

Óbudai Egyetem

Doktori értekezés

Tézisfüzet



Sebestyén Gergely

**ÖSSZEFÜZÖTT ADATGYŰJTÉSI ELJÁRÁSOK
VIZSGÁLATA
ELÁRASZTÁSOS ÚTVÁLASZTÁSON ALAPULÓ
SZÖVEVÉNYES VEZETÉK NÉLKÜLI
SZENZORHÁLÓZATOKBAN**

Témavezető: Dr. Kopják József

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori
Iskola

Budapest 2024

I. A kutatás előzményei

A szenzorhálózatok területe dinamikusan fejlődik, számos új technológiát és megközelítést felvonultatva, mint például a ZigBee, IQRF, LoRa és NB-IoT. Ezek a fejlesztések új kihívások elé állítják a mérnököket az energiahatékonyság, kommunikációs megbízhatóság és az útvonalválasztási stratégiák javítása terén. A vezeték nélküli szenzorhálózatok, a technológia fejlődésével, egyre fontosabbá válnak a környezet monitorozása és az okos városi alkalmazások számára [1]-[5].

Az IQRF technológia rendszeres alkalmazása során felmerült problémák és kérdések az én kutatási témám kialakításához vezettek. Alaposan foglalkoztam az IQRF hálózatok matematikai modellezésével, szimulációjával és informatikai fejlesztéseivel, amelyek lehetővé tették elméleti tudásom gyakorlati problémákra való alkalmazását. Kutatásom a többugrásos szövevényes topológiájú vezeték nélküli szenzorhálózatok, különösen az IQRF technológiával megvalósított rendszerek mélyreható vizsgálatára koncentrálok.

A vezeték nélküli szenzorhálózatok kutatása széles körben zajlik a szakirodalomban, ahol kiemelt fontossággal szerepelnek az energiahatékonyság és a hálózati megbízhatóság területek [1][3][4][5][6]-[10]. Az IQRF technológia is elkezdett jelentősebb figyelmet kapni a kutatóktól, elsősorban az alkalmazások területén[22][23][25][26][27][39]-[43] mint ígéretes alternatíva, de a szakirodalomban még viszonylag kevés publikáció foglalkozik a hálózati architektúra és kommunikációs

metódusok elemzésével. Kutatásom célja az általam felfedezett hiányosságok pótlása, valamint a technológia tudományos népszerűsítése volt.

Részt vettem számos kutatás-fejlesztési tevékenységben, ipari megbízásban és projektben, ahol a valóságban felmerülő elméleti és gyakorlati problémákat vizsgáltam meg. Ezek a projektek gyakran matematikai modellezésen, szimuláción és informatikai fejlesztéseken alapultak, lehetővé téve számomra elméleti ismereteim gyakorlati környezetben való kamatoztatását. A szenzorhálózatok területe különösen érdekes számomra, hiszen számos új, innovatív megoldás megtalálására ösztönöz.

II. Célkitűzések

A kutatásom fő célja az IQRF alapú vezeték nélküli szenzorhálózatok telepítésével és működtetésével kapcsolatos kihívások feltárása. Ez magába foglalja az elemélettartam, a kommunikációs hatékonyság és a hálózati kommunikáció stabilitásának vizsgálatát. Ezen vizsgálatok gyakorlati hasznossága kulcsfontosságú a hálózatok megbízhatósága és hosszú távú fenntarthatósága szempontjából. A kutatás jelentősége és aktualitása abban rejlik, hogy az IQRF technológia alkalmazása új lehetőségeket nyit meg a vezeték nélküli szenzorhálózatok területén. Azokban az alkalmazásokban, ahol az energiahatékonyság és a kommunikációs stabilitás kritikus tényező érdemes megvizsgálni, hogy hogyan működik a fent említett hálózat.

A következőkben bemutatom azokat a kérdésköröket, amelyek köré a kutatásomat építettem:

- Hogyan befolyásolja az összefűzött adatgyűjtési eljárás a hálózat méretének függvényében az elemélettartamot?
- Milyen módszerekkel lehet segíteni a tervezési és karbantartási periódusok meghatározását?
- Hogyan lehet növelni az elemélettartamot az összefűzött adatgyűjtési eljárást alkalmazó hálózatokban?
- IQRF alapú vezeték nélküli szenzorhálózatokban milyen mérőszámokkal lehet a hálózati kommunikáció stabilitását jellemezni?
- Milyen adatgyűjtési és térképezési eljárásokkal lehet a teljes hálózatot feltérképezni?

Az alábbi kérdések kutatása alapján célként tűztem ki, hogy olyan eredményeket és eszközöket azonosítsak be és/vagy fejlesszek ki, amelyek mind az elméleti mind a gyakorlati szakemberek munkáját segítheti a jövőben:

- Elemélettartam becslési modell kifejlesztése és annak validálása mérési eredményekkel.
- Applikációs felület készítése, amely segíti a vezeték nélküli hálózat elemélettartamhoz szükséges karbantartási periódusok meghatározását.
- Adatgyűjtési eljárások esetén az elemélettartam növelés lehetőségének kutatása.
- A hálózati kommunikáció stabilitásának vizsgálata és egy olyan metrika bevezetése, amely segítheti a hálózat

tervezését a hálózati kommunikáció stabilitásának jellemzésével.

