



University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitni 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Energeticky úsporné směrování v oportunistických bezdrátových sítích

The State of the Art and Concept of Ph.D. Thesis

David Široký

Technical Report No. DCSE/TR-2016-02
April, 2016

Distribution: public

Technical Report No. DCSE/TR-2016-02
April 2016

Energeticky úsporné směrování v oportunistických bezdrátových sítích

David Široký

Abstract

Wireless sensor networks gained a huge popularity in the last two decades. Especially networks with mobile nodes are being intensively researched. This Ph.D. thesis concept addresses a special case of sparse and disconnected mobile wireless networks – opportunistic networks. The thesis will be focused on energy efficient routing with respect to reliability and low latency. The first part describes what the wireless sensor networks are and what are their requirements. The second part summarizes the state of the art and defines research directions for the thesis.

The work was supported by the UWB grant SGS-2013-029 Advanced Computer and Information Systems.

Copies of this report are available on
<http://www.kiv.zcu.cz/en/research/publications/technical-reports/>
or by surface mail on request sent to the following address:

University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitni 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Copyright ©2016 University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic

Obsah

1	Úvod	2
2	WSN	3
2.1	Požadavky	3
2.2	Modely doručování zpráv v síti	4
2.3	Spoje	6
2.4	Směrování	7
2.5	Mobilní uzly	9
3	Cíl dizertační práce	10
4	Aktuální stav poznání	11
4.1	Mobile ad hoc networks	11
4.2	Optimalizace mravenčí kolonií	12
4.3	Zónové směrování	12
4.4	Plošné metriky	13
4.5	Vehicular ad hoc networks	14
4.6	Delay tolerant networks	15
5	Oportunistické sítě	18
5.1	Typy kurýrů	18
5.2	Typy sítí s neřízenými kurýry	19
6	Směr výzkumu	20
6.1	Úkoly	20
6.2	Postup výzkumu	21
7	Závěr	22

1 Úvod

Bezdrátové senzorické sítě (WSN) nabyly velké popularity v posledních dvaceti letech díky rychlému rozvoji elektronických zařízení a to zejména miniaturizací a snižováním spotřeby energie.

Vývoj bezdrátových senzorických sítí sahá do začátku osmdesátých let dvacátého století, kdy vojenské složky Spojených států amerických vyvíjely levné metody sledování nepřátelských jednotek [1]. Desítky či stovky senzorů rozmístěných v bitevním poli měly dodávat plošné informace do centrály. Stejně jako byla původní myšlenka Internetu mít komunikační infrastrukturu decentralizovanou, redundantní a tím odolnou proti výpadkům se i od WSN očekává decentralizované doručování zpráv. Není možné, aby při výpadku uzlu došlo k přerušení komunikace v části nebo dokonce v celé síti.

Později se WSN začaly uplatňovat v ekologii k měření kvality ovzduší, měření znečištění moří [2], v systémech rozpoznávání nebezpečí během přírodních katastrof [3], v zemědělství pro optimalizaci zavlažování [4], při sledování pohybu [5] a v mnoha jiných oblastech.

Oportunistické WSN (OppNet) [6], také zvané jako message ferries networks [7] nebo carry and forward networks [8], jsou specifickým typem WSN, kde síť není celistvá, ale je rozdělena do několika samostatných částí. Jeden z důvodů může být, že je síť velmi řídká a vysílací výkon je nedostatečný. Jiná možnost je, že je síť naopak velmi hustá a vzájemné rušení je natolik intenzivní, že znemožňuje komunikaci. Snižováním výkonu se sníží i množství kolizí, ale síť se tím může rozpadnout. Komunikaci mezi uzly potom zajišťují mobilní uzly. Mohou to být např. malá vozidla nebo i zvěř, která bude roznášet data po síti.

2 WSN

Bezdrátové senzorické sítě, které se také díky absenci infrastruktury označují jako ad-hoc bezdrátové sítě, kladou určité požadavky na hardware (HW) i software (SW). Tyto požadavky jsou rozebrány v následující podsekcí. Dále jsou popsány možné modely komunikace v počítačových sítích, rádiové technologie pro komunikaci a klasifikace směrování.

2.1 Požadavky

Vzhledem k tomu, že je množství senzorů nezanedbatelné, je nutné tyto senzory vyrábět levně. Nemohou to být výkonná zařízení s nejmodernější komunikační technikou. Síť by byla neekonomická a nemělo by význam ji dále rozvíjet.

Nejdůležitějším aspektem je však schopnost uzlů sítě se senzory pracovat s omezenými zdroji energie po velmi dlouhou dobu, třeba i několika let. Tento aspekt úzce souvisí i s finanční stránkou. Bude-li síť nasazená např. v rozsáhlé chráněné krajinné oblasti, nelze každý týden obměňovat baterie ve stovkách zařízení. Budou-li uzly umístěné na těžko dostupných místech, bude taktéž náročná údržba.

Odpovědí může být získávání elektrické energie z okolí (energy harvesting), např. přeměnou ze sluneční, tepelné nebo pohybové energie, to ale nemusí vždy pokrýt spotřebu uzlu. Řešením problému je aplikace různých technik úspor energie jako je optimalizace směrování nebo uspávání.

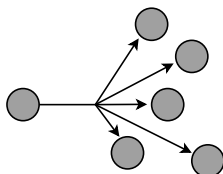
Kdyby uzly běžely neustále, většinu času by energii spotřebovávaly zbytečně. Procesor nebo mikrokontrolér by běžel v prázdné smyčce a rádio by dlouze naslouchalo v době, kdy nikdo nekomunikuje, protože není co posílat. Teplotu stačí změřit jednou za hodinu, vozidlu stačí odeslat informace o stavu vozovky jen každých pár set metrů. Proto se uzly uspávají a probouzejí v tzv. pracovním cyklu. Aby skutečně došlo k úspoře nebo aby se dalo rychle reagovat na podnět zvenčí, musí být systém schopný se nejen rychle probudit, ale i rychle usnout. Jednou z cest zajišťujících, aby se uzly probouzely ve správnou dobu a měly s kým komunikovat, jsou synchronizační protokoly, které zajistí lokální nebo globální plánování bdělosti.

