



MISKOLCI
E G Y E T E M

GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**VEZETÉK NÉLKÜLI SZENZORHÁLÓZATOK
ÖNSZERVEZŐDŐ ÉS ÖNJAVÍTÓ KÉPESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA**

Ph.D. értekezés

KÉSZÍTETTE:

Varga Attila Károly

Okl. mérnök-informatikus

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

TERMELÉSINFORMATIKA TÉMATERÜLET

MÉRÉS- ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Prof. Dr. Szigeti Jenő, CSc, dr. habil

egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Czap László, PhD

egyetemi docens

(† Prof. Dr. Ajtonyi István)

A kutatás a TÁMOP 4.2.4. A/2-11-1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

NYILATKOZAT

Alulírott Varga Attila Károly kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, vagy átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2015. február 25.


.....
Varga Attila Károly

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Varga Attila Károlyt 2004-ben ismertem meg, amikor Okl. mérnök-informatikusként az Automatizálási Tanszékre került, mint tudományos segédmunkatárs. 2005-ben kezdte el PhD tanulmányait a Miskolci Egyetem Hatvány József Informatikai Tudományok Doktori Iskolában, melyet 2010-ben sikeresen abszolvált, doktori szigorlatát 2013-ban summa cum laude minősítéssel tette le.

A doktori értekezése a napjainkban számos alkalmazási területhez kötődő vezeték nélküli szenzorhálózatok témakörében készült, ezen belül is önszerveződő algoritmusokkal foglalkozik, újonnan kidolgozott modellek, módszerek és alkalmazások bemutatásán keresztül. Az értekezés jól felépített egységet alkot, magába foglalja a jelölt elmúlt évek alatt elért legfontosabb kutatási eredményeit.

Varga Attila Károly az oktatói-kutatói munka mellett nagy hangsúlyt fektet arra, hogy az elért tudományos eredményekről hazai és nemzetközi folyóiratokban, konferenciákon, tudományos fórumokon is beszámoljon, számos hazai és idegen nyelvű publikációval rendelkezik, három szakmai könyv társszerzője digitális jelfeldolgozás és ipari kommunikáció témakörben. Nyitott és érdeklődő az újdonságok, szakmai trendek iránt, képes megbirkózni az előtte álló kihívásokkal. Jó kommunikációs és koordinációs készsége, szakmai ismeretei képessé teszik arra, hogy megoldja a kitűzött feladatokat, személyével erősítse a csapatszellemet és segítse társait, kollégáit.

Mindezt összegezve Varga Attila Károlyt az újdonságok, szakmai trendek iránt nyitottnak és érdeklődőnek ismertem meg, képes megbirkózni az előtte álló kihívásokkal. Jó kommunikációs és koordinációs készsége, szakmai ismeretei képessé teszik arra, hogy megoldja a kitűzött feladatokat, személyével erősítse a csapatszellemet és segítse társait. .

Az értekezés Varga Attila Károly saját eredményeit tartalmazza, mely alapján a jelölt számára a Ph.D. cím odaítélését messzemenően támogatom és javaslom.

Miskolc, 2015. február 25.



.....
Dr. Czap László
témavezető, egyetemi docens

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik biztatásukkal, támogatásukkal, segítségükkel hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Külön szeretnék köszönetet mondani tudományos vezetőimnek Dr. Czap László úrnak és Dr. Ajtonyi István professzor úrnak, akik szakmai irányításukkal, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal nélkülözhetetlen útmutatást, segítséget nyújtottak kutatómunkámhoz. Jó érzéssel tölt el, hogy a kezdetektől fogva kollégaként kezeltek, együttműködésünk során nemcsak szakmai, hanem baráti tanácsukkal is segítettek munkámat, építő jellegű javaslataikkal nagyban hozzájárultak az értekezés elkészítéséhez.

Köszönet illeti Dr. Illés Béla, Dr. Szigeti Jenő és Dr. Tóth Tibor professzor urakat, akik a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola vezetőiként mindig is biztosítottak támogatásukról, figyelemmel kísérték munkámat, hasznos tanácsukkal, szakmai iránymutatásukkal segítettek munkámat.

Köszönöm a Miskolc Egyetem Automatizálási és Infokommunikációs Tanszék valamennyi kollégájának, hogy szakmailag és erkölcsileg is támogatták munkámat, lehetővé tették dolgozatom megírását.

Köszönetet mondok Homonnai Emesének, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatalának dolgozójának, aki a doktori képzést és a kutatómunkámat érintő valamennyi hivatalos és egyéb adminisztratív ügy intézésében folyamatosan segítségemre volt.

Hálás vagyok Feleségemnek, Édesanyámnak, Misi bácsinak, Nagyszüleimnek, Családom valamennyi Tagjának és Barátaimnak a biztatásukért, türelmükért, kitartó támogatásukért, melyről munkám során folyamatosan biztosítottak, és végig mellettem álltak.

Az értekezést

Nagyszüleim – Mama & Papó – emlékének

szeretném ajánlani.

*„A fejlődéshez két dolog kell: fáradhatatlan kitartás,
és az a készség, hogy olyasmit is el tudjunk vetni,
amibe pedig sok időt és munkát fektettünk be.”*

(Einstein)

TARTALOMJEGYZÉK

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....	11
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	13
ÁBRA- ÉS TÁBLAJEGYZÉK	15
1. BEVEZETÉS	17
1.1. Motiváció, célkitűzések.....	19
1.2. A dolgozat felépítése.....	20
1.3. A kutatási terület irodalmi áttekintése.....	21
2. TOPOLOGIA FELÜGYELET	28
3. GRÁFELMÉLETI ALAPOK, MINIMÁLIS KÖLTSÉGŰ ÚTKERESŐ ALGORITMUSOK.....	32
3.1. GRÁFELMÉLETI ALAPFOGALMAK, JELÖLÉSEK.....	32
3.2. GRÁFOK ÁBRÁZOLÁSI MÓDJAI	34
3.3. LEGRÖVIDEBB ÚT KERESÉSE GRÁFBAN	35
3.3.1. Szélességi keresés.....	37
3.3.2. Dijkstra algoritmusa	37
3.3.3. A Bellman-Ford algoritmus	38
3.3.4. Két adott csúcs közötti legrövidebb út	38
3.3.5. Egy adott csúcsba érkező legrövidebb utak	39
3.3.6. Floyd algoritmusa.....	39
3.3.7. Warshall algoritmusa	39
3.3.8. Johnson algoritmusa.....	39

3.3.9. MOHÓ legjobbat először algoritmus	39
3.3.10. A* algoritmus	39
4. ÖNSZERVEZŐDŐ VEZETÉK NÉLKÜLI SENZORHÁLÓZATOK	41
4.1. SENZOROK KÖZÖTTI KOMMUNIKÁCIÓ	42
4.2. SZÉLES KÖRBE HASZNÁLT VEZETÉK NÉLKÜLI SZABVÁNYOK	43
4.3. A ZIGBEE KOMMUNIKÁCIÓS SZABVÁNY	44
4.3.1. ZigBee hálózati topológiák	46
4.3.2. Önjavító képesség	48
4.3.3. ZigBee alkalmazási területek	48
5. LOKALIZÁCIÓ VEZETÉK NÉLKÜLI SENZORHÁLÓZATOKBAN	49
5.1. A LOKALIZÁCIÓ KIFEJEZÉS ÉRTELMEZÉSE	49
5.2. LOKALIZÁCIÓS ALAPPROBLÉMA	51
5.3. LOKALIZÁCIÓS KIHÍVÁSOK	53
5.4. SENZORCSOMÓPONTOK KÖZÖTTI LOKALIZÁCIÓ ABSZTRAKT MEGFOGALMAZÁSA	54
6. MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL MEGALKOTÁSA	56
6.1. ÖNSZERVEZŐ, ÖNJAVÍTÓ ELVŰ MŰKÖDÉS VIZSGÁLATA	57
6.2. A MODELL MEGALKOTÁSA SORÁN PRIORITÁSSAL KEZELT KÉRDÉSEK	59
6.3. A MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL MEGALKOTÁSA	60
6.3.1. Feladatprobléma definiálása	61
6.3.2. Megbízhatóság, súlyfüggvény bevezetése	62
6.3.3. Szensorok működési módjai	63
6.3.4. Súlyfüggvény definiálása	66
6.3.5. Megbízhatósági osztályok bevezetése	78
6.3.6. Megbízhatósági gráf modell mátrix-os ábrázolása	80

7.	MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL ALAPÚ RENDSZER FEJLESZTÉSE ...	85
7.1.	FEJLESZTŐKÖRNYEZET.....	86
7.1.1.	Adatbázis struktúra kialakítása.....	86
7.1.2.	Konfigurációs állomány.....	88
7.2.	KEZELŐFELÜLET	90
7.3.	MEGBÍZHATÓSÁG ALAPÚ ALGORITMUS IMPLEMENTÁLÁSA	90
7.3.1.	Szenzorrács generáló algoritmus	91
7.4.	SZENZOR MEGBÍZHATÓSÁGI OSZTÁLYOK VIZUALIZÁLÁSA	95
7.5.	MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL ALAPÚ ÚTVONALVÁLASZTÁS SZIMULÁCIÓJA.....	96
	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	102
	ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK.....	105
	SUMMARY	106
	IRODALOMJEGYZÉK.....	109
	SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....	118

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

2D	Two-dimensional (2-dimenziós)
3D	Three-dimensional (3-dimenziós)
AB	adatbázis
AOA	Angle of Arrival
AP	Access Point
APL	Application Layer
APS	Application Support Sublayer
CDMA	Code Division Multiple Access
CTCA	Cooperative Topology Control with Adaption
DB	Database
DOA	Direction of Arrival
FDD	Full-Function Device
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IR	Infrared
IrDA	Infrared Data Association
ISM	Industrial-Science-Medical
K+F	kutatás-fejlesztés
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
MAC réteg	közeghozzáférési réteg

MPT	Minimum Power Topology
NS2	Network Simulator 2
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PHP	Hypertext Preprocessor
PHY réteg	fizikai réteg
PLC	Programmable Logic Controller
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced-Function Device
RFID	Radio Frequency IDentification
RSS	Received Signal Strength
SQL	Structured Query Language
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIFI	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

JELÖLÉSJEGYZÉK

R^+	pozitív valós számok halmaza
N	természetes számok halmaza
i, j, k, n, m	indexek
σ	szórás
$G = (E, V)$	irányítatlan gráf (önszerveződő szenzorhálózat)
$V(G)$	G gráf csúcshalmaza (node-ok)
$E(G)$	G gráf élhalmaza (node-ok közötti kommunikációs élek)
$ V $	a csúcshalmaz számossága
$ V $	az élhalmaz számossága
$ v $	$v \in V$ fokszáma
$u \rightsquigarrow v$	$u \in V$ és $v \in V$ csomópontok közötti út
$d(u, v)$	$u \in V$ és $v \in V$ csomópontok közötti út hossza
$G' \subset G$	G' részhalmaza, részgráfja G -nek
v_i	i -ed csomópont (node)
$e(i, j) = e_{ij}$	v_i és v_j csomópontok közötti kommunikációs él
w	gráf éleire megadott költségfüggvény
$w_{uv} = w_{vu}$	$e(u, v)$ él súlya
\exists	létezik kvantor
\forall	minden (bármely) kvantor
$v_i \in V$	v_i csúcs (node) eleme a V csúcshalmaznak (hálózatnak)
$v_i \notin V$	v_i csúcs (node) nem eleme a V csúcshalmaznak (hálózatnak)
$V' \subseteq V$	V' csúcshalmaz részhalmaza V csúcshalmaznak
$E' \subseteq E$	E' élhalmaz részhalmaza E élhalmaznak
Π	produktum (szorzat)
Σ	szumma (összeg)
A	szomszédsági mátrix
K	súly/költségmátrix

$M[i,j]$	M mátrix $[i,j]$ eleme
MM	megbízhatósági mátrix
PAM	pillanatnyi aktivitási mátrix
PTM	pillanatnyi terhelési mátrix
Tx	adás
Rx	vétel
$TxRx$	adás-vétel
Id	idle (tétlen) működési mód
I_{max}	csomópont maximális energiaszintje
$I_{aktuális}$	csomópont aktuális energiaszintje
I_{Rx}	Rx üzemmód energiaigénye
I_{Tx}	Tx üzemmód energiaigénye
I_{Id}	$Idle$ üzemmód energiaigénye
$I_{AS} = I_{SA}$	<i>aktív</i> \rightarrow <i>alvó</i> , <i>alvó</i> \rightarrow <i>aktív</i> állapotváltozás energiaigénye
ΔI_{Rx}	energiaszint változás vétel esetén
ΔI_{Tx}	energiaszint változás adás esetén
$t_{AS} = t_{SA}$	<i>aktív</i> \rightarrow <i>alvó</i> , \rightarrow <i>aktív</i> állapotváltozás időtartama
t_{Rx}	vétel időtartama
t_{Tx}	adás időtartama
t_{Id}	idle üzemmód időtartama
R_{bit}	adatsebesség
a_{iRx}	i -edik csomópont aktuális fogadási aktivitása
a_{iTx}	i -edik csomópont aktuális küldési aktivitása
$a_{Rx,max}$	maximális fogadási aktivitása
$a_{Tx,max}$	maximális küldési aktivitása
m_i	i -edik csomópont megbízhatósága
a_{iTx}	i -edik csomópont aktuális küldési aktivitása
$z=f(x,y)$	kétváltozós függvény
$M-$	megbízhatatlan csomópont osztály
$M+$	megbízható csomópont osztály
MTx	Tx megbízhatósági csomópont osztály
MRx	Rx megbízhatósági csomópont osztály

ÁBRA- ÉS TÁBLAJEGYZÉK

1. ábra: A topológia felügyeleti réteg elhelyezkedése a rétegmodellben	28
2. ábra: Szenzorcsomópont blokk-sémája.....	29
3. ábra: Irányított gráf.....	33
4. ábra: Súlyozott gráf.....	34
5. ábra: ZigBee vezeték nélküli hálózati protokoll rétegek.....	45
6. ábra: Csillag topológia	46
7. ábra: Mesh hálózati topológia.....	47
8. ábra: Klaszter fa topológia.....	47
9. ábra: Útvonal kialakítása többszörös ugrással.....	48
10. ábra: Vezeték nélküli szenzorhálózat elemei	52
11. ábra: Útvonalkeresés	58
12. ábra: Szenzor üzemmódok.....	63
13. ábra: Direkt kommunikáció két csomópont között.....	64
14. ábra: Többugrásos (multihop) üzenettovábbítás	64
15. ábra: Csomópont szerepek.....	66
16. ábra: Hálózati pillanatkép 1.	72
17. ábra: Élek súlyozása v1 leképzés szerint	72
18. ábra: Hálózati pillanatkép 2.	72
19. ábra: Élek súlyozása v2 leképzés szerint	73
20. ábra: Az (u,v) él súlyának előállítása.....	74

21. ábra: A súlyfüggvény kimeneteiből képzett felület az xyz 3D térben.....	75
22. ábra: A módosított súlyfüggvény kimeneteiből képzett felület az xyz 3D térben	76
23. ábra: Egy elképzelt hálózat gráfja.....	81
24. ábra: A megbízhatósági gráf modell rendszer koncepciója	85
25. ábra: Adattároláshoz használt adatbázis táblák	87
26. ábra: Részlet a rendszer kezelőfelületéből	90
27. ábra: Szenzor rácsszerkezet kialakítása a szimulációs vizsgálatokhoz	91
28. ábra: A és B node nem tud direkt mód kommunikálni egymással.....	91
29. ábra: A és B node direkt mód kommunikálnak egymással	92
30. ábra: Rácsvonalak elmozdításának szemléltetése	93
31. ábra: Legenerált rácsszerkezet 8 x 8 rácsvonal esetén	93
32. ábra: A szenorrács generátor függvény kimenete 8 x 8 rácsvonal esetén.....	95
33. ábra: Csomópont megbízhatósági osztályozás vizualizálása	96
34. ábra: 5 x 5-ös rácsszerkezetű gráf.....	99
35. ábra: 20 iteráció után kialakuló hálózatkép	99
36. ábra: 40 iteráció után kialakuló hálózatkép	100
37. ábra: 54 iteráció után kialakuló hálózatkép	100
38. ábra: A program lefutása után kialakuló pillanatkép a hálózatunkról.....	101
1. táblázat: Az XBee és XBee-PRO modulok karakterisztikái.....	65

1. BEVEZETÉS

A vezetékes hálózat hátránya a vezeték nélkülivel szemben, hogy ha kapcsolódni akarunk hozzá, mindenképpen valamilyen kábeles összeköttetést kell létrehoznunk, ami igen csak korlátozza a mozgásunkat, vagy mai divatos kifejezéssel élve a mobilitásunkat. Vezeték nélküli hálózat esetében azonban nincs szükségünk kábelekre, készülékeink hatósugarán belül bárhol kapcsolatot létesíthetünk más eszközökkel. Elosztott szenzorhálózatokat több mint 30 éve alkalmaznak, de a vezeték nélküli szenzorhálózat [3] az utóbbi években kapott nagy hangsúlyt a vezeték nélküli technológia fejlődésével és térhódításával, mely lehetővé tette, hogy olcsó, kisméretű, alacsony fogyasztású és több célú szenzorok alkalmazására épülő kommunikációt használjanak rövid távolságokra. [9]

A vezeték nélküli szenzorhálózatok használata, fejlesztése eleinte a hadiiparban, hadászatban figyelhető meg a 1970-es évektől. Azonban a vezeték nélküli szenzorhálózatok (*Wireless Sensor Networks: WSNs*) gyorsan elterjedtek a civil felhasználók körében, és egyre jelentősebb szerepet töltenek be a mindennapi élet számos területén [4]. Köszönhető ez a szenzor árának rohamos csökkenésének, alacsony energiafelvételnek [13][14], valamint a kisméretű, de egyre bonyolultabb funkciók ellátására képes érzékelőknek. Az olcsó, intelligens szenzorok tömegének hálózata soha nem látott lehetőségeket kínálhat háztartások, városok és a környezet megfigyelésére és irányítására. Ezen túlmenően a hálózati érzékelők széles spektrumát alkalmazzák lakóépületek, gyárterületek őrzésére, illetéktelen behatolók jelzésére, mint riasztórendszerek érzékelői, valamint új területe a szenzorhálózatok használatának a felderítési és felügyeleti feladatok ellátása is. A vezetékes és vezeték nélküli ipari kommunikáció napjainkban forradalmi szakmai változásokat és megnövelt szolgáltatásokat biztosít az ipar, kereskedelem, közlekedés, mezőgazdaság területein [42]. Különösképpen igaz ez a logisztikai, a mechatronikai és ipari kommunikáció részterületekre.

A vezeték nélküli hálózatok az évek során több szabvánnyal is gazdagodtak [1][2][26]. Napjainkban több vezeték nélküli kommunikációs szabvány áll rendelkezésre közepes és nagysebességű adatátvitelhez, hang, kép, videó továbbító, és számítógépes hálózatok kiszolgálásához, a kínálatból azonban nem rég még hiányoztak a szenzor és vezérlő egységek speciális igényeit kielégítő vezeték nélküli kommunikációs szabványok. Ezek a rendszerek nem igényelnek nagy sávszélességet, de szükséges a rövid várakozási idő, az alacsony energiafelhasználás és a biztonságos kommunikáció.

A szenzorhálózatok egyre több területen elterjedő [4], intelligens egységekből felépülő mérőrendszerek. Úgy is fogalmazhatnánk, hogy a szenzorhálózatok a környezettel szorosan kapcsolatban álló [41], kisméretű, intelligens, esetleg mobil eszközök százainak szoros együttműködése [26][27], melyek próbálják kényelmesebbé tenni világunkat. Avagy a szenzorhálózatok sok intelligens érzékelő egységből felépített, önálló működésre képes elosztott számítógépes hálózatok [25]. Ezeket az eszközöket nevezzük intelligens pornak, vagy idegen kifejezéssel *smart dust*-nak is. Az apró eszközök „telepítése” abból áll, hogy megfelelően nagy számban kihelyezzük őket, majd a szenzorok autonóm módon hálózatba szerveződnek, vagyis üzembe helyezésüket követően operátori beavatkozás nélkül is képesek működni. A szenzorok a tér különböző pontjain méréseket, esetleg beavatkozó tevékenységeket is végezhetnek. Az alapvető adatgyűjtő funkción kívül az érzékelő hálózat képes adatfeldolgozás és analízis jellegű feladatok elvégzésére is.

Az ipari kommunikáció és az erre épülő automatizálás révén korábban nem, vagy igen költségesen megoldható automatizálási feladatok mára elérhető valósággá váltak. Ezek révén jelentősen növekednek az ilyen rendszerrel ellátott eszközök szolgáltatásai, csökken a méretük, növelik a termékek hozzáadott értékét. Az új technológia alkalmazásának szükségessége megkérdőjelezhetetlen, ugyanakkor alkalmazásának, a szakemberek kiképzésének, a rendszerek diagnosztikájának igen jelentős kutatási igényei vannak. Ezen technológia alkalmazásával jelentősen nő a technológiai eszközök, termékek, rendszerek intelligencia szintje a vezeték nélküli kommunikációs eszközök terén is.

1.1. MOTIVÁCIÓ, CÉLKITŰZÉSEK

Kutatómunkám során számos K+F munka, ipari megbízás és projekt keretében lehetőségem nyílt nagy prioritással kezelt, valós problémák elméleti és gyakorlati hátterének feltárásában, megoldásában részt venni. A matematikai alapokra visszavezethető modellezést, szimulációt és informatikai jellegű fejlesztéseket magukban rejtő problémákat feszegető ipari munkák lehetőséget teremtettek, hogy az elméleti tudásomat a gyakorlatba is átültessem, és további szakmai tapasztalattal gazdagítsam ismereteimet.

A szenzorhálózatok tématerület azért is volt számomra vonzó, mert számos megoldatlan, illetve további finomításra váró problémát vet fel, mely magában rejtje az újszerű, innovatív jellegű megoldáskeresést. Egyfajta motivációként hatott az is, hogy ugyan a vezetékes hálózatokat már viszonylag régóta használjuk a mindennapi élet számos területén, a „vezeték nélkülség” viszont nemrég került be a köztudatba, mely új lehetőséget hordoz magában. A vezeték nélküli megoldás számos kérdést vet fel a helyzetbecsléssel (lokalizáció) kapcsolatban [59], a meglévő lokalizációs technikák elemzése új modellek, algoritmusok, alkalmazások alapjait teremtheti meg, mely szintén motivációként hatott a témaválasztásomra.

A speciális ipari biztonsági hatások kommunikáció-biztonságra gyakorolt hatásának vizsgálata során (a ZigBee, az IrDA, a GPRS és más IEEE 802.11 szabványú kommunikációs rendszerekre alapozottan) célul tűztem ki az önszerveződő szenzorhálózatok működésének, a széles körben elterjedt lokalizációs technikáinak, valamint önszerveződő és önjavító képességének minél mélyebb megismerését. Kiemelt célom volt, hogy a megismert algoritmusok alapján olyan rendszermodellt állítsak fel, mely révén hatékonyságnövelés érhető el a szenzorhálózatok maximális konnektivitása, és a hálózati csomópontok energiafelhasználása terén, növelve ezzel a megbízható, emberi beavatkozás nélküli hatékony működést, és redukálva ezáltal a váratlan működésbeli zavarok (pl. elemek lemerülése) okozta kieséseket, továbbá mely megteremti a lehetőségét a gyakorlatban is jól hasznosítható alkalmazás koncepciójának megalkotására. A modell megalkotása során a legfontosabb szempontnak a megbízhatóságot tartottam azon okból kifolyólag, hogy az önszerveződő

kommunikáció során alkalmazott topológia felügyeleti algoritmusok csomópont választásának hatékonyságát növeljem. Ezen tématerülettel egy konkrét ipari munka kacsán kezdtem el komolyabban foglalkozni, amikor egy termelő vállalat abban kérte a segítségünket, hogy készítsük el a vállalat wireless térképét oly módon, hogy maximális lefedettséget biztosítva az egyes csomópontok több úton legyenek elérhetők, ugyanakkor a beruházási költségeket is számításba véve, ne legyen túlzottan redundáns a rendszer. A gráfokra visszavezethető optimalizálási feladatok már hallgató koromban is rendkívül érdekelték. Egy-egy valós probléma matematikai absztrakcióval történő leírása, modellek és algoritmusok segítségével megfogalmazott forgatókönyvek felállítása és szimulációja során a megoldáskeresés sokrétű, izgalmas kihívást rejt magában.

A tudományos szempontok mellett valós ipari kutatás-fejlesztési együttműködés során felmerült problémát alapul véve nemcsak az útvonalválasztó algoritmust is befolyásoló döntési modell megalkotása volt cél, hanem egy olyan alkalmazás specifikálása is, mely egy könnyen kezelhető, felhasználóbarát, grafikus felületet, továbbá szimulációs lehetőséget biztosít az új modell és ráépülő algoritmus működésének tesztelésére.

1.2. A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE

Az első fejezetben egy átfogó képet adok a kutatási területemhez kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalom vonatkozásában.

A második és harmadik fejezetben a topológia felügyeletet, majd a modell bevezetéséhez szükséges gráfelméleti alapokat tekintem át. A negyedik fejezetben rátérek a kutatási területem bemutatására, az önszerveződő vezeték nélküli kommunikációs technológiákat taglalom. Tekintettel arra, hogy a ZigBee vezeték nélküli kommunikációs szabvánnyal tüzetesebben foglalkoztam kutatómunkám során (könyvfejezet is készült belőle [s19]), így a vezeték nélküli szenzorhálózatok legfontosabb tulajdonságait, működési elvét, alkalmazási lehetőségeit ezen keresztül mutatom be. Az ötödik fejezetben az önszerveződő vezeték nélküli szenzorhálózatok egyik kiemelt témájáról, a kutatásom során is kellő hangsúllyal

tanulmányozott lokalizációról számolok be röviden. A hatodik fejezetben részletesen bemutatom kutatómunkámat és az elért eredményeket. Egy teljesen új elméleti modellt vezetek be a szenzorhálózat csomópontjainak és a közöttük fennálló kommunikációs utak megbízhatóságának vizsgálatára, melyek a téziseim alapjául szolgáltak. A modellem működésének igazolására kifejlesztett keretrendszert és az elvégzett szimulációs vizsgálatokról a 7. fejezetben számolok be.

1.3. A KUTATÁSI TERÜLET IRODALMI ÁTTEKINTÉSE

Tekintve, hogy a kutatási terület igen szorosan kapcsolódik a gyakorlathoz, így a publikációk is sokszor köthetőek egy-egy alkalmazáshoz, azoknak a finomításához, továbbfejlesztéséhez. Mind a hazai, mind a nemzetközi publikációkban nyomon követhető, hogy az önszerveződő szenzorhálózatok témakörével, azon belül pedig a lokalizáció, önszerveződés kérdéseivel az élet számos területén találkozhatunk. A hálózatok mérete nagyságrendekkel is változhat az alkalmazások függvényében, melyet a rendszerkomponenseknek és maguknak az alkalmazásoknak is tolerálniuk kell a teljesítőképesség komolyabb megváltozása nélkül. A szenzorhálózatok elemszáma és sűrűsége nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint a hagyományos hálózatokban, mindemellett a szenzorok alacsony megbízhatóságú eszközök, igen korlátozott erőforrásokkal (sávszélesség, energia).

Szinte valamennyi publikáció kapcsán elmondható, hogy nagy hangsúlyt kap az egyes szenzoregységek megbízható működésének kérdésköre, ugyanis nem megfelelően ellenőrzött, és/vagy karbantartott rendszerek átmenetileg, vagy hosszabb távon is működésképtelenné válhatnak, ezzel akár jelentős működésbeli zavart és többletköltséget generálva. A működésbeli zavarok redukálását, a működési megbízhatóságot fókuszba helyezve végeztem kutatómunkámat, mivel valamennyi gyakorlati alkalmazás esetén elmondható, hogy az egész hálózatnak hibatűrő viselkedést kell mutatnia az érzékelők jelentős részének meghibásodása esetén is.

A továbbiakban a csomópontok, szenzorcsomópontok, önszerveződő eszközök, ad-hoc eszközök alatt ugyanazt értem.

A topológia felügyelet (*Topology Control*) egy rendkívül fontos kérdés a vezeték nélküli ad-hoc szenzorhálózatokban, melynek elsődleges célja, hogy a hálózat bizonyos tulajdonságait, azok változásait nyomon követve javítson a hálózat működésének hatásfokán, hatékonyabb hálózati algoritmusok révén. A többgrásos vezeték nélküli hálózatokban alkalmazott topológia felügyeleti algoritmusok lehetővé teszik a csomópontok számára, hogy az adóteljesítményt saját maguk állítsák be, ezzel gyakorlatilag kijelölve azon szomszédos csomópontokat, amelyekkel közvetlenül képesek kommunikálni, továbbá biztosítva olyan globális célokat, mint például a hálózati konnektivitás megőrzése, a lefedettség maximalizálása, vagy az energiafogyasztás minimalizálása.

A hálózati csomópontok saját energiaellátással rendelkeznek (elem, akkumulátor) melyeknél a fő cél, hogy emberi beavatkozás nélkül minél hosszabb távon képesek legyenek üzemelni. Az egyes csomópontok energiaforrásának élettartama együttesen determinálják a teljes hálózat élettartamát (a továbbiakban az elem, akkumulátor, energiaforrás szavakat egymás szinonimájaként fogom használni). Tekintve, hogy ezen energiaforrások kapacitása véges, így a csomópontok energia hatékony működése és működtetése kulcsfontosságú kérdés [54]. Működtetés alatt a hálózat állapotának felügyeletét, a hálózati eszközök működésének monitorozását és a szükséges beavatkozás együttesét értem. Egy lemerült csomópont nem képes jelet fogadni, illetve továbbítani, így kiesik a hálózati topológiából. Ha egy csomópont nemcsak közvetítő szerepet tölt be (közvetítés alatt egy csomópont hatókörében lévő *i-edik* csomóponttól érkező üzenet vételét és a hatókörben lévő *j-edik* csomópontnak való továbbítását értem) a hálózati kommunikációban, hanem például környezeti monitoring szerepet is (például a környezeti hőmérséklet, páratartalom, stb. mérése), akkor a mérési funkciójának sem tud eleget tenni, mely információvesztéshez vezet. Egy csomópont kiesése a hálózati topológiából nemcsak a kommunikációs utak megszűnését jelentheti, hanem a hálózat egyes szegmenseinek izolációját is magával vonhatja. Ha ezt a folyamatot nem

monitorozzuk, és nem avatkozunk be kellő időben, a kiesett csomóponton áthaladó hálózati forgalom más útirányt keres, a szomszédos csomópontok átveszik a szerepét az önszerveződő, önjavító működésből eredően. Ezzel gyakorlatilag az egyes csomópontok terhelése – terhelés alatt adott csomóponton áthaladó hálózati forgalmat értem – megnő, melynek eredményeként túlterhelt csomópontok alakulnak ki a hálózatban. Ennek következményeként ezek a csomópontok jóval hamarabb merülnek le, mint az várható lenne. Tegyük fel, hogy a kiindulási állapot óta egy periodikusan jelentkező forgalom jellemzi a hálózatot. Ez esetben az egymás után sorra lemerülő csomópontok egyre túlterheltebb, újabb hálózati csomópontokat eredményeznek, mely folyamatba, ha nem avatkozunk be, akkor először hálózati útvonalak, egyes hálózati szegmensek, majd akár a teljes hálózat működésképtelenné válhat. A szenzorcsomópontok és a teljes hálózat működésének hatékonyságnövelésével és élettartamának növelésével számos hazai és nemzetközi kutatás foglalkozik, melyekről rövid áttekintés kívánok adni.