- A hálózati kommunikáció stabilitásának vizsgálatához hálózati feltérképezési eljárás lehetőségének vizsgálata, amely képes rövid idő alatt, alacsony energiaköltséggel feltérképezni a hálózati kapcsolatokat.

A kutatásom magában foglalta az IQRF hálózati protokollok és kommunikációs stratégiák hatékonyságának értékelését, a hálózati eszközök élettartamának meghatározását és a hálózati kommunikáció stabilitásának meghatározását. Ezek az eredmények hozzájárulhatnak a vezeték nélküli szenzorhálózatok hatékonyabb tervezéséhez és üzemeltetéséhez, és elősegíthetik az IQRF technológia szélesebb körű alkalmazását a gyakorlatban.

III. Vizsgálati módszerek

A kutatásaim során lehetőségem nyílt bekapcsolódní valós ipari projektekbe, ahol közvetlenül tesztelhettem az IQRF hálózatokat különféle alkalmazási környezetekben. Ez a gyakorlati munka kulcsfontosságú volt számomra, mivel lehetővé tette, hogy valós körülmények között szerezhessenek tapasztalatokat, amelyeket aztán felhasználhattam a modellek továbbfejlesztésére. Az ipari alkalmazásokból származó adatok és megfigyelések betekintést nyújtottak a vezeték nélküli hálózatok valós világbeli teljesítményébe, így jelentősen hozzájárultak a kutatásaim során alkalmazott modellezési technikák finomításához és validálásához. Az ipari projektek során szerzett tapasztalatok nemcsak hogy erősítették elméleti megértésemet, de hozzájárultak a kutatási eredményeim gyakorlati alkalmazhatóságának növeléséhez is.

A kutatási tevékenységem során kezdeti lépésként mélyreható irodalomkutatást végeztem, amely magában foglalta az IQRF hálózatok[22]-[46] és más hasonló, első sorban az IEEE 802.15.4 szabványra épülő vezeték nélküli kommunikációs technológiákat[9]-[21], valamint a matematikai modellezésükre vonatkozó szakirodalmat[3]-[6][58]-[75]. Céлом az volt, hogy átfogó képet kapjak azokról a technológiai és elméleti alapokról, amelyek lehetővé teszik ezeknek a hálózatoknak a hatékony működését és alkalmazását különböző környezetekben. Különös figyelmet fordítottam a vezeték nélküli hálózatok adatgyűjtési technikáira, kommunikációs protokolljaikra és azok

energiagazdálkodására, valamint az ezen területek matematikai modellezési megközelítéseire.

A kutatás következő szakaszában gyakorlati vizsgálatokba kezdtem, amelyek keretében IQRF alapú vezeték nélküli hálózatokat elemeztem, hogy megértsem azok alkalmazási sajátosságait és kihívásait. Ez magában foglalta az adatgyűjtési lehetőségek, a hálózati kommunikációs stabilitás és az energiafelhasználás mélyreható vizsgálatát. Ezen analízisek alapján matematikai modelleket alkottam az elemélettaram meghatározásához, a hálózati adatküldéshez és annak stabilitásához. energiahatékonyság és a kommunikációs megbízhatóság optimalizálását.

IV. Új tudományos eredmények

1. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban elárasztásos útválasztáson alapuló összefűzött adatgyűjtési eljárás alkalmazása esetén az egyes hálózati eszközök kommunikációra fordított energiafelhasználása nem függ a hálózatban betöltött helyétől.

1.1 Altézis

Megvizsgáltam az összefűzött adatgyűjtési eljárás energiafelhasználását, a kapott eredmény alapján létrehoztam egy elemélettartam becslési modellt. A modell eredményeit méréséssel validáltam.

1.2. Altézis

Az elem élettartam meghatározásához olyan applikációs felületet készítettem, amely a tervezési és karbantartási periódusok meghatározásához nyújt segítséget.

1.3. Altézis

Megoldást javasoltam az elemélettartam növeléshez az összefűzött adatgyűjtési eljárást alkalmazó hálózatok esetén a dinamikusán változó ütemező módszer bevezetésével.

A témában megjelent publikációk: [S1][S2][S3][S4][S11][S12]

2. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban összefűzött adatgyűjtési eljárás alkalmazása esetén az adott hálózat stabilitása leírható egy stabilitási tényezővel.

2.1 Altézis

Meghatároztam a hálózatban a hálózati kommunikáció kérés-és válaszüzenet továbbítására felírható stabilitási tényező meghatározásához szükséges feltételeket.

2.2 Altézis

Meghatároztam a hálózatban az összefűzött adatgyűjtés eljárás alkalmazása esetén felírható adatgyűjtési stabilitási tényezőt.