2.2 Modely doručování zpráv v síti

Modely doručování v datových sítích lze rozdělit do skupin podle mohutnosti množin odesílatelů a příjemců:

broadcast

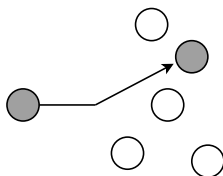
Zprávy mají jediného odesílatele a jsou odesílány do celé sítě, případně do podsítě, která má definované hranice. Je to nejjednodušší forma komunikace, neboť klade minimální nároky na směrování a nevyžaduje žádné adresování. Mělo by se však zajistit, aby se předávání zpráv nezacyklilo. Nevýhodou je, že se síť snadno zahltí a sníží se její propustnost.



Obrázek 1: Broadcast

unicast

Zprávy mají jediného odesílatele i příjemce. Mezilehlé směrovače musí zajistit, aby zprávy dorazily správnému příjemci. Musí tedy již existovat systém adresování a směrování.



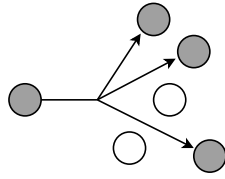
Obrázek 2: Unicast

multicast

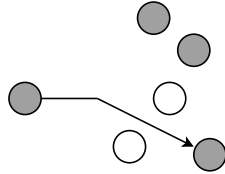
Multicast se nachází mezi broadcastem a unicastem. Odesílatel je jen jeden, ale příjemců může být několik. Doručování může probíhat např. na základě společného prefixu adresy nebo na základě přihlášení do skupiny, což ale klade vyšší nároky na paměť i výpočetní výkon směrovačů.

anycast

Zprávy jsou odesílány z jediného hostitele a jsou doručovány jedinému adresátovi v rámci skupiny. Lze si to představit jako multicast, kde si např. první příjemce zprávy přivlastní a ostatním nebudou doručeny. Příjemce se určuje minimalizací určené metriky, např. vzdálenosti nebo rychlosti



Obrázek 3: Multicast

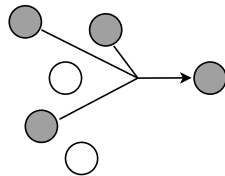


Obrázek 4: Anycast

odezvy. Často se této techniky využívá pro vyrovnávání zátěže serverů. Směrovače budou preferovat servery s nižším zatížením.

convergecast

Convergecast je opak broadcastu. Zprávy ze všech hostitelů jsou odesílány jedinému příjemci, případně velmi malé množině příjemců.



Obrázek 5: Convergecast

Convergecast je ve WSN používán nejčastěji. Data z celé sítě putují do sběrné báze stanice, která je může jen uchovávat, nebo funguje jako brána do další sítě a zpracovaná či nezpracovaná data odešle dál.

Hlavním rozdílem je oproti broadcastu kromě mohutnosti stran komunikace především fakt, že data směrem k báze stanicím nabývají na objemu. Aby nedocházelo k přetěžování linek, mohou se používat navíc techniky agregace dat. Např. jsou-li měřená data teplotou v krajině a úkolem je určit průměrnou teplotu v celé oblasti, pak není nutné, aby se do báze stanice doručovaly údaje z jednotlivých senzorů, ale stačí, aby se už po cestě slučovaly.

2.3 Spoje

Senzory v průmyslových komplexech, kde je vysoká míra elektromagnetického rušení, jsou nejčastěji propojené metalickými nebo optickými spoji. Takové propojení je ovšem nákladné a nepraktické. Především v oblastech, kde by byly náklady např. kvůli rozloze neúnosné nebo by vůbec nebylo možné spoje zavést.

Alternativou jsou bezdrátové spoje – ultrazvukové, optické nebo rádiové. Ultrazvukové spoje se uplatní v prostředí, kde se zvuk šíří rychle a daleko, např. pod vodou. Optické spoje se používají jen v malé míře kvůli nutnosti existence přímé viditelnosti mezi komunikujícími stranami, a tak v komunikaci převládají spoje rádiové. Nejběžnější technologie jsou:

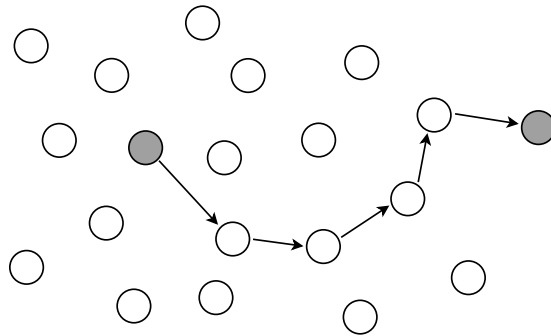
- **WiFi**, IEEE 802.11, je rozšířená technologie především v domácnostech a kancelářích. Nabízí vysoké přenosové rychlosti a je vhodná na přenosy velkých objemů dat. Je to ovšem vyváženo parametry, které nejsou pro WSN vhodné: HW je velmi energeticky náročný a trvá dlouho, než se vytvoří spojení.
- **Bluetooth**, IEEE 802.15.1, byl navržen pro bezdrátová spojení bod-bod na krátké vzdálenosti do 10 metrů, v nové verzi až 100 metrů. Bohužel spárování zařízení trvá dlouhou dobu.
- **GPRS** je jedna z celulárních technologií, které nabízí připojení mobilních i stacionárních zařízení do internetu. Je však závislá na cizí síti, přenosy jsou nákladné a inicializace připojení je extrémně dlouhá. Navazující generace EDGE, UMTS a LTE mají drahý HW a mnohem větší spotřebu.
- **Proprietární RF transceivery a protokoly**, které jsou často odvozené např. z IEEE 802.15.4, jsou čipy a protokoly navržené různými výrobci především s ohledem na nízkou spotřebu, rychlé probouzení a cenu. Většinou nejsou navzájem kompatibilní, je tedy nutné v celé síti používat stejné řešení. I přes to jsou nejvhodnější pro implementaci WSN.

