Analiza sprawności czujnika elektrochemicznego wykazała dwa ważne dodatkowe ograniczenia (większość z nich wynika z ograniczeń mocy i objętości elektroniki):

- (R11) czas potrzebny czujnikowi elektrochemicznemu na dostarczenie wyniku analizy wynosił 30 minut, oraz
- (R12) czujnik mógł być użyty tylko raz, ponieważ komora, w której przechowywana była próbka do analizy chemicznej, nie mogła być odkażona po poprzednich pobraniach (powoduje to zwiększoną liczbę fałszywie dodatnich alarmów, jeśli system wykrył wcześniej docelowe chemikalia).

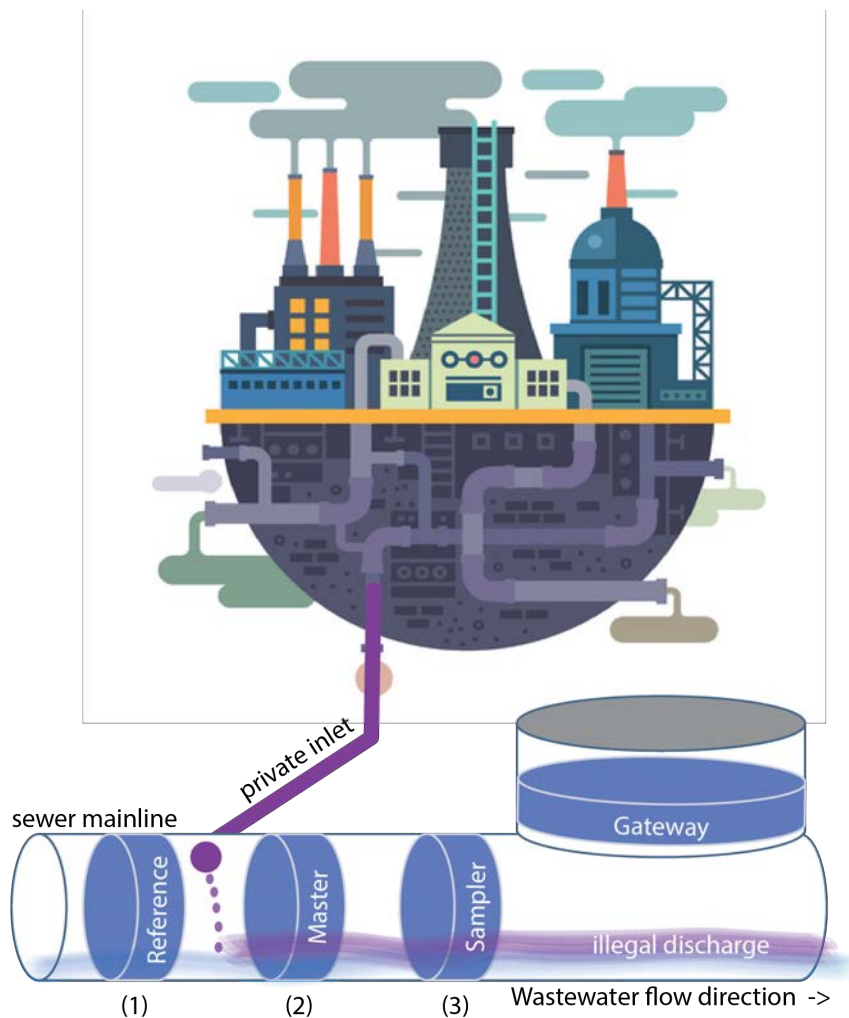
W wyniku (R11) i (R12) zdecydowano, że system Micromole powinien zawierać dodatkowe, szybko reagujące czujniki, które mogły wskazywać na obecność odpadów syntezy. W tym celu

konsorcjum zdecydowało się na dodanie czujników pH i przewodnictwa elektrycznego (EC z ang. Electrical Conductivity), mogących dokonywać pomiaru z częstotliwością 1 Hz. Jeżeli pH i EC wskazywały na potencjalną obecność odpadów syntetycznych, do weryfikacji wykrycia docelowych substancji chemicznych uruchamiał się wysoce specyficzny, jednorazowy czujnik elektrochemiczny. Drugą konsekwencją (R11) było to, że moduł pobierania próbek – zbierający dowody fizyczne – powinien być uruchamiany na podstawie wczesnego wskazania obecności odpadów syntezy w ściekach przez czujniki pH i EC. W rezultacie czujnik elektrochemiczny i moduł do pobierania próbek musiały działać równolegle i być uruchomiane przez czujniki pH i EC.

Oszacowano objętość sprzętu i podzespołów elektronicznych do pobierania próbek – spełniających (R2) - oraz czujnika elektrochemicznego – spełniając (R6). Zaobserwowano, że nie jest możliwe zaprojektowanie urządzenia z pierścieniem Micromole, które zawierałoby jednocześnie czujniki elektrochemiczne, czujniki pH i EC, jak i elementy do pobierania próbek w jednym urządzeniu o pojemności baterii wystarczającej do zasilania systemu przez trzy dni – spełniając (R3) – biorąc pod uwagę ograniczenia ilościowe omówione powyżej. W konsekwencji, przyjęte rozwiązanie sprzętowe przewidywało podział komponentów elektronicznych na trzy oddzielne urządzenia pierścieniowe do monitorowania pojedynczego prywatnego odpływu – patrz Rysunek 4 poniżej. Te trzy urządzenia pierścieniowe zawierały następujące elementy

- Pierścień 1 (umieszczony przed monitorowanym wylotem): wyposażony w czujniki pH i przewodności elektrycznej.
- Pierścień 2 (umieszczony za monitorowanym wylotem): wyposażony w czujniki pH i przewodności elektrycznej.
- Pierścień 3 (umieszczony za pierścieniem 2): wyposażony w czujnik elektrochemiczny i jednostkę próbkującą.

Poniższy rysunek przedstawia konfigurację sprzętową systemu używaną do monitorowania jednego gospodarstwa domowego.



Rysunek 4 wizualizacja systemu micromole

Ponieważ czujniki pH i przewodności elektrycznej – umieszczone w Pierścieniach 1 i 2 –miały inicjować wyzwolenie czujnika elektrochemicznego i jednostki próbkującej – znajdującej się w Pierścieniu 3, konieczne było dodanie bezprzewodowego sprzętu komunikacyjnego do przekazywania takich zdarzeń. W rezultacie trzy urządzenia pierścieniowe musiały tworzyć autonomiczną bezprzewodową sieć sensorową zasilaną bateryjnie. Oznacza to, że wszystkie trzy pierścienie musiały zawierać:

- główny moduł do komunikacji bezprzewodowej, analizy danych i ogólnej kontroli urządzenia pierścieniowego
- moduł zarządzania energią z bateriami do zasilania.

Zdjęcie poniżej przedstawia zaimplementowany pierścień Micromole wyposażony (w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara) w moduł główny, moduł pH, moduł EC, moduł zarządzania energią i jeden moduł baterii - – patrz Rysunek 5 poniżej.

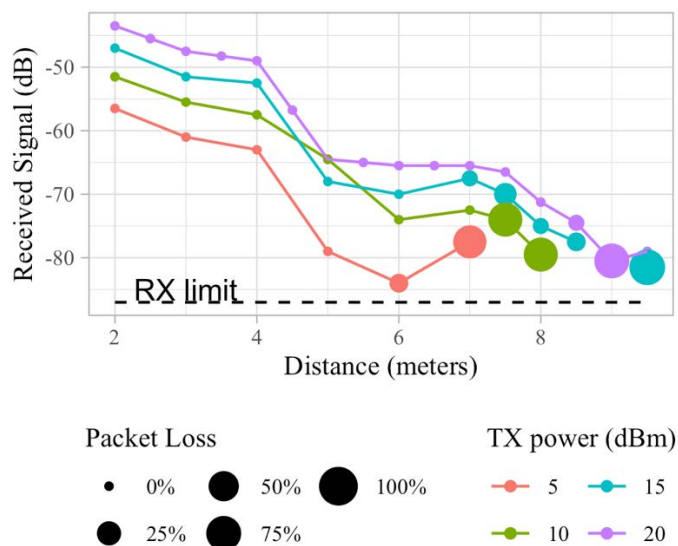


Rysunek 5 Pierścień micromole wyposażony w czujniki EC oraz pH

Moim pierwszym krokiem w kierunku zaprojektowania modułu głównego był wybór sprzętu: głównie kontrolera i radia. Badałem warunki propagacji radiowej w podziemnych rurach kanalizacyjnych poprzez eksperymenty w prywatnej linii kanalizacyjnej na terenie Wyższej Szkoły Policji w Legionowie przy użyciu generatora sygnału radiowego i analizatora widma – patrz Rysunek 6. Zbadałem wszystkie pasma ISM. W najlepszych warunkach, w rurach o średnicy 250 mm, 3 metry pod ziemią, przy zastosowaniu częstotliwości nośnej 169MHz z modulacją FSK i wzmocnieniem sygnału +20dBm, udało się osiągnąć maksymalnie blisko 15 metrów zasięgu transmisji przy niskim poziomie ścieków (prawie 2 cm wysokości). Wyniki tego eksperymentu są podsumowane na poniższym wykresie – patrz Rysunek 7 poniżej.



