

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



Směrování v bezdrátových Ad-Hoc a senzorových sítích

Jan Kubr

Studijní program: P2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Telekomunikační technika

Srpen 2017

Školitel:

Prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2
166 27 Praha 6 - Dejvice
Česká republika

Copyright © 2017 by Jan Kubr

Abstrakt

Senzorové sítě mají využití v řadě různých oblastí. Příkladem jsou aplikace ve zdravotnictví, aplikace chytrých domácností, bezpečnostní a armádní aplikace a aplikace v civilním inženýrství.

Senzorové bezdrátové sítě jsou většinou složeny z řady identických zařízení, která se obvykle vyznačují malými rozměry, malým výpočetním výkonem a malou zásobou elektrické energie. Počty senzorů v bezdrátové senzorové síti se pohybují v jednotkách kusů v malých sítích až v desítkách tisíců kusů v sítích rozlehlých. V těchto sítích je třeba řešit řadu problémů.

Jeden z problémů je způsoben bezdrátovou podstatou těchto sítí a je poněkud paradoxní. Vysílání jednoho senzoru slyší všechny senzory v komunikačním dosahu. Toto chování vytváří velké množství spojů, což je výhodné z pohledu nalezení nejkratších komunikačních cest a nalezení záložních spojů v případě výpadku. Na druhou stranu velké množství spojů výrazně ztěžuje směrování, především při pohledu na omezené výpočetní a paměťové zdroje. Tento problém se snažíme řešit pomocí řízení topologie (topology control).

Dalším problémem v senzorových bezdrátových sítích je vlastní směrování. V oblasti síťových technologií je problém směrování dobře popsán a prakticky řešen. Senzorové bezdrátové sítě však mají některé vlastnosti, které tyto metody neumožňují použít. Jedná se především o zohlednění nízkého výpočetního výkonu, malé dostupné paměti, nízké energetické zásoby a zohlednění možných dynamických přesunů senzorů v mobilních sítích. Řešením je návrh nových směrovacích protokolů, které výše uvedené vlastnosti zohledňují.

Nemenším problémem je limitovaná dostupná energie v senzorech a omezené rádiové možnosti senzorů, které zásadně omezují komunikační vzdálenost. Řešením uvedeného problému je přidání senzorů na vhodná místa, přidání senzorů s odlišnou komunikační technologií, například Global System for Mobile Communications (GSM), nebo použití směrových antén.

Tato práce se zaměřuje na popis metod řešících všechny výše uvedené problémy a v některých případech navrhuje nové postupy řešící dílčí nedostatky popsáných metod.

Hlavní těžiště práce spočívá v řešení problému omezené komunikační vzdálenosti. Pro zvětšení komunikační vzdálenosti je zvolena metoda Distributed Phase Shift Beam Forming (DPSBF). Tato metoda je v práci popsána a zhodnocena. Práce popisuje základní algoritmus pro vyhledání senzorů, které budou vysílat pomocí DPSBF algoritmu, který vyhledá optimální fázový posun. Tyto základní algoritmy jsou zhodnoceny a jsou navrženy, popsány a zhodnoceny jejich optimalizace.

Klíčová slova:

bezdrátový, ad-hoc, sensor, sítě, řízení topologie, interference, beamforming, distribuované anténní řady, isotropní anténa, anisotropní anténa, konvexní obálka

Abstrakt

Sensor networks have applications in many areas, including, for example, medicine, smart home technologies, security, military and civil engineering. Wireless sensor networks are usually composed of a series of small, identical devices (called “modules” or “nodes”) with low processing capabilities and energy power. The number of sensors in a network can range from a few (in small networks) to tens of thousands in large networks (e.g. “smart sands”). These networks feature a number of issues, which require specific solutions.

One of these problems is generated by the way wireless networks operate and is somewhat paradoxical. When a wireless module transmits, its radio transmission is received by all the other modules in its communication range. This results in many communication links, which is in itself a positive fact from the perspective of finding the shortest multihop communication paths and back-up links for the case of a module failure. At the same time however, a large number of links greatly complicates routing algorithms, especially considering the low processing power and memory available. This problem is usually addressed by topology control.

Another problem of wireless sensor networks is in the routing itself. In the area of computer networks routing is a well-known, researched and practically resolved problem. Sensor networks, on the other hand, have their own unique characteristics, which make the solutions for wired networks unusable. These are, once more, resource constraints (in terms of the memory, processing power, and energy), the sheer number of modules and their possible dynamic movement in mobile networks. The solution requires new routing techniques respecting these features.

Equally serious is the limited available energy in sensors and the restricted radio reach, which seriously reduce the communication distance. The solutions to this problem lie in an adequate module placement, a use of sensors with different communication technologies (GSM), or a use of directional antennas.

In this thesis I describe the methods addressing all the above issues of wireless sensor networks and propose new approaches of dealing with certain deficiencies of these methods.

In particular, the main contribution of this thesis lies in a proposed solution for the limited communication range problem. I choose the Distributed Phase Shift Beam Forming (DPSBF) method, which I describe and evaluate. I explain the algorithm of searching and finding the modules to transmit using the DPSBF process, which also determines the optimal phase shift. I describe and evaluate all these algorithms, including their optimization.

Keywords:

wireless, ad-hoc, sensor, networks, topology control, interference, beamforming, distributed antenna array, isotropic antenna, anisotropic antenna, convex hull

Poděkování

Děkuji mému školiteli prof. Ing. Borisi Šimákovi, CSc. za podporu a cenné zkušenosti, které mi předával během mého studia. Zároveň děkuji za vlídné přijetí a kolegiální atmosféru na Katedře telekomunikací, pracovišti, které prof. Ing. Boris Šimák, CSc. vede.

Poděkování patří mé ženě Kamile a dětem Barboře, Markétě a Janovi, kteří se mnou byli nejenom ve chvílích studia. Děkuji jim především za prokázanou trpělivost a podporu.

Nemenší poděkování patří i Ing. Alexandru Mouchovi, Ph.D. a Ing. Viktorovi Černému, mým kolegům, se kterými jsem spolupracoval na tématu bezdrátových sensorových sítí.

Dále děkuji Ing. Alexandru Mouchovi, Ph.D., Ing. Tomáši Černému, MSc., Ph.D. a Ing. Ondřeji Votavovi za odbornou korekturu textu disertační práce a mé manželce Kamile za korekturu jazykovou.

Závěrem děkuji řadě kolegů ze svého okolí, kteří ve mne věřili po celou dlouhou dobu mého studia.

Věnování

Mé rodině (Kamile, Barboře, Markétě a Janovi) a všem, kdo ve mne neztratili víru.

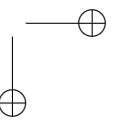
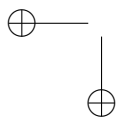
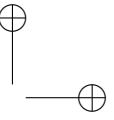
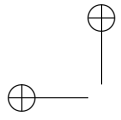
Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení svého školitele Prof. Ing. Borise Šimáka, CSc. Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám námitky proti půjčování, nebo zveřejňování této práce.

V Praze, 21. 8. 2017

.....
Jan Kubr

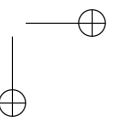
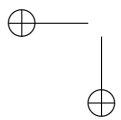
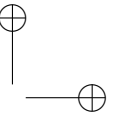
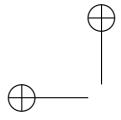


Obsah

1	Úvod	1
1.1	Reálné aplikace sensorových sítí	2
1.1.1	Sledování životního prostředí	2
1.1.2	Zdravotní péče	3
1.1.3	Vojenské aplikace	3
1.2	Hardware pro sensorové sítě	4
1.3	Cíle disertační práce	8
1.4	Použité metody a postup řešení	9
2	Senzorové a ad-hoc bezdrátové sítě	11
2.1	Nastavení topologie (Topology Control)	12
2.1.1	Kvalitativní kritéria síťových topologií	14
2.1.2	Algoritmy pro nastavení topologie	16
2.1.2.1	Grafy s prázdnou množinou sousedů	16
2.1.2.2	Grafy založené na úhlových výsečích	19
2.2	Směrování v bezdrátových sensorových sítích	20
2.2.1	Síťová struktura	22
2.2.2	Typ stavových informací	22
2.2.3	Energetická efektivita	23
2.2.4	Mobilita	24
2.2.5	Ploché směrování	24
2.2.5.1	Řízená difúze	24
2.2.5.2	Sensor Protocols for Information via Negotiation	25
2.2.6	Opportunistic směrování	28
2.2.6.1	Extremely Opportunistic Routing	29
2.2.6.2	RSSI based opportunistic routing protocol for MWSN	32
2.2.6.3	Receiver-based Opportunistic Forwarding Protocol	34
2.2.7	Směrování po nejlepší cestě (Best Path Routing)	38
2.2.7.1	Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing	38

2.2.7.2	Location based Energy Efficient Intersection Routing protocol	41
2.2.8	Hierarchické směrování	43
2.2.8.1	Plošná hierarchie	43
2.2.8.2	Clusterová hierarchie	45
2.2.8.3	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy	45
2.2.8.4	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems	47
2.2.8.5	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network . .	48
2.2.8.6	Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol	49
2.3	Souhrn	50
3	Antény a přenos bezdrátového signálu	53
3.1	Antény	53
3.1.1	Parametry antén	53
3.1.1.1	Směrová a vyzařovací charakteristika antény	54
3.1.1.2	Všesměrová anténa	56
3.1.1.3	Směrovost	57
3.1.1.4	Účinnost antény	58
3.1.1.5	Zisk antény	58
3.1.1.6	Efektivní plocha antény	59
3.1.1.7	Vzdálená zóna	59
3.1.1.8	Šíření signálu ve volném prostoru	59
3.2	Anténní řady	61
3.2.1	Půlvlnný dipól	62
3.2.2	Anténní řada dvou dipólů	64
3.2.3	Senzorové anténní řady	68
3.2.4	Senzorová anténní řada v prostoru	71
3.3	Chytré antény	72
3.4	Anténní řady v senzorových sítích	73
3.5	Souhrn	73
4	Distribuované tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze	75

<i>OBSAH</i>	xi
4.1 Zařízení pro DPSBF	75
4.1.1 Provozní režimy zařízení pro DPSBF	78
4.2 Vyhledání optimální fáze	80
4.2.1 Hrubá síla	80
4.2.2 Optimální velikost kroku pro změnu fáze	85
4.2.3 Optimal algorithm for Phase Shift searching for the DPSBF	86
4.3 Optimalizace výběru uzlů pro DPSBF	90
4.3.1 Uzly ležící na konvexní obálce	91
4.3.2 Convex Hull Based Accelerated DPSBF	102
4.3.2.1 Zhodnocení složitosti	103
4.4 Souhrn	105
5 Závěr	107
5.1 Budoucí práce	108



Seznam obrázků

1.1	Senzor MICA2. Zdroj: [1]	5
1.2	Senzor G-Node G301. Zdroj: [2]	6
2.1	Příklad rozpínacích faktorů mezi dvěma uzly. Zdroj: [3] str. 84	15
2.2	Prázdné sousedství v okolí hrany. Zdroj: [3] str. 86	17
2.3	β -skeleton. Zdroj: [3] str. 89	18
2.4	Yao graf. Zdroj: [3] str. 89	19
2.5	Rozdělení směrovacích algoritmů pro bezdrátové sensorové sítě	21
2.6	Řízená difúze. Zdroj: [4]	25
2.7	Řízená difúze. Zdroj: [4]	26
2.8	Imploze. Zdroj: [5]	27
2.9	Překrytí. Zdroj: [5]	28
2.10	Protokol SPIN. Zdroj: [5]	29
2.11	Přenos s možností využití více mezilehlých uzlů. Zdroj: [6]	30
2.12	Přenos s možností využití více mezilehlých cest k cíli. Zdroj: [6]	30
2.13	Síť s uvedením pravděpodobnosti úspěšného předání zprávy na jednotlivých linkách. Zdroj: [6]	31
2.14	Síť s pravděpodobností úspěšného předání zprávy na jednotlivých linkách. Zdroj: [6]	32
2.15	Estimated Transmission Count (ETX) do uzlu E z jednotlivých uzlů v síti podle obrázku 2.14. Zdroj: [6]	33
2.16	Algoritmus OR-RSSI. Zdroj: [7]	35
2.17	ROF - nově pokrytý prostor. Zdroj: [8]	36
2.18	ROF - potlačení kolizí. Zdroj: [8]	37
2.19	AODV - vytvoření zpětné cesty. Zdroj: [9]	39
2.20	AODV - odstranění nadbytečných záznamů ze zpětné cesty. Zdroj: [9]	40
2.21	EELIR - vyhledání vhodných sousedů pro předání zprávy. Zdroj: [10]	42
2.22	RRP - alternativní cesty. Zdroj: [11]	44
2.23	RRP - zvolená a ochranná cesta. Zdroj: [11]	44
2.24	Clusterová hierarchie - třívrstvá architektura. Zdroj: [12]	46

2.25	LEACH. Zdroj: [13]	47
2.26	PEGASIS - vytváření řetězce stanic. Zdroj: [14]	48
2.27	TEEN - struktura sítě. Zdroj: [15]	49
3.1	Vyzařovací charakteristiky dipólů s různou délkou L . Vypočteno pomocí: [16]	55
3.2	Definice svazků (maxim) směrové antény. Zdroj: [17]	55
3.3	Vyzařovací charakteristika všesměrové (isotropní) antény	56
3.4	Vyzařovací charakteristika omnidirectional antény	57
3.5	Šíření signálu ve volném prostoru	60
3.6	Schéma anténní řady	62
3.7	Dipól umístěný v počátku souřadnic	63
3.8	Symetrická anténní řada se dvěma prvky	65
3.9	Symetrická anténní řada se dvěma prvky - vzdálená zóna	65
3.10	Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $d = 0.25 * \lambda, \beta = 0$.	67
3.11	Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $d = 0.25 * \lambda$ s různým fázovým posunem vstupního signálu.	68
3.12	Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $\beta = 0.5 * \lambda$ s různou vzdáleností mezi dipóly.	69
3.13	Anténní řada tvořená dvěma senzory T_1 a T_2	70
3.14	Antény umístěné ve 3D prostoru	71
4.1	Zapojení elektroniky senzoru umožňující kolaborativní distribuované tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze	77
4.2	Asymetrická sensorová síť se základnovou stanicí	86
4.3	Přijímaný výkon v závislosti na fázovém posunu vysílání dvou vysílačů při DPSBF	87
4.4	Pozice vhodných uzlů pro DPSBF	90
4.5	Případ uzlů vhodných pro DPSBF, které neleží na konvexní obálce	91
4.6	Popis pokusu pro zhodnocení hledání uzlů na konvexní obálce	91
4.7	Poměr počtu případů s existujícím řešením oproti celkovému počtu všech případů. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.	94
4.8	Poměr počtu uzlů na konvexní obálce k celkovému počtu uzlů	94

SEZNAM OBRÁZKŮ

xv

4.9	Poměr počtu nejlepších řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku počtu všech nejlepších řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	96
4.10	Poměr počtu řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku počtu všech řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	97
4.11	Poměr počtu nejlepších řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	98
4.12	Poměr počtu řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	99
4.13	Poměr kvality řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	100
4.14	Poměr kvality řešení s oběma uzly na konvexní obálce ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$. Zvětšená osa Quality.	100
4.15	Poměr kvality řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$	101
4.16	Poměr kvality řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$. Zvětšená osa Quality.	102

Seznam Zkratek

- AODV** Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. xiii, 38–41
- APTEEN** Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol. 49, 50
- ATF** Apply to Forward. 36, 37
- CHUBA-DPSBF** Convex Hull Based Accelerated DPSBF. 9, 102, 105, 107
- DPSBF** Distributed Phase Shift Beam Forming. iii, xi, xiv, 8–10, 75, 77–81, 83–88, 90, 91, 93, 95, 97, 99, 101–105, 107, 108
- EELIR** Location based Energy Efficient Intersection Routing protocol. xiii, 38, 41, 42
- ETX** Estimated Transmission Count. xiii, 32, 33
- ExOR** Extremely Opportunistic Routing. 28–31
- GG** Gabriel Graph. 16, 17, 19
- GPS** Global Positioning System. 3, 14, 23, 105
- GSM** Global System for Mobile Communications. iii
- LEACH** Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy. xiv, 45, 47, 48
- M-LEACH** Mobility LEACH. 45, 47
- MIMO** Multiple Input Multiple Output. 73, 75
- MISO** Multiple Input Single Output. 73, 75
- OP** Opportunity Probability. 32–34
- OPS-DPSBF** Optimal algorithm for Phase Shift searching for the DPSBF. 86, 105
- OR-RSSI** RSSI based opportunistic routing protocol for MWSN. xiii, 29, 34, 35
- PAGER-M** Partial-partition Avoiding Geographic Routing-Mobile. 38
- PEGASIS** Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems. xiv, 47, 48
- RNG** Relative Neighborhood Graph. 17, 19

- ROF** Receiver-based Opportunistic Forwarding protocol. xiii, 29, 34, 36–38
- RRP** Robust cooperative Routing Protocol. xiii, 43–45
- RSSI** Received Signal Strength Indicator. 33, 82
- SIMO** Single Input Multiple Output. 72, 75
- SISO** Single Input Single Output. 72
- SPIN** Sensor Protocols for Information via Negotiation. xiii, 24, 25, 28, 29
- TDMA** Time Division Multiple Access. 45, 46, 50
- TEEN** Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network. 48–50
- YG** Yao Graph. 19, 20

Kapitola 1

Úvod

Senzorové sítě jsou sítě složené z mnoha malých modulů (senzorů). Tyto sítě umožňují měření různých veličin a sběr dat z velkých geografických prostorů po velmi dlouhou dobu. Klesající cena senzorů umožňuje vytvářet senzorové sítě se stovkami až tisíci senzorů. Využití senzorových sítí je možné v celé řadě oblastí. Příkladem mohou být aplikace ve zdravotnictví, sledování dějů v přírodě, aplikace chytrých domácností, armádní aplikace a aplikace v průmyslových provozech. Požadavky kladené na senzorové sítě se liší podle aplikací, pro které jsou určeny. Můžeme však definovat některé společné požadavky:

- tolerance proti výpadkům. V senzorových sítích je potřeba počítat s častými výpadky senzorů ať již z důvodu poruchy nebo vybití baterie. Po těchto výpadcích je potřeba, aby ostatní moduly převzaly úlohu nefunkčního modulu.
- škálovatelnost. S klesající cenou modulů je možné vytvářet sítě s řádově tisícovkami modulů. Použitá řešení musí být připravena na takovéto množství modulů.
- jednoduchost. I přes klesající cenu elektronických zařízení mají použité senzory relativně malý výpočetní výkon (například vzhledem k požadavku nízké spotřeby). Použitá řešení by proto měla být co nejjednodušší.
- dynamičnost. Senzorové sítě musí reagovat na změny topologie sítě.
- autonomnost. Při provozu senzorových sítí je často složité až nemožné provádět administrativní operace nad jednotlivými moduly, či celou senzorovou sítí. Senzorová síť by tedy měla fungovat co nejvíce autonomně.

Některé výše uvedené požadavky mohou být podle použité aplikace důležitější, jindy méně důležité. Například pokud je aplikace určena pro desítky senzorů, nemusíme se tolik zaměřovat na škálovatelnost řešení. V některých případech jsou senzory umístěny staticky a pak není potřeba sledovat dynamičnost systému.

1.1 Reálné aplikace sensorových sítí

Jak bylo výše zmíněno, aplikace sensorových sítí se objevují v oblastech sledování životního prostředí, ve zdravotnictví, v armádních aplikacích, v průmyslových provozech a mnoha dalších oblastech. Sensorové sítě mají možnost proniknout i do momentálně velmi sledovaných oblastí chytrých domácností (SmartHome), nositelné elektroniky (SmartWearables) a internetu věcí (Internet of Things).

1.1.1 Sledování životního prostředí

Při sledování životního prostředí se můžeme zaměřit na sledování živočichů, sledování parametrů životního prostředí (např. sledování kvality ovzduší či vodních zdrojů) či varování před živelnými katastrofami jako jsou lesní požáry, zemětřesení nebo tsunami. Sledování chování živočichů může být řešeno přímým pozorováním živočichů pomocí pozorovatelů či automatických kamer. Tah ptáků je možné sledovat díky označení ptáků kroužky a při dalším odchycení daného jedince odborníci určí jeho přibližný pohyb. Tyto metody sledování mají bohužel malé časové a prostorové rozlišení. Při sledování pohybu ptáků umíme určit pouze čas a polohu daného odchytu. Pohyb sledovaného subjektu mezi těmito body můžeme pouze odhadovat. Snímání živočichů kamerou se omezuje pouze na místo, kde je kamera umístěná.

V praxi využívané umístění kamery na sledované zvíře má omezení v potřebné velikosti zařízení a nemožnosti jednoduše získat data ze záznamového zařízení. Zde by odpovědi mohly být právě sensorové sítě.

Nejnámější (a jednou z prvních) aplikací sensorových sítí je projekt Great Duck Island [18]. Projekt byl určen ke sledování mikroklimatu v hnízdech buřňáčků malých. V květnu 2002 byla vytvořena síť 14 senzorů. Tyto senzory předávaly data (teplota, tlak, vlhkost) do základnové stanice a poté přecházely do spánku. Během roku 2002 bylo sesbíráno více než milion záznamů. Sensorová síť se postupně rozrůstala na přibližně 100 senzorů na konci roku 2003. Senzory byly vytvořeny na platformě MICA Motes [19] s operačním systémem TinyOS [20]. Předávání dat do základnové stanice je realizováno posíláním přes prostředníky. Sensorová síť je v tomto případě předkonfigurovaná a schází jí funkce autokonfigurace.

Další reálnou aplikací je projekt sledování migračních přesunů zeber – ZebraNet [21]. Na rozdíl od předchozího projektu jsou v tomto případě senzory mobilní (senzor je umístěn v obojku na krku zvířete). Z toho plyne i nutnost dynamického umístění zá-

1.1. REÁLNÉ APLIKACE SENZOROVÝCH SÍTÍ

3

kladnových stanic. Základnové stanice jsou v tomto případě umístěny na terénních automobilech, které se v okamžiku odečtu přiblíží ke stádu. Senzory projektu ZebraNet měří kondici zvířete (teplotu, srdeční tep, frekvenci krmení) a data pro sledování migrace (GPS souřadnice). Protože je složité přečíst data od všech monitorovaných zvířat, autoři ZebraNet zvolili model předávání dat s prostředníkem. Pokaždé, když se dvě monitorovaná zvířata přiblíží na komunikační vzdálenost, předají si senzory navzájem svá naměřená data. Každý senzor tedy obsahuje svá vlastní data a data všech zvířat, se kterými se dostal v poslední době na komunikační vzdálenost. V ideálním případě pak pro přečtení dat všech zvířat stačí provést odečet z jediného senzoru. Senzory jsou pro komunikaci vybaveny dvěma bezdrátovými moduly. Jeden umožňuje komunikaci na krátkou a jeden na dlouhou vzdálenost.

1.1.2 Zdravotní péče

V nemocnicích se každý den používá velké množství senzorů monitorujících řadu životních funkcí pacientů. Pokud budou tyto senzory připojeny bezdrátově, umožní lepší mobilitu pacientů a zlepší tím jejich životní podmínky. Jedním z projektů využívajících senzorové bezdrátové sítě je CodeBlue [22]. Tento projekt se snaží zjednodušit předání pacienta z místa nehody do nemocnice. Pacient je na místě nehody vybaven senzorem monitorujícím frekvenci srdečního tepu, kyslíkovou saturaci a další parametry. Po příjezdu do nemocnice má lékař k dispozici data jednotlivých pacientů, ale může být také upozorněn na tísňové stavy. CodeBlue je založeno na senzorech MICA2 Motes [1] a vytváří ad-hoc síť. Tato síť obsahuje jak senzory, tak i osobní počítače a PDA sester a lékařů. Síť umožňuje vytváření geograficky rozlehlého propojení s malým počtem prvků. Zajímavě je v této síti řešeno zabezpečení. Pokud prvky naleznou bezpečnostní autoritu (např. PC lékaře), vytvoří zabezpečený kanál. Pokud tuto autoritu nenaleznou, probíhá komunikace nezabezpečeně. Takto se zajistí předávání dat i v místě nehody, kde nemusí být možné vytvořit zabezpečené spojení.

1.1.3 Vojenské aplikace

Použití senzorových sítí ve vojenských aplikacích má široké možnosti. Jednou možností může být zabezpečení hlídaného prostoru. Další možností použití je průzkum neznámé oblasti. V prvním případě umístíme senzory podle předem připraveného schématu, v druhém můžeme senzory shodit z letadla. V obou případech je velkou výhodou použití senzorové bezdrátové sítě pro komunikaci. Předávání dat mezi blízkými sousedy umožňuje snížit energii potřebnou k přenosu a tím snížit riziko objevení senzorů ne-

přítelem. Speciálním případem jsou stále častěji využívané mobilní senzory (pozemní, vzdušné, hladinové i podvodní).

Zajímavou aplikací je systém PinPtr [23]. Tento systém umožňuje zaměření ostřelovačů pomocí akustického měření. Systém je tvořen velkým množstvím senzorů MICA2 Motes vytvářejících sensorovou bezdrátovou síť. Tato síť propojuje senzory se základnovou stanicí, která zároveň slouží jako rozhraní pro obsluhu. PinPtr umožňuje zaměření ostřelovače s přesností 1m během 2s od výstřelu. Zajímavostí systému PinPtr je potřeba přesné časové synchronizace, přesné lokace polohy jednotlivých senzorů a předcházení zahlcení sítě. Přesná časová synchronizace a přesná lokalizace polohy je nutná pro výpočet přesné polohy střelce. Při předcházení zahlcení sítě je potřeba si uvědomit, že senzory síť využívají nárazově. Bezprostředně po výstřelu se všechny senzory snaží předat informace základnové stanici a tím mohou zahltnit síť.

Bylo by možné představovat další projekty z oblastí chytrých domácností, průmyslových aplikací apod., ale předchozí výčet ukazuje základní vlastnosti a požadavky reálných aplikací sensorových bezdrátových sítí.

1.2 Hardware pro sensorové sítě

Pro vytváření sensorových sítí je potřeba mít k dispozici vhodnou hardwarovou platformu. Hardware vhodný pro sensorové sítě má řadu požadavků, které nebývají zcela běžné. Asi nejpodstatnějším požadavkem je dlouhá výdrž provozu na baterie, tudíž nízká energetická spotřeba zařízení. Dalšími požadavky jsou: snadné připojení nejrůznějších senzorů, odolnost proti povětrnostním vlivům a schopnost bezdrátové komunikace. Výpočetní výkon může být poměrně nízký. Nízká energetická spotřeba je často dosahována uspáváním zařízení, což musí být zohledněno v některých algoritmech.

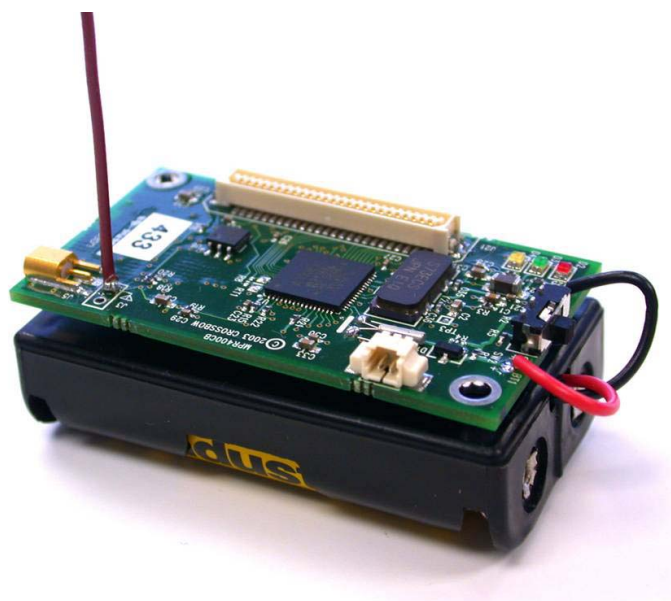
Platformy pro sensorové sítě se neustále vyvíjí, uvádím proto některá starší i současná zařízení.

Z originálního návrhu UC Berkeley vznikly komerční produkty Crossbow Mica [24], Mica2 [25] (obr. 1.1) a MicaZ [26]. Další produkty této firmy jsou Cricket [27], Imote2 [28] a IRIS [29]. Opět podle návrhu UC Berkeley TelosB vznikly komerční modifikace TelosB (Crossbow, USA) [30], Tmote Sky (Moteiv, USA) [31] a TIP700CM (Maxfor, Korea) [32].

Dalšími výzkumnými projekty jsou: BTnode (ETH Zurich) [33], XYZ (Yale University) [34], Modular Sensor Board (MSB-A2) (Freie Universität Berlin) [35].

1.2. HARDWARE PRO SENZOROVÉ SÍTĚ

5



Obrázek 1.1: Senzor MICA2. Zdroj: [1]

Komerční produkty: iDwaRF (NodeBoard) [36], Worldsens (WSN430) [37], kompletní řešení SmartMesh (Linear Technology’s Dust Networks) [38] a G-Node G301 SOWNet technologies [2] (obr. 1.2).

V této kapitole je uveden jen velmi omezený výčet zařízení. Povšimněte si velmi omezené paměti uvedených senzorů. Pro program je dostupná paměť o velikosti 128 KB a RAM je omezená na 8 KB. Zajímavý je také proudový odběr v uspaném módu 15-2 μA a 25-100 mA v běžném provozu. Výrobci udávají dobu provozu na jednu sadu baterií až 10 let. Například pro senzor WeeBee výrobce udává dobu použití 1 rok při odečtu vzorků 1/min; 2 roky při odečtu vzorků 1/2 min; 6 let při odečtu vzorků 1/3 min. Pro dosažení takové doby provozu je nutné využívat uspávání senzoru. Komunikační rychlosti senzorů jsou řádově desítky až stovky kbps. Parametry vybraných senzorů jsou shrnuty v tabulce 1.1.



Obrázek 1.2: Senzor G-Node G301. Zdroj: [2]

1.2. HARDWARE PRO SENZOROVÉ SÍŤE

7

Tabulka 1.1: Parametry vybraných senzorů

	TelosB	MICA2	IRIS	MICAZ	G-Node G301
CPU	TPR2420CA	MPR400CB	XM2110CB	MPR2400CA	TI MSP430F2418
Program FLASH	48 KB	128 KB	128 KB	128 KB	116 KB
RAM	10 KB	4KB	8 KB	4KB	8 KB
FLASH	1024 KB measurement serial flash + 16 KB config flash	512 KB measurement serial flash + 4 KB config flash	512 KB measurement serial flash + 4 KB config flash	512 KB measurement serial flash + 4 KB config flash	256 B int. + 8 Mbit ext.
Sleep current	5.1 μ A	< 15 μ A	8 μ A	< 15 μ A	2 μ A
Active current	1.8 mA + 23 mA Receive mode	8 mA + 27 mA Transmit with maximum power; 10 mA Receive	8 mA + 16 mA Receive mode; 10 mA TX, -17 dBm; 13 mA TX, -3 dBm; 17 mA TX, 3 dBm	8 mA + 19.7 mA Receive mode; 11 mA TX, -10 dBm; 14 mA TX, -5 dBm; 17.4 mA TX, 0 dBm	35 mA (node) + 70mA (I/O)
Frequency band	2400-2483.5 MHz	868/916 MHz	2405-2480 MHz	2400-2483.5 MHz	300-348 MHz, 387-464 MHz and 779-928 MHz
Transmit data rate	250 kbps	38.4 Kbaud	250 kbps	250 kbps	0.8kbps up to 500 kbps
Power Supply	battery 2X AA Attached pack	battery 2X AA Attached pack; 2.7 – 3.3 V Connector provided	battery 2X AA Attached pack; 2.7 – 3.3 V Molex connector provided	battery 2X AA Attached pack; 2.7 – 3.3 V Molex connector provided	Battery connector for 1.8-3.6V input

1.3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je optimalizace (vylepšení funkcí) komunikace v senzorních bezdrátových sítích. Mezi parametry, které je možné optimalizovat, patří zlepšení energetické bilance sítě a zlepšení souvislosti sítě. Z disertační práce Alexandru Mouchy [39] vyplývá výhodnost použití DPSBF (kap. 4) v senzorních bezdrátových sítích. Byly vytyčeny následující pracovní hypotézy.

Pracovní hypotéza 1: Při použití směrových antén je možné zacílit vyzářenou energii při bezdrátovém přenosu na přijímač. Jelikož není energie vyzařována do ostatních směrů, je možné pro přenos snížit vysílací výkon a tím šetřit energetický zdroj. Pokud je DPSBF schopné vytvářet směrové vysílání, je možné jeho pomocí zlepšit energetickou bilanci bezdrátové sítě.

Pracovní hypotéza 2: Pokud je vyzářená energie soustředěna pomocí směrové antény do vhodného směru, je možné při stejné celkové vyzářené energii překlenout větší vzdálenost, než při použití všesměrové antény. Zvýší-li se celková vyzářená energie, dojde ke zvětšení komunikační vzdálenosti bez ohledu na typ použité antény. DPSBF umožňuje vytvářet směrové vysílání i sdružovat energii pro vysílání ze dvou a více senzorů. Mělo by tedy dojít ke zvětšení komunikačního dosahu a tím i ke zvýšení souvislosti sítě.

Pokud se hypotézy výhodnosti použití DPSBF potvrdí, bude vhodné zaměřit se na vylepšení vyhledávání optimálního fázového posunu pro DPSBF a vylepšení vyhledání senzorů, které se komunikace pomocí DPSBF budou účastnit. Byly tedy vytyčeny další pracovní hypotézy.

Pracovní hypotéza 3: Pokud se při plynulé změně fázového posunu v anténní řadě (kap. 3.2.2) nemění vyzářený výkon v určitém směru skokově, je možné vyhledávat optimální posun fáze lepším způsobem, než lineárním procházením celého stavového prostoru. Jednou možností by mohlo být vyhledávání optimálního posunu fáze binárním půlením.

Pracovní hypotéza 4: Z pohledu energetické výhodnosti je vhodné volit komunikaci na nejmenší možnou vzdálenost. Pokud existují dvě oblasti pokryté senzory, s velkou pravděpodobností se dvojice nejbližších senzorů zvolených z obou oblastí bude nacházet na okraji těchto oblastí. Pro vysílání pomocí DPSBF je tedy vhodné volit uzly na okraji pokryté oblasti.

Dílejšími cíli disertační práce jsou: ověření pracovních hypotéz, návrh algoritmů vylepšujících nastavování komunikace pomocí DPSBF a zhodnocení těchto algoritmů.

1.4 Použité metody a postup řešení

Při řešení práce je každá oblast teoreticky zhodnocena. Z tohoto zhodnocení jsou vytvořeny předpoklady, které jsou poté potvrzeny či vyvráceny. Pro potvrzení předpokladů jsou použity především simulační metody. Součástí řešení je i návrh algoritmů a zařízení realizujících požadované funkce.

Práce je rozdělena do následujících částí:

- V rámci úvodu do problematiky bezdrátových sensorových sítí popisuje kapitola 1.1 různé aplikace sensorových bezdrátových sítí a hardware používaný v těchto sítích.
- Pokračováním uvedení do problematiky bezdrátových sensorových sítí je kapitola 2. Tato kapitola se v podkapitole 2.1 zaměřuje na popis nastavení topologie (topology control) a v podkapitole 2.2 na směrování v bezdrátových sensorových sítích.
- Důležitým teoretickým základem je popis šíření bezdrátového signálu a antén v kapitole 3. Součástí této kapitoly je popis anténních řad v podkapitole 3.2. Tato kapitola také poskytuje nezbytné vzorce pro výpočty vlastností anténních řad.
- Klíčovou částí práce je kapitola 4, která se zabývá popisem distribuovaného tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze (Distributed Phase Shift Beam Forming (DPSBF)). Součástí této kapitoly je podkapitola 4.1 popisující zařízení vhodné pro DPSBF. Dále se tato kapitola zabývá algoritmem umožňujícím vyhledání vhodné skupiny uzlů a vzájemného posunu fází (podkapitola 4.2) a jeho optimalizací. V kapitole 4.3.1 je zhodnocena vhodnost vyhledání uzlů účastnících se komunikace pomocí DPSBF na konvexní obálce clusteru. Poznatky získané v této kapitole jsou použity při návrhu nového algoritmu Convex Hull Based Accelerated DPSBF (CHUBA-DPSBF), který je popsán a zhodnocen v kapitole 4.3.2.
- Závěrečné zhodnocení je uvedeno v kapitole 5, spolu s naznačením možností směrování budoucího výzkumu.