Protiváhou k nízké spotřebě a krátkým časům probouzení proprietárních řešení je relativně malý dosah a nízká přenosová rychlost. Malé vysílací výkony a zisk přijímacího zesilovače nabízejí dosahy řádově desítky až stovky metrů v rychlostech maximálně jednotek kilobytů za vteřinu. Pro WSN jsou však v mnoha případech tyto parametry postačující.

Nejpoužívanější volná pásma pro rádiovou komunikaci jsou 433, 868, 915 MHz a 2,4 Ghz. Záleží na regionu, kde je síť provozována. Každý region má svá legislativní pravidla na jakých frekvencích a s jakými vysílacími výkony a modulacemi lze pracovat. Kromě legislativy se musí u návrhu sítě počítat také s prostředím, kde bude síť umístěna, jaké je tam rušení a jaká je nutná míra miniaturizace.

2.4 Směrování

Protože uzly mají nízký vysílací výkon a „vidí“ jen své nejbližší sousedy, je základním komunikačním principem WSN předávání zpráv z uzlu na uzly a jejich postupné doručování do bazových stanic. Taková komunikace se také nazývá multi-hop nebo hop-by-hop. Jedním z kritérií směrování je doručit zprávu v co nejkratším čase a za nízkou cenu. Cenou je míněna především spotřeba energie. Tyto dva požadavky jsou ale protichůdné, protože neustálé využívání stále nejkratší cesty co do počtu přeskoků bude znamenat, že se uzly po této cestě budou vyčerpávat rychleji, než ostatní ve zbytku sítě. Je tedy potřeba hledat kompromis.



Obrázek 6: Multi-hop předávání zpráv

Základním problémem WSN je drahé získání informace o globálním stavu. Aby bylo možné zjistit aktuální stav energetických zdrojů v celé síti, např. baterií, kdo s kým sousedí, kvality rádiových linek atd., je zapotřebí velkého množství přenesených zpráv. Stav sítě se může navíc neustále měnit. Jakékoliv centrální zpracování je energeticky zcela nevýhodné musí se hledat vhodné decentralizované metody.

Bez centrálního zpracování a s neustále se měnící topologií sítě není možné dosáhnout optimálního směrování v rámci zadaných parametrů. Vhodná metoda by měla mít vyvážené požadované vlastnosti v daném modelu sítě.

Nejjednoduššími metodami, které fungují bez jakékoliv znalosti topologie sítě, jsou záplavové a náhodné směrování. Záplavové směrování doručuje zprávy tak, že uzel vyšle zprávu všem sousedům a ti operaci opakují. Je tedy garantováno, že se zpráva doručí do bazové stanice v nejkratším čase za cenu velkého počtu zpráv. U náhodného směrování pošle každý uzel zprávu vždy jen jednomu náhodnému sousedovi. V ideálním případě dorazí zpráva vinou náhody po nejkratší/nejlevnější cestě, v nejhorším případě bude zpráva „bloudit“ po síti, dokud nebude odstraněna. Postupně vznikaly nové metody směrování, které již berou na zřetel topologii sítě a spotřebu energie. Žádná z metod není univerzální, protože každá senzorická síť může mít jiné uspořádání.

Pro snazší popis vlastností směrovacích protokolů zavedeme následující klasifikaci:

Proaktivní/reaktivní – proaktivní protokoly vytvářejí směrovací tabulky předem. Buď při inicializaci sítě nebo v pravidelných intervalech. Výhodou je, že při častém posílání zpráv není nutné opakovaně zjišťovat, kterému ze sousedů ji má uzel poslat. Nevýhoda je, že se opožděně adaptuje na změny v síti a má vyšší paměťovou i výpočetní náročnost. Příkladem je protokol Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) [10, 11]. Reaktivní protokoly zjišťují trasu, až když potřebují odeslat zprávu. Výhodou je rychlá adaptace na změny a uzly nemusí udržovat žádné tabulky, ale nehodí se pro časté odesílání zpráv, neboť opakovanými dotazy na směrování se síť zahlcuje. Příkladem je protokol Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [12, 13].

Deterministické/pravděpodobnostní – při rozhodování, kterému sousednímu uzlu se má zpráva poslat na základě dostupných informací a aktuálního stavu, se uzel s deterministickým protokolem rozhodne vždy stejně. Naopak pravděpodobnostní protokoly přiřadí jednotlivých sousedům pravděpodobnosti podle dostupných informací a posléze zprávy mezi ně patřičně rozdělují. Výhodou determinismu je predikovatelnější čas doručení, ale v případě narušení struktury sítě se začnou všechny zprávy ztrácet, dokud nedojde opětovnému obnovení nebo reinicializaci směrování. Pravděpodobnostní přístup sice nedokáže zaručit, kdy bude zpráva doručena, ale poskytuje vyšší míru odolnosti vůči změnám a navíc stačí méně častá reinicializace směrování.

(Ne)podporuje vícecestné směrování – velmi důležitá vlastnost, má-li být směrování robustní. Má-li uzel na výběr z více cest a všechny využívá, např. cyklicky nebo podle pravděpodobnosti, zvyšuje se pravděpodobnost doručení zpráv při poruchách v síti. Tento princip byl popsán v předchozím odstavci.

(Ne)podporuje výpadky uzlů/nové uzly – robustnost již byla zmíněna. Nelze předpokládat, že bude síť neměnná. Uzly se mohou poškodit, dojde jim energie, nebo budou ze sítě odstraněny. Naopak do sítě mohou přibývat nové uzly, např. v rámci inovace nebo zvýšení hustoty sítě. V podstatě každý směrovací protokol by měl obsahovat mechanismus na řešení takových situací.

(Ne)podporuje mobilní uzly – podpora mobility spočívá ve schopnosti rychle reagovat na změny vzájemných poloh. Předpokládá se, že se všechny uzly nepohybují stejným směrem a stejnou rychlostí. Bližší rozbor bude v kapitole 2.5.