Rysunek 6 Testowanie zasięgu komunikacji systemu micromole'a w kanalizacji



Rysunek 7 Wyniki testów zasięgu systemu w kanalizacji. Zasięg (w metrach) vs odebrana moc radiowa

Konsorcjum rozważało również komunikację akustyczną. Jednak biorąc pod uwagę niską szybkość transmisji danych i duży wysiłek potrzebny do opracowania dojrzałego rozwiązania telekomunikacyjnego, została ona odrzucona. Rozważano również optyczną komunikację bezprzewodową, jednak biorąc pod uwagę wysoki poziom dokładności wymagany do pozycjonowania odbiornika i nadajnika pod kątem strumienia światła, zakrętów w kanałach i konieczności instalowania urządzeń Micromole za pomocą robota, rozwiązanie to również zostało odrzucone.

Biorąc pod uwagę słabe warunki propagacji radiowej i wymagania (R4), zdecydowałem, że system będzie wymagał dodatkowego urządzenia - bramy telekomunikacyjnej (ang. *Gateway*) - do przekazywania informacji z monitoringu do organów ścigania przez Internet. Projekt i wdrożenie bramy należało również do obowiązków kierowanego przeze mnie zespołu.

Komunikacja między ostatnim pierścieniem (Pierścień 3) a bramą miała być przewodowa, naruszając wymagania (R9), ale umożliwiającą spełnienie (R4) ze względu na słabe warunki propagacji radiowej. Wybrałem komunikację za pośrednictwem światłowodu ze względu na energooszczędność, zasięg oraz możliwość zastosowania niewielkich elementów elektronicznych i złączy.

Po wnikliwej analizie danych ograniczeń objętościowych modułu głównego i ograniczonej pojemności baterii (ze względu na ograniczenia objętościowe w pierścieniach), zdecydowałem się użyć mikrokontrolera EZR32WG330 firmy Silicon Labs, który zawierał kontroler ARM Cortex-M4F oraz podłączone poprzez magistralę SPI radio nadające częstotliwością radiową 169 MHz. Mikrokontroler pracował z maksymalną szybkością zegara 48 MHz i mógł obsługiwać aplikację binarną o rozmiarze nie większym niż 256 KB. Mikrokontroler posiadał zaledwie 16 KB pamięci ulotnej dla wbudowanej aplikacji.

4.3.2 Projektowanie, implementacje i testowanie oprogramowania wbudowanego H2020 Micromole

Zgodnie z pokazanym wcześniej schematem (Rys. 1), w dalszej części autoreferatu nazwałem pierwsze (z lewej na rysunku) urządzenie monitorujące IoT – umieszczone przed monitorowanym odpływem – urządzeniem *referencyjnym*. Drugie urządzenie monitorujące IoT – umieszczone za monitorowanym odpływem – nazwałem urządzeniem *nadrzędnym*. Trzecie monitorujące urządzenie IoT (z prawej na rysunku) nazwałem urządzeniem *próbującym*.

Jak wspomniano wcześniej ustalenie, czy szkodliwe ścieki pochodzą z konkretnego monitorowanego gospodarstwa domowego, polegało na porównaniu dwóch wielowymiarowych

szeregów czasowych obserwacji, jednego dostarczonego przez urządzenie referencyjne i drugiego dostarczonego przez urządzenie nadrzędne. Jedno z rozwiązań projektowych IoT dla tej aplikacji mogło polegać na wykorzystaniu podejścia do obliczeń w Cloud'zie lub Edge'u [2], w którym wszystkie pomiary z obu czujników na każdym urządzeniu są przesyłane na serwer w Cloud'zie lub Edge'u w celu przetwarzania danych i podejmowanie decyzji. Niestety takie podejście miało w naszej aplikacji następujące wady: a) wysokie zużycie energii ze względu na konieczność transmisji wszystkich próbek w trudnych warunkach propagacji radiowej w podziemnych rurach kanalizacyjnych, oraz b) potencjalne opóźnienia w podejmowaniu krytycznych czasowo decyzji systemów, z powodu zakłóceń w komunikacji powodowanych wahaniami poziomu ścieków oraz zakłóceń telekomunikacyjnych powodowanych przemieszczaniem się obiektów nad pokrywą wjazdu (takich jak pojazdy przejeżdżające lub zaparkowane na ulicy powyżej).

W odniesieniu do punktu drugiego, decyzje czasowo krytyczne dla systemu Micromole IoT obejmowały uruchomienie modułu próbkowania w odpowiednim czasie: tylko wtedy, gdy płynące ścieki przenosiły odpady syntezowe nad modułem próbkowania znajdującym się w urządzeniu IoT Micromole. Jeśli nie zostały wykonane w odpowiednim czasie, urządzenie do pobierania próbek mogło zbierać i napełniać pojemniki ściekami nie zawierającymi docelowych substancji.

Zamiast użycia wzorca projektowego Cloud-center lub Fog-center [3] do wykrywania anomalii online, zdecydowałem się zaprojektować rozproszony algorytm czasu rzeczywistego poprzez dystrybucję analizy danych sygnałów między obydwooma urządzeniami IoT w sposób minimalizujący liczbę ramek danych, które były wymieniane między obydwooma urządzeniami IoT, co zmniejszało ogólne zużycie energii i ograniczało czas odpowiedzi.

Zaproponowany przeze mnie rozproszony algorytm wykorzystywał filtr Kalmana do ustawienia linii bazowej dla pomiarów pH i EC w celu identyfikacji anomalii w każdym urządzeniu niezależnie. Te linie bazowe były aktualizowane po każdym pomiarze. W ten sposób kompensowane były normalne wahania pomiarów pH i EC ścieków – spowodowane np. opadami deszczu lub nieszczelnością rur. Następnie każde urządzenie ustawiało względne progi w odniesieniu do linii bazowej dla rosnących alarmów lokalnych. Jeśli próg był przekroczony w pierścieniu nadrzędnym, pierścień nadrzędny wysyłał pojedyncze żądanie do pierścienia referencyjnego z zapytaniem o stan alarmu lokalnego w pierścieniu. Po uzyskaniu odpowiedzi z pierścienia referencyjnego, pierścień nadrzędny w oparciu o stan alarmów lokalnych na pierścieniu referencyjnym mógł zdecydować, czy z monitorowanego obiektu została usunięta agresywna substancja - jeśli na pierścieniu referencyjnym nie występowały żadne alarmy, nadrzędny pierścień potwierdzał, że pozbyto się agresywnej substancji z monitorowanego obiektu (a nie przed nim). W takiej sytuacji pierścień nadrzędny po wstępnie skonfigurowanym czasie wysyłał żądanie aktywacji - usytuowanego w następnym pierścieniu - modułu próbkującego i powiadomienie do użytkowników końcowych poprzez bramę.

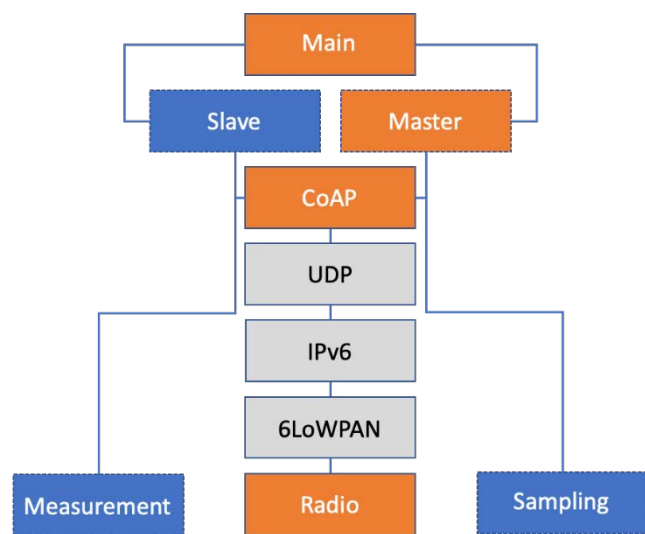
Więcej szczegółów na temat tego rozproszonego algorytmu wykrywania anomalii można znaleźć w [H4].

Zaprojektowany algorytm rozproszony zaimplementowałem początkowo za pomocą skryptów R, a następnie przetestowałem go *offline* przy użyciu pomiarów wcześniej zebranych za pomocą sprzętu laboratoryjnego działającego w sieciach kanalizacyjnych, oraz przy zrzutach rzeczywistych substancji docelowych. Po tej walidacji *offline*, programowałem rozproszony algorytm w mikrokontrolerze urządzeń pierścieniowych i bramy w języku C jako zestaw modułów oprogramowania, z których każdy powstał jako oddzielny proces obliczeniowy. Ze względu na konieczność przekazywania wiadomości pomiędzy tymi procesami obliczeniowymi, zdecydowałem się na użycie systemu operacyjnego RIOT-OS [5].

