

**Multicast communication  
in wireless sensor networks  
with the use of uncontrolled mobile relay node**

**(Komunikacja rozgałęźna  
w bezprzewodowych sieciach sensorowych  
z wykorzystaniem niezależnego mobilnego węzła przekaźnikowego)**



**Bartosz Musznicki**

Faculty of Computing and Telecommunications  
Poznan University of Technology

*Doctoral dissertation*

Abstract  
(Streszczenie)

Supervisor:

Piotr Zwierzykowski, BEng, MSc, PhD, DSc

Poznań 2023

## Abstract

The concept of wireless sensor networks develops and evolves over the last two decades. New research trends appear while more implementations or the elements of these are present in actual environments. Technological development leads both to the emergence of new network structure subcategories, as well as, to the intertwining of those which in are usually studied separately. This trend is visible in particular in urban environment. While researching and designing wireless networks, which are related to measurement functionalities for this environment, one can and should perceive sensor networks as heterogeneous structures composed of increasing numbers of devices of various connectivity, computation, and functional capabilities, as the ones presented in Figure 1.

The networks of interest consist of stationary (fixed) and mobile nodes, which location may be known, predicted, or random, with their momentary structure being distributed and fragmented. Network functions performed by mobile devices are merely an addition to their main role with their movement not being controlled by the operator of the network. And yet, they can be used to enable the communication between disjoint areas of a delay tolerant network. Opportunistic node contacts can be used, e.g., in dissemination process of configuration and control messages aimed at a group of destination nodes. The messages are stored in relay nodes to forward them further at a later point in time, while mobile relays also carry them between stationary subareas of the network, as shown in Figure 2. The process may happen without the usage of network structure knowledge, with the use of the knowledge of local surroundings of the node, as well as, with global (complete) knowledge. Particular nodes can perform different network roles according to the function assigned to them.

The development of network functionalities is accompanied by the emergence of new sets and sources of data. More and more of them are publicly available in real time. It was leveraged to introduce a method of graph modeling of time-changing network connectivity structures. They are the basis of designed architecture and implemented research environment, which was used to investigate proposed multicast algorithms. The architecture is presented in Figure 3.



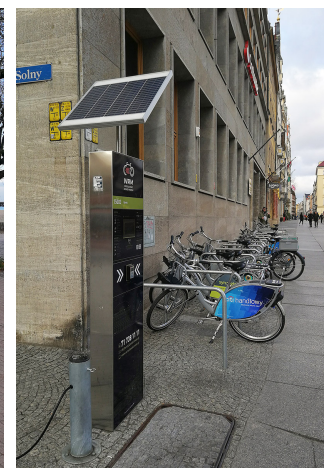
(a) Parking meter, tram, and scooter

*Poznań  
August 2019*



(b) Electric kick scooters

*Sopot  
November 2019*



(c) Bike rental station

*Wrocław  
December 2019*

Figure 1 Examples of urban connected devices in cities in Poland

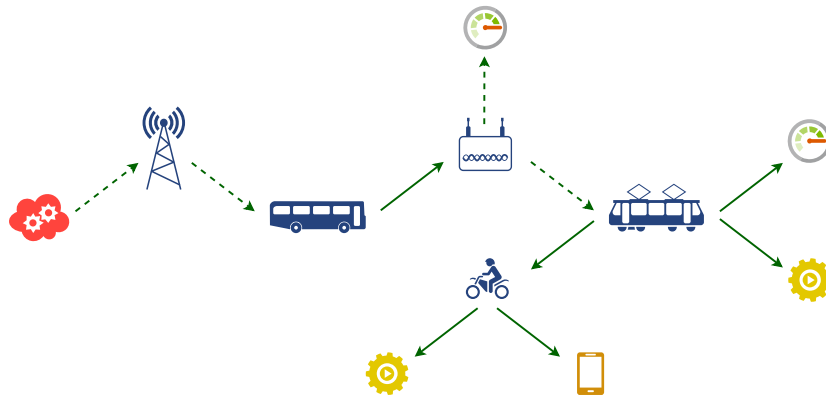


Figure 2 Urban delay-tolerant multicast sensor network

Network modeling was performed in four Polish cities based on open data on the location of public transportation vehicles and elements of urban infrastructure. Over 60 thousand graphs were constructed and analyzed. It has been shown that the use of uncontrolled mobile relay enables the construction of space- and time-spanning multicast structures. An example multicast structure modeled in the area of the Kaponiera Roundabout in the city center of Poznań, aimed at reaching nodes of given class, based on local knowledge about surroundings of current node, is depicted in Figure 4.