Řešení práce probíhalo v následujících krocích: Nejprve byla provedena rešerše problematiky a studium disertační práce Alexandru Mouchy [39], na kterou tato práce volně navazuje. Dále byly vytyčeny cíle disertační práce a formulovány hypotézy. Následoval teoretický rozbor vlastností přenosu bezdrátového signálu, teoretický rozbor vlastností antén a anténních řad. Výsledkem tohoto rozboru je vytvoření modelu cho-

vání anténních řad, který částečně opravuje předchozí model. Tento model potvrdil pracovní hypotézu 1 a pracovní hypotézu 2. Dále byl tento model využit v simulacích prováděných v rámci této práce.

Po potvrzení prvních dvou pracovních hypotéz se práce zaměřila na vylepšení použití DPSBF v bezdrátových sensorových sítích. Nejprve bylo popsáno zařízení umožňující komunikaci pomocí DPSBF a byl formulován základní algoritmus pro vytvoření DPSBF spoje. Návrh výše zmíněného zařízení a základní algoritmus jsou výsledkem společné práce autora disertační práce, Alexandru Mouchy a Viktora Černého, a autor disertační práce v ní nemá převažující podíl. Základní algoritmus byl zhodnocen a bylo navrženo několik jeho vylepšení. Prvním vylepšením je návrh vytváření DPSBF spoje ve dvou clusterech paralelně. Toto vylepšení není podepřeno žádnou hypotézou a vzniklo vlastně jen mimochodem při analýze základního algoritmu.

V dalším kroku byla prověřena pracovní hypotéza 3. Po jejím ověření byl navržen algoritmus umožňující nalézt optimální fázový posun pomocí metody podobné binárnímu půlení. Tento algoritmus byl poté zhodnocen.

Následovalo ověření pracovní hypotézy 4. Při ověřování byl zvolen okraj oblasti definovaný jako konvexní obálka pokryté oblasti. Výsledkem ověření pracovní hypotézy 4 je její částečné potvrzení. Výsledky získané z výše zmíněného ověření pracovní hypotézy byly natolik kvalitní, že bylo rozhodnuto o zapracování pracovní hypotézy do nově navrženého algoritmu. Vzniklý algoritmus byl opět zhodnocen.

Všechny výsledky byly shrnuty v závěru a byly navrženy další směry výzkumu.

Kapitola 2

Senzorové a ad-hoc bezdrátové sítě

Tato kapitola obsahuje úvod do problematiky senzorových a ad-hoc bezdrátových sítí a popisuje stávající výzkum v této oblasti. V první části si popíšeme senzorové a ad-hoc sítě. Ve druhé části popíšeme metody pro nastavení topologie (topology control). Třetí část obsahuje popis směrovacích algoritmů používaných v senzorových bezdrátových sítích.

Senzorové sítě jsou tvořeny desítkami až desítkami tisíc senzorů. Pokud požadujeme, aby senzory mohly komunikovat, je z praktických důvodů výhodné použít bezdrátovou komunikaci. Oproti běžným bezdrátovým sítím je v senzorových bezdrátových sítích největší rozdíl v zařízeních, která takové sítě tvoří. U běžných sítí očekáváme využití zařízení s velkým výpočetním výkonem a s relativně neomezeným zdrojem energie. Typickým příkladem jsou sítě tvořené notebooky nebo mobilními telefony se základnovými stanicemi. Senzorové sítě jsou tvořeny jednoduchými zařízeními, která mají omezený výpočetní výkon, omezenou paměť a především omezený zdroj energie, který by měl umožnit dlouhodobé používání zařízení bez doplnění energie. Hlavním úkolem senzorů je měření různých fyzikálních veličin a předání výsledků měření k dalšímu zpracování.

Běžné bezdrátové sítě často využívají předem připravený model komunikace. Příkladem je komunikace notebooků pomocí access pointu, nebo komunikace mobilních telefonů prostřednictvím základnových stanic a infrastruktury mobilního operátora. Pokud tato struktura není předem připravena a vytváří se až při vzniku požadavku na komunikaci, hovoříme o **ad-hoc** sítích. Ad-hoc sítě jsou tedy decentralizované, samoorganizující se sítě bez pevné infrastruktury. Každý uzel v ad-hoc síti je vybaven přijímačem a vysílačem a může zprostředkovat komunikaci mezi jinými uzly.

Ad-hoc sítě mohou být různých typů, například:

- mobilní nebo fixní,
- zabezpečené nebo nezabezpečené,
- homogenní (všechny uzly jsou identické) nebo heterogenní (uzly jsou různých typů),

- s omezeným zdrojem energie, s dobíjením, nebo s neomezeným zdrojem energie,
- v jedné rovině (2D) nebo v prostoru (3D),
- clusterové nebo neclusterové sítě.

Tato práce se zaměřuje na ad-hoc sensorové sítě se senzory umístěnými v jedné rovině (2D). Uvažujeme, že všechny senzory mají fixní umístění a omezený zdroj energie. Sítě mohou být clusterové i neclusterové a homogenní i heterogenní.

Pro potřeby této práce dále uvažujeme, že senzory (uzly bezdrátové sítě) jsou tvořeny čtyřmi klíčovými částmi. První částí je komunikační modul, který zajišťuje příjem a odesílání informací a obsahuje rádiový transceiver a anténu. Druhou částí je výpočetní modul určený pro interní výpočty a řízení komunikace, který obsahuje procesor a paměť. Třetí částí jsou senzory umožňující měření různých fyzikálních veličin (teplota, zvuk, vlhkost, pozice atp.). Sensorovou částí se tato práce vůbec nezabývá. Poslední částí je zdroj energie napájející předchozí tři části. Tento zdroj energie je typicky baterie s omezeným množstvím energie.

V následující kapitole si uvedeme metody pro nastavení topologie v sensorových bezdrátových sítích.

2.1 Nastavení topologie (Topology Control)

V typické sensorové síti mohou navzájem komunikovat všechny uzly, které jsou v komunikační vzdálenosti. V extrémním případě, kdy všechny uzly leží navzájem v komunikační vzdálenosti, tvoří model sítě úplný graf. Tento případ na první pohled vypadá jako ideální, jelikož komunikace mezi libovolnými uzly probíhá vždy přímo. Dále je úplný graf velmi odolný proti výpadkům uzlů i linek. Paradoxně je však takováto síť v praxi špatně použitelná. Problémem je velká interference při komunikaci různých dvojic uzlů. Při bezdrátové komunikaci může být komunikace přímo mezi dvěma uzly méně energeticky výhodná, než komunikace provedená přes jednoho či více prostředníků. Pokud chceme zjednodušit komunikační graf, můžeme využít právě metody nastavení topologie.

Výstupem algoritmů nastavení topologie je obvykle zmenšení počtu komunikačních linek, což může zjednodušit a zrychlit směrovací algoritmy. V případě sensorových bezdrátových sítí můžeme využít možnosti měnit vysílací výkon jednotlivých modulů a tím vlastně používat jednotlivé dostupné spoje a minimalizovat ovlivnění ostatních komunikačních spojů.

Algoritmy pro nastavení topologie mohou vycházet z úplné znalosti sítě. Takové al-

2.1. NASTAVENÍ TOPOLOGIE (TOPOLOGY CONTROL)

13

goritmy označujeme jako centralizované. Centralizované algoritmy nejdříve sesbírají informaci o propojení sítě a umístění jednotlivých uzlů do jednoho uzlu. Tento uzel potom vypočte optimální topologii a tu následně odešle všem ostatním uzlům. Druhým typem algoritmů pro nastavení topologie jsou algoritmy využívající pouze lokální informaci o síti. Tyto algoritmy využívají pouze informace z bezprostředního okolí daného uzlu. Bezprostřední okolí daného uzlu jsou uzly vzdálené nejvýše k přeskoků, kde k je konstantní. Ve většině případů volíme $k = 1$ nebo $k = 2$. Většinou dáváme přednost algoritmům pracujícím s lokální informací.

Výsledkem činnosti algoritmu nastavení topologie by měla být taková topologie, která umožňuje efektivní směrování v síti a vylepšuje celkový výkon sítě. V případě senzorových bezdrátových sítí je vzhledem k omezené energii důležitým kritériem ušetření energie při komunikaci.

Základem pro činnost topologických algoritmů je neorientovaný graf $G = (V, E)$, kde množina vrcholů V odpovídá uzlům sensorové sítě a množina hran E odpovídá spojům v sensorové síti. Hrana (u, v) mezi uzly u a v bude existovat za předpokladu, že uzly u a v jsou navzájem v komunikační vzdálenosti.

V případě, že uzly mohou mít různý vysílací výkon, může jeden uzel ležet v komunikační vzdálenosti od druhého, ale opačně to platit nemusí. Výsledkem bude orientovaný graf.

Mějme graf $G = (V, E)$, výsledkem nastavení topologie je podgraf $G' = (V, E')$ kde $E' \subset E$ a $G' \subset G$. G' umožní energeticky výhodné směrování, zvýší životnost sítě a zlepší její výkon podle zvolených parametrů.

Pro měření energetické výhodnosti zavedeme váhu hrany jako hodnotu $w(e)$, $e \in E$. Tato hodnota značí energetickou náročnost přenosu informace přes hranu e . Energetická náročnost přenosu informace mezi dvěma uzly u a v je součtem energetických náročností přenosu informace po jednotlivých hranách na cestě mezi u a v .

Hodnota hrany $w(e)$ může být udávána buď jako jednotková, jako euklidovská vzdálenost mezi uzly, či jako energetická náročnost přenosu informace po hraně. Energetická náročnost je dána vzdáleností mezi uzly a útlumovým koeficientem a , pro který typicky platí $2 \leq a \leq 5$. Hodnota hrany e mezi uzly u a v je potom:

- $w_{link}(e) = 1$ pro jednotkovou váhu,
- $w_{dist}(e) = dist(u, v)$ pro váhu udanou euklidovskou vzdáleností,
- $w_{energy}(e) = dist(u, v)^a$ pro váhu udávající energetickou náročnost přenosu a platí, že $a > 1$ a typicky $2 \leq a \leq 5$.

Pro možnost zjištění euklidovské vzdálenosti předpokládáme umístění modulů v euklidovském 2D či 3D prostoru. Pokud jsou moduly umístěné v euklidovském prostoru, každý modul má své souřadnice. Některé algoritmy vyžadují znalost těchto souřadnic. Aby moduly souřadnice znaly, musely by být rozmístěny na předem známá místa, nebo by moduly musely být opatřeny lokalizační technologií, např. Global Positioning System (GPS). Některé algoritmy znalost souřadnic nevyžadují a spokojí se s relativní vzdáleností a směrem k sousedním modulům, nebo pouze s relativní vzdáleností k ostatním modulům.

Existují i algoritmy, které nevyžadují pro svou funkci žádnou informaci o souřadnicích, vzdálenosti či směru.

Pro ohodnocení kvality algoritmů pro nastavení topologie musíme určit kvalitativní kritéria vzniklých topologií.

2.1.1 Kvalitativní kritéria síťových topologií

Spojitosť (Connectivity). Toto kritérium je základním kritériem síťové topologie. Graf G je spojitý, pokud mezi libovolnými dvěma uzly u a v , $u, v \in V$ existuje cesta. Přísnějším kritériem je k -vrcholová či k -hranová souvislost. Graf G je k -vrcholově (k -hranově) souvislý, jestliže je nutné odebrat nejméně k vrcholů (k hran), aby graf přestal být souvislý. Jelikož výsledné topologie mají menší počet hran, je logickým požadavkem sledovat souvislost nově vzniklého grafu. Sledování k -vrcholové (k -hranové) souvislosti je důležité z pohledu odolnosti nově vzniklé topologie proti možným výpadkům. Požadavek na algoritmy nastavení topologie může být:

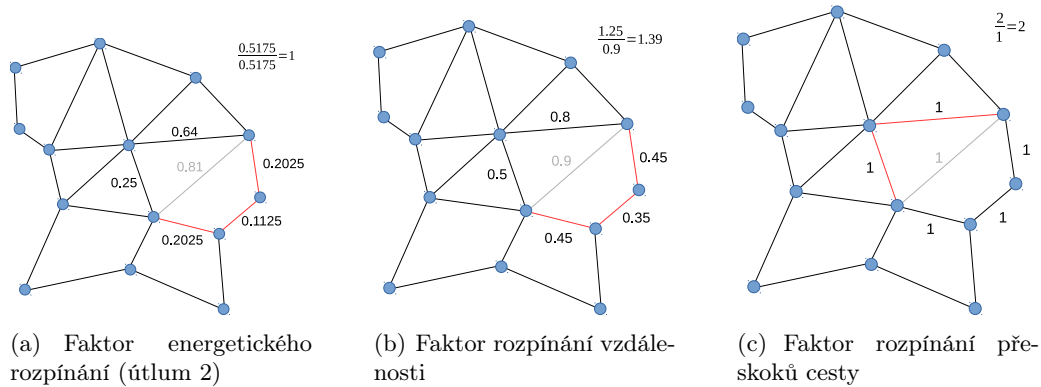
- pokud byl graf G souvislý, musí být graf G' také souvislý,
- pokud byl graf G k -vrcholově (k -hranově) souvislý, musí být graf G' také k -vrcholově (k -hranově) souvislý.

Rozpínací faktor (Stretch factor). Hlavním cílem algoritmů pro nastavení topologie je zvýšení životnosti sítě nalezením energeticky efektivní síťové topologie. Odebráním některých hran však může dojít ke zhoršení parametrů některých cest. Toto zhoršení měří faktor rozpínání. Faktor rozpínání definujeme jako nejvyšší poměr mezi hodnotou minimální cesty mezi všemi uzly grafu v původním grafu G a novém grafu G' .

Rozpínací faktor je dán vztahem 2.1

$$\max_{u,v \in V} \frac{E_{G'}(u,v)}{E_G(u,v)} \quad (2.1)$$

2.1. NASTAVENÍ TOPOLOGIE (TOPOLOGY CONTROL)



Obrázek 2.1: Příklad rozpínacích faktorů mezi dvěma uzly. Zdroj: [3] str. 84

kde $E_G(u, v)$ je minimální energie cesty mezi uzly u a v v původním grafu G a $E_{G'}(u, v)$ je minimální energie cesty mezi uzly u a v v nově vzniklém grafu G' .

V našem případě rozlišujeme faktor energetického rozpínání, faktor rozpínání vzdálenosti a faktor rozpínání počtu přeskoků cesty. Jednotlivé faktory jsou zřejmé z obrázku 2.1.

Pokud je útlumový koeficient větší než 1, pak v euklidovském prostoru platí: pokud je faktor rozpínání vzdáleností konstantní, je i faktor energetického rozpínání konstantní. Má-li podgraf G' grafu G konstantní faktor rozpínání vzdálenosti, pak podgraf G' označujeme jako spanner grafu G . Spanner je podgraf G' grafu G , ve kterém má vzdálenost mezi libovolnými dvěma uzly podgrafu G' konstantní faktor rozpínání vzdálenosti oproti grafu G .

Symetrie (Symmetry). Řada algoritmů v bezdrátových senzorových sítích očekává symetrickou komunikační síť. Pokud existuje hrana mezi uzly u a v , musí existovat i hrana mezi uzly v a u . Nově vzniklý podgraf G' je tedy neorientovaný.

Řídkost (Sparseness). Výsledkem činnosti algoritmů nastavení topologie je odebrání některých hran původního grafu. Výsledný graf na první pohled vypadá jako řídkší než původní graf. Pokud je stupeň grafu konstantní, pak počet hran souvisí lineárně s počtem vrcholů. V řídkých grafech je činnost směrovacích algoritmů jednodušší a časově a výpočetně efektivnější. Často mají řídké grafy menší k -souvislost a tím i menší odolnost proti výpadkům.

Interference. Interference vzniká při příjmu zprávy, pokud příjemce nemůže přijmout zprávu z důvodu rušení vysíláním jiných uzlů.

Planarita (Planarity). Graf G je planární, pokud při umístění uzlů v ploše neexistují hrany, které se kříží. Graf je planární právě tehdy, když lze sestavit jeho diagram v rovině takovým způsobem, že žádné dvě hrany nemají kromě svých krajních uzlů žádné společné body. Některé algoritmy vyžadují pro svoji činnost planární grafy.

Adaptabilita (Adaptability). Adaptabilitu můžeme měřit jako maximální počet uzlů, které musí změnit svou topologickou informaci z důvodu změny polohy nějakého uzlu. Algoritmy využívající lokální informace mají vysokou adaptabilitu, protože při změně polohy uzlu se přepočítává topologická informace pouze v sousedech daného uzlu. Adaptabilita odráží schopnost algoritmu nastavení topologie rychle reagovat na změny topologie.

Propustnost (Throughput). Výsledkem činnosti algoritmů pro nastavení topologie by měla být topologie s maximální propustností mezi libovolnými uzly. V některých případech můžeme tento požadavek omezit na maximální propustnost mezi vybranými uzly. Tento případ může nastat například při požadavku přesunu výsledků od všech uzlů k jednomu zvolenému uzlu.

Důležitost výše uvedených kritérií se může lišit podle zvolené aplikace.

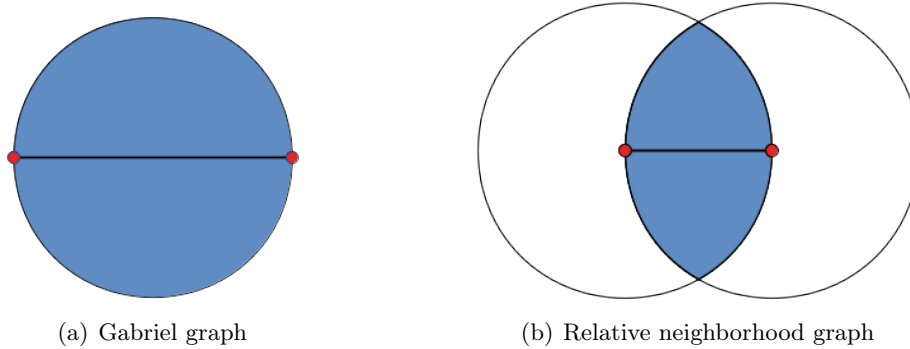
2.1.2 Algoritmy pro nastavení topologie

Uveďme si typické představitele algoritmů pro nastavení topologie. V senzorových bezdrátových sítích je složité získat kompletní informace o celé síti. Zaměříme se tedy na algoritmy využívající lokální informace.

Jak bylo uvedeno výše, algoritmy pro nastavení topologie využívající lokální informace vycházejí z informací získaných od sousedů s maximální vzdáleností k přeskoků. V praxi se nejčastěji objevují algoritmy s velikostí k jedna nebo dvě, tedy informace pouze z bezprostředních sousedů, nebo ze sousedů bezprostředních sousedů. Většinou uvažujeme uzly rozmístěné v dvoudimenzionálním euklidovském prostoru \mathbb{R}^2 .

2.1.2.1 Grafy s prázdnou množinou sousedů

Jedním z představitelů tohoto typu algoritmů jsou **Gabriel Graph (GG)** [3] str. 86. Gabrielovy grafy jsou konstruovány podle následujícího předpisu. Mějme množinu vrcholů V , dva vrcholy jsou propojeny hranou právě tehdy, pokud v kruhu s průměrem vzdálenosti těchto vrcholů a opisujícím tyto vrcholy neleží jiný vrchol. Tento požadavek je možné zapsat: hrana e mezi vrcholy u a v $e(u, v)$ existuje, pokud neexistuje vrchol w , pro který platí nerovnice 2.2.



Obrázek 2.2: Prázdné sousedství v okolí hrany. Zdroj: [3] str. 86

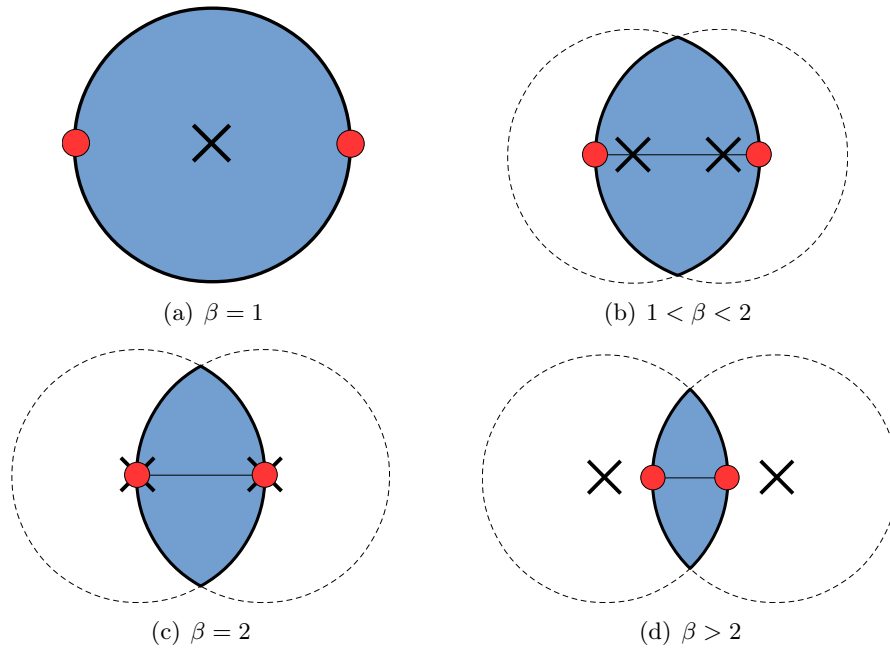
$$d(u, w)^2 + d(w, v)^2 \leq d(u, v)^2 \quad (2.2)$$

Gabrielův graf je souvislý, neorientovaný, řídký a planární. Faktor rozpínání vzdálenosti je $\sqrt{n-1}$, kde n je počet uzlů grafu G a platí, že $n = |V|$, má optimální faktor energetického rozpínání ($= 1$) a není spanner. Maximální stupeň uzlu v GG je $n - 1$. Gabrielův graf vzniklý z grafu G značíme $GG(G)$. Prázdný prostor, ve kterém nesmí být jiný soused, je zřejmý z obrázku 2.2a. Tento typ grafů označujeme jako grafy s prázdným sousedstvím.

Dalším představitelem grafů s prázdnou množinou sousedů je **Relative Neighborhood Graph (RNG)** [3] str. 88. V případě RNG je prázdný prostor kolem hrany určen průsečíkem dvou kruhů se středy ve vrcholech u a v a s poloměrem rovným vzdálenosti mezi uzly (obr. 2.2b). Tento prostor se označuje jako relativní okolí (relative neighborhood) hrany. Dva uzly jsou relativně blízké, pokud neexistuje uzel bližší oběma uzlům. Hrana $e(v, w)$ existuje, pokud platí nerovnice 2.3.

$$d(v, w) \leq \max_{u \in V \setminus \{v, w\}} (d(v, u), d(w, u)) \quad (2.3)$$

RNG je souvislý, neorientovaný graf, je řídký a planární. Faktor rozpínání vzdálenosti a faktor energetického rozpínání je $n - 1$ a není spanner. Maximální stupeň uzlu v RNG je $n - 1$. Maximální stupeň uzlu může být ohraničen 5 za předpokladu, že žádné dva uzly nemají stejnou vzdálenost do třetího uzlu. Pokud tato podmínka není splněna, lze algoritmus upravit tak, aby maximální stupeň uzlu nepřesáhl 6.



Obrázek 2.3: β -skeleton. Zdroj: [3] str. 89

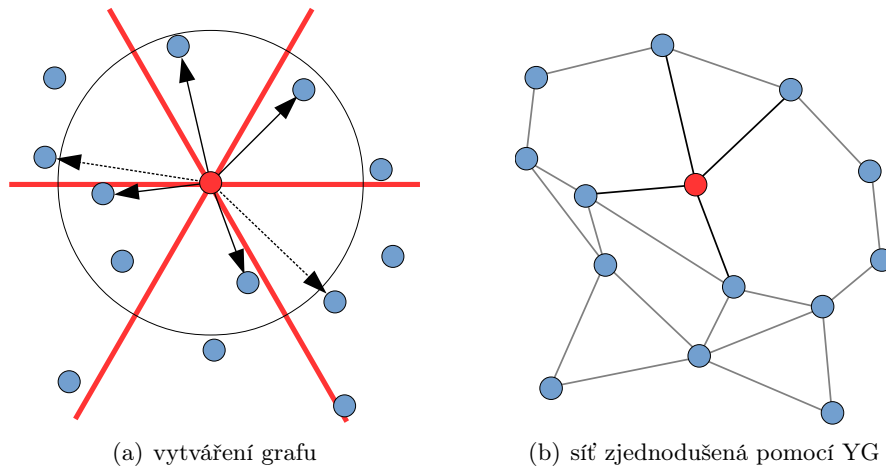
V případě použití algoritmů s prázdnou množinou sousedů je možné parametrizovat velikost prostoru, ve kterém se nesmí při vytváření hrany nacházet žádný jiný uzel. Parametrizaci můžeme provést pomocí pozitivního reálného čísla β . Hovoříme pak o skupině grafů **β -skeleton** [3] str. 88. Parametrizace prázdného prostoru je zřejmá z obrázku 2.3.

Při vytváření prázdného prostoru volíme buď průsečík kružnic, nebo jejich sjednocení. Hovoříme pak o lune based, nebo circle based β -skeletonech. Na obrázku jsou prázdné prostory vyznačeny modrou barvou pro lune-based β -skeletony a přerušovanou čarou jsou ohraničeny prázdné prostory pro circle based β -skeletony. Formálně je možné definovat lune based prázdný prostor hrany $e(u, v)$ výrazem 2.4

$$B\left(\left(1 - \frac{\beta}{2}\right)u + \frac{\beta}{2}v, \frac{\beta}{2}d(u, v)\right) \cap B\left(\left(1 - \frac{\beta}{2}\right)v + \frac{\beta}{2}u, \frac{\beta}{2}d(u, v)\right) \quad (2.4)$$

kde $B(c, r)$ značí kruh se středem v c a poloměrem r a $d(u, v)$ je euklidovská vzdálenost mezi uzly u a v . Pro β platí $\beta \geq 1$.

Formální definice circle based prázdného prostoru hrany $e(u, v)$ je dána vztahem 2.5



Obrázek 2.4: Yao graf. Zdroj: [3] str. 89

$$B\left(\left(1 - \frac{\beta}{2}\right)u + \frac{\beta}{2}v, \frac{\beta}{2}d(u, v)\right) \cup B\left(\left(1 - \frac{\beta}{2}\right)v + \frac{\beta}{2}u, \frac{\beta}{2}d(u, v)\right) \quad (2.5)$$

β -skeletony jsou generalizací GG a RNG.

Podrobnější informace o výše uvedených grafech je možné nalézt v [3] str. 87-89.

2.1.2.2 Grafy založené na úhlových výsečích

Další typ algoritmů pro nastavení topologie využívá rozdělení prostoru kolem vrcholu na úhlové výseče (Cone-Based graphs). Jedním z představitelů tohoto typu grafů je **Yao Graph (YG)** [3] str. 89. Yao graf dělí prostor na k stejných úhlových výsečí, kde $k \geq 6$. Vrchol je poté spojen hranou s nejbližším vrcholem v každé výseči za předpokladu, že se v dané výseči nachází vrchol v komunikační vzdálenosti. Podobně jako v případě RNG je zde problém s více nejbližšími vrcholy v dané výseči. Řešením je buď zvolení pouze jednoho nejbližšího vrcholu, nebo propojení s více vrcholy. YG je orientovaný graf se slabým propojením. Slabé propojení znamená, že všechny vrcholy jsou propojené, ale pouze bez ohledu na orientaci hran. Pokud použité hrany budeme používat obousměrně, vzniká neorientovaný YG. YG nemusí být planární. YG je při konstantním k řídký. Faktor rozpínání vzdálenosti je $1/(1 - 2 \sin(\pi/k))$ a faktor energetického rozpínání je $1/(1 - (2 \sin(\pi/k))^\alpha)$, kde α je útlumový exponent. YG je spanner. Maximální stupeň uzlu je $n - 1$, ale výstupní stupeň uzlu je nejvýše k , pokud neexistuje více nejbližších sousedů v některé úhlové výseči. Neorientovaný Yao graf je uveden na obrázku 2.4.

Podrobnější informace o YG je možné nalézt v [3] str. 89-90.

2.2 Směrování v bezdrátových senzorových sítích

V běžných datových sítích s úspěchem využíváme hierarchickou adresaci. Díky tomu, že adresu můžeme rozdělit na adresu sítě a adresu zařízení v této síti, můžeme provádět směrování buď jen podle adresy sítě, nebo jen podle adresy zařízení v dané síti. Tím pádem mohou být ve směrovací tabulce obsaženy pouze adresy sítí. Díky agregaci adres sítí se obsah tabulky ještě zjednodušuje.

V bezdrátových senzorových sítích je složité využít hierarchickou adresaci. Sensory mohou být umístěny v prostoru zcela náhodně a jejich adresy splňují pouze požadavek unikátnosti adresy v rámci sítě. Z toho důvodu nelze adresu hierarchicky rozdělit na jednotlivé části. Směrovací tabulky poté mají paměťovou složitost $O(n)$, kde n je počet prvků sensorové sítě. V nejhorším případě musí být na každém prvku tabulka obsahující záznamy se směrem na všechny ostatní senzory.

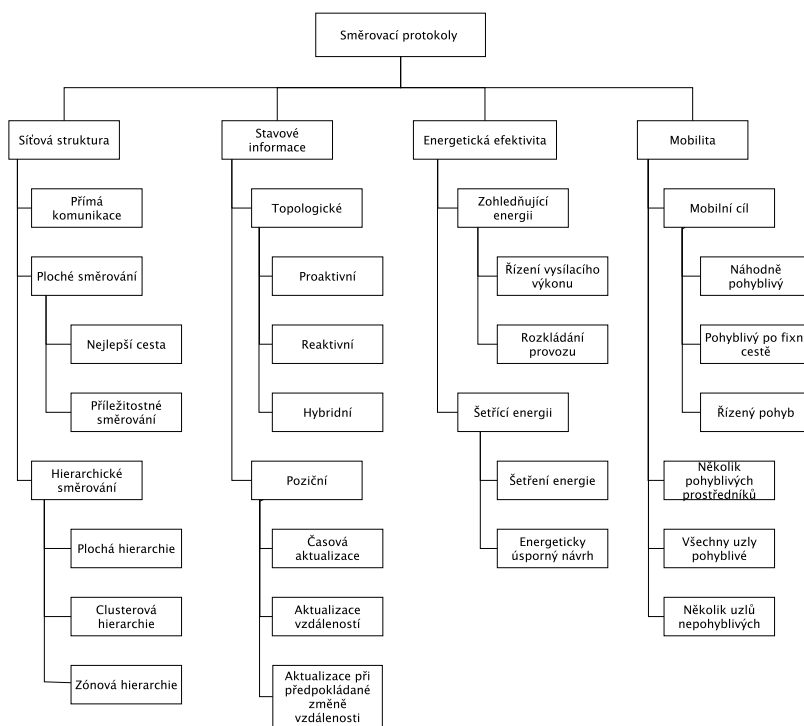
Zajímavým problémem je i vlastní přiřazení adres jednotlivým stanicím v sensorové síti. Stanice mohou mít adresu přidělenou při výrobě, mohou ji mít nakonfigurovanou administrátorem při vytvoření sítě, nebo mohou být adresy přiřazeny automaticky v okamžiku formování sítě. V případě přidělení adresy administrátorem nebo při formování sítě je možné zohlednit topologii a zavést hierarchickou adresaci a tím i hierarchické směrování.

Vzhledem k omezené velikosti paměti v senzorech je značně omezená škálovatelnost sensorové sítě při použití směrovacích algoritmů používaných v běžných datových sítích.

Dalšími problémy při směrování v bezdrátových senzorových sítích je omezený výpočetní výkon senzorů, omezená energetická zásoba a omezená komunikační kapacita senzorových bezdrátových sítí. Použité směrovací algoritmy by tedy měly mít minimální paměťové nároky, měly by si vyměňovat minimální množství informací a měly by být výpočetně jednoduché.

Směrovací algoritmy v bezdrátových senzorových sítích můžeme rozdělit podle různých parametrů: podle síťové struktury, typu stavových informací, mobility a energetické efektivity (obr. 2.5).

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH



Obrázek 2.5: Rozdělení směrovacích algoritmů pro bezdrátové senzorové sítě

2.2.1 Síťová struktura

Při dělení podle síťové struktury se zaměříme na způsob komunikace se sběrným uzlem. První možností je směrování s přímou komunikací (direct communication routing). V tomto případě senzory zasílají data přímo sběrnému uzlu. Tento způsob komunikace je energeticky nevýhodný, pokud je prostor bezdrátové sítě rozlehlý a pokud v síti dochází k mnoha kolizím.

Druhou možností je ploché směrování (flat based routing). Toto směrování vychází z předpokladu, že všechny uzly mají stejnou funkčnost. Ploché směrování můžeme rozdělit na oportunistické směrování (opportunistic routing) a směrování po nejlepší cestě (best path routing). V oportunistickém směrování vytvoříme pro každý cíl množinu kandidátů na následující skok. Každému prvku z množiny je přiřazena priorita. Při požadavku na směrování je zvolen následující skok s nejvyšší prioritou. Algoritmus směrování po nejlepší cestě nalezne nejlepší cestu a následující skok je vybrán z této cesty.

Poslední možností je hierarchické směrování. Při hierarchickém směrování jsou uzly v síti dynamicky organizovány do skupin, které se nazývají clustery. Každý cluster obsahuje řídicí uzel (cluster head). Tento uzel cluster řídí a sbírá data od ostatních uzlů. Nasbíraná data řídicí uzel dále agreguje a předává je sběrnému uzlu. Pokud mají všechny uzly stejnou funkčnost, ale vykonávají různé funkce, pak hovoříme o plošné hierarchii (flat based hierarchy). Pokud je síť tvořena propojenými clustery, pak hovoříme o clusterové hierarchii (cluster based hierarchy). Pokud zvyšujeme škálovatelnost sítě na úkor možností reorganizace sítě vytvářením zón, pak hovoříme o zónové hierarchii (zone based hierarchy).

2.2.2 Typ stavových informací

Směrovací protokoly můžeme rozdělit podle typu stavových informací na protokoly topologické (topology based routing) a protokoly poziční (location based routing).

Při použití topologických protokolů každý uzel v síti udržuje rozsáhlé informace o topologii sítě. Topologické protokoly mohou pracovat v proaktivním, reaktivním a hybridním režimu.

Proaktivní směrovací algoritmy aktivně získávají informace pro směrování dříve, než k vlastnímu směrování dojde. Většinou každý uzel udržuje směrovací tabulku, kterou využije pro směrování paketu. Proaktivní směrování je vhodné pouze za předpokladu,

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

23

že se síťová topologie příliš často nemění. Lépe řečeno jsou linky v síti stabilní a poloha uzlů se mění zřídka v porovnání s frekvencí předávaných dat. Dalším problémem proaktivních algoritmů může být nemožnost uložení směrovacích tabulek do omezené paměti senzorů.