(Ne)řeší energetickou úsporu – hlavní téma dizertační práce a jeden z nejdůležitějších problémů WSN. Jsou-li uzly napájené z omezených zdrojů a umístěné např. v těžko dostupném prostředí, je požadavkem dlouhodobý provoz bez nutnosti zásahu obsluhy. Jiným aspektem může být cena za údržbu, kde je také snahou minimalizovat četnost zásahů.

(Ne)podporuje kvalitu služby (QoS) – Kvalita služby řeší dva hlavní úkoly – čas doručení a rozložení objemu dat. Tyto úkoly mohou být protichůdné. Budou-li např. k dispozici dvě cesty k cíli a budou-li se zprávy posílat vždy jen tou kratší, může dojít k zahlcení této cesty a k zahazování zpráv. Využijí-li se obě cesty, sníží se riziko zahlcení a zahazování.

Odolnost proti útokům – na směrování jsou v zásadě zaměřeny dva hlavní typy útoků – odepření služby (Denial of Service, DoS) a vyčerpání. Útokům založeným na rušení komunikačního kanálu nebo zahlcením uzlu nadměrným množstvím zpráv se dá jen těžko algoritmicky bránit. V ostatních případech se lze bránit detekcí, adaptací, odstraněním příčiny nebo redundancí [15].

Synchronní/asynchronní – energetických úspor lze docílit jak při vysílání, tak i při příjmu. Aby mohly uzly komunikovat, musí být aktivní, jeden musí být v danou chvíli připravený vysílat a druhý přijímat. Jde tedy o to, jak často a kdy se mají probouzet. V případě synchronní komunikace dochází k synchronizaci vnitřních hodin a probouzení probíhá podle předem domluveného plánu. Je-li komunikace asynchronní, plánuje se probouzení bez znalosti stavu okolí, ale tak, aby se zvýšila pravděpodobnost, že bude potřebný souseď připravený přijímat zprávy.

Tato klasifikace postačuje pro základní orientaci ve vlastnostech směrovacích protokolů.

2.5 Mobilní uzly

Na mobilní uzly lze pohlížet dvěma způsoby – uzel je zdroj dat, které potřebujeme doručit z aktuálního místa v síti u které se předpokládá, že je její graf spojitý. Uzly se pouze účastní přeposílání dat. Druhý pohled na mobilní uzel je jako na kurýra, který přenáší data mezi izolovanými subsítěmi nebo samostatnými uzly, kde chybí konektivita. Kurýr může také v síti ušetřit energii tím, že data přenesou do vzdálenější části sítě a není potřeba zapojovat mezilehlé uzly do komunikace.

3 Cíl dizertační práce

Dostupnost miniaturních zařízení vybavených bezdrátovou komunikací otevírá nové možnosti v nasazení elektroniky do oblastí, kde to dříve nebylo možné nebo minimálně náročné či nepraktické. Třeba kvůli mobilitě nebo nutnosti propojení vodiči. Zásadním problémem jsou omezené zdroje energie pro provoz takových zařízení.

Miniaturizace a pokroky ve výrobě integrovaných obvodů představují jeden směr vývoje snižování spotřeby energie. Druhým směrem vývoje je navrhování kvalitních směrovacích protokolů, které dále sníží spotřebu minimalizací vysílacích výkonů a zkrácením pracovních cyklů.

Cílem práce je zhodnotit aktuální stav vědy v oblasti směrování v oportunistických sítích a navrhnout nové protokoly pro energeticky úsporné směrování kombinací různých metod s vyvážením spolehlivosti doručování a doby odezvy. Efektivita bude ověřena simulací.

4 Aktuální stav poznání

V následujících sekcích je přehled protokolů a principů, které lze využít pro další rozvoj oportunistických sítí. Jedná se převážně o protokoly směrování v sítích s mobilními uzly, ale také o metodách distribuované optimalizace.

4.1 Mobile ad hoc networks

Mobile ad hoc networks (MANET) [16], je rodina protokolů navržená pro komunikaci mobilních zařízení, jako jsou přenosné počítače nebo mobilní telefony, bez přítomnosti statické komunikační infrastruktury. Nepředpokládají se časté změny v síti. Patří sem např. protokoly DSDV a AODV.

Protokol DSDV vychází ze směrovacího protokolu Routing Information Protocol (RIP) [9]. Odstraňuje z něj dva problémy – zacyklení a počítání do nekonečna. K vektoru, kde jsou uloženy cílové uzly, jejich vzdálenosti v počtu skoků a sousední uzel, který je v daném směru, se přidává navíc sekvenční číslo a čas aktualizace. Sekvenční číslo generuje cílový uzel při každém rozeslání svého vektoru. Přejde-li informace o vzdálenosti s vyšším sekvenčním číslem, je položka tabulky aktualizována. Přejde-li informace o vzdálenosti se sekvenčním číslem stejným, jako je již v tabulce, aktualizuje se položka pouze tehdy, je-li cesta kratší. Při každé aktualizaci se upraví čas aktualizace. Položky, které nebyly dlouho aktualizovány, se z tabulky odstraňují. Sekvenční čísla zabrání počítání do nekonečna a tvorbě smyček. Nevýhodou protokolu je nutné časté rozesílání směrovacích tabulek.

Protokol AODV je reaktivním protokolem, který vytváří cestu na požádání, ale jednou ustanovená cesta se udržuje co nejdéle to jde. Obsahuje tedy i prvky proaktivního přístupu. Ve chvíli, kdy uzel potřebuje odeslat zprávu, rozešle nejdříve všem sousedům požadavek na získání cesty. Dostane-li uzel požadavek na cíl, ke kterému už cestu zná, pošle tuto informaci zpět stejnou cestou, jinak požadavek přepošle dál všem svým sousedům vyjma původního. Takto se předává dál, dokud nedorazí do cíle a ten pošle zpět odpověď stejnou cestou. Tímto procesem v síti vzniká mnoho dočasných potenciálních cest, ale vždy jen jedna je zvolena. Není garantováno, že je optimální. Duplicity se nepřeposílají, aby se zabránilo zacyklení. Pro snížení zatížení sítě se do požadavků přidává sekvenční číslo. Mezilehlý uzel zahodí požadavky, které mají nižší nebo stejné sekvenční číslo, než které už zpracoval. Dlouho nevyužívané směrovací informace se zahazují.