The features of constructed multicast trees are determined by the topology of given city area, the distribution of destination nodes, as well as, the number and the routes of mobile relays. Efficacy and efficiency of the algorithms depend on radio range of the nodes, maximum time-span of forwarded messages, and network structure knowledge availability. Various metrics can be distinguished, e.g., time cost, which can be used as an indicator of total computing resources needed to propagate the message to the leaves of the tree, as presented in Figure 5.

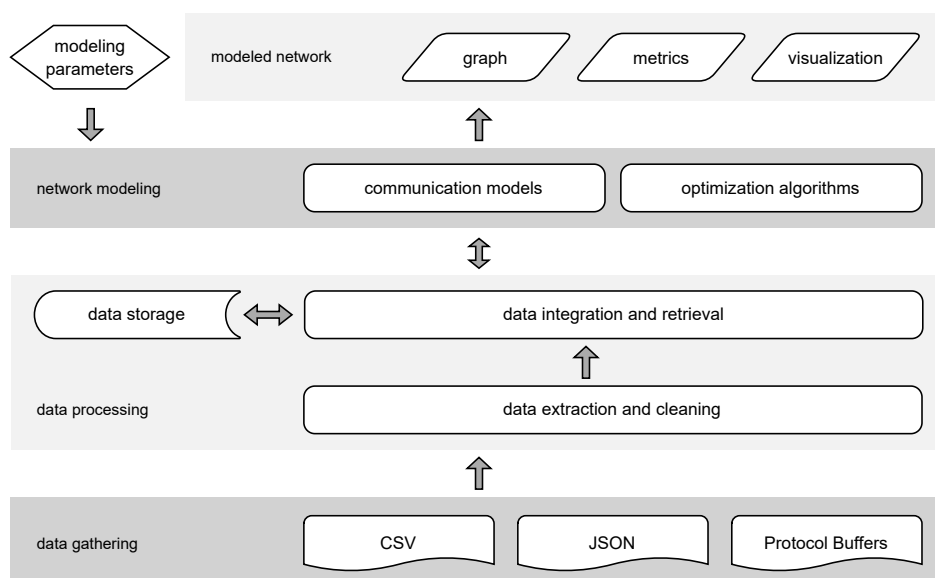


Figure 3 Open-data-based network modeling architecture

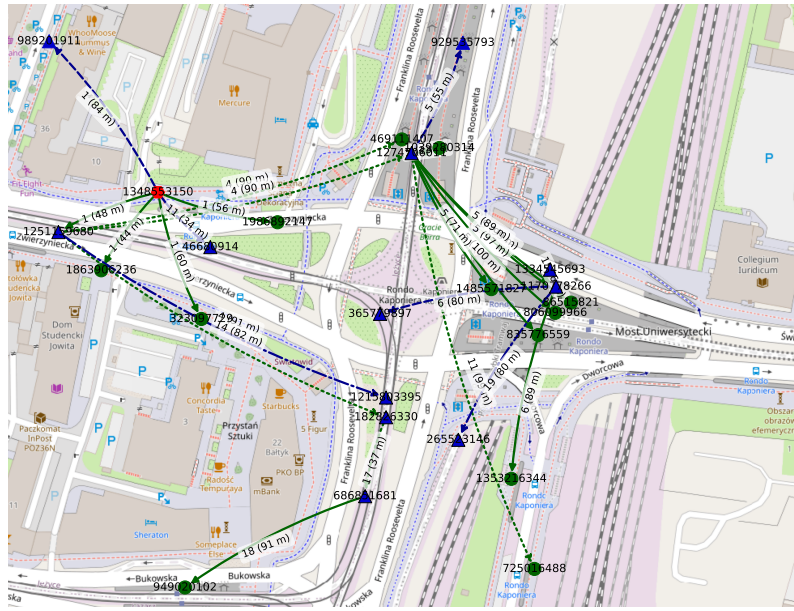


Figure 4 Modeled opportunistic localized class-based multicast graph

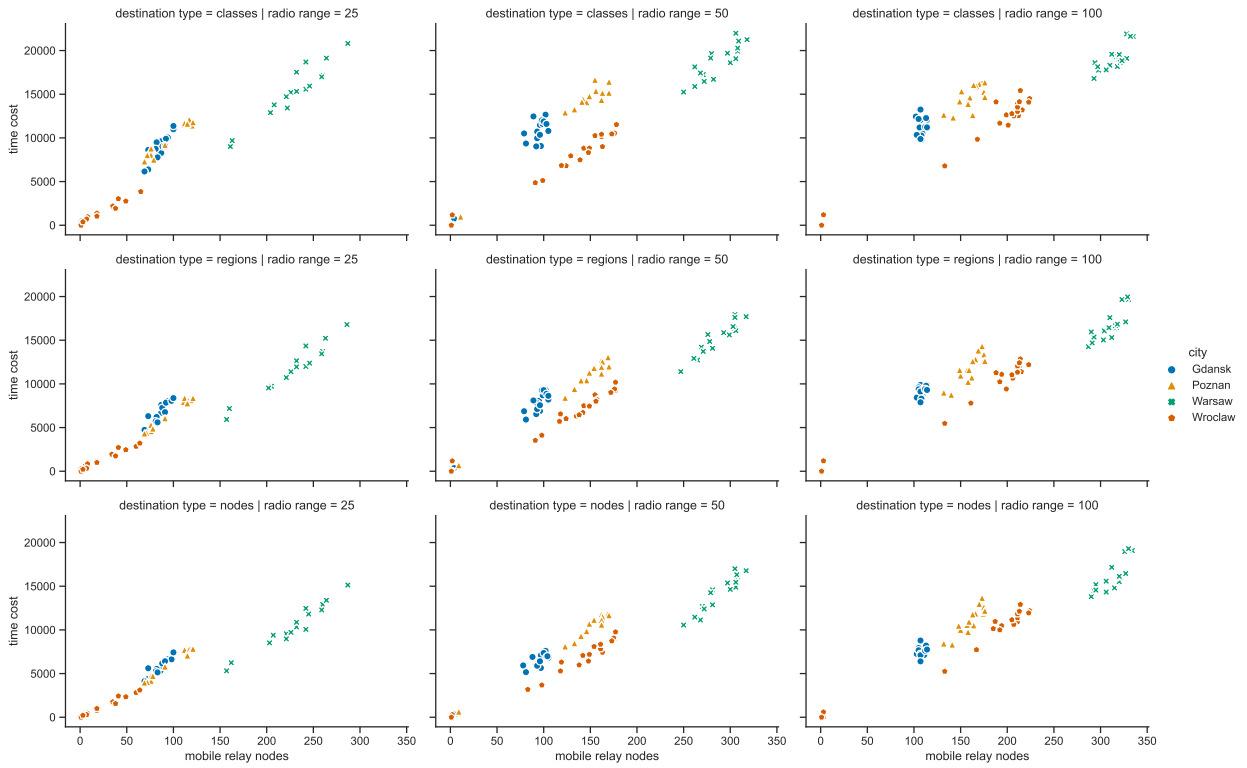


Figure 5 Mobile relays influence on time cost of 30 min graphs with local knowledge

## Publications of the author

### Papers in scored journals

- [1] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, B. Musznicki. LoRaWAN Metering Infrastructure Planning in Smart Cities, *Applied Sciences*, 13(14), 2023, 100 points.
- [2] B. Musznicki, M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Modeling Real-Life Urban Sensor Networks Based on Open Data. *Sensors*, 22(23), 2022, 100 points;
- [3] B. Musznicki, M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Problemy Badawcze i Modelowanie Sieci Sensorowych w Środowiskach Miejskich, *Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne*, (4):291–294, 2022, 20 points.