Niestety, w momencie pobrania kodu źródłowego RIOT-OS z jego publicznego repozytorium nie było w nim implementacji protokołu komunikacyjnego CoAP, sterowników radiowych dla układu EZR32WG330 poprzez magistralę SPI, obsługi płyty dla kontrolera Gateway SAME70, sterowników do zarządzania pamięcią zewnętrzną, sterowników odczytu czujników pH i EC, sterownika komunikacji optycznej, ani sterownika płytki próbkującej. Dlatego, oprócz implementacji algorytmu rozproszonego, wszystkie wymienione powyżej brakujące moduły oprogramowania zostały również opracowane przez mój zespół. Po zintegrowaniu przeze mnie protokołu komunikacyjnego CoAP do

systemu operacyjnego RIOT-OS, zaimplementowałem protokół warstwy aplikacji nad CoAP'em, sterowniki radia dla układu EZR32WG330 poprzez SPI, obsługę płyty kontrolera bramy oraz wymieniony powyżej algorytm rozproszony. Przegląd tych modułów oprogramowania można zobaczyć na poniższym rysunku.

Każde pole reprezentuje proces obliczeniowy zaimplementowany jako wątek w RIOT-OS – patrz Rysunek 8. Linie na Rysunku 8 oznaczają interfejsy przesyłania informacji między wątkami. Wątki na dole rysunku, tzn. *Measurement*, *Radio*, *Sampling*, implementują sterowniki niskiego poziomu do obsługi odczytu pomiaru czujnika, komunikacji z modułem radiowym i aktywacji fizycznego zbierania dowodów poprzez pobieranie próbek ścieków. Wątek *Slave* implementuje filtr Kalmana i porównanie progów dla alarmów lokalnych. Wątek *Master* wykonuje zapytanie pierścienia referencyjnego o alarmy pierścieniowo-lokalne, porównuje swoje pierścieniowe odniesienie z tymi odebranymi i decyduje o



Rysunek 8 Architektura oprogramowania pierścienia micromole'a

wyzwoleniu czujnika elektrochemicznego i jednostki próbkującej. Wątek *Main* nadzoruje inicjalizację urządzeń i sieci oraz okresowo wysyła komunikaty o utrzymaniu aktywności. Wątek *Idle* (nie pokazany na rysunku) jest również obecny na każdym urządzeniu i wdraża sprzętową funkcję uśpienia, gdy wszystkie inne wątki są bezczynne. Nie wszystkie wątki są obecne w każdym urządzeniu pierścieniowym Micromole. Wątki zaznaczone na pomarańczowo zostały przeze mnie zaimplementowane. Wątki zaznaczone na niebiesko zostały zaimplementowane przez mój zespół. Wątki zaznaczone na szaro były już obecne w używanej dystrybucji RIOT-OS.

System został zaimplementowany i przetestowany w dwóch obiektach: Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) w Berlinie oraz Wyższej Szkoły Policji w Legionowie.

KWB zaferowało 7-metrową metalową rurę kanalizacyjną umieszczoną nad ziemią, odprowadzającą ścieki z odrębnego terenu Berlina. Przepływ ścieków można było kontrolować, a dostęp do każdego punktu rury kanalizacyjnej był możliwy. W związku z tym, do przeprowadzenia kontrolowanych testów wykorzystano KWB. W jednym z najbardziej skomplikowanych eksperymentów 13 razy niemiecka policja przetestowała automatyczne wyzwalanie modułu próbkowania przez czujniki pH i EC systemu Micromole, przez wprowadzane przez policjanta niemieckiego konsorcjum różnych chemikaliów do strumienia ścieków. Zdjęcie stanowiska testowego i eksperymentów można zobaczyć na Rysunku 9 poniżej.

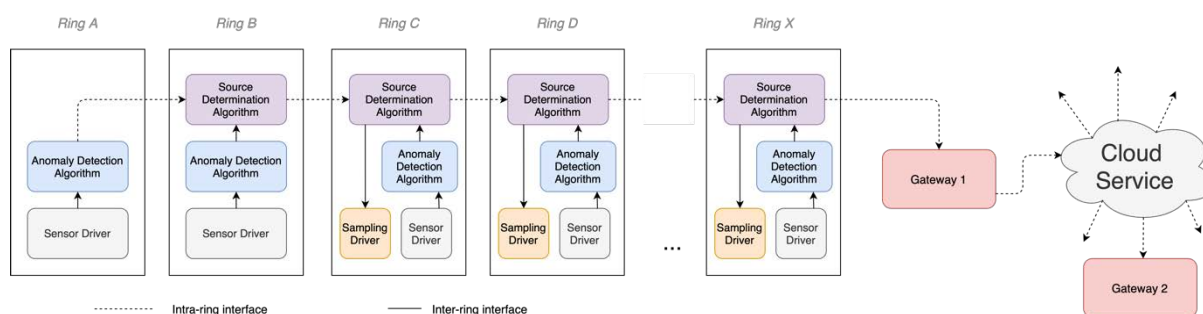


Rysunek 9 Testowanie systemu micromole przez policję niemiecką w KWB

Badania prowadzone w Legionowie przeprowadzono w działającej podziemnej rurze kanalizacyjnej, gdzie nie można było kontrolować przepływu ścieków, a dostęp do rur kanalizacyjnych był możliwy tylko ze studzienek.

4.3.3 Wzorzec architektury IoT dla autonomicznego wykrywania i wyzwalania akcji

Wcześniej opisany rozproszony algorytm monitorowania pojedynczego monitorowanego obiektu rozszerzyłem do systemu monitorowania składającego się z wielu urządzeń z pierścieniem Micromole, umożliwiającym monitorowanie zestawu kolejnych sąsiednich wlotów w sieci kanalizacyjnej. Aby to osiągnąć ustaliłem, że rola pierścienia Micromole dla konkretnego monitorowanego obiektu zależy od jego względnego położenia w stosunku do monitorowanego obiektu. W takiej koncepcji, pojedyncze urządzenie z pierścieniem Micromole mogłoby pełnić trzy role — referencyjny, nadrzędny i próbujący — dla trzech różnych monitorowanych obiektów – patrz Rysunek 10 poniżej.



Rysunek 10 Wzorzec architektury Hada - Hop-by-hop Anomaly Detection and Actuation

Jako przykład na powyższym rysunku pokazuję schemat funkcjonalności urządzeń pierścieniowych Micromole. W przypadku monitorowanego obiektu znajdującego się pomiędzy urządzeniami A i B, urządzenia A, B i C są odpowiednio urządzeniami referencyjnym, nadrzędnym i próbującym. Jednak dla monitorowanego obiektu znajdującego się pomiędzy urządzeniami B i C, urządzenia B, C i D są odpowiednio urządzeniami referencyjnym, nadrzędnym i próbującym. W ten sposób można monitorować i określać źródło zanieczyszczeń w sieci kanalizacyjnej z N wlotami, używając tylko $N + 1$ urządzeń pierścieniowych.

Sprawiłem architektury i wzorce projektowe dla typowych problemów IoT dostarczone w [6]. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą, żaden ze 143 wzorców architektury IoT i wzorców projektowych IoT cytowanych w [6] nie pasuje do charakterystyki kaskadowego monitorowania lokalizacji anomalii, jak przedstawiono w tej sekcji.

Podążając za nomenklaturą [6], poniżej przedstawiam uogólnienie wzorca architektury IoT:

- **Nazwa wzoru:** Wykrywanie i uruchamianie anomalii hop-by-hop (HADA z ang. *Hop-by-hop Anomaly Detection and Actuation*)
- **Cel:** Wyzwolenie elementu wykonawczego w systemie IoT w odpowiedzi w czasie rzeczywistym na wykrytą anomalię w sieci czujników i siłowników
- **Kontekst:** Istnieje zależność między propagacją obserwowanych zjawisk a łączem komunikacyjnym hop-by-hop czujnika IoT i elementów wykonawczych w taki sposób, że dla każdej pary urządzeń z bezpośrednią komunikacją, zjawiska mogą być obserwowane sekwencyjnie w całej sieci, a anomalię można wykryć głównie za pomocą danych zebranych przez sąsiadujące czujniki
- **Problem:** Wykrywanie anomalii na brzegu lub w chmurze jest kosztowne ze względu na trudne warunki komunikacji dla urządzeń wykrywających i uruchamiających IoT, albo istnieje nietolerowalne opóźnienie w komunikacji od węzła do usług położonych na brzegu chmury (ang. Edge), lub w samej chmurze (ang. Cloud), albo ich komunikacja jest zawodna. Natomiast, system IoT wymaga w czasie rzeczywistym natychmiastowego sygnalizowania urządzeń uruchamiających (np. węzła próbkującego w Micromole) IoT w odpowiedzi na wykrytą anomalię. Niezwykle ważne jest wykonanie procesu wykrywania anomalii, oraz niezawodność przesyłu sygnału do urządzeń uruchamiających.
- **Rozwiązanie:** Algorytm wykrywania anomalii zaimplementowany jest w każdym urządzeniu IoT przy użyciu pomiarów z czujników węzła IoT. Wynik algorytmu wykrywania anomalii jest przekazywany do następnego urządzenia IoT w kierunku obserwowanych zjawisk. Wyzwolenie urządzenia uruchamiającego w czasie rzeczywistym następuje po wykryciu anomalii, która nie została wykryta przez poprzednie sąsiednie węzły. Usługi w chmurze są powiadamiane o lokalizacji anomalii przez odpowiednie urządzenie uruchamiające IoT
- **Konsekwencje:** Ponieważ pomiary nie są wymieniane między urządzeniami IoT, ilość energii zużywanej do transmisji danych jest niska. Urządzenia IoT są zdolne do wyzwolenia elementów wykonawczych w czasie rzeczywistym.
- **Powiązane wzorce:** Cloud-on-the-loop [7], Device-to-Device [7]