Reaktivní směrovací algoritmy odkládají přípravu směrování až do okamžiku přijetí paketu určeného k přeposlání. Nejjednodušším způsobem je při přijetí paketu určeného k přeposlání odeslat záplavou výzvu pro nalezení správného směru, případně záplavou odeslat přímo datový paket. Pochopitelně existují metody, které se snaží omezit rozsah záplavy a tím i přetěžování sítě.

Zajímavým typem algoritmů jsou algoritmy hybridní, které se snaží využít vlastnosti proaktivních i reaktivních směrovacích algoritmů.

Další rodinou algoritmů použitelných v senzorových sítích jsou algoritmy geografického směrování (geographic routing, directional, geometric, location-based, position-based routing). V geografickém směrování musí znát každý uzel svou polohu a polohu svých sousedů. Dále musí zdrojový uzel znát polohu uzlu cílového. Pro zjištění polohy uzlů je možné použít řadu geolokačních služeb např. GPS, vložení polohy administrátorem při vytváření sítě, či geolokační algoritmy. Zajímavým dopadem použití geografických algoritmů je možnost zaslání zprávy uzlu v nějakém geografickém prostoru (geocasting).

Poziční protokoly si udržují informaci o pozicích cílových uzlů. Pozice mohou být aktualizovány na základě času (time based location update routing protocol), změně vzdálenosti (distance based location update routing protocol) a předpokladu o změně vzdálenosti (predictive distance based location update routing protocol).

V prvním případě uzly pravidelně zasílají svou polohu lokalizačnímu serveru. V druhém případě každý uzel sleduje změnu své polohy, a pokud se od původní polohy vzdálí o více, než je nastavená prahová hodnota, odešle informaci o své poloze. V třetím případě uzel odesílá lokalizačnímu serveru svou polohu a směr a rychlost pohybu. Lokalizační server poté předpovídá aktuální polohu uzlu.

2.2.3 Energetická efektivita

Další skupinou protokolů jsou protokoly zaměřené na energetickou efektivitu. Energeticky efektivní algoritmy zajišťují hospodaření s energií různými způsoby.

Jednou možností je prosté zohlednění energetické náročnosti při směrování (energy aware protokol). Nejjednodušší metodou je řízení vysílacího výkonu na nejnižší pou-

žitelnou mez (transmission power control). Jinou metodou je rozkládání vysílání na několik uzlů (load distribution).

Druhou možností je šetření energií (energy conserving). Šetření energie lze provádět převedením uzlu do stavu usnutí/vypnutí v čase, kdy uzel nemusí komunikovat (power save). Při použití této strategie je nutné navrhnout směrovací protokol dostatečně robustní, aby dokázal doručit data i v případě, že řada uzlů je v neaktivním stavu a nepředává data. Další možností je energeticky efektivní návrh senzorové sítě (energy efficient design) [40]. Energeticky efektivní návrh je v současné době intenzivně zkoumán.

2.2.4 Mobilita

Směrovací algoritmy mohou být přizpůsobeny různým typům mobility. Mobilitu rozlišujeme podle toho, které uzly se pohybují. Mobilní může být sběrný uzel, několik mobilních uzlů, které vystupují jako prostředníci při komunikaci se sběrným uzlem (relay), mobilní mohou být všechny uzly a nakonec může být mobilní většina uzlů a několik uzlů zůstává stacionárních.

2.2.5 Ploché směrování

Mezi ploché směrování můžeme zařadit řízenou difúzi (Directed Diffusion) [4] a Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [5].

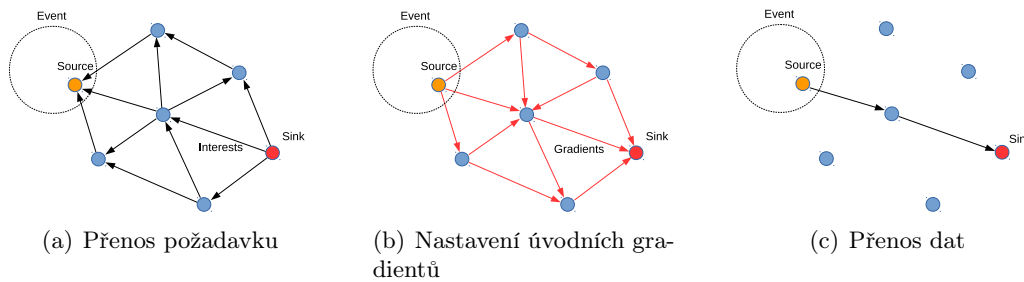
2.2.5.1 Řízená difúze

Řízená difúze se opírá o specifické komunikační paradigma. Toto paradigma vychází z předpokladu, že existuje nějaký prvek, který potřebuje získat informaci o nějaké fyzikální proměnné. Příkladem může být zájem o teplotu v oblasti X, přítomnost zvířete v oblasti Y apod. Prvek, který má zájem o danou informaci, odešle broadcastem (difúzí) žádost o změření požadované veličiny. Senzor, který tuto žádost přijme, začne měřit a po změření vrátí výsledek žadateli.

Řízená difúze využívá čtyři elementy: požadavek, datovou zprávu, gradient a posílení (reinforcement). O požadavku a datové zprávě se zmiňuji výše. Gradient je typicky množina sousedů, ze kterých přišel daný požadavek. Gradient si udržuje každý uzel a pro jeden požadavek může množina obsahovat více sousedů. Datová zpráva je předávána uzlu, který informaci požaduje po jedné či více cestách sestavených podle gradientu. Počet cest je určen zesílením. Předání požadavku, vytvoření gradientu a předání zprávy je zobrazeno na obrázku 2.6.

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

25



Obrázek 2.6: Řízená difúze. Zdroj: [4]

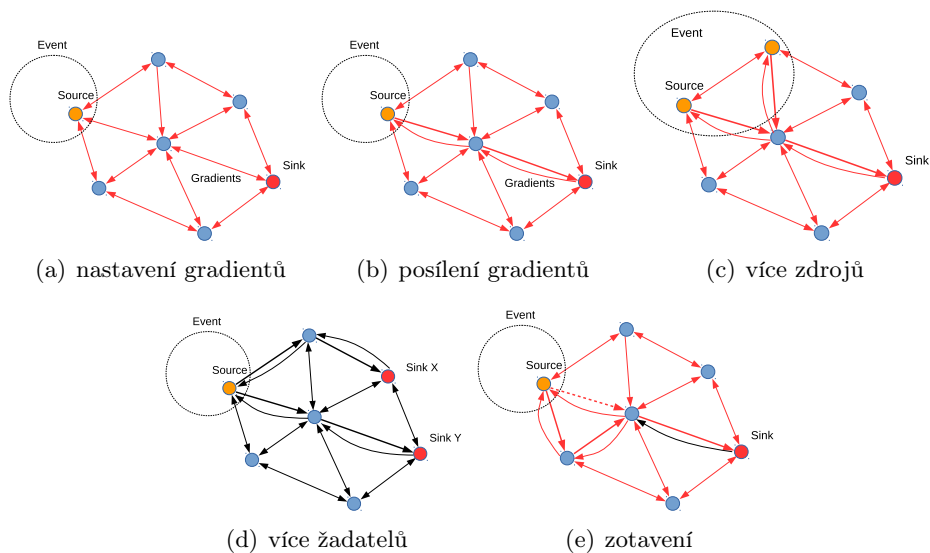
Na obrázku 2.7a jsou znázorněny gradienty, které vzniknou při zaplavení sensorového pole požadavkem. Rozdíl oproti obrázku 2.6b je v obousměrném nastavení gradientu mezi dvěma uzly. Toto nastavení gradientů je typické a je způsobeno nemožností odlišit stejné požadavky od jednoho žadatele, nebo stejné požadavky od různých žadatelů (v požadavku není zaslána identifikace žadatele). Obousměrný gradient způsobí přijetí jedné kopie dat od každého souseda, což může být na jednu stranu nevýhodné, ale na druhou stranu to usnadní obnovu při poruše v sensorové síti.

Po přijetí datové zprávy žadatel odešle sousedovi, od kterého zprávu obdržel, informaci o zesílení. Soused, který zesílení obdržel, dále odešle zesílení sousedovi, od kterého původně obdržel datovou zprávu. Tato operace se opakuje až ke zdroji. Zesílení může být odesláno podle různých pravidel. Pokud je zesílení odesláno pouze sousedovi, který doručil datovou zprávu jako první, vytvoříme cestu s minimálním zpožděním (obr. 2.7b). Pokud zesílení odešleme několika sousedům, vytvoříme vícecestné směřování. Díky použití zesílení je síť schopná velmi rychle reagovat na změny vlastnosti sítě, podle které zesílení vysíláme. Využití gradientu a zesílení umožňuje nastavit komunikaci s více zdroji (obr. 2.7c) i více žadateli (obr. 2.7d). Zároveň síť umožňuje rychlé zotavení po výpadku či zhoršení kvality spoje (obr. 2.7e).

Jednotlivé fáze řízené difúze mohou být řešeny různými způsoby, které ovlivní výsledné chování směřování v síti. Tyto různé přístupy jsou shrnuty v tabulce 2.1.

2.2.5.2 Sensor Protocols for Information via Negotiation

Dalším představitelem plochého směřování je Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [5]. Rodina SPIN protokolů je založena na vyjednávání (negotiation) a přizpůsobení zdrojů (resource-adaptation). Vyjednávání umožní přenášet pouze nezbytných dat. Před zasláním dat každý soused vyjedná s ostatními sousedy, která data



Obrázek 2.7: Řízená difúze. Zdroj: [4]

Tabulka 2.1: Způsoby řešení fází řízené difúze. Zdroj: [4]

Fáze řízené difúze	Možnosti řešení
Přenos požadavku	Záplava Omezená nebo řízená záplava založená na poloze Řízená propagace založená na dříve uložených datech
Přenos dat	Doručení po jedné cestě získané posílením Vícecestné doručení s výběrovou kvalitou v různých cestách Vícecestné doručení s pravděpodobnostním předáváním
Agregace a kešování dat	Pro robustní doručování dat i při výpadku uzlu Pro koordinované snímání a redukci dat Pro řízení požadavků
Posílení	Pravidla pro rozhodnutí kdy zesílovat Pravidlo kolik sousedů zahrnout do zesílení Pravidla pro negativní zesílení

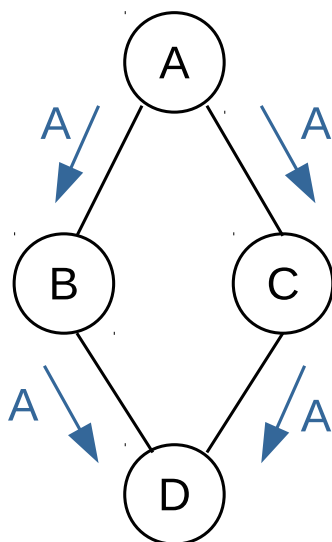
2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

27

je potřeba přenést. Aby vyjednání mohlo proběhnout, je potřeba data nějak popsat či pojmenovat. Popis dat se provádí pomocí metadat. Každý uzel také před přenosem dat otestuje stav svých zdrojů pomocí resource manageru. Pokud má uzel například nedostatek energie, může odmítnat přenos cizích dat.

Přizpůsobení zdrojů umožňuje prodloužení energetické životnosti uzlu. Vyjednávání řeší dva problémy záplavového směrování. Prvním je problém imploze a druhým problém překrytí.

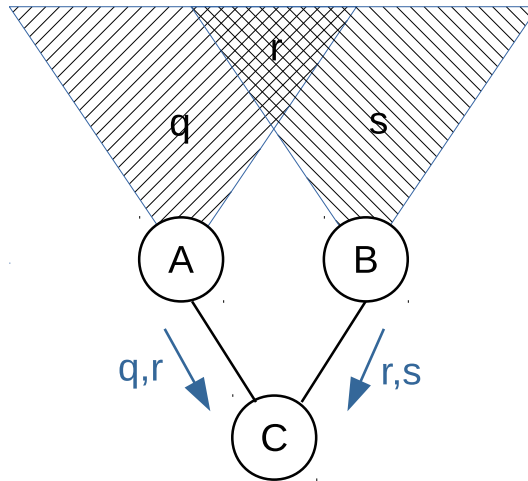
Při posílání dat pomocí záplavového směrování často posíláme zbytečná data. Pokud uzel *A* posílá data záplavou, mohou být tato data přijata na uzlu *D* dvakrát (obr. 2.8). Tento jev nazýváme implozí a přináší zbytečné plýtvání energií a přenosovým pásmem. Při použití vyjednávání uzel zjistí, že data byla předána jinou cestou, a duplikovaná data neodešle.



Obrázek 2.8: Imploze. Zdroj: [5]

Problém překrytí vzniká při pokrytí jedné geografické oblasti více senzory. Příkladem je oblast *r* na obrázku 2.9. Pokud v tomto případě předávají senzory *A* a *B* informace o oblasti *r* senzoru *C*, získá senzor *C* dvě kopie těchto informací, což opět vede k plýtvání energií a přenosovým pásmem.

Využití metadat umožní identifikovat, z jaké oblasti byla už data předána, a není proto nutné přenášet informace z již zpracované oblasti, která je pokrytá více senzory.



Obrázek 2.9: Překrytí. Zdroj: [5]

SPIN pro vyjednávání používá třícestný protokol (ADV-REQ-DATA). Při vyjednávání se předávají následující zprávy:

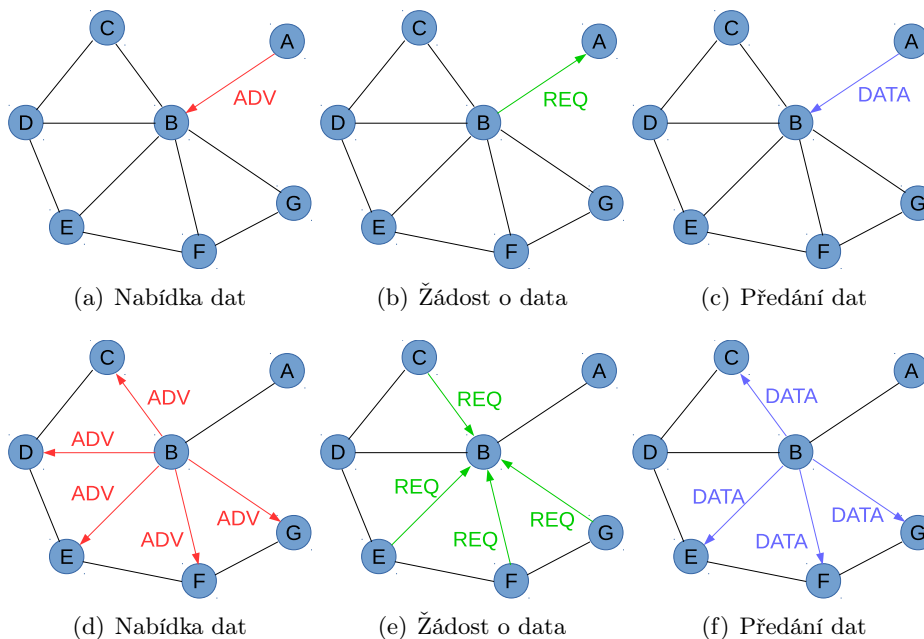
- ADV – nabídka nových dat. Tuto zprávu vysílá uzel, pokud má k dispozici nová naměřená data.
- REQ – žádost o data. Tuto zprávu vysílá uzel po obdržení zprávy ADV, pokud nabízená data ještě neobdržel.
- DATA – datová zpráva. Datová zpráva je odeslána pouze v případě, že si ji sousední uzel vyžádá.

Zprávy ADV a REQ obsahují pouze metadata, takže jejich předání je energeticky málo náročné. Fungování protokolu SPIN je zřejmé z obrázku 2.10. Komunikace začíná nabídkou nových dat od uzlu *A* (obr. 2.10a). Pokud uzel *B* tato data ještě nemá, požádá o tato data (obr. 2.10b) a uzel *A* mu tato data pošle (obr. 2.10c). Uzel *B* nabídne tato data svým sousedům (obr. 2.10d). Sousední uzly, které ještě nabízená data nemají, pošlou žádost (obr. 2.10e) a posléze tato data obdrží (obr. 2.10f).

2.2.6 Oportunistické směrování

Oportunistické metody směrování jsou založeny na následujícím principu. Zpráva je zdrojem odeslána předem vybrané skupině sousedů. Tato množina je uspořádána podle priorit a jednotlivé prvky této množiny se podle priority pokoušejí předat zprávu dál. Výše uvedený princip bude ukázán na třech směrovacích protokolech: Extremely Oppor-

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH



Obrázek 2.10: Protokol SPIN. Zdroj: [5]

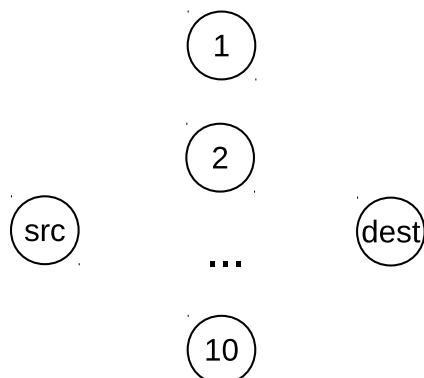
tunistic Routing (ExOR) [6], Receiver-based Opportunistic Forwarding protocol (ROF) [8] a RSSI based opportunistic routing protocol for MWSN (OR-RSSI) [7].

2.2.6.1 Extremely Opportunistic Routing

Základní idea tohoto algoritmu se opírá o jednoduchý princip. Pokud by bezdrátová síť byla vytvořena podle obrázku 2.11, kde pravděpodobnost doručení zprávy od zdroje k libovlnnému mezilehlému uzlu je 10% a od libovlnného mezilehlého uzlu k cíli je 100%, poté při tradičním směrování po předem zvolené jednocestné trase bude nutné průměrně desetkrát opakovat odeslání zprávy. Zvolíme-li však odeslání všem mezilehlým uzlům pomocí broadcastu, poté bude pravděpodobnost předání zprávy (při 10 mezilehlých uzlech) 65%, takže k opakování zprávy bude docházet v méně než polovině případů. Podobně se zvýší propustnost sítě.

Druhá výhoda oportunistického přístupu je zřejmá z obrázku 2.12. Pokud bychom na takovýto řetěz uzlů aplikovali tradiční postupy pro směrování, vznikla by například cesta $src - B - D - dst$.

Pokud však zdrojový uzel src není schopen odeslat data až uzlu B , ale odešle je pouze



Obrázek 2.11: Přenos s možností využití více mezilehlých uzlů. Zdroj: [6]



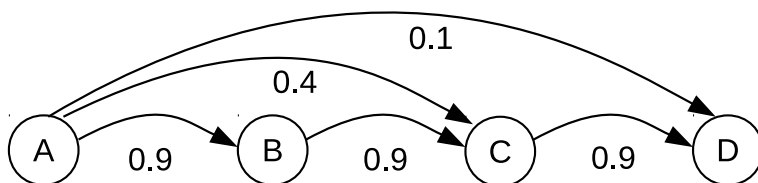
Obrázek 2.12: Přenos s možností využití více mezilehlých cest k cíli. Zdroj: [6]

uzlu A , tradiční směrovací protokoly neumí s touto skutečností pracovat a budou se pokoušet pomocí opakování doručit zprávu do uzlu B . Naopak pokud dojde k situaci, že zdrojový uzel src dokáže doručit zprávu přímo až do uzlu D , tradiční směrovací protokoly tuto skutečnost ignorují a zbytečně předávají zprávu z uzlu B do uzlu D .

Extremely Opportunistic Routing (ExOR) tyto principy zohledňuje při své implementaci. Zdrojový uzel odešle paket množině uzlů potenciálně využitelných k předání paketu blíže k cíli. Z této množiny se vybere uzel, který skutečně předá data další množině uzlů, nebo přímo cílovému uzlu.

Množina uzlů vhodných k předání zprávy (forwarder) je podmnožina množiny všech sousedů odesílacího uzlu, pro které platí, že vzdálenost předávacího uzlu k cíli je menší než vzdálenost odesílacího uzlu k cílovému uzlu. Tato podmnožina kandidátů je uspořádána podle priority, kde nejvyšší prioritu má uzel, který je nejbliž k cíli. Množina kandidátů je uvedena přímo v hlavičce paketu. Každý uzel, který předává zprávu, nahradí tento seznam novým seznamem. Ve vzorové síti na obrázku 2.13 by množina kandidátů při posílání paketu z uzlu A do uzlu C byly uzly D , C a B . Při předání tohoto paketu uzlem C by nově nastavená množina kandidátů byl pouze uzel D .

Pokud je zvolena množina kandidátů, je nutné zajistit, aby tito kandidáti nepředávali zprávu všichni. Ideálním případem je předání paketu pouze uzlem, který je nejbliž k cíli.



Obrázek 2.13: Síť s uvedením pravděpodobnosti úspěšného předání zprávy na jednotlivých linkách. Zdroj: [6]

Toto chování je možné zajistit pomocí jednoduchého potvrzení. Každý uzel v seznamu kandidátů má vyhrazen časový slot pro odeslání potvrzení. Časové sloty jsou opět seřazeny podle priority od nejvyšší po nejnižší. Potvrzení odesílá každý uzel z množiny kandidátů, který obdržel daný datový paket. Jako ID potvrzení každý uzel vkládá ID uzlu s nejvyšší prioritou, jehož potvrzení přijal. Předpokládejme, že uzel D (uzel s nejvyšší prioritou) odešle potvrzení, které uzel C (uzel s druhou nejvyšší prioritou) nepřijme a uzel B (uzel s nižší prioritou než uzel C) přijme. Pokud by všechny uzly odesílaly potvrzení pouze se svým ID, tak by uzel C odeslal vlastní potvrzení a přeposlal by datový paket. Pokud však přijme potvrzení od uzlu B s ID uzlu D , uzel C zjistí, že paket byl přeposlán uzlem s vyšší prioritou a paket přeposílat nebude.

Uzel, který neobdrží potvrzení s ID s vyšší prioritou, než má uzel sám, přepoše datový paket. Problémem při předávání paketů by mohlo být zduplikování paketu při několikanásobném výpadku potvrzení. Proto je každý paket opatřen náhodným číslem. Náhodná čísla paketů jsou uložena v dočasné paměti uzlu a paket je předán pouze v případě, že jeho číslo není nalezeno v této paměti.

Příklad komunikace v síti podle obrázku 2.13, kdy uzel A odesílá zprávu uzlu D , by vypadal následovně. Uzel A odešle zprávu s množinou kandidátů D , C , B . Vzhledem k pravděpodobnosti přijetí zprávy paket obdrží uzly B a C . Uzel D zprávu neobdrží. Po odeslání paketu začnou uzly sestupně podle priority odesílat potvrzení. Časový slot vyhrazený uzlu D bude vzhledem k nedoručení paketu do uzlu D prázdný. Časový slot vyhrazený uzlu C obsahuje ID uzlu C , stejně jako časový slot vyhrazený uzlu B . Pokud všechny uzly, které přijaly datový paket, obdrží i potvrzení od ostatních uzlů, zvolí se uzel C jako uzel vhodný k předání paketu. Po dokončení potvrzovací fáze pak uzel C odešle paket. Množina kandidátů uvedených v hlavičce tohoto paketu bude obsahovat jediný prvek D .

Existuje i odlišná verze ExOR algoritmu. Zásadním rozdílem je odesílání dat v dávkách

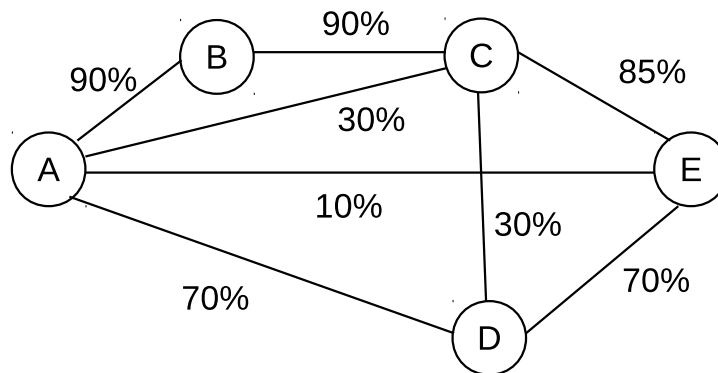
a jiná metrika [6]. Metrika v tomto případě zohledňuje spolehlivost jednotlivých linek. Pro každý uzel je vypočten odhadovaný počet přenosů (Estimated Transmission Count (ETX)) pomocí vzorce 2.6.

$$ETX = \sum_{path} (1/p_i) \quad (2.6)$$

kde p_i je pravděpodobnost doručení zprávy na lince a $path$ je minimální cesta.

Pro síť z obrázku 2.14 jsou vypočtené hodnoty ETX uvedeny v obrázku 2.15. ETX v uzlu B je uveden ve výpočtu 2.7.

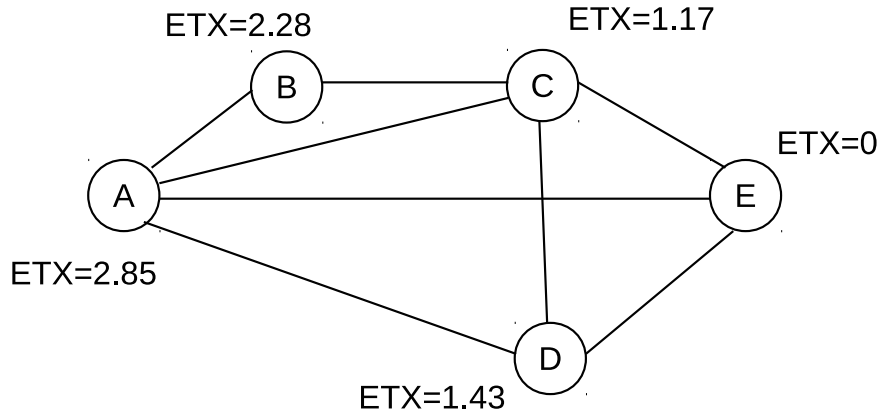
$$ETX_B = 1/0.85 + 1/0.9 = 2.28 \quad (2.7)$$



Obrázek 2.14: Síť s pravděpodobnostmi úspěšného předání zprávy na jednotlivých linkách. Zdroj: [6]

2.2.6.2 RSSI based opportunistic routing protocol for MWSN

Tento algoritmus je zajímavý zohledněním pohybu senzorů. Algoritmus tedy uvažuje kvalitu linky, pohyb senzorů a spolehlivost linky. Aby nebylo nutné sledovat geografickou polohu senzorů, využijeme měření kvality majákového (beacon) signálu. Cílový uzel pravidelně odesílá majákový signál s vyšším výkonem a dosahem, než používá při běžném předávání dat. Uzel i při příjmu tohoto signálu nastaví nebo upraví hodnotu pravděpodobnosti použití Opportunity Probability (OP) pro vysílání do uzlu s podle vzorce 2.8.



Obrázek 2.15: Estimated Transmission Count (ETX) do uzlu E z jednotlivých uzlů v síti podle obrázku 2.14. Zdroj: [6]

$$OP'_{is} = OP_{is} + \frac{1}{|RSSI|} * \alpha \quad (2.8)$$

kde α je konstanta a $|RSSI|$ je absolutní hodnota RSSI. Received Signal Strength Indicator (RSSI) vyjadřuje úroveň přijímaného signálu. Pokud je $RSSI = -20dBm$ a $\alpha = 100$, pak se při každém přijetí majákového signálu OP zvětší o 5. Pokud je však $RSSI = -200dBm$, pak se OP zvýší pouze o 0,5.

Pro zohlednění pohybu senzoru zavádíme vektor pohybu $m\vec{v}$ (Mobility Vector). Vektor pohybu nabývá hodnotu 1, pokud se uzel blíží cíli, -1, pokud se od cíle vzdaluje, a 0, pokud se vzhledem k cíli nepohybuje. Pohyb senzoru se opět zjišťuje podle změny RSSI. Výpočet je zřejmý ze vzorce 2.9, kde $RSSI_{t_c}$ je momentálně změřená hodnota a $RSSI_{t_1}$ je hodnota předchozí.

$$m\vec{v}_i = \text{sign}(RSSI_{t_c} - RSSI_{t_1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } RSSI_{t_c} - RSSI_{t_1} > 0 \\ 0 & \text{if } RSSI_{t_c} - RSSI_{t_1} = 0 \\ -1 & \text{if } RSSI_{t_c} - RSSI_{t_1} < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Pohybový vektor se poté použije ve výpočtu OP podle vzorce 2.10, kde $m\vec{v}_i$ je vypočtený pohybový vektor a c je konstanta.

$$OP'_{is} = OP_{is} + \frac{1}{|RSSI|} * \alpha + m\vec{v}_i * c \quad (2.10)$$

Pokud uzel nepřijme majákový signál v předpokládaném čase, sníží hodnotu OP podle vzorce 2.11, kde β je faktor stárnutí a k je počet časových jednotek ΔT od poslední obnovy.

$$OP'_{is} = OP_{is} * \beta^k \quad 0 < \beta < 1 \quad (2.11)$$

Výše vypočtenou hodnotu OP_{is} vkládá uzel při odesílání paketu do jeho hlavičky. Každý uzel, který úspěšně dekoduje paket, porovná své OP s OP vloženým do hlavičky paketu. Pokud je OP uzlu větší než OP v hlavičce paketu, paket uloží do paměti a později jej přeposle. Při odesílání do hlavičky vloží svou hodnotu OP . V opačném případě paket ihned zahodí.

Čas pro odeslání paketu se vypočte podle vzorce 2.12, kde Δt je časová konstanta, OP_{is} je hodnota získaná z hlavičky paketu a OP_{rs} je hodnota OP vypočtená uzlem. Uzel s vyšším OP se tedy pokusí odeslat paket dříve, než uzel s nižším OP . Tím se řeší kolize při vysílání a zároveň priorita.

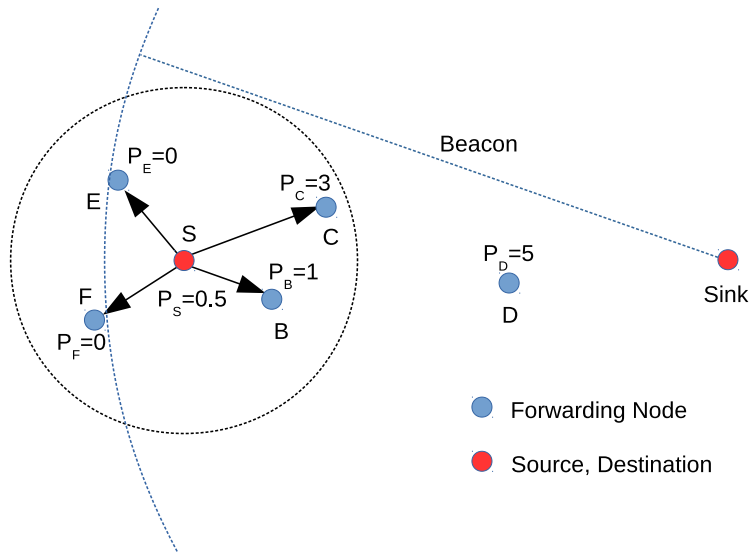
$$t_r = \frac{\Delta t}{|OP_{rs} - OP_{is}|} \quad (2.12)$$

Fungování algoritmu RSSI based opportunistic routing protocol for MWSN (OR-RSSI) je zřejmé z obrázku 2.16. Uzel S odešle paket s nastaveným $OP = 0,5$. Uzly E a F paket zahodí, protože jejich OP je nižší než OP nastavené v paketu. Uzly B a C paket uloží a přeposlou jej. Uzel C se pokusí paket přeposlat v čase $t_r = \Delta t/2,5$ a uzel B v čase $t_r = \Delta t/0,5$. Po odeslání paketu uzlem C uzel B paket zahodí.

Bližší informace o OR-RSSI je možné nalézt v [7].

2.2.6.3 Receiver-based Opportunistic Forwarding Protocol

Receiver-based Opportunistic Forwarding protocol (ROF) [8] se opírá o informaci o geografickém umístění jednotlivých senzorů a zbytkovou energii v jednotlivých senzorech. ROF protokol funguje následujícím způsobem: Nejdříve zdrojový senzor odešle paket, do jehož hlavičky uvede svá lokalizační data. Sousedí, kteří přijmou tento paket, dekodují lokalizační data odesílatele a v případě, že nejsou blíže cíli než odesílatel, paket



Obrázek 2.16: Algoritmus OR-RSSI. Zdroj: [7]

zahodí. Pokud je uzel blíž cíli, vypočte svou vysílací prioritu. Podle vysílací priority uzel zvolí časový okamžik pro předání paketu a paket přepošle.

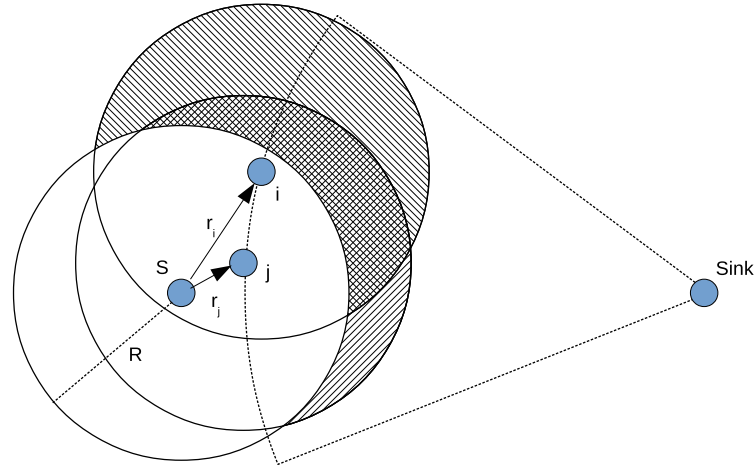
Vysílací priorita pro předávání dat se vypočte podle vzdálenosti k cíli a podle zbytkové energie daného uzlu. Zároveň se při výpočtu vysílací priority preferuje uzel s větším nově pokrytým prostorem. Větší nově pokrytý prostor je zřejmý z obrázku 2.17.

V případě stejné vzdálenosti uzlu i a j od cílového uzlu preferujeme uzel i , který nově pokrývá větší plochu. Za předpokladu rovnoměrného pokrytí plochy senzory zároveň uzel i nově pokrývá větší počet senzorů. Je zřejmé, že platí, že větší nově pokrytou plochu pokrývají uzly vzdálenější od zdrojového uzlu (pokud jsou uzly stejně vzdálené od cíle).

Vysílací prioritu uzlu vypočteme podle vzorce 2.13

$$Pr_i = \begin{cases} \frac{d-d_i}{R} \frac{E_i}{E_0} \frac{r_i}{R} & , \quad d - d_i > 0 \\ 0 & , \quad d - d_i \leq 0 \end{cases} \quad (Pr_i \in [0, 1]) \quad (2.13)$$

kde Pr_i je vysílací priorita uzlu i , d je vzdálenost mezi zdrojovým a cílovým uzlem, d_i je vzdálenost mezi uzlem i a cílovým uzlem, R je vysílací dosah uzlu a r_i je vzdálenost mezi zdrojovým uzlem a uzlem i . E_i je zbytková energie uzlu i a E_0 je úvodní energie



Obrázek 2.17: ROF - nově pokrytý prostor. Zdroj: [8]

v uzlu.