- [4] B. Musznicki. Empirical Approach in Topology Control of Sensor Networks for Urban Environment, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (1):47–57, 2019, 12 points.
- [5] K. Kowalik, A. Kliks, B. Musznicki, M. Kołodziejski, P. Kryszkiewicz. Observation of WiMAX Radio Parameters to Enhance Spectrum Utilisation in Mixed Environment, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (1):42–50, 2018, 12 points.
- [6] A. Kliks, B. Musznicki, K. Kowalik, P. Kryszkiewicz. Perspectives for Resource Sharing in 5G Networks, *Telecommunication Systems*, 11 December 2017, 25 points.
- [7] K. Kowalik, D. Dudek, M. Kołodziejski, B. Musznicki, E. Grzybek, J. Jarzina. Lessons Learned from WiMAX Deployment at INEA, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (3):34–41, 2014, 6 points.
- [8] B. Musznicki, M. Tomczak, P. Zwierzykowski. Geographic Dijkstra-based Multicast Algorithm for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Image Processing & Communications, Special Issue: Algorithms and Protocols in Packet Networks*, 17(1–2):33–46, 2012, 7 points.
- [9] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Shortest Path Problem Solving Based on Ant Colony Optimization Metaheuristic, *International Journal of Image Processing & Communications, Special Issue: Algorithms and Protocols in Packet Networks*, 7(1–2):20–30, 2014, 7 points.