Uważam, że zaproponowany wzorec architektury HADA IoT może być ponownie wykorzystany do projektowania systemów IoT w środowiskach podwodnych lub podziemnych lub w aplikacjach IoT do monitorowania środowiska, gdzie większość wdrożonych urządzeń IoT nie ma bezpośredniego połączenia z Internetem lub połączenie jest zawodne, powolne lub bardzo kosztowne. W środowisku, w którym urządzenia IoT mają bardzo ograniczoną łączność z Internetem, HADA działa lepiej pod względem energooszczędności i czasu przetwarzania niż rozwiązania oparte na chmurze i Edge. Niestety przetwarzanie w urządzeniu IoT nie zapewnia tak silnych możliwości obliczeniowych przetwarzania sygnałów, jakie oferują rozwiązania oparte na chmurze i Edge. Zaproponowany wzorec architektury HADA został opublikowany w [H4]

Projekt Micromole zakończył się 28 lutego 2019 r. Wszystkie wyniki naukowe i techniczne projektu zostały ocenione przez dwóch niezależnych recenzentów zewnętrznych i zaakceptowane. Dwa miesiące później zorganizowano pokaz na żywo dla niezależnych recenzentów na terenie Wyższej Szkoły Policji w Legionowie przy współpracy Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego Policji z różnymi substancjami chemicznymi w rzeczywistej sieci kanalizacyjnej. Prototyp Micromole osiągnął 6 poziom gotowości technologicznej (TRL6). Project Micromole został wyróżniony przez Komisję Europejską jako „Success Stories”.

4.4 Osiągnięcia podczas realizacji projektu H2020 SYSTEM

Podczas finalizacji projektu H2020 Micromole konsorcjum wypełniło kolejny wniosek o dofinansowanie projektu w ramach programu Komisji Europejskiej Horyzont 2020, który wykorzystuje większość wyników projektu H2020 Micromole. Ten kolejny projekt ma akronim SYSTEM² oznaczający tytuł „SYnergy of integrated Sensors and Technologies for urban sEcured environMent”.

Komisja Europejska zaakceptowała tylko jeden z dziewięciu (11,11%) wysłanych wniosków na finansowanie w ramach programu Horizont 2020. Projekt SYSTEM otrzymał prawie 8 mln euro dofinansowania z UE na 42 miesiące realizacji od listopada 2018 roku do lutego 2022 roku – numer umowy 787128. Konsorcjum było prowadzone przez FORMIT, a ja objąłem rolę pomysłodawcy projektu i lidera Work-Package’a. W składzie konsorcjum znajdowało się 20 organizacji, które są wymienione poniżej.

Nazwa organizacji	Typ organizacji	Kraj
Komenda Główna Polskiej Policji	Policja	Polska
Bundeskriminalamt	Policja	Niemcy
Fraunhofer Inst.	Instytut Badawczy	Niemcy
Capsenze	Firma	Szwecja
Blue Technologies	Firma	Polska
Politechnika Warszawska	Akademia	Polska
Universiteat der Bundeswehr Muenchen	Akademia	Niemcy
RESI Informatica	Firma	Włochy
T4i Engineering	Firma	Anglia
Sensichips	Firma	Włochy
USTAV HYDROLOGIE SLOVENSKEJ AKADEMIE VIED VEREJNA VYSKUMNA INSTITUCIA	Akademia	Słowacja
HOCHSCHULEN FRESENIUS GEMEINNUTZIGE TRAGERGESELLSCHAFT MBH	Akademia	Niemcy
ISEM-INSTITUT PRE MEDZINARODNU BEZPECNOST A KRIZOVE RIADENIE, NO	Instytut Badawczy	Słowacja
OSSERVATORIO SULLA SICUREZZA E DIFESA CBRNE	Policja	Włochy
BRATISLAVSKA VODARENSKA SPOLOCNOSTA.S.	Firma	Słowacja
ACQUALATINA SPA	Firma	Włochy
ACEA ATO2 SPA	Firma	Włochy
ROMA CAPITALE	Urząd	Włochy
MINISTERO DELLA DIFESA	Policja	Włochy
VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL	Akademia	Belgia

Głównym celem projektu H2020 SYSTEM było zaprojektowanie systemu fuzji danych dla lokalizacji laboratoriów produkujących narkotyki syntetyczne lub materiały wybuchowe w dużych aglomeracjach miejskich. System fuzji danych miał łączyć dane z heterogenicznych zestawów czujników, w tym z urządzeń Micromole, rozmieszczonych w różnych sieciach użyteczności publicznej na obszarze miejskim. Ponieważ sieć kanalizacyjna została uznana za jedną z trzech sieci użyteczności publicznej uwzględnionych w projekcie H2020 SYSTEM, system Micromole był jednym z podsystemów czujników zapewniających pomiary w celu fuzji danych.

W trakcie realizacji projektu SYSTEMU H2020 przyczyniłem się do następujących czterech osiągnięć:

- Adaptacja systemu H2020 Micromole do monitoringu dużych aglomeracji miejskich,
- Algorytm adaptacyjny do energooszczędnego pobierania próbek pH i EC ścieków,
- Algorytmy kompresji danych do transmisji pomiarów przez urządzenia końcowe IoT, oraz
- Algorytmy fuzji danych do lokalizacji tajnych laboratoriów narkotyków syntetycznych lub materiałów wybuchowych.

² <https://cordis.europa.eu/project/id/787128>

4.4.1 Adaptacja systemu H2020 Micromole do monitoringu dużych aglomeracji miejskich

Podczas gdy projekt H2020 micromole koncentrował się na opracowaniu narzędzia do zbierania dowodów nielegalnej produkcji narkotyków syntetycznych z pojedynczego zlokalizowanego monitorowanego obiektu, projekt H2020 SYSTEM skupił się na lokalizacji tych laboratoriów przy użyciu dużej sieci czujników o heterogenicznych i uzupełniających się możliwościach (takich jak pomiary z detektorów fotojonizacyjnych montowanych na dronach, czujników tlenków metali próbkujących powietrze, tandemowej spektroskopii masowej z chromatografią cieczą w oczyszczalniach ścieków itp.). Miało to następujące konsekwencje dla podsystemu Micromole:

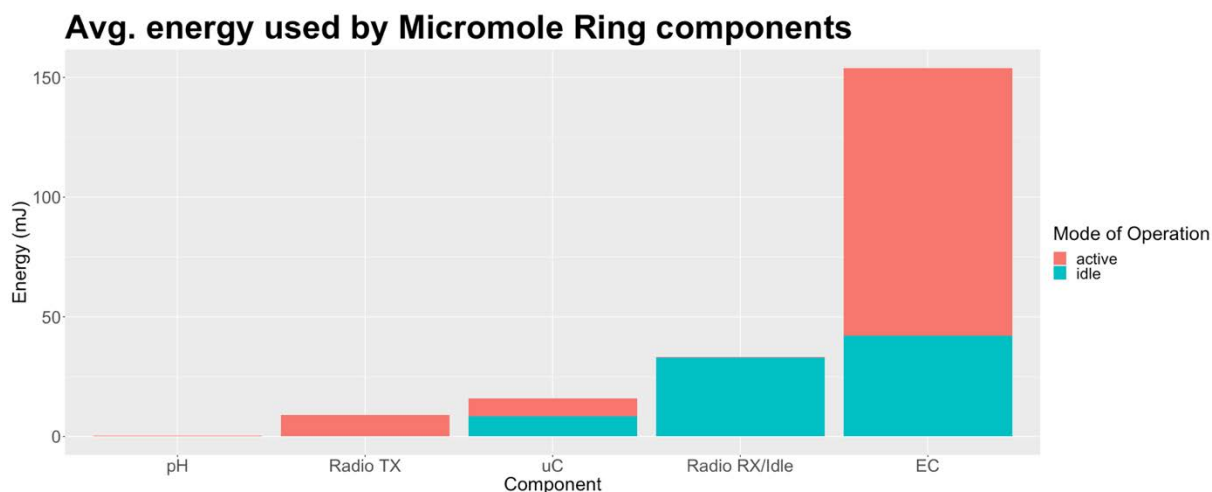
- (R1a) Biorąc pod uwagę dużą liczbę pomiarów z czujników i złożoność modeli sieci dla dużych obszarów miejskich, zdecydowałem, że przetwarzanie wszystkich pomiarów z czujników – w tym pomiary pH i EC z pierścieni Micromole – musiało odbywać się w chmurze. Przypomnijmy Czytelnikowi, że w rozwiązaniu H2020 Micromole żadne pomiary nie były przesyłane między urządzeniami, ani do Chmury.
- (R2a) Biorąc pod uwagę potencjalne wolniejsze czasy reakcji na uruchomienie próbkowania ścieków, spowodowane opóźnieniami w komunikacji sieci mobilnej z usługami w chmurze, oraz potencjalne rozcieńczenie substancji docelowych na duże odległości, należało zaprojektować nowe, oddzielne, samodzielne urządzenie do pobierania i przechowywania próbek, z możliwością przechowywania dużej ich liczby i objętości.
- (R3a) Ze względu na słabą wydajność czujnika elektrochemicznego zastosowanego w projekcie H2020 Micromole, rolę i funkcjonalność zapewnianą przez czujnik elektrochemiczny zastąpiono urządzeniem komercyjnym LC-MS/MS (Chromatografia cieczą z tandemową spektrometrią mas).
- (R4a) Ponieważ system miał być używany przy braku twardego dowodu na produkcję narkotyków syntetycznych, wymagany czas pracy podsystemów miał wynosić nie mniej niż 14 dni bez wymiany baterii.

Z powodu (R1a), musiałem przeprojektować architekturę systemu Micromole i ponownie ją wdrożyć tak, aby była zgodna z klasycznym systemem IoT opartym na chmurze.

Zmodyfikowałem oprogramowanie urządzeń pierścieniowych Micromole. Ponieważ wyzwaniem alarmu miało się odbywać się w chmurze i nie następowało pobierania próbek, usunąłem wątki Master i Sampling (z Rysunku 8). Co więcej, zmodyfikowałem wątek Slave tak, aby okresowo – w odpowiedzi na żądanie obserwacji zasobów CoAP – wysyłał (ang. *Push*) ostatni zestaw pomiarów EC i pH do bramy. Oprogramowanie sprzętowe bramy również zmodyfikowałem, aby umożliwić tymczasowe przechowywanie tych pomiarów i ich dalsze przekazywanie do chmury w formacie JSON. Przeprowadziłem modyfikacje firmware związane z transmisją próbki pomiędzy urządzeniami pierścieniowymi Micromole a bramą.

Partnerzy konsorcjum z Uniwersytetu Fresenius zidentyfikowali markery chemiczne do produkcji leków syntetycznych, które można zidentyfikować za pomocą technik LC-MS/MS. Urządzenie LC-MS/MS zostało zamontowane w oczyszczalni ścieków koło Idstein w Niemczech w celu testowania i pilotażu rozwiązań projektu. Współpracowałem z kolegami z Uniwersytetu Fresenius przy zaprojektowaniu i wdrożeniu oprogramowania pośredniego do integracji analizy z LC-MS/MS z pomiarami scentralizowanego przetwarzania usług w chmurze ze wszystkich innych czujników. Efekt tych wysiłków opublikowano w [H5].

Niestety przesyłanie wszystkich pomiarów z każdego pierścienia Micromole do chmury w celu ich przetworzenia wiązało się z zużyciem większej ilości energii w każdym urządzeniu, co utrudniało spełnienie wymagania (R4a). Dlatego zbadałem zużycie energii każdego pojedynczego modułu urządzenia pierścieniowego w każdym trybie pracy – patrz na Rysunek 11 poniżej. Zaobserwowałem, że duże ilości energii pobierane są głównie podczas transmisji radiowej pomiarów oraz podczas pomiaru przewodności elektrycznej ścieków. Następnie zbadałem, zaprojektowałem i wdrożyłem dwa różne rozwiązania programowe w celu zmniejszenia zużycia energii każdego urządzenia pierścieniowego, które zostały przedstawione w kolejnych dwóch podrozdziałach.



Rysunek 11 Zużycie energii pierścienia Micromole'a

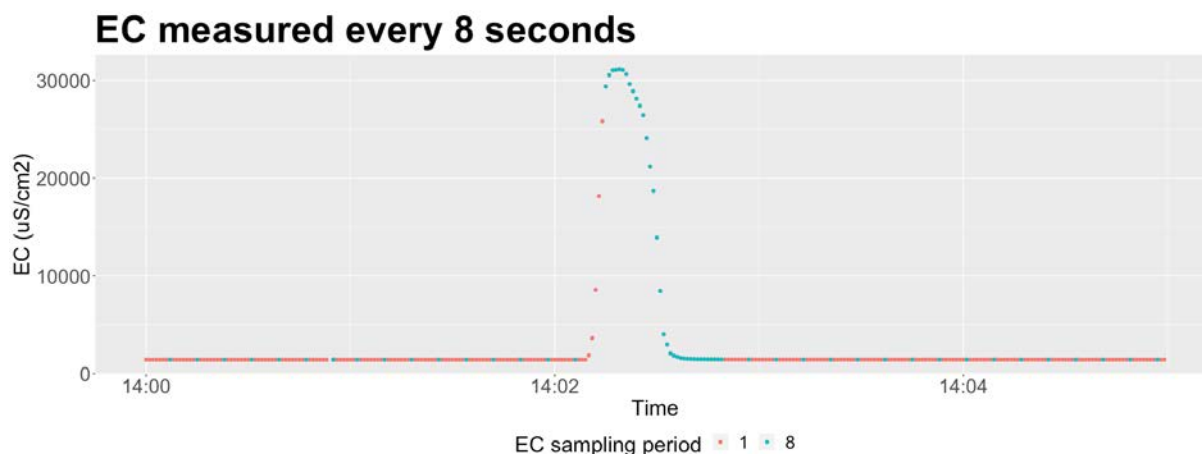
4.4.2 Algorytm adaptacyjny do energooszczędnego pobierania próbek pH i EC ścieków

Zmierzyłem średnią energii pobieranej przez czujnik w ciągu sekundy. Dla pomiaru pH było to średnio ~350 mikrodzuli, podczas gdy dla pomiaru EC było to średnio ~112 milidzuli. Biorąc pod uwagę, że substancja chemiczna odprowadzana do ścieków miała powodować nagłą zmianę obu wartości – pH i EC – zaprojektowałem algorytm – nazywany w konsorcjum projektowym *adaptowalna częstotliwość pomiaru* (ang. *adaptive rate*) – który dostosował okres pomiarowy EC w czasie rzeczywistym na podstawie zmienności względem do oczekiwanej wartości pH i EC. Pożądanym efektem był to, że nieoczekiwana zmiana EC lub pH zwiększała szybkości pomiaru i użycia modułu EC, podczas gdy pomiar EC lub pH z wartościami zbliżonymi do poprzednich, zmniejszał liczbę pomiarów pobranych w czasie i wykorzystanie modułu EC.

Rdzeniem algorytmu adaptowalnej częstotliwości pomiaru jest regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID), który ma na celu kontrolowanie wzmocnienia filtra Kalmana (w ang. *Kalman filter gain*) używanego do prognozowania bazowego poprzez dostosowanie tempa pomiaru EC.

Podczas eksperymentów z algorytmem adaptowalnej częstotliwości pomiaru w przypadku przepływu czystej wody zaobserwowałem, że częstotliwość pomiaru modułu EC wynosiła 8 sekund podczas gdy żadne substancje nie były odprowadzane, i wzrastała do 1 sekundy po odczytaniu kilku nieoczekiwanych pomiarów. Poniższy Rysunek 12 przedstawia za pomocą niebieskich i czerwonych kropek pomiary wykonane, gdy zaproponowany algorytm działa i nie działa, odpowiednio, dla tego samego zdarzenia zrzutu. Bez zaproponowanego algorytmu (czerwone kropki), pierwsza próbka EC odbiegająca od linii podstawowej jest wykrywana o 14:02:10. Przy włączonym algorytmie (niebieskie kropki), próbka EC odbiegająca od linii podstawowej jest wykrywana 5 sekund później, o 14:02:15. Identyfikacja tej niestandardowej próbki wyzwała większą częstotliwość pomiaru, tj. co sekundę. Częstotliwość pomiaru jest zmniejszana ponownie raz na osiem sekund jeśli algorytm zauważy, że pomiary są bliskie linii bazowej, tzn. o 14:02:49.