Kolize při vysílání jsou řešeny pomocí plánování času vysílání jednotlivých uzlů podle vysílacích priorit. Čas je rozdělen na časová okna s délkou T_{window} . Jednotlivé uzly nemají pevně přidělené okno pro vysílání, ale nastavují si pravděpodobnost vysílání v jednotlivých oknech podle vysílací priority. Tato pravděpodobnost je vypočtena podle vzorce 2.14

$$P_{ik} = \begin{cases} \min\{Pr_i[1 + (1 - Pr_i)\alpha]^{k-1}, 1\} & , \quad k < CW \\ 1 & , \quad k = CW \end{cases} \quad (2.14)$$

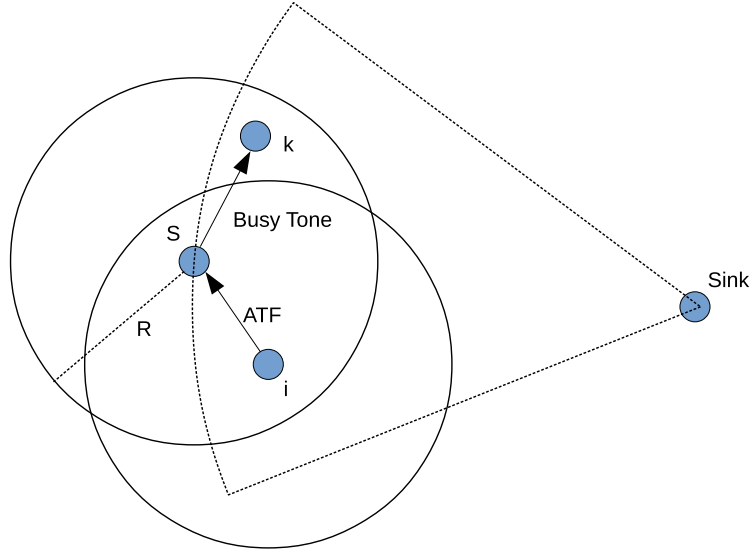
kde P_{ik} je pravděpodobnost vysílání uzlu i v okně k , Pr_i je vysílací priorita uzlu i , α je regulační konstanta a CW je maximální počet oken, po který může uzel čekat na odeslání paketu. Tento čas je dán maximální dobou T_{wait} určenou na předání paketu na jeden přeskok, pro kterou platí vzorec 2.15.

$$T_{wait} = T_{window} \cdot CW \quad (2.15)$$

Kolize jsou dále v ROF protokolu řešeny pomocí dvoukanálového přenosu s vysíláním obsazovacího (busy) tónu. Pokud se uzel rozhodne v daném časovém slotu vysílat, počká krátkou náhodnou dobu. Pokud v této době přijme obsazovací tón, nebude v tomto časovém slotu vysílat. V opačném případě odešle signál "žádám o vysílání" Apply to

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

Forward (ATF). Pokud zdrojový uzel přijme ATF, začne vysílat obsazovací tón. Tímto postupem řešíme problém skrytého uzlu (obr. 2.18). V této situaci uzel k neslyší vysílání uzlu i a mohl by vstoupit do jeho vysílání.



Obrázek 2.18: ROF - potlačení kolizí. Zdroj: [8]

V reálné síti může dojít k současnému vysílání ATF od více uzlů. Tuto situaci detekuje zdrojový uzel na linkové vrstvě. Zdrojový uzel poté zopakuje vysílání obsazovacího tónu. Uzly, které po odeslání ATF detekují obsazovací tón, si nastaví pravděpodobnost odeslání ATF v následujícím slotu $P_{ik} = 1$. V následujícím slotu se tedy pokusí odeslat ATF s nově nastavenou náhodnou dobou k detekci obsazovacího tónu. Pokud uzel úspěšně odešle ATF a nedetekuje opakovaný obsazovací tón, získává právo k odeslání paketu a paket okamžitě odešle. Do tohoto paketu vloží svá lokalizační data. V případě, že vysílací uzel neobdrží ATF po dobu T_{wait} , přejde do přechodného módu. V tomto přechodném módu je upraven výpočet vysílací priority, kdy uvažujeme i uzly vzdálenější od cíle, než je vysílací uzel. Výpočet vysílací priority je zřejmý ze vzorce 2.16

$$Pr_i = \max\{\lambda_1 \frac{d - d_i}{R} + \lambda_2 \frac{r_i}{R}, 0\} \quad (2.16)$$

kde R , d , d_i a r_i je vysílací dosah uzlů, vzdálenost mezi vysílacím a cílovým uzlem, vzdálenost mezi uzlem i a cílovým uzlem a vzdálenost mezi uzlem i a zdrojovým uzlem. λ_1 a λ_2 jsou váhové faktory, pro které platí 2.17

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (2.17)$$

Protokol ROF nevyžaduje vytváření množin uzlů vhodných pro předání zprávy. Na druhou stranu musí senzory znát svá lokalizační data.

2.2.7 Směrování po nejlepší cestě (Best Path Routing)

Při směrování po nejlepší cestě se algoritmus pokouší identifikovat nejlepší cestu mezi zdrojovým a cílovým uzlem a poté přeposlat paket k následujícímu uzlu (next hop) ležícímu na této cestě. Nejlepší cesta je vybírána podle vhodně zvolené metriky. Touto metrikou může být například počet přeskoků, energie potřebná k vysílání, spolehlivost linek atp. V této kategorii existuje řada algoritmů. Příkladem může být Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) [9], Partial-partition Avoiding Geographic Routing-Mobile (PAGER-M) [41], Location based Energy Efficient Intersection Routing protocol (EELIR) [42] a Anycast based hybrid routing protocol [43].

2.2.7.1 Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing

Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) je reaktivní (on demand) směrovací protokol. Tento protokol nevytváří informaci o cestách průběžně, ale jen na vyžádání pro doručení informace mezi zdrojovým a cílovým uzlem. Po vytvoření informací o cestě tyto informace dočasně zůstávají na jednotlivých uzlech a po vypršení časového intervalu jsou smazány.

Vyhledání cesty je v AODV protokolu založeno na vyhledávání pomocí broadcastu. Vyhledání cesty (Path Discovery) spouští zdrojový uzel, pokud ve své směrovací tabulce nenalezne záznam pro daný cílový uzel. Každý uzel v síti udržuje dva čítače *nodeSequenceNumber* a *broadcastID*. Zdrojový uzel spouští vyhledání cesty odesláním zprávy *route_request* (*RREQ*) pomocí broadcastu. Zpráva *RREQ* obsahuje následující položky:

$\langle sourceAddr, sourceSequence\#, broadcastID, destAddr, destSequence\#, hopCnt \rangle$

Dvojice *sourceAddr* a *broadcastID* jednoznačně identifikují zprávu.

Proměnnou *broadcastID* uzel inkrementuje při každém novém odeslání *RREQ*.

Každý uzel po přijetí zprávy *RREQ* inkrementuje položku *hopCnt* a přepoše tuto zprávu svým sousedům, nebo je schopný odeslat informace o cílovém uzlu a poté odešle zprávu *route_reply* (*RREP*) zpátky zdrojovému uzlu.

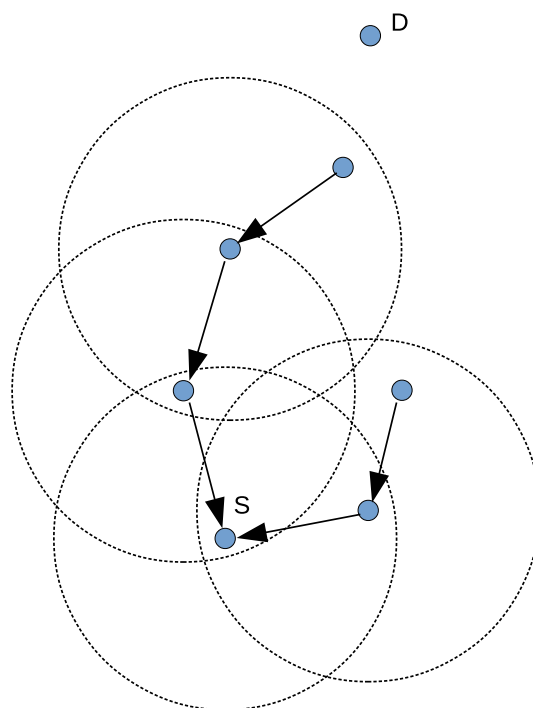
2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

39

Uzel si uloží následující informace:

- zdrojovou IP adresu (*sourceAddr*),
- broadcast ID (*broadcastID*),
- čas vypršení platnosti záznamu zpětné cesty (*reversePathRouteEntryTimeout*),
- sekvenční číslo ve zdrojovém uzlu (*sourceSequence#*).

Tyto informace určují zpětnou cestu. Předávání zprávy *RREQ* tedy v síti nastaví zpětnou cestu ke zdrojovému uzlu (obr. 2.19).

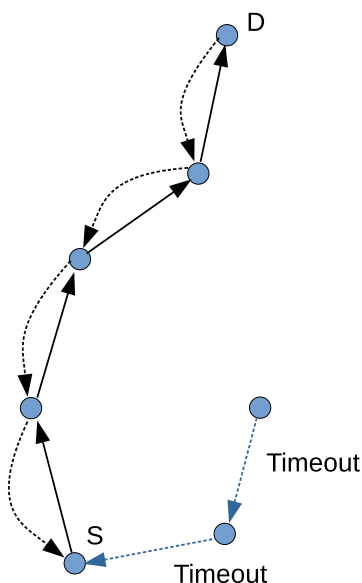


Obrázek 2.19: AODV - vytvoření zpětné cesty. Zdroj: [9]

Cestu k cílovému uzlu nastavujeme při přijetí zprávy *RREQ* uzlem, který zná cestu k cílovému uzlu (může to být přímo uzel cílový) a jehož proměnná *destSequence#* je novější než *destSequence#* uložená ve zprávě *RREQ*. Pokud je *destSequence#* v uzlu nižší než *destSequence#* ve zprávě *RREQ*, nesmí uzel na tuto zprávu odpovědět a přepoše zprávu *RREQ* svým sousedům. Pokud uzel zná cestu k cíli, *destSequence#* v uzlu je vyšší nebo stejné jako *destSequence#* ve zprávě *RREQ* a danou zprávu *RREQ* uzel ještě nezpracovával, uzel odpoví zprávou *RREP* posílanou pomocí unicastu po zpětné cestě. Zpráva *RREP* obsahuje následující položky:

$\langle sourceAddr, destAddr, destSequence\#, hopCnt, lifetime \rangle$

Při návratu zprávy *RREP* do zdrojového uzlu si každý mezilehlý uzel nastaví cestu do cílového uzlu, délku cesty *hopCount*, sekvenční číslo cílového uzlu *destSequence#* a časovač platnosti záznamu cesty *lifetime*. Uzly, které neleží v aktivní cestě, po vypršení časového intervalu (typicky 3000 ms) odstraní záznam o zpětné cestě (obr. 2.20). Pokud uzel přijme opakovaně zprávu *RREQ* se stejnou dvojicí *sourceAddr* a *broadcastID*, jedná se o duplikovanou zprávu a uzel ji zahodí.



Obrázek 2.20: AODV - odstranění nadbytečných záznamů ze zpětné cesty. Zdroj: [9]

Mezilehlý uzel přeposílá zprávu *RREP* pouze poprvé. Při obdržení opakované zprávy *RREP* si upraví vlastní záznamy a přepośle zprávu pouze, pokud nová zpráva obsahuje vyšší hodnotu sekvenčního čísla cíle, nebo stejné sekvenční číslo cíle a zároveň nižší *hopCount*, než má uloženo.

Zdrojový uzel může začít posílat datové zprávy při obdržení první zprávy *RREP*. Po přijetí dalších zpráv *RREP* může dojít k vylepšení parametrů používané cesty.

Uzly musí při používání protokolu AODV udržovat směrovací tabulku s následujícími položkami:

- cíl (Destination),
- následující uzel (Next Hop),

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

41

- metriku (Number of hops),
- sekvenční číslo cíle (Sequence number for the destination),
- aktivní sousedi v této cestě (Active neighbors for this route),
- čas odstranění záznamu (Expiration time for the route table entry).

Položky cíl, následující uzel, metrika, sekvenční číslo cíle a čas odstranění záznamu jsou zjevné, nebo byly zmíněny v předchozím textu. Položka aktivní sousedi v této cestě obsahuje adresy sousedů, kteří poslali (jako zdrojový uzel nebo jako předávající uzel) datovou zprávu pro daný cíl. Seznam aktivních uzlů se využívá pro informování uzlů při výpadku cesty do cílového uzlu. Čas odstranění záznamu se obnovuje při každém použití daného směrovacího záznamu.

Protokol AODV nabízí také funkci údržby aktivní cesty. Pokud se přesune zdrojový uzel, může vyvolat nové vyhledání cesty. V případě ztráty spojení mezilehlého uzlu může uzel odeslat nevyžádanou zprávu *RREP*. Ztrátu uzly detekují pomocí *HELLO* zpráv, nebo detekcí spojení na linkové vrstvě. Podrobnosti je možné nalézt v [9].

Protokol AODV byl definován jako experimentální protokol pro internetovou komunitu v RFC3561 [44].

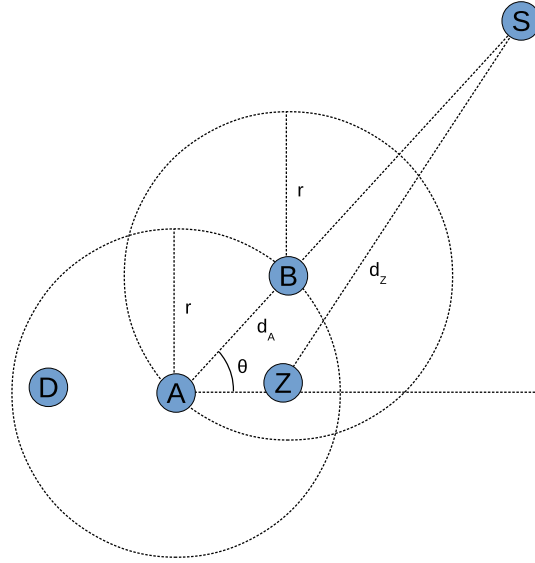
2.2.7.2 Location based Energy Efficient Intersection Routing protocol

Směrování pomocí Location based Energy Efficient Intersection Routing protocol (EE-LIR) probíhá ve třech fázích [10]. Během první fáze zdrojový uzel vyhledává vhodný prostor pro směrování paketu a pošle sousedům oznamovací paket. V druhé fázi sousední uzly vyhodnotí, zda budou nebo nebudou předávat paket dál. Ve třetí fázi zdrojový uzel pošle datový paket zvolenému sousedovi. Pro správnou funkci algoritmu musí každý uzel znát svou zbývající energii, svou polohu a polohu cílového uzlu.

Vhodní sousedé jsou vybráni z prostoru ležícího v průniku dvou kruhů s poloměrem komunikační vzdálenosti uzlů. První kruh má střed ve zdrojovém uzlu a druhý má střed ležící na úsečce mezi zdrojovým a cílovým uzlem v komunikační vzdálenosti r od zdrojového uzlu. Situace je zřejmá z obrázku 2.21.

Poloha zdrojového uzlu A je dána souřadnicemi x_A a y_A , poloha cílového uzlu S je dána souřadnicemi x_S a y_S . d_A je vzdálenost uzlu A od cílového uzlu S a d_Z je vzdálenost uzlu Z od cílového uzlu S .

Pro souřadnice x_B a y_B hypotetického uzlu B platí rovnice 2.18.



Obrázek 2.21: EELIR - vyhledání vhodných sousedů pro předání zprávy. Zdroj: [10]

$$B(x_B, y_B) \Rightarrow x_B = (x_A + r \cdot \cos \theta), y_B = (y_A + r \cdot \sin \theta) \quad (2.18)$$

Souřadnice hypotetického uzlu B je možné vypočítat přímo ze souřadnic uzlů A a S podle rovnic 2.19.

$$\begin{aligned} x_B &= \left(x_A + r \cdot \frac{x_S - x_A}{\sqrt{(x_S - x_A)^2 + (y_S - y_A)^2}} \right) \\ y_B &= \left(y_A + r \cdot \frac{y_S - y_A}{\sqrt{(x_S - x_A)^2 + (y_S - y_A)^2}} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Po přijetí oznámení uzel Z vypočte rovnice 2.20.

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x_Z - x_A)^2 + (y_Z - y_A)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(x_Z - x_B)^2 + (y_Z - y_B)^2} \\ &\text{if } d_1 < r \text{ and } d_2 < r \text{ then true} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Pokud je podmínka 2.20 pravdivá, odešle uzel odpověď zdrojovému uzlu. Odpověď

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

43

obsahuje informaci o zbývající energii P_Z uzlu Z a vzdálenosti k cílovému uzlu d_Z vypočtené podle vzorce 2.21.

$$d_Z = \sqrt{(x_Z - x_S)^2 + (y_Z - y_S)^2} \quad (2.21)$$

Zdrojový uzel vybere vhodného kandidáta s nejvyšší zbytkovou energií a minimální vzdáleností k cílovému uzlu. Tomuto kandidátovi odešle datový paket. Tyto kroky se dále opakují.

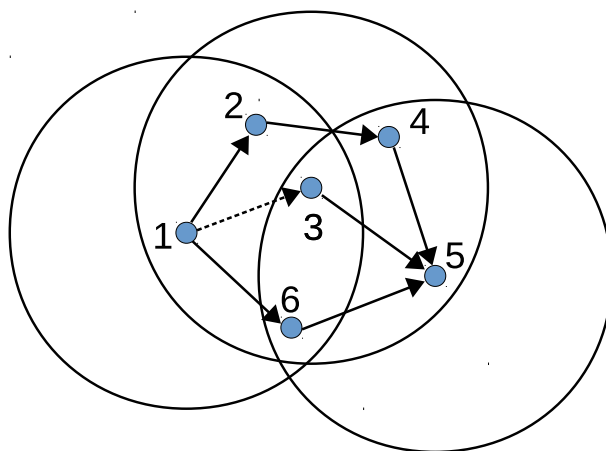
2.2.8 Hierarchické směrování

Další skupinou směrovacích algoritmů jsou algoritmy hierarchické. Tyto algoritmy jsou často založeny na existenci clusterů. Výhodou těchto algoritmů je lepší škálovatelnost než u algoritmů nehierarchických. Naopak je složitější vytváření clusterů a případné přiřazení adres respektujících hierarchii. V případě použití hierarchického směrování vykonávají jednotlivé uzly různé funkce podle jejich zařazení v hierarchii směrování. Rozlišujeme několik typů hierarchie, plošnou hierarchii (flat hierarchy), clusterovou hierarchii (cluster hierarchy) a hierarchii zónovou (zone hierarchy). Uvedené typy hierarchií a typické směrovací algoritmy v těchto hierarchiích využívané si popíšeme v následujících kapitolách.

2.2.8.1 Plošná hierarchie

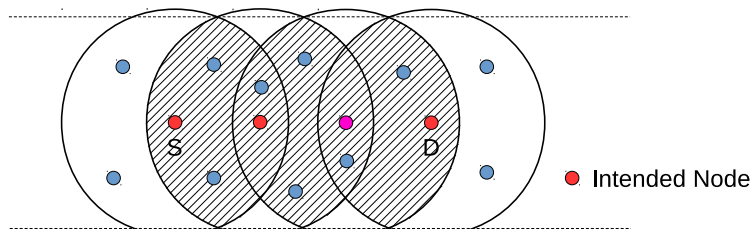
V plošné hierarchii mají všechny uzly v síti stejné schopnosti, ale vykonávají různé funkce. Příkladem je Robust cooperative Routing Protocol (RRP) [11]. Tento protokol využívá výhody všesměrového šíření bezdrátového signálu. Pokud zdrojový uzel odešle data sousedovi, pak tato data odposlechnou i ostatní sousedi v komunikačním dosahu. Při předávání dat dalším uzlům je potom jedno, zda data předá zvolený soused, nebo nějaký jiný uzel, čili zda byla zvolena alternativní cesta. Tato situace je zřejmá z obrázku 2.22.

Pokud uzel 1 chce předat data uzlu 5, může využít nejkratší cestu $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$. Při předávání dat mezi uzly 1 a 3 odposlechnou tato data také uzly 2 a 6. Pokud uzel 3 nepřijme data správně, mohou tato data předat uzly 2 a 6. RRP řeší spolupráci uzlů při předávání stejných dat od různých uzlů. RRP nejdříve vytvoří cestu mezi zdrojem a cílem, tuto cestu nazývá zvolenou cestou (intended path). Uzly, které jsou součástí zvolené cesty, nazýváme zvolenými uzly (intended nodes). Uzly, které jsou v komunikač-



Obrázek 2.22: RRP - alternativní cesty. Zdroj: [11]

ním dosahu nejméně dvou zvolených uzlů, nazýváme ochrannými uzly (guard nodes). Linku mezi ochranným uzlem a zvoleným uzlem nazýváme ochrannou linkou (guard link). Zvolená cesta spolu s ochrannými uzly vytváří robustní cestu, jak je zřejmé z obrázku 2.23.



Obrázek 2.23: RRP - zvolená a ochranná cesta. Zdroj: [11]

Na fungování protokolu můžeme také nahlížet tak, že data jsou postupně předávána mezi zónami. Pakety jsou mezi jednotlivými zónami předávány množinou spolupracujících uzlů.

RRP nejprve vytvoří zvolenou cestu mezi zdrojovým a cílovým uzlem. Po vytvoření zvolené cesty každý uzel z této cesty začne všesměrově posílat informace, které se využijí pro vytvoření robustní cesty. Informace obsažené ve vysílání jsou: zdrojový uzel, cílový uzel, ID vysílajícího uzlu, uzly pro upstream a downstream. Informace o zdrojovém uzlu a cílovém uzlu je využita k identifikaci zvolené cesty. Pokud nějaký uzel přijme řídicí

2.2. SMĚROVÁNÍ V BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍCH

45

nebo datový paket pro jednu zvolenou cestu od dvou různých uzlů, prohlásí se za uzel ochranný a začne spolupracovat s ostatními uzly na provozu robustní cesty. Jelikož je v komunikačním dosahu ochranného uzlu více zvolených uzlů, předává ochranný uzel informaci zvolenému uzlu, který je blíž cíli. Určení, který zvolený uzel je blíž cíli, je možné zjistit ze seznamu upstream a downstream uzlů. Pokud je jeden uzel součástí více robustních cest, udržuje oddělené informace pro každou cestu. Spolupráce uzlů při vysílání je řešena na linkové vrstvě.

Podrobnosti o RRP je možné nalézt v [11].

2.2.8.2 Clusterová hierarchie

V této hierarchii se uzly organizují do clusterů. Každý cluster má řídicí uzel (cluster head), který agreguje data a přeposílá je pomocí ostatních řídicích uzlů do základnové stanice. Tímto postupem se zvýší výdrž celé sítě, ale životnost řídicích uzlů se sníží.

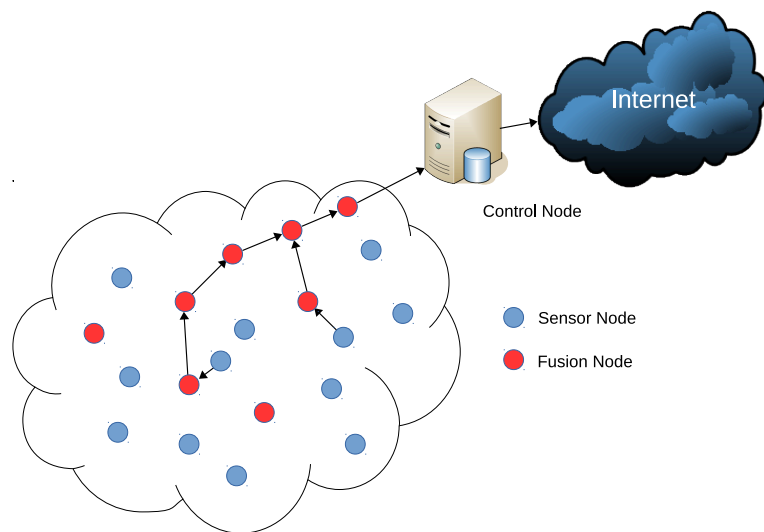
Jednou možností je rozdělit síť do třívrstvé architektury [12]. V této síti se nacházejí tři typy uzlů s různými schopnostmi a s různou funkcí. První typ jsou sensorové (Sensor S) uzly, které se běžně náhodně pohybují (např. působením vody a větru). Sensorové uzly nekomunikují s ostatními uzly s výjimkou slučovacích (Fusion F) uzlů. Se slučovacími uzly uzly sensorové komunikují přímo. Slučovací uzly udržují směrovací tabulky, přijímají data ze sensorových uzlů, která sloučí a nejkratší cestou je přeposílou do řídicích (Control C) uzlů. Řídicí uzly slouží jako datové sklady a brány do internetu (obr. 2.24).

Rozdělení sítě do více vrstev zjednoduší uzly a sníží cenu sensorové bezdrátové sítě. Úloha uzlu je v tomto případě dána jeho konstrukcí. Slučovací uzly pomocí Floydova algoritmu [45] vytvoří kostru bezdrátové sensorové sítě. Sensorové uzly jsou uspány do doby příjmu ACTIVATION paketu od slučovacího uzlu. Po přijetí ACTIVATION paketu sensorový uzel odpoví nejbližšímu slučovacímu uzlu ACK paketem a odvysílá sensorová data o svém okolí. Po odvysílání dat se sensorový uzel uspí do následujícího komunikačního cyklu. Clustery se tedy automaticky vytvářejí okolo slučovacích uzlů.

Dalším příkladem clusterové hierarchie je algoritmus Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [13] a jeho rozšíření Mobility LEACH (M-LEACH) [46].

2.2.8.3 Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

Směrovací protokol Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [13] je založen na rozdělení uzlů do clusterů. V každém clusteru se nachází vyhrazený uzel nazývaný Cluster Head (CH). Tento uzel se stará o inicializaci a správu plánování Time Division



Obrázek 2.24: Clusterová hierarchie - třívrstvá architektura. Zdroj: [12]

Multiple Access (TDMA) a odesílá agregovaná data sesbíraná od jednotlivých uzlů základnové stanici (BS) (obr. 2.25).

Práce protokolu probíhá v opakovaných cyklech. Každý cyklus zahrnuje dvě fáze:

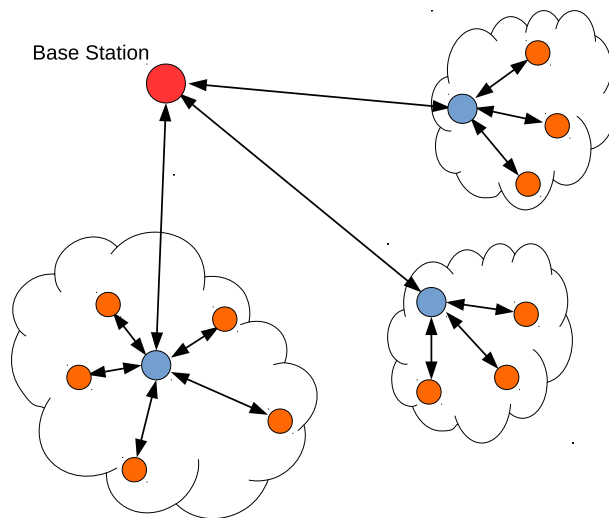
- nastavovací fázi,
- ustálenou fázi.

V nastavovací fázi se z uzlů vybírá Cluster Head uzel. Každý uzel si náhodně zvolí číslo mezi 0 a 1. Pokud je toto číslo menší než práh $T(n)$, uzel se stane Cluster Head. Práh $T(n)$ se vypočte podle vzorce 2.22.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot (r \bmod 1/P)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.22)$$

kde P je procento uzlů, které jsou Cluster Head, r je číslo aktuálního cyklu a G je množina uzlů, které nebyly v posledních $1/P$ cyklech zvoleny jako Cluster Head. Po zvolení Cluster Head uzel odešle oznamovací rámeček. Ostatní uzly si zvolí jako prostředníka Cluster Head s nejsilnějším signálem a přihlásí se k němu. Cluster Head uzel naplánuje komunikaci jednotlivých uzlů pomocí TDMA.

Během ustálené fáze všechny uzly odesílají data směrem k Cluster Head uzlu v časovém



Obrázek 2.25: LEACH. Zdroj: [13]

slotu vyhrazeném Cluster Head uzlem. Uzly, které nejsou Cluster Head, mohou mít odpojenou rádiovou část, pokud jsou mimo časový slot vyhrazený danému uzlu. Cluster Head uzel data agreguje, komprimuje a odešle je základnové stanici BS.

Algoritmus LEACH pracuje s následujícími předpoklady:

- každý uzel může komunikovat s BS,
- blízké uzly mají korelovaná data (předpoklad úspěšné komprese).

Protokol M-LEACH rozšiřuje možnosti protokolu LEACH o mobilitu Cluster Head uzlů i uzlů ostatních. Podrobnější informace je možné nalézt v [46].

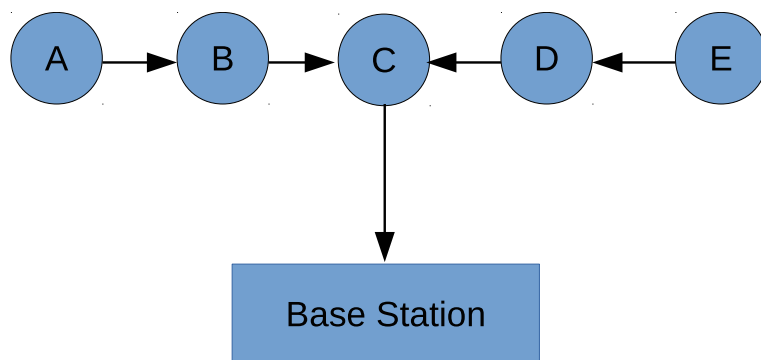
2.2.8.4 Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

Algoritmus Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) [14] je vylepšením a rozšířením algoritmu LEACH. PEGASIS je založen na vytvoření řetězu stanic. Práce algoritmu PEGASIS probíhá ve dvou krocích:

- vytvoření řetězu,
- sběru dat.

Vytvoření řetězu je možné různými způsoby. Jednou možností je vypočtení řetězu centrálně v základnové stanici (BS) a následné odeslání této informace všem ostatním

uzlům. Další možnost je využití hladového algoritmu. V tomto případě spustíme hladový algoritmus v nejvzdálenějším uzlu od BS. Tento uzel nalezne nejbližšího souseda a přidá jej do řetězu. Tento právě přidáný uzel najde opět svého nejbližšího souseda a opět jej přidá do řetězu. Jelikož každý uzel může být v řetězu právě jednou, vybírají se nejbližší sousedi pouze z uzlů ještě nepřidaných do řetězu. Uzel, který komunikuje s BS, se v každém kole mění (obr. 2.26).



Obrázek 2.26: PEGASIS - vytváření řetězce stanic. Zdroj: [14]

Pro vytvoření řetězu je potřebná globální znalost sítě. V případě výpadku některého uzlu (například při vybití baterie) je tento uzel hladovým algoritmem překlenut.

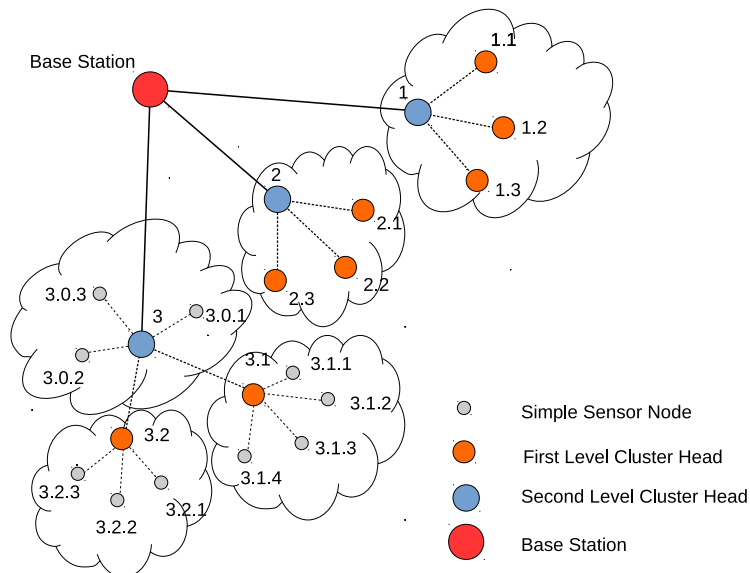
Data se předávají mezi sousedy v řetězu, jsou agregována a případně odeslána BS. Podrobnosti o algoritmu PEGASIS je možné nalézt v [14].

2.2.8.5 Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network

Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network (TEEN) [15] je víceúrovňový hierarchický směrovací protokol. Pro vytvoření clusterů se používá stejný mechanismus jako v případě protokolu LEACH. Vzdálenější Cluster Head uzly od základnové stanice (BS) vytváří Cluster Head uzly první úrovně a bližší vytváří Cluster Head uzly druhé úrovně. Sensory v clusteru předávají data svému Cluster Head uzlu, ten tato data agreguje a předá je Cluster Head uzlu vyšší úrovně, dokud data nejsou předána základnové stanici (obr. 2.27).

Předávání dat při použití směrovacího algoritmu TEEN není kontinuální, ale data se předávají, pouze pokud měřená hodnota překoná hodnoty nastavené jako prahové. Pro řízení komunikace jsou nastaveny dva limity:

- tvrdý práh – hodnota měřené veličiny, při jejímž překonání se zapne rádiový



Obrázek 2.27: TEEN - struktura sítě. Zdroj: [15]

modul a data jsou odeslána BS,

- měkký práh – hodnota, o kterou se musí změnit měřená veličina, aby se zapnul rádiový modul a data byla odeslána BS.

Pro odeslání dat musí být překonány oba limity zároveň. Tvrdý práh zaručuje předávání dat pouze v okamžiku, když se hodnota měřené veličiny pohybuje v oblasti zajímavých hodnot. Měkký práh eliminuje odesílání dat při malé změně měřené veličiny.

TEEN umožňuje dynamické kompromisní nastavení mezi energetickou náročností, přesností měření a rychlostí reakce na změnu.

TEEN není vhodný pro senzorové sítě s pravidelným předáváním naměřených dat. Jedná se o typického představitele reaktivních sítí.

2.2.8.6 Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol

Vylepšením směrovacího algoritmu TEEN je směrovací algoritmus Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (APTEEN) [47]. Podobně jako v případě protokolu TEEN se vybere Cluster Head na jednu periodu. Na začátku této periody Cluster Head odešle broadcastem následující informace:

- Atributy (A) – jedná se o seznam sledovaných veličin.
- Prahy (Thresholds) (TH) – jedná se o měkký a tvrdý práh podobně jako v protokolu TEEN. Prahy se tedy dají nastavit dynamicky v každé periodě.
- Plánování (Schedule) – jedná se o TDMA časový slot pro každý uzel.
- Count Time (TC) – maximální časová perioda mezi dvěma úspěšnými odesláními dat. Tato perioda umožňuje použít APTEEN v proaktivním módu.

Směrovací protokol APTEEN nabízí:

- řízení spotřeby energie nastavením Count Time a prahů,
- nastavení Count Time a prahů je dynamické a lze jej změnit v každé periodě,
- periodický odečet hodnot kombinovaný s odečtem při významné změně sledovaných veličin,
- změnou parametrů můžeme přecházet od proaktivního odečtu k odečtu reaktivnímu.

V tabulce 2.2 je vidět porovnání základních vlastností výše uvedených hierarchických směrovacích protokolů.

Tabulka 2.2: Porovnání Hierarchických směrovacích algoritmů. Zdroj: [48]

Algoritmus	LEACH	TEEN	APTEEN	PEGASIS
Klasifikace	hierarchický	hierarchický	hierarchický	hierarchický
Model doručování dat	Cluster Head	aktivní práh	aktivní práh	řetězec uzlů
Agregace dat	ano	ano	ano	ne
Využití energie	vysoké	vysoké	vysoké	maximální
Škálovatelnost	dobrá	dobrá	dobrá	ovlivněná řetězením uzlů
QoS	ne	ne	ne	ne
Založen na dotazech	ne	ne	ne	ne
Režie	vysoká	vysoká	vysoká	nízká
Životnost sítě	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá
Sledování zdrojů	ano	ano	ano	ano
Mobilita	Fixní BS	Fixní BS	Fixní BS	Fixní BS

2.3 Souhrn

V této kapitole byly popsány senzorové bezdrátové sítě. Dále byl popsán význam algoritmů pro nastavení topologie a uvedeny vybrané algoritmy pro nastavení topologie. Nakonec byla popsána problematika směrování v bezdrátových senzorových sítích a uve-

2.3. *SOUHRN*

51

deny vybrané algoritmy pro směrování v sensorových bezdrátových sítích. Při zkoumání vlastností algoritmů nastavení topologie byl navržen algoritmus nastavení topologie při použití směrových antén, který byl publikován v [O2]. Tento algoritmus má k této práci jen okrajový vztah, proto mu není věnována větší pozornost.