Žádný z protokolů MANETu ve skutečnosti neřeší pohyb uzlů. Reaktivní protokoly vždy před vysláním zprávy zjišťují cestu, takže nepotřebují předem znát, kde se probudí a komu pak data poslat. V oportunistických sítích jsou prakticky nepoužitelné, neboť je velká pravděpodobnost, že se síť bude měnit rych-

leji, než budou konvergovat směrovací informace. U proaktivních protokolů se zase předpokládá, že změny a pohyby v síti budou natolik pomalé, že budou stačit periodické aktualizace směrovacích informací.

4.2 Optimalizace mravenčí kolonií

Úkolem optimalizace mravenčí kolonií (Ant Colony Optimization, ACO) [17] je nalezení vhodných cest. ACO je pravděpodobnostní metoda. Je inspirována chováním mravenců při hledání potravy. Když vyrazí mravenec pro potravu a nalezne ji kratší/výhodnější cestou, cestou zpět tuto označí feromonem. Další mravenec bude při hledání označenou cestu preferovat, ale nemusí se jí držet. Může hledat jiné a nalezené lepší řešení opět označí feromonem. Tímto způsobem lze konvergovat k optimálnímu řešení, neboť čím bude cesta výhodnější, tím bude feromonová stopa silnější. Díky pravděpodobnostnímu přístupu se nemůže stát, že optimalizace dokonverguje k lokálnímu optimu.

V této podobě však bude metoda velmi pomalu reagovat na změny v síti. Zavádí se tedy ještě princip vyprchávání feromonů v čase. Čím silnější bude stopa, tím rychleji bude vyprchávat. Bude-li cesta stále nejvhodnější, bude po ní stále chodit hodně mravenců a budou jí obnovovat. Nalezne-li se vhodnější řešení, provoz se tím rychleji přesune.

4.3 Zónové směrování

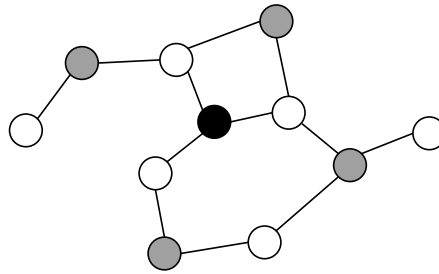
Zónové směrování je typ protokolů, které využívají kombinaci proaktivního a reaktivního směrování. Jsou dva možné přístupy.

První je, že se síť rozdělí do jednotlivých zón, které se mohou i nemusí překrývat. Tento přístup se také nazývá shlukování (clustering). V rámci zóny se zvolí hlava (head) zóny, jejíž úkolem je proaktivně spočítat směrování uvnitř zóny. Tyto informace pak rozešle ostatním. Při přechodech zpráv mezi zónami se pak uplatňuje reaktivní směrování. Úkolem takového přístupu je v podstatě rozdělení velkého výpočetního problému na menší, čímž se řeší škálovatelnost směrování.

Podobný přístup se používá u hierarchického shlukového směrování. Rozdíl je ale v tom, že se předpokládá, že hlava shluku bude mít dostatečný vysílací výkon na to, aby dosáhl přímo na báзовou stanici nebo na další uzel v hierarchii. Příkladem je protokol Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [18]. Tento protokol dokonce předpokládá, že každý uzel může být hlavou shluku. Protokol pracuje v cyklech, kde v první fázi dojde k volbě hlav shluků, utvoření shluků, a následuje stabilní fáze, kde již probíhá sběr dat. Uzly se pravidelně střídají ve vedení a tím se rovnoměrně rozdělí energetická zátěž na komunikaci s báзовou stanicí. Zda bude uzel v následujícím cyklu hlava shluku, si

každý uzel určí sám. Počet shluků k a počet uzlů N je předem definován. Uzel se stane hlavou s pravděpodobností $p = k/N$. Není garantováno, že počet hlav bude přesně k , ale odpadá jakákoliv komunikační režie. Rozhodne-li se uzel, že bude hlavou, oznámí to svému okolí, a uzly, které nebudou hlavní, si zvolí svou hlavu shluku podle nejnižší potřebné intenzity signálu. Zná-li bázeová stanice počet uzlů a rozlohu oblasti, kde jsou nasazeny, dokáže spočítat optimální počet shluků pro maximalizaci životnosti sítě.

Druhý přístup je takový, kde si zónu okolo sebe do určitého počtu přeskoků tvoří každý uzel. Příkladem je protokol Zone Routing Protocol (ZRP) [19]. Odpadá nutnost volby hlavy zóny, ale zvyšuje se výpočetní náročnost všech uzlů. Tento přístup lze chápat jako kešování reaktivních metod. Každý uzel využívající protokol ZRP má definovaný poloměr své zóny v počtu přeskoků. Aby zjistil, kdo spadá do jeho zóny, vyšle broadcastem maják s omezenou dobou života. Z odpovědí, které obsahují informace o linkách dosažených uzlů, si sestaví lokální směrovací tabulku. Chce-li odeslat zprávu a cíl je v jeho zóně, pošle zprávu podle směrovací tabulky. Aby mohl odeslat zprávu mimo zónu, zavádí ZRP tzv. bordercast. Uzly, které jsou na hranici zóny, se nazývají hraniční. Na obrázku 7 má černý uzel zónu o velikosti dvou přeskoků, šedé uzly jsou jeho hraniční uzly. Při bordercastu se zpráva odešle všem hraničním uzlům a ti jí přepošlou svým hraničním uzlům, atd. Mimo zónu se ZRP chová proaktivně identicky jako AODV, ale místo broadcastu využívá bordercastu.