### Papers in other foreign journals

- [10] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Review and Performance Analysis of Shortest Path Problem Solving Algorithms, *International Journal On Advances in Software*, 7(1–2):20–30, 2014.
- [11] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Survey of Simulators for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 5(3):23–50, 2012.

### Book chapters published abroad

- [12] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Performance Evaluation of Flooding Algorithms for Wireless Sensor Networks Based on EffiSen: The Custom-Made Simulator, *Simulation Technologies in Networking and Communications: Selecting the Best Tool for the Test*, pp. 433–458, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2015.
- [13] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. An Algorithm for Finding Shortest Path Tree Using Ant Colony Optimization Metaheuristic, *Image Processing and Communications Challenges 5*, pp. 317–326, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.

### Book chapters published in Poland

- [14] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. An In-depth Discussion of Challenges Related to Solving Shortest Path Problems Using ShortestPathACO Based Algorithms, *Information Systems Architecture and Technology; Knowledge Based Approach to the Design, Control and Decision Support*, pp. 77–88, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland, 2013.
- [15] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. The Factors Influencing Energy Efficiency of Flooding Algorithms for Wireless Sensor Networks, *Information Systems Architecture and Technology, Networks and Networks' Services*, pp. 211–222, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland, 2010.

### Papers presented at international conferences

- [16] B. Musznicki, M. Piechwiak, P. Zwierzykowski. Research Problems and Network Modeling Concept in Urban Sensor Networks, *IBIMA 2022, 39th International Business Information Management Association*, Granada, Spain, 30–31 May 2022, 70 points.
- [17] B. Musznicki, K. Kowalik, P. Kołodziejki, E. Grzybek. Mobile and Residential INEA Wi-Fi Hotspot Network, *ISWCS 2016, 13th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Poznań, Poland, 20–23 September 2016.
- [18] P. Walkowiak, R. Szalski, B. Musznicki, D. Dudek, K. Kowalik, P. Zwierzykowski. Evaluation of CARMNET System in INEA HOTSPOT Network, *2014 IEICE ICTF, Information and Communication Technology Forum*, Poznań, Poland, 28–30 May 2014.
- [19] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Efficiency Evaluation of Shortest Path Algorithms, *AICT 2013, The Ninth Advanced International Conference on Telecommunications*, pp. 154–160, Rome, Italy, 23–28 June 2013.
- [20] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. ShortestPathACO Based Strategy to Find the Shortest Path Between Two Nodes, *2013 IEICE ICTF, Information and Communication Technology Forum*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 29–31 May 2013.

- [21] B. Musznicki, M. Tomczak, P. Zwierzykowski. Dijkstra-based Localized Multicast Routing in Wireless Sensor Networks, *CSNDSP 2012, 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Poznań, Poland, 18–20 July 2012.
- [22] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Classification of Wireless Sensor Networks Simulators, *InterTech 2010, III International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists*, pp. 203–214, Poznań, Poland, 19–21 May 2010.

**Sum of MEiN points: 359**

**Bibliometric parameters**

	publications	citations	h-index
Google Scholar	20	365	7
Scopus	10	86	4
Web of Science	5	95	3

## Streszczenie

Koncepcja bezprzewodowych sieci sensorowych rozwija się i ewoluuje na przestrzeni ostatnich dwóch dekad. Pojawiają się nowe nurty badawcze, a kolejne wdrożenia lub ich elementy są obecne w rzeczywistych środowiskach. Rozwój technologii prowadzi zarówno do wydzielenia się nowych podkategorii struktur sieciowych, jak i do przenikania się tych, które zazwyczaj są badane oddzielnie. Ten trend jest szczególnie zauważalny w środowisku miejskim. Badając i projektując w nim sieci bezprzewodowe związane z funkcjami pomiarowymi można i należy postrzegać sieci sensorowe jako struktury heterogeniczne złożone z rosnącej liczby urządzeń o różnych możliwościach łącznościowych, obliczeniowych i funkcjonalnych, jak przedstawione na Rysunku 1.