Kapitola 3

Antény a přenos bezdrátového signálu

Tato kapitola popisuje základní informace o anténách a přenosu bezdrátového signálu. Dále se zaměřuje na anténní řady a chytré antény. Na konci kapitoly jsou uvedeny informace o distribuovaném tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze, který je zásadní pro tuto práci.

3.1 Antény

Antény lze definovat různými způsoby. Pro tuto práci byly zvoleny definice vycházející z [49], [50] a [51].

Definice 1. *Anténa je zařízení, které funguje jako filtr frekvence, impedance, prostoru (směru) a polarizace.*

Definice 2. *Anténa je součást elektrického obvodu, který přizpůsobuje impedanci elektrického obvodu, ke kterému je anténa připojena, impedanci prostředí ve kterém je anténa umístěna.*

V této práci je předpokládáno, že nedochází k nepřizpůsobení v impedanci, frekvenci a polarizaci, a toto nepřizpůsobení je zanedbáváno. Zajímavé je jen prostorové (směrové) uspořádání vysílací a přijímací antény.

3.1.1 Parametry antén

Tato kapitola se zaměřuje především na ty parametry, které jsou z pohledu této práce důležité. Těmito parametry jsou směrová a vyzařovací charakteristika antény, směrovost, zisk antény a efektivní plocha a délka (výška) antény. Popis parametrů antén je volně převzat z [52].

3.1.1.1 Směrová a vyzařovací charakteristika antény

Směrová a vyzařovací charakteristika antény je vlastně jedna veličina popisující směrové vlastnosti antény. Směrová charakteristika (radiation pattern) se používá u přijímacích antén, zatímco vyzařovací charakteristika antény se používá u antén vysílacích. Elektromagnetické pole \mathbf{E} vyzařované anténou lze ve sférických souřadnicích popsat vzorcem 3.1,

$$\mathbf{E} = C \cdot Ae^{j\psi} \mathbf{a}_0 F(\vartheta, \varphi) \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.1)$$

kde C jsou konstanty prostředí,

$Ae^{j\psi} \mathbf{a}_0$ je funkce buzení (amplituda a fáze zdrojové veličiny),

$F(\vartheta, \varphi)$ je vyzařovací charakteristika (prostorové rozložení vyzařované intenzity pole)

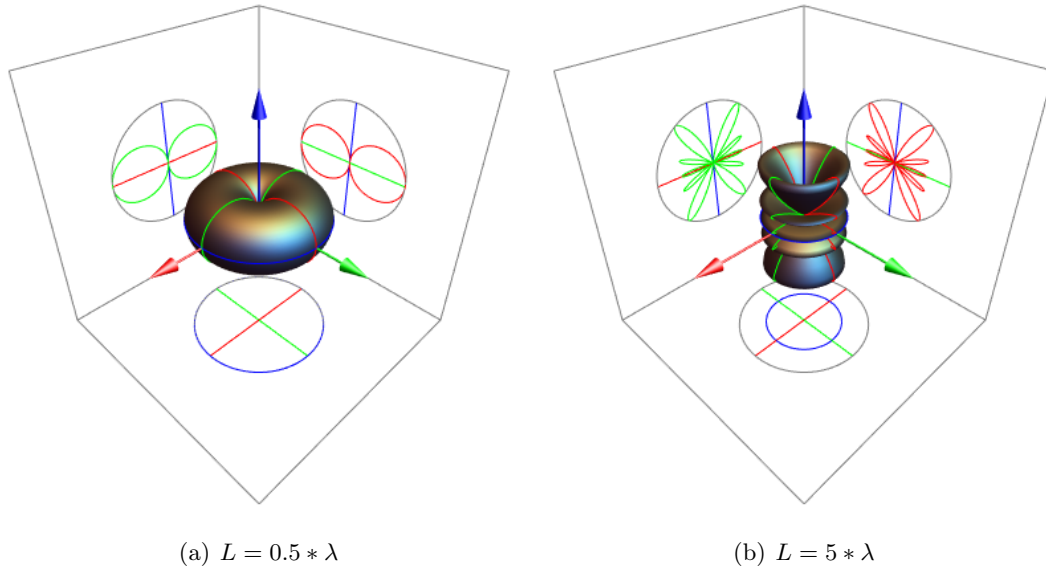
a $\frac{e^{-jkr}}{r}$ je závislost amplitudy a fáze vyzařovaného pole v závislosti na vzdálenosti r od antény.

Běžná anténa vysílá/přijímá elektromagnetickou energii do/z různých směrů s různou intenzitou. Směrové vlastnosti antény v závislosti na prostorových souřadnicích jsou nazývány **směrovou charakteristikou antény**. Rozlišuje se **výkonová směrová charakteristika** (power pattern) a **směrová (napěťová) charakteristika** (field pattern). Výkonová směrová charakteristika zobrazuje přijímaný výkon a směrová charakteristika zobrazuje intenzitu pole. Příklad vyzařovacích charakteristik dipólů o délce $L = 0,5 * \lambda$ a $L = 5 * \lambda$ je na obrázku 3.1.

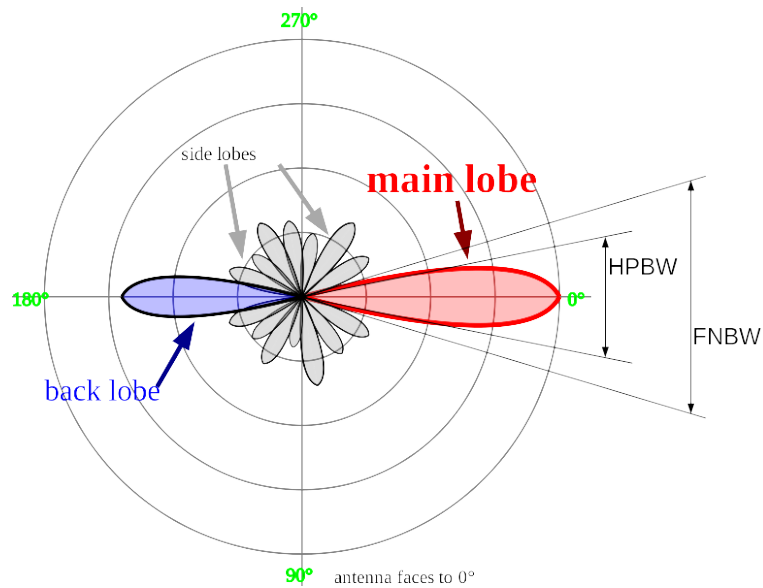
Části směrové charakteristiky jsou nazývány (obr. 3.2):

- hlavní svazek (maximum) (major lobe), tento svazek představuje maximum vyzařovacích/přijímacích vlastností a většinou představuje směr hlavního příjmu,
- vedlejší svazky (maxima) (minor lobes) jsou všechny svazky mimo hlavní svazek,
- postranní svazky (maxima) (side lobes) jsou první vedlejší svazky, často jsou největší z vedlejších,
- zpětné svazky (maxima) (back lobes), vedlejší svazky, které leží v opačném směru než svazek hlavní.

Úrovně vedlejších svazků se udávají v poměru ku hlavnímu svazku. Další důležitou charakteristikou je šířka svazku. Nejzajímavější je šířka hlavního svazku. Tato šířka se udává buď jako šířka hlavního svazku vymezená poklesem (teoretickým) na nulovou



Obrázek 3.1: Vyzařovací charakteristiky dipólů s různou délkou L . Vypočteno pomocí: [16]

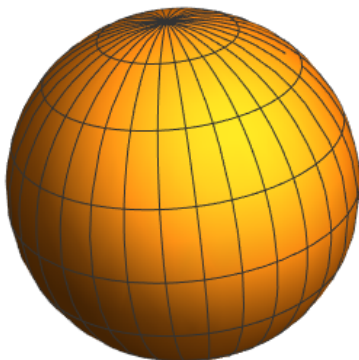


Obrázek 3.2: Definice svazků (maxim) směrové antény. Zdroj: [17]

hodnotu (FNBW - First Null Beamwidth), nebo častěji šířka hlavního svazku vymezená poklesem výkonu o 3 dB, tj. poklesem výkonu na polovinu (HPBW - Half Power Beamwidth).

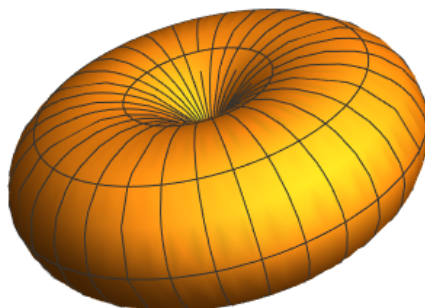
3.1.1.2 Všesměrová anténa

Pro řadu výpočtů je užitečné definovat teoretickou anténu, která vyzařuje stejně do všech směrů, tedy jejíž vyzařovací vlastnosti nezávisí na prostorových souřadnicích. Taková anténa se nazývá **všesměrovou (isotropní)** (obr. 3.3). Tato anténa není prakticky realizovatelná, ale lze jí vhodně využít jako anténu referenční. Speciálním příkladem směrové antény je anténa, která má směrové vlastnosti jenom v jedné rovině a ve druhé rovině má vlastnosti všesměrové. Taková anténa se nazývá **omnidirectional**. Omnidirectional charakteristiku má například dipól (obr. 3.4).



Obrázek 3.3: Vyzařovací charakteristika všesměrové (isotropní) antény

V této práci se většinou uvažuje využití všesměrové antény, což by mohlo omezit praktické využití výsledků této práce. Jelikož se však zároveň uvažuje rozmístění prvků sítě výhradně v ploše, je možné dosáhnout podobných výsledků i s použitím omnidirectional antén, které jsou prakticky realizovatelné.



Obrázek 3.4: Vyzařovací charakteristika omnidirectional antény

3.1.1.3 Směrovost

Poměr intenzity vyzařování U v daném směru k intenzitě U_0 referenční (většinou isotropické) antény je **směrovost antény** D (directive gain/directivity). Směrovost antény se může uvažovat v libovolném směru (directive gain), nebo pouze ve směru hlavního svazku antény (maximální směrovost) (directivity). Směrovost popisují následující rovnice:

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{U(\vartheta, \varphi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\vartheta, \varphi)}{P_T} \quad (3.2)$$

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_T} \quad (3.3)$$

$$U_{max} = B_0 F_{max}^2(\vartheta_0, \varphi_0) \quad (3.4)$$

P_T je celkový vyzařovaný výkon, F_{max} je maximum napěťové směrové charakteristiky, B_0 je konstanta úměrnosti a ϑ_0, φ_0 určují směr maxima vyzařování.

Směrovost se obvykle udává v decibelech, potom tedy platí:

$$D_{dB} = 10 \cdot \log_{10} D \quad (3.5)$$

Jako referenční zářič lze pro určení směrovosti použít kromě isotropní antény i krátký dipól (elementární dipól), nebo půlvlnný dipól. Pro přepočítání směrovosti se pak odečte 1,76 dB pro elementární dipól a 2,15 dB pro půlvlnný dipól.

3.1.1.4 Účinnost antény

Vazba mezi celkovým vyzářeným výkonem P_{out} a výkonem na vstupu bezztrátové antény P_{in} se nazývá **účinnost antény** (antenna efficiency).

$$P_{out} = \eta P_{in} \quad (3.6)$$

η je tedy celková účinnost antény a platí:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.7)$$

Ztráty vznikají na vstupu i uvnitř anténní struktury. Na vstupu se jedná o ztráty způsobené odrazem výkonu při nepřizpůsobení napájecího vedení a antény. Uvnitř antény jsou ztráty způsobeny dielektrickými ztrátami v dielektriku a v důsledku konečné vodivosti kovových prvků antény.

3.1.1.5 Zisk antény

Zisk antény (antenna gain) je dán poměrem vysílaného výkonu k výkonu dodávanému na vstup antény. Opět se zisk určuje ve vztahu k nějaké referenční anténě. Určuje se zisk ve směru hlavního svazku (maximum power gain), nebo relativní zisk. Relativní zisk je výkonový zisk v daném směru k výkonovému zisku referenční antény. Nejčastěji používané referenční antény jsou isotropní anténa, elementární dipól a půlvlnný dipól.

Pro zisk G platí vztah:

$$G = \eta D \quad (3.8)$$

kde η je celková účinnost antény a D je směrovost antény.

Zisk antény určuje poměr výkonu na vstupu bezztrátové referenční antény a výkonu,

3.1. ANTÉNY

59

který je nutné přivést na vstup skutečné antény, aby produkovala v daném směru stejný výkonový tok.

3.1.1.6 Efektivní plocha antény

Maximální efektivní plocha antény (effective aperture) A_{efmax} je definována jako poměr výkonu na přizpůsobené zátěži P_{out} k výkonové hustotě dopadající elektromagnetické vlny S_{in} :

$$A_{efmax} = \frac{P_{out}}{S_{in}} \quad (3.9)$$

Maximální efektivní plocha antény je dána vztahem:

$$A_{efmax} = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) D_{max} \quad (3.10)$$

3.1.1.7 Vzdálená zóna

V rámci tohoto textu jsou zkoumány vlastnosti antén ve vzdálené zóně (far-field). Tato zóna je zjednodušeně definována v závislosti na maximálním rozměru antény D a použité vlnové délce λ .

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.11)$$

Pro typicky používané antény v senzorech o velikosti řádově centimetrů a uvažovaných frekvencích kolem 2,5 GHz vychází vzdálená oblast ve vzdálenosti větší než 16 cm. Při uvažovaných vzdálenostech senzorů v jednotkách až stovkách metrů se senzory skutečně nacházejí ve vzdálené oblasti.

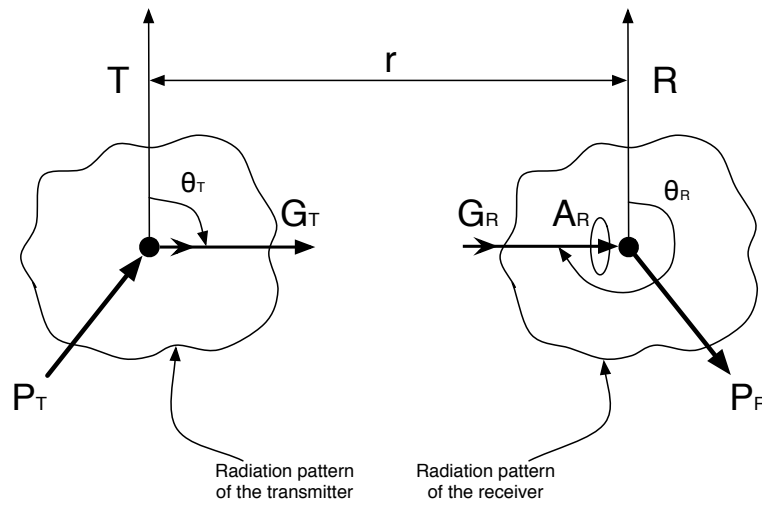
3.1.1.8 Šíření signálu ve volném prostoru

Nejjednodušším modelem šíření signálu je šíření signálu ve volném prostoru [53]. Ve volném prostoru nejsou předpokládány žádné překážky a odrazy.

Nechť jsou vysílač T a přijímač R umístěny ve stejné ploše ve vzdálenosti r . Stejně jako ve všech ostatních případech v tomto textu uvažujeme, že přijímací anténa je umístěna ve vzdálené zóně (obr. 3.5).

Parametry modelu jsou následující:

- výkon vstupující do vysílače $P_T[W]$,
- očekávaný výkon na přijímači $P_R[W]$,
- vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem $r[m]$,
- zisk vysílací antény ve směru k přijímači $G_T(\theta_T)[dBi]$,
- zisk přijímací antény ve směru k vysílači $G_R(\theta_R)[dBi]$,
- plocha přijímací antény ve směru k vysílači $A_R(\theta_R)[m^2]$,
- směr k přijímači $\theta_T[^\circ]$ a k vysílači $\theta_R[^\circ]$.



Obrázek 3.5: Šíření signálu ve volném prostoru

Při šíření signálu ve volném prostoru lze předpokládat, že celkový výkon vysílače je vysílán do všech směrů (se zohledněním směrovosti vysílací antény). Poté je výkonová hustota vyzařovaného pole vysílačem v místě přijímací antény $W(\theta_T)[W/m^2]$ dána vztahem 3.12

$$W(\theta_T) = \frac{P_T}{4\pi r^2} \cdot G_T^*(\theta_T) \quad (3.12)$$

kde $G_T^*(\theta_T)$ je zesilovací faktor (amplification factor) vysílací antény ve směru k přijímači. Zisk vysílací antény $G_T(\theta_T)[dBi]$ je možné vypočítat podle vztahu 3.13.

$$G_T(\theta_T) = 10 \cdot \log_{10}(G_T^*(\theta_T)) \quad (3.13)$$

Podobným způsobem je možné definovat zesilovací faktor přijímací antény $G_R^*(\theta_R)$.

3.2. ANTÉNNÍ ŘADY

61

Energie indukovaná na přijímací anténě je ovlivněna plochou této antény a platí pro ni vztah 3.14.

$$P_R = W(\theta_T) \cdot A_R(\theta_R) \quad (3.14)$$

Pro elementární elektrický zářič (Hertzův dipól) platí mezi plochou a ziskem vztah 3.15.

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G^* \quad (3.15)$$

Poté tedy pro energii indukovanou na přijímací anténě platí:

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot G_T^*(\theta_T) \cdot G_R^*(\theta_R) \quad (3.16)$$

Po vyjádření rovnice 3.16 v decibelech platí:

$$P_R = P_T + G_T(\theta_T) + G_R(\theta_R) + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \quad (3.17)$$

Rovnice 3.16 resp. 3.17 popisuje přenos signálu v otevřeném prostoru (Free Space Path Loss - FSPL). V tomto případě výkon ve wattech klesá se čtvercem vzdálenosti.

Některé modely mohou uvažovat větší útlum ve vztahu ke vzdálenosti r . Rovnice se pak změní na:

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)^\beta \cdot G_T^*(\theta_T) \cdot G_R^*(\theta_R) \quad (3.18)$$

respektive

$$P_R = P_T + G_T(\theta_T) + G_R(\theta_R) + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) - 10\beta \log_{10} r \quad (3.19)$$

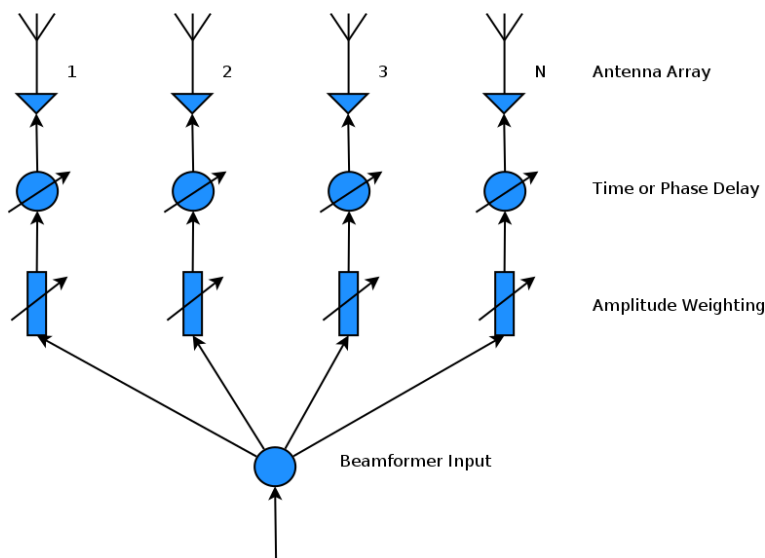
3.2 Anténní řady

Anténní řady (Antenna Arrays) jsou anténní systémy tvořené dvěma a více anténami. Pro anténní řady se někdy používá termín anténní pole. Smyslem anténních řad při vysílání je možnost tvarovat vyzařovací charakteristiku skupiny zářičů. Anténní řada je

podle [54] tvořena:

- jedním vysílačem,
- množinou antén,
- mechanismem umožňujícím posunout fázi a sílu signálu vycházejícího z vysílače do každé jednotlivé antény.

Schéma anténní řady je vidět na obrázku 3.6.



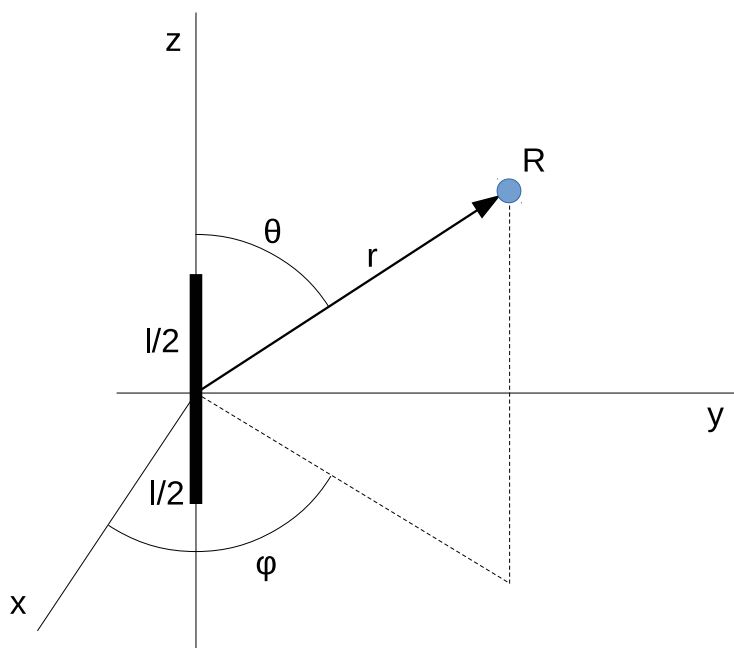
Obrázek 3.6: Schéma anténní řady

Jedním z nejjednodušších příkladů anténní řady je anténní řada tvořená dvěma ideálními anténami, nebo dvěma půlvlnnými dipóly. Pro výpočet vlastností anténní řady je možné využít anténní řadu tvořenou půlvlnnými dipóly, které se lépe blíží anténám využívaným v senzorech tvořících sensorové sítě. Výpočty se provádějí ve vzdálené oblasti (kap. 3.1.1.7).

3.2.1 Půlvlnný dipól

Nechť je půlvlnný dipól umístěný v počátku souřadnic podle obrázku 3.7.

Pro intenzitu elektrického pole \vec{E}_i vertikálního půlvlnného dipólu v bodě R při průmětu do horizontální plochy xy platí rovnice 3.20



Obrázek 3.7: Dipól umístěný v počátku souřadnic

$$\vec{E}_i = \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_0 \cdot l}{4\pi} \cdot \frac{e^{-j(kr+\beta)}}{r} \cdot \sin \theta, \quad (3.20)$$

kde:

- \hat{a}_θ je jednotkový vektor - versor,
- η je impedance volného prostoru ($120\pi\Omega$),
- k je úhlové vlnové číslo ($\frac{2\pi}{\lambda}$),
- I_0 je vstupní proud,
- l je délka dipólu ($\frac{\lambda}{2}$),
- r je vzdálenost vyšetřovaného bodu od středu anténní řady,
- β je počáteční fázový posun vstupního signálu,
- θ je úhel mezi osou z a směrem mezi počátkem souřadnic a bodem R.

Intenzitu elektrického pole vertikálního půlvlnného dipólu v bodě R promítnutou do vertikální roviny lze vypočíst podle vzorce 3.21

$$\vec{E}_i = \hat{a}_\phi \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_0 \cdot l}{4\pi} \cdot \frac{e^{-j(kr+\beta)}}{r} \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.21)$$

kde ϕ je úhel mezi osou x a směrem mezi počátkem souřadnic a bodem R.

Pro průměrnou výkonovou hustotu vyzařovaného pole platí:

$$W_{av} = \frac{1}{2} \cdot \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}] \quad (3.22)$$

Pro intenzitu magnetického pole platí:

$$|\vec{H}| = \frac{|\vec{E}|}{\eta} \quad (3.23)$$

Dosazením se získá upravený vzorec pro výkonovou hustotu vyzařovaného pole 3.24:

$$W_{av} = \frac{1}{2} \cdot |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (3.24)$$

3.2.2 Anténní řada dvou dipólů

Jak bylo uvedeno výše, je možné použít pro výpočet vlastností anténní řady jeden z nejjednodušších případů anténní řady, tedy anténní řadu sestávající ze dvou půlvlnných dipólů. Pro zjednodušení se uvažuje symetrické anténní pole tvořené shodnými dipóly o délce l , vzdálené od sebe na vzdálenost d (obr. 3.8). Dipóly budou napájeny shodným proudem I_0 .

Pro intenzitu elektrického pole anténní řady platí:

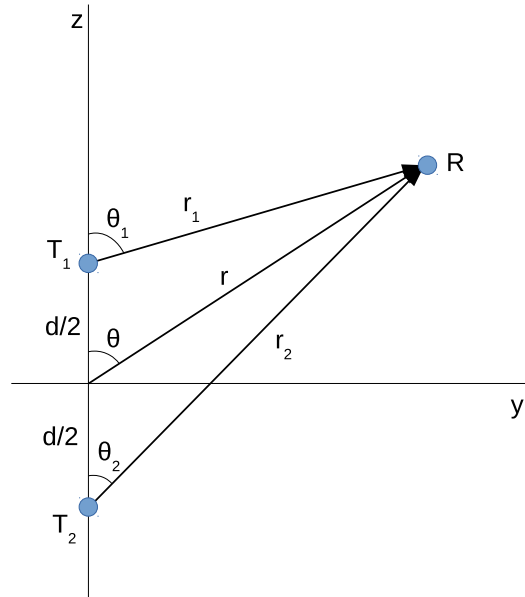
$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_0 \cdot l}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{e^{-j(kr_1 - \frac{\beta}{2})}}{r_1} \cdot \cos\theta_1 + \frac{e^{-j(kr_2 + \frac{\beta}{2})}}{r_2} \cdot \cos\theta_2 \right\}, \quad (3.25)$$

kde β je rozdíl fází v napájení obou dipólů.

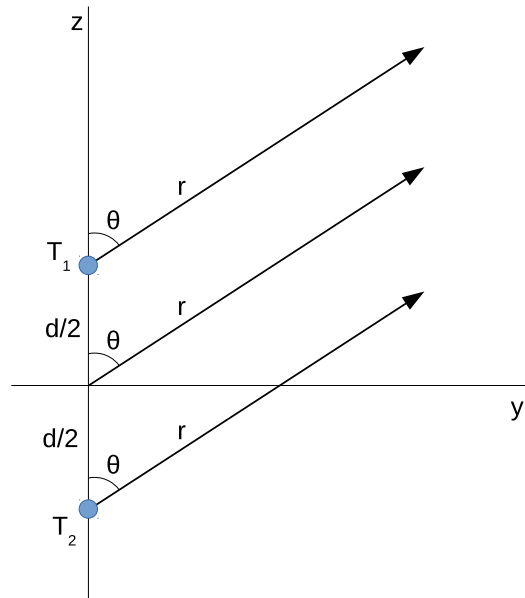
Ve vzdálené zóně lze předpokládat, že úhly k bodu R jsou přibližně stejné (obr. 3.9) a platí:

$$\theta_1 \simeq \theta_2 \simeq \theta \quad (3.26)$$

3.2. ANTÉNNÍ ŘADY



Obrázek 3.8: Symetrická anténní řada se dvěma prvky



Obrázek 3.9: Symetrická anténní řada se dvěma prvky - vzdálená zóna

66 KAPITOLA 3. ANTÉNY A PŘENOS BEZDRÁTOVÉHO SIGNÁLU

Pro rozdíl fází v bodě R platí:

$$r_1 \simeq r - \frac{d}{2} \cos \theta \quad (3.27)$$

$$r_2 \simeq r + \frac{d}{2} \cos \theta \quad (3.28)$$

Z pohledu rozdílů amplitud nemá rozdíl vzdáleností vliv a platí:

$$r_1 \simeq r_2 \simeq r \quad (3.29)$$

Za těchto předpokladů je možné vzorec 3.25 upravit:

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_0 \cdot l \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \cos \theta \left\{ e^{\frac{j(kd \cos \theta + \beta)}{2}} + -e^{\frac{j(kd \cos \theta + \beta)}{2}} \right\} \quad (3.30)$$

a po další úpravě se dostane:

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_0 \cdot l \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \cos \theta \left\{ 2 \cos \left[\frac{1}{2} \cdot (kd \cos \theta + \beta) \right] \right\} \quad (3.31)$$

První část výrazu 3.31 vyjadřuje intenzitu elektrického pole vyzářované jednou anténou umístěnou v počátcích souřadnic a druhá část tohoto výrazu se nazývá faktor anténní řady (array factor) AF .

$$AF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} \cdot (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.32)$$

Faktor anténní řady je často udáván ve své normalizované formě:

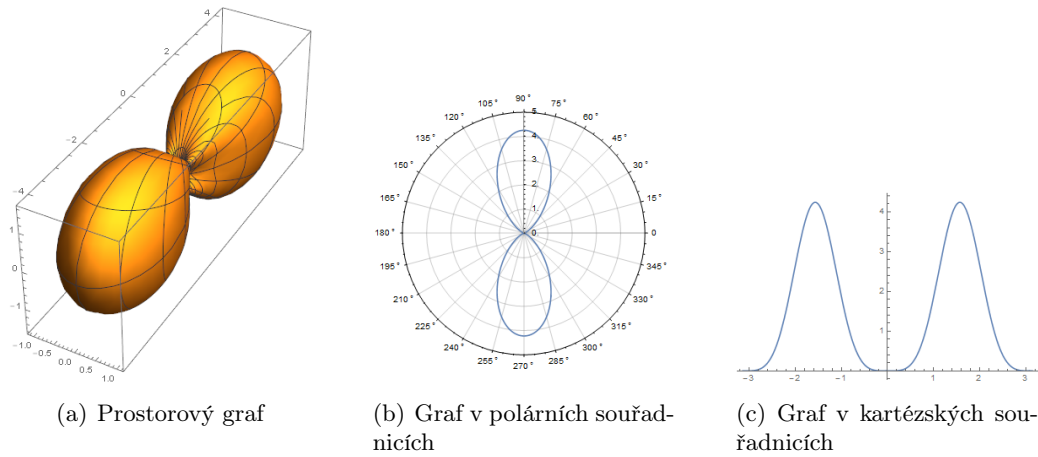
$$(AF)_n = \cos \left[\frac{1}{2} \cdot (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.33)$$

Každá anténní řada má svůj vlastní faktor anténní řady. Tento faktor je ovlivněn počtem elementů anténní řady, geometrickým uspořádáním těchto elementů, jejich relativní magnitudou, relativní fází a vzdáleností. Faktor anténní řady není ovlivněn směrovou charakteristikou jednotlivých elementů anténní řady.

Vyzařovací charakteristika anténní řady tvořené půlvlnnými dipóly je vidět na obrázku 3.10. Dipóly jsou od sebe vzdáleny na vzdálenost $d = 0.25 * \lambda$ a vstupní signál do

3.2. ANTÉNNÍ ŘADY

67



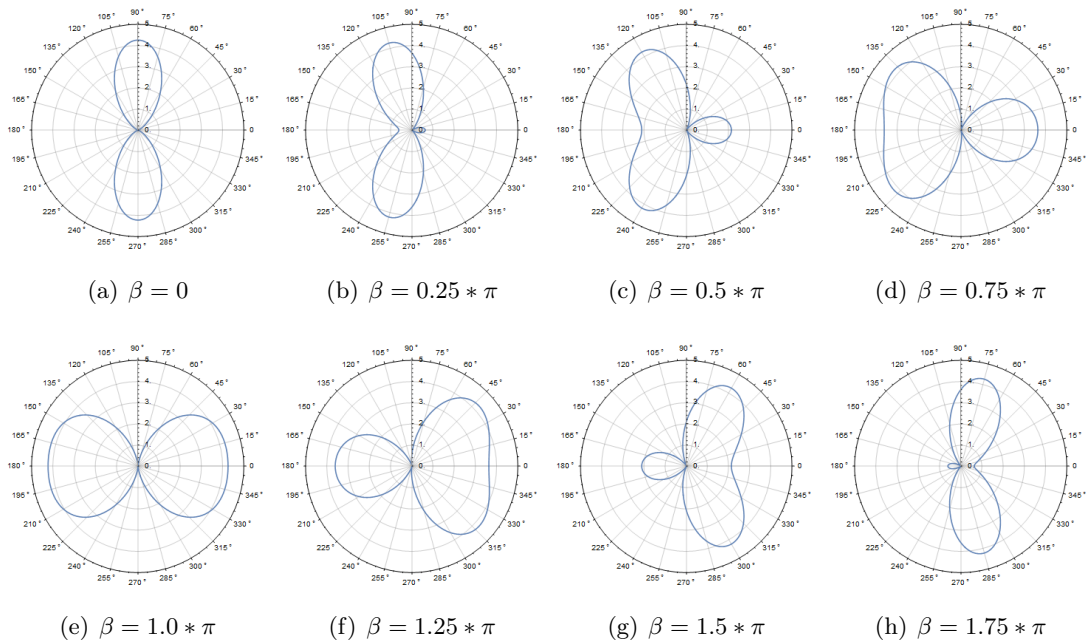
Obrázek 3.10: Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $d = 0.25 * \lambda$, $\beta = 0$.

jednotlivých antén je ve fázi. Tato anténní řada tedy vyzařuje především ve směru 90° a 270° a ve směru 0° a 180° nevyzařuje.

Při změně fázového posunu mezi signály vstupujícími do jednotlivých antén dochází ke změně vyzařovací charakteristiky anténní řady a změně směru hlavního svazku. Změna vyzařovací charakteristiky při posunu fáze mezi vstupními signály při použití anténní řady se stejnými parametry jako na obrázku 3.10 je zřejmá z obrázku 3.11. Pro zobrazení byl zvolen posun fáze mezi signály $\beta = [0, 0.25 * \pi, 0.5 * \pi, 0.75 * \pi, 1.0 * \pi, 1.25 * \pi, 1.5 * \pi, 1.75 * \pi]$. Důležité je, že velikost hlavního svazku je stále stejně velká.

Pokud se bude zvětšovat vzdálenost mezi dipóly, zvětšuje se počet vedlejších svazků. Vedlejší svazky jsou užší, ale mají stejnou velikost jako svazek hlavní. Změna vyzařovací charakteristiky anténní řady dvou dipólů při změně vzdálenosti mezi dipóly $d = [0.25 * \lambda, 0.5 * \lambda, 1.0 * \lambda, 2.0 * \lambda, 5.0 * \lambda]$ s fázovým posunem mezi vstupními signály $\beta = 0.5 * \pi$ je vidět na obrázku 3.12.

Z výše uvedených vzorců vyplývá, že v ideálním případě díky anténní řadě tvořené dvěma prvky je možné při stejném výkonu vkládaném do obou antén překonat až vzdálenost $d' = 2 * d * \sqrt{2}$, kde d je původní vzdálenost překlenutá původní anténou s původním výkonem. Pokud se původní výkon rozdělí mezi obě antény, čili použije se stejný výkon jako pro jednu anténu, je možné překlenout vzdálenost $d' = 2 * d$. Pro překlenutí stejné vzdálenosti poté stačí celkový výkon $P' = \frac{P}{\sqrt{2}}$, kde P je původní výkon vkládaný do jedné antény a P' je celkový výkon, který se vhodně rozdělí do obou antén.



Obrázek 3.11: Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $d = 0.25 * \lambda$ s různým fázovým posunem vstupního signálu.

Tím jsou potvrzeny pracovní hypotézy 1 a 2.

3.2.3 Senzorové anténní řady

V případě anténních řad tvořených senzory může být rozdíl vzdáleností mezi jednotlivými anténami a přijímačem nezanedbatelný a není možné provést zjednodušení podle vzorce 3.26, vzorce 3.27, vzorce 3.28 a vzorce 3.29.