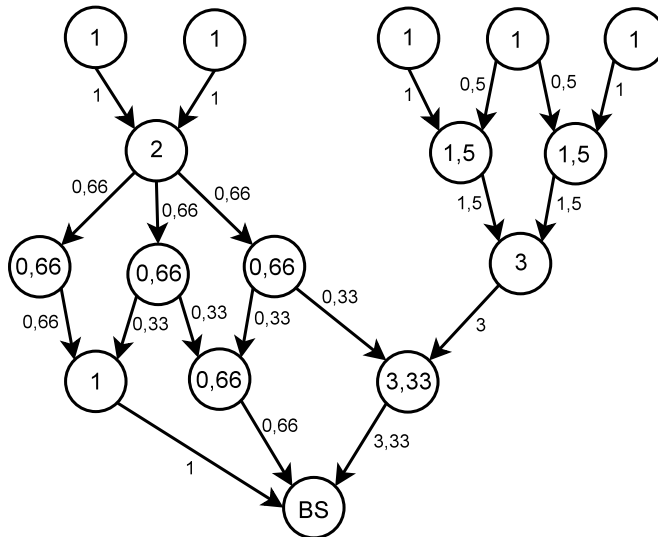


Obrázek 7: Hraniční uzly.

4.4 Plošné metriky

Většina směrovacích protokolů, které berou v potaz úsporu energie, počítá při výpočtu cesty jen s aktuálním stavem energie v jednotlivých uzlech, cenou spoju a případně vytížeností jednotlivých uzlů. Tento přístup může vést k pomalejšímu rozkládání toku v síti a předčasnému vyčerpávání některých uzlů. Zavede-li se pomocná metrika, která se bude počítat plošně a určí vhodné/nevhodné oblasti místo jednotlivých uzlů, pak se tok lépe a rychleji rozloží. Tato metrika určí plošnou míru zatížení.

Jedním z takových algoritmů je PageRank [20]. V současnosti jsou na PageRanku založené protokoly Page Rank Routing Algorithm Method (PR-RAM) [21], a Visit of Links Routing algorithm method (VOL-RAM) [22]. Přístupují k problému ale trochu jinak. Při inicializaci sítě se naleznou všechny nejkratší cesty, bráno počtem přeskoků, ze všech uzlů do bazových stanic. Ve vytvořeném orientovaném grafu, kde bazové stanice tvoří stoky, se listům grafu přiřadí hodnoty 1 a všem ostatním se přiřadí již podle výpočtu PageRanku. Příklad je na obr. 8. Výsledné hodnoty určují pravděpodobnostní zatížení uzlů. Čím vyšší hodnota, tím vyšší pravděpodobnost, že bude uzel sloužit jako mezilehlý článek pro přenos zprávy. Bude-li se uzel rozhodovat, kam zprávu poslat, měl by preferovat souseda s nižším PageRankem, kde bude nižší pravděpodobnost přetížení.



Obrázek 8: Výpočet hodnot PageRanku.

U velkých a/nebo proměnlivých sítí je počáteční sestavování grafu náročné. V dizertační práci se tedy bude vycházet z jiné představy a to takové, kdy se PageRank spočítá v neorientovaném grafu bez bazových stanic. PageRank lze počítat iterativně, decentralizovaně, a lze do něj zakomponovat váhy uzlů. Váhy se přiřadí podle jejich stavu energií a datového vytížení. Musí se však řešit problémy jako např. postupná divergence hodnot. Není také jisté, zda výpočet povede k očekávanému výsledku. To je předmětem dalšího výzkumu.

4.5 Vehicular ad hoc networks

Vehicular ad hoc networks (VANET), je rodina protokolů multi-hop sítí určené především pro komunikaci mezi vozidly v silničním provozu [23, 24]. Slouží pro zvýšení bezpečnosti dopravy a komfortu pro cestující díky předcházení nebezpečným situacím a k optimalizaci cesty, aby nedocházelo k zácpám. Sítě jsou

složené z mobilních jednotek umístěných ve vozidlech (on board unit, OBU) a stacionárních jednotek rozmístěných podél silničních komunikací (road side unit, RSU).

Na rozdíl od obecnějších protokolů rodiny MANET jako jsou AODV a DSDV, většina těchto protokolů již počítá se směrem pohybu a využívá predikce pro optimalizaci směrování. Neřeší energetickou spotřebu, protože se předpokládá, že vozidla mají energie dost a stacionární jednotky jsou připojené do elektrické rozvodné sítě. Mají také k dispozici velký výpočetní výkon, což lépe umožňuje adaptovat se na rychlé změny sítě. Největším problémem k řešení u směrování ve VANETu je velká rozličnost situací, na které lze narazit. Na jedné straně jsou méně frekventované komunikace, kde jezdí velice málo vozidel a tudíž konektivita mezi nimi je sporadická a při přenosu dat dochází k dlouhým zpožděním a ztrátám. Naopak v centrech velkých měst je hustota vozidel největší a režie komunikace může představovat velkou zátěž na komunikační médium. Směrovacích protokolů vznikla celá řada a lze je klasifikovat do dvou hlavních kategorií:

- **směrování založené na topologii** – vycházejí ze znalostí existujících spojů v síti, téměř identické principy jako v MANETu. Nejsou tedy vhodné pro rozsáhlé, rychle se měnící nebo řídké sítě.
- **Směrování založené na pozici** – základem jsou hladové algoritmy. Uzly mohou i nemusí znát mapy, ale znají svou pozici a pozici cíle. Pokud chce uzel poslat data, vybere si nejvzdálenějšího souseda ve směru cíle. K optimalizaci se využívá i informace o směru pohybu.