Vincze Zoltán disszertációjában [11] olyan algoritmus dolgozott ki, amely több nyelű kontrollált telepítésével növeli az idővezérelt, vezeték nélküli szenzorhálózatok energiahatékonyságát, ezáltal meghosszabbítva azok működését.

Vincze Zoltán és Vida Roland [7] kutatásukban arra keresik a választ, hogy a szenzorok mobilitásának biztosításával, azaz áthelyezésük lehetőségével a kezdeti kiinduló állapothoz képest javítható-e a hálózat energia- és egyéb funkcióinak hatékonysága. Cikkükben széleskörű áttekintést nyújtanak a mobil eszközök szenzorhálózatokban való alkalmazásáról. Kutatásuk összegzésként kiemelik, hogy a csomópontok mobilitására irányuló javaslatok közös célja a hálózat működési minőségének a javítása, illetve a hálózat használhatóságának meghosszabbítása. Hangsúlyozzák, hogy az elméleti és szimulációs eredmények azt mutatják, hogy ezek a megoldások képesek a kitűzött célok elérésére, azonban a gyakorlati megvalósítások még váratnak magukra.

Gémesi Roland et al. [10] kutatómunkája a szenzorhálózatok biztonságát vizsgálja processz algebrai eszközök alkalmazásával, melyben rámutat, hogy az ad-hoc csomópontok

önszerveződő tulajdonsága milyen biztonsági fenyegetéseket rejt magában. A biztonságos kommunikációra egy kulcs-csere alapú protokollt mutat be, mely révén modellezhetővé és vizsgálhatóvá válnak a biztonságos útvonalválasztó mechanizmusok. Hangsúlyt helyez arra, hogy a szenzorhálózatokban az érzékeny információk védelmét a szűkös erőforrások figyelembevételével kell biztosítani.

Dóra László [8] szintén a biztonságos adattovábbítással foglalkozik vezeték nélküli multi-hop hálózatokban, mobil környezetben, késleltetés tűrő hálózatok és vezeték nélküli mesh hálózatok vizsgálatával. Kutatásában célul tűzte ki, hogy olyan elosztott ösztönző mechanizmust javasoljon, melynek köszönhetően a csomópontok akkor is tárolják, szállítják és továbbítják az üzeneteket, ha azok az üzenetekere nem 'kíváncsiak', növelve ezzel a kézbesített csomagok számát és csökkentve a kézbesítés idejét.

Ács Gergely kutatómunkája [12] a 'Biztonságos útvonalválasztás többugrásos vezeték nélküli hálózatokban' címmel az útvonalválasztó protokollok tervezési elveit vizsgálja biztonságuk elemzésével. A protokollok elemzéséhez a szimulációs paradigmához hasonló számításelméleti modellt használ, melyet eddig is sikeresen alkalmaztak kriptográfiai protokollok biztonságának elemzéséhez.

[13] energia hatékony hálózati megoldásokat mutat be. Az energiahatékonyság fontosságát gazdasági és környezeti tényezőkre vezeti vissza. A szerző kiemeli, hogy a teljes CO₂ kibocsátás 2%-ért a telekommunikációs szektor a felelős, ezzel meghaladva a teljes légközlekedés által generált mennyiséget. Üzemeltetési oldalról a költség hatékonyságra is kitér, mivel az energiatakarékos megoldások mellett, hogy csökkentik a szolgáltatók üzemeltetési költségeit, a hődisszipációt is csökkentik, ami nagyobb működési megbízhatóságot eredményez.

A hálózat hosszú távú üzemképességének biztosítása céljából tehát rendkívül fontos az energiával való hatékony gazdálkodás, a csomópontok azonos terhelése. Ez egyrészt biztosítható azzal, hogy a csomópontok minimális adóteljesítménnyel továbbítsanak egy

üzenetet, másrészt azzal, hogy a közelebbi csomópontokat részesítik előnyben a kommunikációs útvonal kiválasztása során. Ehhez szükséges feltétel, hogy a hálózat K -konnektivitású legyen, ahol $K \in \mathbb{Z}^+$, vagyis a hálózat egyik csomópontjából bármely másik csomópontjába legalább egynél több út vezessen. Ez a feltétel, továbbá a szenzorcsomópontok ad-hoc szerveződésű képessége gyakorlatilag azt is biztosítja, hogy egy csomópont kiesése esetén nem alakul ki egyből izolált hálózati rész. Ezt matematikailag úgy fogalmazhatjuk meg, hogy egy gráfban bármely csomópont fokszámának nagyobbának kell lennie egynél:

$$|v_i| > 1, v_i \in V, i = \{1, 2, \dots, |V|\}.$$

Minél nagyobb egy hálózat konnektivitása, annál nagyobb hiba-tolerancia jellemzi, így tehát beszélhetünk K -hibatűrő hálózatokról (matematikai absztrakciós szinten K -hibatűrő gráfokról). Számos szakirodalom a hálózat K -konnektivitásának fenntartásával foglalkozik [15], mely tulajdonságot nem csomópontonként, hanem globális szinten, a teljesen gráfban vizsgálják. A cél, hogy a teljes hálózat K -konnektivitása mindig maximális legyen.

Bahramgiri et al. [17] például pont ilyen topológia felügyeleti algoritmust mutat be a K -konnektivitás fenntartására a teljes hálózatra nézve. Ehhez viszont kiindulási alapként feltételeznie kellett, hogy valamennyi hálózati csomópont ugyanazzal a maximális teljesítménnyel sugároz, kizárva ezzel a csomópontok közötti aszimmetrikus kapcsolatok létezését, holott az algoritmus sokkal jobban közelítene a valós működéshez, ha megengednénk, hogy a csomópontok maximális adóteljesítménye különböző legyen.

[18] egy hibrid klaszter alapú topológia felügyeleti algoritmus elvi működését mutatja be, amelyben a K -konnektivitású hálózat elérésére és fenntartására a Shen et al. által javasolt modelltől [18] indul ki.

Chen és Son hibatűrő topológia felügyelet kutatásával foglalkoznak. [19] publikációjukban olyan elosztott algoritmust mutatnak be, mely a hálózati gerincet redundáns csomópontokkal

bővíti a K-hibatűrő topológia eléréséhez.

Indranil et al. [15] a hálózat egészét tekintve egy teljesen elosztott K-hibatűrő topológia felügyeleti algoritmust mutat be, melynek alapja, hogy feltételezi, hogy valamennyi csomópont maximális teljesítményen sugároz, de megengedi, hogy ez csomópontonként más és más legyen, vagyis Bahramgiri-vel ellentétben nem zárja ki az aszimmetrikus kapcsolatok létét. A rendszermodell felállításához Liu és Li [20] művéből indul ki, melyben megengedett a körsugárzó antennával felszerelt csomópontok adóteljesítményének adott értékre való beállítása, továbbá a csillapítást kettő hatványaival állítja arányba. Vagyis, ha egy csomópont r^2 adóteljesítménnyel sugároz, akkor egy r sugarú gömbfelület által kijelölt térben elhelyezkedő csomópontok képesek venni a gömb középpontjában lévő csomópont adását.

Xiaoyu et al. [22] a játékelmélet oldaláról közelíti meg a szenzorhálózatok élettartamának növelésének problémakörét, mely során feltételezi, hogy a csomópontok kooperatív módon képesek [28] változtatni az adóteljesítményüket. A kifejlesztett modell működését szimulációval vizsgálta, mely során az algoritmusára (CTCA: Cooperative Topology Control with Adaption) bebizonyította, hogy létezik a Nash egyensúly. A szimulációs eredmények kiértékeléséhez egy centralizáltan működő algoritmust is vizsgált, mely során megállapította, hogy az általa javasolt CTCA algoritmus jobban közelíti az optimumot.

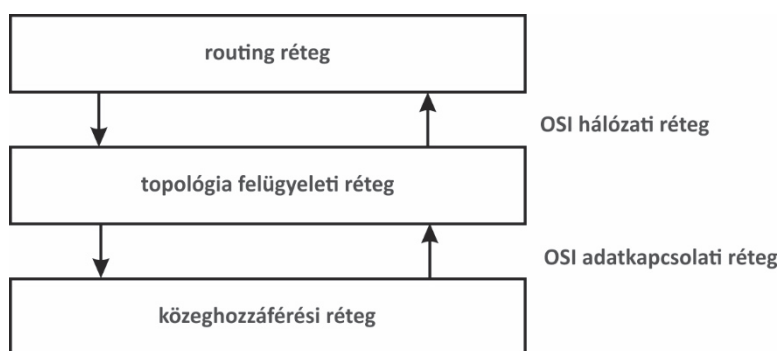
Az önszerveződő szenzorhálózatok témakörben a hazai és nemzetközi szakirodalmat vizsgálva megállapítható, hogy a topológia felügyeletével foglalkozó kutatások a hálózat egy vagy több jellemző paraméterének hosszú távú fenntartásával foglalkoznak, melyek mindegyike egy gráfon végzett optimalizálási feladatra vezethető vissza. Valamennyi javasolt megoldás azzal operál, hogy kezdeti feltételként rögzíti, hogy az egyes csomópontoknak beállíthatják-e egyedileg az adóteljesítményüket vagy eleve maximális szinten sugároznak, és ez a szint dinamikusan változhat-e a szomszéd csomópontok energiaszintjének függvényében vagy folyamatosan maximális szinten kívánják tartani.

Kutatásomban arra kerestem a választ, hogy miként lehet egy önszerveződő vezeték nélküli

szenzorhálózat élettartamának maximalizálása céljából javítani csomópontjainak energia gazdálkodásán, azaz mindig a lehető legmagasabb szinten tartani a hálózati konnektivitást, elkerülve ezzel a lemerülés állapotát, a hálózati csomópontok kiesését, valamint az ezzel generált hálózati útvonalak megszűnését és a teljes hálózat működésképtelenné válását. Ennek vizsgálatához elengedhetetlen az a matematikai absztrakció, mely során a szenzorhálózatot egy gráfnak megfelelően keressük az egyes csomópontok, útvonalak és a teljes hálózat optimális működtetési értékeit. Emiatt szükségesnek tartom a topológia felügyelet rövid áttekintését követően a gráfokkal kapcsolatos alapdefiníciókat és útkeresési algoritmusokat bemutatni ([5] alapján), melyekből kiindulva határoztam meg a hálózati rendszermodelleket, vezettem be a megbízhatósági gráf modellt.

2. TOPOLÓGIA FELÜGYELET

A topológia felügyelet az egyik legkritikusabb feladat a többugrásos vezeték nélküli szenzorhálózatokban, ugyanis a hálózat működőképességét, és annak hatékonyságát nagyban befolyásolja. Ebből kifolyólag számos kutatás [15] [16] [17][18][19][20][36][39] foglalkozik ezzel a problémakörrel arra keresve a választ, hogy miként lehet egy hálózatban a csomópontok közötti kapcsolatokat hosszú távon fenntartani, az önszerveződő és önjavító képességgel rendelkező csomópontok útvonalkereső algoritmusának optimalizálásával a teljes hálózat energia felhasználását minimalizálni. Az 1. ábra a topológia felügyeleti réteg OSI modellben való elhelyezkedését mutatja.



1. ábra: A topológia felügyeleti réteg elhelyezkedése a rétegmodellben

Kutatómunkám során ezzel a tématerülettel részleteibe menően foglalkoztam. Elsősorban azt vizsgáltam, hogy olyan adatgyűjtő funkciókat ellátó (pl. mezőgazdasági rendszerekben hőmérséklet, páratartalom, termőföld nedvesség tartama, stb.) csomópontokat tartalmazó szenzorhálózatokban, ahol az adattovábbítás ugyan nem időkritikus, de a mért adat célba juttatása prioritással kezelendő, miként tartható fenn a maximális hálózati konnektivitás. Célul tűztem ki egy olyan modell felállítását, mely az egyes csomópontokat kategorizálja aszerint, hogy mennyire megbízhatók (ez alatt a továbbiakban a csomópontok működésének

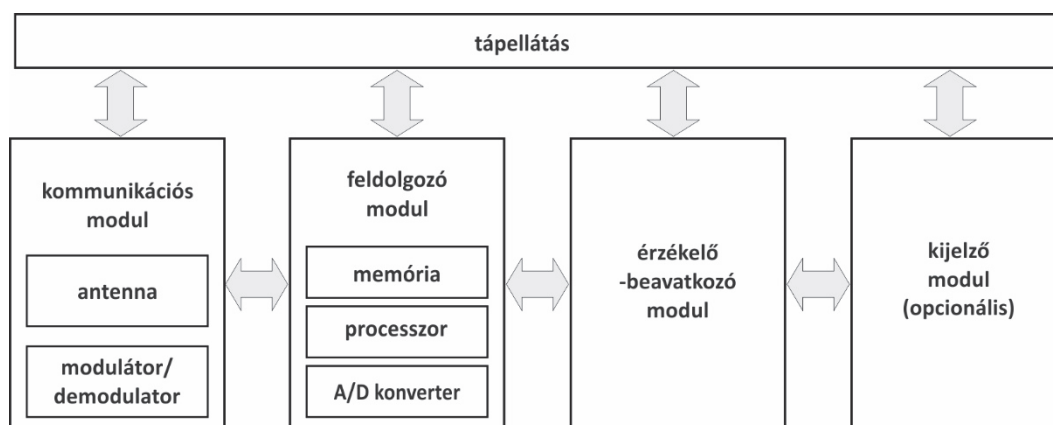
megbízhatóságát értem az energiaforrásuk függvényében), és ez alapján mennyire megbízható a csomópontok közötti kapcsolat.

Mind a nemzetközi, mind a hazai szakirodalom számos útvonalválasztó protokollról számol [72] [73] [74], melyek kétféleképpen közelítik meg a konnektivitási problémát:

- centralizált hálózati modell,
- elosztott hálózati modell.

A centralizált modell abból indul ki, hogy a teljes hálózati topológia központilag nyilván van tartva, ezzel a hálózat felépítése ismert valamennyi csomópont számára. Az elosztott hálózati modell csomópont szinten kezeli ezt a kérdést, azaz minden egyes csomópont csak a vele szomszédos csomóponttól bír információval, ezzel a csomópontokra nézve elosztottan biztosított a hálózati topológia felépítésére vonatkozó információ.

A szenzorcsomópontoknak nemcsak adattovábbító szerepük lehet, hanem különböző méréseket, elő- és adatfeldolgozásokat is képesek elvégezni. Ilyen egyéb feladattal ellátott többcélú szenzorokat alkalmaznak például mezőgazdasági alkalmazásoknál, földrengés előrejelző rendszereknél, katasztrófa sújtotta területek feltérképezésénél, vagy például katonai célokra is az ellenség területek felderítéséhez. A 2. ábrán egy ilyen célokra alkalmas szenzorcsomópont blokksémája [33] látható.



2. ábra: Szenzorcsomópont blokksémája

A fenti architektúrán is nyomon követhető, hogy az egyes modulok között kooperáció, szoros kommunikáció megy vége, melyek biztosításához energiára, tápellátásra van szükség. A szenzorcsomópontok működését biztosító energiaforrás (általában 2 ceruzaelem) az egyik legszűkebb erőforrás, így ezzel számos szempontot mérlegelve okosan kell gazdálkodni ahhoz, hogy folyamatos, hosszú távú működést biztosítsanak a csomópontok számára, ezzel megnövelve a teljes hálózat élettartamát.

A modellem felállítása során elsődleges céлом az volt, hogy az egyes csomópontokon jelentkező hálózati túlterhelések kiküszöbölése, és a maximális konnektivitás fenntartása céljából egy adott pillanatban adattovábbítás során kialakuló kommunikációs úton a jobban merült energiaforrással rendelkező csomópontokat tehermentesítsem, ezzel elkerülve az adatvesztést. Egyes nem időkritikus rendszerekben a mért adat megléte fontosabb, mint annak valós időben történő továbbítása. Ebből kiindulva valamennyi csomópont meglétének szükségességét azonos prioritással kezeltem, és azt tartottam szem előtt, hogy lemerülés közeli állapotban ne terheljük tovább, adott pillanatban becsülhető legyen az állapota/megbízhatósága, és időben jóslható legyen, hogy mikor fog lemerülni, ezzel tervezhető és költségtakarékos karbantartást eredményezve. A rendszermodell megalkotása során mérlegeltem azt a helyzetet, hogy esetenkénti interferencia, hibás működés, és egyéb tényezők súlyozása alapján sűrűbben kiválasztott, ezáltal még inkább túlterhelt csomópontok lemerüléséből fakadó kiesés – kiesés alatt egyrészt két csomópont közötti kapcsolat megszűnését, másrészt ezen jelenség gyakoriságának növekedésével kiesett csomópontok miatt meghíusult adattovábbítást értem – miatt, az önszerveződő, önjavító képességéből eredően miként helyeződik át a kommunikáció a szomszédos csomópontokra.

A szimulációs vizsgálatok egyértelműen azt mutatták, hogy egy-egy csomópont kiesése miatt megszűnő direkt kapcsolatok csökkenése az idő előrehaladtával még több túlterhelt csomópontot eredményez. Ez gyakorlatilag egy folyamatot indít be, melyből eredően még több csomópont esik ki a hálózatból, még több kapcsolat szűnik meg a csomópontok között, a kezdeti mesh jellegét egyre inkább elveszítve, mely egy idő után a teljes hálózat

működésképtelenségét is okozhatja. Egyrészt a szenzorcsomópontok által mért, de kézbesítetlenség végett elveszett adatok, másrészt a tömeges kiesések miatt izolálttá vagy működésképtelenné váló hálózati szegmensek leállása, a csomópontok energiaforrásának feltöltése vagy cseréje jelentős karbantartási költségeket generálnak.

Ezen szempontokat mérlegelve alkottam tehát meg a modelletem, melynek megalapozásához részletibe menően foglalkoztam a szenzorhálózatok felépítésével és működésével. A szenzorcsomópontok közötti kapcsolat-felépítés megértéséhez szükségesnek tartottam a lokalizáció, a kommunikációs utak optimalizálása, továbbá ezek matematikai leírásához szükséges gráfelmélet alapjainak, a gráfokra visszavezethető minimális költségű utak megkeresését célzó eljárások vizsgálatát. A következő két fejezetben röviden taglalom a gráfelmélet és a lokalizáció alapjait.

3. GRÁFELMÉLETI ALAPOK, MINIMÁLIS KÖLTSÉGŰ ÚTKERESŐ ALGORITMUSOK [5]

A gráfelmélet témakörével kapcsolatban számos szakirodalom állt rendelkezésemre [29] [30] [31][32][71] a Miskolci Egyetem Könyvtárában, melyek segítségemre voltak a gráfok elméleti alapjainak, optimalizálási feladatok megoldását kereső algoritmusok működésének és az ezekre visszavezethető gyakorlati problémák elemzésének, matematikai alapokon történő modellezésének megismerésében. Ezen túlmenően az Interneten is fellelhetők a témát részletiben boncolgató hazai és idegen nyelvű források, melyek közül [5]-öt lényegre törő, jól felépített szakirodalomnak tartom, tökéletes kiindulópontot biztosított a kutatási területemben vizsgált problémák matematikai megfogalmazására, absztrakt eszközökkel történő leírására, gráfokra való visszavezetéséhez.

A szenzorhálózatok működését célzó optimalizálási feladatok matematikai leírása, modellezés kapcsán rendkívül hasznos volt számomra a gráfelméletben tanultakat újra feleleveníteni.

Ebben a fejezetben az [5] szakirodalomra hagyatkozva mutatom be a gráfelmélet alapjait, és az erre épülő útkereső algoritmusokat.

3.1. GRÁFELMÉLETI ALAPFOGALMAK, JELÖLÉSEK

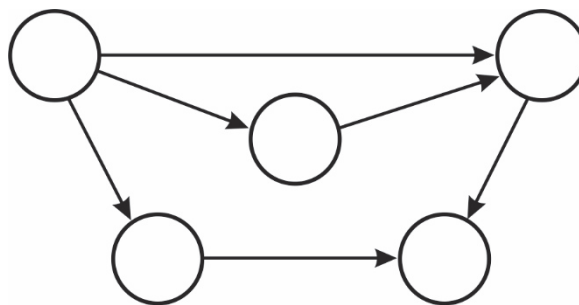
Definíció: Egy G gráf két halmazból áll: a csúcsok vagy pontok V halmazából, mely egy véges, nem üres halmaz; és az élek E halmazából, melynek elemei bizonyos V -beli párok.

Jelölések:

- $|H|$: a H halmaz elemszáma,

- $G = (V, E)$ gráf esetén:
 - o $|V|$ a csúcshalmaz elemszáma,
 - o $|E|$ az élhalmaz elemszáma.

Definíció: Az irányított gráfban (ld. 3. ábra) minden él irányított, azaz a csúcsok rendezettek. Az irányítást nyilak segítségével jelöljük.



3. ábra: Irányított gráf

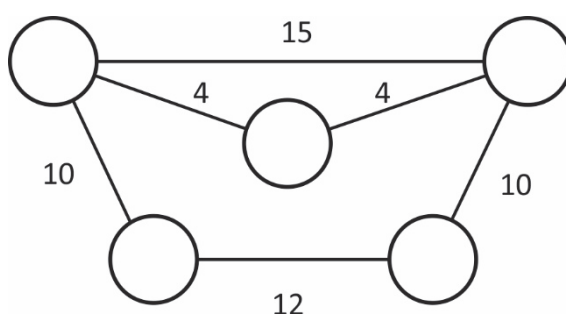
Amennyiben nincs irányításunk, vagy ha minden él oda és vissza is irányítva van, akkor irányítatlan gráfról beszélünk. Ekkor nem teszünk különbséget az (u, v) és a (v, u) élpár között.

A csúcsok közötti kapcsolat esetünkben út/kommunikáció létezését jelenti. A szenzorhálózatok matematikai modellezés során irányítatlan gráfokat fogok használni a kétirányú kommunikációra való tekintettel. Csomópontok között irányt csak akkor fogok jelölni, ha a forrás-nyelő útvonalon a pillanatnyi információáramlást szeretném hangsúlyozni.

Az élekhez gyakran költségek vagy súlyok tartoznak, amelyek időt, akár pénzt is jelenthetnek, esetünkben a szenzorcsomópontok energiaszintjével összefüggésben bevezetésre kerülő megbízhatóságot fogja jelölni. Ezt a kapcsolatot egy valós értékű függvénnyel szokás leírni, melynek értelmezési tartománya a gráf élhalmaza, az érték készlete pedig a valós számok

halmaza, és w -vel fogom jelölni, mely a súlyfüggvénnyel az élekhez rendelt súlyokra (*weight*) utal (ld. 4. ábra).

Definíció: A gráfban egy *út* csúcsok olyan v_1, \dots, v_k sorozata, melyben minden (v_i, v_{i+1}) *éle* ($1 \leq i \leq k-1$) a gráfnak. Az u -ból v -be menő útra (az irányítottság alatt továbbra is az aktuális küldő-fogadó szerepet értem a kétirányú kommunikációban) $e(u, v)$ vagy $u \rightarrow v$ jelöléssel fogok utalni.



4. ábra: Súlyozott gráf

Definíció: Legyen adott egy $G = (V, E)$ gráf a $w(e)$ ($e \in E$) élsúlyokkal. A G gráf egy u -ból v -be menő *útjának hossza* az úton szereplő élek súlyának összege.

3.2. GRÁFOK ÁBRÁZOLÁSI MÓDJAI

Két módszert szokás alkalmazni egy $G = (V, E)$ gráf ábrázolására: állítás és szomszadsági mátrix alapú ábrázolás.

Állítás ábrázolási mód

Definíció: A gráf minden csúcsához egy lista tartozik. Az $u \in V$ csúcs listájában tároljuk az u -ból kimenő éleket és azok súlyát, ezek összességét pedig egy tömbben tároljuk. Ezt nevezzük a gráfok *állítás ábrázolási módjának*.

Legyen a tömb neve *Szomszéd*. Vagyis $Szomszéd[u]$ elemei az u csúcs G -beli szomszédjai. Ha G irányított, akkor a szomszédossági listák hosszainak összege $|E|$, hiszen egy (u, v) élt úgy ábrázolunk, hogy v -t felvesszük a $Szomszéd[u]$ listába. Ha G irányítatlan, akkor az összeg $2 \cdot |E|$, mivel (u, v) irányítatlan él ábrázolása során u -t beletesszük a $Szomszéd[v]$ -be, míg v -t a $Szomszéd[u]$ -ba. Az éllistas ábrázolás legjobban a *ritka gráfok* esetében alkalmazható.

Definíció: Egy gráfot *ritkának* nevezünk, ha $|E|$ sokkal kisebb, mint $|V|^2$.

Szomszédossági mátrix alapú ábrázolás

A gráfok ábrázolásának másik módszere a szomszédossági, vagy adjacencia mátrix.

Definíció: A $G = (V, E)$ gráf *szomszédossági viszonyai* a következő négyzetes, szomszédossági mátrix-szal adható meg:

$$A[i, j] = \begin{cases} 0, & \text{ha } (i, j) \notin E \\ 1, & \text{ha } (i, j) \in E \end{cases} . \quad (1.)$$

Irányítatlan gráfok esetén a szomszédossági mátrix szimmetrikus lesz (azaz $A[i, j] = A[j, i]$ teljesül minden i, j csúcspárra). Ha az élekhez még költségeket is nyilván kell tartani, akkor egy olyan W súlymátrixot (vagy költségmátrixot) szokás használni, amelyben $W[i, j] = 0$, ha $i = j$, $W[i, j] = w(i, j)$, ha $i \neq j$ és (i, j) éle G -nek, $W[i, j] = *$ egyéb esetben ($*$ jelzi egy él nemlétét).

3.3. LEGRÖVIDEBB ÚT KERESÉSE GRÁFBAN

Mint azt már említettem, az önszerveződő szenzorhálózatok kutatása kapcsán az egyik legfontosabb kérdés a hálózat energiafogyasztásának optimalizálása. Kutatómunkám során olyan modell felállítását céloztam meg, amely a szenzorhálózat csomópontjaira ad egy $[0, 1]$ közötti megbízhatósági szintet (*a megbízhatóságot a csomópont energiaszintjével összefüggésben*

vezetem be), mely alapján el lehet dönteni, hogy mely csomópontok terhelhetők jobban egy üzenettovábbítás során, ezzel a csomópontok egyenletes terhelését biztosítva.

A modell felállítását követően arra kerestem a választ, hogy egy forrás – nyelő típusú adatkommunikáció során a csomópontok megbízhatóságát miként lehet összefüggésbe hozni a közöttük fennálló élek súlyával úgy, hogy megbízhatóbb élek (erre a 7. fejezetben bővebben is kitérek, amikor is bevezetem az élek súlyozására a költségfüggvényt) mentén jussak el forrás csomópontból a célcsomópontba. Ez a probléma a gráfelméletben ismert minimális költségű folyamfeladatokra, minimális költségű utak keresésére vezethető vissza, melynek megoldásához gráfokon értelmezett minimális útkereső algoritmusok működését vizsgáltam.

Az alábbiakban bemutatom ezek közül a legismertebbeket, a kevésbé elterjedt módszereket pedig csak egy-két mondat erejéig említem meg.

Az algoritmusok működésének bemutatása előtt, az ezekhez kötődő legfontosabb fogalmakat definiálom először, továbbra is az [5] kutatómunkára támaszkodva.

Definíció: *Legrövidebb út* alatt a gráfelméletben egy minimális hosszúságú utat értünk egy gráf két különböző u és v csúcsa között. Súlyozott gráfban ez olyan utat jelent, amelynek élein szereplő súlyok összege minimális, vagyis ha adott egy $G = (V, E)$ gráf a $w(e)$, $e \in E$ élsúlyokkal, akkor $d(u, v) = \min \sum_{e \in P} w(e)$, ahol P út u és v között.

Ez tehát az u és v csúcsok közötti minimális költségű út, ha $u \neq v$. Ha $u = v$ akkor ez a távolság, illetve a súly is 0 . Ha nincs út u és v között, akkor ezt ∞ -nel szokás jelölni.

Az útkereső probléma alapján az algoritmusokat négy fő csoportba sorolhatjuk:

1. Legrövidebb út egy kiinduló pont és az összes többi pont között: meg szeretnénk találni az összes $v \in V$ csúcsához egy adott $s \in V$ kezdőcsúcsból odavezető legrövidebb utat.

2. Legrövidebb út két különböző csúc között: keressük egy adott u csúcsból egy adott v csúcsba vezető egyik legrövidebb utat.
3. Legrövidebb út egy végpont és az összes többi pont között (az 1. megfordítása).
4. Legrövidebb út az összes csúcspár között: keressük az összes u és v csúcspárra egy u -ból a v csúcsba vezető legrövidebb utat.

Természetesen akadhat olyan legrövidebb út probléma, amelyben előfordulnak negatív élek is.

Definíció: A $G = (V, E)$ irányított gráf olyan körét, amelyben az élek súlyának összege negatív, *negatív körnek* nevezzük.

A szenzorhálózatok gráf alapú modellezése során pozitív élsúlyozást használunk, azaz negatív kör a gráfban kizárt, mivel ezzel biztosítható bármelyik $v \in V$ csúcs esetén, hogy a legrövidebb út súlya jól definiált maradjon.