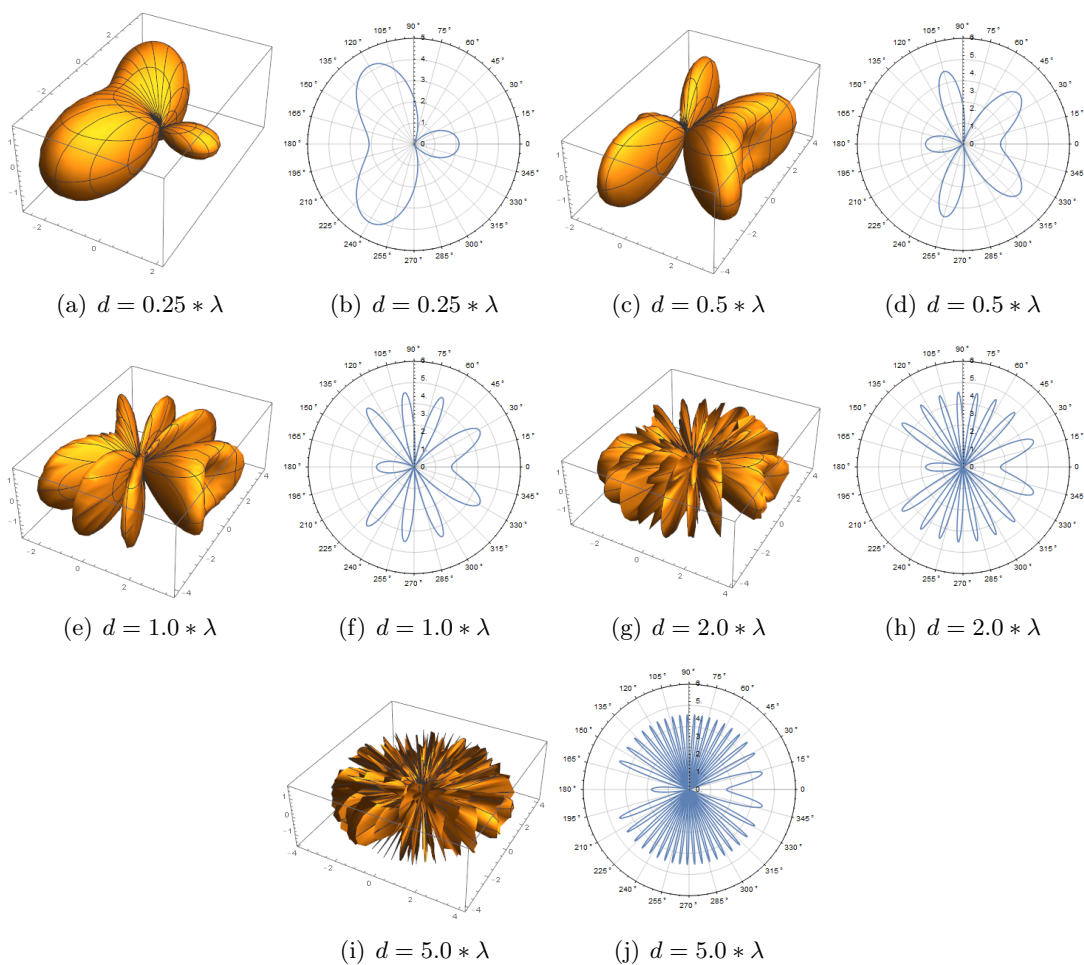
Pokud jsou umístěny dva vysílače T_1 a T_2 podle obrázku 3.13, pak pro vzdálenost prvního a druhého senzoru od přijímače platí vzorec 3.34 resp 3.35

$$r_1 = \sqrt{(x_R - x_1)^2 + (y_R - y_1)^2} \quad (3.34)$$

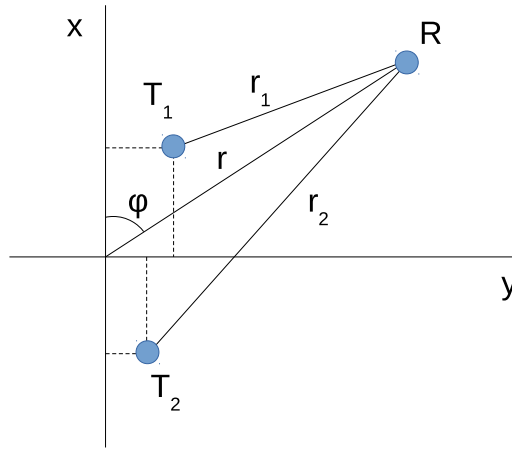
$$r_2 = \sqrt{(x_R - x_2)^2 + (y_R - y_2)^2} \quad (3.35)$$

kde x_R a y_R jsou souřadnice cílového uzlu R za předpokladu, že hypotetická anténa tvořená dvojicí dipólů leží v počátku souřadnic. Pro souřadnice platí vzorce 3.36 a 3.37.

3.2. ANTÉNNÍ ŘADY



Obrázek 3.12: Vyzařovací charakteristiky anténní řady půlvlnných dipólů s parametry: $\beta = 0.5 * \lambda$ s různou vzdáleností mezi dipóly.



Obrázek 3.13: Anténní řada tvořená dvěma senzory T_1 a T_2

$$x_R = r \cos \varphi \quad (3.36)$$

$$y_R = r \sin \varphi \quad (3.37)$$

Vzdálenost jednotlivých antén od přijímače je tedy (vzorec 3.38).

$$r_i = \sqrt{(r \cos \varphi - x_i)^2 + (r \sin \varphi - y_i)^2} \quad (3.38)$$

Pro vektor intenzity elektrického pole jedné antény platí vzorec 3.39

$$\vec{E}_i = \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_{0i} \cdot l_i}{4\pi r_i} \cdot e^{-j(kr_i + \beta_i)} \cdot \sin \theta \quad (3.39)$$

pro intenzitu elektrického pole celé anténní řady platí vzorec 3.40

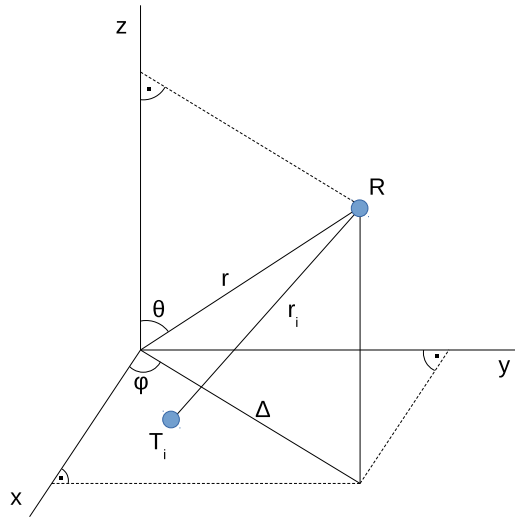
$$\vec{E}_t = \sum_{i=1}^N \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_{0i} \cdot l_i}{4\pi r_i} \cdot e^{-j(kr_i + \beta_i)} \cdot \sin \theta \quad (3.40)$$

a pro intenzitu magnetického pole platí vzorec 3.41

$$\vec{H}_t = \sum_{i=1}^N \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \frac{k \cdot I_{0i} \cdot l_i}{4\pi r_i} \cdot e^{-j(kr_i + \beta_i)} \cdot \sin \theta \quad (3.41)$$

3.2.4 Sensorová anténní řada v prostoru

Výpočet uvedený v předchozí kapitole platí pro sensorovou anténní řadu, jejíž všechny prvky jsou umístěny v ploše ($\theta = 90^\circ$). Pokud jsou vysílací senzory a přijímač umístěny v prostoru podle obrázku 3.14, změní se způsob výpočtu vzdáleností jednotlivých antén od přijímače.



Obrázek 3.14: Antény umístěné ve 3D prostoru

Podobně jako ve vzorci 3.34 je možné vypočítat vzdálenost senzoru od přijímače podle vzorce 3.42

$$r_{3D_i} = \sqrt{(x_R - x_i)^2 + (y_R - y_i)^2 + (z_R - z_i)^2} \quad (3.42)$$

Průmět vzdálenosti přijímače od hypotetické antény tvořené anténní řadou do plochy xy Δ se vypočte podle vzorce 3.43

$$\Delta = r \sin \theta \quad (3.43)$$

pro x_R platí 3.44

$$x_R = \Delta \cos \varphi = r \sin \theta \cos \varphi \quad (3.44)$$

pro y_R platí 3.45

$$y_R = \Delta \sin \varphi = r \sin \theta \sin \varphi \quad (3.45)$$

a pro z_R platí 3.46

$$z_R = r \cos \theta \quad (3.46)$$

Vzdálenost mezi anténami ve 3D prostoru je poté:

$$r_{3D_i} = \sqrt{(r \sin \theta \cos \varphi - x_i)^2 + (r \sin \theta \sin \varphi - y_i)^2 + (r \cos \theta - z_i)^2} \quad (3.47)$$

Tato hodnota se opět dosadí do vzorce pro výpočet intenzity elektrického a magnetického pole anténní řady 3.48 a 3.49

$$\vec{E}_t = \sum_{i=1}^N \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \eta \cdot \frac{k \cdot I_{0i} \cdot l_i}{4\pi r_{3D_i}} \cdot e^{-j(kr_{3D_i} + \beta_i)} \cdot \sin \theta \quad (3.48)$$

$$\vec{H}_t = \sum_{i=1}^N \hat{a}_\theta \cdot j \cdot \frac{k \cdot I_{0i} \cdot l_i}{4\pi r_{3D_i}} \cdot e^{-j(kr_{3D_i} + \beta_i)} \cdot \sin \theta \quad (3.49)$$

3.3 Chytré antény

Princip anténních řad je často využíván v oblasti chytrých antén (smart antennas). Chytré antény využívají pro vysílání či příjem více antén. Takové antény mohou v určitých směrech dosahovat vyšší vyzařovací výkon, nebo vyšší propustnost. Protože je možné vyšší počet antén využívat buď při vysílání, při příjmu, nebo v obou směrech, rozlišuje se několik typů chytrých antén:

- Single Input Single Output (SISO) - tento typ nepatří mezi chytré antény, pro vysílání i příjem využívá jednu anténu.
- Single Input Multiple Output (SIMO) - tento typ umožňuje příjem pomocí více antén, vysílání provádí pouze jedna anténa. SIMO umožňuje lepší příjem signálu

pomocí redukce šumu.

- Multiple Input Single Output (MISO) - tento typ umožňuje vysílání více anténami, příjem provádí pouze jedna anténa. MISO umožňuje směřování vysílacího paprsku.
- Multiple Input Multiple Output (MIMO) - tento typ umožňuje příjem i vysílání pomocí více antén. MIMO považujeme za plnohodnotného představitele chytrých antén.

3.4 Anténní řady v senzorových sítích

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.2, jsou senzory v senzorových bezdrátových sítích často napájeny bateriemi typu AA a předpokládá se jejich provoz v řádu jednotek let. Velkým problémem v senzorových sítích je tedy omezená zásoba energie v jednotlivých senzorech. Typicky energeticky nejnáročnější činností senzorů je komunikace. Snížení energetické náročnosti komunikace je tedy zajímavým úkolem v oblasti výzkumu senzorových bezdrátových sítí.

Ze skutečností uvedených na konci kapitoly 3.2.2 plyne, že je možné při použití anténní řady komunikovat oproti jedné anténě na stejnou vzdálenost s nižším výkonem, případně je možné se stejným výkonem překlenout větší vzdálenost. Navíc je možné sdružit energii z více senzorů a překlenout výrazně větší vzdálenost, než by bylo možné s jedním senzorem.

Podobných výsledků je možné dosáhnout použitím směrových antén. Bohužel senzory mohou být často instalovány náhodným způsobem (například shozením velkého množství senzorů z letadla), a proto není zaručena orientace senzorů. Není-li zaručena orientace senzorů, není výhodné používat směrové antény, protože je nemožné je správně orientovat. Pokud by tato orientace byla možná, objeví se problém komunikace s různými sousedy. V tomto případě by bylo nutné měnit orientaci směrové antény při komunikaci s různými sousedy. Z těchto důvodů se v senzorových bezdrátových sítích jeví jako velmi vhodné využití anténních řad.

3.5 Souhrn

V této kapitole byly popsány základní parametry antén a základní teorie šíření signálu ve volném prostoru. Dále zde byly popsány anténní řady. Z převzaté teorie anténních řad byl vytvořen výpočetní model anténních řad, který bude použit pro simulaci anténních

řad v sensorových bezdrátových sítích.

Z provedených výpočtů vyplynul poznatek, že při použití anténní řady se dvěma prvky lze v ideálním případě úspěšně vysílat na stejnou vzdálenost s celkovým výkonem $P' = \frac{P}{\sqrt{2}}$ oproti úspěšnému vysílání s použitím jedné antény. Tento celkový výkon je možné rozdělit na oba senzory. Tím je potvrzena pracovní hypotéza 1.

Pracovní hypotéza 2 je potvrzena stejnými výpočty, ze kterých plyne, že při použití anténní řady se dvěma prvky a použitím stejného celkového výkonu můžeme úspěšně vysílat na vzdálenost $d' = 2 \cdot d$ oproti úspěšnému vysílání s použitím jedné antény. Pokud budou oba senzory anténní řady vysílat s maximálním možným výkonem, je možné úspěšně vysílat na vzdálenost $d' = 2 \cdot d \cdot \sqrt{2}$. Tato zjištění potvrdila pracovní hypotézu 2.

Kapitola 4

Distribuované tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze

Jak je uvedeno v kapitole 3.2.2, je možné při použití více vysílacích antén (anténní řady) směřovat hlavní lalok k přijímači. V tomto případě se používají chytré antény typu MISO. Při příjmu signálu je možné pomocí více antén identifikovat směry, ze kterých jednotlivé signály přicházejí. Potom je možné identifikovat směr, ze kterého přichází užitečný signál, a ostatní (šumové) signály od celkového přijímaného signálu odečíst. V tomto případě se jedná o komunikaci pomocí chytrých antén typu SIMO. Je pochopitelně možné využít výhodné vlastnosti anténních řad na vysílací i přijímací straně a použít chytré antény typu MIMO.

Pro komunikaci v sensorových bezdrátových sítích je možné použít anténní řady, kde je směřování hlavního laloku prováděno softwarovou úpravou posunutí rozdílů fáze v signálech vstupujících do jednotlivých antén. Jelikož je vhodné, aby antény anténní řady byly od sebe vzdáleny alespoň $\lambda/4$, je na velmi malých senzorech často nemožné umístit anténní řadu se dvěma a více prvky. Řešením je vytvoření anténní řady dvěma a více senzory.

4.1 Zařízení pro DPSBF

Podobné principy, které jsou využívány v případě anténních řad, lze využít i při vysílání stejného signálu pomocí několika prvků (senzorů). Poté se hovoří o kolaborativním distribuovaném tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze (Collaborative DPSBF). Pro fungování DPSBF je potřeba, aby jednotlivé prvky používaly pro vysílání shodný kmitočet a shodný počáteční posun fáze. Takovéto zařízení bylo navrženo a je předmětem uděleného patentu [P1].

Další text je volnou citací patentové přihlášky [P1].

Podstatou patentu je, že sestává ze skupiny stejných, nezávislých a staticky umístěných modulů. Každý modul je tvořen blokem výpočetní logiky, která sestává z paměti

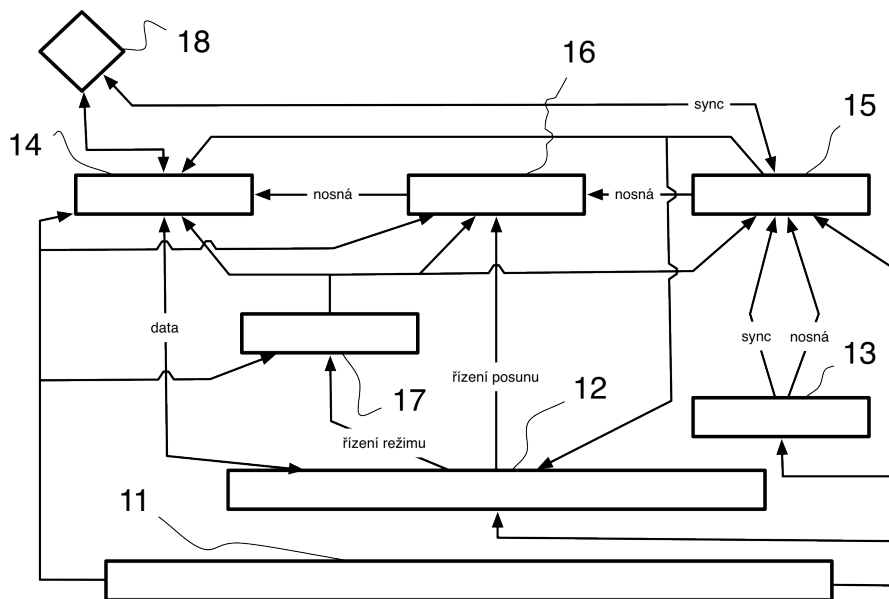
a procesoru a slouží k výpočtu posunu fáze nosné vlny, která je použita k modulaci datového signálu. Jeden výstup bloku výpočetní logiky je propojen obousměrně s datovým vstupem transceiveru, druhý jeho výstup je propojen s řídicím vstupem přepínače provozního režimu a třetí výstup je spojen s jedním řídicím vstupem posouvače fáze. Přepínač provozního režimu je výstupem propojen s řídicím vstupem transceiveru, s druhým řídicím vstupem posouvače fáze a s řídicím vstupem synchronizátoru fáze. Systém dále obsahuje generátor nosné vlny, který vytváří nosnou vlnu, a synchronizační signál s n -násobnou frekvencí. Tento generátor nosné vlny má synchronizační výstup připojen na vnitřní synchronizační vstup synchronizátoru fáze a výstup nosné vlny na vstup nosné vlny synchronizátoru fáze. Synchronizátor fáze je svým vnějším synchronizačním rozhraním obousměrně propojen s anténou a dále má propojen jeden výstup s řídicím vstupem výpočetní logiky a s řídicím vstupem transceiveru a druhý výstup má propojen se synchronizačním vstupem posouvače fáze. Posouvač fáze má propojen výstup se synchronizačním vstupem transceiveru, jehož výstup je obousměrně propojen s anténou. Všechny bloky jsou propojeny se zdrojem energie.

Výhodou uvedeného řešení je, že umožní distribuované tvarování vyzařovacího diagramu skupiny antén. Předkládané řešení odstraňuje potřebu znalosti přesného umístění jednotlivých antén. Dále toto řešení umožňuje libovolné rozšiřování počtu antén a odstraňuje potřebu napájení antén z jediného zdroje energie.

Pro tvarování vyzařovacího diagramu skupiny antén je nutné mít k dispozici modul, který umožní posouvat fáze vysílaného datového signálu oproti vysílaným signálům ostatních modulů. Zároveň je nutné, aby vysílané datové signály všech modulů používaly stejnou nosnou frekvenci. Uvedené řešení využívá vysílání synchronizačního signálu s n -násobnou frekvencí oproti frekvenci nosné vlny, kde n je větší než 1. Tento synchronizační signál vysílá jeden z modulů. Ostatní moduly si ze synchronizačního signálu odvodí nosnou frekvenci a stanoví si nulový posun fáze v daném místě. Všechny moduly potom mohou posouvat fázi vysílaného datového signálu pro dosažení optimálního vyzařovacího diagramu skupiny antén.

Každý modul je zapojen podle obrázku 4.1 a je tvořen blokem 12 výpočetní logiky, která sestává z paměti a procesoru pro výpočet posunu fáze nosné vlny a slouží k výpočtu posunu fáze nosné vlny, která je použita k modulaci datového signálu. Jeden výstup bloku 12 výpočetní logiky je propojen obousměrně s datovým vstupem transceiveru 14, druhý jeho výstup je propojen s řídicím vstupem přepínače 17 provozního režimu a třetí výstup je spojen s jedním řídicím vstupem posouvače 16 fáze. Přepínač 17 provozního

4.1. ZAŘÍZENÍ PRO DPSBF



Obrázek 4.1: Zapojení elektroniky senzoru umožňující kolaborativní distribuované tvarování vyařovacího diagramu pomocí posunu fáze

režimu je výstupem propojen s řídicím vstupem transceiveru 14, s druhým řídicím vstupem posouvače 16 fáze a s řídicím vstupem synchronizátoru 15 fáze. Dále je zde zapojen generátor 13 nosné vlny, který vytváří nosnou vlnu a synchronizační signál s n -násobnou frekvencí. Synchronizační výstup generátoru 13 nosné vlny je připojen na vnitřní synchronizační vstup synchronizátoru 15 fáze a jeho výstup nosné vlny na vstup nosné vlny synchronizátoru 15 fáze. Synchronizátor 15 fáze je svým vnějším synchronizačním rozhraním obousměrně propojen s anténou 18 a dále má propojen jeden výstup s řídicím vstupem výpočetní 12 logiky a s řídicím vstupem transceiveru 14 a druhý výstup má propojen se synchronizačním vstupem posouvače 16 fáze. Posouvač 16 fáze má propojen výstup se synchronizačním vstupem transceiveru 14, jehož výstup je obousměrně propojen s anténou 18. Všechny uvedené bloky jsou propojeny se zdrojem 11 energie, což bývá nejčastěji baterie.

Jak bylo uvedeno, blok 12 výpočetní logiky obsahuje paměť a procesor. Úkolem tohoto bloku je vypočítat posun fáze nosné vlny, která je využita k modulaci vysílaného datového signálu. Dále blok 12 výpočetní logiky zajišťuje uložení přijímaných, nebo vysílaných dat do paměti a také volí provozní režim modulu, tedy komunikaci uvnitř skupiny, nebo společné vysílání mimo skupinu.

Generátor 13 nosné vlny vytváří dva sinusové signály pomocí děliče frekvence ze společného krystalu. Sinusový signál s nižší frekvencí se používá k modulaci datového signálu, sinusový signál s vyšší frekvencí slouží k synchronizaci modulů při vysílání na velkou vzdálenost, nebo k zablokování vysílání při příjmu signálu od vzdáleného modulu. Oba vytvořené signály jsou synchronní.

Transceiver 14 zajišťuje modulaci/demodulaci datového signálu.

Synchronizátor 15 fáze v závislosti na provozním režimu předává synchronizační signál získaný od generátoru 13 nosné vlny do antény 18. Dále v závislosti na provozním režimu předává nosnou vlnu získanou od generátoru 13 nosné vlny, nebo vytvořenou pomocí synchronizačního signálu získaného od antény 18 do posouvače 16 fáze. Dále v závislosti na provozním režimu a příjmu synchronizačního signálu od antény 18 vysílá blokovací signál bloku 12 výpočetní logiky a transceiveru 14.

Posouvač 16 fáze se využívá v režimu vysílání mimo skupinu a slouží k posouvání fáze vysílaného datového signálu oproti přijímanému synchronizačnímu signálu.

Přepínač 17 provozního režimu zajistí přepínání mezi režimy komunikace.

4.1.1 Provozní režimy zařízení pro DPSBF

Modul 1 může fungovat v několika režimech. **První režim** je režim **přijímací s příjmem od blízkého modulu**, kdy vysílací stanice nevyužila tvarování vyzářovacího diagramu skupiny antén 18. Do tohoto režimu je modul 1 přepnut na základě žádosti bloku 12 výpočetní logiky pomocí přepínače 17 provozního režimu. V tomto režimu je transceiver 14 přepnut na příjem dat a moduly posouvače 16 fáze a synchronizátoru 15 fáze jsou odpojeny pomocí přepínače 17 provozního režimu.

Druhý režim je režim **přijímací s příjmem od vzdáleného modulu**, kdy vysílací stanice využila tvarování vyzářovacího diagramu skupiny antén 18. Do tohoto režimu je modul 1 přepnut na základě žádosti bloku 12 výpočetní logiky pomocí přepínače 17 provozního režimu, který tuto skutečnost zjistí pomocí adresy vysílací stanice, případně pomocí informace obsažené v přijímaných datech. V tomto režimu je transceiver 14 přepnut na příjem dat a modul posouvače 16 fáze je odpojen pomocí přepínače 17 provozního režimu. Pomocí přepínače 17 provozního režimu synchronizátor 1 fáze začne vysílat synchronizační signál získaný od generátoru 13 nosné vlny do antény 18. Tento synchronizační signál upozorní ostatní blízké moduly 1, že dochází k příjmu datového signálu od vzdáleného modulu.

4.1. ZAŘÍZENÍ PRO DPSBF

79

Třetí režim slouží pro **vysílání na krátkou vzdálenost**, jedná se o vysílání uvnitř skupiny modulů, kdy není nutné vytvořit skupinu antén s upraveným vyzařovacím diagramem. Do tohoto režimu je modul 1 přepnut přepínačem 17 provozního režimu na žádost bloku 12 výpočetní logiky. V tomto režimu blok 12 výpočetní logiky předá data určená k vysílání transceiveru 14. Transceiver 14 pomocí nosné vlny vytvořené generátorem 13 nosné vlny vytvoří vysílaný datový signál a pošle jej na anténu 18. Pomocí signálu z přepínače 17 provozního režimu je posouvač 16 fáze nastaven na nulový fázový posun a synchronizátor 15 fáze předává nosnou vlnu získanou z generátoru 13 nosné vlny prostřednictvím posouvače 16 fáze do transceiveru 14. Vysílání uvnitř skupiny modulů 1 je méně důležité než vysílání s využitím vytvoření skupiny antén 18. Pokud synchronizátor 15 fáze začne přijímat synchronizační signál, upozorní blok 12 výpočetní logiky a vynutí okamžité ukončení vysílání na transceiveru 14 díky přímému propojení. Přímé propojení mezi synchronizátorem 15 fáze a transceiverem 14 umožní lepší využití přenosového pásma. Blok 12 výpočetní logiky naplánuje vysílání na jinou dobu.

Čtvrtý režim umožňuje **řízení vysílání na velkou vzdálenost**, tedy vysílání mimo skupinu modulů 1. Do tohoto režimu je modul 1 přepnut přepínačem 17 provozního režimu na žádost bloku 12 výpočetní logiky. V tomto režimu blok 12 výpočetní logiky předá data určená k vysílání transceiveru 14 a pomocí režimu vysílání na krátkou vzdálenost tato data předá ostatním modulům 1, které budou spolupracovat na tvarování vyzařovacího diagramu skupiny antén. Po odeslání dat ostatním modulům 1 transceiver 14 pomocí nosné vlny vytvořené generátorem 13 nosné vlny vytvoří vysílaný datový signál a pošle jej na anténu 18. Pomocí signálu z přepínače 17 provozního režimu je posouvač 16 fáze nastaven na nulový fázový posun a synchronizátor 15 fáze předává nosnou vlnu získanou z generátoru 13 nosné vlny prostřednictvím posouvače 16 fáze do transceiveru 14. Na požadavek přepínače 17 provozního režimu synchronizátor 15 fáze posílá na anténu 18 synchronizační signál získaný od generátoru 13 nosné vlny.

Pátý režim umožňuje podporu **vysílání na velkou vzdálenost**, tedy vysílání mimo skupinu modulů 1. Do tohoto režimu je modul 1 přepnut přepínačem 17 provozního režimu na žádost bloku 12 výpočetní logiky. V tomto režimu blok 12 výpočetní logiky předá data určená k vysílání transceiveru 14. Tato data získá od řídicího modulu 1 pomocí přijímacího režimu s příjmem od blízkého modulu. Na žádost přepínače 17 provozního režimu synchronizátor 15 fáze vytvoří nosnou vlnu pomocí synchronizačního signálu přijatého anténou 18 a předá ji prostřednictvím posouvače 16 fáze do transce-

iveru 14 a ten pomocí ní vytvoří datový signál, který předá do antény 18. Pomocí signálu z přepínače 17 provozního režimu je posouvač 16 fáze nastaven na nenulový fázový posun. Hodnota fázového posunu je získána od bloku 12 výpočetní logiky.

Výše uvedené zařízení umožňuje vytvářet sensorové bezdrátové sítě využívající distribuované tvarování vyzařovacího diagramu pomocí posunu fáze. V dalším textu uvedu výhody použití DPSBF a způsob, kterým blok výpočetní logiky vypočte optimální posun fáze.

4.2 Vyhledání optimální fáze

Je-li k dispozici zařízení uvedené v kapitole 4.1, zůstává otázkou vyhledání optimální kombinace fází vysílacích zařízení. Nejjednodušším postupem je vyhledání optimální kombinace fází hrubou silou.

4.2.1 Hrubá síla

Při vyhledávání optimální kombinace fází pro DPSBF pomocí hrubé síly se vyzkouší všechny kombinace fází pro všechny n -tice sensorů. V tomto případě lze pro zjednodušení uvažovat pouze všechny dvojice sensorů. Dále se předpokládá, že fázi je možné měnit v krocích $\Delta\beta$. Vyhledávání se spouští z clusteru K_1 směrem ke vzdálenému clusteru K_2 .

Algoritmus funguje následovně: Nejprve se v clusteru K_1 zvolí uzel (*master*), který začne vysílat zprávu *HELLO*. Poté postupně všechny ostatní uzly (*slave*) postupně mění svou fázi a s touto změněnou fází odvysílají zprávu *HELLO* společně s referenčním uzlem. Vysílání uzlu *slave* je ukončeno po vyčerpání všech hodnot posunu fáze tj. po 360° a zvolí se další *master* uzel. Algoritmus vyhledání optimální fáze je ukončen použitím všech uzlů ve funkci *master*.

Po odvysílání všech zpráv *HELLO* pomocí všech dvojic uzlů a všech kombinací posunů fáze vzdálený cluster K_2 vyhodnotí kombinaci s nejsilnějším signálem. Poté začne vzdálený cluster K_2 vyhledávat vlastní optimální kombinaci uzlů a posunů fáze. Jediným rozdílem je, že do zprávy *HELLO* je navíc vložena optimální komunikační kombinace uzlů a posunu fáze clusteru K_1 .

Po odvysílání všech zpráv *HELLO* pomocí všech dvojic uzlů a všech kombinací posunů fáze cluster K_1 vyhodnotí kombinaci s nejsilnějším signálem. Tuto kombinaci cluster K_1 odešle pomocí kombinace získané ze zprávy *HELLO* směrem ke clusteru K_2 a

4.2. VYHLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍ FÁZE

81

komunikace pomocí DPSBF je navázána. Pseudokód je uveden v algoritmu 1.

Algorithm 1 Cluster discovery for 2 clusters K_1 and K_2 :

Input: Síť tvořená dvěma clustery K_1 a K_2 . Každý cluster obsahuje n_{K_1} respektive n_{K_2} senzorů. Vzdálenost mezi clustery neumožňuje přímou komunikaci mezi clustery, ale umožňuje komunikaci pomocí DPSBF.

Output: Vyhledaná dvojice uzlů z clusteru K_1 A_1 a A_2 a fázový posun β_A a dvojice uzlů z clusteru K_2 B_1 a B_2 a fázový posun β_B .

Goal: Meziclusterová komunikace

K_1 performing **active discovery** of K_2 :

- 1: All modules $P := P_{max}$
- 2: **for** $i = 1 \dots n_{K_1}$ **do**
- 3: module i is master, keeping synchronisation signal (as in 4.1)
- 4: all modules $s \in K_1 - \{i\}$ are slaves, receiving the synchronisation signal transmitted by i
- 5: **for** $j = i + 1 \dots n_{K_1}$ **do**
- 6: **while** s_j phase search space not exhausted **do**
- 7: transmit HELLO message
- 8: $\beta_{n_{K_1}} := \beta_{n_{K_1}} + \Delta\beta$
- 9: **end while**
- 10: **end for**
- 11: **end for** K_1 performs passive discovery of K_2 by listening for incoming HELLO messages
- 12: Wait for $LIST_{K_2}$ from K_2 and broadcast it in K_1
- 13: Send $LIST_{K_1}$ to K_2

K_2 performing **passive discovery** of K_1 :

- 1: **for** all $i = 1 \dots n_{K_2}$ in parallel **do**
 - 2: build empty $LIST_i$
 - 3: $RSSI_i := 0$
 - 4: **if** HELLO from K_1 received **then**
 - 5: **if** $RSSI > RSSI_i$ **then**
 - 6: record HELLO into $LIST_i$
 - 7: $RSSI_i := RSSI$
 - 8: **end if**
 - 9: **end if**
 - 10: broadcast $LIST_i$ and $RSSI_i$ in K_2
 - 11: find maximal $RSSI_i$ ($RSSI_{MAX}$) and corresponding $LIST_i$ ($LIST_{MAX}$)
 - 12: **end for**
 - 13: K_2 performs active discovery of K_1 to K_1 ; use HELLO message with $LIST_{MAX}$
-

Zpráva *HELLO* obsahuje následující položky:

- id_M, id_S - identifikátor master a slave uzlu,
- β - použitý fázový posun,
- $LIST$ - nejlepší kombinace pro vysílání ze vzdáleného clusteru $[id_M, id_S, \beta]$, pokud není známá, tak $[0, 0, 0]$.

Proměnná RSSI vyjadřuje úroveň přijímaného signálu (kap. 2.2.6.2).

Výše uvedený algoritmus 1 vždy vyhledá nejlepší kombinaci uzlů a posunů fáze. Složitost algoritmu je $\Theta(n_{K_1}^2 + n_{K_2}^2)$. Pokud se podobným způsobem hledá M -tice uzlů, bude složitost $\Theta(n_{K_1}^M + n_{K_2}^M)$. Celkový počet operací je dán počtem uzlů v jednotlivých clusterech a počtem kroků testovaných fázových posunů. Počet kroků N_K lze vyjádřit výrazem 4.1:

$$N_K = \frac{n_{K_1} \cdot (n_{K_1} - 1)}{2} \cdot 360/\Delta\beta + \frac{n_{K_2} \cdot (n_{K_2} - 1)}{2} \cdot 360/\Delta\beta \quad (4.1)$$

Pomocí jednoduché úpravy výše uvedeného algoritmu je možné spustit vyhledávání optimální kombinace uzlů a fázového posunu souběžně v obou clusterech. Úprava spočívá ve vysílání nejlepší známé kombinace v každé *HELLO* zprávě. S tímto vysíláním také souvisí nutnost informovat všechny uzly o zjištění nové kombinace s lepší RSSI, než byla dosud známá. Úprava algoritmu je popsána v algoritmu 2.

Aktivní vyhledávání spouští cluster, pokud potřebuje předat zprávu uzlu mimo komunikační vzdálenost. Pasivní vyhledávání spouští cluster, pokud některý uzel přijme zprávu *HELLO*. Pokud oba cluster spustí aktivní vyhledávání zároveň, je potřeba, aby se cluster, který přijme zprávu *HELLO*, přepnul do pasivního vyhledávání (do každé posílané zprávy *HELLO* přidá informaci o nejlepší získané kombinaci vysílacích uzlů a posunu fáze vzdáleného clusteru).

Existuje několik možností jak ukončit běh algoritmu. Tyto možnosti ovlivňují dobu běhu algoritmu (a tím množství vydané energie) a množství získaných informací.

První možností je nechat proběhnout algoritmus nad všemi dvojicemi (n -ticemi). V tomto případě se získá nejlepší kombinaci uzlů a fázového posunu. Pokud se v cílovém clusteru zaznamenávají všechny nejlepší kombinace uzlů a fázového posunu, získá se informaci o všech použitelných kombinacích. Tyto kombinace je poté možné využít pro plánování energeticky výhodného provozu, případně provozu v postupně degradované síti po vyčerpání zdrojů některých prvků.

V případě použití algoritmu 1 nemá cluster K_2 informaci, zda cluster K_1 již vyčerpал všechny kombinace uzlů a fázových posunů. Jednou možností jak odhadnout dobu otestování všech kombinací je přidání informací o postupu prohledávání do zprávy *HELLO*.