Rozważane sieci składają się z węzłów stacjonarnych (nieruchomych) i mobilnych, których położenie może być znane, przewidywalne lub losowe, a chwilowa struktura rozproszona i fragmentaryczna. Funkcje sieciowe realizowane przez urządzenia mobilne są jedynie uzupełnieniem ich podstawowej roli, a ich przemieszczanie się niezależne od operatora sieci. Mimo to, mogą być używane w celu umożliwienia łączności między rozłącznymi obszarami sieci niewrażliwej na opóźnienia. Okazjonalne kontakty między węzłami mogą być wykorzystywane, m. in. w procesie rozsyłania wiadomości konfiguracyjnych i sterujących do grupy węzłów odbiorczych. Wiadomości są przechowywane w węzłach przekaźnikowych w celu późniejszego przekazania dalej, a mobilne przekaźniki dodatkowo przenoszą je pomiędzy stacjonarnymi podobszarami sieci, jak pokazano na Rysunku 2. Proces może odbywać się bez wykorzystania wiedzy o strukturze sieci, przy wiedzy o lokalnym otoczeniu węzła, jak też przy wiedzy globalnej (całościowej). Poszczególne typy węzłów mogą pełnić odmienne role, zależnie od przydzielonej im funkcji.

Rozwojowi funkcjonalności sieciowych towarzyszy pojawianie się nowych zbiorów i źródeł danych. Coraz więcej z nich jest publicznie dostępnych w czasie rzeczywistym. Zostało to wykorzystane do opracowania metody grafowego modelowania zmiennych w czasie struktur odpowiadających łączności



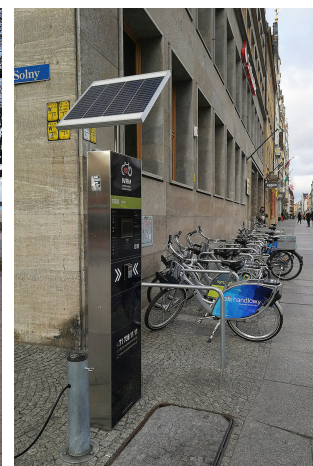
(a) Parkometr, tramwaj i skuter

*Poznań  
sierpień 2019*



(b) Elektryczne hulajnogi

*Sopot  
listopad 2019*

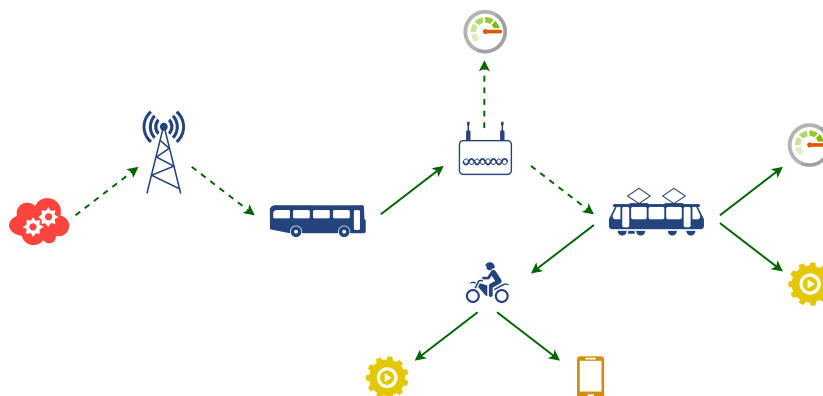


(c) Stacja wypożyczenia  
rowerów

*Wrocław  
grudzień 2019*

Rysunek 1 Przykłady miejskich urządzeń o możliwościach łącznościowych w miastach w Polsce