Ha megengednénk, hogy létezzenek u -ből elérhető negatív körök, akkor viszont a legrövidebb út súlya definiálatlan lesz, ugyanis ilyen esetben mindig van kisebb súlyú rövidebb út, ha a feltételezett legrövidebbhez hozzávesszük a negatív kör egy bejárását. Ilyen esetekben ezt a távolságot $-\infty$ -nek definiáljuk. [Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, 2001]

3.3.1. Szélességi keresés

A szélességi keresés az egyik legegyszerűbb gráf bejáró algoritmus, ezen alapul sok fontos gráf algoritmus, többek között Dijkstra algoritmus is. Ez az eljárás az egységnyi súlyokkal ellátott gráf esetén keresi meg az $u \in V$ kezdőpontból az összes többi pontba vezető legrövidebb utakat úgy, hogy G éleit szisztematikusan megvizsgálja és kiszámítja az elérhető csúcsok távolságát u -tól. Elnevezése onnan ered, hogy az algoritmus az u -tól k távolságra lévő csúcsokat még azelőtt eléri, mielőtt egy $k+1$ távolságra levőt elérne, vagyis egyre szélesedő körben vizsgálódik. A szélességi bejárás segítségével a $d(u, v)$ távolságok lineáris időben meghatározhatók, ugyanis a következő teljesül.

Tétel:

Legyen $u = x_1, x_2, \dots, x_n$ a csúcsok szélességi bejárás szerinti sorrendje. Ekkor:

- $D[x_1] \leq D[x_2] \leq \dots \leq D[x_n]$
- Ha $u \rightarrow v$ éle G -nek, akkor $D[v] \leq D[u] + 1$
- $D[v] = d(u, v)$ teljesül minden $v \in V$ csúcsra.

3.3.2. Dijkstra algoritmus

Dijkstra algoritmus egy adott kezdőcsúcsból az összes többi csúcsba vezető legrövidebb utak problémáját egy súlyozott, irányított $G = (V, E)$ gráfban, abban az esetben oldja meg, ha a nincsenek negatív súlyok az éleken, vagyis ha minden $u \rightarrow v$ élre $w(u, v) \geq 0$ teljesül. Természetesen a módszer működik irányítatlan gráfok esetén is, mivel minden irányítatlan él felfogható úgy, mintha mindkét irányban irányított lenne.

3.3.3. A Bellman-Ford algoritmus

A Bellman-Ford algoritmus az adott kezdőcsúcsból induló legrövidebb utak problémáját abban az esetben oldja meg, amikor vannak az élek között negatív súlyúak, de nem találunk a gráfban negatív kört.

Az eljárás lényege:

Adott egy $w: E \rightarrow \mathbb{R}$ súlyfüggvénnyel súlyozott irányított $G = (V, E)$ gráf, ahol a kezdőcsúcs az s . Az algoritmus visszajelzi, ha van a gráfban s -ből elérhető negatív kör, ha nincs benne, akkor előállítja a megoldást.

3.3.4. Két adott csúcs közötti legrövidebb út

Ha megoldjuk az adott csúcsból az összes többi csúcsba vezető legrövidebb utak problémáját, akkor a két adott csúcs közötti legrövidebb út problémát is megoldottuk. Érdekes azonban, hogy nem ismert ennek a problémának olyan megoldó algoritmus, amelyik aszimptotikusan

gyorsabb lenne az adott csúcsból az összes többi csúcsba vezető legrövidebb utak problémájánál.

3.3.5. Egy adott csúcsba érkező legrövidebb utak

Ennek a problémának a megoldása nagyon egyszerű: csupán annyi a teendőnk hogy megfordítjuk a gráfunk irányítását. Ezáltal visszavezetjük a feladatot az egy csúcsból kiinduló legrövidebb utak kérdésére.

3.3.6. Floyd algoritmus

Ez az algoritmus abban az esetben oldja meg az összes csúcspár közötti legrövidebb utak problémáját, ha a bemenő gráfban nincsenek negatív körök (negatív élek lehetnek). Ezt az algoritmust akkor érdemes használni, ha a gráf éleinek száma jóval kisebb, mint a csomópontok száma, és az élsúlyok nemnegatívak.

3.3.7. Warshall algoritmus

Ez az algoritmus az imént említett Floyd algoritmusnál korábbi, de a módszer lényegében ugyanaz.

3.3.8. Johnson algoritmus

Johnson módszere ritka gráfokon az összes csúcspár közti legrövidebb utat gyorsabban találja meg, mint az eddig ismert módszerek.

3.3.9. MOHÓ legjobbat először algoritmus

A mohó legjobbat először keresés annak a csúcsnak az irányába indul el, amelyiket a legközelebbinek ítéli meg a célállapothoz. A mohó algoritmusnak két nagy problémája van: nem optimális, és nem teljes, mert elindulhat egy végtelen úton, és így soha sem fog visszalépni más lehetőségeket kipróbálni.

3.3.10. A* algoritmus

A legjobbat-először keresés leginkább ismert változata. Az eljárás egyik nagy hibája a

hatalmas memóriaigény, mivel a meglátogatott csúcsokat a memóriában tárolja. Ezért az A^* algoritmus nagyméretű problémákhoz nem praktikus.

Megjegyzés:

A csomópontok közötti útkeresés kapcsán a [19] szakirodalomban talált alábbi gondolat hatással volt a 7. fejezetben bemutatásra kerülő élsúlyozási módszer koncepciójának megalkotására:

„Maximális értékű xy -folyam általában nem egyértelmű”. [29]

4. ÖNSZERVEZŐDŐ VEZETÉK NÉLKÜLI SZENZORHÁLÓZATOK

A mai tipikus szenzorhálózatok elemszáma a néhány tucattól a több százig terjed, de teszteltek már több ezer szenzort tartalmazó hálózatokat is. A szenzorhálózatok általános felépítésére jellemző, hogy az adatgyűjtő szenzoregységek hálózatba rendeződnek, és a szenzor node-ok esetleg még kisebb feldolgozó műveleteket is végeznek az érzékelt adatokkal. Ezek a szenzorok az adatokat továbbítják egy átjáróként működő szenzorhoz, amely a mért adatokat továbbítja egy feldolgozó egységhez. [64][76]

A szenzorcsomópont (*más néven mote – az USA-ban elterjedt elnevezés*) gyakorlatilag egy olyan eszköz a vezeték nélküli hálózatban, amely képes adatfeldolgozásra, információ begyűjtésre, illetve kommunikációra a hálózatba kapcsolódó többi csomóponttal. Minden szenzor tartalmaz:

- saját érzékelő- és esetleg beavatkozó egységet,
- saját számítási egységet (mikrokontrollert),
- saját kommunikációs egységet (általában rádiót), valamint
- saját tápellátást (tipikusan szárazelemet vagy fényelemet).

Az alacsony ár és a kis méret következtében a szenzorok teljesítőképessége erősen korlátozott mind a számítási kapacitás, a memória, a kommunikációs képességek és a tápellátás tekintetében. A rádió néhány kbps (~250 kbps) sebességgel képes több méter (akár 100 méter) távolságra kommunikálni, mely azonban zárt térben jelentősen csökkenhet. Általában a tápellátást két ceruzaelem biztosítja, amellyel az egység folyamatosan néhány napig, „altatva” pedig hónapokig, akár évekig is képes üzemelni [77].

A szenzorhálózatok mérete a felhasznált szenzorok számának növekedésével nagyságrendileg változhat. Ezt a megváltozást a hálózatnak jelentősebb teljesítménybeli, illetve a működés

minőségének számottevő romlása nélkül tolerálnia kell. Ezt nevezzük skálázhatóságnak. A lokalizációs módszer kialakítást nagyban befolyásoló tényezők a költség, valamint a használhatósági korlátok, mivel egyes rendszerek nem működnek bizonyos körülmények között. A hálózatnak önállóan is képes kell lennie tolerálni a változásokat, el kell tudnia indítani a rendszer működését, mivel a nagy elemszám miatt az operátori beavatkozás igen nehézkes. Ez az önszerveződés igénye. [77]

A vezeték nélküli ipari kommunikáció esetén teljesülnie kell az alábbi követelményeknek:

- valós idejű átvitel (adatcsere),
- adatvédelem és zajszűrés,
- nagy megbízhatóságú eszköz hozzáférés,
- megfelelés az ipari környezeti követelményeknek, megfelelés az adatbiztonsági (*security*), ill. a technológiai biztonsági (*safety*) követelményeknek.

A szenzorhálózatok működését, köszönhetően a kis energiaigénynek, hosszabb időre akár több évre is tervezik jelentősebb szervizelés átalakítás nélkül. Minél összetettebb tulajdonságú, pontosabb működésre képes szenzorok használata esetén nő az energiafelvétel, valamint az eszközök gyártásának költsége is megemelkedik. Ezért kompromisszumokat kell kötni a hálózatban alkalmazott érzékelők mérésének megbízhatósága és az ár között.

A szenzorcsomópontok szerveződésnek, az eszközök közötti kommunikációs út felépítésének valamint az önszerveződő és önjavító működés megértéséhez fontosnak tartom dióhéjban összefoglalni a szenzorok közötti kommunikáció alapjait [76].

4.1. SZENZOROK KÖZÖTTI KOMMUNIKÁCIÓ [76]

A szenzorhálózatokban az átvitel módja lehet rádiós, infravörös tartományba tartozó vagy ultrahangos. Mindegyik lehetőségnek megvannak az előnyei és a hátrányai is.

Az infravörös tartományba tartozó hullámok nem sokkal a látható frekvenciaspektrum alatt

helyezkednek el. A hőt kibocsátó testek, berendezések, fénycsövek megzavarhatják a megbízható működésben, falakon nem képes áthatolni. A sebessége körülbelül megegyezik a rádióhullámok sebességével, tehát 3×10^8 m/s. A hatótávolsága hozzávetőleg 5 méter.

Az ultrahangos érzékelés előnye az alacsony ár. Viszonylag kis frekvencián, 40 kHz-en üzemel. A terjedési sebessége a hangéval megegyező 343 m/s. A legtöbb beltéri akadályról visszaverődik a hatótávolság maximum 10 méter, valamint ez a módszer érzékeny a környezet hőmérsékletének megváltozására is.

A rádiófrekvenciás kommunikáció [48] esetében érhető el a legnagyobb távolság, mivel a legtöbb akadályon és falakon képes áthatolni a rádióhullám, valamint több frekvenciasávon képes üzemelni. A szenzorhálózatokban alkalmazott tipikus rádiósávok az ún. ISM (Industrial, Scientific and Medical) sávokban találhatóak, például 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz a működési frekvenciák. A jelterjedési sebesség itt is nagyjából megegyezik az elektromágneses hullám vákuumbeli terjedési sebességével, amely 3×10^8 m/s.

A vezeték nélküli szenzorhálózatok kommunikációs sáv szélessége általában viszonylag alacsony: néhány tíz vagy száz kbps tartományban található. Ennek oka energiatakarékossági megfontolásokban keresendő.

4.2. SZÉLES KÖRBE HASZNÁLT VEZETÉK NÉLKÜLI SZABVÁNYOK

Ahogy a vezeték nélküli szenzorhálózat technológiája fejlődik, az erre épülő alkalmazások egyre szélesebb területen hódítanak teret. A vezeték nélküli kommunikációval az élet számos területén találkozhatunk. [34][35]

Az automatizálási, monitorozási célú hálózati alkalmazásokhoz leginkább a ZigBee típusú (IEEE 802.15.4 szabvány) kommunikációs rendszer használatos. A hagyományos technológiák a nagy mennyiségű adatfolyam Interneten keresztül történő továbbítását tartják

elsődleges célnak. A ZigBee olyan egyszerű feladatokat lát el, mint például világításvezérlés vagy hőmérsékleti adatok elküldése.

Az IEEE 802.11.b a 2,4GHz-es sávban működik, (mint ahogy a Bluetooth és a ZigBee is), nagy adatsebességet biztosít (11 Mbps) vezeték nélküli Internet hozzáférés révén, és tipikusan 30 és 100 méteres hatótávolságon belül használják. A Bluetooth közepes adatsebességet biztosít (kisebb, mint 3 Mbps) és 2-10 méteren belüli kommunikációra alkalmas. A ZigBee szolgáltatja a legalacsonyabb adatsebességet, ugyanakkor hosszabb elemélettartam jellemző rá.

A Bluetooth technológia remekül megállja a helyét a beszédátviteli és a nagyobb adatátviteli sebességet igénylő alkalmazásokban, ellenben a ZigBee technológia sokkal alkalmasabb az olyan felügyeleti alkalmazásokra, melyekhez nem kell nagyobb átviteli sebesség, viszont sokkal fontosabb a hatékony telephasználás, változtatható topológia, és csak kismértékű felhasználói beavatkozás (pl. távirányítás) szükségeltetik.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a vezeték nélküli hálózatok célja, hogy alacsony energiaigényű kommunikációt biztosítsanak adott hálózati tartományon belül anélkül, hogy bármilyen infrastruktúra kialakítására lenne szükség.

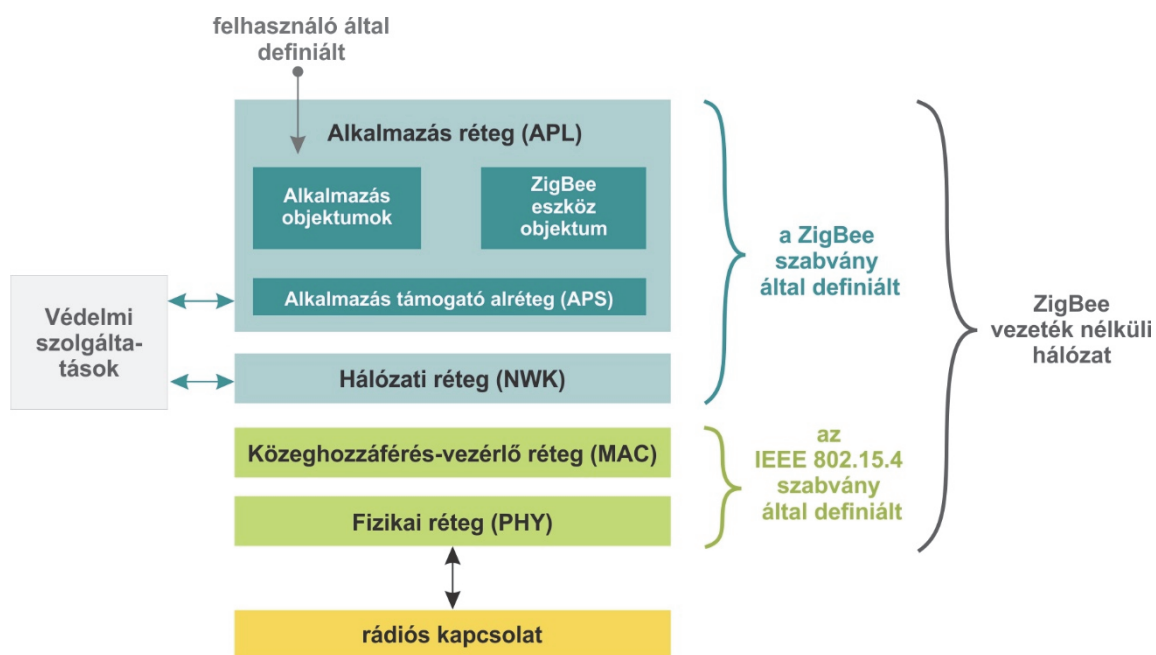
Az elmúlt években kutatómunkám során a ZigBee ad-hoc szerveződésű vezeték nélküli szabvánnyal részletekbe menően foglalkoztam. Tekintve, hogy erről egy külön könyvfejezetet is készítettem [s19], így az alábbiakban csak az értekezésem témájához szorosan kapcsolódó legfontosabb fogalmakra, hálózati önszerveződés révén kialakuló topológiákra, önjavító útvonalkereső tulajdonságaira [75] és a szabvány alkalmazási területeire térek ki, melyekre alapozott kutatómunkám révén sikerült új tudományos eredményeket megfogalmazni.

4.3. A ZIGBEE KOMMUNIKÁCIÓS SZABVÁNY

A ZigBee egy nyílt, globális szabványon alapuló vezeték nélküli, rádiós adatátviteli technológia, melynek tartalmát 2004-ben véglegesítették. A cél: kis adatátviteli sebességű és

kis hatótávolságú, alacsony energiafelhasználású, kis komplexitású hálózati rendszerben üzemeltethető rádiók megalkotása volt. Olyan vezeték nélküli eszközök létrehozását teszi lehetővé, amelyekre a Bluetooth, a WiFi, a Wi-Max, a Wireless USB vagy egyéb szabványú rádiók nem adnak megfelelő megoldást. Míg a mindennapjainkban használt, ismert vezeték nélküli technológiák csak néhány óráig képesek akkumulátorról működni, addig a ZigBee-t több éves üzemelésre tervezték.

A ZigBee protokollrétegek az OSI referencia modellen alapulnak (ld. 5. ábra). Minden egyes réteg bizonyos funkcióért felelős a hálózatban. A rétegek alapesetben csak adatot és parancsokat küldenek a felettük vagy alattuk lévő rétegek számára.



5. ábra: ZigBee vezeték nélküli hálózati protokoll rétegek [s19]

A ZigBee szabvány csak a hálózati, alkalmazás és biztonsági réteget definiálja, míg az IEEE 802.15.4 szabvány fizikai és közeg-hozzáférési réteget áttemeli a protokoll. Ennek köszönhetően egy ZigBee eszköz képes együttműködni az IEEE 802.15.4 szabványú eszközökkel.

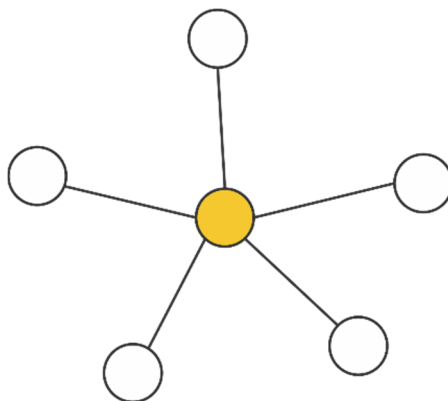
4.3.1. ZigBee hálózati topológiák

A lehetséges hálózati formációkat a ZigBee hálózati réteg határozza meg. A hálózat az alábbi topológiák szerint szerveződhet az IEEE 802.15.4 szabványban:

- csillag topológia (*star topology*),
- pont-pont topológia (*peer-to-peer*),
- klaszter fa (*cluster tree*).

Csillag topológia

A csillag topológiában (ld. 6. ábra) minden egyes eszköz csak a koordinátorral tud kommunikálni. Egy tipikus forgatókönyv a csillag hálózati szerveződés során, amikor egy koordinátornak programozott FFD (Full-Function Device – FFD, teljes funkciójú eszköz) az aktiválást követően elkezd felépíteni a saját hálózatát.

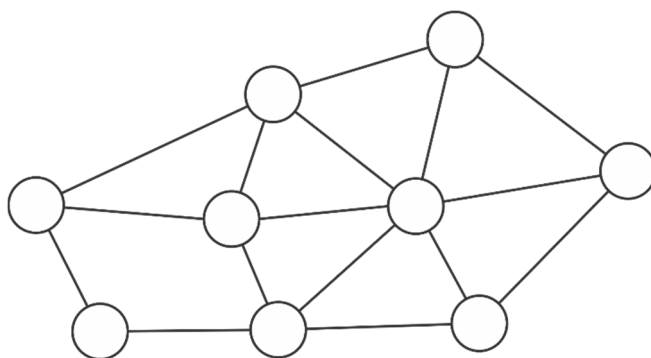


6. ábra: Csillag topológia

Pont-pont/mesh topológia

A pont-pont topológiában minden egyes eszköz közvetlenül tud kommunikálni bármely másik eszközzel, ha az eszközök a hatókörüknek megfelelő távolságra vannak elhelyezve. Egy pont-pont hálózat többféleképpen szerveződhet attól függően, hogy milyen megkötések vonatkoznak a kommunikációban résztvevő eszközökre. Amennyiben semmilyen megkötés nincs megadva, akkor a csomópontok szabadon kommunikálhatnak a hatósugarukon belül

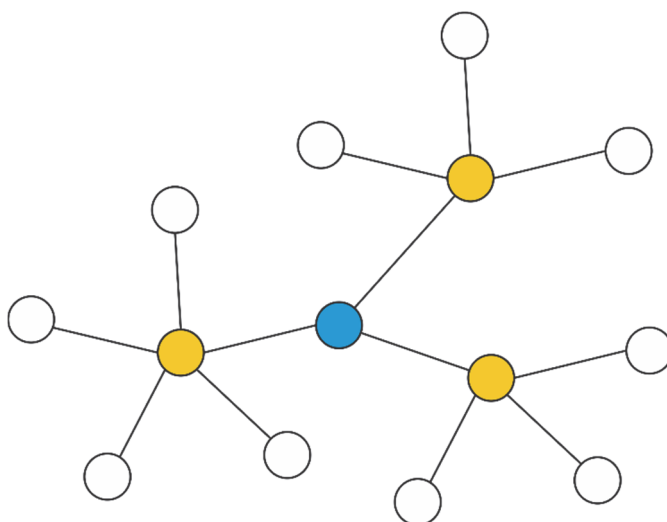
lévő bármely másik csomóponttal, tehát szövevényes hálózat (*mesh*) alakul ki (ld. 7. ábra), mely fokozza a hálózat hibatűrő, önjavító képességét. Legfőbb előnye tehát, hogy egy eszköz kiesése esetén a szomszédos (azaz *hatókörben lévő*) eszköz átveszi a meghibásodott eszköz szerepét.



7. ábra: Mesh hálózati topológia

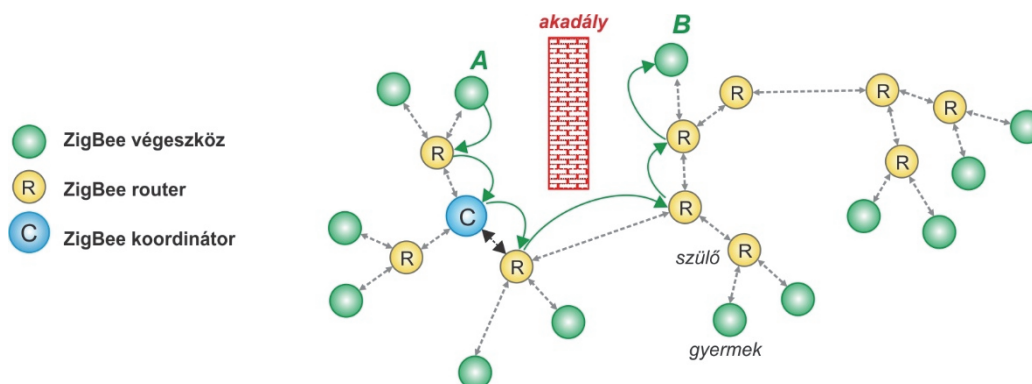
Fa topológia

A pont-pont kommunikáció egy másik formációja, amit a ZigBee támogat, a fa topológia (ld. 8. ábra). Ebben az esetben, a ZigBee koordinátor alakítja ki az induló hálózatot. A ZigBee routerek hozzák létre az ágakat és közvetítik az üzeneteket. A végesszközök a fa struktúra leveleinek tekinthetők, melyek az üzenettovábbításban nem vesznek részt.



8. ábra: Klaszter fa topológia

4.3.2. Önjavító képesség



9. ábra: Útvonal kialakítása többszörös ugrással

A 9. ábrán megfigyelhető, hogy egy üzenet továbbítás miként terjesztheti ki a hálózatot akkor, amikor valami akadály folytán másik útvonalat kell választani a kommunikáció lefolytatásához. Az *A* eszköz üzenetet akar küldeni a *B* eszköznek, de a kettő között lévő akadály miatt a jelerősség annyira leromlik, hogy direkt módon nem oldható meg a kommunikáció. A fa topológia révén az üzenet el fog jutni a *B* eszközhöz, kikerülve az akadályt. Ezt többszörös ugrásnak (*multi-hopping*) is szokták nevezni, mivel az üzenet az egyik csomóponttól a másikra ugrálva tud elérni a célsomóponthoz, mely gyakran nagy üzenetkésleltetés révén érhető el.

4.3.3. ZigBee alkalmazási területek

ZigBee kompatibilis termékek nemcsak szigorú értelemben vett szenzorhálózat alkalmazásokban fordulnak elő, az élet számos területén használják, mint például: épület automatizálás, világítás szabályozás, ipari vezérlés, szórakoztató elektronika, egészségügy stb. A teljes ZigBee protokoll implementációja megbízható mesh hálózatot eredményez, egy egyszerű alkalmazás esetén elegendő az IEEE 802.15.4 rétegeket implementálni. A ZigBee eszközök révén gyakorlatilag megnövelhetjük a hatékonyságot [73] és csökkenthetjük a költségeket.

5. LOKALIZÁCIÓ VEZETÉK NÉLKÜLI SZENZORHÁLÓZATOKBAN

A vezetékes hálózatokkal ellentétben a vezeték nélküli hálózatokban egy csomópont olyan üzenetet (a továbbiakban üzenet, adatcsomag alatt ugyanazt értem) is megkap, amit ugyan nem neki címeztek, de a célcsomóponthoz való üzenetkézbesítés garantálásához felépülő kommunikációs út részesévé válva szükségszerűen üzenetvevő és -továbbító szerepet tölt be. Az önszerveződő jellegből adódóan a szenzorcsomópontok képesek felderíteni a környezetükben lévő szomszéd csomópontokat (*szomszédsági viszony* alatt egy adott csomópont és a hatósugarában lévő csomópontok közötti direkt kapcsolatot értem), azaz valamennyi csomópont információval rendelkezik arról, hogy mely csomópontokkal képes közvetlenül kommunikálni. Azokat a szenzorokat, amelyeknek ismert a pozíciója anchor-oknak [40] nevezzük (magyarul: *vasmacska*, *borgony*). Ezen egységek helyzete meghatározható például globális helymeghatározó rendszerrel, illetve pozícióbecslő algoritmus révén (az irodalom ezeket a csomópontokat *'setteled'*, azaz telepített node-oknak nevezi), vagy már a telepítési koordinátái ismertek (pl. a telepítést végző személy manuálisan megadja, ezeket *'Beacon'*, azaz jeladó [62] csomópontként említi az irodalom). Az ismeretlen pozíciójú node-ot *'dumb'* (néma) és *'free'* (szabad, mozgásában nem korlátozott) csomópontnak is nevezik.

5.1. A LOKALIZÁCIÓ KIFEJEZÉS ÉRTELMEZÉSE

A szakirodalom a hálózati topológia felépítése során a csomópontok közötti szomszédsági viszony felderítését lokalizációnak nevezi [76]. A lokalizáció kifejezés a magyar és idegen nyelvekben egyaránt megannyi jelentést hordoz magában mind a hétköznapi szóhasználat, mind a szakirodalomban betöltött terminus technicus szerepét illetően. A 'lokalizáció' különböző értelmezéseinek vizsgálata során számos definícióval találkoztam magyar és idegen nyelven egyaránt, melyek közül néhányat szeretnék megemlíteni.

Idegen szavak szótára szerinti értelmezés:

„Behatárolás, helyhez kötés, helyhez kötöttség, helymegjelölés; bizonyos helyre való szorítás, továbbterjedés megakadályozása, elszigetelés. Számítástechnikában: fordítás, honosítás. Latin eredetű szó (locus).”

[<http://idegen-szavak.hu>]

Hétköznapi értelmezés:

„Localization is real and widely used word but its meaning is not too easy to understand. With common sense it can be deduced that localization includes a refer to something local, near and close.”

[<http://translation-blog.multilizer.com/what-is-localization/>]

Egy szakcikk szerinti értelmezés:

„Monitoring applications define an important class of applications used in wireless sensor networks. In these applications the network perceives the environment and searches for event occurrences (phenomena) by sensing different physical properties, such as temperature, humidity, pressure, ambient light, movement, and presence (for target tracking). In such cases the location information of both phenomena and nodes is usually required for tracking and correlation purposes.”

[<http://abvaz.ist.unomaha.edu/azad/temp/sal/07-boukerche-localization-sensor-wireless-network.pdf>]

Szoftverfejlesztés, IT területen vett értelmezése (több nyelvre való fordítás, honosítás):

„Software localization (or localisation) means translation of a software interface and messages to another language plus adaptation of some formats (e.g. measures, dates and currency) plus adaptation to local cultures.”

[http://edutechwiki.unige.ch/en/Software_localization]

„Die Lokalisierung ist die Anpassung des Produktes an die sprachlichen, kulturellen und andere Bedürfnisse einer bestimmten Zielumgebung oder eines Marktes (LISA – Localization Industry Standards Association). Wir bieten folgende Lokalisierung an: Software Lokalisierung, Webseiten Lokalisierung, Webdokumentationen”

[<http://www.optimus-uebersetzung.com/translation-lokalizacija.php>]

Orvostudományban:

„Localisation in neurology is not difficult, but the principal of „garbage in-garbage out” does apply: if you fail to identify the clinical signs correctly, then you will be unable to identify where the problem is. Fortunately, clues frequently come from each of the various systems such as cranial nerves, motor and sensory, so that the localisation of the lesion may be confirmed by examining each system.”