Tyto rozšiřující informace by mohly být předávány pomocí položek:

- N - celkový počet uzlů,
- T - doba od začátku vyhledávání.

Algorithm 2 Cluster discovery for 2 clusters K_1 and K_2 :

Input: Síť tvořená dvěma clustery K_1 a K_2 . Každý cluster obsahuje n_{K_1} respektive n_{K_2} senzorů. Vzdálenost mezi clustery neumožňuje přímou komunikaci mezi clustery, ale umožňuje komunikaci pomocí DPSBF.

Output: Vyhledaná dvojice uzlů z clusteru K_1 A_1 a A_2 a fázový posun β_A a dvojice uzlů z clusteru K_2 B_1 a B_2 a fázový posun β_B .

Goal: Meziclustrová komunikace

K_1 performing **active discovery** and **passive discovery** of K_2 in parallel

K_1 performing **active discovery** of K_2 :

- 1: All modules $P := P_{max}$
- 2: $LIST_{MAX} := [0, 0, 0]$
- 3: **for** $i = 1..n_{K_1}$ **do**
- 4: module i is master, keeping synchronisation signal (as in 4.1)
- 5: all modules $s \in K_1 - \{i\}$ are slaves, receiving the synchronisation signal transmitted by i
- 6: **for** $j = i + 1..n_{K_1}$ **do**
- 7: **while** s_j phase search space not exhausted **do**
- 8: transmit HELLO message with $LIST_{MAX}$
- 9: $\beta_{n_{K_1}} := \beta_{n_{K_1}} + \Delta\beta$
- 10: **end while**
- 11: **end for**
- 12: **end for**
- 13: K_1 performs passive discovery of K_2 by listening for incoming HELLO messages
- 14: Wait for $LIST_{K_2}$ from K_2 and broadcast it in K_1
- 15: **if active discovery** of K_2 ended **then**
- 16: Send $LIST_{K_1}$ to K_2
- 17: **end if**

K_2 performing **active discovery** and **passive discovery** of K_1 in parallel

K_2 performing **passive discovery** of K_1 :

- 1: **for** all $i = 1..n_{K_2}$ in parallel **do**
 - 2: build empty $LIST_i$
 - 3: $RSSI_i := 0$
 - 4: **if** HELLO from K_1 received **then**
 - 5: **if** $RSSI > RSSI_i$ **then**
 - 6: record HELLO into $LIST_i$
 - 7: $RSSI_i := RSSI$
 - 8: broadcast $LIST_i$ and $RSSI_i$ in K_2
 - 9: find maximal $RSSI_i$ ($RSSI_{MAX}$) and corresponding $LIST_i$ ($LIST_{MAX}$)
 - 10: **end if**
 - 11: **end if**
 - 12: **end for**
 - 13: K_2 performs active discovery of K_1 to K_1 ; use HELLO message with $LIST_{MAX}$
-

Odhad potřebné doby pro dokončení vyhledávání se vypočítá podle vzorce 4.2 (je zanedbán stav testování *slave* uzlů daného *master* uzlu).

$$T_{remaining} \simeq \frac{1 + id_M}{2N - id_M} \cdot T \quad (4.2)$$

Další možností ukončení běhu algoritmu je ukončení v okamžiku navázání spojení. Toto ukončení je možné při použití algoritmu 2. Cluster K_1 ukončí procházení kombinací uzlů a fázových posunů v okamžiku přijetí zprávy *HELLO* s vyplněnou položkou *LIST*. Podle položky *LIST* zvolí kombinaci uzlů a fázového posunu, pomocí které odvysílá zprávu *HELLO* s vyplněnou položkou *LIST*. Položka *LIST* je vyplněna podle parametrů id_M , id_S a β z právě přijaté zprávy *HELLO*.

Cluster K_2 po přijetí zprávy *HELLO* s vyplněnou položkou *LIST* také ukončí procházení kombinací uzlů a fázových posunů.

Pokud došlo k nalezení lepších kombinací během doby, která byla potřebná k předání informace do vzdáleného uzlu, předá se informace o lepší kombinaci v dalších zprávách.

Při tomto ukončení běhu algoritmu se ušetří čas běhu (a tím množství vydané energie), ale nemusí se nalézt optimální kombinaci uzlů a fázového posunu.

V případě použití zařízení popsaného v kap. 4.1 musí být uzly vytvářející DPSBF v komunikační vzdálenosti. Tento požadavek je způsoben nutností příjmu synchronizačního signálu *slave* uzlem/uzly. Připomeňme si definici sensorové sítě.

Definice 3. *Senzorová síť je popsána neorientovaným grafem G , kde množina vrcholů V reprezentuje jednotlivé senzory a množina hran E reprezentuje dvoubodové spoje mezi těmito senzory. Hrana mezi libovolnými uzly u a v existuje za předpokladu, že uzly u a v leží navzájem v komunikační vzdálenosti.*

$$G = V \times E \quad (4.3)$$

Bude-li se pro formování DPSBF vybírat pouze dvojice uzlů, mezi kterými existuje spoj, bude složitost algoritmu dána počtem hran $|E|$ a minimální velikostí kroku pro vyhledávání vhodné fáze MS a platí:

$$\Theta(|E| \cdot 360/MS) \quad (4.4)$$

Poznamenejme, že počet hran v grafu je dán hustotou uzlů v grafu. Počet hran grafu je možné ovlivnit pomocí algoritmů nastavení topologie, z nichž některé jsou popsány v kapitole 2.1.2. Jelikož se při použití algoritmu nastavení topologie nevyužijí některé dvojice uzlů pro formování DPSBF, je pravděpodobné, že se nenalezne optimální kombinace uzlů a fází. Posouzení vlivu algoritmů nastavení topologie na formování DPSBF je jednou z možností pokračování této práce.

4.2.2 Optimální velikost kroku pro změnu fáze

Tato část se zaměřuje na snížení složitosti algoritmu pomocí optimalizace počtu testovaných posunů fáze.

Jak bylo výše zmíněno, je počet testovaných kroků N_S dán velikostí minimálního kroku MS a platí:

$$N_S = 360/MS \quad (4.5)$$

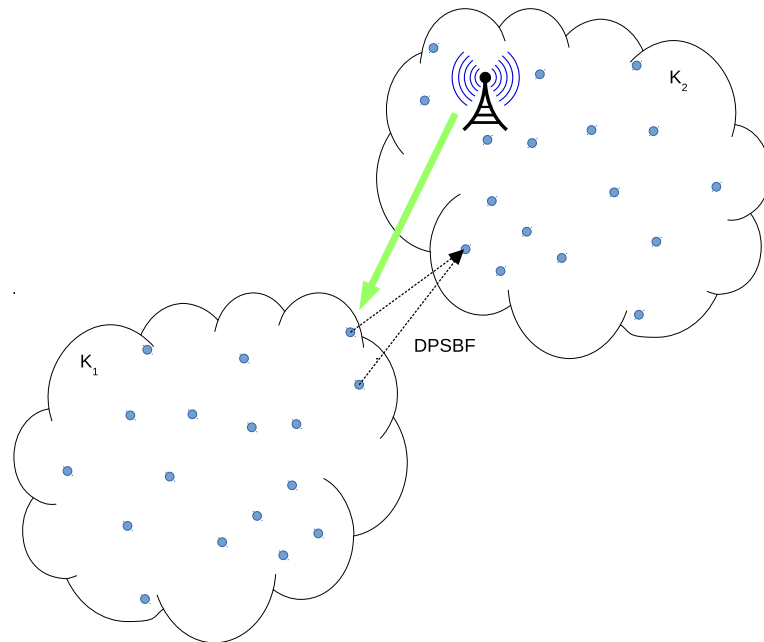
Pro snížení složitosti algoritmu je tedy vhodné zvětšit velikost minimálního kroku MS . Pokud se zvětší velikost minimálního kroku MS příliš, vzniká velká pravděpodobnost, že se nenalezne vhodný posun fáze, který zajišťuje komunikaci mezi clustery.

Pokud by existovala okamžitá zpětná vazba mezi clustery, je možné navrhnout algoritmus využívající adaptabilní velikost testovaného kroku. Okamžitá zpětná vazba může být k dispozici v řadě situací. Jedním případem je asymetrická síť s měřicími senzory a sběrným clusterem, jehož součástí je speciální uzel umožňující vysílání s výrazně vyšším výkonem než ostatní senzory (obr. 4.2). Takovým uzlem může být například základnová stanice.

Dalším případem je síť, ve které existuje spojení mezi clustery a hledá se další kombinace uzlů a frekvencí, například pro lepší vyvážení energetické zátěže.

Případně se dá tento princip využít v intraclusterové komunikaci, kde zpětná vazba přirozeně existuje. Využití DPSBF je vhodné i v tomto případě, protože díky směrovosti výsledného paprsku dochází k šetření energie a může dojít ke snížení nežádoucí interference.

Pokud je k dispozici zpětná vazba, je možné počet kroků vyhledání optimálního fázového posunu minimalizovat pomocí postupného zmenšování velikosti minimálního kroku M_S .



Obrázek 4.2: Asymetrická senzorová síť se základnovou stanicí

4.2.3 Optimal algorithm for Phase Shift searching for the DPSBF

Při návrhu algoritmu Optimal algorithm for Phase Shift searching for the DPSBF (OPS-DPSBF) se vychází ze skutečnosti, že při změně fázového posunu vysílání dvou vysílačů při použití DPSBF dochází k postupně změně přijímaného výkonu v místě přijímače.

Na obrázku 4.3 je zobrazena výše uvedená závislost. Předpokládejme, že citlivost přijímače umožní příjem i v případě signálu slabšího, než je signál maximální. Poté je možné, aby přijímač přijal signál v jistém rozmezí fázových posunů vysílání.

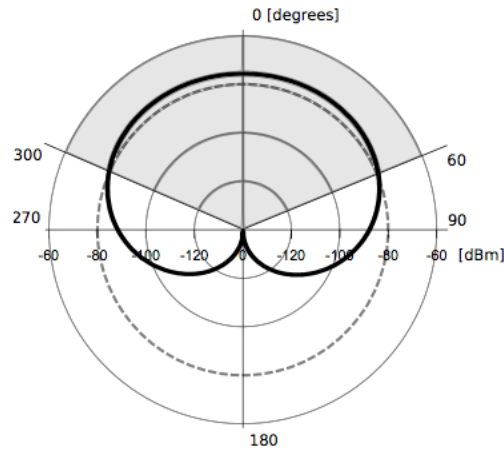
Citlivost přijímače je na obrázku 4.3 naznačena přerušovanou čarou a výkon přijímaného signálu plnou čarou. Přijímač tedy bude schopen přijmout signál s fázovým posunem vysílání v rozmezí 300° až 60° , tj. v rozmezí 120° . Průběh přijímaného výkonu v závislosti na fázovém posunu vysílání dvou vysílačů zobrazený na obrázku 4.3 potvrzuje pracovní hypotézu 3.

Optimalizace vyhledání nejlepšího fázového posunu probíhá ve dvou úrovních.

První úroveň se snaží navázat jakékoli spojení se vzdáleným clusterem. Oba vysílače

4.2. VYHLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍ FÁZE

87



Obrázek 4.3: Přijímaný výkon v závislosti na fázovém posunu vysílání dvou vysílačů při DPSBF

si nastaví maximální vysílací výkon a pokusí se navázat spojení se vzdáleným uzlem. Pokud se spojení nepodaří navázat, nastaví si vysílače jiný fázový posun a pokusí se opět navázat spojení. V každém testovacím cyklu se otestují všechny nepoužité fázové posuny daného cyklu. Množina fázových posunů daného cyklu je dána krokem fázového posunu, který se v každém cyklu zmenší na polovinu. První úroveň je úspěšně ukončena navázáním spojení, nebo je neúspěšně ukončena v okamžiku, kdy je aktuální krok fázového posunu menší než předem nastavený minimální krok fázového posunu. Pokud je první úroveň ukončena úspěšně, přejde se na úroveň druhou.

Úkolem druhé úrovně je nalezení nejlepšího fázového posunu vysílání obou vysílačů. Z první úrovně se převezme nalezený fázový posun a aktuální krok fázového posunu. V každém kroku cyklu je nastavena aktuální velikost kroku fázového posunu na polovinu předchozího kroku fázového posunu a dvakrát se odešle zpráva s aktuálním fázovým posunem zvětšeným, resp. zmenšeným o aktuální krok fázového posunu. Vzdálený cluster potvrdí přijetí zpráv společně s úrovní přijímaného výkonu. Vybere se fázový posun s největším přijímaným výkonem a pokračuje se dalším krokem cyklu. Tato úroveň je ukončena při zmenšení kroku fázového posunu pod předem nastavený minimální krok fázového posunu. Pseudokód popisuje algoritmus 3.

Podmínkou fungování algoritmu je existence zpětné vazby. Algoritmus poskytne tím lepší výsledky, čím bude větší rozdíl mezi dostatečným výkonem pro příjem signálu

Algorithm 3 Phase discovery:

Input: Dvojice uzlů hledajících optimální fázi posunu vysílání pro DPSBF. Minimální krok fázového posunu (MS).

Output: Optimální fáze posunu vysílání ($phase$).

Goal: Meziclusterová komunikace

Stage 1:

```

1:  $SS := 360$ 
2: build empty set  $used$ 
3: while  $SS > MS$  do
4:    $p := 0$ 
5:    $s := 0$ 
6:   for  $p < 360/SS$  do
7:      $s := s + SS$ 
8:     if  $s \notin used$  then
9:       transmit HELLO message ( $s$ , destination)
10:      add  $s$  into  $used$ 
11:     end if
12:      $p := p + 1$ 
13:   end for
14:    $SS := SS/2$ 
15:   if receive REPLY message then
16:      $phase := s$ 
17:     break
18:   end if
19: end while

```

Stage 2:

```

1: while  $SS > MS$  do
2:   transmit HELLO message ( $phase + SS$ , destination)
3:   transmit HELLO message ( $phase - SS$ , destination)
4:   receive REPLY message
5:   according the confirmation do:
6:      $phase := [phase|phase + SS|phase - SS]$ 
7:      $SS := SS/2$ 
8: end while

```

4.2. VYHLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍ FÁZE

89

a maximálním možným výkonem. Algoritmus byl publikován v [O3].

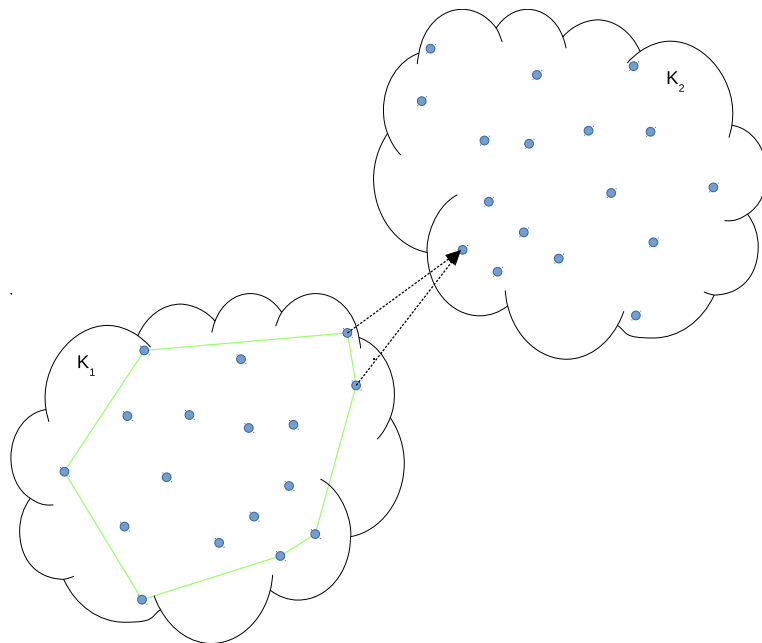
4.3 Optimalizace výběru uzlů pro DPSBF

Ze vztahů 4.1 a 4.4 vyplývá, že složitost problému nastavení DPSBF je ovlivněna počtem uzlů v clusteru (resp. hran) a počtem testovaných kroků změny fáze. Snížení počtu kroků při testování vhodného posunu fáze byla věnována předchozí kapitola. Tato kapitola se zaměřuje na zmenšení množství testovaných dvojic uzlů.

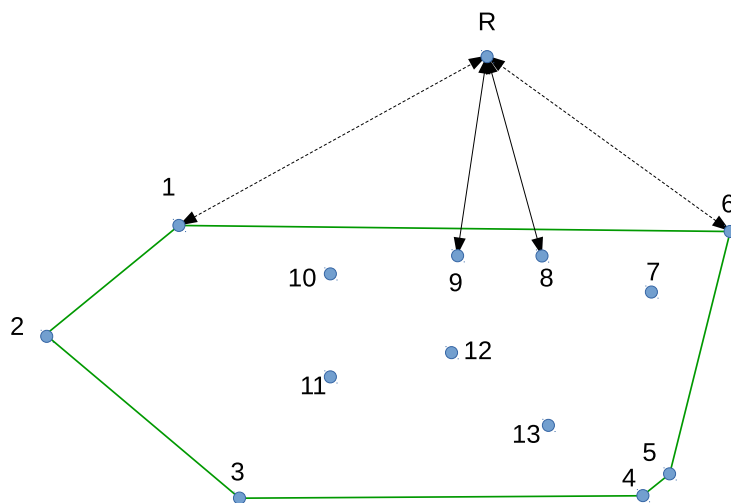
První úvaha se zaměřuje na redukci množství testovaných uzlů pomocí konvexní obálky všech uzlů ležících v jednom clusteru. K této úvaze vede přesvědčení, že uzel, který je nejbliž k jinému clusteru, bude pravděpodobně ležet na vnějším okraji clusteru obr. 4.4. Při hledání definice hranice planárního grafu, byla objevena dobře zpracovaná problematika konvexní obálky planárního grafu a algoritmy, které tuto obálku hledají [55] a [56] str. 1029 - 1039.

Z obrázku 4.5 je zřejmé, že existují případy, kdy uzly vhodné pro zformování DPSBF neleží na konvexní obálce. Z příkladu je patrné, že se uzly 8 a 9 nacházejí blíže uzlu D než uzly 1 a 6. Přesto uzly 8 a 9 na rozdíl od uzlů 1 a 6 nejsou součástí konvexní obálky.

Ačkoli je snadné nalézt případy, kdy uzly vhodné pro zformování DPSBF neleží na konvexní obálce, bylo rozhodnuto, že tato metoda bude zhodnocena.



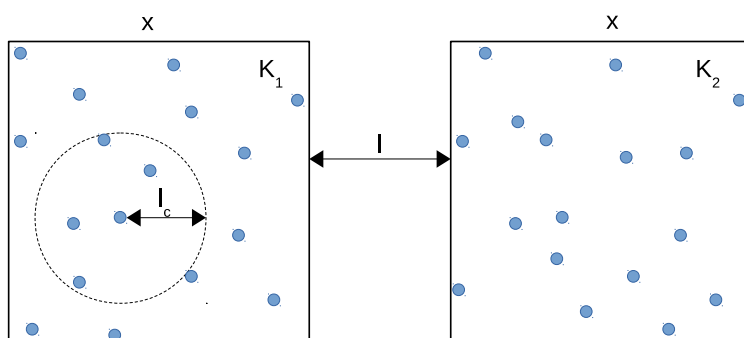
Obrázek 4.4: Pozice vhodných uzlů pro DPSBF



Obrázek 4.5: Příklad uzlů vhodných pro DPSBF, které neleží na konvexní obálce

4.3.1 Uzly ležící na konvexní obálce

Při zhodnocení vhodnosti hledání uzlů pro formování DPSBF byl navržen následující pokus: Senzory budou náhodně rozmístěny ve dvou čtvercových clusterech K_1 a K_2 (obr. 4.6). V rámci pokusu se budou hledat vhodné uzly pro formování DPSBF. V každé testovací situaci bude ze všech uzlů nalezena nejlepší kombinace uzlů, která bude použita jako referenční proti kombinaci uzlů, která bude vybrána z uzlů na konvexní obálce.



Obrázek 4.6: Popis pokusu pro zhodnocení hledání uzlů na konvexní obálce

Výsledkem pokusu bude zhodnocení, zda vhodné uzly pro formování DPSBF leží na

konvexní obálce. Budou zhodnoceny následující situace:

- oba uzly nejlepšího řešení leží na konvexní obálce,
- existuje řešení, které nemusí být nejlepší, ve kterém oba uzly leží na konvexní obálce,
- nejlepší řešení má alespoň jeden uzel na konvexní obálce,
- existuje řešení, které nemusí být nejlepší, ve kterém alespoň jeden uzel leží na konvexní obálce,
- kvalitu řešení, ve kterých oba uzly leží na konvexní obálce, pokud tato řešení existují,
- kvalitu řešení, ve kterých alespoň jeden uzel leží na konvexní obálce, pokud tato řešení existují.

Pokus bude prováděn s následujícími nastaveními:

- různé velikosti clusterů:
 - čtverec se stranou **Width** = $\langle 1.0, 9.0 \rangle$ násobku komunikační vzdálenosti l_c ,
- různé vzdálenosti clusterů:
 - vzdálenost oblastí v nejbližším bodě **Distance** = $\langle 1.1, 1.9 \rangle$ násobku komunikační vzdálenosti l_c ,
- různé hustoty uzlů v clusteru :
 - hustota **Density** = $\langle 2, 20 \rangle$ uzlů/plocha pokrytí.

Jednotlivé proměnné jsou patrné z obrázku 4.6.

Hustotu uzlů v clusteru D je definována podle (4.6):

$$D = \frac{N}{S_c} \cdot S \tag{4.6}$$

kde:

- D je hustota,
- S_c je celková plocha clusteru,
- N je celkový počet uzlů v clusteru,
- S je plocha pokrytí jedním uzlem (plocha v komunikační vzdálenosti jednoho uzlu).

Hustota uzlů souvisí s průměrným stupněm uzlu v grafu a tím s celkovým počtem hran v grafu.

4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF

Tabulka 4.1: Poměr počtu případů s existujícím řešením oproti celkovému počtu všech případů. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Distance	ResultRatio						
	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
110	0,256	0,780	0,948	0,992	1,000	1,000	1,000
120	0,232	0,736	0,932	0,972	1,000	1,000	1,000
130	0,164	0,568	0,856	0,956	0,996	1,000	1,000
140	0,096	0,448	0,724	0,920	0,940	0,995	1,000
150	0,080	0,324	0,632	0,804	0,900	0,970	0,995
160	0,035	0,168	0,376	0,608	0,712	0,940	0,980
170	0,030	0,092	0,196	0,328	0,512	0,760	0,880
180	0,020	0,040	0,075	0,130	0,176	0,375	0,575
190	0,000	0,000	0,020	0,040	0,030	0,040	0,085

Počet uzlů N v clusteru je potom (4.7):

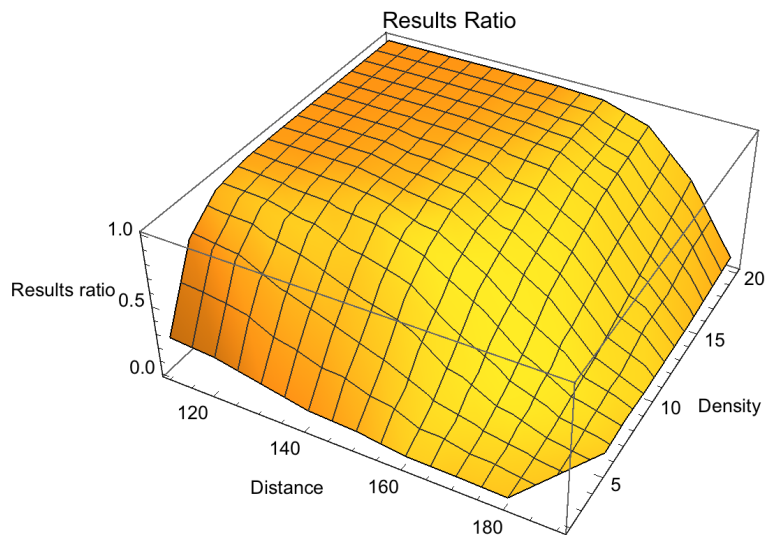
$$N = \frac{D}{S} \cdot S_c \tag{4.7}$$

V pokusu je používán počet uzlů v clusteru zaokrouhlený na celá čísla nahoru. Výjimkou je cluster s menší plochou, než je plocha pokrytí jedním uzlem. V tomto případě se používá $N = D$.

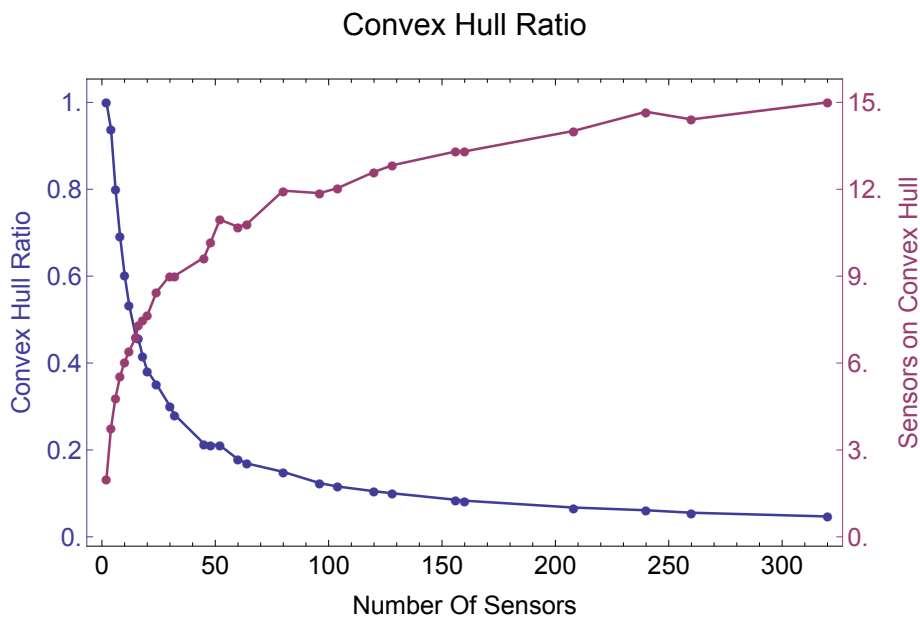
Nejprve byl proveden pokus, ve kterém bylo zjištěno, jaký vliv mají vstupní parametry na celkový počet řešení. Jak je vidět z tabulky 4.1 a grafu 4.7, při hustotě uzlů $D = 2$ a vzdálenosti clusterů větší než 1,8 násobku komunikační vzdálenosti je možnost propojení clusterů pomocí DPSBF spíše nepravděpodobná.

Dále byl zjištěn poměr počtu uzlů ležících na konvexní obálce oproti celkovému počtu uzlů. Z tabulky 4.2 a grafu 4.8 je zřejmé, že při vyšším počtu uzlů, řádově jednotky stovek, se poměr počtu uzlů ležících na konvexní obálce k celkovému počtu uzlů blíží jednotkám procent. Zajímavější však je, že celkový počet uzlů ležících na konvexní obálce se se zvyšujícím počtem všech uzlů zvyšuje logaritmicky.

První sledovanou hodnotou je poměr počtu takových nejlepších řešení, kdy oba uzly leží na konvexní obálce ku počtu všech nejlepších řešení. Z tabulky 4.3 a grafu 4.9 je zřejmé, že tento poměr se v tomto případě pohybuje mezi 80 % a 12 % (řešení v clusteru se dvěma uzly je zanedbáno). Tento poměr je nejlepší v menších clusterech s menší hustotou uzlů.



Obrázek 4.7: Poměr počtu případů s existujícím řešením oproti celkovému počtu všech případů. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.



Obrázek 4.8: Poměr počtu uzlů na konvexní obálce k celkovému počtu uzlů

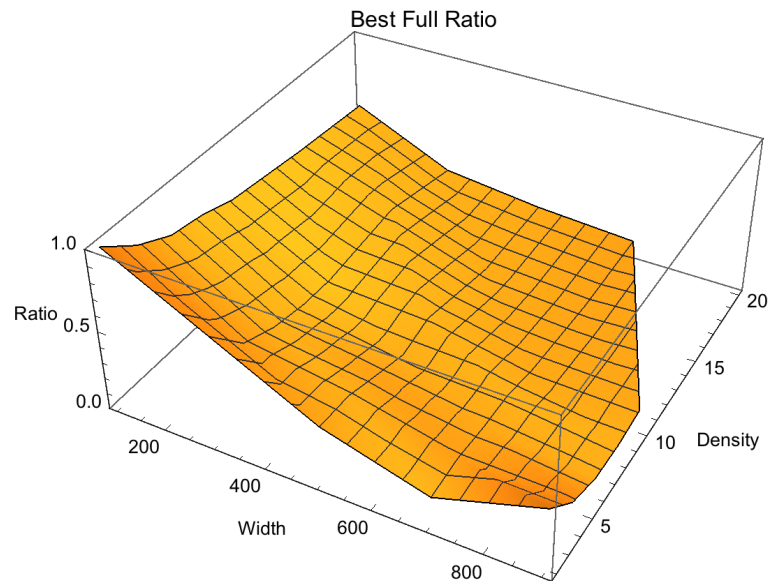
4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF

Tabulka 4.2: Poměr počtu uzlů na konvexní obálce k celkovému počtu uzlů

Number of Sensors	Convex Hull Ratio	Average Number of Sensors on Convex Hull
2	1,000	2,0
4	0,939	3,8
6	0,801	4,8
8	0,692	5,5
10	0,604	6,0
12	0,534	6,4
15	0,460	6,9
16	0,457	7,3
18	0,416	7,5
20	0,382	7,6
24	0,352	8,4
30	0,301	9,0
32	0,281	9,0
45	0,214	9,6
48	0,212	10,2
52	0,211	11,0
60	0,178	10,7
64	0,169	10,8
80	0,149	12,0
96	0,124	11,9
104	0,116	12,0
120	0,105	12,6
128	0,100	12,8
156	0,085	13,3
160	0,083	13,3
208	0,067	14,0
240	0,061	14,7
260	0,055	14,4
320	0,047	15,0

Tabulka 4.3: Poměr počtu nejlepších řešení s oběma uzly na konvexní obálce ku počtu všech nejlepších řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Width	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	0,843	0,740	0,706	0,643	0,583	0,540
300	-	0,452	0,371	0,331	0,321	0,379	0,264
500	0,364	0,355	0,291	0,231	0,285	0,176	0,192
700	0,181	0,211	0,199	0,205	0,164	0,134	0,151
900	0,389	0,200	0,131	0,124	0,147	-	-



Obrázek 4.9: Poměr počtu nejlepších řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku počtu všech nejlepších řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

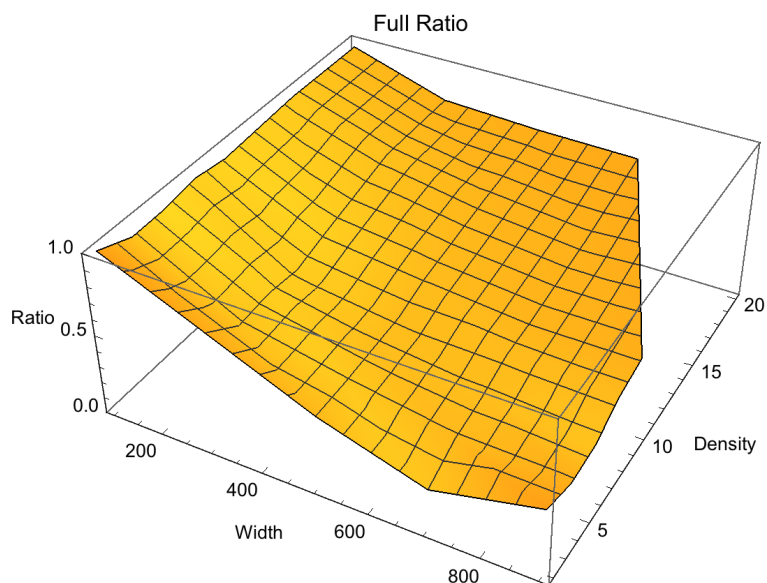
V druhém případě bylo sledováno, zda existuje nějaké (nejlepší či jiné) řešení se dvěma uzly na konvexní obálce. Poměr uvedený v tabulce 4.4 a grafu 4.10 zobrazuje počet případů, ve kterých existuje alespoň jedno řešení se dvěma uzly na konvexní obálce ku počtu všech případů s nějakým existujícím řešením. Z hodnot je patrné, že počet takových případů klesá s velikostí clusteru a stoupá s větší hustotou uzlů. Poměr se v tomto případě pohybuje v rozsahu 25 % - 90 % (řešení v clusteru se dvěma uzly je opět zanedbáno).

V tabulce 4.5 a grafu 4.11 je uveden poměr případů s nejlepším řešením takovým,

Tabulka 4.4: Poměr počtu řešení s oběma uzly na konvexní obálce ku počtu všech řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Width	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	0,919	0,925	0,958	0,929	0,967	0,963
300	-	0,588	0,608	0,587	0,644	0,772	0,770
500	0,455	0,464	0,483	0,502	0,569	0,665	0,742
700	0,255	0,360	0,408	0,484	0,507	0,600	0,731
900	0,409	0,346	0,366	0,463	0,506	-	-

4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF



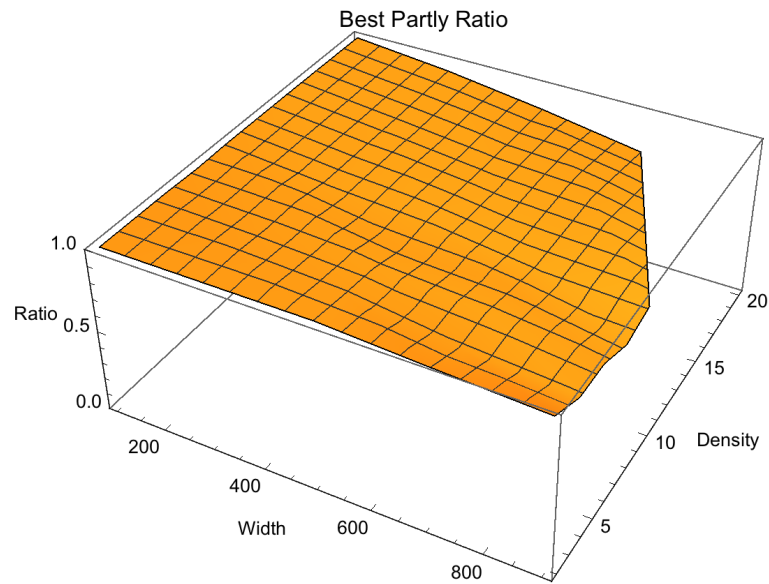
Obrázek 4.10: Poměr počtu řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku počtu všech řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

že alespoň jeden z uzlů leží na konvexní obálce ku počtu všech případů s existujícím řešením. Z uvedených hodnot je patrné, že poměr klesá při zvětšujícím se clusteru a zvyšující se hustotě uzlů. Poměr se v tomto případě pohybuje mezi 75 % a 100 %.

V posledním případě byla prověřena situace, kdy existuje řešení (nejlepší či jiné), které má alespoň jeden uzel na konvexní obálce. Poměr zobrazuje počet situací, kdy existuje alespoň jedno řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce ku všem situacím s nějakým řešením. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.6 a grafu 4.12. Z hodnot je patrné, že řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce existuje ve více než 90 %

Tabulka 4.5: Poměr počtu nejlepších řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Width	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	1,000	1,000	0,994	1,000	1,000	0,996
300	-	1,000	0,982	0,982	0,947	0,938	0,936
500	1,000	0,970	0,948	0,892	0,907	0,871	0,851
700	0,964	0,885	0,904	0,861	0,827	0,841	0,750
900	0,934	0,836	0,834	0,754	0,800	-	-



Obrázek 4.11: Poměr počtu nejlepších řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

situací.