Dzięki temu algorytmowi średnia ilość energii używanej przez moduł EC była automatycznie zmniejszana o jedną ósmą (12,5%), gdy algorytm nie obserwował nagłych zmian pH lub EC. Niemniej jednak należy zauważyć, że zastosowanie algorytmu mogłoby przeoczyć krótko trwające zdarzenia, np. trwające krócej niż ~20 sekund. Dlatego zalecałem jego stosowanie w rurociągach, w których prędkość przepływu jest niska lub gdzie było wiadomo, że potencjalne źródła zrzutu znajdują się w pewnej odległości od punktu pomiarowego.



Rysunek 12 - Porównanie częstotliwości próbkowania po włączeniu algorytmu adaptive-rate

4.4.3 Algorytmy kompresji danych do transmisji pomiarów przez urządzenia końcowe IoT

Jak widać na wykresie zużycia energii przez elementy pierścienia Micromole (Rysunek 13), drugim źródłem wysokiego zużycia energii jest transfer danych za pomocą radia.

Pomiary EC i pH są przesyłane między pierścieniami Micromole i Gateway przy użyciu protokołu CoAP, przesyłanego przez UDP, IPv6 i 802.15.4. Ponieważ ramki radiowe 802.15.4 mogą przenosić maksymalnie 127 bajtów, zdecydowałem się użyć 6LoWPAN do kompresji nagłówków IPv6 i UDP. Dzięki temu liczba bajtów wykorzystywanych przez nagłówki wszystkich tych protokołów wynosi 42 bajty (33% maksymalnej długości ramki), pozostawiając 85 bajtów na dane aplikacji w każdej ramce radiowej. Ponieważ energia zużywana przez radio podczas nadawania i odbioru była proporcjonalna do całkowitej liczby transferowanych bajtów, naturalną decyzją było zmaksymalizowanie liczby pomiarów EC i pH, które miały być przesyłane w jednej ramce, zmniejszając średnie straty energii na transfer nagłówka protokołu na pomiar.

Gdy w pobliżu czujnika brak było zrzutu agresywnych podejrzanych chemikaliów, kompozycja ścieków była jednorodna. W takich okolicznościach oczekiwano, że zmierzone wartości pH i EC mogą się różnić tylko ze względu na szum czujnika pH lub EC. Przeanalizowałem różne metody wykorzystania małej wariancji pomiarów sensorowych w takich warunkach, do kompresji szeregów czasowych danych pomiarowych sensorów w czasie rzeczywistym.

Na początku zastosowałem koder Rice'a będący rezultatem moich prac w projekcie FP7 Goldfish i dostosowałem go do kodowania pomiarów EC i pH. Następnie zbadałem koder Sprintz dla systemów IoT zaproponowany przez Blalocka et. al w [8]. Biorąc pod uwagę wyższą złożoność algorytmu kodowania Sprintz, moim celem była analiza Sprintz pod kątem całkowitego osiągniętego zużycia energii. Zużycie energii oszacowałem biorąc pod uwagę zużycie energii ponoszone przez CPU na wykonanie algorytmu Sprintz, oraz zużycie energii na transmisję skompresowanych pomiarów. Ponieważ pobór prądu i czas wykonania zależał od użytego mikrokontrolera i zestawu danych, algorytm Sprintz został oceniony na trzech różnych platformach (dwie z nich są wykorzystywane dla bramy i pierścienia Micromole) i 10 zestawów danych (dwa z nich to pH i EC).

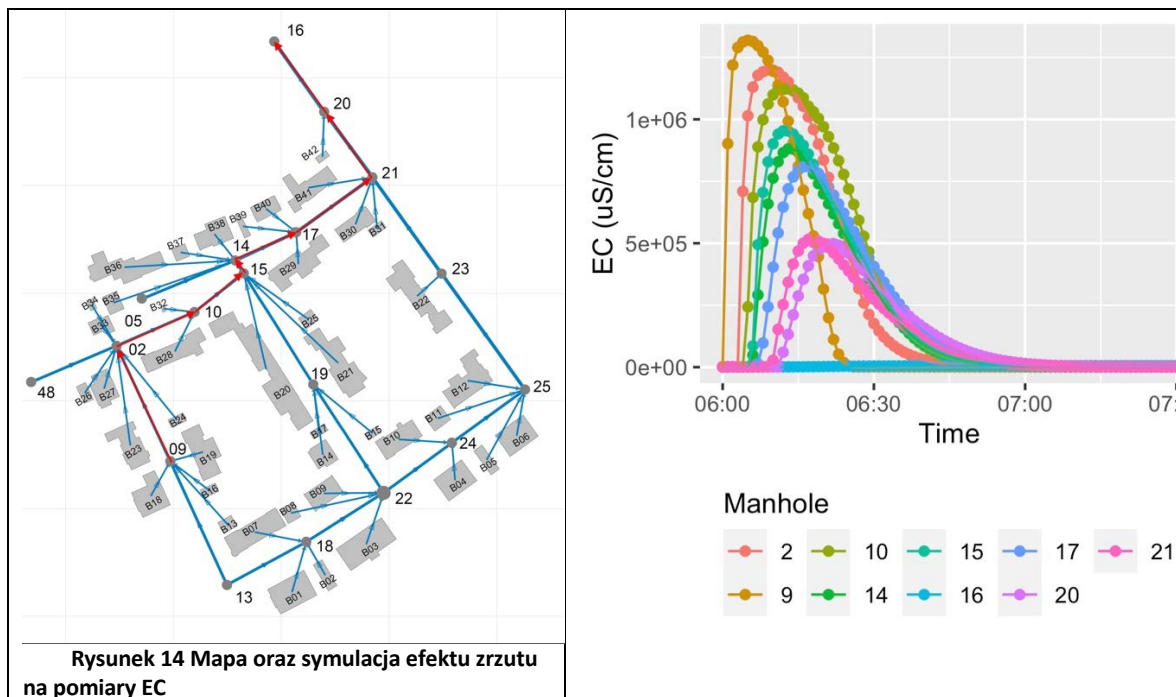
W artykule napisanym wspólnie z moim studentem, panem Norbertem Niderlą, zaproponowaliśmy odmianę algorytmu kodowania Sprintz dla sieci o małej mocy i stratnych, który pod względem efektywności energetycznej przewyższa w większości przypadków wydajność kodów Golomb-Rice. Artykuł ten jest w trakcie redakcji.

Na koniec przeprowadzono badanie porównawcze obejmujące 11 różnych algorytmów bezstratnej kompresji danych. Badanie porównawcze zostało napisane w formie ankiety. Artykuł ten jest w trakcie redakcji.

4.4.4 Lokalizacja i Fuzja danych

Głównym celem projektu H2020 SYSTEM jest dostarczenie systemu fuzji danych do lokalizacji tajnych laboratoriów narkotyków syntetycznych i materiałów wybuchowych.

Eksperti zajmujący się modelowaniem zjawisk propagacji zrzutów w sieci kanalizacyjnej zwrócili uwagę, że kształt pików generowanych przez zdarzenia zrzutowe zmienia się wzdłuż sieci kanalizacyjnej. Jako przykład, Rysunek 13 poniżej pokazuje po lewej stronie sieć kanalizacyjną, w której zdarzenie zrzutu miało miejsce w pobliżu włazu 09. Prawy rysunek poniżej pokazuje obserwowane szeregi czasowe EC w 9 lokalizacjach poniżej punktu zrzutu. Jak można zaobserwować, gdy ścieki są rozrzedzane w trakcie spływu, piki stają się krótsze i szersze.



Obserwacja ta postawiła pytanie, czy kształt obserwowanego piku zrzutu w określonej lokalizacji może dostarczyć wystarczających informacji do wskazania punktu źródłowego zrzutu w sieci kanalizacyjnej.

Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykorzystałem algorytmy uczenia maszynowego. Te algorytmy uczenia maszynowego zostały opracowane we współpracy z byłą studentką Panią Magdaleną Buras i opublikowane³ w [H6]. Podejście przyjęte w tej publikacji polegało na rozważeniu dużego zestawu różnych zdarzeń zrzutu w sieci. Zdarzenia zrzutu były symulowane przez partnera projektu H2020 SYSTEM, Steffena Krause, z Uniwersytetu Sił Zbrojnych w Monachium. Każde symulowane zdarzenie zrzutu dawało szereg czasowy pomiarów pH i EC w kilku punktach poniżej punktu zrzutu. Kilka cech każdego wynikowego szeregu czasowego wartości pH i EC dla każdego symulowanego zrzutu zostało wyodrębnionych i wykorzystanych do szkolenia przez algorytmy uczenia maszynowego. Algorytmy uczenia maszynowego mają dwa cele: po pierwsze zidentyfikowanie rodzaju substancji, która została zrzuczona, po drugie, oszacowanie odległości między punktem zrzutu, a punktem pomiarowym. Wynikiem tego algorytmu uczenia maszynowego nie jest lokalizacja w sieci kanalizacyjnej, ale oszacowanie odległości między punktem pomiarowym a punktem źródłowym zrzutu. Z naszych eksperymentów wynika, że: a) wynikowe wartości dokładności i rozwiązania problemu identyfikacji mogą sięgnąć 96%, jak i b) mediana błędu uzyskanego przy estymacji problemu lokalizacji źródła może wynosić nawet 6,30 metra, co odpowiada potrzebom projektu H2020.