[<http://academic.sun.ac.za/neurology/lectures/local.htm>]

További értelmezések:

beazonosítás és nyomon követés (logisztika), diagnózis felállítása (orvosi tudományok), helyzet felderítés (robotika, hadászat), termékek adaptációja és elosztása (üzleti élet), tájékozódás/információgyűjtés (újságírás)

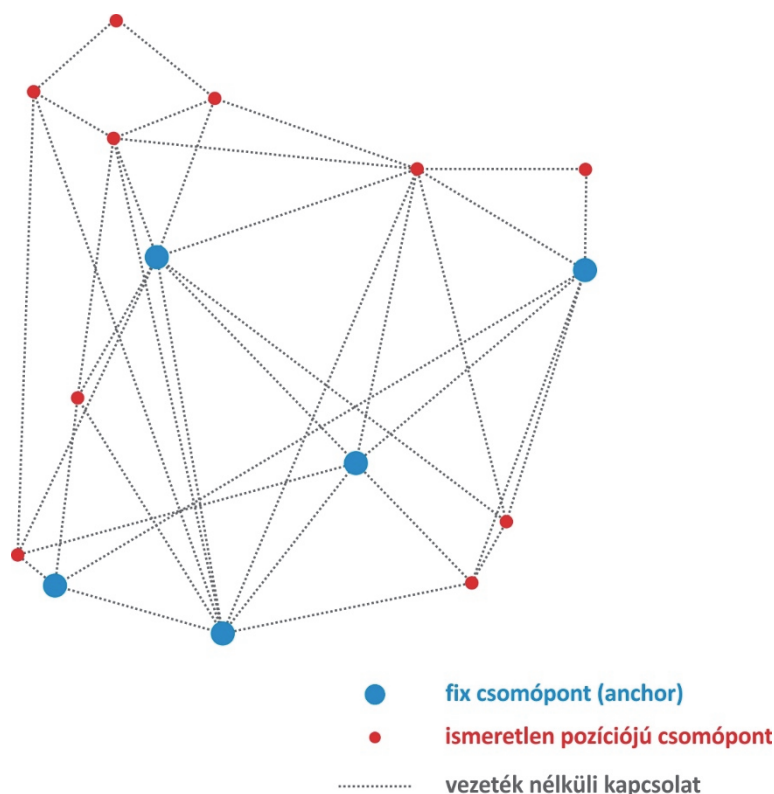
Tekintve, hogy a lokalizáció meglehetősen túlterhelt kifejezéssé vált napjainkban, így fontosnak tartottam értelmezését röviden áttekinteni, mivel sokszor a hazai és nemzetközi szakcikkekben is számos kifejezés szinonimájaként, sokszor nem is a klasszikus helyzet meghatározás értelemben, hanem egy kicsit lazább, tágabb értelmezésben használják. Az értekezésemben a lokalizáció kifejezést én is egyrészt a helyzet meghatározás, másrészt egy kicsit tágabban értelemben vett behatárolás, felderítés, beazonosítás értelemben is használom.

5.2. LOKALIZÁCIÓS ALAPPROBLÉMA

A vezeték nélküli szenzorhálózatokban alapvető probléma a mozgó eszközök helyzetének meghatározása [57][66][76][69]. Az ön-lokalizációs képesség fontos követelménye a vezeték nélküli szenzorhálózatoknak. Ahhoz, hogy egy eszköz helyzetét kiderítsük, referencia pontok használatára van szükség. Az eszköz meghatározza a távolságot, a szöveget vagy mindkettőt önmaga és a referencia pont között, tehát a 2D-s síkban, ha egy eszköz ismeri a távolságát három referencia ponttól (melyek helyzete ismert), akkor meghatározható az eszköz helyzete. Ezzel szemben a 3D-s térben [56] már 4 referencia pontra van szükség.

Ugyanakkor, ha egy eszköz ismeri a helyzetét és a szöget egy referencia ponthoz képest, akkor szintén meghatározható a helyzete.

Környezetmonitorozási feladatokban, mint például tűzjelző berendezéseknél, vízminőség mérésénél és precíziós mezőgazdasági feladatoknál elengedhetetlen, hogy tudjuk hol mértük az adott eredményeket, a pontos helymeghatározás [76] nélkül értelmét veszítik a mérések. Azonban lehet olyan eset is, ahol nem vagyunk kíváncsiak a pontos koordinátákra, hanem elég, ha csak szimbolikusan ismerjük a pozíciókat, például azt akarjuk megtudni, hogy mozog-e az adott szenzor esetleg távolodik, közeledik [38][62]. A legtöbb ismert forgatókönyv szerint a felhasználó magával visz egy egyszerű szenzort, melyet mobil jeladónak, vagy cél eszköznek is nevezünk, és ennek a jeladónak a helyzetét fix (ld. 10. ábra), ismert pozícióval rendelkező hálózati érzékelőkhöz képest következteti ki.



10. ábra: Vezeték nélküli szenzorhálózat elemei

Azokban az esetekben ahol elégséges egy helyi koordináta-rendszer (például intelligens otthonok), ezek a pozícióval rendelkező szenzorok határozzák meg a koordináta-rendszert és a többi érzékelő ezekhez a rögzített pozícióval rendelkező „vasmacskákhoz” képest határozza meg a pozícióját. Az ár és a szenzorméret korlátai, energiaellátás nagysága miatt a GPS (Global Positioning System, azaz Globális Helymeghatározó Rendszer) nem alkalmazható minden esetben [52][76], valamint a véletlenszerűen telepített szenzorhálózatok esetében a legtöbb szenzornak nem ismerjük az elhelyezkedését. Ezeket az ismeretlen pozíciójú eszközöket *'non-anchor'*-oknak is hívjuk. Ezen csomópontok koordinátáját a szenzorhálózat lokalizációs algoritmusai alapján lehet meghatározni [53][65][70][76].

5.3. LOKALIZÁCIÓS KIHÍVÁSOK

Manapság a legkorszerűbb helymeghatározó rendszerek műholdak segítségével határozzák meg egy adott objektum elhelyezkedését. A rendszer legjelentősebb hátránya az, hogy zárt térben, vagy fedett helyen, ahol a műholdaknak nincs rálátása az objektumra, ott nem lehetséges a hely meghatározása, tehát épületek belsejében, alagutakban nem tudunk a globális helymeghatározó rendszer segítségére támaszkodni. Emiatt van szükség beltéri helymeghatározó rendszerekre [76] is, amikkel zárt térben is lehetséges a lokalizáció. A [63] irodalomban a lokalizáció kihívásokról és az azokra adott megoldásokról olvashatunk. Ebben a rendszerben fix pozíciójú eszközök figyelik egy mobil eszköz által kiadott jeleket (pl. rádiófrekvenciás jel). A jel érzékelése után a szenzorok az adott mérési elv alapján távolságot határoznak meg. Az érzékelt jel természetesen lehet a már említett infravörös vagy hangfrekvenciás tartományba eső szignál is. A mérési elv alapja lehet az időmérés (Time of Arrival: TOA), beérkezési szögmérés (Angle of Arrival: AOA), vagy a vett jel erősségének megváltozása (Received Signal Strength: RSS).[51][61][76]

Miután a szenzorhálózat meghatározta a távolságokat, pozícióbecslő algoritmusok segítségével rekonstruálható az elrendezés. Attól függően, hogy milyen koordináta-rendszert alkalmazunk, a rendszer meghatározza a lokális vagy globális koordinátákat, így megkapjuk az adó vagy vevőállomás becsült helyzetét.

5.4. SZENZORCSOMÓPONTOK KÖZÖTTI LOKALIZÁCIÓ ABSZTRAKT MEGFOGALMAZÁSA

A szenzorhálózatok jelentősen eltérnek a hagyományos mobil hálózatoktól és a WLAN rendszertől, mivel nagyszámú, apró és olcsó csomópontot tartalmaz. Ezek a tulajdonságok egyedi kihívást jelentenek a szenzorhálózatokban történő lokalizáció során. A [43][44][45][46][48][50][58][67][68] publikációkban jó áttekintést találhatunk a szenzorhálózatokban leggyakrabban alkalmazott lokalizációs algoritmusokról. Egy szenzorhálózatból álló rendszerben nem elég tudni azt, hogy a szenzorok milyen távolságban helyezkednek el egymástól. A hálózat geometriájának, topológiai felépítésének meghatározása is fontos feladat. Ennek a topológiai rekonstrukciónak a megvalósítására olvashatunk algoritmusokat az [60] irodalomban.

Vezeték nélküli szenzorhálózatokban a lokalizáció matematikailag az alábbiak szerint értelmezhető:

Legyen adott n db szenzor r kommunikációs hatósugárral a kétdimenziós síkban. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy szimmetrikus kommunikációról beszélünk bármely u és v csomópont esetén, vagyis u node akkor és csak akkor éri el v node-ot, ha v is eléri u -t, ugyanolyan P térerősség értékkel. Ez esetben a szenzorhálózat felfogható egy $G=(V,E)$ gráfként, melyre a következők érvényesek:

- $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ a szenzorcsomópontok halmaza,
- $(i,j) \in E$, ha v_i eléri v_j -t, azaz v_i és v_j közötti távolság nem nagyobb, mint r ,
- $P(e) \leq r$ az $e(u,v)$ él súlya (pl. távolság, ugrások száma, stb.)

Ez alapján tehát a lokalizációs probléma az alábbiak szerint fogalmazható meg:

Adott egy $G=(V,E)$ többugrásos hálózat, benne fix $b \in B$ csomópontokkal, melyeknek ismert a helyzetük (x_b, y_b) . Keressük az $u \in U$ csomópontok pozícióját (x_u, y_u) .

A lokalizációs probléma természetesen háromdimenziós térre is megfogalmazható, a fenti megközelítés nagyon egyszerűen kiterjeszthető. A matematikai modellezés, az algoritmusok

vizualizációja és működésük megértése, továbbá a szimulációs vizsgálatok leegyszerűsítése céljából a továbbiakban a kétdimenziós térben vizsgálódunk.

Az előző fejezetekben ismertetett gráfelméleti fogalmak bevezetését, a szenzorhálózatok felépítésének és működésének elemzését, valamint a lokalizációs alapprobléma áttekintését követően a következő fejezetben a megalkotott gráf modellt kívánom ismertetni.

6. MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL MEGALKOTÁSA

A vezeték nélküli kommunikációban használt technológiák túlnyomó többsége elég megbízhatatlanul működik. Gondoljunk csak a mobil telefonokra, szinte mindenki megtapasztalhatta már, hogy bizonyos hívásokat eldob a rendszer, vagy alacsony térerő miatt nem tud biztosítani bizonyos szolgáltatásokat, tehát nem biztosított a folyamatos, megbízható működés. Ez a rádióhullámok fizikai tulajdonságainak, viselkedésének tudható be: interferenciára hajlamosak, a fém, víztömeg vagy vastag betonfal blokkolhatja, továbbá számos olyan tényező befolyásolja a viselkedését, mint az antenna kialakítása, az erősítés mértéke vagy az időjárási körülmények. [77]

Mint azt már a topológia felügyelet rövid áttekintése kapcsán említettem, a szenzorhálózatok és azok építőelemeinek, a szenzorcsomópontok működésével megannyi kutatás foglalkozik, melyek mindegyike az energiaforrással való hatékony gazdálkodást helyezi fókuszba, gráfokra megfogalmazott optimalizálási feladatokra visszavezetve a problémát.

A mai vezeték nélküli szenzorcsomópontokat viszonylag kis energiafelhasználás jellemzi, általában 2 ceruzaelemmel hónapokig, vagy akár 1-2 évig is működőképesek maradnak anélkül, hogy operátori beavatkozásra lenne szükség. Ugyanakkor mégis előfordul, hogy bizonyos csomópontok többször lépnek aktív állapotba, mint a hálózat többi csomópontja, mert például egy rossz hálózattervezésnek köszönhetően a node-ok nem megfelelően lettek elhelyezve. Kutatások számolnak be arról, hogy ilyen túlterhelt aktív állapotok miatt a kommunikációban sűrűn érintett node-ok hamarabb lemerülnek, melyek szerepét a többi csomópontnak kell átvenni.

A tanulmányok között a minimális energiafelhasználást célzó topológia (Minimum Power

Topology: MPT) alapú megközelítés rendkívül gyakori. Ramanathan és Rosales-Hain [78] modellje a maximális átviteli teljesítmény szabályozásával dinamikusan alakítja a hálózati topológia szerveződését.

Althaus et al. bebizonyítja [79], hogy a csomópontok közötti kétirányú kapcsolatok engedélyezésével egyszerűsödik az ugrás alapú átviteli mechanizmus, mivel az üzenettovábbítás során a vétel visszirányú nyugtázását biztosítja a protokoll.

Wieselthier et al. [80] a multi-cast előnyeit vizsgálja, kutatómunkájában azt vizsgálja, hogy körsugárzó antennákkal felszerelt szenzorcsomópontok az üzenettovábbítás során milyen döntés alapján választanak a szomszéd csomópontok halmazából, továbbá milyen előnnyel jár egy közelebb lévő csomópont kiválasztása.

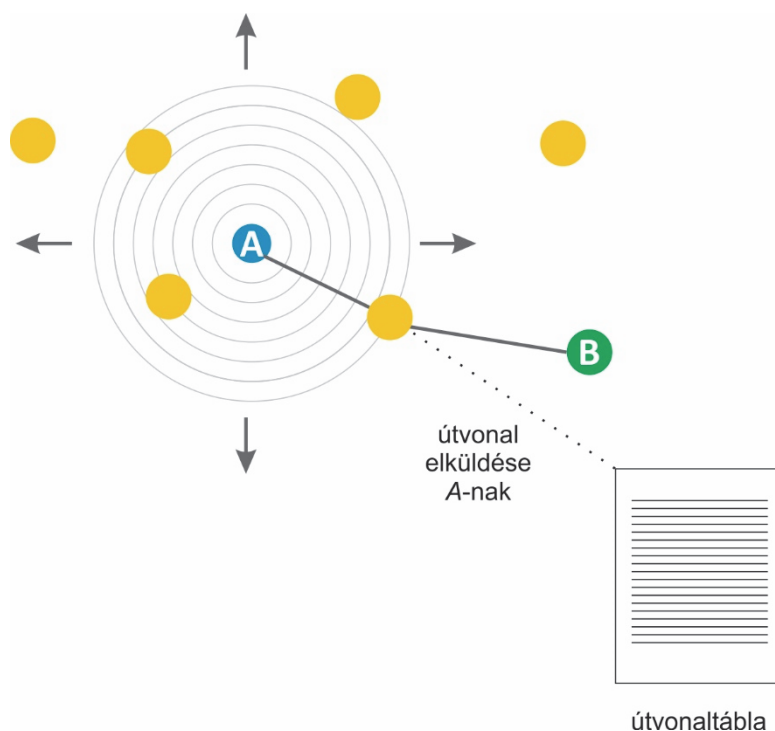
Glauche et al. [81] és Krause et al. [82] elosztott protokoll alapú topológia felügyeletet mutat be, mellyel a konnektivitás maximalizálását kívánja biztosítani, továbbá a csomópontok redundancia vizsgálatával a szomszédok minimalizálását célozza meg.

Rappaport [83] energiamodellje az antennák közötti adás és vétel közötti kapcsolatra ismert Friis formulából eredeteztethető: az adóteljesítmény az adó és vevő közötti távolsággal κ -adik hatvány szerint csökken, ahol κ a környezeti együttható (tipikusan 2 és 4 közötti érték attól függően, hogy szabadtéri vagy beltéri környezetben megy végbe a vezeték nélküli kommunikáció).

6.1. ÖNSZERVEZŐ, ÖNJAVÍTÓ ELVŰ MŰKÖDÉS VIZSGÁLATA

Ad-hoc szerveződésű hálózatokban általában az első kommunikálni kívánó eszköz ún. koordinátorrá válik, melyet követően a többi eszköz csatlakozni tud a hálózathoz egy csatlakozási kérelem elküldése után. Mivel járulékos felügyelet nem szükséges a hálózat kialakításához, így ezek a rendszerek önszervező hálózatként képesek működni. Mesh hálózat létrehozása esetén, több módon is megoldható egy üzenet elküldése, de természetesen a legoptimálisabb út kiválasztása [49] a cél az üzenet továbbítása során. Abban

az esetben, ha egy router nem működik megfelelően, például az üzenet útvonalát valami akadályozza, akkor a hálózat egy alternatív útvonalat választ ki. Ezt a hálózat önjavító képességének nevezzük. A ZigBee-t alapul véve, az útvonal keresési algoritmus az ún. „távolság vektor” (*distance vector*) elvén alapul. Ehhez minden útvonalkeresésre alkalmas eszköz rendelkezik egy ún. útvonal táblával. Ez tartalmazza egyrészt a logikai távolságot a célhelyhez és az útvonalban következő router címét a célhelyhez. Az (*A*) eszköz kezdeményez egy felfedező folyamatot egy útvonal kérés broadcast paranccsal, mire a cél eszköz (*B*) vissza küld egy útvonal választ (ld. 11. ábra). Ezzel a csomópontok gyakorlatilag feltérképezik a hálózati topológiát, mely révén a hálózat bármely más csomópontjával való kommunikációs út kialakításához rendelkezni fognak elegendő információval. [77]



11. ábra: Útvonalkeresés

Egy ad hoc jellegű hálózatban az útvonal [24] tehát, melyen keresztül megy az üzenet a forrástól a cél csomópontig, dinamikusan kerül kiválasztásra a csomópontok között kialakult

kapcsolatoktól függően. Ha a hálózati feltételek megváltoznak, akkor ehhez igazodva, valószínűleg az útvonal is meg fog változni.

6.2. A MODELL MEGALKOTÁSA SORÁN PRIORITÁSSAL KEZELT KÉRDÉSEK

A modell megalkotása során én is az energia hatékonyságra helyeztem a hangsúlyt a következő kérdéseket mérlegelve:

- maximális konnektivitás fenntartása a teljes hálózatban [37],
- hálózati túlterheltség kialakulásának vizsgálata,
- túlterhelt csomópontok, kommunikációs utak tehermentesítése,
- kieső csomópontok számának minimalizálása, megszüntetése,
- a csomópontok közötti kommunikáció kiegyenlítése,
- a hálózati izolációs részek kialakulási esélyének minimalizálása,
- forrás csomópontból induló üzenetek cél csomópontba való megérkezés valószínűségének maximalizálása.

Ha jobban belegondolunk, a szenzorhálózatok működése kapcsán az előbbieken megfogalmazott célok mindegyike a szenzorcsomópontok korlátozott erőforrásának, a működésüket biztosító energiával való hatékony gazdálkodásra vezethető vissza. Egy legrosszabb forgatókönyvet alapul véve a sorra lemerülő csomópontok kiesése miatt kialakulhat az a helyzet, hogy a hálózat működése teljesen megbízhatatlanná válik, veszélyeztetve ezzel a kommunikációs útvonal forrástól célig történő kialakulását. Ezt a problémát, továbbá a szenzorhálózatok önszerveződő képességének köszönhető multihopping technikát alapul véve gondolkodtam el azon, hogy miként lehetne a hálózati csomópontok működési megbízhatóságát növelni az energiaszintekből kiindulva, mely révén a hálózati kommunikációból kieső csomópontok száma, vagy a kieséshez közeli állapot viszonylag jól becsülhető.

A csomópontok lemerülés közeli állapotának elkerülésével biztosítható, hogy a

kommunikációban résztvevő eszközök hosszú távú megbízhatóan működjenek, maximális konnektivitás jellemezze a hálózatot. Finanziális oldalról szemlélve a dolgot, feltételezésem szerint ezzel elkerülhető a hirtelen jelentkező, nagy volumenű leállások, mivel a szenzorcsomópontok állapota, működésbeli megbízhatósága (a csomópont energiaforrásának töltöttségi szintjéből eredő kiszámítható működését értem ez alatt) nyomon követhetővé válik. Ezzel gyakorlatilag a nem tervezett karbantartásból eredő költségek is csökkenthetők, hiszen a lemerüléshez közeli node-ok felderítésével megelőzhető a további csomópontok túlterhelése, egy-egy csomópont karbantartása még mindig olcsóbb, mint egy teljes hálózat leállása, szervizelése.

Ez alapján tehát a cél, hogy a hálózat felügyelete és az útválasztás során próbáljuk meg oly módon befolyásolni a csomópontok működését, egy adott kommunikációs útba való bekapcsolását szabályozni, hogy az alacsonyabb töltöttségi szintű csomópontokat kímélve a nagyobb energiaszinttel bíró csomópontokat terheljük. Ezen cél eléréséhez az önszerveződő csomópontok aktivitását, valamint a működésük során jellemző állapotokat, és az ezek során jelentkező energiafogyasztást vizsgáltam meg először.

6.3. A MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL MEGALKOTÁSA

Képzelnék el az önszerveződő szenzorhálózatunkat a következőképpen.

Legyen adott egy T nagyságú terület, melyen adott pontjain Δt időközönként mérést (adatrögzítést) végzünk. Ezeket a mérési adatokat továbbítanunk kell D csomópontba (cél/nyelő csomópont), melynek adatgyűjtő feladatán túl további adatfeldolgozó és adattároló funkciókat is el kell látnia. Tegyük fel, hogy a rendszerünk nem időkritikus, tehát nem szükséges valós időben továbbítanunk ezen adatokat, a cél inkább az, hogy a mérési adatok megérkezzenek, mert ezen adatok révén maximalizálhatjuk T -n végzett tevékenységünkől származó profitunkat. T -n a vezetékes kommunikáció nehezen, vagy igen magas költségek árán lenne megvalósítható, így vezeték nélküli kommunikációra kell támaszkodnunk. Célunk tehát, hogy T adott pontjain végzett mérések adatait akár több módon (kommunikációs úton) is el tudjuk juttatni D -be, melyet teljes vezeték nélküli lefedettséggel lehet biztosítani.

Ez tipikusan olyan hálózat létét feltételezni, melyben egy csomópont több szomszéd csomóponttal is képes közvetlenül kommunikálni. A teljes lefedettséghez a szenzorcsomópontokat egyenletesen elszórtan helyezzük el T -n. Az adattovábbítás során szeretnék elkerülni, hogy egyes csomópontok túlterhelte válnanak, mely később hálózati kommunikációval való lefedetlenséghez, adatok továbbíthatatlanságához és adatvesztéshez vezetne, mindezzel többletköltséghez generálva.

6.3.1. Feladatprobléma definiálása

Legyen $V = \{v_i, i = 1, \dots, n\}$ a csomópontok halmaza ($n = |V|$). $\forall u \in V$ -t véletlenszerűen helyezzük el a 2-dimenziós sík T nagyságú területén.

Legyen $E \subseteq [V]^2 = \{e(u,v): u \in V \wedge v \in V \wedge u \neq v\}$ a csomópontokat összekötő élek halmaza, ahol $e(u,v) \leftrightarrow e(v,u)$.

Legyen az i -edik csomópont ($v \in V$) pozíciója (x_i, y_i) , továbbá $\forall i \in V$ -re adott:

- $m_i \in [0,1]$, melyet nevezünk megbízhatóságnak (a megbízhatóság fogalmát a csomópont energiaszintjével összefüggésben vezettem be),
- $p_i \in \{0, p_{max}\}$, az i -edik csomópont adóteljesítménye,
- $r_i \geq 0$, az i -edik csomópont hatósugara, melyre:
 - $p_i = p_{max}, r_i = r$ (ahol r a maximális hatósugár), ha $m_i > 0$,
 - és $p_i = 0, r_i = 0$, ha $m_i = 0$.

$\forall v \in V$ és $\forall u \in V$ esetén akkor és csak akkor $\exists e(u,v) \in E$, ha

$$d_{uv} < r,$$

$$\text{ahol } d_{uv} = \sqrt{(x_v - x_u)^2 + (y_v - y_u)^2},$$

az u és v csomópont közötti eukleidészi távolság.

Vezessük be a w súlyfüggvényt, mely megadja az $e(u, v)$ él w_{uv} súlyát ($w_{uv} = w_{vu} \geq 0$) $\forall e(u, v) \in E$ esetén.

Problémadefiníció:

Keressük a $G = (V, E)$ gráffal definiált hálózati topológiában $\forall s \in V$ és $\forall d \in V$ ($s \neq d$) csomópont között a $G' \subseteq G$ utat, melyben:

$$V' = \{(u_i, v_i)_{i \in I = \{1, 2, \dots, n\}} \mid \forall i \in I: ((u_i, v_i) \in V \wedge v_i = u_{i+1} \wedge u_1 = s \in V \wedge v_n = d \in V)\},$$

továbbá

$$\sum_{V'} w_i \rightarrow \min.$$

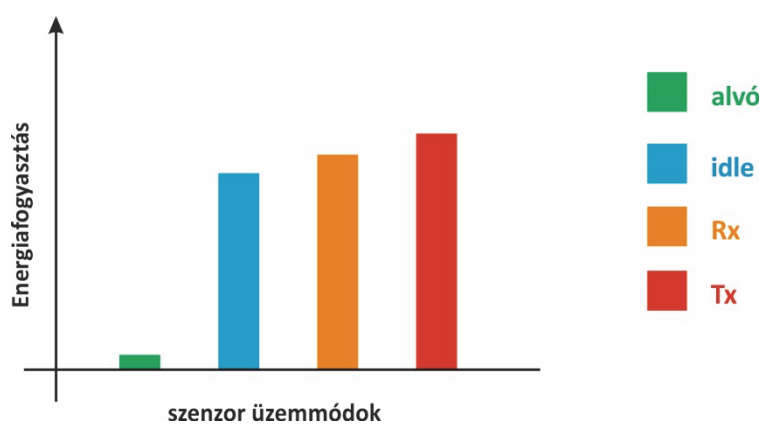
6.3.2. Megbízhatóság, súlyfüggvény bevezetése

A 6.2.1. pontban definiált $G=(V,E)$ gráfban $\forall u_i \in V$ és $\forall v_i \in V$ esetén úgy célszerű bevezetni az m_i megbízhatósági értékeket, hogy azokból meghatározható legyen bármely $e(u, v) \in E$ él w_{uv} súlya. Azaz a súlyfüggvény egy él súlyát, két csomópontjának megbízhatósági értékéből számítsa ki.

A bevezetendő súlyfüggvény leképzési szabályának meghatározása során az volt a célom, hogy az élek súlyozása alapján eldönthető legyen, melyik él biztosít megbízhatóbb adattovábbítást, azaz az alacsony energiaszinttel rendelkező csomópontok elkerülésével minél inkább garantálni tudjuk az adatunk forrásból célba történő eljuttatását, ezzel gyakorlatilag egyenletes terhelést biztosítva hosszú távon a teljes rendszerre nézve. Más szóval, a megbízhatóbb (magasabb aktuális energiaszint) csomópontok terhelésével, a kevésbé megbízható csomópontok lemerülési esélyét minimalizáljuk a maximális konnektivitás fenntartása céljából, elkerülve ezzel az izolált hálózati részek kialakulását, illetve a mért adatok továbbíthatatlanságát és az adatvesztést. A súlyfüggvény leképzési szabályának megalkotásához elengedhetetlen a szenzorcsomópontok működési módjainak vizsgálata, így szükségesnek tartom ezek rövid áttekintését.

6.3.3. Szenzorok működési módjai

Számos kutatás foglalkozik azzal, hogy megállapítsa, egy limitált kapacitású energiaforrással rendelkező eszköz (szenzor) energiaszintje milyen szempontok prioritizálásával maximalizálható. Tekintve, hogy ezeket az eszközöket tipikusan 3 működési mód jellemzi (*alvó* - *sleep*, *tétlen* - *idle*, *aktív* - *active*: Tx , Rx), így célszerű ezeket a működési módokat részletesebben megvizsgálni (ld. 12. ábra).

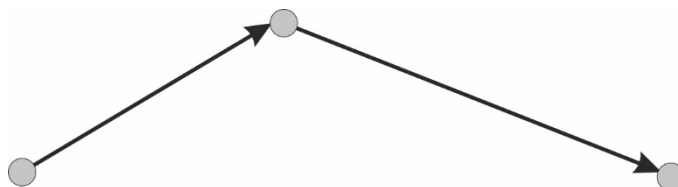


12. ábra: Szenzor üzemmódok jellemző energiaigénye

A csomópontok idejük túlnyomó részét alvó üzemmódban töltik a tápellátásuk maximalizálása céljából, a másik két működési módba csak akkor lépnek, amikor egy hálózati esemény bekövetkezik. Ennek hatására felébrednek, és a kommunikációs útvonal felépítése során aktív működési módban részt vesznek az adatok továbbításában. A szenzorcsomópontok energiaforrása gyakorlatilag az aktív szerep betöltése során veszítenek legtöbbet energiaforrásukból, tekintve, hogy az adattovábbítás két részből tevődik össze: vétel és adás. Tehát a kijelölt átviteli úton, miután az i -edik csomópont átvette az $(i-1)$ -edikétől az adatsomagot, azt továbbítani kell az $(i+1)$ -edik felé. Ezt több módon megteheti, attól függően, hogy az az útvonalválasztás során az algoritmus milyen paraméterre optimalizál, továbbá, hogy az adott csomóponttal direkt módon (ld. 13. ábra), vagy csak másik csomóponton keresztül (ld. 14. ábra) tud kommunikálni.



13. ábra: Direkt kommunikáció két csomópont között



14. ábra: Többugrásos (multihop) üzenetátvitel

A teljes hálózatot tekintve a globális cél legtöbbször tehát az, hogy minél rövidebb útvonal épüljön fel a forrás és nyelő (cél) között, mellyel minimalizálható a teljes rendszer energiafelhasználása. Lokális szempontból vizsgálva a dolgot, azaz csomópont szintjén, viszont nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy adott csomópontok energiaszintje nem biztos, hogy elegendő ahhoz, hogy az adattovábbításban részt vegyen. Elképzelhető olyan eset, hogy az i -edik csomópont olyannyira kevés energiával rendelkezik, hogy az $(i-1)$ -edik csomópont felől érkező adatcsomagot venni tudja, de az $(i+1)$ -edik felé már nem tudja továbbítani. Az ad-hoc jellegből adódó önszerveződő, önjavító képességgel rendelkező szenzorhálózat $(i-1)$ -edik csomópontja az adattovábbítás megszakadását követően egy alternatív útvonalat keres, biztosítva ezáltal, hogy a célcsomópontba megtörténjen a kézbesítés. Egy olyan szenzorhálózatban, ahol nagy számban fordulnak elő alacsony töltöttségű csomópontok, egyre gyakoribb jelenséggé válik az alternatív utak választása, mely során további megbízhatatlan csomópontok alakulhatnak ki.

Ezen elv alapján olyan elméleti rendszerben kezdtem el gondolkodni, melyben feltételezem, hogy a teljes hálózatra vonatkozóan rendelkezem a csomópontok megbízható működést jellemző mérőszámmal, melyekből egy alkalmasan választott súlyfüggvénnyel a csomópontok megbízhatóságára utaló érték rendelhető az élekhez. Ezen mérőszám vizsgálatával dönthető el, hogy egy forrás-nyelő modell alapú adattovábbítás során a lehetséges útvonalak közül melyik mellett érdemes letenni a voksot azon célból, hogy minél megbízhatóbb csomópontok

kiválasztásával az üzenetkézbesítés sikerességének esélye maximalizálható legyen, továbbá a megbízhatatlan csomópontok ne kerüljenek lemerülés közeli állapotba, és addig ne terhelődjenek, amíg a szükséges karbantartást el nem végzik rajtuk (energiaforrás cseréje/újrátöltése). Az egyes működési állapotok energiafelhasználásának vizsgálatához a széles körben elterjedt, kutatómunkámban is nagy hangsúlyt kapó ZigBee szabványt vettem alapul.