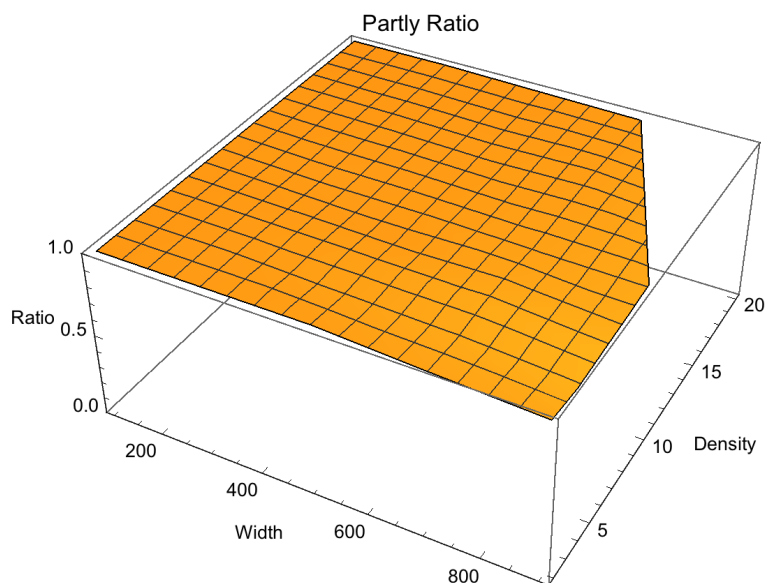
Z předchozích hodnot plyne, že řešení s jedním či oběma uzly na konvexní obálce nemusí být vždy nejlepší. Zajímavým údajem tedy je, jak kvalitní je řešení s jedním či dvěma uzly na konvexní obálce oproti nejlepšímu řešení. Kvalita řešení bude zobrazována jako poměr přenesené energie řešením s uzly na konvexní obálce oproti energii přenesené nejlepším řešením v dané situaci. Do výpočtu vstupují pouze situace, ve kterých řešení s uzly na konvexní obálce existuje.

Tabulka 4.7 a grafy 4.13 a 4.14 zobrazují kvalitu řešení s oběma uzly na konvexní obálce.

Tabulka 4.6: Poměr počtu řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Width	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
300	-	1,000	0,996	0,989	0,979	0,992	1,000
500	1,000	0,975	0,988	0,973	0,978	0,977	0,988
700	0,964	0,954	0,979	0,982	0,963	0,990	0,977
900	0,934	0,911	0,924	0,935	0,951	-	-

4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF



Obrázek 4.12: Poměr počtu řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku počtu všech možných řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Z hodnot je patrné, že pokud existuje řešení s oběma uzly na konvexní obálce, pak jeho kvalita v tomto případě dosahuje alespoň 90% kvality nejlepšího řešení.

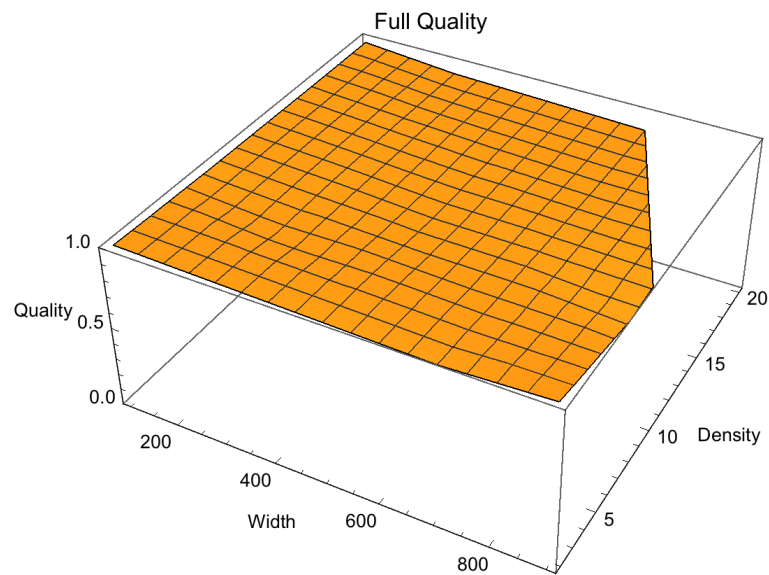
Tabulka 4.8 a grafy 4.15 a 4.16 zobrazují kvalitu řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce. Z hodnot je zřejmé, že kvalita řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce v tomto případě dosahuje 98% kvality nejlepšího řešení.

Po zhodnocení pokusu byly formulovány následující závěry:

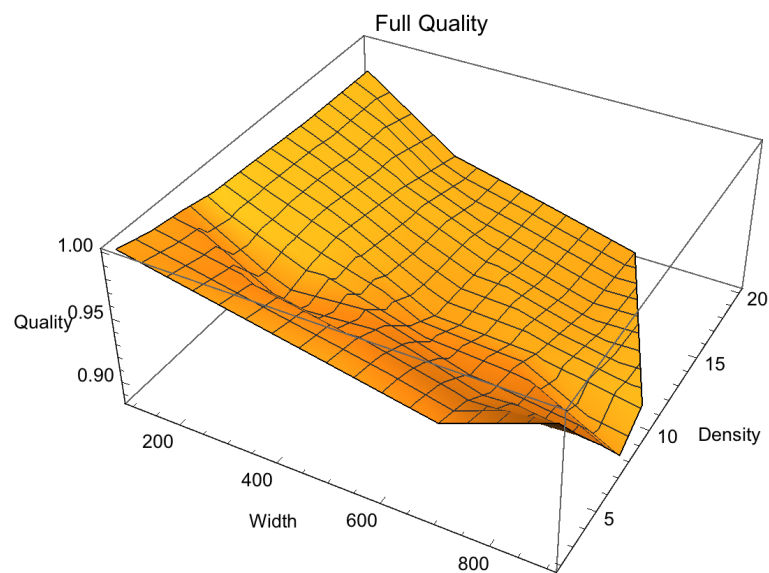
Využití konvexní obálky pro vyhledání kandidátů *master* uzlů pro DPSBF je velmi

Tabulka 4.7: Poměr kvality řešení s oběma uzly na konvexní obálce ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

	Density						
Width	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	0,993	0,989	0,984	0,983	0,979	0,978
300	-	0,979	0,947	0,953	0,955	0,944	0,927
500	0,970	0,965	0,952	0,930	0,917	0,914	0,909
700	0,955	0,947	0,929	0,925	0,913	0,894	0,889
900	0,986	0,951	0,919	0,884	0,900	-	-



Obrázek 4.13: Poměr kvality řešení s oběma uzly na konvexní obálce (Full) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

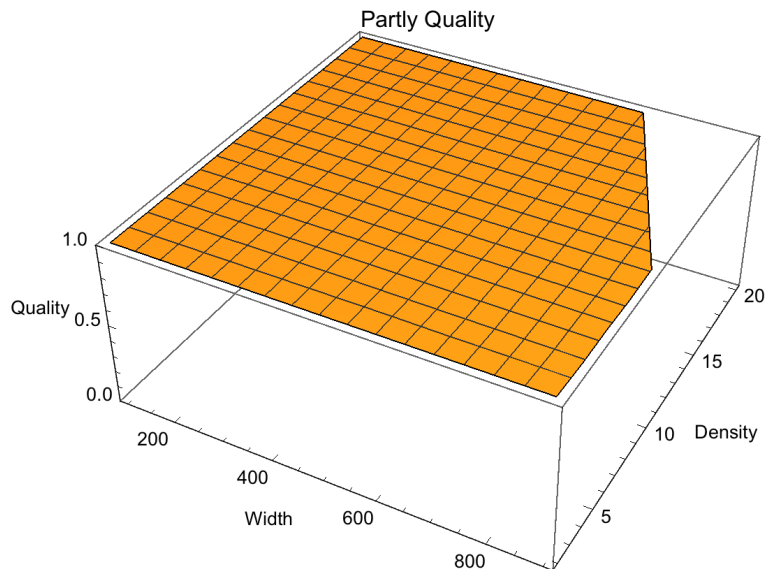


Obrázek 4.14: Poměr kvality řešení s oběma uzly na konvexní obálce ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$. Zvětšená osa Quality.

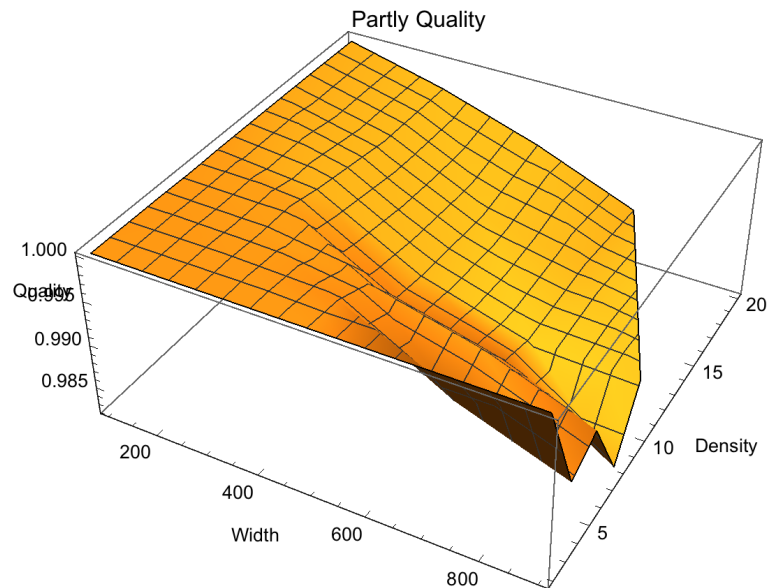
4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF

Tabulka 4.8: Poměr kvality řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.

Width	Density						
	2	4	6	8	10	15	20
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
300	-	1,000	1,000	1,000	0,999	0,997	0,997
500	1,000	1,000	0,998	0,993	0,993	0,992	0,993
700	1,000	0,993	0,995	0,990	0,989	0,990	0,989
900	1,000	0,989	0,990	0,982	0,989	-	-



Obrázek 4.15: Poměr kvality řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$.



Obrázek 4.16: Poměr kvality řešení s alespoň jedním uzlem na konvexní obálce (Partly) ku kvalitě nejlepšího řešení. Komunikační vzdálenost $l_c = 100$. Zvětšená osa Quality.

vhodné. Tento postup nalezne možné řešení v 90 % případů. Toto řešení bude v řadě případů nejlepší, a pokud ne, bude se jeho kvalita blížit 98 % kvality nejlepšího řešení. Řešení s oběma uzly (*master* i *slave*) na konvexní obálce nejsou příliš zajímavá. Pravděpodobnost toho, že nejlepší řešení má oba uzly na konvexní obálce, se pohybovala mezi 12 % a 80 %. Existence nějakého řešení s oběma uzly na konvexní obálce pak byla 25% až 90% a jeho kvalita dosahovala 90 %. Nevýhodná je však skutečnost, že se nižší pravděpodobnosti objevují u větších sítí.

Výsledky pokusu potvrzují, s jistými výhradami, pracovní hypotézu 4. Bylo tedy možné přistoupit k návrhu nového algoritmu pro vyhledání uzlů a fází pro DPSBF.

4.3.2 Convex Hull Based Accelerated DPSBF

Nově navržený algoritmus Convex Hull Based Accelerated DPSBF (CHUBA-DPSBF) slučuje výše zmíněné postupy a zjištění. Opírá se tedy o předvýběr uzlů, které vstupují do algoritmu pro vyhledání uzlů a fází pro DPSBF, a zrychlení vyhledání optimální fáze. Běh algoritmu probíhá ve dvou úrovních.

V první úrovni se z množiny všech uzlů vytvoří množina uzlů, které leží na konvexní

4.3. OPTIMALIZACE VÝBĚRU UZLŮ PRO DPSBF

103

obálce.

V druhé úrovni se prochází všechny dvojice uzlů, které jsou vytvořeny tak, že se vezme uzel z množiny uzlů ležících na konvexní obálce a k němu postupně přidávají uzly ležící v komunikačním dosahu. Pomocí postupu popsaném v algoritmu 3 se na těchto dvojicích testuje přenos pomocí různých posunů fáze.

Důležité proměnné:

- *convexHull* - množina uzlů ležících na konvexní obálce,
- *inCommunication_i* - množina uzlů v komunikačním dosahu *master* uzlu (uzlu *i*).

Zpráva *HELLO* obsahuje následující položky:

- *id_M*, *id_S* - identifikátor *master* a *slave* uzlu,
- β - použitý fázový posun,
- *LIST* - nejlepší kombinace pro vysílání ze vzdáleného clusteru [*id_M*, *id_S*, β], pokud není známá, tak [0, 0, 0].

4.3.2.1 Zhodnocení složitosti

Navržený algoritmus snižuje složitost předvýběrem uzlů, které poté vstupují do vyhledávání fázového posunu. Počet *master* uzlů je dán počtem uzlů, které leží na konvexní obálce. Počet *slave* uzlů je dán počtem uzlů v komunikačním dosahu.

Podle tabulky 4.8 vychází, že počet uzlů na konvexní obálce je přibližně:

$$N_{convexhull} = \log_{1.46} N \quad (4.8)$$

Počet uzlů v komunikačním dosahu je dán hustotou uzlů v clusteru 3.12.

Celková složitost algoritmu je pak dána součinem:

$$O(\log N \cdot D \cdot N_S) \quad (4.9)$$

kde N je celkový počet uzlů v clusteru, D je hustota uzlů v clusteru a N_S je počet kroků pro testování fázového posunu.

Při výpočtu složitosti se nesmí zapomenout na složitost výpočtu konvexní obálky. Podle [55] existují algoritmy vyhledávající konvexní obálku se složitostí:

Algorithm 4 Convex Hull Based Accelerated DPSBF for 2 clusters K_1 and K_2 :

Input: Síť tvořená dvěma clustery K_1 a K_2 . Každý cluster obsahuje n_{K_1} respektive n_{K_2} senzorů. Vzdálenost mezi clustery neumožňuje přímou komunikaci mezi clustery, ale umožňuje komunikaci pomocí DPSBF.

Output: Vyhledaná dvojice uzlů z clusteru K_1 A_1 a A_2 a fázový posun β_A a dvojice uzlů z clusteru K_2 B_1 a B_2 a fázový posun β_B .

Goal: Meziclusterová komunikace

Stage 1 (find convex hull):

1: $convexHull := findConvexHull(K_1)$

Stage 2 (find basic connection):

K_1 performing **active discovery** and **passive discovery** of K_2 in parallel

K_1 performing **active discovery** of K_2 :

1: modules from $convexHull$ set $P := P_{max}$

2: **for** $i \in convexHull$ **do**

3: module i is master, keeping synchronisation signal (as in 4.1)

4: all modules $s \in inCommunication_i - \{i\}$ are slaves, receiving the synchronisation signal transmitted by i

5: **for** $j = i + 1 \dots n_{convexHull}$ **do**

6: **while** s_j phase search space not exhausted **do**

7: transmit HELLO message

8: find new phase shift as algorithm 3

9: **end while**

10: **end for**

11: **end for** K_1 performs passive discovery of K_2 by listening for incoming HELLO messages

12: Wait for $LIST_{K_2}$ from K_2 and broadcast it in K_1

13: Send $LIST_{K_1}$ to K_2

K_2 performing **active discovery** and **passive discovery** of K_1 in parallel

K_2 performing **passive discovery** of K_1 :

1: **for** all $i = 1 \dots n_{K_2}$ in parallel **do**

2: build empty $LIST_i$

3: $RSSI_i := 0$

4: **if** HELLO from K_1 received **then**

5: **if** $RSSI > RSSI_i$ **then**

6: record HELLO into $LIST_i$

7: $RSSI_i := RSSI$

8: **end if**

9: **end if**

10: broadcast $LIST_i$ and $RSSI_i$ in K_2

11: find maximal $RSSI_i$ ($RSSI_{MAX}$) and corresponding $LIST_i$ ($LIST_{MAX}$)

12: **end for**

13: K_2 performs active discovery of K_1 to K_1 ; use HELLO message with $LIST_{MAX}$

$$O(N \log H) \tag{4.10}$$

kde N je počet uzlů v clusteru a H je počet uzlů, které leží na konvexní obálce. Tato přípravná fáze se v praxi může provádět pouze jednou a je platná pro komunikaci se všemi sousedními clusteru.

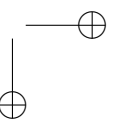
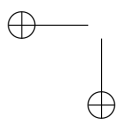
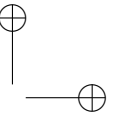
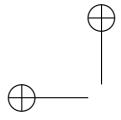
Pro výpočet konvexní obálky je výhodné znát umístění jednotlivých uzlů v absolutních souřadnicích. Tato podmínka může být splněna například přidáním GPS modulu na senzor. Nepřesnost souřadnic získaných pomocí GPS není zásadním nedostatkem. Z hlediska běhu algoritmu není přidání resp. nepřidání několika konkrétních uzlů na konvexní obálku zásadní.

4.4 Souhrn

V této kapitole byla popsána technologie Distributed Phase Shift Beam Forming (DPSBF). Následně bylo popsáno zařízení a základní algoritmus umožňující navázat spojení pomocí DPSBF. Dále byl navržen paralelní algoritmus zrychlující vytvoření DPSBF spoje.

Po potvrzení pracovní hypotézy 3 byl navržen algoritmus OPS-DPSBF, který umožňuje vyhledání optimálního fázového posunu v logaritickém čase oproti času lineárnímu při přístupu hrubou silou. Vyhledané výsledky mají stejnou kvalitu.

Závěr kapitoly je zaměřen na optimalizaci vyhledání dvojice uzlů, které se budou účastnit vytváření DPSBF spoje. Nejprve byla potvrzena pracovní hypotéza 4 s použitím hranice pokryté oblasti ve formě konvexní obálky. Při ověřování hypotézy se hypotéza nepotvrdila stoprocentně. Jak bylo očekáváno, existují situace, kdy nejvhodnější uzly pro tvorbu DPSBF spoje na konvexní obálce neleží. Z výsledků je však patrné, že řešení s uzlem na konvexní obálce jsou dostatečně kvalitní. Řešení s oběma uzly na konvexní obálce nemusí být podle výsledků dostatečně kvalitní. Podle výsledků ověření pracovní hypotézy 4 byl navržen nový algoritmus CHUBA-DPSBF, který se opírá o výběr *master* uzlu z množiny uzlů konvexní obálky. Složitost algoritmu CHUBA-DPSBF je $O(\log N \cdot D \cdot N_S)$ (rovnice 4.9) oproti složitosti $O(N^2 \cdot N_S)$ (rovnice 4.1) u algoritmu využívajícího hrubou sílu. Oba algoritmy mají kvadratickou složitost, ale CHUBA-DPSBF má menší počet vstupních proměnných. CHUBA-DPSBF nemusí nalézt optimální řešení.



Kapitola 5

Závěr

V této práci je popsána problematika komunikace v bezdrátových sensorových sítích, především se zaměřením na možnost komunikace mezi dvěma oblastmi, které jsou od sebe vzdálené na větší vzdálenost, než je komunikační vzdálenost jednoho modulu.

Při studiu algoritmů pro řízení topologie v bezdrátových sensorových sítích byl navržen nový algoritmus pro řízení topologie zohledňující směrové antény. Tento algoritmus je popsán v článku [O2].

Při pracích zabývajících se DPSBF byly nejprve posouzeny energetické dopady použití DPSBF v bezdrátových sensorových sítích. Toto posouzení je publikováno v článcích [O4] a [I1].

V první řadě bylo navrženo zařízení umožňující komunikaci pomocí DPSBF. Toto zařízení je popsáno v kapitole 4.1 a je předmětem patentu [P1] a publikace [I1]. Dále byl navržen základní algoritmus pro navázání meziclusterové komunikace popsáný v kapitole 4.2.1. Pro tento algoritmus byla dále navržena paralelní optimalizace popsána algoritmem 2.

Po zaměření na rychlejší vyhledání optimálního fázového posunu byl navržen algoritmus popsáný v kapitole 4.2.3 a publikovaný v [O1] a [O3].

Pro možnost lepší simulace DPSBF byl navržen a implementován nový protokolový zásobník. Tento protokolový zásobník je publikován v [O5].

Na závěr byla posouzena možnost lepšího výběru uzlů, které budou vytvářet komunikaci pomocí DPSBF. Tato optimalizace byla ověřena pomocí simulace a poté byl navržen algoritmus CHUBA-DPSBF, který tuto optimalizaci využívá. Analýza pomocí simulace a popis algoritmu jsou uvedeny v kapitole 4.3.2. Algoritmus bude publikován v připravovaném článku.

V práci byly vytyčeny čtyři pracovní hypotézy. Všechny tyto hypotézy byly potvrzeny. Z hypotéz byly vyvozeny závěry, které umožnily návrh nových algoritmů, které zlepšují komunikaci v bezdrátových sensorových sítích.

Všechny vědecké výsledky a poznatky uvedené v disertační práci byly vytvořeny výhradně autorem disertační práce. Výjimkou je návrh zařízení pro DPSBF, ve kterém má autor 25% podíl, a návrh algoritmu vyhledání optimální fáze pomocí binárního půlení, který vznikl v rovném spoluautorství tří autorů.

5.1 Budoucí práce

Výzkum v dané oblasti ještě není zcela dokončený. Ačkoli jsou výsledky vyhledávání *master* uzlu povzbudivé, je pravděpodobné, že tato metoda selže při použití v senzorových bezdrátových sítích, jejichž oblast pokrytí bude mít výrazně nekonvexní tvar. Pro tuto situaci bude třeba jinak definovat hranici oblasti a bude třeba provést nové zhodnocení kvality volby *master* uzlů volených z množiny uzlů ležících na této hranici. Dalším nevyřešeným problémem je výběr *slave* uzlu. V současnosti je *slave* uzel volen ze všech sousedů *master* uzlu a tato volba nemá žádnou přidanou logiku. Výzkum by se měl zaměřit na zmenšení množiny potenciálních *slave* uzlů a nalezení uzlů, které mají větší pravděpodobnost být vhodným *slave* uzlem. Počet testovaných *slave* uzlů může být ovlivněn skutečností, zda k uzlu vede hrana z *master* uzlu. Existence hran může být ovlivněna algoritmy pro nastavení topologie. Výzkum vlivu algoritmů pro nastavení topologie je dalším možným pokračováním této práce.

Současný výzkum je zaměřen především na použití DPSBF v meziclusterové komunikaci. Je velmi pravděpodobné, že DPSBF může zlepšovat vlastnosti komunikace v bezdrátových senzorových sítích i v případě komunikace uvnitř clusteru. Toto zlepšení se může týkat oblastí snižování interference a zlepšování energetické bilance sítě. Výzkum vlivu použití DPSBF v intraclusterové komunikaci na interferenci a energetickou bilanci sítě je další možností pokračování výzkumu. První výsledky vlivu DPSBF na interferenci při intraclusterové komunikaci byly publikovány v [W1].

V kapitole 2.2 byly ukázány algoritmy pro směrování v bezdrátových senzorových sítích. Žádný z uvedených algoritmů nezohledňuje možnosti komunikace pomocí DPSBF. V dalším výzkumu je možné se zaměřit na vyhledání a zhodnocení směrovacích algoritmů, které jsou vhodné pro sítě využívající DPSBF, případně na modifikaci stávajících směrovacích algoritmů, či návrh směrovacích algoritmů nových.

Praktickým rozvinutím výsledků výzkumu shrnutého v disertační práci by byl vývoj reálného prototypu senzoru, který by umožňoval komunikaci pomocí DPSBF.

Literatura

Citované publikace

- [1] The Sensor Network Museum - Mica2. <http://www.snm.ethz.ch/Projects/Mica2>. Dec 2015.
- [2] SOWNet technologies G node 301 Wireless Sensor. <http://www.sownet.nl/index.php/products/gnode>. Dec 2015.
- [3] Dorothea Wagner and Roger Wattenhofer. *Algorithms for Sensor and Ad Hoc Networks: Advanced Lectures*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [4] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '00, pages 56–67, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [5] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '99, pages 174–185, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [6] Sanjit Biswas and Robert Morris. ExOR: Opportunistic Multi-hop Routing for Wireless Networks. In *Proceedings of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '05, pages 133–144, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [7] G. Huo and X. Wang. An Opportunistic Routing for Mobile Wireless Sensor Networks Based on RSSI. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on*, pages 1–4, Oct 2008.
- [8] Lian Li, Limin Sun, Jian Ma, and Canfeng Chen. A Receiver-Based Opportunistic Forwarding Protocol for Mobile Sensor Networks. In *ICDCSW*, 2008.
- [9] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Sys-*

- tems and Applications*, WMCSA '99, page 90, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [10] Kihyun Kim, Jeongbae Yun, Jangkyu Yun, Byeongjik Lee, and Kijun Han. A Location Based Routing Protocol in Mobile Sensor Networks. In *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology - Volume 2*, ICACT'09, pages 1342–1345, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.
- [11] X. Huang, H. Zhai, and Y. Fang. Robust cooperative routing protocol in mobile wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(12):5278–5285, December 2008.
- [12] Z. F. Duan, F. Guo, M. X. Deng, and M. Yu. Shortest Path Routing Protocol for Multi-layer Mobile Wireless Sensor Networks. In *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC '09. International Conference on*, volume 2, pages 106–110, April 2009.
- [13] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences - Volume 8 - Volume 8*, HICSS '00, pages 8020–, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [14] S. Lindsey and C. S. Raghavendra. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, volume 3, pages 3–1125–3–1130 vol.3, 2002.
- [15] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS 2001*, pages 2009–2015, April 2001.
- [16] Nikolitsa Yannopoulou and Petros Zimourtopoulos. Dipole Antenna Radiation Pattern from the Wolfram Demonstrations Project. <http://demonstrations.wolfram.com/DipoleAntennaRadiationPattern/>, February 2017.
- [17] Main Lobe. https://en.wikipedia.org/wiki/Main_lobe. Aug 2017.

- [18] Mainwaring A., Culler D., Polastre J., Szewczyk R., and Anderson J. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, WSNA '02, pages 88–97, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [19] Hill J.L. and Culler D.E. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. *Micro, IEEE*, 22(6):12–24, Nov 2002.
- [20] TinyOS community forum. <http://www.tinyos.net>. Dec 2015.
- [21] Juang P., Hidekazu O., Wang Y., Martonosi M., Peh L., and Rubenstein D. Energy-efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet. *SIGPLAN Not.*, 37(10):96–107, October 2002.
- [22] Lorincz K., Malan D. J., Fulford-Jones T. R. F., Nawoj A., Clavel A., Shnayder V., Mainland G., Welsh M., and Moulton S. Sensor Networks for Emergency Response: Challenges and Opportunities. *IEEE Pervasive Computing*, 3(4):16–23, October 2004.
- [23] Simon G., Maróti M., Lédeczi Á, Balogh G., Kusy B., Nádas A., Pap G., Sallai J., and Frampton K. Sensor Network-based Countersniper System. In *Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '04, pages 1–12, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [24] Crosbow MICA. <http://www.willow.co.uk/MICA.pdf>. Jul 2017.
- [25] Crosbow MICA2. <http://www.willow.co.uk/MICA2.pdf>. Jul 2017.
- [26] Crosbow MICAZ. http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_datasheet.pdf. Jul 2017.
- [27] Crosbow CRICKET. http://www.willow.co.uk/html/cricket_mote_platform.php. Jul 2017.
- [28] Crosbow Imote2. http://wsn.cse.wustl.edu/images/e/e3/Imote2_Datasheet.pdf. Jul 2017.
- [29] Crosbow IRIS. http://www.nr2.ufpr.br/adc/documentos/iris_datasheet.pdf. Jul 2017.
- [30] Crosbow TELOSB. http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf. Jul 2017.

- [31] Moteiv Tmote Sky. <http://www.eecs.harvard.edu/konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>. Jul 2017.
- [32] Maxfor TIP700CM. <http://www.maxfor.co.kr/eng/TIP7xx.Series.datasheet.pdf>. Jul 2017.
- [33] ETH Zurich BNode. <http://www.btnode.ethz.ch>. Jul 2017.
- [34] Yale University XYZ. <http://www.cs.yale.edu/enalab/XYZ/>. Jul 2017.
- [35] Freie Universitat Berlin Modular Sensor Board (MSB-A2). <http://ftp.math.fu-berlin.de/pub/reports/tr-b-08-15.pdf>. Jul 2017.
- [36] NodeBoard iDwaRF. http://download.chip45.com/iDwaRF-NodeBoard_infosheet.pdf. Jul 2017.
- [37] Worldsens WSN430. <http://perso.ens-lyon.fr/eric.fleury/Upload/wsn430-docbook/introduction.html>. Jul 2017.
- [38] Linear Technology Dust Networks SmartMesh. http://cds.linear.com/docs/en/product-selector-card/smartmesh_Rev_D.pdf. Jul 2017.
- [39] Alexandru M. Moucha. *Topology Control, Interference and Collaboration in Wireless Ad-Hoc and Sensor Networks*. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, 2012.
- [40] Getsy S Sara, Neelavathy Pari S, and Sridharan D. Evaluation and comparison of emerging energy efficient routing protocols in MANET. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 1:37–46, 2010.
- [41] M. Lu L. Zou and Z. Xiong. PAGER-M: A novel location-based routing protocol for mobile sensor networks. In *IEEE/ACM First International Workshop on Broadband Wireless Services and Applications*, San Jose, CA, Oct 2004.
- [42] Kihyun Kim, Jeongbae Yun, Jangkyu Yun, Byeongjik Lee, and Kijun Han. A Location Based Routing Protocol in Mobile Sensor Networks. In *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology - Volume 2*, ICACT’09, pages 1342–1345, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.

- [43] Kashif Sharif, Teresa A. Dahlberg, and Lijuan Cao. Anycast Based Lightweight Routing Protocol for Mobile Sink Discovery in Sensor Networks. In *Proceedings of the 7th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference*, CCNC'10, pages 410–411, Piscataway, NJ, USA, 2010. IEEE Press.
- [44] Samir R. Das, Charles E. Perkins, and Elizabeth M. Belding-Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, March 2013.
- [45] Robert W. Floyd. Algorithm 97: Shortest Path. *Commun. ACM*, 5(6):345–, June 1962.
- [46] Lan Tien Nguyen, X. Defago, R. Beuran, and Yoichi Shinoda. An energy efficient routing scheme for mobile wireless sensor networks. In *2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, pages 568–572, Oct 2008.
- [47] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal. APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, IPDPS '02, pages 48–, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [48] Abdul Gani Khan, Abdur Rahman, and Neeti Bisht. Classification of hierarchical based routing protocols for wireless sensor networks. *International journal of innovations in engineering and technology*, pages 2319–1058, 2013.
- [49] C. Haslett. *Essentials of Radio Wave Propagation*. The Cambridge Wireless Essentials Series. Cambridge University Press, 2008.
- [50] C.A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2015.
- [51] J.D. Kraus and R.J. Marhefka. *Antennas for all applications*. McGraw-Hill series in electrical engineering. McGraw-Hill, 2002.
- [52] M. Mazánek, P. Pečač, and J. Vrba. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. České vysoké učení technické v Praze, Praha, vyd. 1. edition, 2008.
- [53] T. Penick. *Antennas and Wireless Propagation*, volume 1, page 24. EE325K Lecture Notes, 1st edition, 2003.
- [54] C. A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*, volume 1. John Wiley & Sons, 3rd edition, 2005.

- [55] Vaclav Skala, Michal Smolik, and Zuzana Majdisova. Reducing the Number of Points on the Convex Hull Calculation Using the Polar Space Subdivision in E2. In *Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI), 2016 29th SIBGRAPI Conference on*, pages 40–47. IEEE, 2016.
- [56] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms, Third Edition*. The MIT Press, 3rd edition, 2009.

Publikace autora k tématu disertační práce

Impaktované publikace

- [I1] A. Moucha, V. Černý, J. Kubr, and J. Janeček. Distributed Phase-Shift Beamforming Power Balancing in Ad-Hoc and Sensor Networks. *Telecommunication Systems*, 57(4):367–377, December 2014. Spoluautorství 25%.

Publikace excerptované ISI

- [W1] V. Černý, A. Moucha, and J. Kubr. Interference Cancellation by the Usage of Distributed Phase Shift Beamforming. In *2014 Eighth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, pages 248–253, Los Alamitos, US, 2014. Spoluautorství 33,33%.

Patenty

- [P1] A. Moucha, J. Kubr, and V. Černý. Distribuovaný systém pro tvarování vyzářovacího diagramu, 2013. Patent. Spoluautorství 25%.

Ostatní publikace

- [O1] J. Kubr, V. Černý, and A. Moucha. Advanced Methods for Phase Search in Beamformed Ad-Hoc Wireless Networks. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis*, pages 1–7, Dallas, TX, US, 2013. Spoluautorství 33,33%.
- [O2] A. Moucha, V. Černý, and J. Kubr. Topology Control with High-Gain Sector Turning Antennas in Wireless Networks. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis*, pages 160–174, Dallas, TX, US, 2012. Spoluautorství 33%.
- [O3] V. Černý, A. Moucha, and J. Kubr. Optimal Algorithm for Phase Shift Searching for the DPSBF. In *Proceedings of the 2nd Prague Embedded Systems Workshop*, pages 17–21, Roztoky u Prahy, 2014. Spoluautorství 33,33%.
- [O4] A. Moucha, V. Černý, and J. Kubr. Distributed Phase-Shift Beamformed Power Balancing in Ad-Hoc and Sensor Networks. In *Proceedings of the 2011 Internati-*

onal Conference on Telecommunication Systems Management, Dallas, TX, US, 2011. Spoluautorství 33%.

- [O5] V. Černý and J. Kubr. Design of the Protocol Stack for the Distributed Phase-Shift Beamforming. In *POSTER 2013 - 17th International Student Conference on Electrical Engineering*, Prague, CZ, 2013. Spoluautorství 50%.

Ostatní publikace autora

Patenty

- [OP1] J. Janeček and J. Kubr. Zařízení pro integrované a distribuované řízení a správu inteligentních budov a bytů, 2014. Utility Model, Patent pending. Spoluautorství 20%.

Ostatní publikace

- [OO1] J. Kubr and O. Votava. Mobile Data Network Analysis and Emulation tool. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis*, pages 128–135, Dallas, TX, US, 2012. Spoluautorství 50%.
- [OO2] L. Mátl, V. Klouček, V. Bohdal, J. Kubr, and T. Černý. ELISA: Extensible Layer for Internet Services and Applications. In *Building Sustainable Information Systems, XIV*, pages 309–321, Milano, IT, 2013. Spoluautorství 20%.
- [OO3] L. Mátl, V. Bohdal, J. Kubr, T. Černý, and V. Klouček. ELISA: Extensible Layer for Internet Services and Applications. In *POSTER 2013 - 17th International Student Conference on Electrical Engineering*, pages 1–5, Prague, CZ, 2013. Spoluautorství 20%.
- [OO4] O. Votava, P. Macejko, J. Kubr, and J. Janeček. Scheduling of Data Constrained Applications in Distributed Heterogeneous systems. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis*, pages 141–149, Dallas, TX, US, 2012. Spoluautorství 10%.
- [OO5] O. Votava, P. Macejko, J. Kubr, and J. Janeček. Dynamic Local Scheduling of Multiple DAGs in a Distributed Heterogeneous Systems. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Telecommunication Systems Management*, pages 171–178, Dallas, TX, US, 2011. Spoluautorství 5%.
- [OO6] J. Kubr and T. Sysala. Efficiency of Java RMI, Ninja, ARMI and ONC RPC. In *Proceedings of Workshop 2001*, pages 278–279, Praha, CZ, 2001. Spoluautorství 50%.

- [OO7] J. Kubr and J. Janeček. Performance Comparison of RPC Communication Protocols. In *Workshop 97*, pages 311–312, Praha, CZ, 1997. Spoluautorství 50%.
- [OO8] J. Janeček, J. Kubr, and M. Červený. *Distribuované systémy: Cvičení*. ČVUT, 1 edition, 2000. Spoluautorství 30%.