Zaobserwowano jednak, że dane symulacyjne wykorzystywane do uczenia algorytmów uczenia maszynowego mogą różnić się od rzeczywistych pomiarów, jeśli w sieci kanalizacyjnej występują osady lub zatory rur. Co więcej, wymagana duża ilość danych do treningu utrudnia szybkie

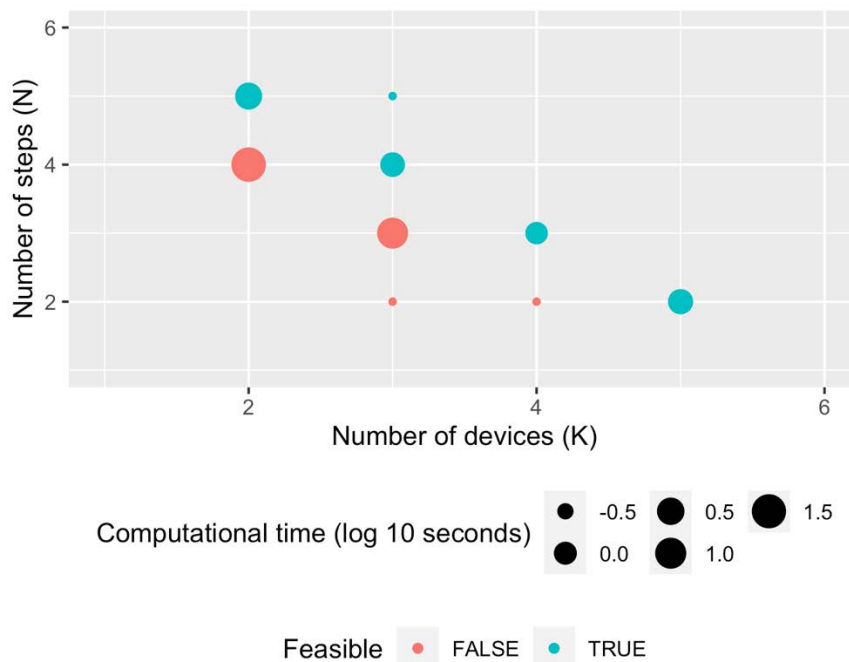
³ <http://doi.org/10.3390/s21103426>

przyswojenie tego rozwiązania. W związku z tym zacząłem pracować nad kolejnymi dwoma podejściami do określania lokalizacji nielegalnego zrzutu.

Druga metoda obliczeniowa została zaprojektowana we współpracy z dr hab. inż. Arturem Tomaszewskim, byłem prowadzącym zakład, w której jestem zatrudniony, i zapewnia strategię rozmieszczenia ograniczonego zestawu czujników w celu zlokalizowania tajnego laboratorium. W przeciwieństwie do pierwszego podejścia, uważaliśmy, że szeregi czasowe pomiarów były wstępnie przetwarzane i że istniał binarny algorytm klasyfikacji szeregów pomiarów wskazujący na obecność (lub brak) substancji docelowej w określonym punkcie sieci kanalizacyjnej. Przykładem tego algorytmu klasyfikacji binarnej może być prosta wartość progowa dla pomiarów EC lub pH. Założyliśmy, że liczba dostępnych czujników była ograniczona i niewystarczająca do indywidualnego monitorowania każdej prywatnej posesji. Strategia wdrażania zawierała sekwencję kroków wdrażania ograniczonego zbioru czujników. Innymi słowy, strategia rozmieszczania zapewniała lokalizację rozmieszczenia dla małego zestawu czujników oraz sposób, w jaki takie lokalizacje można było zmienić, gdy podzbiór tych czujników wykryje obecność substancji docelowej. Nowe pozycje czujników uwzględniały zakres wykrywania czujników umieszczonych na poprzednich etapach, aby iteracyjnie redukować przeszukiwany obszar do pojedynczej własności prywatnej. Operator sieci kanalizacyjnej powinien był przenieść lub rozmieścić czujniki w tych nowych lokalizacjach. Ta metoda obliczeniowa zapewniała sekwencję kroków, którą należało wykonać, aby rozmieścić dany zestaw czujników. Nasza metoda obliczeniowa gwarantowała, że maksymalna liczba kroków potrzebnych do określenia ze 100% pewnością lokalizacji potencjalnego źródła zrzutu była minimalna.

Rozwiązanie tej procedury można postrzegać jako drzewo decyzyjne. W naszym drzewie decyzyjnym każdy węzeł drzewa reprezentuje krok procedury: zestaw pozycji, w których należy rozmieścić ograniczony zestaw czujników. Każda gałąź wychodząca z węzła drzewa decyzyjnego reprezentuje potencjalne wyniki procesu wykrywania prowadzącego do następnego kroku. Zdefiniowaliśmy procedurę obliczeniową jako program optymalizacyjny, który możliwy był do wykonania za pomocą większości współczesnych narzędzi matematycznych do optymalizacji.

Proponowane podejście przetestowaliśmy na małej podzlewni. Poniższy Rysunek 24 przedstawia wykonalność różnych konfiguracji wdrożeń oraz czas obliczeniowy potrzebny do tego, aby ten przykładowy przypadek został rozwiązany za pomocą typowego laptopa. Na przykład zielony znacznik w koordynatach (4,3) reprezentuje wykonalne rozwiązanie problemu poprzez użycie nie więcej niż czterech urządzeń sensorowych (K) do monitorowania całego obszaru podzlewni i umożliwienie przesunięcia tych czterech czujników maksymalnie trzy razy (N). Czerwone znaczniki określają niewykonalne rozwiązanie problemu. Jako przykład - wiedzieliśmy, że nie jest możliwe monitorowanie całego obszaru podzlewni za pomocą czterech czujników w dwóch lub mniej krokach.



Rysunek 15 Rozwiązania modelu lokalizacji przy różnych wartości n i k

Trzecia opracowana metoda bierze pod uwagę ograniczenia geometryczne oraz prędkości przepływu w kanalizacji. Ze względu na ograniczenia geometryczne i efektywność energetyczną wszystkie baterie przydzielone do urządzenia czujnikowego powinny mieć tę samą pojemność. Żywotność urządzenia zależy od przydzielonej pojemności baterii urządzenia czujnikowego i częstotliwości próbkowania czujnika. Częstotliwość pobierania próbek przez czujnik należy ustawić w zależności od prędkości przepływu w rurze, w której jest on umieszczony. Rury kanalizacyjne o dużej prędkości przepływu wymagają większej częstotliwości próbkowania z podłączonych czujników, aby uniknąć pominięcia szybko przepływających substancji zanieczyszczających. Dlatego całkowity koszt urządzenia czujnikowego powinien uwzględniać koszt samych elektrod czujnikowych jak i koszt wybranej liczby przydzielonych jednostek akumulatorowych. Problem optymalizacji został opublikowany w [H7] a następnie rozszerzony w [H8]. Obie wspomniane wcześniej metody optymalizacji nie zostały zaimplementowane w ostatecznym prototypie projektu.

Algorytm fuzji danych zaimplementowany dla prototypu projektu SYSTEM opisano w [H9]. Projekt i implementację wykonali koledzy z Instytutu Informatyki PW, a ja przedstawiłem wymagania techniczne dla algorytmu fuzji danych oraz przygotowałem zbiory danych do jego oceny.

Niestety, ze względu na stopień bezpieczeństwa wszystkich trzech projektów europejskich (EU Restricted i EU Classified), w których brałem udział, nie było możliwe upublicznienie wszystkich wyników projektu poprzez publikacje naukowe.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Uczestniczyłem w trzech projektach europejskich, z których dwa koordynowałem. Łącznie współpracowałem z 34 instytucjami. Poniżej opisano instytucje, z którymi współpraca dotyczyła badań.

5.1 Aktywność Naukowa Zrealizowana W Ramach Projektu FP7 Goldfish

1. Zastrzeżony raport wydajności prototypu Goldfish-light. Raport ten został opracowany z następującymi partnerami konsorcjum.

- Francuska firma. Ocena wydajności prototypów Goldfish i Goldfish-light pod względem energii i czasu reakcji
- Chorwacka uczelnia. Integracja urządzenia do zbierania energii i optymalizacja energii prototypu Goldfish-light

2. Dwa opublikowane artykuły naukowe. Publikacje wynikały ze współpracy z kolumbijską uczelnią. Publikacje te można znaleźć w [10] i [11]:

5.2 Aktywność Naukowa Zrealizowana W Ramach Projektu H2020 Micromole

Sześć zastrzeżonych raportów projektu zostało opracowane z partnerami konsorcjum.