Az XBee és az XBee-PRO karakterisztikája

Mint minden hibatűrő vezeték nélküli megoldásnál, a ZigBee megalkotása során is az alacsony energiafelhasználást és alacsony működtetési költséget célozták meg, melyet rövid hatótávolsággal (XBee: 30-90 m, XBee-PRO: 60-750 m), alacsony átviteli sebességgel (max. 250 kbit/s) érnek el. A kisméretű eszközben az energiaforrás mellett a feldolgozó egység (processzor) és memória is limitált erőforrásnak számítanak, ezért jellemzően kis kitöltési tényezővel (~1%) üzemelnek, idejük túlnyomó részét alvó állapotban töltik, mivel aktív üzemmódban megnő az áramfelvétel. Példaként tekintünk az XBee és XBee-PRO gyártója által megadott specifikációt.

1. táblázat: Az XBee és XBee-PRO modulok karakterisztikái

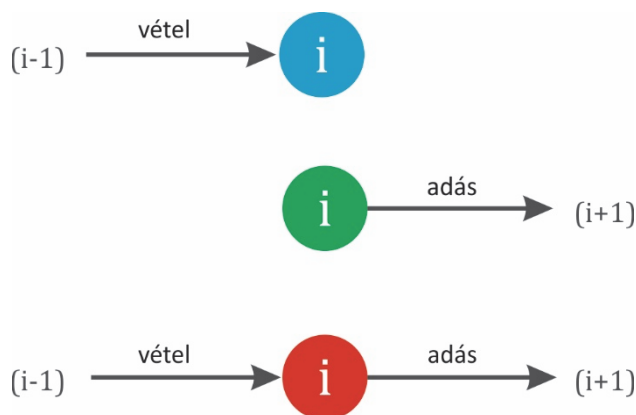
Tápfeszültség		XBee	XBee-PRO
		2,8 – 3,4 V	
Áramfogyasztás (3,3 V-on)	~Idle/Rx	45 mA	55 mA
	Tx	50 mA	150 mA
	Sleep	<10 µA	
Hatótáv	beltér	30 m	60 m
	kültér	90 m	750 m
Teljesítmény		1 mW	10 mW
Adatátviteli sebesség		250 kbps	
A vevő érzékenysége		-92 dBm	-100 dBm

(forrás: XBee datasheet)

A fenti specifikációból is látszik, hogy egy adatátvitel során az alvó üzemmódban a fogyasztás elhanyagolható az vétel, az idle és adás üzemmódban mérhető áramfogyasztásához képest, azaz megállapítható, hogy egy csomópont élettartamára leginkább az aktív üzemmód (R_x , T_x , $Idle$) gyakorol jelentős negatív hatást. Minél több időt tölt egy csomópont aktív üzemmódban, annál inkább merül az energiaforrása, és annál inkább csökken a működési megbízhatósága, vagyis válik egyre megbízhatatlanabbá.

6.3.4. Megbízhatóság bevezetése

A súlyfüggvény megalkotásához az előbb leírtakból indultam ki, azaz egy csomópont aktivitása az adattovábbításokban vállalt szerepének gyakoriságával jellemezhető. Egy Forrás-Nyelő modell alapú szenzorhálózatban az üzenet (adatcsomag) eljuttatása során 3-féle csomópontot különböztethetünk meg (ld. 15. ábra): üzenetet adó, üzenetet vevő, és üzenetet továbbító (veszi + továbbadja az üzenetet) csomópont.



15. ábra: Csomópont szerepek

Gyártói specifikációk alapján a szenzorcsomópontokra adottak:

- adatsebesség: R_{bit} [bps],
- egy csomópont energiaforrásának maximális kapacitását jelölje: I_{max} , (megjegyzés: E -vel az élek halmazát jelöltem, így itt a megkülönböztethetőség kedvéért nem használom már E -t, továbbá ugyanolyan maximális kapacitással rendelkezik

valamennyi csomópontunk a szenzorhálózat kialakítása során, így I_{max} csomópont alapú indexelése felesleges),

- adó (Tx) üzemmódban az energiafogyasztást jelölje: I_{Tx} ,
- vevő (Rx) üzemmódban az energiafogyasztást jelölje: I_{Rx} ,
- tétlen/idle (Id) üzemmódban az energiafogyasztás: I_{Id} ,
- *Alvó* (S) \rightarrow *Aktív* (A), *Aktív* (A) \rightarrow *Alvó* (S) állapotváltozás időtartamát jelölje:
 $t_{SA} = t_{AS}$,
- *Alvó* (S) \rightarrow *Aktív* (A), *Aktív* (A) \rightarrow *Alvó* (S) esetben az energiafogyasztást jelölje:
 $I_{SA} = I_{AS}$.

I_{max} , I_{Tx} , I_{Rx} , I_{Id} , I_{SA} , I_{AS} dimenzió nélküli mérőszámok.

t_{SA} , t_{AS} mértékegysége: másodperc [s].

Tekintve, hogy a cél az, hogy minél tovább maradjanak a csomópontok alvó üzemmódban, ütemező algoritmus alapján figyelik a csatornát, hogy adott kommunikációban aktív szerepet kell-e betölteniük, vagy visszatérhetnek alvó állapotba az energiafogyasztás minimalizálása céljából. Az Id , Tx és Rx időkerete a csomópontok telepítése és inicializálása definiálható. Ezzel megadható, hogy adott csomópont adott időkeret alatt a kommunikáció során mennyit fogyaszt *adó*, *vevő*, illetve *idle* üzemmódban (az *idle* üzemmód energiaigénye nem sokkal marad el a vevő üzemmódétól).

Vezessük be a következő jelöléseket:

- $I_{aktuális}$: a csomópont aktuális energiafelhasználása (dimenzió nélküli mérőszám; megjegyzés: a kapacitás és energiaszint kifejezéseket egymás szinonimájaként fogom használni),
- t_{Tx} : adás időtartama [s],
- t_{Rx} : vétel időtartama [s],
- t_{Id} : az idle üzemmód időtartama, mely az adás és vételi szerepkör során különbözhet,

így megkülönböztetjük Tx -re és Rx -re vonatkozóan: t_{IdTx} , t_{IdRx}) [s].

Az előbbiek alapján:

- egy adásra kész csomópont aktivitásának időtartama [s] Tx esemény esetén:

$$t_{aTx} = t_{Tx} + t_{IdTx} + t_{AS}. \quad (2.)$$

- egy alvó csomópont aktivitásának időtartama [s] Rx eseménykor:

$$t_{aRx} = t_{SA} + t_{IdRx} + t_{Rx}. \quad (3.)$$

- egy adattovábbításban ($Rx + Tx$) résztvevő csomópont aktivitásának időtartama [s]:

$$t_{aTxRx} = t_{Tx} + t_{IdTx} + t_{AS} + t_{SA} + t_{IdRx} + t_{Rx}. \quad (4.)$$

Az adatküldés és adatfogadás időtartama függ a továbbított adatcsomag méretétől és a megválasztott átviteli sebességtől [bps].

N byte méretű adatcsomag elküldéséhez, vételéhez szükséges idő 250 kbps-os bitráta esetén:

$$t_{Tx}(N, 250kbps) = t_{Rx}(N, 250kbps) = \frac{8 \text{ bit} \cdot N}{250 \text{ bps} \cdot 1000} [\text{s}]. \quad (5.)$$

N byte méretű adatcsomag elküldéséhez, vételéhez szükséges idő R_{bit} bitráta esetén:

$$t_{Tx}(N, R_{bit}) = t_{Rx}(N, R_{bit}) = \frac{8 \text{ bit} \cdot N}{R_{bit}[\text{bps}]} [\text{s}]. \quad (6.)$$

Az egyes szerepkörök (Tx , Rx , $TxRx$) alapján egy csomópont átlagfogyasztása az aktivitása során az alábbiak szerint számítható ki (t_{Tx} helyére $t_{Tx}(N, R_{bit})$ -et, t_{Rx} helyére pedig $t_{Rx}(N, R_{bit})$ -et helyettesítve):

- Tx -re az átlag energiafelhasználás:

$$\bar{I}_{Tx} = \frac{I_{Tx} \cdot t_{Tx} + I_{Id} \cdot t_{IdTx} + I_{AS} \cdot t_{AS}}{t_{aTx}}. \quad (7.)$$

- Rx -re az átlag energiateljesítményfelhasználás:

$$\bar{I}_{Rx} = \frac{I_{SA} \cdot t_{SA} + I_{Id} \cdot t_{IdRx} + I_{Rx} \cdot t_{Rx}}{t_{aRx}}. \quad (8.)$$

- Tx és Rx esetén az átlag energiateljesítményfelhasználás:

$$\bar{I}_{TxRx} = \frac{I_{Tx} \cdot t_{Tx} + I_{Id} \cdot t_{IdTx} + I_{AS} \cdot t_{AS} + I_{SA} \cdot t_{SA} + I_{Id} \cdot t_{IdRx} + I_{Rx} \cdot t_{Rx}}{t_{aTxRx}}. \quad (9.)$$

$\bar{I}_{Tx}, \bar{I}_{Rx}, \bar{I}_{TxRx}$: a csomópontok egyes üzemmódjaira (Tx -adás, Rx -vétel, $Tx+Rx$ -adás+vétel) jellemző átlagos energiateljesítményfelhasználást jelölő dimenzió nélküli mérőszámok. Ugyanolyan paraméterekkel bíró csomópontokból épül fel a hálózatunk, így ezen átlagértékek valamennyi csomópontra azonosak, tehát azonos feltételek – *adatsebesség, adatcsomag mérete, stb.* – mellett $\forall u \in V$ csomópont is annyit fogyaszt $Tx, Rx, Tx+Rx$ esetén, mint $\forall v \in V$ a $Tx, Rx, Tx+Rx$ szerepkörök esetén).

A továbbiakban az adott üzemmód szinonimájaként használom az *Rx szerep, Tx szerep, TxRx szerep* kifejezéseket, utalva arra, hogy a csomópont milyen üzemmódban van, azaz milyen szerepet tölt be.

Vezessük be az *i-edik* csomópont aktivitásának mérésére (az aktivitást *a*-val jelölöm, melynek *i* indexe az *i-edik* csomópontra, *Rx, Tx* indexe pedig az üzemmódra utal) az alábbi mérőszámokat:

- a_{iTx} : az *i-edik* csomópont aktuális küldési aktivitása, azaz hány db alkalommal töltött be eddig *Tx* szerepkört (dimenziója: db),
- a_{iRx} : az *i-edik* csomópont aktuális fogadási aktivitása, azaz hány db alkalommal töltött be eddig *Rx* szerepkört (dimenziója: db).

Vezessük be a maximális aktivitás mérésére az alábbi mérőszámokat (valamennyi csomópontra jellemző mérőszámok, ezért felesleges a csomópont szerinti indexelés):

- $a_{Tx,max} = \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Tx}}$ a maximális küldési aktivitás [db], mely megmutatja, hogy egy csomópontot milyen maximális aktivitás jellemezné, ha csak Tx szerepkört töltene be (azaz I_{max} energiaforrásából hány db Tx szerepet tudna ellátni),
- $a_{Rx,max} = \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Rx}}$ a maximális fogadási aktivitás [db], mely megmutatja, hogy egy csomópontot milyen maximális aktivitás jellemezné, ha csak Rx szerepkört töltene be (azaz I_{max} energiaforrásából hány db Rx szerepet tudna ellátni).

Ezek alapján megadhatók a következő arányszámok:

- $\frac{a_{iTx}}{a_{Tx,max}}$ az i -edik csomópont küldési aktivitási rátája (dimenzió nélküli arányszám, mely a $[0,1]$ zárt intervallumon értelmezett, 0 : ha egyszer sem volt Tx szerepben, és 1 ha csak Tx szerepre használta el kezdeti maximális I_{max} kapacitását), mely megmutatja, hogy az aktuális küldési aktivitás milyen mértékben csökkentette a csomópont energiaszintjét,
- $\frac{a_{iRx}}{a_{Rx,max}}$ az i -edik csomópont fogadási aktivitási rátája (dimenzió nélküli arányszám, mely a $[0,1]$ zárt intervallumon értelmezett, 0 : ha egyszer sem volt Rx szerepben, és 1 ha csak Rx szerepre használta el kezdeti maximális I_{max} kapacitását), mely megmutatja, hogy az aktuális fogadási aktivitás milyen mértékben csökkentette a csomópont energiaszintjét.

Mivel a_{iTx} és a_{iRx} egy csomópont aktivitását [db] méri (azaz hányszor volt Tx és hányszor volt Rx szerepben), és az egyes csomópontokra nézve ez egyedi, ezért indokolt az indexelés, jelölve, hogy az i -edik csomópontokra vonatkozik az arány.

Az i -edik csomópontra megadott küldési és aktivitási rátával együttesen jellemezhető a csomópont aktuális megbízhatósága (energiaszinttel összefüggésben bevezetve), melyet megbízhatósági rátának nevezek el, és a következő képlettel fejezem ki:

$$m_i = 1 - \left(\frac{a_{iRx}}{a_{Rx,max}} + \frac{a_{iTx}}{a_{Tx,max}} \right). \quad (10.)$$

Az m_i megbízhatósági ráta az egyes csomópontokra nézve egyedi (bármely két csomópont

Tx -beli és Rx -beli aktivitása különbözhet, így a csomópont alapú indexelés szükséges), $[0, 1]$ zárt intervallumon értelmezett mutatószám, mely 1 , ha $I_{aktuális} = I_{max}$, azaz a kiinduló állapotot jellemző maximális energiájából még nem használt fel semmit (se Tx , se Rx szerepet sem töltött be), és 0 ha $I_{max} = 0$, azaz már a teljes energiáját elhasználta Tx -re és/vagy Rx -re.

Ha becsülni szeretnénk, hogy egy adott csomópont aktuális megbízhatóságára milyen hatást gyakorol egy rákövetkező Tx vagy Rx , akkor azt a maximális küldési aktivitás reciprokával, illetve a maximális fogadási aktivitás reciprokával tudjuk vizsgálni. Ezeket ΔI_{Tx} -szel és ΔI_{Rx} -szel jelölöm, ahol Δ a változásra utal, azaz hogy mennyivel csökken a maximális energiaszint):

$$\Delta I_{Tx} = \frac{1}{a_{Tx,max}} = \frac{\bar{I}_{Tx}}{I_{max}}, \quad (11.)$$

$$\Delta I_{Rx} = \frac{1}{a_{Rx,max}} = \frac{\bar{I}_{Rx}}{I_{max}}. \quad (12.)$$

- ΔI_{Tx} : dimenzió nélküli arányszám, mely megadja, hogy a csomópont energiaszintjét milyen mértékben csökkenti egy Tx -beli szerepvállalás.
- ΔI_{Rx} : dimenzió nélküli arányszám, mely megadja, hogy a csomópont energiaszintjét milyen mértékben csökkenti egy Rx -beli szerepvállalás.

Mivel az arányban szereplő \bar{I}_{Tx} , \bar{I}_{Rx} , I_{max} minden egyes csomópontot jellemző mérőszám (úgy is fogalmazhatnánk, hogy a maximális fogadási, illetve maximális adási aktivitás minden egyes csomópontra ugyanaz), vagyis ugyanaz $\forall u \in V$ -re, ezért csomópont alapú indexelés felesleges.

A kiinduló célunk a súlyfüggvény (w) meghatározása volt, azaz a súlyértékek élekhez hozzárendelő leképzési szabály megalkotása. Ennek meghatározásához a csomópontok aktuális megbízhatóságát veszem alapul.

Első ránézésre két kézenfekvő megoldás kínálkozik:

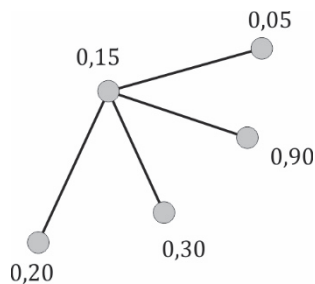
- v_i : $u \in V$ és $v \in V$ csomópont $e(u,v) \in E$ élének súlya legyen a megbízhatatlanabb csomópont megbízhatósági rátája, azaz :

$$w_{uv} = \min\{m_u, m_v\}. \quad (13.)$$

- v_2 : $u \in V$ és $v \in V$ csomópont $e(u,v) \in E$ élének súlya legyen a megbízhatóbb csomópont megbízhatósági rátája, azaz:

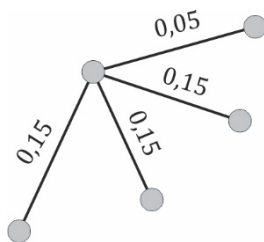
$$w_{uv} = \max\{m_u, m_v\}. \quad (14.)$$

A v_1 jóságának vizsgálatához tekintsük az alábbi pillanatképet (ld. 16. ábra) a hálózatunk egyik csomópontjára nézve.



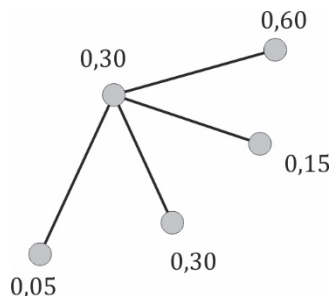
16. ábra: Hálózati pillanatkép 1.

Az élekhez rendeljük hozzá a súlyokat a v_1 leképzés szerint (ld. 17. ábra).



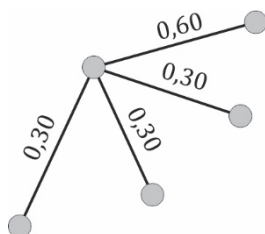
17. ábra: Élek súlyozása v_1 leképzés szerint

A v_2 jóságának vizsgálatához tekintsük az alábbi pillanatképet (ld. 18. ábra) a hálózatunk egyik csomópontjára nézve.



18. ábra: Hálózati pillanatkép 2.

Az élekhez rendeljük hozzá a súlyokat a v_2 leképzés szerint (ld. 19. ábra).



19. ábra: Élek súlyozása v_2 leképzés szerint

Az útkeresésénél a célunk, hogy a megbízhatóbb csomópontokat terheljük, és a lemerüléshez közeli csomópontokat a szükséges karbantartási munkák elvégzéséig kíméljük. A pillanatképből leolvasható, hogy az i -edik csomópontnál a maximális súlyú él kiválasztása során az élek súlyozása nem igazán jól definiált, mivel ez esetben a súlyfüggvény leképzésének jellegéből eredően egy magasabb megbízhatóságú és alacsonyabb megbízhatóságú csomópontba is vezethet ugyanolyan súlyú él.

Ezen túlmenően a v_2 megközelítés kapcsán szeretnék visszautalni a 2. fejezet végén a [29] szakirodalomból idézett gondolatra: „Maximális értékű xy -folyam általában nem egyértelmű”. A lineáris programozás problémaköre kapcsán más kutatók is megjegyzik, hogy a maximális folyamproblémára visszavezethető feladat során előfordulhat, hogy a folyamérték ugyan folyamatosan növekszik, mégsem a maximális folyam nagysághoz tart, vagyis az algoritmus nem áll le. Lineáris programozásnál a maximális folyam a minimális vágás duális párja, azaz a maximális folyamprobléma minimális vágásra visszavezetve oldható meg. [29]

A súlyfüggvény leképzést tehát úgy kell megalkotni, hogy a forrás és cél csomópont közötti útkeresés a minimális összéll költségű problémakörre legyen visszavezethető. Tekintve, hogy a matematikai modell felállítása során két csomópont között szimmetrikus kommunikációs kapcsolatot engedünk meg, azaz él csak akkor alakul ki a csomópontok között, ha mindkettő a másik hatókörén belül helyezkedik el. Ebből kiindulva egy él élettartamát egyértelműen a csomópontok élettartama együttesen determinálja, azaz egy él megbízhatóságát a két csomópont megbízhatósága együttesen befolyásolja.

Ez alapján a súlyfüggvény leképzési szabályát első körben a következő szerint célszerű definiálni $\forall u, v \in V$ -re:

$$w: w_{uv} = (m_u \cdot m_v) . \quad (15.)$$

Mivel a megbízhatósági ráta a $[0,1]$ zárt intervallumon értelmezett, ezért a súlyfüggvény által előállított súlyok is $[0,1]$ közötti valós értékek lesznek. A függvény értelmezési tartománya tehát: $[0,1]^2$, értékészlete pedig: $[0,1]$, azaz a súlyfüggvény az alábbi leképzést végzi el:

$$w: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]. \quad (16.)$$

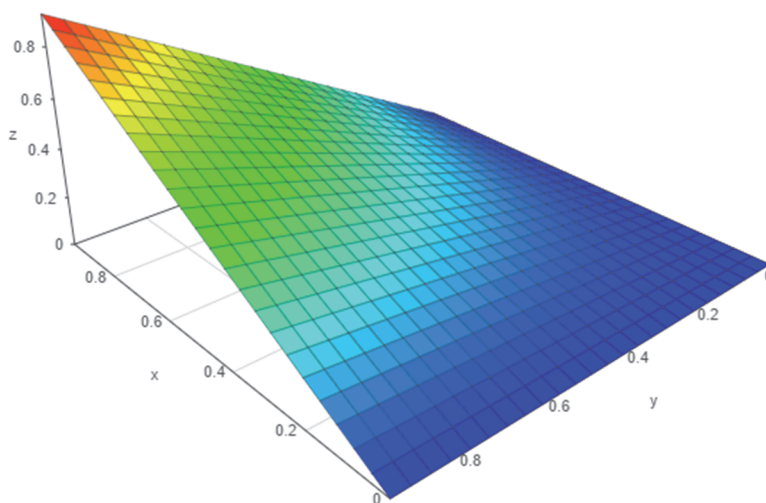
A súlyfüggvényünk tehát egy kétváltozós függvény (ld. 20. ábra), melynek bemeneti változói az adott él két csomópontjának megbízhatósági rátái (m_u és m_v), kimenete pedig az él súlya (w_{uv}).



20. ábra: Az (u,v) él súlyának előállítása

Ha az xyz 3-dimenziós térben az x -nek megfeleltetjük m_u -t, y -nak m_v -t, akkor a $z = f(x, y) = x \cdot y$ függvény által előállított értékek, azaz súlyfüggvényünk w_{uv} értékei a 21. ábrán látható felület mentén helyezkednek el ($x \in [0,1], y \in [0,1], z \in [0,1]$).

A csomópontok megbízhatósági rátájának bevezetésével, az ebből származtatott súlyfüggvénnyel generált élsúlyokból képzett felület (ld. 21. ábra) $(x=1, y=1, z=1)$ pontján vörös szín jelöli a maximális megbízhatóságot, mely csak akkor tud előállni, ha az él mindkét csomópontját maximális (1) megbízhatósági ráta jellemzi. Ha az él egyik csomópontja kiesik, azaz 0 megbízhatósági rátával bír, akkor az élsúly is 0 lesz, mely jól reprezentálja, hogy a két csomópont között a kapcsolat megszűnik. A felület mentén a kék és vörös csúcspontok között $]0,1[$ megbízhatóságú csomópontok élsúlyai találhatóak.



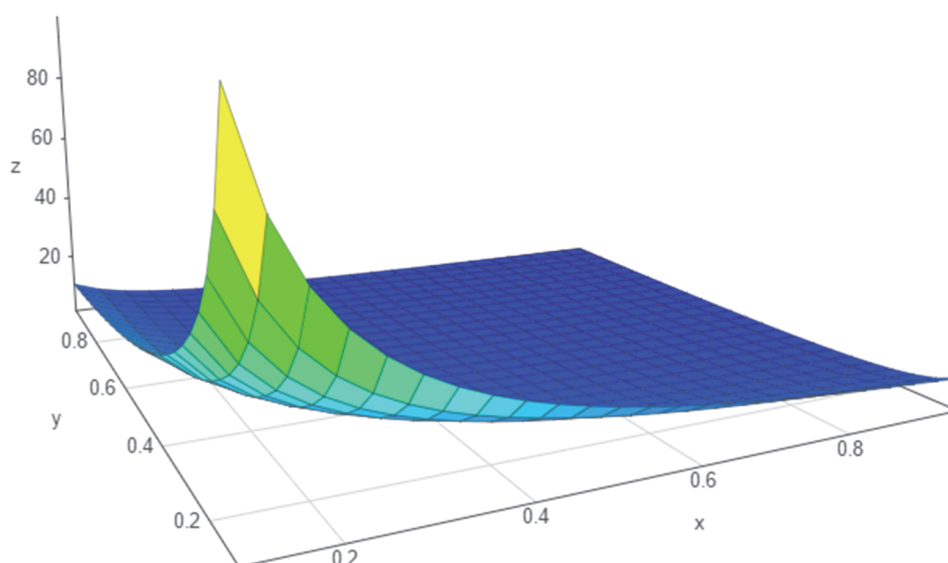
21. ábra: A súlyfüggvény kimeneteiből képzett felület az xyz 3D térben

A megalkotott súlyfüggvény 3-dimenziós vizuális reprezentációja is igazolja, hogy a megbízhatósági gráf modell koncepciója a kiindulásként rögzített célokat teljes mértékben kielégíti. A bevezetett súlyozási módszer tehát tökéletesen alkalmas arra, hogy az élek megbízhatósága kellően differenciált legyen a csomópontok megbízhatóságától függően, de v_1 és v_2 megközelítés során a maximumkeresés kapcsán felvetett probléma (végtelen ciklus) itt is előjön, ezért úgy célszerű finomítanunk a súlyozási módszerünket, hogy az élsúlyok kiválasztása minimumkeresésre legyen visszavezethető. A cél tehát úgy módosítani a súlyfüggvényt, mely oly módon rendelje az élekhez a súlyokat, hogy egy alacsonyabb súllyal rendelkező él nagyobb megbízhatóságot jelentsen egy megbízhatatlanabb él nagyobb súlyánál. A legkézenfekvőbb megoldás: vegyük a megbízhatósági ráták reciprokát, mellyel kielégíthető a súlyozás finomítási okaként megfogalmazott kritérium (maximális folyam probléma).

Ez alapján a súlyfüggvény leképzési szabálya a következőképpen módosul ($\forall u, v \in V$ -re):

$$w: w_{uv} = (m_u^{-1} \cdot m_v^{-1}). \quad (17.)$$

Nézzük meg ez alapján, hogy miként módosul a súlyértékekből alkotott felületünk (ld. 22. ábra).



22. ábra: A módosított súlyfüggvény kimeneteiből képzett felület az xyz 3D térben

Megjegyzendő, hogy m_i -vel való osztást megengedjük, mivel a modell felállítása során elsődleges célként határoztuk meg, hogy a csomópontok egyenletes terhelésével a csomópontok lemerülését kívánjuk elkerülni. Ne felejtsük, hogy a fenti hányadost meglévő élek súlyozásának finomítása kapcsán vezettük be. Modellünkben két csomópont között él viszont csak akkor létezik, ha egyrészt a két csomópont egymás hatókörében tartózkodik, másrészt, ha a két csomópont rendelkezik kellő energiával, azaz 0 -tól nagyobb megbízhatósággal. Ha tehát például a hálózat hibás működéséből eredően egy él bármely csomópontját 0 megbízhatósági ráta jellemezné, akkor az az él eltűnik a gráfunkból, azaz a két csomópont között nem lesz mit súlyozni. Ugyanakkor a súlyozás alkalmával megtehetjük, hogy kommunikációra nem alkalmas élhez (azaz a két csomópont egymás hatókörében tartózkodik, de kommunikációban nem tud részt venni, a lemerülés közeli, vagy lemerült energiaforrása miatt) ∞ súlyt társítunk.

A kiinduló súlyfüggvényünket az alapján is finomíthattuk volna, hogy figyelembe vesszük a csomópont Tx és Rx szerepének az energiaforrásra gyakorolt hatását, melyre korábban

bevezettük a Δa_{Tx} és Δa_{Rx} mutatókat. Ezen mutatókat arányba állítva a csomópontok megbízhatósági rátájával, a következő hányadosokat kapjuk az i -edik csomópontra:

$$- \quad Tx\text{-re:} \quad \bar{I}_{Tx}/m_i, \quad (18.)$$

$$- \quad Rx\text{-re:} \quad \bar{I}_{Rx}/m_i, \quad (19.)$$

$$- \quad (Tx+Rx)\text{-re:} \quad (\bar{I}_{Tx} + \bar{I}_{Rx})/m_i. \quad (20.)$$

Emlékezzünk vissza \bar{I}_{Tx} az adáshoz szükséges átlagenergia, \bar{I}_{Rx} pedig a vételhez szükséges energia.

Ez alapján tehát:

- az \bar{I}_{Tx}/m_i arány megmutatja, hogy az i -edik csomópont megbízhatóságát milyen mértékben csökkenti egy Tx szerep (melyhez \bar{I}_{Tx} átlagenergia szükséges),
- az \bar{I}_{Rx}/m_i arány megmutatja, hogy az i -edik csomópont megbízhatóságát milyen mértékben csökkenti egy Rx szerep (melyhez \bar{I}_{Rx} átlagenergia szükséges),
- az $(\bar{I}_{Tx} + \bar{I}_{Rx})/m_i$ arány megmutatja, hogy az i -edik csomópont megbízhatóságát milyen mértékben csökkenti egy $Tx + Rx$ szerep együttesen (melyhez $\bar{I}_{Tx} + \bar{I}_{Rx}$ átlagenergia szükséges).

Ez alapján a súlyfüggvény leképzési szabálya az alábbiak szerint is megadható ($\forall u, v \in V$ -re):

(a):

$$w: w_{uv} = \left(\frac{\bar{I}_{Tx}}{m_u} \cdot \frac{\bar{I}_{Tx}}{m_v} \right). \quad (21.)$$

(b):

$$w: w_{uv} = \left(\frac{\bar{I}_{Rx}}{m_u} \cdot \frac{\bar{I}_{Rx}}{m_v} \right). \quad (22.)$$

(c):

$$w: w_{uv} = \left(\frac{(\bar{I}_{Tx} + \bar{I}_{Rx})}{m_u} \cdot \frac{(\bar{I}_{Tx} + \bar{I}_{Rx})}{m_v} \right). \quad (23.)$$

Mivel a (21.), (22.), (23.) törtek számlálóiban szereplő mutatószámok \bar{I}_{Rx} , \bar{I}_{Tx} , $(\bar{I}_{Rx} + \bar{I}_{Tx})$ minden egyes csomópont esetén ugyanazok az értékek, a számlálóban pedig egy $[0,1]$ közötti érték szerepel, ebből következően nagyobb megbízhatósági érték esetén a törtek értéke kisebb, mint kisebb megbízhatóságú érték esetén. Az ezek szorzatából képzett élsúly tehát szintén megfelel a kezdeti kritériumunknak (azaz a forrás és cél csomópont között minimális összelköltségű útkeresésnek).