2.3 Altézis

Meghatároztam a hálózatban az FRC eljárás alkalmazása esetén felírható adatgyűjtési stabilitási tényezőt.

A témában megjelent publikációk: [S1][S5][S7]

3. Tézis

A szövevényes időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban elárasztásos útválasztás alkalmazása esetén a hálózat stabilitási tényezőjének meghatározásához szükséges adatok egy összefűzött adatgyűjtési ciklus segítségével begyűjthetők és bizonyos peremfeltételek esetén a hálózat feltérképezhető.

3.1. Altézis

Kidolgoztam egy adatgyűjtési eljárást, amellyel a teljes hálózat feltérképezhető előállítva a hálózatot reprezentáló gráf szomszédsági mátrixát.

3.2. Altézis

Kidolgoztam egy egyszerűsített térképezési eljárást, amely a szomszédos csomópontok relatív címén alapul.

3.3. Altézis

Kidolgoztam egy egyszerűsített eljárást, amivel megállapítható a csomópontokra és hálózatra felírható stabilitási tényező.

A témában megjelent publikációk: [S5][S6][S9][S10]

V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A hálózatok telepítése és üzemeltetése során felmerülő problémák megértése és kezelése elengedhetetlen a megbízható, hatékony és fenntartható rendszerek kialakításához. Ebben a kontextusban a kutatásom során elért eredmények célja az volt, hogy válaszokat találjak a telepítési és üzemeltetési problémákra, különösen az elemélettartam meghatározására, a hálózati stabilitást leíró metrika meghatározására és a hálózat gyors teljes feltérképezésére vonatkozóan.

Elemélettartam meghatározása

A kutatásom egyik kulcsfontosságú eredménye az elemélettartam becslési modell kifejlesztése volt, amely a vezeték nélküli hálózat gráfként való modellezésén alapul. Az elemélettartam modell segítségével alkottam meg egy API-t és online kalkulátort, ami lehetővé teszi a vezeték nélküli hálózat tervezői számára, hogy meghatározzák a várható elemélettartamot és azt, hogy mikor van szükség az elemek cseréjére vagy karbantartásra. Ennek eredményeképpen, a karbantartási ciklusokat optimalizálhatják, ami jelentős mértékben csökkenti az üzemeltetési költségeket és minimalizálja a leállási időt. Ez a folyamat alapvetően hozzájárul a vezeték nélküli szenzorhálózatok hatékonyabb és költséghatékonyabb üzemeltetéséhez.

Hálózati Stabilitási Faktor

A hálózati stabilitás egy másik fontos aspektusa a kutatásomnak, ahol a cél a kommunikációs megbízhatóság elemzése volt. E célból a kutatás során vezettem be egy ún. stabilitási faktort, amely kvantitatív értéként jelzi a hálózat stabilitásának szintjét. Ennek meghatározása a hálózati kommunikáció különböző mérőszámok, mint az az átviteli hibák és redundáns utak elemzésén alapul. A stabilitási tényező hasznos mértéke lehet a hálózati telepítések tervezésében, tekintet nyújtva az elérhető stabilitásba. Ez a mérőszám segítséget nyújt a tervezési folyamatban; például, ha a telepítési környezet megköveteli a kommunikációs linkek redundanciájának növelését, a stabilitási tényező iránymutatást adhat a hálózati eszközök elhelyezéséhez a kívánt stabilitás eléréséhez. Általánosságban egy stabilitási tényező (S_n), ami nagyobb, mint 1, elegendő, de ez függ az adott alkalmazástól. Azok a csomópontok, melyeknek a bejövő fokszáma kisebb, mint a VRN-jük, könnyen azonosíthatóak. A csomópontok bejövő fokszámának növelése attól függ, hogy milyen mértékben lehetséges a vezeték nélküli eszközök újra pozicionálása vagy további eszközök hozzáadása a hálózathoz. Habár több eszköz hozzáadása növelheti a hálózat stabilitását, ez hosszabb adatgyűjtési időkhöz és megnövekedett energiafelhasználáshoz vezethet.