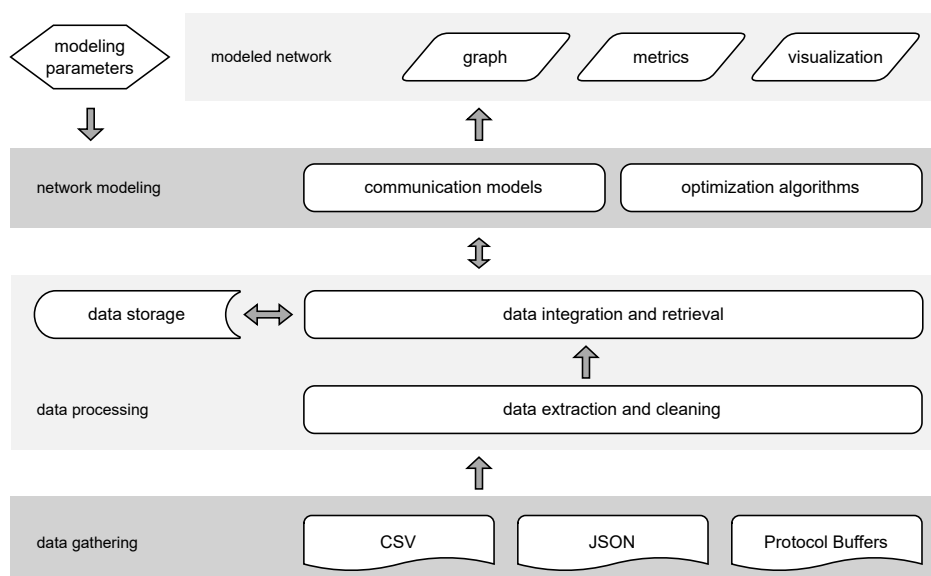


Rysunek 2 Komunikacja rozgałęźna w miejskiej sieci sensorowej niewrażliwej na opóźnienia

sieciowej. Są one podstawą zaprojektowanej architektury i zbudowanego środowiska badawczego, w którym analizowano zaproponowane algorytmy komunikacji rozgałęźnej. Architektura ta została zaprezentowana na Rysunku 3.

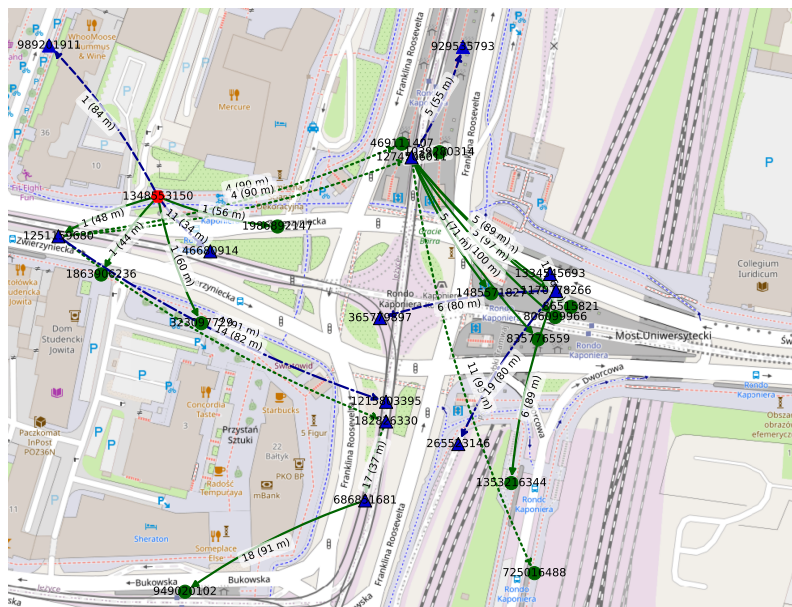
Modelowanie sieci sensorowych przeprowadzono w czterech polskich miastach na podstawie otwartych danych o położeniu pojazdów komunikacji publicznej i elementów infrastruktury miejskiej. Skonstruowano i przeanalizowano ponad 60 tysięcy grafów. Wykazano, że wykorzystanie niezależnego mobilnego przekaźnika umożliwia powstawanie rozciągniętych w przestrzeni i czasie struktur komunikacji rozgałęźnej. Przykładowa struktura skonstruowana w okolicy ronda Kaponiera w centrum Poznania, w oparciu o lokalnie dostępną wiedzę o otoczeniu danego węzła, mająca na celu dotarcie do węzłów danej klasy, została pokazana na Rysunku 4.

Cechy zbudowanych drzew komunikacji rozgałęźnej są warunkowane topologią danego obszaru miejskiego, rozmieszczeniem węzłów docelowych oraz liczbą i trasami mobilnych przekaźników. Skuteczność i efektywność algorytmów zależą od zasięgu radiowych węzłów, maksymalnej rozpiętości