Příkladem směrování založeném na pozici je sada protokolů Vehicle-Assisted Data Delivery (VADD) [8]. VADD potřebují ke své funkci znalost mapy a informace o době přenosu dat mezi křižovatkami. Cílem je minimalizovat zpoždění. Pro zjištění, kdo je v komunikačním dosahu, vysílají uzly majákové zprávy a odpovědi obsahují pozici a směr pohybu. Před odesláním dat uzel spočítá nejkratší cestu Dijkstrovým algoritmem, kde vrcholy grafu jsou křižovatky a vzdálenosti jsou doby přenosu mezi nimi. Dorazí-li vozidlo na křižovatku, majákem zjistí, zda se z ní pohybuje vozidlo po optimální trase. Pokud ano, zprávu mu předá. Pokud ne, provede výpočet lokálních náhradních tras na další křižovatku. Pokud bude doba zpoždění na nové trase pod hranicí definovaného prahu, zprávu předá. V opačném případě si zprávu ponechá a pokusí se operaci zopakovat na další křižovatce.

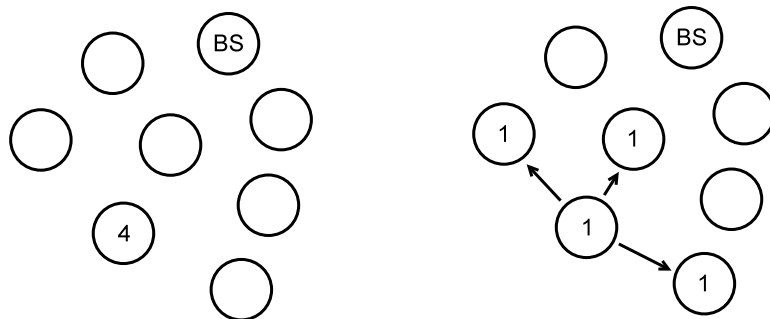
4.6 Delay tolerant networks

Delay tolerant networks (DTN) je typ sítí, které jsou odolné vůči častým a dlouhotrvajícím výpadkům konektivity. Buď z důvodu přerušování konektivity, např. rušením, nebo kvůli pohybu účastníků sítě. Svou cestu si našly i do WSN [25].

Reaktivní protokoly v takových sítích nemohou vůbec fungovat, protože nebude existovat stabilní cesta k cíli. Proaktivní protokoly také nejsou vhodné, protože budou dlouho a nebo vůbec nemusí konvergovat.

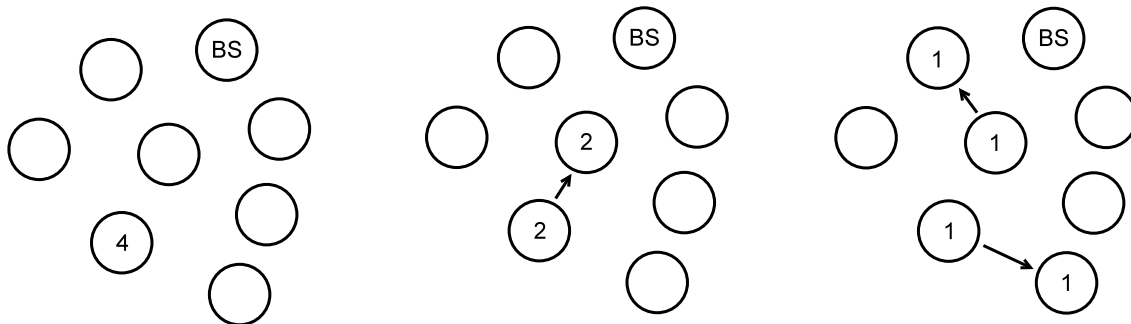
Odolnosti proti ztrátám se dosahuje replikací dat na víc cest, čímž se zvyšuje šance, že se zpráva kompletně neztratí, vyprší-li její doba života. Replikace však znamená zvýšené požadavky na přenosové rychlosti, paměť a výpočetní výkon. Nelze tedy jen slepě vysílat všemi směry, tím by se síť zahltila. Úkolem DTN sítí je tedy řídit zahlcení (congestion control). Řízení může probíhat z centrálního uzlu, což není vhodné pro WSN, nebo decentralizovaně. Decentralizovanému řízení se věnují především takzvané epidemické protokoly [14], které určují, kterým sousedním uzlům se mají zprávy v intervalech předávat a za jakých okolností mají přestat předávat.

Protokol Spray and wait [27, 28] je epidemickým protokolem, který zajistí, že se v síti bude najednou pohybovat maximálně L kopií zprávy. Nedojde tedy k takovému zahlcení sítě jako v případě záplavového směrování. Protokol je rozdělený do dvou fází: sprejování a čekání. Během sprejování dochází ke kopírování zpráv mezi uzly. Aby se zajistilo, že v síti bude maximálně L kopií zprávy, vytvoří zdrojový uzel u sebe L virtuálních kopií a ty pak rozdává. Každý další uzel může rozdat jen $N - 1$ kopií, které obdržel. Jednu si vždy ponechá. Tato fáze končí ve chvíli, kdy každý uzel má maximálně jednu kopii zprávy. Jinak řečeno přesně L uzlů obsahuje jednu kopii. V druhé fázi, zvané čekání, už uzly předají zprávu pouze cílovému uzlu. Jak bude protokol úspěšný, záleží na velikosti L a strategii rozdávání kopií. Nejjednodušší strategie je taková, že zdrojový uzel rozdá po jedné kopii prvním L uzlům, které potká, viz obr. 9. Nevýhodou je, že takové nastavení bude vyžadovat maximálně dvouskokovou vzdálenost k cíli. Jinou variantou je např. binární sprejování, kdy každý uzel rozdá na setkání jen $N/2$ kopií, které aktuálně vlastní, pokud je $N > 1$, čímž zvýší limit na skokovou vzdálenost, viz obr. 10.



Obrázek 9: Spray and wait, jednoduchá strategie

Dalším z protokolů DTN sítí je History Based Prediction for Routing (HBPR) [26]. Pro optimalizaci šíření zpráv se využívá historie pohybu uzlů. Plo-



Obrázek 10: Spray and wait, binární sprejování

cha, po které se mohou uzly pohybovat je omezená a rozdělená na sektory. Každý uzel si uchovává frontu navštívených sektorů a průměrné rychlosti mezi sektory. K odhadu budoucího sektoru se používají Markovské modely. Protokol nevyužívá mapy a uzly se snaží vždy předávat zprávy nejlépe ve směru cíle. Potkají-li se dva uzly a jeden potřebuje odeslat zprávu, vyžádá si od druhého tabulku s historií pohybu a provede odhad směru pohybu a následující sektor. Bude-li výsledek spadat do daného limitu, předá druhému uzlu kopii zprávy.