Hálózat feltérképezése

A hálózatfeltérképezéshez kapcsolódó eredményeim segítséget nyújtanak a hálózati topológia és a kommunikációs útvonalak részletes és pontos meghatározásában az IQRF vezeték nélküli hálózatokban. A teljes hálózati feltérképezés és az üzenetküldések számának csökkentésével elért eljárások lehetővé teszik a hálózati kapcsolatok és eszközök vizuális ábrázolását, beleértve a csomópontok és a közöttük lévő kommunikációs utakat. A feltérképezés eredményeként nyert adatok alapján a hálózat üzemeltetői képesek a hálózati topológiát és kommunikációs utakat optimalizálni, a vezeték nélküli eszközök pozícionálását módosítani a hálózati elvárások szerint. A hálózat feltérképezési eljárással a korábban bemutatott stabilitási tényező meghatározásához is segítséget nyújt, hogy akár egy összefűzött adatgyűjtési ciklussal meghatározható legyen.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- [1] Kandris, D.; Nakas, C.; Vomvas, D.; Koulouras, G. Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey. *Applied System Innovation* **2020**, 3, 14, doi:[10.3390/asi3010014](https://doi.org/10.3390/asi3010014).
- [2] Chochul, M.; Ševčík, P. A Survey of Low Power Wide Area Network Technologies. In Proceedings of the 2020 18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA); November 2020; pp. 69–73., doi: 10.1109/ICETA51985.2020.9379213
- [3] Adefemi Alimi, K.O.; Ouahada, K.; Abu-Mahfouz, A.M.; Rimer, S. A Survey on the Security of Low Power Wide Area Networks: Threats, Challenges, and Potential Solutions. *Sensors* **2020**, 20, 5800, doi:[10.3390/s20205800](https://doi.org/10.3390/s20205800).
- [4] De Beelde, B.; Plets, D.; Joseph, W. Wireless Sensor Networks for Enabling Smart Production Lines in Industry 4.0. *Applied Sciences* **2021**, 11, 11248, doi:[10.3390/app112311248](https://doi.org/10.3390/app112311248).
- [5] Artetxe, E.; Barambones, O.; Calvo, I.; Fernández-Bustamante, P.; Martín, I.; Uralde, J. Wireless Technologies for Industry 4.0 Applications. *Energies* **2023**, 16, 1349, doi:[10.3390/en16031349](https://doi.org/10.3390/en16031349).
- [6] Yang, S.-H. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications; Signals and Communication Technology*; Springer London: London, 2014; ISBN 978-1-4471-5504-1.
- [7] Fahmy, H.M.A. *Concepts, Applications, Experimentation and Analysis of Wireless Sensor Networks; Signals and Communication Technology*; Springer International Publishing: Cham, 2021; ISBN 978-3-030-58014-8.
- [8] Ramin Hekmat, *Ad-Hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies*; Springer Netherlands, 2006; ISBN 978-1-4020-5165-4.

- [9] Al-Karaki, J.N.; Kamal, A.E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communications* **2004**, *11*, 6–28, doi:[10.1109/MWC.2004.1368893](https://doi.org/10.1109/MWC.2004.1368893).
- [10] Shabbir, N.; Hassan, S.R.; Shabbir, N.; Hassan, S.R. Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs). In *Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations*; IntechOpen, 2017 ISBN 978-953-51-3562-3.
- [11] De Guglielmo, D.; Brienza, S.; Anastasi, G. IEEE 802.15.4e: A Survey. *Computer Communications* **2016**, *88*, 1–24, doi:[10.1016/j.comcom.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.05.004).
- [12] Nixon, M.; Blvd, W.L.H. A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a. 2012.
- [13] H.C. IEC 62591 WirelessHART System Engineering Guide. 2013.
- [14] Song, J.; Han, S.; Mok, A.; Chen, D.; Lucas, M.; Nixon, M.; Pratt, W. WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control. In *Proceedings of the 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*; April 2008; pp. 377–386.
- [15] Raptis, T.; Passarella, A.; Conti, M. A Survey on Industrial Internet with ISA100 Wireless. *IEEE Access* **2020**, *PP*, 1–1, doi:[10.1109/ACCESS.2020.3019665](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019665).
- [16] Chupaev, A.V.; Zaripova, R.S.; Galyamov, R.R.; Sharifullina, A.Y. The Use of Industrial Wireless Networks Based on Standard ISA-100.11a and Protocol WirelessHART in Process Control. *E3S Web Conf.* **2019**, *124*, 03013, doi:[10.1051/e3sconf/201912403013](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912403013).
- [17] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)* **2020**, 1–800, doi:[10.1109/IEEESTD.2020.9144691](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691).

- [18] Zigbee | Complete IOT Solution Available online: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/> (Accessed 2 February 2024).
- [19] Petrova, M.; Riihijarvi, J.; Mahonen, P.; Labella, S. Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.; April 2006; Vol. 1, pp. 487–492.
- [20] Khanafer, M.; Guennoun, M.; Mouftah, H.T. A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2014, 16, 856–876, doi:10.1109/SURV.2013.112613.00094.
- [21] ZigBee Specification Revision r21, <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf> (Accessed 2 February 2024)
- [22] Bouzidi, M.; Dalveren, Y.; Cheikh, F.A.; Derawi, M. Use of the IQRF Technology in Internet-of-Things-Based Smart Cities. *IEEE Access* **2020**, 8, 56615–56629, doi:[10.1109/ACCESS.2020.2982558](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982558).
- [23] Bazydło, P.; Dąbrowski, S.; Szweczyk, R. Wireless Temperature Measurement System Based on the IQRF Platform. In Proceedings of the Mechatronics - Ideas for Industrial Application; Awrejcewicz, J., Szweczyk, R., Trojnecki, M., Kaliczyńska, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2015; pp. 281–288., doi:10.1007/978-3-319-10990-9.
- [24] Bouzidi, M.; Amro, A.; Dalveren, Y.; Alaya Cheikh, F.; Derawi, M. LPWAN Cyber Security Risk Analysis: Building a Secure IQRF Solution. *Sensors* **2023**, 23, 2078, doi:[10.3390/s23042078](https://doi.org/10.3390/s23042078).
- [25] Properties of a Wireless Mesh Network Constructed with the Use of IQRF Modules in the Indoor Environment. *International Journal of Electronics and Telecommunications* **2023**, doi:[10.24425/ijet.2020.134010](https://doi.org/10.24425/ijet.2020.134010).