A súlyfüggvényt tehát oly módon finomítottuk, hogy kisebb élsúly nagyobb megbízhatóságot tükrözzön, a minimális költségű útkeresés problémájára visszavezetve a forrás-nyelő kommunikációt.

6.3.5. Megbízhatósági osztályok bevezetése

A csomópontok megbízhatósági rátájának ismeretében célszerű megbízhatósági osztályokat definiálni, mely a hálózat pillanatnyi képeinek megítélésében, a terhelések kiértékelésében lehet segítségünkre.

Tekintsük a következő hányadosokat:

$$- \frac{m_i}{\Delta I_{Tx}}, \quad (24.)$$

$$- \frac{m_i}{\Delta I_{Rx}}. \quad (25.)$$

(11.) és (12.):

$$\Delta I_{Tx} = \frac{1}{a_{Tx,max}} = \frac{\bar{I}_{Tx}}{I_{max}},$$

$$\Delta I_{Rx} = \frac{1}{a_{Rx,max}} = \frac{\bar{I}_{Rx}}{I_{max}},$$

melyeket (24.), (25.) képleteinkbe behelyettesítve a következőt kapjuk:

$$- \frac{m_i}{\Delta I_{Tx}} = m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Tx}} = m_i \cdot a_{Tx,max}: \text{ megadja [db], hogy az } i\text{-edik csomópont megbízhatósági rátája hány darab } Tx\text{-beli szerepvállalást bír még el, ha a meglévő energiáját már csak } Tx \text{ szerepekre használná fel.}$$

-
- $\frac{m_i}{\Delta I_{Rx}} = m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Rx}} = m_i \cdot a_{Rx,max}$: megadja [db], hogy az *i-edik* csomópont megbízhatósági rátája hány darab *Rx*-beli szerepvállalást bír még el, ha a meglévő energiáját már csak *Tx* szerepekre használná fel.

Ez alapján az alábbi arány is definiálható:

- $m_i \cdot \frac{I_{max}}{(\bar{I}_{Rx} + \bar{I}_{Tx})}$: megadja [db], hogy az *i-edik* csomópont megbízhatósági rátája hány darab (*Rx* + *Tx*) adattovábbítás jellegű szerepvállalást bír még el, ha a meglévő energiáját már csak (*Tx* + *Rx*) szerepekre használná fel.

A fenti ráták alapján csoportosíthatjuk a csomópontjainkat, tekintsük az alábbi négy kategóriát:

1. kategória:

Ha $(m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Rx}}) < 1$, akkor az *i-edik* csomópont se fogadni, se küldeni nem képes.

2. kategória:

Ha $1 \leq (m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Rx}})$, de $(m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Tx}}) < 1$, akkor az *i-edik* csomópont csak fogadni képes.

3. kategória:

Ha $1 \leq (m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Rx}})$, $1 \leq (m_i \cdot \frac{I_{max}}{\bar{I}_{Tx}})$, de $(m_i \cdot \frac{I_{max}}{(\bar{I}_{Rx} + \bar{I}_{Tx})}) < 1$, akkor az *i-edik* csomópont csak fogadni, vagy csak küldeni képes.

4. kategória:

Ha $1 \leq (m_i \cdot \frac{I_{max}}{(\bar{I}_{Rx} + \bar{I}_{Tx})})$, akkor az *i-edik* csomópont fogadni és küldeni egyaránt tud.

A fenti kategorizálás két 'szélsőségét' tekintve, míg az 1. kategóriában a megbízhatatlan csomópontok, addig a 4. kategóriában az (*Rx+Tx*) adattovábbításban megbízható csomópontok sorolhatók. Ez alapján bevezethetjük a csomópontok megbízhatósági osztályait, melyekre használjuk az alábbi jelöléseket.

A **1. kategóriába** sorolható csomópont megbízhatósági osztályt nevezzük el **megbízhatatlan osztálynak**, melyre vezessük be az alábbi jelölést:

$M-$ (a csomópont se vételre, se adásra nem képes).

A **2. kategóriába** sorolható csomópont megbízhatósági osztályt nevezzük el **Rx megbízhatóságú osztálynak**, melyre vezessük be az alábbi jelölést:

MRx (a csomópont csak vételre képes).

A **3. kategóriába** sorolható csomópont megbízhatósági osztályt nevezzük el **Tx megbízhatóságú osztálynak**, melyre vezessük be az alábbi jelölést:

MTx (a csomópont vételre vagy adásra képes).

A **4. kategóriába** sorolható csomópont megbízhatósági osztályt nevezzük el **megbízható osztálynak**, melyre vezessük be az alábbi jelölést:

$M+$ (a csomópont vételre és adásra egyaránt képes).

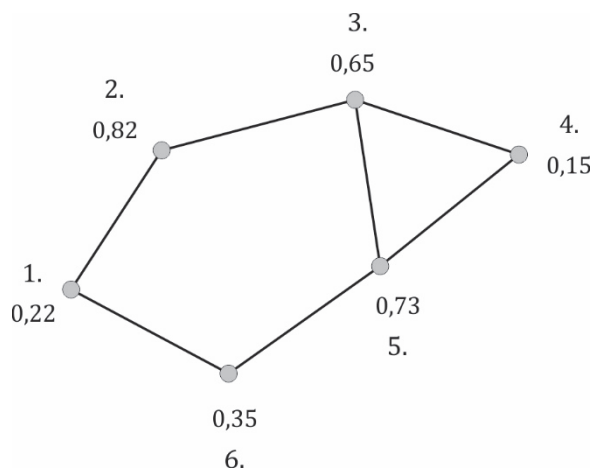
Ezt a beszédes jelölésrendszert használva a csomópontok osztályozása alapján könnyen eldönthető (például egy vizuális megjelenítés során), hogy adott út, vagy akár az egész gráf mennyire tekinthető megbízhatónak.

6.3.6. Megbízhatósági gráf modell mátrix-os ábrázolása

A hálózatunk szenzorcsomópontjai között fennálló kapcsolatok egyszerűen megadhatók a gráfelméletben használt, 3. fejezetben bevezetett szomszédsági (adjacencia) mátrix-szal.

$$A[i, j] = \begin{cases} 0, & \text{ha } (i, j) \notin E, \\ 1, & \text{ha } (i, j) \in E. \end{cases} \quad (26.)$$

Példaként tekintsük a hálózatot reprezentáló $G=(V,E)$ gráfot (ld. 23. ábra).



23. ábra: Egy elképzelt hálózat gráfja

A gráf szomszédsági mátrixa:

$$A_{G=(V,E)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27.)$$

A szomszédsági mátrix a definíciójából következően irányítatlan gráfok estén a főátlóra nézve szimmetrikus ($A[i, j] = A[j, i]$), ami a szenzorhálózatokban a kétirányú kommunikációra utal (ne felejtjük: két csomópont csak akkor tud egymással kommunikálni, ha mindkettő a másik hatókörében tartózkodik, mint ahogy erre a megbízhatósági gráf modell bevezetése során is kitértünk). A fenti mátrixban a szimmetria miatt a gráfunkban szereplő éleket kétszer tartalmazza, vagyis:

$$|E| = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A[i, j] \right) / 2. \quad (28.)$$

A hurokmentes gráf szomszédsági mátrixának (nincs olyan él, melynek mindkét végpontja ugyanaz a csomópont, azaz $A[i, j]=0$, ha $i=j$) főátlóját feltöltve, vezessük be a megbízhatósági

mátrix (MM) fogalmát, az alábbiak szerint:

$$MM[i, j] = \begin{cases} m_i, & \text{ha } i = j, \\ 1, & \text{ha } (i, j) \in E. \end{cases} \quad (29.)$$

ahol m_i az i -edik csomópont megbízhatósági rátája.

Ezzel gyakorlatilag a szenzorhálózatunk számítógépes adatábrázolása során a csomópontok közötti kapcsolatok reprezentálására létrehozott szomszédsági mátrix a főátlójában szereplő nullák helyén a csomópontok megbízhatósági rátájának tárolására is alkalmassá válik.

Az 23. ábrán látható gráfra a megbízhatósági mátrix az alábbi:

$$MM_{G=(V,E)} = \begin{bmatrix} 0,22 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0,82 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,65 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,15 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0,73 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,35 \end{bmatrix}. \quad (30.)$$

Tegyük fel, hogy számítógépes adatábrázolás céljából kialakított adatstruktúrában azt is szeretnénk szemléltetni/tárolni, hogy adott üzenettovábbítás során felépülő $G'=(V',E') \subseteq G=(V,E)$ utat mely élek alkotják. A megbízhatósági mátrix ötletét továbbgondolva kézenfekvőnek tűnik a pillanatnyi aktivitási mátrix (PAM) bevezetése:

$$PAM[i, j] = \begin{cases} m_i, & \text{ha } i = j, \\ 1, & \text{ha } (i, j) \in E \text{ és } j > i, \\ *, & (i, j) \in E' \text{ és } j < i, \\ 0, & (i, j) \notin E \text{ és } j > i, \text{ vagy } (i, j) \notin E' \text{ és } j < i. \end{cases} \quad (31.)$$

A pillanatnyi aktivitási mátrix főátlójában tehát a $G=(V,E)$ gráfot alkotó csomópontok megbízhatósági rátáját, a főátló feletti háromszögben ($j > i$) a csomópontok szomszédsági viszonyát tárolja, a főátló alatti háromszögben ($j < i$) pedig a $G'=(V',E') \subseteq G=(V,E)$ utat alkotó élekre utalunk a * szimbólummal.

A felső háromszög $[i,j]$ pozíciójában tehát a 0 arra utal, hogy $G=(V,E)$ gráfban az i -edik és j -edik csomópont között nincs él (nem szomszédosak G -ben), míg az alsó háromszög $[i,j]$ pozíciójában álló 0 azt jelöli, hogy a $G'=(V',E') \subseteq G=(V,E)$ részgráfban (forrástól nyelőig felépülő út) az i -edik és j -edik csomópont között nincs él (nem szomszédosak G' -ben), azaz nem történik i és j között adattovábbítás.

Tegyük fel, hogy felügyeljük a szenzorhálózat működését annak hatékonyságának javítása céljából, mely során kinyerhetők, rendelkezésünkre állnak a szükséges információk a teljes szenzorhálózatra nézve. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy n átviteli ciklust lefedő T megfigyelési időintervallum alatt, hol alakulnak ki a hálózatban túlterhelések.

Az imént bevezetett PAM ötletét továbbgondolva, vezessük be a pillanatnyi terhelési mátrixot (PTM) az alábbiak szerint:

$$PTM[i,j] = \begin{cases} m_i, & \text{ha } i = j, \\ 1, & \text{ha } (i,j) \in E \text{ és } j > i, \\ 0, & \text{ha } (i,j) \notin E \text{ és } j > i, \\ a_{ij}, & \text{ha } j < i, \end{cases} \quad (32.)$$

ahol a_{ij} az i -edik és j -edik csomópont közötti él aktivitását (terhelését, azaz hányszor lett kiválasztva kommunikációhoz) jelenti a megfigyelt T időintervallum alatt. A pillanatnyi terhelési mátrix főátlójában továbbra is a $G=(V,E)$ gráfot alkotó csomópontok megbízhatósági rátáját, a főátló feletti háromszögben pedig ($j > i$) a csomópontok szomszédsági viszonyát tároljuk acélból, hogy a hálózat vizsgálata során egyértelmű következtetéseket vonhassunk le a szomszédsági relációk és megbízhatósági ráták

ismeretében. A főátló alatti háromszögben ($j < i$) az $[i,j]$ elem a_{ij} értéke a T megfigyelési idő alatt végbemenő forrás-nyelő kommunikációk $G'=(V,E') \subseteq G=(V,E)$ útjainak kialakításában résztvevő élek aktivitását (terhelését) mutatja.

Példaként tekintsük az alábbi terhelési mátrixot:

$$PTM_{G=(V,E)} = \begin{bmatrix} 0,22 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0,82 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0,65 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0,15 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 0,73 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0,35 \end{bmatrix}. \quad (33.)$$

A terhelés mátrix alsó háromszögében lévő aktivitási értékekre statisztikai számítások végezhetők a hálózat működésének jellemzésére. Például (28.) PTM átlaga (\overline{tm}), és szórása (σ_{tm}):

$$\overline{tm} = \frac{20}{7} = 2,86, \quad (34.)$$

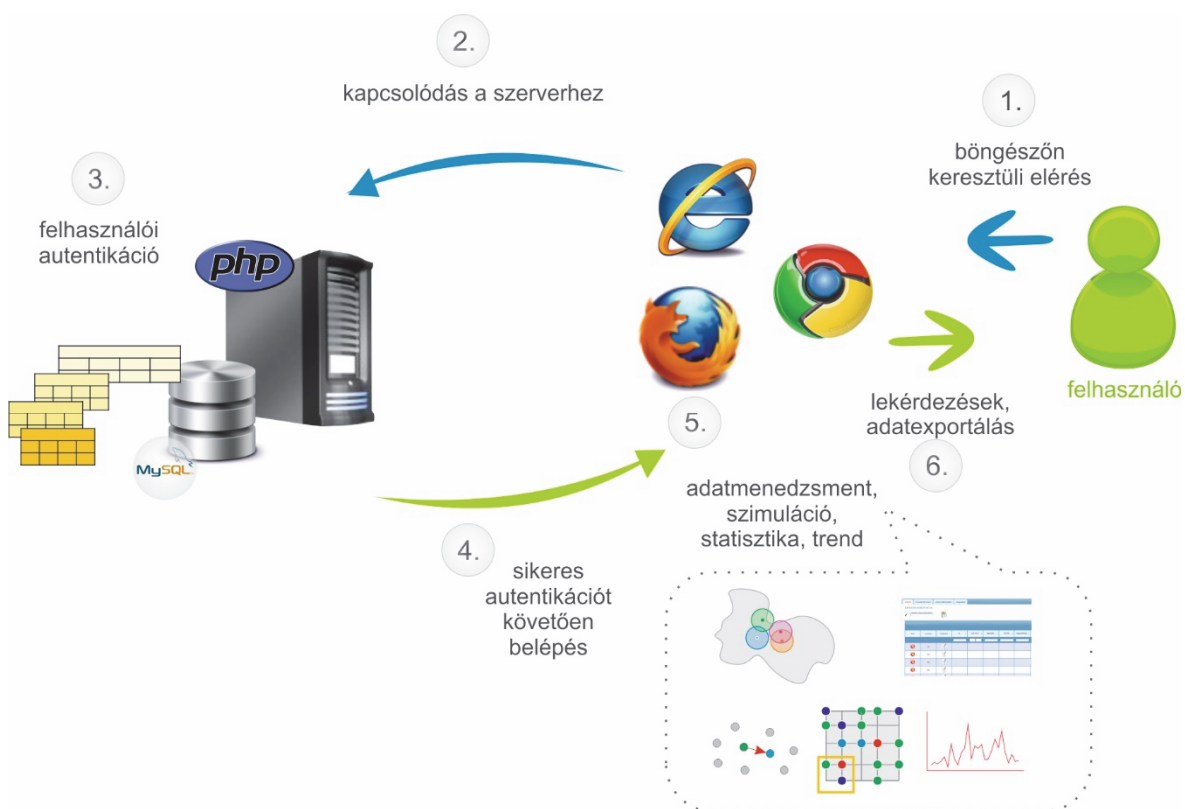
$$\sigma_{tm} = \frac{20}{7} = 1,25. \quad (35.)$$

Ez alapján megállapítható, hogy a megfigyelt T intervallumban az egyes csomópontok terhelése átlagosan 1,25-tel térnek el az átlagos terheléstől.

A gyakorlatilag a hálózati kommunikáció folyamatos nyomon követése, a működési hatékonyság javítására irányuló következtetések megállapítása, trendek felállítása céljából T -t elég nagyra érdemes választani ($T \rightarrow \infty$). Ez esetben a pillanatnyi terhelési mátrix analógiájára bevezethetjük a terhelési mátrix fogalmát, mely a PTM-mel megegyező struktúrával és működési mechanizmussal bír, így ennek részletezésétől eltekintek.

7. MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL ALAPÚ KERETRENDSZER FEJLESZTÉSE

A megbízhatósági gráf modellhez vázolt algoritmus viszonylag könnyen implementálható bármilyen programnyelven. Az egyes csomópontok helyzetének, aktivitásának, megbízhatósági rátájának tárolására alkalmas adatbázis modult, a 6.3.6. fejezetben bevezetett mátrixok előállítására, a megbízhatósági gráf modell és a megbízhatósági osztályok vizualizálására, és a megbízhatóság alapú útvonalkeresés szimulációs vizsgálatára alkalmas keretrendszert fejlesztettem ki. A rendszer működési elve a 24. ábrán követhető nyomon.



24. ábra: A megbízhatósági gráf modell rendszer koncepciója

7.1. FEJLESZTŐKÖRNYEZET

A rendszer fejlesztése PHP alapon történt MySQL támogatással, mely révén az adatok adatbázistáblákban kerülnek letárolásra egy központi szerveren (a működés elvét az 24. ábra mutatja be). A működéséhez szükséges infrastruktúrát a kiszolgáló szerver biztosítja az alábbiak szerit:

- PHP modul: a szerver oldali PHP alapú programkódok futtatásához,
- MySQL modul: centralizált adattárolás, szűrési, keresési funkciók megvalósítása.

A PHP (Hypertext Preprocessor) egy olyan nyílt forráskódú számítógépes szkriptnyelv, mely szerver oldalon az operációs rendszerek bármelyikén képes futni, a legtöbb kiszolgálóprogrammal együttműködve. Legfőbb felhasználási területe a dinamikus weboldalak készítése.

A MySQL egy nagyon elterjedt adatbázis kezelő rendszer, amely egyszerűségéről és hatékonyságáról híres. Az egyszerűsége többek közt annak is köszönhető – ahogyan azt a neve is jelzi –, hogy SQL parancsokon alapszik. Az SQL (Structured Query Language) szabványosított nyelvezete segítségével a különböző típusú adatbázisokat azonos módon kezelhetjük.

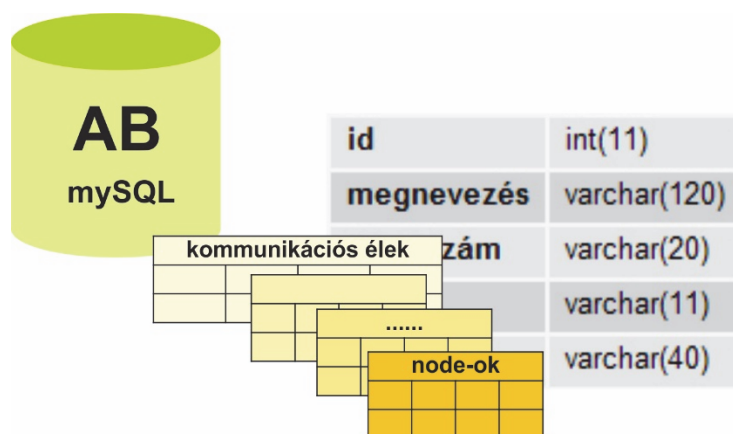
7.1.1. Adatbázis struktúra kialakítása

Az adatok adatbázisban való nyilvántartásához egyértelműen definiálni kellett, hogy melyek azok az információk, amelyeket le kell tárolni az általános keresési és összetettebb szűrési funkciók biztosításához. Az adatok megfelelően kialakított adatbázis táblákban kerülnek letárolásra.

Az adatmezőkkel kapcsolatban az alábbi járulékos paramétereket kellett definiálni:

- adatmező típusa: szám, szöveg, logikai, dátum, stb.
- adatmező hossz: hány karakternyi hossz szükséges a tároláshoz,
- adatmezőhöz kötődő integritási feltétel: belső szabályrendszer, a letárolt adatok

helyessége (lehet-e például üresen hagyni az adott adatmezőt a rögzítés során, elsődleges kulcsról van-e szó, stb.).



25. ábra: Adattároláshoz használt adatbázis táblák

A táblázat szerkezete (ld. 25. ábra), sémája tehát a táblázathoz tartozó mezőkkel írható le. Azaz, ha megadjuk, hogy milyen mezőkből épül fel a táblázat, akkor ezzel egyértelműen megadjuk a táblázat szerkezetét is, tehát két táblázat szerkezete különbözik egymástól, ha található olyan mező, mely az egyikben benne van, a másikban nincs.

Azért tartottam fontosnak a bemutatott modell implementálását, mert egyrészt bizonyítani szerettem volna, hogy az elgondolás viszonylag könnyen megvalósítható a gyakorlatban, másrészt a létrehozott adatbázist random adatokkal feltöltve tesztelni lehet a működését. Megfelelő interfész kialakításával az általam fejlesztett rendszer illeszthető egy önszerveződő vezeték nélküli hálózathoz. Például, ha a ZigBee vezeték nélküli hálózatot egy belső szobában információgyűjtésre használjuk, akkor utána szükség lehet az üzenet Interneten keresztül egy figyelő állomáshoz történő továbbítására. Ebben az esetben a ZigBee átjáró implementálja a ZigBee protokollt és az Internet protokollt is, mely révén a ZigBee csomagokat az Internet protokoll csomag formátumára fordítja le, és fordítva.

Rendszerfejlesztés során a modularitást mindig nagy prioritással kezelem, tekintettel arra, hogy sokkal nagyobb rugalmasság biztosítható ezáltal mind a rendszer továbbfejlesztése, mind pedig a kezelése tekintetében.

A mezők megadása a mező névének és a mező adattípusának a kijelölésével történik. Mivel a szerkezetek megadása nem azonosít egyértelműen egy táblázatot, hiszen több táblázat is létezhet ugyanazzal a szerkezettel, másrészt a szerkezet leírása igen hosszadalmas, ezért minden táblázat kap egy egyedi azonosító nevet az adatbázison belül. Ezzel a névvel egyértelműen lehet azonosítani a táblázatot a műveletek során. A táblázat névnek tehát az adatbázison belül, a mezőnévnek pedig a táblázaton belül kell egyediek lennie.

A kötelező adatmezőkön túl (belső primary ID, node azonosító, telepkapacitás, állapotváltozáshoz felhasznált energia, stb.) mellett további mezők adhatók meg egy konfigurációs adatállományban, melynek szerkesztéséhez egy egyszerű szövegszerkesztő (pl. notepad) szükséges. A konfigurációs állományban megadott plusz adatmezőket a rendszer automatikusan létrehozza, melyeket alapértelmezés szerint 'szöveg' formátumúra állít be. Azért tartottam célszerűnek a konfigurációs állományból létrehozandó adatmezők típusát szöveges adatként definiálni, mert ebben az adattípusban gyakorlatilag bármilyen egyéb adattípus letárolható (szám, logikai, dátum, stb.), továbbá automatikus adatkonverzió biztosított, azaz ha adott függvény egy számokat tartalmazó szöveges adatmezőben lévő adatokkal kíván operálni, akkor ez probléma nélkül fog végbemenni, mivel számként fogja kezelni ezen adatokat.

7.1.2. Konfigurációs állomány

A konfigurációs állományban a felhasználó által definiált új adatmezők adatbázis való letárolásához használt mezőneveken túl, a megjelenítés során a táblázat fejlécében szereplő 'beszédés' mezőnevek is definiálhatók, mellyel a felhasználói felület áttekinthetősége fokozható, egyszerűbb kezelés biztosítható.

Adatbázis kapcsolatot létrehozó, funkciókat betöltő konfigurációs állomány:

```
if ( defined( "config.php" ) )
    return;

define( "config.php", "1" );
define( "DBHOST", "host");
define( "DBUSER", "root");
define( "DBPASS", "root");
define( "DBNAME", "sensors");

mysql_connect( DBHOST, DBUSER, DBPASS ) or
    die( "Nem sikerült az adatbázisszerverhez csatlakozni,
    hibaüzenet:" . mysql_error() );
mysql_select_db( DBNAME ) or
    die( "Nem sikerült az adatbázist elérni,
    hibaüzenet:" . mysql_error() );

mysql_query ( 'SET NAMES latin2' );
$current_date = date( "Y.m.d. H:i:s" );
include( "scripts/functions.php" );
```

Az adattábla kibővítéséhez létrehozott konfigurációs állomány egy részlete:

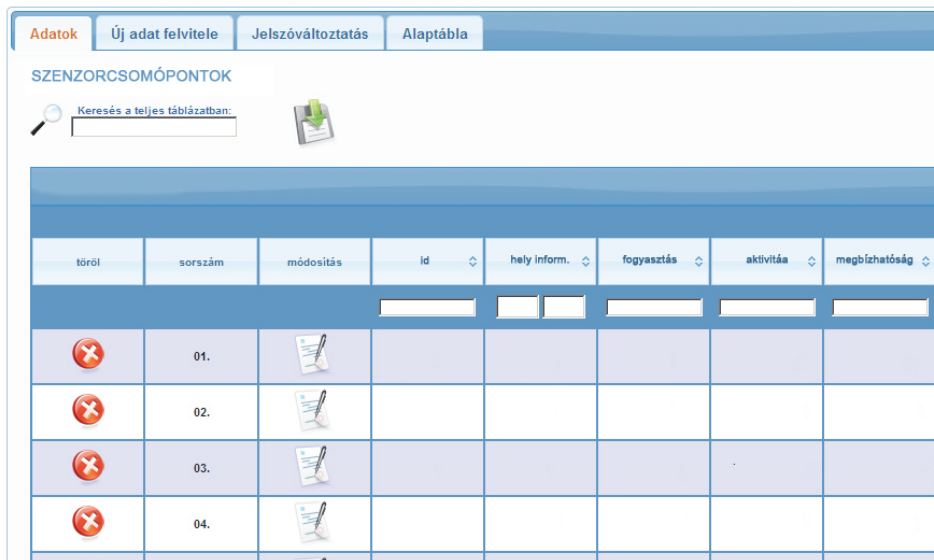
```
/* az új mezők neveinek megadása */

$new_table_columns =
    array(
        "col_name_1",
        "col_name_2",
        "col_name_3",
        "col_name_4"
        ...
    );

/* az új mezők felhasználói felületen történő megjelenítése
során használt elnevezése */

$new_table_columns_name =
    array(
        "mező 1 neve 1",
        "mező 2 neve",
        "mező 3 neve",
        "mező 4 neve",
        ...
    );
```

7.2. KEZELŐFELÜLET



26. ábra: Részlet a rendszer kezelőfelületéből

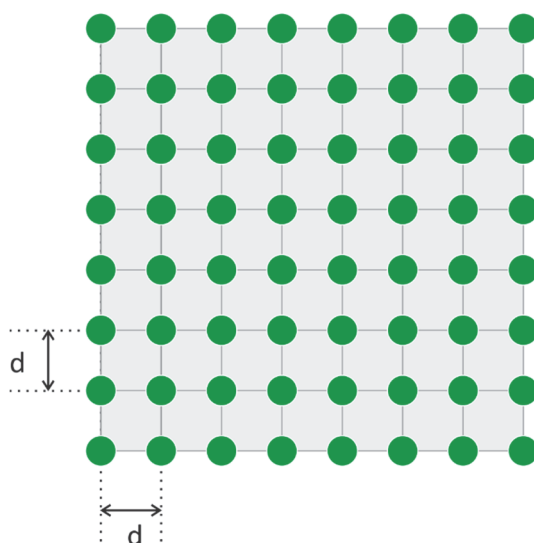
A felhasználóbarát felület (ld. 26. ábra) fontossága a fejlesztés során kiemelt prioritást kapott, mivel a külalak és a user-ek elvárásainak összekapcsolása egy kényelmes, egyszerűen kezelhető rendszerrel megkönnyíti a felhasználók munkáját, ez pedig munkaidő megtakarítást eredményezhet.

7.3. MEGBÍZHATÓSÁG ALAPÚ ALGORITMUS IMPLEMENTÁLÁSA

Szimulációs vizsgálatok elvégzése céljából, a megbízhatóság alapú algoritmust is a rendszerbe integráltam. Ezáltal tesztelhető a megbízhatósági gráf modell koncepció. A szenzorok véletlenszerű elhelyezése kapcsán különböző technikákat vizsgáltam. Tekintve, hogy egy elvi modell bevezetése esetén az algoritmus helyességének a működését tesztelik, így teljesen lényegtelen, hogy milyen területen helyezzük ki a szenzorcsomópontokat, hiszen kiindulásként feltételezzük, hogy a csomópontok látják egymást, és a cél a minél nagyobb fokú konnektivitás megőrzése. Természetesen egy algoritmus implementálása során további célokat is lehet definiálni, és azokkal együtt lehet vizsgálni adott módszer működését.

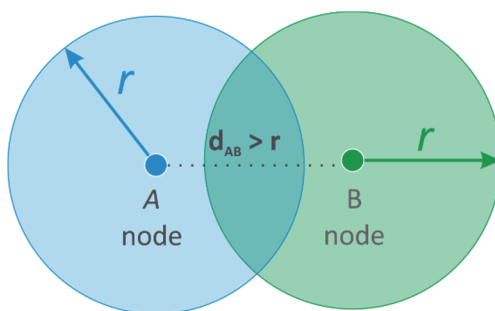
7.3.1. Szenzorrács generáló algoritmus

Algoritmusok szimulációs vizsgálatainál a legelterjedtebb módszer az, hogy egy téglalap/négyzet alapú területen vizsgálódnak, azon helyezik el a szenzorokat oly módon, hogy minél nagyobb konnektivitás valósuljon meg inicializáláskor. Erre egy rácsot szokás generálni (ld. 27. ábra), melynek a metszéspontjai reprezentálják a csomópontokat.

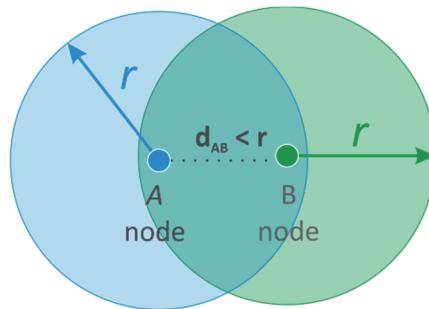


27. ábra: Szenzor rácsszerkezet kialakítása a szimulációs vizsgálatokhoz

A rácsok sűrűségét, a szimulációs vizsgálatok elvégzése során a szenzorcsomópontokra definiált hatósugár alapján szokták meghatározni (ld. 28., 29. ábra).