- Raporty D2.1 oraz D2.3 z projektu H2020 Micromole.
 - Bundeskriminalamt (DE) - Definicja wymagań systemowych, projekt rozwiązania Micromole i jego ocena z odpadami chemicznymi
- Raporty D7.2 oraz D7.6 z projektu H2020 Micromole.
 - Fraunhofer Gesellschaft Zur Foerderung Der Angewandten Forschung E.V. (DE) - Projekt osprzętu pierścienia Micromole i integracja prototypu.
- Raport D4.8 z projektu H2020 Micromole.
 - Universite Lyon 1 Claude Bernard (FR) - Konstrukcja modułu próbkującego dla pierścieni Micromole
- Raport końcowy projektu H2020 SYSTEM
 - Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Policji (PL) - Ewaluacja systemu Micromole w rzeczywistej sieci kanalizacyjnej w Legionowie.

Ponadto, jeden artykuł naukowy – w [4] - został opracowany ze współpracą z Universitaet Der Bundeswehr Muenchen (DE). Partner ocenił wydajności systemu Micromole poprzez symulacje.

5.3 Aktywność Naukowa Zrealizowana W Ramach Projektu H2020 SYSTEM

Dwa zastrzeżone raporty projektu zostały opracowane z partnerami konsorcjum.

- Raport D4.3 z projektu H2020 SYSTEM. Hochschule Fresenius Gemeinnutzige Gmbh (DE) ocenił system Micromole w rzeczywistej sieci kanalizacyjnej w Idstein, DE.
- Raport D1.1 z projektu H2020 SYSTEM. Resi Informatica Spa (IT) opisał architekturę rozwiązania SYSTEM i wymagań dotyczących fuzji danych.

Najbardziej istotne wyniki i rezultaty raportu D4.3 zostały opublikowane w [12].

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Od 2013 r. jestem adiunktem badawczo-dydaktycznym na Politechnice Warszawskiej. Tabela poniżej podsumowuje prowadzoną aktywność dydaktyczną od rozpoczęcia pracy na stanowisku adiunkt.

Nazwa, rodzaj zajęć	Rok akademicki	Rodzaj studiów, kierunek/specjalność, semestr
Projektowanie Sieci Telekomunikacyjnych (PSTKM) - projekty	2013Z, 2013L, 2014Z, 2014L	Studia II stopnia (PZ-TKM)
Techniki Internetu (TINE) - ćwiczenia	2013Z, 2013L, 2014Z, 2014L	Studia I stopnia - EIT (sem.4) - A4
IP Multimedia Subsystem (EIMS) - projekty	2013Z, 2013L, 2014Z, 2014L	ECE programme taught in English
Grafy i sieci (GIS) - projekty	2013Z, 2013L, 2014Z, 2014L	Studia II stopnia (PZ-OTR, PZ-OTI, PZ-OTJ)
Pracownia probl. mag NP	2013L	
Przygot. pracy dypl. mgr NP	2013L	
Edycja pracy dypl. mgr	2013L, 2013Z	
Edycja pracy dypl. inż ang	2013L, 2013Z	
Przygot. pracy dypl. mgr NP (IN)	2013L, 2013Z	
Pracownia inż. 1 ang	2013Z	
Pracownia inż. 2 ang	2013Z	
Pracownia naukowa 1-7	2013L	
Pracownia inż. 1 NP	2014L	
Switching and Routing (ESWIT) – wykłady, laboratoria	2016L	ICT programme taught in English
Internet of Things (EIOT) – wykłady, laboratoria, ćwiczenia	2017L, 2018L, 2019L, 2020L, 2021L, 2022L	ICT programme taught in English
Internet Technologies and Standards (EINTE) – wykład oraz ćwiczenie lab.	2016Z, 2017L, 2017Z, 2018L, 2018Z, 2019L, 2019Z, 2020L, 2020Z, 2021L, 2021Z	ICT programme taught in English
Projektowanie sieci telekomunikacyjnych (PSTKM) - projekt	2015Z	Studia II stopnia (PZ-TKM)
IP Multimedia Subsystems (EIMS) - projekt	2015Z	ICT programme taught in English
Architektura sieci telekomunikacyjnych (ARSTE) - wykład	2017L, 2018Z	Studia I stopnia - EIT
Techniki Internetu (TINE) – laboratorium, wykład	2015Z, 2016Z, 2017L, 2018L, 2018Z, 2019L	Studia I stopnia - EIT
Obiekty Internetu Rzeczy (OBIR) - wykład	2017L, 2017Z, 2018Z	Studia I stopnia - OTT, OTS
Pracownia dypl. inż. 1 (PD1)	2015Z, 2016Z, 2018L, 2019L	
Pracownia dypl. inż. 2 (PD2)	2015Z, 2016L, 2018Z, 2019L	
Edycja pracy dypl. inż (EPDI)	2015Z, 2016L, 2016Z, 2017L, 2018Z, 2019L	
Pracownia problemowa magisterska (PPMGR)	2019L	

Pracownia dyplomowa magisterska (PDMGR)	2017L	
Przygotowanie pracy dyplomowej magisterskiej (PDYM)	2017L	
Senior Design Project 1(ESDP1)	2018L, 2019L	
Senior Design Project 2 (ESDP2)	2018L, 2019L	
Master of Science Project 1 (EMSC1)	2017L, 2019L	
Master of Science Project 2 (EMSC2)	2017L, 2017Z, 2019L	
Master of Science Project 3 (EMSC3)	2017L, 2017Z, 2018L, 2018Z, 2019L	
Master Diploma Edition (EMDE)	2017Z, 2018L, 2018Z, 2019L	
Programowanie systemów Internetu Rzeczy i aplikacji sieciowych (PSIR) – wykład oraz laboratoria	2021Z	Studia I stopnia
Sieci mobilne i sieci Internetu Rzeczy (SMSIR) – wykład oraz laboratoria	2021Z	Studia I stopnia

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

- 2018 – Wyróżnienie „success story” od Komisji Europejskiej dla koordynowanego przeze mnie projektu H2020 Micromole, za prawidłowe osiągnięcie rezultatów projektu.
- 2016 - Wybrany kandydat (na 10 w całym kraju) do nagrody Kryształ Brukseli przyznawanej przez Krajowy Punkt Kontaktowy Komisji Europejskiej w Polsce.
- 2009 - Nagrody Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w 2009 roku.



(podpis wnioskodawcy)

8. Works Cited

- [1] F. Solano, „On the Optimal Calculation of the Rice Coding Parameter,” *MDPI Algorithms*, nr 13, p. 181, 2020.
- [2] I. Martinez, A. S. Hafid i A. Jarray, „Design, Resource Management, and Evaluation of Fog Computing Systems: A Survey,” *IEEE Internet of Things Journal*, tom 8, nr 4, pp. 2494-2516, 2021.
- [3] M. Syed, E. Fernandez i M. Ilyas, „A Pattern for Fog Computing,” w *Proceedings of the 10th Travelling Conference on Pattern Languages of Programs*, 2016.
- [4] F. Solano, S. Krause i C. Wollgens, „An Internet-of-Things Enabled Smart System for Wastewater Monitoring,” *IEEE Access*, tom 10, pp. 4666-4685, 2022.

- [5] E. Baccelli, C. Gündoğan, O. Hahm, P. Kietzmann, M. S. Lenders, H. Petersen, K. Schleiser, T. C. Schmidt i M. Wählisch, „RIOT: An Open Source Operating System for Low-End Embedded Devices in the IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, tom 5, nr 6, pp. 4428-4440, 13 March 2018.
- [6] H. Washizaki, S. Ogata, A. Hazezama, T. Okubo, E. B. Fernandez i N. Yoshioka, „Landscape of Architecture and Design Patterns for IoT Systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, tom 7, nr 10, pp. 10091-10101, 18 June 2020.
- [7] G. Bloom, B. Alsulami, E. Nwafor i I. C. Bertolotti, „Design patterns for the industrial Internet of Things,” w *14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2018.
- [8] D. Blalock, S. Madden i J. Guttag, „Sprintz: Time Series Compression for the Internet of Things,” w *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, New York, 2018.
- [9] M. P. Buras i F. Solano, „Identifying and Estimating the Location of Sources of Industrial Pollution in the Sewage Network,” *MDPI Sensors*, tom 21, nr 10, p. 3426, 14 May 2021.
- [10] Y. Donoso, G. Montoya i F. Solano, „An Energy-Efficient and Routing Approach for Position Estimation using Kalman Filter Techniques in Mobile WSNs,” *International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC)*, tom 10, nr 4, p. 500, 2015.
- [11] C. Velasquez-Villada, F. Solano i Y. Donoso, „Algorithm, Routing Optimization for Delay Tolerant Networks in Rural Applications Using a Distributed,” *International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC)*, tom 10, nr 1, pp. 100-111, February 2015.
- [12] N. Kokle, F. Solano, T. Knepper i T. Fromel, „Unraveling the dynamics of organic micropollutants in wastewater: Online LC-MS/MS analysis at high temporal resolution,” *Environmental Pollution*, tom 310, p. 119807, October 2022.