- [26] Pies, M.; Hájovský, R.; Velička, J. Wireless Measuring System for Monitoring the Condition of Devices Designed to Protect Line Structures. *Sensors* **2020**, *20*, 2512, doi:[10.3390/s20092512](https://doi.org/10.3390/s20092512).
- [27] Kuchta, R.; Vrba, R.; Sulc, V. Smart Platform for Wireless Communication - Case Study; **2008**; p. 120; ISBN 978-0-7695-3106-9.
- [28] Sulc, V. Module for Wireless Communication between Electric or Electronic Equipment or Systems, Method for Its Control and Method for Creating Generic Platforms for User Applications in Area of Wireless Communications with Those Modules, US Patent 20070188343A1, filed 2006-09-26
- [29] Sulc, V. Electronic Transceiver Module for Network Wireless Communication in Electric or Electronic Devices or Systems, a Method of Controlling It and a Method of Creating a Generic Network Communication Platform with Transceivers, US Patent 9336676B2, filed 2008-05-30
- [30] Sulc, V. System for wireless mesh network communication, US Patent 9743404B2, filed 2015-11-03
- [31] Sulc, V. Configuring a Wireless Mesh Network of Communication Devices with Packet Message Transmission, and Routing Packet Message Transmission in Such a Network, US Patent 20120163234A1, filed 2015-11-03
- [32] Sulc, V. System for Message Acknowledgement and Data Collection in Wireless Mesh Networks, US Patent 20070188343A1, filed 2017-04-03.
- [33] Lim, C.L.; Goh, C.; Li, Y. Long-Term Routing Stability of Wireless Sensor Networks in a Real-World Environment. *IEEE Access* **2019**, *7*, 74351–74360, doi:[10.1109/ACCESS.2019.2920248](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920248).
- [34] Sajadian, S.; Ibrahim, A.; Pignaton de Freitas, E.; Larsson, T. Improving Connectivity of Nodes in Mobile WSN; 2011; p. 371; doi: 10.1109/AINA.2011.81

- [35] Lohs, S.; Karnapke, R.; Nolte, J. Link Stability in a Wireless Sensor Network – An Experimental Study. In Proceedings of the Sensor Systems and Software; Martins, F., Lopes, L., Paulino, H., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, **2012**; pp. 146–161., doi: 10.1007/978-3-642-32778-0_12
- [36] Delaney, D.T.; Higgs, R.; O’Hare, G.M.P. A Stable Routing Framework for Tree-Based Routing Structures in WSNs. IEEE Sensors Journal 2014, 14, 3533–3547, doi:10.1109/JSEN.2014.2329391.
- [37] Ishibashi, K.; Yamaoka, K. A Study of Network Stability on Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2015 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies; September **2015**; pp. 96–101., doi:10.1109/NGMAST.2015.42
- [38] Xu, Y.-H.; Wu, Y.; Song, J. A Routing Metric to Improve Route Stability in Mobile Wireless Sensor Networks. KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS) 2016, 10, 2245–2266, doi:10.3837/tiis.2016.05.016.
- [39] Sulc, V.; Kuchta, R.; Vrba, R. IQMESH Implementation in IQRF Wireless Communication Platform. In Proceedings of the 2009 Second International Conference on Advances in Mesh Networks; June **2009**; pp. 62–65., doi:10.1109/MESH.2010.17
- [40] Seflova, P.; Sulc, V.; Pos, J.; Spinar, R. IQRF Wireless Technology Utilizing IQMESH Protocol. In Proceedings of the 2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP); July **2012**; pp. 101–104.
- [41] Dąbrowski, S.; Bazydło, P.; Szewczyk, R. Functional Performance Testing of Routing Devices in Networks Based on IQMESH Protocol. In Proceedings of the Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques; Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M., Eds.; Springer