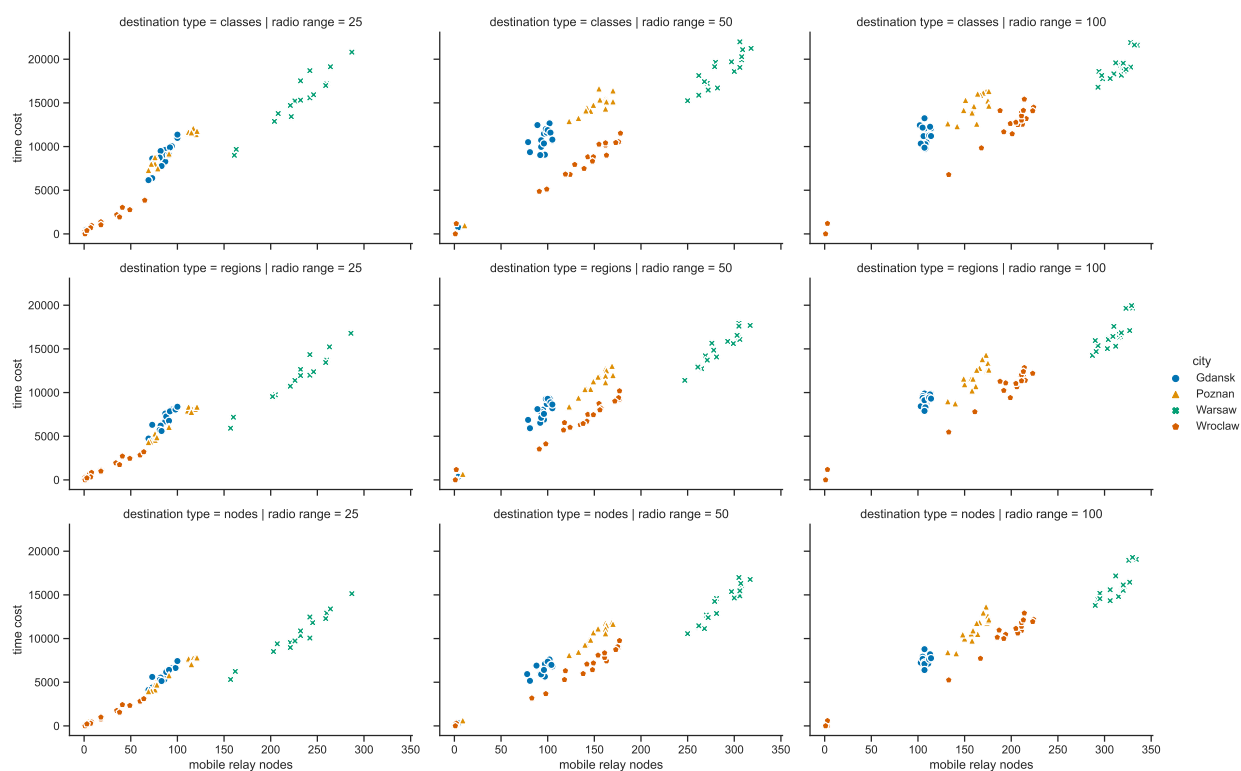


Rysunek 3 Architektura modelowania sieci oparta o otwarte dane

czasowej przekazywanych wiadomości i dostępności wiedzy o strukturze sieci. Moga być wykorzystywane różnorodne metryki, np. koszt czasowy, który może być użyty jako wskaźnik ilości zasobów obliczeniowych wymaganych aby wiadomość została dostarczona do liści drzewa, jak pokazano na Rysunku 5.



Rysunek 4 Skonstruowany graf okazjonalnej komunikacji rozgałęznej do węzłów danej klasy



Rysunek 5 Wpływ mobilnych przekazników na koszt czasowy 30 min grafów przy wiedzy lokalnej

## Publikacje autora

### Artykuły w czasopismach punktowanych

- [1] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, B. Musznicki. LoRaWAN Metering Infrastructure Planning in Smart Cities, *Applied Sciences*, 13(14), 2023, 100 punktów.
- [2] B. Musznicki, M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Modeling Real-Life Urban Sensor Networks Based on Open Data. *Sensors*, 22(23), 2022, 100 punktów.
- [3] B. Musznicki, M. Piechowiak, P. Zwierzykowski. Problemy Badawcze i Modelowanie Sieci Sensorowych w Środowiskach Miejskich, *Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne*, (4):291–294, 2022, 20 punktów.
- [4] B. Musznicki. Empirical Approach in Topology Control of Sensor Networks for Urban Environment, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (1):47–57, 2019, 12 punktów.
- [5] K. Kowalik, A. Kliks, B. Musznicki, M. Kołodziejcki, P. Kryszkiewicz. Observation of WiMAX Radio Parameters to Enhance Spectrum Utilisation in Mixed Environment, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (1):42–50, 2018, 12 punktów.
- [6] A. Kliks, B. Musznicki, K. Kowalik, P. Kryszkiewicz. Perspectives for Resource Sharing in 5G Networks, *Telecommunication Systems*, 11 grudnia 2017, 25 punktów.
- [7] K. Kowalik, D. Dudek, M. Kołodziejcki, B. Musznicki, E. Grzybek, J. Jarzina. Lessons Learned from WiMAX Deployment at INEA, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (3):34–41, 2014, 6 punktów.
- [8] B. Musznicki, M. Tomczak, P. Zwierzykowski. Geographic Dijkstra-based Multicast Algorithm for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Image Processing & Communications, Special Issue: Algorithms and Protocols in Packet Networks*, 17(1–2):33–46, 2012, 7 punktów.
- [9] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Shortest Path Problem Solving Based on Ant Colony Optimization Metaheuristic, *International Journal of Image Processing & Communications, Special Issue: Algorithms and Protocols in Packet Networks*, 7(1–2):20–30, 2014, 7 punktów.