28. ábra: A és B node nem tud direkt mód kommunikálni egymással



29. ábra: A és B node direkt mód kommunikálnak egymással

Minél nagyobb konnektivitás biztosítása céljából a d távolságot úgy választottam meg, hogy átlósan is megvalósuljon a kommunikáció 2 csomópont között, ez esetben tehát:

$$\frac{r}{\sqrt{2}} \geq d, \quad (31.)$$

ahol r a szenzorcsomópontok hatósugara.

Hasonlóképp közelítettem meg én is a problémát, de apró módosítással igyekeztem a valóságos helyzethez közelíteni a szenzorok elhelyezést, melyre egy függvényt hoztam létre.

A függvény fejléce:

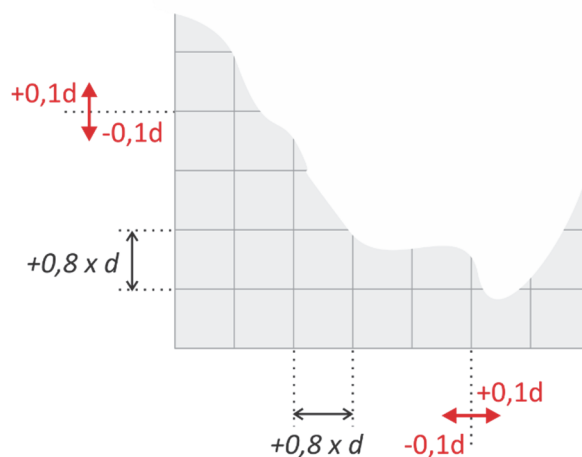
```
function SzenzorRacsGenerator( $v_num, $f_num, $r )
{
    /*
        rácsgenerálás
    */
}
```

A függvénynek négy típusú bemeneti paramétere van:

- $\$v_num$: numerikus típus, a rácsszerkezet vízszintes vonalainak száma,
- $\$f_num$: numerikus típus, a rácsszerkezet függőleges vonalainak száma,
- $\$r$: numerikus típus, a szenzorcsomópontok hatósugara.

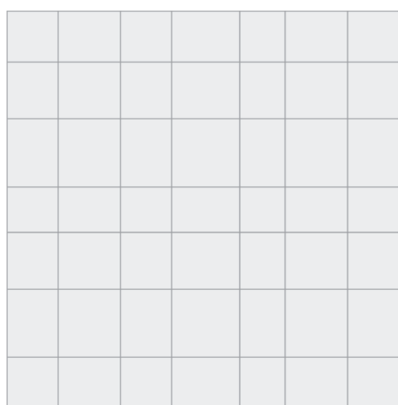
A függvénybe implementált algoritmus a következő lépéseken halad végig:

1. Vízszintesen legenerál v_num db rácsvonalat, egymástól $0,8d$ távolságra (ld. 30. ábra).
2. Függőleges irányba legenerál f_num db rácsvonalat, egymástól $0,8d$ távolságra.



30. ábra: Rácsvonalak elmozdításának szemléltetése

3. A függőleges vonalakat sorra egymás után, véletlenszerűen jobbra/balra elmozdítja $0,1d$ -vel (ld. 31. ábra).
4. A vízszintes vonalakat sorra egymás után, véletlenszerűen fel/le irányba elmozdítja $0,1d$ -vel.



31. ábra: Legenerált rácsszerkezet 8×8 rácsvonal esetén

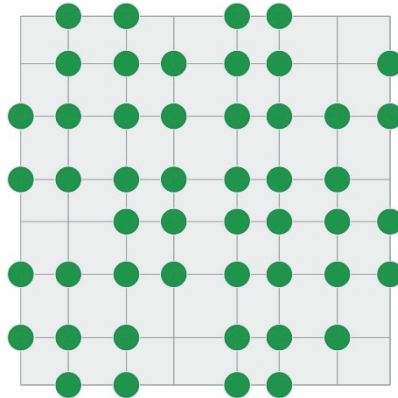
5. A vízszintes és függőleges rácsvonalak metszéspontjába elhelyez egy-egy csomópontot.
6. A bal alsó sarokponttól az óramutató járásával megegyező irányba elindulva a téglalapburkoló kerületén, a burkolótól a téglalap belsejébe mutató irányba minden harmadik rácspontnál véletlenszerűen az első, vagy első + második csomópontot eltávolítja, figyelve arra, hogy két egymást követő törlés kritikus pontjaiba (jellemzően a téglalap sarkainál) is teljesüljön, hogy a csomópont fokszáma egynél nagyobb legyen (ld. 32. ábra).

A rácsvonalak távolságát a függvény a bementi argumentumként kapott r numerikus értékből számítja, a $d = \frac{r}{\sqrt{2}}$ képlet alapján, mivel ezzel garantálható, hogy a csomópontok átlós irányban is egymás szomszédjai legyenek, azaz kommunikálni tudjanak egymással. Tekintve, hogy a rácsvonalakat a legenerálásuk alkalmával a függvény $0,8 \cdot d$, azaz $0,8 \cdot \frac{r}{\sqrt{2}}$ távolságokra helyezi el egymástól, majd véletlenszerűen függőleges rácsvonal esetén jobbra vagy balra, vízszintes rácsvonal esetén fel vagy le irányba elmozdítja $0,1 \cdot d$, azaz $0,1 \cdot \frac{r}{\sqrt{2}}$ értékkel, így végül összesen 3-féle távolság alakulhat ki két rácsvonal között:

- mindkét rácsvonal egymás felé indul el: $(0,8 - 0,1 - 0,1) \cdot \frac{r}{\sqrt{2}} = 0,6 \cdot \frac{r}{\sqrt{2}}$,
- mindkét rácsvonal ugyanabba az irányba indul el: $0,8 \cdot \frac{r}{\sqrt{2}}$,
- mindkét rácsvonal távolodik egymástól: $(0,8 + 0,1 + 0,1) \cdot \frac{r}{\sqrt{2}} = \frac{r}{\sqrt{2}}$.

Ezek közül a legkritikusabb távolság $\frac{r}{\sqrt{2}}$, mivel a kezdeti rácstávolságához képest ez esetben nő leginkább 2 rácsvonal között a távolság. Tehát ha ennél teljesül, hogy 2 szomszédos függőleges, és 2 szomszédos vízszintes rácsvonal metszéspontjaiban lévő csomópontok egymás hatósugarában vannak, akkor a másik két esetet ez már teljesül, mivel ettől kisebb távolságokat definiálnak átlós irányba.

A 'legkritikusabb esetben' tehát az átló hossza: $\sqrt{\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{2 \cdot \frac{r^2}{2}} = r$, vagyis átlós irányba is garantált a kommunikáció.



32. ábra: A szenzorrács generátor függvény kimenete 8×8 rácsvonal esetén

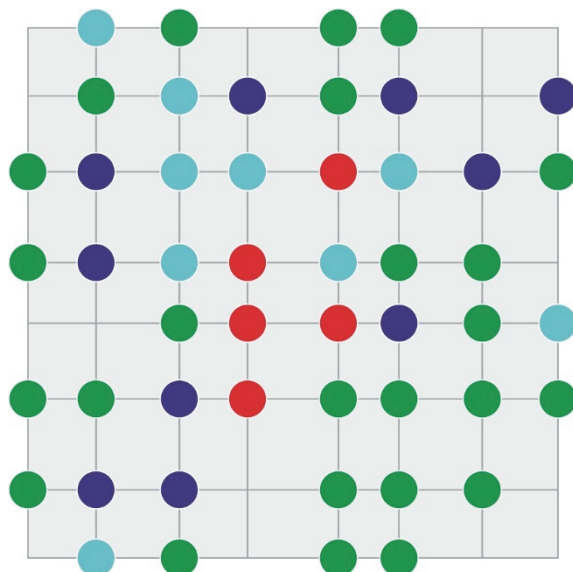
7.4. SENZOR MEGBÍZHATÓSÁGI OSZTÁLYOK VIZUALIZÁLÁSA

A 6.3.5. pontban bevezetett megbízhatósági osztályok hasznát a szimuláció során is be szerettem volna mutatni. Ezen célból létrehoztam egy függvényt, mely az adott megbízhatósági osztályba besorolja a csomópontokat a pillanatnyi megbízhatóságuk alapján, majd ezt vizuálisan is megjeleníti.

```
function SzenzorMegbizhatosagiOsztylozas( $racs )
{
    /*
        megbízhatósági osztályozás
    */
}
```

A függvény egyetlen bemeneti paraméterként a legenerált rácsszerkezetet tároló tömböt kapja, mely csomópontjaira elvégzi a megbízhatósági osztályba sorolást. A négy megbízhatósági osztályt (6.3.5. fejezet) a következő színekkel jelenti meg (ld. 33. ábra):

- M+: zöld ,
- M-: vörös,
- MTx: sötétkék,
- MRx: világoskék.



33. ábra: Csomópont megbízhatósági osztályozás vizualizálása

7.5. MEGBÍZHATÓSÁGI GRÁF MODELL ALAPÚ ÚTVONALVÁLASZTÁS SZIMULÁCIÓJA

A keretrendszer a szenzorrácsszerkezet generáló modul lefutás után automatikusan lefuttatja a megbízhatóság alapú üzenettovábbítást megvalósító algoritmust. Ennek implementációja során a paramétereket rögzítettem, de ennek elhagyásával lehetőség van a felhasználótól is bekérni az alábbi adatokat (alább az alapértelmezett értékeket adom meg):

- szenzorcsomópont energiája: 1,0 ;
- Tx-hez szükséges energia: 0,05 ;
- Rx-hez szükséges energia: 0,04 ;
- maximális úthossz forrás és cél között: a leggenerált rácsszerkezet átlójában lévő csomópontok száma;
- minimális úthossz forrás és cél között: a leggenerált rácsszerkezet átlójában lévő csomópontok számának fele (szükség esetén lefelé kerekítve);
- iterációk száma: 20.

A szenzorrácsgenerálás és a szenzorok elhelyezését követően a program minden egyes iterációban véletlenszerűen választja ki a forrás és nyelő csomópontokat, melyek között a bevezetett megbízhatósági faktor alapján legoptimálisabbnak ítélt út megtalálása, azaz a legmegbízhatóbb kommunikációs útvonal kiválasztása a cél. A megbízhatósági gráf modellel bevezetett élsúlyozás alapján, a forrás és nyelő csomópont között a legmegbízhatóbb út megtalálásra a 3. fejezetben bemutatott [5] algoritmusokat alapul véve megadható a megbízhatóság alapú útvonalválasztó algoritmus az alábbiak szerint.

```

procedure MegbízhatóÚtvonalKeresés
begin
  for  $\forall v \in V$  csúcsra do
    begin
       $D[v] := \infty$ 
       $Szülő[v] := \emptyset$ 
    end
   $D[s] := 0$ 
  var
     $S := \emptyset$ 
     $Q$ : csomópontok sora
     $M$ : csomópont megbízhatóságok
     $A$ : adjacencia mátrix
  while  $Q$  nem üres do
    begin
       $u := \min(Q)$ 
       $S := S \cup \{u\}$ 
      for  $\forall v \in Szomszéd[u]$ -ra do
        begin
          if (  $A[u, v]$  ) then
            begin
              if (  $M[v] == 0$  ) or (  $M[u] == 0$  ) then
                begin
                   $w(u, v) = \infty$ 
                end
              end
            else
              begin
                 $w(u, v) = (1 / M[v]) * (1 / M[u])$ 
              end
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
    if ( D[ v ] > ( D[ u ] + w( u, v ) ) ) then
        begin
            D[ v ] := D[ u ] + w( u, v )
            Szülő[ v ] := u
        end
    end
end
end
end

```

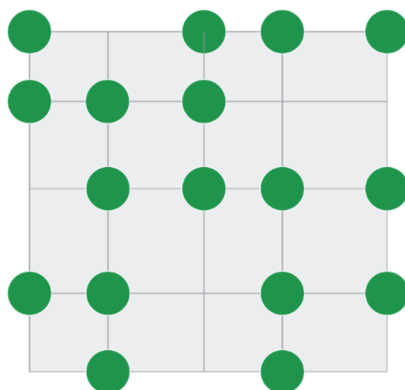
A létrehozott metódus megjegyzi azon csúcsok halmazát, melyekhez a forráscsúcsból ($s \in V$) induló legrövidebb út összsúlyát meghatározta, majd minden iterációban a legrövidebb súlyú út kiválasztásával halad a célcsozópont felé a szomszédos csomópontokba vezető élek súlyainak közelítésével.

A legmegbízhatóbb útvonal megtalálását követően az aktuális kommunikációban résztvevő csomópontok energiaszintjét a kommunikációs szerepnek megfelelően (*a forrás csomópont Tx, a cél csomópont Rx, míg a közbelső csomópontok Rx+Tx szerepet töltenek be a kommunikáció során*) az előre definiált értékkel csökkenti. Az aktuális energiaszinteknek megfelelően az egyes csomópontokat megbízhatósági osztályba sorolhatók, melyet vizuálisan is megjelenít a program egy átfogó képet nyújtva a hálózat jelenlegi állapotát illetően.

Alapértelmezett beállítás szerint, a szimuláció lefut x iterációval (x értéke felüldefiniálható a programban), majd még kétszer x iterációval (az iterációk száma tehát összesen: $3x$), melyeket követően a rendszer minden egyes alkalommal a megbízhatósági osztályok alapján definiált színekkel jeleníti meg a csomópontokat. Ez alapján kvázi egy pillanatképet kapunk a hálózatunk állapotáról, mely során vizuálisan meg tudjuk tekinteni, hogy mely csomópontok voltak túlterhelve, melyek nem vettek részt a kommunikációkban, hol kell beavatkoznunk, hogy ne alakuljanak ki izolációs hálózati részek.

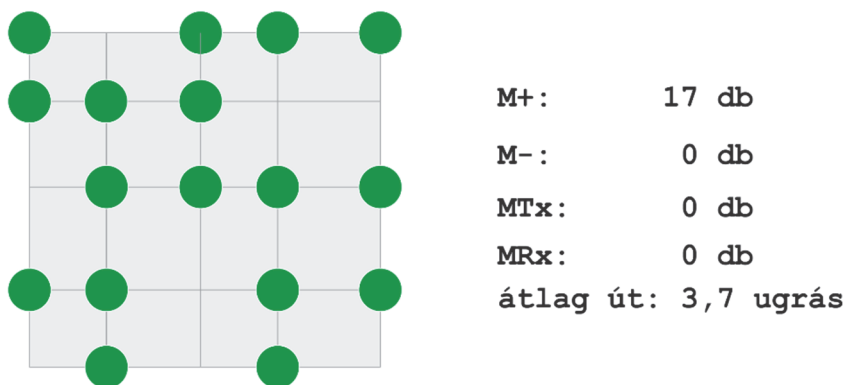
A program és az egyes funkciók működésnek szemléltetése, átláthatósága és nyomon követhetősége céljából tekintsünk egy 3.20 iterációból álló szimulációt, melyhez egy 5x5-ös rácsszerkezetű hálózatot (ld. 34. ábra) inicializáltam a rácsgenerátorral. Kezdetben minden

csomópont maximális energiával rendelkezik. Az algoritmus a forrás-nyelő kiválasztását véletlenszerűen végzi.



34. ábra: 5 x 5-ös rácsszerkezetű gráf

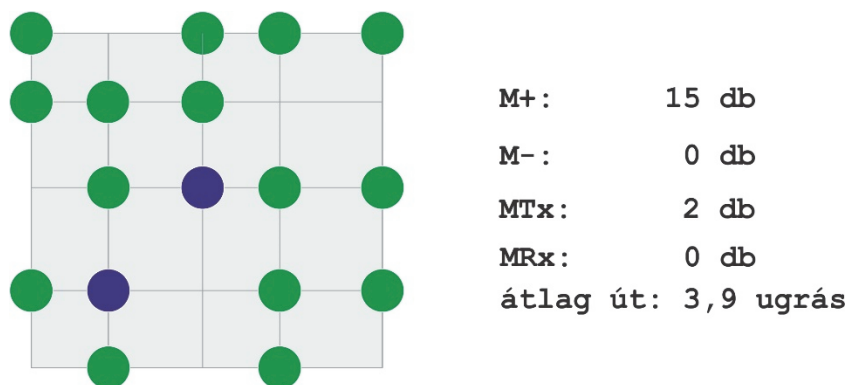
A legenerált rácsszerkezet 25 rácspontjából 17-be helyezett el szenzorcsomópontot a rácsgenerátor. Az első 20 iterációs fázis után már információt kapunk az egyes megbízhatósági osztályok gyakoriságára és az úthosszak átlagára is (ld. 35. ábra). Valamennyi csomópont $M+$ osztály besorolású maradt, mely várható volt a forrás-cél véletlenszerű kiválasztása, valamint a minimális (3) és maximális (5) úthosszak alapján.



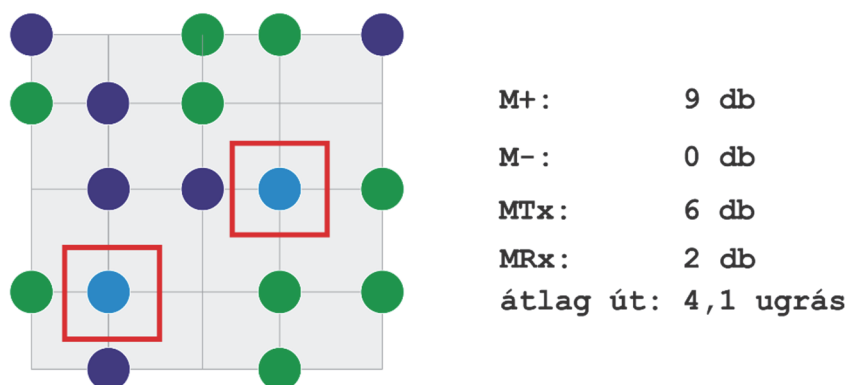
35. ábra: 20 iteráció után kialakuló hálózatkép

Ezt követően lefutott a következő 20 iteráció (ld. 36. ábra), mely során két csomópont jobban

terhelődött a többi csomóponthoz képest, mely többszöri forrás és cél szerepkör, a rövid utak (átlag: 3,9 ugrás), valamint a rács inicializációs fázis során a csomópont környezetéből eltávolított rácspontok továbbító szerepének átvállalása miatt következett be.

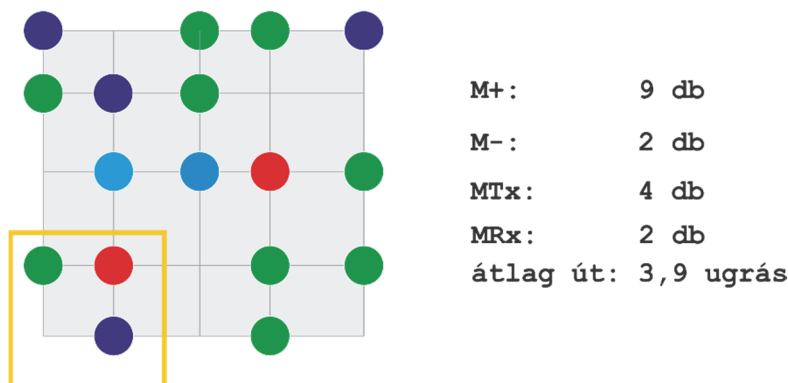


36. ábra: 40 iteráció után kialakuló hálózatkép



37. ábra: 54 iteráció után kialakuló hálózatkép

A program az 54. iterációban leáll, és figyelmeztetést ad (ld. 37. ábra, piros keretezés), hogy a hálózatban túlterhelés észlelhető, a piros kerettel megjelölt csomópontok hamarosan M-osztályba lépnek át. Természetesen lehetőséget ad a program a folytatásra, egy ENTER lenyomása után továbbfut, de az 56. iterációnál leáll, mert két csomópont megbízhatatlan osztályba ($M-$) lépett (ld. 38. ábra).



38. ábra: A program lefutása után kialakuló pillanatkép a hálózatunkról

A program a megbízhatatlan csomópontok felderítésével az izolált, vagy hamarosan elszigetelődő hálózati szegmenseket is kijelzi (ld. 38. ábra, sárga keretezés). Látható tehát, hogy az algoritmus jól működik, próbálja egyenletesen terhelni a rendszert az üzenettovábbítások során. Mivel a valós helyzet minél jobb megközelítése céljából korigáltuk a csomópontok helyzetét az eredeti rácsvonalak metszéspontjához képest, továbbá egy-két csomópontot eltávolítottunk, hogy vizsgálni tudjuk az alternatív útvonalválasztást (önjavító mechanizmus), továbbá a kiesett csomópontok miatt túlterhelődő csomópontok, majd ennek eredményeként újabb túlterhelt csomópontok megjelenése előidézi-e a megbízhatósági gráf modell alap gondolatát adó hálózati izolációt. A program előrejelezte az 54. iterációt követően, hogy két csomópont ugyan még nem merült le (MR_x), cél csomópontként még működnek, de továbbítani már nem fognak tudni. Az elgondolás alapötlete tehát bebizonyosodott, a modell az elvártak szerint működött a szimulációs vizsgálatok során.

8. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. TÉZIS

[s1] [s3] [s6][s8][s10]

Megalkottam az önszerveződő szenzorhálózatok megbízhatósági gráf modelljét, mely az aktuális energiaszintekhez viszonyított megbízhatósági értékek csomópontokhoz rendelésével az energiaforrások lemerülésének megelőzését célozza a túlterhelések elkerülésével.

A modellel bevezetett aktivitási értékek, megbízhatósági ráták alapján nyomon követhető, hogy a szenzorcsomópontok milyen megbízhatósággal képesek részt venni hálózati kommunikációban. Bevezettem a Megbízhatósági Mátrix, a Pillanatnyi Aktivitási Mátrix, a Pillanatnyi Terhelési Mátrix és a Terhelési Mátrix fogalmát, amelyek a vizsgált szenzorhálózat működésbeli megbízhatóságáról tömör módon tárolnak információkat, megkönnyítve ezzel a rendszer algoritmikus megközelítésű, megbízhatósági gráf modell alapú számítógépes adatábrázolását, a teljes hálózati működés kiértékelését, a túlterhelt hálózati szegmensek felderítését.

2. TÉZIS

[s1] [s3] [s6][s8][s10]

Az 1. Tézisben meghatározott gráf modellt kiegészítettem az élek költségét meghatározó súlyfüggvénnyel, mely használatával a csomópontok energiafelhasználását figyelembe vevő útvonalválasztó algoritmus alakítható ki.

A felállított modell alapján megadott súlyfüggvény két egymás hatókörében lévő csomópont megbízhatósági rátájából oly módon állítja elő a közöttük lévő él súlyértékét, hogy nagyobb megbízhatóságú élhez kisebb súlyt, kisebb megbízhatóságú élhez pedig nagyobb súlyt rendel, a minimális összköltségű útkeresésre visszavezetve a problémát.

A súlyfüggvény bemeneti paraméterei, és a kimenetként legenerált súlyértékek 3-dimenziós térben való leképzése során kapott felület alakja, a súlyfüggvény megbízhatóság alapú vizsgálódásra való jóságát támasztja alá.

3. TÉZIS

[s1] [s3] [s8][s11][s18]

Kidolgoztam egy olyan útválasztási metodikát, amely biztosítja a mesh típusú vezeték nélküli szenzorhálózatok kiegyensúlyozott csomópontterhelését, maximális élettartamú használatát.

Az útválasztási algoritmus bármely forrás és cél csomópont között a legmegbízhatóbb útvonalat adja meg. A megbízhatóság alapú útkeresés az összélsúlyok minimalizálásával valósul meg. A keresés a csomópontok megbízhatóság alapú kategorizálására bevezetett megbízhatósági osztályok alapján is történhet (M-: megbízhatatlan, MRx: vétel szempontjából megbízható, MTx: adás szempontjából megbízható, M+: megbízható) aszerint, hogy a vizsgált csomópont csak adásra, csak vételre, adásra vagy vételre, illetve adásra és vételre együttesen elegendő energiaszinttel bír -e.

4. TÉZIS

[s1] [s3] [s8][s18][s19]

Kialakítottam egy olyan keretrendszert, amellyel a megbízhatósági gráf modell kapcsán megalkotott súlyfüggvény működése szimulálható.

A súlyfüggvény működésbeli jóságának igazolására létrehozott keretrendszerben a szimulációk alkalmával nyomon követhető volt, hogy az útvonalválasztó algoritmus a megalkotott költségfüggvénnyel előállított élsúlyok vizsgálatával, a minimális élsúlyú utak kiválasztásával biztosítani tudja a csomópontok kiegyensúlyozott terhelését és a megbízhatatlan csomópontok tehermentesítését a hálózati izoláció elkerülése céljából.

A csomópont megbízhatósági osztályok vizualizálásával megfigyelhető, hogy ha nem történik időben beavatkozás, akkor az önszerveződő jellegből adódóan a terhelés más csomópontokra tevődik át, mely egy idő után a csomópontok kieséséhez, izolált hálózati részek kialakulásához vezetett.

ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A bevezetett új modell és a megadott ábrázolásmódok révén implementálható olyan alkalmazás, mely képes vizualizálni a node-ok közötti kapcsolatokat, a csomópontok és az élek megbízhatóságát, továbbá az energiafelhasználás hatékonyságát célzó algoritmus működésének nyomon követését. A kidolgozott koncepció továbbgondolható olyan értelemben, hogy miként működjön az algoritmus, miként struktúráljuk át, illetve milyen adatokat tároljanak a mátrixok, ha nemcsak az energiafogyasztást hanem egyéb hálózati paraméterekre is optimalizálni szeretnénk a rendszert.

A bevezetett elvi modell korlátozottságaként feltétlen fontosnak tartom megjegyezni, hogy centralizált megközelítésű a modell, azaz feltételezi, hogy a teljes rendszerre nézve rendelkezünk a szükséges információkkal. Erre való tekintettel a modellt finomítani kívánom oly módon, hogy infrastruktúra független szenzorhálózatokban is monitorozható legyen a szenzorcsomópontok élettartama, tervezhetővé téve a karbantartási munkálatokat, és ezzel megelőzve a váratlan hálózati kieséseket.

Az modellhez kifejlesztett alkalmazást további funkciókkal kívánom bővíteni, mely a szenzorhálózat állapotának vizuális nyomon követhetőségét, felügyeletét fokozza. Alkalmassá kívánom tenni a rendszert ipari üzemi területek wireless térképének előzetes tervezéséhez, mely révén előre megadhatók a szenzorcsomópontok optimális helyzete, figyelembe véve a fizikai és egyéb akadályokat, melyek az akkumulátorok élettartamát jelentősen befolyásolják. Ezzel nemcsak adott terület vezeték nélküli kommunikációval való lefedése tervezhető, hanem egyfajta energiaoptimalizálás is elérhető, mivel adatforgalom szempontjából egyenletesen terheltté válnak a csomópontok a szükségtelen alvó → aktív állapotváltozások redukálásával, megnövelve ezzel az egyes csomópontok telepélettartamát.

SUMMARY

THESIS 1

[s1] [s3] [s6][s8][s10]

I have created the reliability graph model of self-organising sensor networks by using reliability values in relation to the energy levels, which aims to detect the overloaded network segments to prevent the depletion of the sensor nodes.

The activity value introduced by means of the model and the reliability rate obtained from it can be used to monitor with what reliability the sensor nodes will be able to participate in further network communications. The notions of the Reliability Matrix, the Momentary Activity Matrix, the Momentary Load Matrix and the Load Matrix as well as that of the reliability sensor groups were introduced; they store information on the operation reliability of the sensor network tested in a concise way, thus facilitating the algorithm-approach testing of the system, the computerised data representation of sensor networks based on reliability graph models and the evaluation of the operation of the complete network. These self-organising mathematical abstractions lend themselves readily to testing the existence of the communications connection between the nodes of the self-organising sensor network, the activity values of the sensors, the reliability rates of the nodes and edges, the sending-receiving relation as well as to finding overloaded network segments.

THESIS 2

[s1] [s3] [s6][s8][s10]

The model constructed in Thesis 1 was used to define the weight function to produce the weight values of the edges, which can be used to create a routing algorithm that considers the energy consumption of the sensor nodes.

Input parameters of the weight function are the reliability rates of two nodes within each other's scopes of operation, which are used to produce as an output the edge weight value between two

nodes. The weight function was refined in the following way: higher reliability is denoted by a smaller weight value while smaller reliability is denoted by a higher weight value. This ensured that the source-sink route search based on edge weights could be traced back to the problem of minimum path search. The surfaces obtained in the course of 3D mapping of the input parameters of the starting and then of the refined weight function and of the weight values generated as outputs supported the goodness of the reliability-based operation of the function-relation established between the inputs and outputs.

THESIS 3

[s1] [s3] [s8][s11][s18]

A new routing methodology, a reliability graph model-based path-finding algorithm was worked out to ensure balanced load for the nodes and to provide maximum lifetime for mesh type wireless sensor networks.

The routing method introduced provides the most reliable route between any source and sink nodes in the mesh network by using minimum path search. The operation of the algorithm is based on node reliability classes (M-: unreliable, MRx: reliable for reception, MTx: reliable for transmission, M+: reliable) considering that a given node has sufficient energy for transmission, reception or both operations.

THESIS 4

[s1] [s3] [s8][s18][s19]

A framework system integrating the reliability graph model was implemented, which is aimed at the simulation of monitoring the operation of the weight function.

By means of the new model introduced and the representation modes presented it becomes possible to implement an application which is capable of visualising the inter-node relations and the reliability of nodes and edges, as well as of monitoring the operation of the algorithm aimed at the efficiency of energy utilisation. The reliability graph model-based path-finding algorithm was verified by operation simulation tests. The simulation tests show it clearly that the reliability graph-based approach facilitates a balanced loading of the nodes; moreover, the visual representation of the node reliability classes also proved that if there was no

intervention in time, the load was passed on to other nodes resulting from the self-organising character, which in the long term leads to a loss of nodes, the development of isolated network parts, as well as to loss of data and unexpected extra costs.

The reliability graph makes it possible to plan maintenance in advance and to prevent the depletion of the nodes. In this way it becomes possible to increase the predictability of the operation of the sensor network, to detect the overloaded sensor nodes which are soon to drop out of the overloaded network topology, as a result of which it becomes possible to prevent the development of isolated network parts and to prevent the network from becoming inoperable.