- International Publishing: Cham, **2015**; pp. 39–47., doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_5
- [42] Angelov, K.K.; Sadinov, S.M.; Kogias, P. Deployment of Mesh Network in an Indoor Scenario for Application in IoT Communications. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2021**, *1032*, 012004, doi:[10.1088/1757-899X/1032/1/012004](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1032/1/012004).
- [43] Fujdiak, R.; Mlynek, P.; Malina, L.; Orgon, M.; Slacik, J.; Blazek, P.; Misurec, J. Development of IQRF Technology: Analysis, Simulations and Experimental Measurements. *EIAEE* **2019**, *25*, 72–79, doi:[10.5755/j01.eie.25.2.22739](https://doi.org/10.5755/j01.eie.25.2.22739).
- [44] DPA - IQRF Available online: <https://www.iqrf.org/technology/dpa> (accessed on 1 October 2023).
- [45] IQRF Alliance. IQRF Technology. Available online: <https://www.iqrf.org/technology/> (accessed on 1 October **2023**).
- [46] IQRF Tech s.r.o., IQRF OS User's Guide Version 4.03D for (DC)TR-7xD, 2018, Available online: https://www.iqrfalliance.org/data_files/news/user-guide-iqrf-os-403d-tr-7xd-181025.pdf (accessed on 1 October **2023**).
- [47] Obr1342_p240.Jpg Available online: https://cdn.sos.sk/novinky/obr/obr1342_p240.jpg (accessed on 19 December **2023**).
- [48] Bouguera, T.; Diouris, J.-F.; Chaillout, J.-J.; Jaouadi, R.; Andrieux, G. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors* **2018**, *18*, 2104.
- [49] D. Tudose, L. Gheorghe, and N. Tăpuș, “Radio transceiver consumption modeling for multi-hop wireless sensor networks,” *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng.*, vol. 75, no. 1, pp. 17–26, 2013.

- [50] J. Song and Y. K. Tan, "Energy consumption analysis of ZigBee-based energy harvesting wireless sensor networks," 2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), 2012, pp. 468-472
- [51] V. Agarwal, R. A. DeCarlo, and L. H. Tsoukalas, "Modeling Energy Consumption and Lifetime of a Wireless Sensor Node Operating on a Contention-Based MAC Protocol," in IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 16, pp. 5153-5168, 15 Aug.15, 2017
- [52] Yunxia Chen and Qing Zhao, "On the lifetime of wireless sensor networks," in IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 11, pp. 976-978, Nov. 2005
- [53] Z. Cheng, M. Perillo and W. B. Heinzelman, "General Network Lifetime and Cost Models for Evaluating Sensor Network Deployment Strategies," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 7, no. 4, pp. 484-497, April 2008
- [54] Cheng, S., Li, B., Yuan, Z., Zhang, F., & Liu, J. (2016). Development of a lifetime prediction model for lithium thionyl chloride batteries based on an accelerated degradation test. Microelectronics Reliability, 65, 274–279
- [55] XENO-ENERGY Co. Ltd., XL-060F Li/SOCl₂ battery datasheet, http://www.xenoenergy.com/eng/file/Xeno%20Catalog%20XL-060F_E.pdf
- [56] IQ Home, Industrial Temperature Sensor [SI-T-02], <https://www.iqhome.org/SI-T-02>
- [57] Çabuk, U.C.; Akram, V.K.; Dağdeviren, O. An Experimental Analysis of Minimum Cut Size in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU); April **2019**; pp. 1–4.,doi: 10.1109/SIU.2019.8806304
- [58] Richardson, T.S. A Discovery Algorithm for Directed Cyclic Graphs **2013.**, doi:10.48550/arXiv.1302.3599

- [59] Araujo, J.; Cohen, N.; Giroire, F.; Havet, F. Good Edge-Labeling of Graphs. *Discrete Applied Mathematics* **2012**, 160, 2502–2513, doi:10.1016/j.dam.2011.07.021.
- [60] Bermond, J.-C.; Cosnard, M.; Pérennes, S. Directed Acyclic Graphs with the Unique Dipath Property. *Theoretical Computer Science* **2013**, 504, 5–11, doi:10.1016/j.tcs.2012.06.015.
- [61] Cho, S.; Elhourani, T.; Ramasubramanian, S. Resilient Multipath Routing with Independent Directed Acyclic Graphs. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications*; May **2010**; pp. 1–5., doi:10.1109/ICC.2010.5502526
- [62] Xu, Y.-H.; Wu, Y.; Song, J. A Routing Metric to Improve Route Stability in Mobile Wireless Sensor Networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)* **2016**, 10, 2245–2266, doi:10.3837/tiis.2016.05.016.
- [63] Dash, L.; Pattanayak, B.K.; Mishra, S.K.; Sahoo, K.S.; Jhanjhi, N.Z.; Baz, M.; Masud, M. A Data Aggregation Approach Exploiting Spatial and Temporal Correlation among Sensor Data in Wireless Sensor Networks. *Electronics* **2022**, 11, 989, doi:[10.3390/electronics11070989](https://doi.org/10.3390/electronics11070989).
- [64] Ergen, S.C.; Varaiya, P. TDMA Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Wireless Netw* **2010**, 16, 985–997, doi:[10.1007/s11276-009-0183-0](https://doi.org/10.1007/s11276-009-0183-0).
- [65] Hajovsky, R.; Pies, M.; Velicka, J. Monitoring the Condition of the Protective Fence above the Railway Track. *IFAC-PapersOnLine* **2019**, 52, 145–150, doi:[10.1016/j.ifacol.2019.12.747](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.747).
- [66] Hwang, D.; Kim, D. DFR: Directional Flooding-Based Routing Protocol for Underwater Sensor Networks. In *Proceedings of the OCEANS 2008*; September 2008; pp. 1–7.,doi: 10.1109/oceans.2008.5151939
- [67] Klempous, R. Collective Behavior in Wireless Sensor Networks. *Acta Polytechnica Hungarica* **2014**, 11.