### Artykuły w pozostałych czasopismach zagranicznych

- [10] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Review and Performance Analysis of Shortest Path Problem Solving Algorithms, *International Journal On Advances in Software*, 7(1–2):20–30, 2014.
- [11] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Survey of Simulators for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 5(3):23–50, 2012.

### Rozdziały w książkach wydanych za granicą

- [12] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Performance Evaluation of Flooding Algorithms for Wireless Sensor Networks Based on EffiSen: The Custom-Made Simulator, *Simulation Technologies in Networking and Communications: Selecting the Best Tool for the Test*, s. 433–458, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2015.
- [13] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. An Algorithm for Finding Shortest Path Tree Using Ant Colony Optimization Metaheuristic, *Image Processing and Communications Challenges 5*, s. 317–326, Springer International Publishing, Szwajcaria, 2014.

### Rozdziały w książkach wydanych w Polsce

- [14] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. An In-depth Discussion of Challenges Related to Solving Shortest Path Problems Using ShortestPathACO Based Algorithms, *Information Systems Architecture and Technology; Knowledge Based Approach to the Design, Control and Decision Support*, s. 77–88, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013.
- [15] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. The Factors Influencing Energy Efficiency of Flooding Algorithms for Wireless Sensor Networks, *Information Systems Architecture and Technology, Networks and Networks' Services*, s. 211–222, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2010.

### Artykuły zaprezentowane podczas konferencji międzynarodowych

- [16] B. Musznicki, M. Piechwiak, P. Zwierzykowski. Research Problems and Network Modeling Concept in Urban Sensor Networks, *IBIMA 2022, 39th International Business Information Management Association*, Grenada, Hiszpania, 30–31 maja 2022, 70 punktów.
- [17] B. Musznicki, K. Kowalik, P. Kołodziejski, E. Grzybek. Mobile and Residential INEA Wi-Fi Hotspot Network, *ISWCS 2016, 13th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Poznań, 20–23 września 2016.
- [18] P. Walkowiak, R. Szalski, B. Musznicki, D. Dudek, K. Kowalik, P. Zwierzykowski. Evaluation of CARMNET System in INEA HOTSPOT Network, *2014 IEICE ICTF, Information and Communication Technology Forum*, Poznań, 28–30 maja 2014.
- [19] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. Efficiency Evaluation of Shortest Path Algorithms, *AICT 2013, The Ninth Advanced International Conference on Telecommunications*, s. 154–160, Rzym, Włochy, 23–28 czerwca 2013.
- [20] M. Głąbowski, B. Musznicki, P. Nowak, P. Zwierzykowski. ShortestPathACO Based Strategy to Find the Shortest Path Between Two Nodes, *2013 IEICE ICTF, Information and Communication Technology Forum*, Sarajewo, Bośnia i Hercegowina, 29–31 maja 2013.

- [21] B. Musznicki, M. Tomczak, P. Zwierzykowski. Dijkstra-based Localized Multicast Routing in Wireless Sensor Networks, *CSNDSP 2012, 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Poznań, 18–20 lipca 2012.
- [22] B. Musznicki, P. Zwierzykowski. Classification of Wireless Sensor Networks Simulators, *InterTech 2010, III International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists*, s. 203–214, Poznań, 19–21 maja 2010.

**Suma punktów MEiN: 359**

**Parametry bibliometryczne**

	publikacje	cytowania	h-index
Google Scholar	20	365	7
Scopus	10	86	4
Web of Science	5	95	3