As a result, the probability of network outages due to depleted nodes and the number of messages undelivered or lost can be minimised, as well as unexpected network outages due to large-scale maintenance works can be prevented together with the extra costs generated by them, all of which will ensure a more predictable and more reliable network operation.

The system developed for calculating and storing the reliability rates of the sensor nodes and of the edge weights and for facilitating the performance of the related statistical computations also includes a sensor grid generating module.

As a limitation of the conceptual model it is essential to note that it is a centralised-approach model, that is it assumes that we are in possession of the necessary information concerning the complete system. As a consequence, the author wishes to refine the model so that it will become possible to monitor the lifetime of sensor nodes, facilitating the planning of maintenance works and thus preventing unexpected network losses in infrastructure-independent sensor networks as well.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Intanagonwiwat, C., R. Govindan, and D. Estrin, Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. 2000: Mobile Computing and Networking.
- [2] Ed Callaway, P. Gorday, L. Hester, J.A. Gutierrez, M. Neave, B. Heile, V. Bahl: Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks, IEEE Communication Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 70-77, August 2002.
- [3] Manoj Ahlawat: Wireless Sensor Network-A Theoretical Review International Journal of Wired and Wireless Communications, Vol.1, Issue 2, April, 2013
- [4] Man Wah Chiang, Zeljko Zilic, Katarzyna Radecka, Jean-Samuel Chenard, "Architectures of Increased Availability Wireless Sensor Network Nodes" IEEE, Vol.2, pp 1232-1240, Feb 2004.
- [5] Podobni Katalin: Legrövidebb útkereső algoritmusok, Diplomamunka, ELTE, Budapest, 2009.
- [6] Lengyel Zoltán: ZigBee hálózat analízátor fejlesztése, BME, TDK dolgozat, 2007.
- [7] Vincze Zoltán, Vida Rolland: Mobil eszközök alkalmazása szenzorhálózatokban, Híradástechnika
- [8] Dóra László: Biztonságos adattovábbítás vezeték nélküli multi-hop hálózatokban mobil felhasználók számára, PhD Értekezés, BME, 2011.
- [9] Ballagi Áron: Zigbee: vezeték nélküli komplex szenzorhálózatok gyorsan, olcsón, hatékonyan

-
- http://publikacio.uni-miskolc.hu/data/ME-PUB-16513/Ballagi_Zigbee_Poster.pdf
- [10] GÉMESI ROLAND, IVÁDY BALÁZS, ZÖMBIK LÁSZLÓ: Processz algebrai eszközök a szenzorhálózatok biztonsági vizsgálatában, *Híradástechnika*, LIX. ÉVFOLYAM 2004/8
- [11] Vincze Zoltán: ENERGIAHATÉKONYSÁG NÖVELŐ TECHNIKÁK VEZETÉKNÉLKÜLI SENZORHÁLÓZATOKBAN, PhD Értekezés, BME, 2008.
- [12] Ács Gergely: 'Biztonságos útvonalválasztás többugrásos vezeték nélküli hálózatokban, PhD Értekezés, BME, Budapest, 2008.
- [13] Szilágyi László, Cinkler Tibor, Csernátony Zoltán: Energiahatékony hálózati megoldások, *Híradástechnika*, LXV. Évfolyam, 2010/7-8
- [14] M.J. Handy, M. Haase, D. Timmermann, "Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection," 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, pp. 9-11, September 2002.
- [15] Indranil Saha, Lokesh Kumar Sambasivan, Subhas K. Ghosh, Ranjeet K. Patro: Distributed Fault Tolerant Topology Control in Wireless Ad-hoc Sensor Networks, 2006 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, Bangalore, IEEE, ISSN 1811-3923
- [16] Yu-Chee Tseng, Yen-Ning Chang, Bour-Hour Tzeng: Energy-efficient Topology Control for Wireless Ad Hoc Sensor Networks, *Journal of Information Science and Engineering* 20, pp. 27-37, 2004
- [17] M. Bahramgiri, M. Hajiaghayi, V. S. Mirrokni: Fault-tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms wireless multi-jop networks, 11th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 392-398, 2002
- [18] C.C. Shen, C. Srisathapornphat, R. Liu, Z. Huang, C. Jaikaeo, E. L. Lloyd: CLTC: A Cluster-Based Topology Control Framework For Ad Hoc Networks,
-

-
- IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 3., No. 1, pp. 18-32, Jan-Mar 2004
- [19] Yong Chen, S. H. Son: A Fault Tolerant Topology Control In Wireless Sensor Networks, 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, 2005
- [20] Nig Li, Jennifer C. Hou, Lui Sha: Design and Analysis of an MST-Based Topology Control Igorithm, IEEE INFOCOM, 2003
- [21] Jilei Liu, Baochun Li: Distributed Topology Control in Wireless Sensor Networks with Asymmetric Links, GLOBECOM 2003 – IEEE Global Telecommunications Conference, no. 1, pp. 1257-1262, Dec 2003
- [22] Xiaoyu Chu; Harish Sethu, "Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad hoc networks", INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE, vol., no., pp.262, 270, 25-30 March 2012.
- [23] Sanaz Naziri, Majid Haghparast, Somayeh Hasanpoor, "Improving Lifetime and Reliability in Routing Real-Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm" AJBAS, Vol.5, pp1105-1109, 2011.
- [24] Perkins, C., Ad-hoc on-demand distance vector routing. MILCOM, 1997.
- [25] Mclurkin, J., Algorithms for distributed sensor networks. 1999: Masters Thesis for Electrical Engineering at the University of California, Berkeley.
- [26] Pottie, G. and W. Kaiser, Wireless Integrated Network Sensors (WINS): Principles and Approach. Communications of the ACM, 2000. 43.
- [27] I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks 38, pp. 393–422, Elseiver, 2002
- [28] J. Agre, L. Clare, An integrated architecture for cooperative sensing networks, IEEE Computer Magazine (May 2000) 106–108.
- [29] Andrásfai Béla: Gráfelmélet: folyamatok, mátrixok, Akadémiai Kiadó, ISBN 963 05 3146 1, Budapest 1983
- [30] Katona Gyula Y., Recski András, Szabó Csaba: Gráfelmélet, algoritmuselmélet és algebra, ELTE, Budapest 1997
-

-
- [31] Hajnal Péter: Gráfelmélet, Polygon Kiadó – SZTE Bolyai Intézet, 2003
- [32] Friedl Katalin, Recski András, Simonyi Gábor: Gráfelméleti feladatok, Typotex Kiadó, Budapest, 2006
- [33] Gang Zhao: Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey, Vol. 3, No. 1, , ISSN 1943-3581, 2011
- [34] P. Bauer, M. Sichitiu, R. Istepanian, K. Premaratne, The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care, Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, 2000, pp. 17–21.
- [35] B.G. Celler et al., An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly, International Conference IEEE-EMBS, New York, 1994, pp. 908–909.
- [36] Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz, Piotr Kwasniewski, Izabela Windyga: Comparative Study of Wireless Sensor Networks Energy-Efficient Topologies and Power Save Protocols, Journal of Telecommunications and Information Technology, 3/2009
- [37] O. Dousse, P. Thiran, and Martin Hasler: Connectivity in ad-hoc and hybrid networks, Proceedings of IEEE Infocom 2002, New York, June 2002.
- [38] I. Rubin, R. Zhang and H. Ju: Topological performance of mobile backbone based wireless ad-hoc network with unmanned vehicles, Proceedings of IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC 2003), New Orleans, March 2003.
- [39] F. Sun and M. Shayman, “Minimum interference algorithm for integrated topology control and routing in wireless optical back-bone networks,” Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Paris, June 2004.
- [40] F. Reichenbach, „Localization in wireless ad hoc networks“, Master Thesis, University of Rostock, Germany, 2004.
-

-
- [41] Peter Corke, Fellow, Tim Wark, Member, Raja Jurdak, Wen Hu, Philip Valencia, Darren Moore: Member Environmental Wireless Sensor Networks, Vol. 98, No. 11, November 2010
- [42] T. L. Dinh, W. Hu, P. Sikka, P. I. Corke, L. Overs, and S. Brosnan, B: Design and deployment of a remote robust sensor network: Experiences from an outdoor water quality monitoring network, in Proc. 2nd IEEE Int. Workshop Practical Issues in Building Sensor Netw. Appl., Dublin, Ireland, 2007, pp. 799–806.
- [43] J. Blumenthal, F. Reichenbach, M. Handy, and D. Timmermann, “Optimal adjustment of the coarse grained localization-algorithm for wireless sensor networks”, Invited Paper, Proceedings of 1st Intl. Workshop on Positioning, Navigation, and Communication WPNC’2004, Hanover, Germany, March 2004.
- [44] S. Feldmann, “An indoor Bluetooth-based positioning system: concept, implementation and experimental evaluation”, ICWN’03, Las Vegas, USA, Institute of Communications Engineering, Hanover, June 23-26, 2003.
- [45] C. Savarese, “Robust positioning algorithm for distributed ad-hoc wireless sensor networks”, Technical Report, Delft University of Technology, 2001
- [46] ABI Research (2005). “Location Based Services”, Oyster Bay, NY, June 2005. http://www.abiresearch.com/products/market_research/Location_Based_Services
- [47] Atmel Corporation (2005). Atmel Corporation, San Jose, CA 95131, USA. http://www.atmel.com/dyn/corporate/view_detail.asp?FileName=Baldur_GPS_4_25.html
- [48] P. Bahl and V. N. Padmanabhan. (2000). RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, Israel.
- [49] J. H. Chang and L. Tassiulas, Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks, in Proceedings of IEEE INFOCOM, Vol. 1, 2000, pp. 22-31.
-

-
- [50] X. Cheng, A. Thaeler, G. Xue, D. Chen. (2004). TPS: A Time-Based Positioning Scheme for Outdoor Wireless Sensor Networks. INFOCOM 2004
- [51] E. Elnahrawy, J. Austen-Francisco, R. P. Martin. (2007). Adding Angle of Arrival Modality to Basic RSS Location Management Techniques. Presented at the IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing, San Juan, Puerto Rico, 5-7 February, 2007.
- [52] Hung-Chi Chu and Rong-Hong Jan (2005). A GPS-less self-positioning method for sensor networks. 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2005. Proceedings. Volume 2, 20-22 July 2005 Page(s):629 - 633 Vol. 2
- [53] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher. (2003). Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In Proceedings of ACM MOBICOM, 2003.
- [54] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000, pp. 1-10.
- [55] K. Henriksen and J. Indulska (2005). Developing context-aware pervasive computing applications: Models and approach. Pervasive and Mobile Computing, Volume 2, Issue 1, February, Pages 37-64
- [56] J. Hightower, R. Want, and G. Borriello, (2000). SpotOn: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. Technical Report UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, Feb. 2000.
- [57] J. Kjeldskov, C. Graham, D. Pedell, F. Vetere, S. Howard, S. Balbo and J. Davies. (2005). Evaluating the Usability of a Mobile Guide: The influence of Location, Participants and Resources. Behaviour and Information Technology, 24(1):51-65., <http://www.cs.aau.dk/~jesper/html/projects.html#trammate>
-

-
- [58] C. Savarese, J. Rabaey, and K. Langendoen, "Robust positioning algorithms for distributed ad hoc wireless sensor networks," in Proceedings of USENIX Annual Technical Conference, 2002.
- [59] C. R. Rao (1945). Information and accuracy attainable in the estimation of statistical parameters. Bulletin of the Calcutta Mathematical Society, 37:81–91, 1945.
- [60] Savvides, C.-C. Han, and M. B. Strivastava. (2001). Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors. In Proceedings of ACM MOBICOM, 2001.
- [61] H. Shi, X. Li, Y. Shang, D. Ma (2005). Cramer-Rao Bound Analysis of Quantized RSSI Based Localization in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2005. Volume 2, p. 32-36.
- [62] M.L. Sichitiu and V. Ramadurai. (2004). Localization of Wireless Sensor Networks with a Mobile Beacon. In Proceedings of the First IEEE Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS 2004), (Fort Lauderdale, FL), October 2004
- [63] H. Yunos, J. Gao, & S. Shim (2003). Wireless advertising's challenges and opportunities. IEEE Computer, Vol. 36, No 5.
- [64] B. Krishnamachari, D. Estrin, S. B. Wicker: The impact of data aggregation in wireless sensor networks, in Proc. 22nd Int. Conf. Distrib. Comput. Syst.
- [65] 2002, pp. 575–578. Chris Savarese, K. Langendoen, and J. Rabaey. Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks. Proceedings of the General Track: 2002 USENIX Annual Technical Conference, pages 317-327, 2002
- [66] Vaidyanathan Ramadurai and M. L. Sichitiu. Localization in wireless sensor networks: A probabilistic approach. In Proc. of the 2003 International Conference
-

-
- on *Wireless Networks (ICWN 2003)*, pages 275-281, Las Vegas, NV, June 2003.
- [67] X. Ji and H. Zha. Multidimensional scaling based sensor positioning algorithms in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st Annual ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 328-329, Nov. 2003.
- [68] Saad Biaz and Yiming Ji. Precise distributed localization algorithms for wireless networks. Submitted to *IEEE Infocom 2005*, July, 2004.
- [69] K. Langendoen and N. Reijers. Distributed location in wireless sensor networks: A quantitative comparison. *Computer Networks*, 43:499-518, 2003.
- [70] Keil, J. and C. Gutwin: 1989, 'The Delaunay triangulation closely approximates the complete Euclidean graph'. In: *Proc. 1st Workshop Algorithms Data Structure (LNCS 382)*.
- [71] Keil, J. M. and C. A. Gutwin: 1992, 'Classes of graphs which approximate the complete Euclidean graph'. *Discr. Comp. Geom.* 7, 13-28.
- [72] Kuhn, F., R. Wattenhofer, and A. Zollinger: 2002, 'Asymptotically Optimal Geometric Mobile Ad-Hoc Routing'. In: *International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIALM)*.
- [73] Kuhn, F., R. Wattenhofer, and A. Zollinger: 2003, 'Worst-Case Optimal and Average-Case Efficient Geometric Ad-Hoc Routing'. In: *ACM Int. Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*.
- [74] Li, L., J. Y. Halpern, P. Bahl, Y.-M. Wang, and R. Wattenhofer: 2001a, 'Analysis of a Cone-Based Distributed Topology Control Algorithms for Wireless Multi-hop Networks'. In: *PODC: ACM Symposium on Principle of Distributed Computing*.
- [75] Li, X.-Y., G. Calinescu, and P.-J. Wan: 2002a, 'Distributed Construction of Planar Spanner and Routing for Ad Hoc Wireless Networks'. In: *21st Annual*
-

Joint Conference of the, IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), Vol. 3.

- [76] Bevíz Péter: Akusztikus távolságmérésen alapuló lokalizáció szenzorhálózatban, Szakdolgozat, BME, Budapest 2011
- [77] Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek IV., Vezeték nélküli ipari kommunikációs rendszerek, 467 p, Miskolc, Aut-Info Kft. 2011. ISBN:978-963-08-1516-1
- [78] Lloyd, E., Liu, R., Marathe, M., Ramanathan, R., and Ravi, S. (2002). Algorithmic aspects of topology control problems for ad hoc networks. In Proceedings of the ACS MobiHoc 2002 Conference, pages 123-134
- [79] Althaus, E., Calinescu, G., Mandoiu, I.I., Prasad, S., Tchervenski, N., and Zelikovsky, A. (2003). Power efficient range assignment in ad-hoc wireless networks. In Proceedings of the IEEE WCNC 2003 Conference, pages 1889-1894.
- [80] Wieselthier, J., Nguyen, G., and Ephremides, A. (2000). On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. In Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000 Conference, pages 585-594.
- [81] I. Glauche, W. Krause, R. Sollacher, and M. Greiner. Continuum percolation of wireless ad hoc communication networks. *Physica A*, 325:577-600, 2003.
- [82] W. Krause, R. Sollacher, and M. Greiner. Self-topology control in wireless multihop ad hoc communication networks. Submitted for publication.
- [83] T. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practices*. Prentice Hall, 1996.

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [s1] Varga Attila K , Czap László: Reliability graph model for sensor networks, 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015), Debrecen, 2015.11.19 Debrecen: University of Debrecen Faculty of Engineering, 2015. pp. 238-244. (ISBN:9789634739173)
- [s2] Varga Attila K , Czap László: Development of a web-based system for evaluation of speech samples of deaf and hard of hearing children, 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015), Debrecen, 2015.11.19 Debrecen: University of Debrecen Faculty of Engineering, 2015. pp. 245-251. (ISBN:9789634739173)
- [s3] Varga Attila Károly, Czap László: Önszerveződő vezeték nélküli szenzorhálózatok megbízhatósági modellje, In: ENELKO 2015, XVI. Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika Konferencia, Arad , Románia, 2015.10.08 2015.10.11., Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 165-170.
- [s4] Czap László, Illés Béla , Varga Attila: Concept of a Speech Assistant System, In: 4th Word Congress on Software Engineering WCSE 2013 . Konferencia helye, ideje: Hong Kong , Kína , 2013.12.03 2013.12.04., Hong Kong: IEEE Computer Society, pp. 207211.
- [s5] Varga Attila K.: ZIGBEE vezeték nélküli szabvány, 28th microCAD Nemzetközi Multidiszciplináris Tudományos Konferencia, Miskolc, 2014.04.10-2014.04.11., 2014. Paper 01. 6 p., ISBN:978-963-358-051-6
- [s6] Varga Attila K.: ZIGBEE ALAPÚ VEZETÉK NÉLKÜLI ÖNSZERVEZŐDŐ HÁLÓZATOK, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XIX: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia,

-
- 2014.03.20-2014.03.21.,Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2014. pp. 437-440.,
(Műszaki Tudományos Füzetek - FMTÜ; 19.)
- [s7] Varga Attila K.: WEB-ALAPÚ AUTOMATIZÁLÁS, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XIX: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2014.03.20-2014.03.21.,Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2014. pp. 441-444., (Műszaki Tudományos Füzetek - FMTÜ; 19.)
- [s8] Attila K. Varga: ZigBee Based Wireless Sensor Networks, Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Debrecen, 2014.10.08-2014.10.09., ISBN:978-963-473-751-3
- [s9] Attila K. Varga: Self organizing in wireless sensor networks, Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013), 10-11 October 2013, Debrecen, pp. 211-218., ISBN:978-963-473-623-3
- [s10] Varga Attila K.: Localization Techniques in Wireless Sensor Networks, PRODUCTION SYSTEMS AND INFORMATION ENGINEERING 6: pp. 81-90. (2013)
- [s11] Varga Attila K.: Lokalizációs Algoritmusok Önszerveződő Vezeték Nélküli Szenzor Hálózatokban, GÉP 63:(9) pp. 35-38. (2012)
- [s12] Varga Attila K.: A Miskolci Egyetem Program Háló Felületének Fejlesztése, GÉP 63:(5) pp. 39-42. (2012)
- [s13] Varga Attila K.: Lokalizáció vezeték nélküli ad-hoc szenzor hálózatokban, FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA., MŰSZAKI TUDOMÁNYOS FÜZETEK (EME), Kolozsvár, ISSN 2067-6 808, XVII: pp. 351-354. (2012)
- [s14] Varga Attila K.: Gépi beszéd felismerés, FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA., MŰSZAKI TUDOMÁNYOS
-

FÜZETEK (EME), Kolozsvár, ISSN 2067-6 808,
XVII: pp. 355-388. (2012)

- [s15] Varga Attila K.: Localization Techniques Used in Self-organizing Wireless Sensor Networks, Tavaszi Szél 2012 = Spring Wind 2012. Győr, 2012.05.17-2012.05.20. (Széchenyi István Egyetem)
- [s16] Budapest: Doktoranduszok Országos Szövetsége, 2012. pp. 478-484., ISBN:978-963-89560-0-2
- [s17] Attila K Varga, István Ajtonyi: Localization algorithms used in self-organizing wireless sensor networks, 12th International Carpathian Control Conference: IEEE ICC 2011. Konferencia helye, ideje: Velké Karlovice, Csehország, 2011.05.25-2011.05.28. Piscataway: IEEE, 2011. pp. 410-413., ISBN:978-1-61284-360-5
- [s18] Attila K Varga: Localization in Ad-Hoc Wireless Sensor Networks, microCAD 2011, G Section: XXV. International Scientific Conference. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2011.03.31-2011.04.01. Miskolc: Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, 2011. pp. 43-48., ISBN:978-963-661-960-2
- [s19] Varga Attila: A ZIGBEE VEZETÉK NÉLKÜLI KOMMUNIKÁCIÓS SZABVÁNY, In. Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek IV.: Vezeték nélküli ipari kommunikációs rendszerek. 467 p., Miskolc: Aut-Info, 2011. pp. 119-159., ISBN:978-963-08-1516-1
- [s20] Varga Attila K., Ajtonyi István: Önszerveződő vezeték nélküli szenzor hálózatoknál alkalmazott lokalizációs technikák, Doktoranduszok fóruma: Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa, Miskolc, 2010.11.10, Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, pp. 120-125.

-
- [s21] Varga Attila K.: Localization in Ad-Hoc Wireless Sensor Networks microCAD 2011, H szekció: XXV. International Scientific Conference. Miskolc, Magyarország, 2011.03.31-2011.04.01., 2011.
- [s22] Varga Attila: Az ipari Ethernet kialakulása, In. Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek III.: Ipari ethernet alapú kommunikáció és automatizálás. Miskolc: Aut-Info, 2010. pp. 120-146., ISBN:978-963-06-8988-5
- [s23] Varga Attila: WEB-ALAPÚ FOLYAMATIRÁNYÍTÁS ÉS ALKALMAZÁSA, In. Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek III.: Ipari ethernet alapú kommunikáció és automatizálás. Miskolc: Aut-Info, 2010. pp. 238-259., ISBN:978-963-06-8988-5
- [s24] Varga Attila K, Dalmi Dénes: Quality assessment of motion picture transmission over digital channels, PRODUCTION SYSTEMS AND INFORMATION ENGINEERING 5: pp. 139-150. (2009)
- [s25] Varga Attila K, Ádám Tihamér: Error analysis of digital transfer channels, Proceedings of 10th International Carpathian Control Conference (ICCC'2009). Konferencia helye, ideje: Zakopane, Lengyelország, 2009.05.24-2009.05.27. Kraków: Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics, AGH University of Science and Technology, 2009. pp. 265-268., ISBN:8389772-51-5
- [s26] Ajtonyi István, Varga Attila K.: Új tudásanyagot eredményező kutatás lefolytatása a real-time alapú és a vezeték nélküli műszerezés erőműves alkalmazás lehetőségének vizsgálata és megbízhatósági kérdéseinek elemzése során, az alábbi részletezés szerint: A real-time ethernet alapú kommunikáció feltételrendszerének feltárása és alkalmazásának kidolgozása az erőműves technológiák irányításánál, 2008.

-
- [s27] Ajtonyi István, Varga Attila K.: REAL-TIME ETHERNET ALAPÚ KOMMUNIKÁCIÓ FELTÉTELRENDSZERÉNEK FELTÁRÁSA ÉS ALKALMAZÁSÁNAK KIDOLGOZÁSA AZ ERŐMŰVES TECHNOLOGIÁK IRÁNYÍTÁSÁNÁL, ipari munka
- [s28] Varga Attila K, Ádám Tihamér: Digitális átviteli csatornák hibavizsgálata, In. Doktoranduszok Fóruma 2008: Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2008 Miskolc: Miskolci Egyetem (ME), pp. 104-109.
- [s29] Ajtonyi István, Varga Attila K.: Az erőműben telepített égővezérlő irányítások biztonsági analízise alapján javaslat a módosításokra a biztonságos üzemeltetés érdekében: Az MLR-RET 6070101 sz. témaszámú projekthez kapcsolódó kutatás
- [s30] Kovács János, Varga Attila K.: Mozgókép-továbbító digitális átviteli csatornák hibavizsgálata, MAGYAR TÁVKÖZLÉS 4: pp. 25-30., 2007.
- [s31] Varga Attila K, Ádám Tihamér: Error analysis and modelling of digital transfer channel, Proceedings of International Carpathian Control Conference ICC 2007. Konferencia helye, ideje: High Tatras, Szlovákia, 2007.05.24-2007.05.27. Kosice: Technical University of Kosice, 2007. pp. 734-737., ISBN:978-80-8073-805-1
- [s32] Ádám Tihamér, Kane Amadou, Monica Borda, Serfőző Péter, Varga Attila K.: Digitális Jelprocesszorok és Infokommunikációs Alkalmazásaik, Miskolc: Miskolci Egyetem (ME), 2006. 344 p., ISBN:978-963-229-254-0
- [s33] Ajtonyi István, Varga Attila K, Ballagi Áron, Gyuricza István: Review of the alarm management system of the AES TISZA 2 power plant, Proceedings of 7th International Carpathian Control Conference, ICC 2006: XXXIth Seminary ASR'2006 „Instruments & Control”, 8th Automatyzacja maszyn, urzadzeń i procesów, APRO, 20th Automated systems of control of
-

-
- technological processes, ASR TP 2006. Konferencia helye, ideje: Roznov pod Radhostem, Csehország, 2006.05.29-2006.05.31. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2006. pp. 29-32., ISBN:80-2481066-2
- [s34] Ajtonyi István, Ballagi Áron, Gyuricza István, Trohák Attila, Varga Attila K.: Erőművi DCS alarm management rendszerének felülvizsgálata és a kapcsolódó szabályozó körök identifikációja, DCS-12: Folyamatirányító rendszerek XII. Találkozó : Miskolc-Lillafüred, 2006. okt. 25-27.. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2006.10.25-2006.10.27. Miskolc: pp. 1-8.
- [s35] Ajtonyi István, Varga Attila K, Ballagi Áron, Gyuricza István: Identification of the DCS control loops of a power plant, Proceedings of 7th International Carpathian Control Conference, ICC'C'2006: XXXIth Seminary ASR'2006 „Instruments & Control”, 8th Automatyzacja maszyn, urządzeń i procesów, APRO, 20th Automated systems of control of technological processes, ASR TP 2006. Konferencia helye, ideje: Roznov pod Radhostem, Csehország, 2006.05.29-2006.05.31. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2006. pp. 25-28., ISBN:80-2481066-2
- [s36] Ajtonyi István, Varga Attila K.: HAZOP vizsgálati módszerek és SIS biztonsági algoritmusok kutatása és kidolgozása: Az ML-RET 6050101 sz témaszámú projekthez kapcsolódó alap kutatás
- [s37] Formanek Bence, Dalmi Dénes, Varga Attila K.: Modern video kódolási eljárások és a bitsebesség csökkentés lehetőségei, ENELKO 2006 VII Nemzetközi Energetikai Konferencia. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2006.10.20-2006.10.22., Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp. 29-34.
- [s38] Serfőző Péter, Vásárhelyi József, Varga Attila K.: Analysis of hardware resources of Mojette transform implementation, TRANSACTIONS OF THE
-

UNIVERSITY OF MINING AND METALLURGY OF OSTRAVA.
MECHANICAL SERIES 52:(2) pp. 155-160., 2006.

- [s39] Varga Attila K, Serfőző Péter, Amadou Kane, Ádám Tihamér: Analysing and broadcasting transport streams over digital cable television network, TRANSACTIONS OF THE UNIVERSITY OF MINING AND METALLURGY OF OSTRAVA. MECHANICAL SERIES 52:(2) pp. 209-212., 2006
- [s40] Varga Attila K, Ádám Tihamér: Error analysis of digital transfer channels, Doktoranduszok fóruma 2006: Gépészmérnöki Kar szekciókiadványa. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2006.11.09 Miskolc: ME ITTC, pp. 234-239.
- [s41] Varga Attila K, Ádám Tihamér: Analysis of transport streams broadcastd via digital cable television networks, Proceedings of 7th International Carpathian Control Conference, ICCC'2006: XXXIth Seminary ASR'2006 „Instruments & Control”, 8th Automatyzacja maszyn, urządzeń i procesów, APRO, 20th Automated systems of control of technological processes, ASR TP 2006. Konferencia helye, ideje: Roznov pod Radhostem, Csehország, 2006.05.29-2006.05.31. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2006. pp. 601-604., ISBN:80-2481066-2
- [s42] Ádám Tihamér, Amadou Kane, Varga Attila K, Vásárhelyi József: Active noise cancellation strategies based on digital signal processing - an overview, Engineering achievements across the global village: International Conference on CAD/CAM, Robotics, and Factories of the Future. 536 p., Konferencia helye, ideje: Kraków, Lengyelország, 2005 Glasgow: University of Glasgow, 2005. pp. 305-312., ISBN:8372044546
- [s43] Ádám Tihamér, Kane Amadou, Varga Attila, Vásárhelyi József: Overview of Digital Signal Processing Based Noise Cancellation Strategies, Proceedings of

-
- 6th International Carpathian Control Conference ICCC 2005. Konferencia helye, ideje: Miskolc; Lillafüred, Magyarország, 2005.05.24-2005.05.27. Miskolc: Miskolci Egyetem (ME), 2005. pp. 519-528., ISBN:963 661 644 2
- [s44] Ajtonyi István, Varga Attila K., Gyuricza István, Ballagi Áron: A legkorszerűbb szabályozástechnikai módszerek alkalmazásával a Tisza II. Erőmű 4-es blokk DCS szabályozó köreinek behangolását javító, megbízhatóságot növelő tanulmány készítése, továbbá a legújabb hibajelzési metodika összehasonlítása és alkalmazásának lehetőségei a deltaV hibajelző rendszerében, tanulmány, 2006.
- [s45] Ajtonyi István, Varga Attila K., Ballagi Áron: A mechatronikában ill. szerelésautomatikában a vezeték nélküli kommunikációs rendszerek lehetőségének feltárása, tanulmány, 2006.
- [s46] Ajtonyi István, Varga Attila K., Ballagi Áron: Mikrokamerás felvételek kritikus gyártási folyamatok megfigyelésére, tanulmány, 2006.
- [s47] Varga Attila K, Kovács János: Inconsistency of telecommunication quality, Proceedings of 6th International Carpathian Control Conference ICCC 2005. Konferencia helye, ideje: Miskolc; Lillafüred, Magyarország, 2005.05.24-2005.05.27. Miskolc: Miskolci Egyetem (ME), 2005. pp. 343-354., ISBN:963 661 644 2
- [s48] Czap László, Mátyás János, Serfőző Péter, Varga Attila K.: Beszélő fej, ENELKO 2004, Energetika - Elektrotechnika Konferencia. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2004.10.08-2004.10.10. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2004. pp. 20-24., ISBN:9789738685291