- [68] Ko, Y.-B.; Choi, J.-M.; Kim, J.-H. A New Directional Flooding Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the Information Networking. Networking Technologies for Broadband and Mobile Networks; Kahng, H.-K., Goto, S., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2004; pp. 93–102.,doi: 10.1007/978-3-540-25978-7_10
- [69] Kumar, S.; Kim, H. Energy Efficient Scheduling in Wireless Sensor Networks for Periodic Data Gathering. *IEEE Access* **2019**, *7*, 11410–11426, doi:[10.1109/ACCESS.2019.2891944](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891944).
- [70] Lee, S.H.; Rhee, S.H. Efficient Flooding for Reliability in Link-State Routing Protocols. In Proceedings of the 2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC); October 2012; pp. 787–788.,doi: 10.1109/ICTC.2012.6387146
- [71] Manuel, E.M.; Pankajakshan, V.; Mohan, M.T. Data Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Transmission Ranges: Sensor Signal Aggregation Over Graph. *IEEE Sensors Journal* **2022**, *22*, 21135–21144, doi:[10.1109/JSEN.2022.3204800](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3204800).
- [72] Sarioz, D. Geometric Graph Theory and Wireless Sensor Networks., ISBN:978-1-267-23588-6
- [73] Xiong, S.; Li, J. An Efficient Algorithm for Cut Vertex Detection in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2010 IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems; June 2010; pp. 368–377.,doi: 10.1109/ICDCS.2010.38
- [74] Oehlers, M.; Fabian, B. Graph Metrics for Network Robustness—A Survey. *Mathematics* **2021**, *9*, 895.
<https://doi.org/10.3390/math9080895>
- [75] Zhang, D., Zhu, Y., Zhao, C., & Dai, W. (2012). A new constructing approach for a weighted topology of wireless sensor networks based on local-world theory for the Internet of Things (IOT). *Computers & Mathematics with Applications*, 64(5), 1044–1055.

- [76] "IQ Home - Wireless Sensor Networks and Solutions." Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.iqhome.org/>
- [77] "Sensor Battery Lifetime Calculator." Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.iqhome.org/sensor-battery-lifetime-calculator>
- [78] "Sensor Battery Lifetime Calculator API." Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://api.iqhtech.eu/>
- [79] "Node.js." Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://nodejs.org/en>
- [80] Jae-Hwan Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks," Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064), 2000, pp. 22-31 vol.1
- [81] Zhou, C., Wang, M., Qu, W., & Lu, Z. (2018). A Wireless Sensor Network Model considering Energy Consumption Balance. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–8.
- [82] Elshrkawey, M., Elsherif, S. M., & Elsayed Wahed, M. (2018). An Enhancement Approach for Reducing the Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30(2), 259–267
- [83] Muller, I., Winter, J. M., Brusamarello, V., Pereira, C. E., & Netto, J. C. (2014). Algorithm for estimation of energy consumption of industrial wireless sensor networks nodes. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings.
- [84] Nikolaos A. Pantazis; Dimitrios J. Vergados; Dimitrios D. Vergados; Christos Douligeris (2009). Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling. , 7(2), 322–343.

- [85] Muller, Ivan; Winter, Jean; Pereira, Carlos; Brusamarello, Valner; Netto, Joao C. (2016), 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) - Energy consumption estimation for TDMA-based industrial wireless sensor networks.
- [86] J. A. Khan, H. K. Qureshi, and A. Iqbal, "Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 41, pp. 159–176, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.06.009.
- [87] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, May 2009, doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003.
- [88] I. Das, R. N. Shaw, and S. Das, "Analysis of Energy Consumption of Energy Models in Wireless Sensor Networks," in *Innovations in Electrical and Electronic Engineering*, M. N. Favorskaya, S. Mekhilef, R. K. Pandey, and N. Singh, Eds., in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer, 2021, pp. 755–764. doi: 10.1007/978-981-15-4692-1_57.
- [89] B. Guruprakash, C. Balasubramanian, and R. Sukumar, "An approach by adopting multi-objective clustering and data collection along with node sleep scheduling for energy efficient and delay aware WSN," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 13, no. 1, pp. 304–319, Jan. 2020, doi: 10.1007/s12083-019-00779-3.
- [90] J. Ma, W. Lou, Y. Wu, X.-Y. Li, and G. Chen, "Energy Efficient TDMA Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks," in *IEEE INFOCOM 2009*, Apr. 2009, pp. 630–638. doi: 10.1109/INFOCOM.2009.5061970.
- [91] S. V and C. Chandrasekar, "Cluster based Sleep/Wakeup Scheduling Technique for WSN," *International Journal of Computer Applications*, vol. 72, pp. 15–22, Jun. 2013, doi: 10.5120/12513-8030.

- [92] R. Chauhan and V. Gupta, "Energy Efficient Sleep Scheduled Clustering & Spanning Tree based data aggregation in wireless sensor network," in 2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), Mar. 2012, pp. 536–541. doi: 10.1109/RAIT.2012.6194617.
- [93] Y. Wu, X.-Y. Li, Y. Liu, and W. Lou, "Energy-Efficient Wake-Up Scheduling for Data Collection and Aggregation," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 21, no. 2, pp. 275–287, Feb. 2010, doi: 10.1109/TPDS.2009.45.

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [S1] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Comparison of Data Collecting Methods in Wireless Mesh Sensor Networks". In Proceedings of the 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI); February 2018; pp. 000155–000160., doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S2] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Deep Sleep Algorithms in Battery Powered TDMA Wireless Mesh Sensor Network". In Proceedings of the 2018 IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI); November 2018; pp. 000115–000118.,doi: 10.1109/CINTI.2018.8928209
- [S3] Kopják, J.; Sebestyén, G. "Energy Consumption Model of Sensor Nodes Using Merged Data Collecting Methods". In Proceedings of the 2022 IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI); March 2022; pp. 000027–000030.,doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S4] G. Sebestyén; J. Kopják, "Battery Life Prediction Model of Sensor Nodes using Merged Data Collecting methods," 2022 IEEE 20th

Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), Poprad, Slovakia, 2022,

- [S5] Sebestyén, G.; Kopjak, J., "Network Mapping for TDMA Mesh Sensor Networks with Flooding Routing". In Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE); November 2022; pp. 153–156., doi: 10.1109/SAMI54271.2022.9780791
- [S6] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Optimization of TDMA Wireless Network Mapping using Merged Data Collecting", SISY 2023 IEEE 21st International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Budapest, Magyarország: IEEE Hungary Section (2023) 663 p. pp. 659-662., doi: 10.1109/SISY60376.2023.10417891
- [S7] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Assessing the Stability of Time-Division Multiple Access (TDMA) Mesh Networks through Flooding Route Selection", SISY 2023 IEEE 21st International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Budapest, Magyarország: IEEE Hungary Section (2023) 663 p. pp. 649-652., doi: 10.1109/SISY60376.2023.10417892
- [S8] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Energiahatékonyság javítása szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban", KVK PhD Workshop Minikonferencia, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2023) 23 p. pp. 8-9.
- [S9] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Hálózat feltérképezési eljárás szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz", XXXVIII. Kandó Konferencia 2022, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022), 68-68

- [S10] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, Hálózat feltérképezési eljárás szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz, XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet
- [S11] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, "Estimating Battery Life in TDMA Mesh-based Wireless Sensor Networks for Merged Data Collection Method", Acta Polytechnica Hungarica, 21:3 pp. 225-244. (2024)
- [S12] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, " Enhancing Battery Efficiency through Dynamic Data Collection Scheduling in IQRF Wireless Sensor Networks", Acta Electrotechnica et Informatica, 23:4 pp. 3-9. (2023)

VIII. További tudományos közlemények

- [S13] Bartos, Béla; Wendler, Márk; Kopják, József; Sebestyén, Gergely, Virtuális laboratórium, XXXII. Kandó Konferencia 2016: Kandó a tudomány hajóján, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2016) pp. 1-5.
- [S14] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, Vezeték nélküli beléptető rendszer architektúrális tervezése, XXXIII. Kandó Konferencia 2017: "Kandó a tudomány hajóján", Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2017) 193 p. pp. 148-161.
- [S15] Kopják, József; Sebestyén, Gergely; Mátrai, Pál, IQRF DPA alapú vezeték nélküli beléptető rendszer szoftverének megvalósítása, XXXIII. Kandó Konferencia 2017: "Kandó a tudomány hajóján", Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2017)

- [S16] Laslo Olah, Richardson; Grigorii, Sokolovskii; Sergey, Losev; Ekaterina, Sokolovskaya; Peter, Czifra; Gergely, Sebestyen, System and method for aiding hearing, USA szabadalom:US-10893370-B1
- [S17] Sebestyén, Gergely; Kopják, József, Hálózat feltérképezési eljárás szövevényes topológiájú időosztásos vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz, XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet
- [S18] Jozsef, Kopjak; Gergely, Sebestyen, Event-driven Fuzzy Inference System Implementation in Node-RED, IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Proceedings, Sisy 2019, Szabadka, Szerbia: IEEE Hungary Section (2019) 273 p. pp. 255-260., doi: 10.1109/SISY47553.2019.9111512