5 Oportunistické sítě

Definujme pojem *oportunistická síť* jako síť složenou ze stacionárních uzlů, jejichž graf konektivity má prázdnou množinu hran, a z mobilních uzlů, které se v této síti pohybují. Mobilní uzly, kurýři, mohou v dostatečné blízkosti navazovat komunikaci se statickými uzly nebo i s jinými kurýry a vyměňovat si s nimi zprávy.

Definujme *cestu* jako posloupnost kontaktů kurýra s jinými uzly. Aby bylo možné doručit zprávu z libovolného uzlu do báze stanice, musí platit předpoklad, že v konjunkci budoucích cest všech kurýrů bude existovat cesta z daného uzlu do báze stanice.

Rychlost doručování bude silně záviset na množství a typu kurýrů v síti. Větší počet kurýrů zajistí větší počet budoucích cest a častější předávání zpráv.

5.1 Typy kurýrů

Kurýry lze rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- řízený,
- neřízený.

Řízené lze ještě rozdělit na kurýry s a bez vlastní vůle. Ti bez vlastní vůle budou řízeni ze stacionárních uzlů, které jim předají zprávu. Budou jim určovat, jakým směrem se mají následně vydat. Kurýři s vlastní vůlí si mohou sami plánovat cestu sítí. Příkladem můžou být robotizovaná vozítka v oblasti s přírodní katastrofou nebo ponorné automatické bóje v podvodních WSN.

Neřízení kurýři, ve smyslu pohybu, se po síti pohybují nezávisle na topologii a stavu sítě. Nelze ovlivnit, kam se v budoucnu vydají, lze to jen odhadovat. Je-li pohyb zcela náhodný, není možné optimalizovat cestu a zbývá jen alternativa záplavového směřování. Pokud však pohyb není zcela náhodný, je možné odhadovat vhodnější cesty. Stacionární uzel nemusí zprávu předat prvnímu kurýrovi, který se přiblíží, ale počká na dalšího, protože předpokládá s určitou pravděpodobností, že půjde lepší cestou. Dorazit samozřejmě nemusí nebo dorazí později. Podobným rozhodovacím procesem musí projít i kurýr, když se rozhoduje, zda naloženou zprávu předat nebo ne. Z toho také vyplývá, že je mnohem těžší garantovat čas nebo spolehlivost doručení oproti řízeným kurýrům. Příkladem může být divoká zvěř nebo vozidla v silničním provozu.

5.2 Typy sítí s neřízenými kurýry

Sítě lze rozdělit podle dynamičnosti množiny neřízených kurýrů na

- otevřené
- a uzavřené.

Otevřené sítě představují scénář, kdy do stálé stacionární sítě vnikne kurýr, projede skrz a zase jí opustí. Na své cestě může i nemusí předávat zprávy. Nelze klasifikovat jeho vhodnost pro předání zprávy jen na základě jeho předchozího pohybu v síti, protože je viděn poprvé a pravděpodobně i naposled. Bude-li se ale jeho cesta shodovat s jinými, již viděnými kurýry a u kterých je známo, kam následně mířili, je velká pravděpodobnost, že půjde stejným směrem.

V uzavřených sítích je množina kurýrů stabilní. Mohou i vznikat a zanikat, ale předpokládá se delší doba setrvání a tedy možnost naučit se jejich individuální chování. Stejně jako u otevřených sítích mohou i zde existovat společné cesty, po kterých se budou kurýři pohybovat, a je možné kombinovat informace jedince i skupiny.

6 Směr výzkumu

Oblast, kterou se budeme zabývat, je vymezena následovně:

- Malé množství stacionárních báзовých stanic – cíle zpráv budou vždy jen báзовé stanice, které nebudou měnit svou polohu a poměr jejich počtu vůči počtu všech uzlů bude velmi malý.
- Neřešit linkovou vrstvu – předpokladem je nerušená komunikace a permanentní bdělost – tento předpoklad je protichůdný k požadavku na úsporu energie, ale protože rozsah problematiky tvoří samostatnou oblast výzkumu, nebudeme se tím nyní zabývat, ale budeme s tím do budoucna počítat.
- Absence útočníků – podobně jako u předchozího bodu je problematika útoků samostatná oblast, bude se zatím předpokládat, že nikdo zvenku nebude zasahovat do chodu směrování.
- Neřízení kurýři – v reálném světě představují většinou skupinu potenciálních nosičů zařízení pro bezdrátovou komunikaci – např. vozidla, lidé, zvěř.

Důvodem vymezení modelu sítě je zaměřit dizertační práci zejména na minimalizaci počtu přenášených zpráv a tedy minimalizaci spotřeby energie spojenou s vysíláním.

6.1 Úkoly

Ve vymezeném modelu budeme řešit tyto úkoly:

- mapování pohybu kurýrů,
- určování váhy okolních uzlů,
- určování vhodnosti kurýrů pro předávání zpráv,
- optimalizace úspory energie.

Mapování pohybu kurýra znamená najít vhodný mechanismus zaznamenávání a šíření historie kontaktů mezi kurýrem a dalšími uzly. Na základě tohoto mechanismu se vytvoří pravděpodobnostní model, který bude odhadovat budoucí cestu. Váhy okolních uzlů reprezentují poměr cen dosud nalezených cest do báзовé stanice. Tyto váhy budou sloužit pro stacionární i kurýrní uzly.

Cílem optimalizace úspory energie je maximalizovat sumu energie v celé síti a minimalizovat odchylky od průměru. Tedy prodloužit životnost sítě jako celku. Nemělo by se stát, že část sítě zbytečně odumře předčasným vyčerpáním, protože přes ní bylo posíláno nadměrné množství zpráv, i když bylo možné tok lépe rozložit. Jde o správné vyvážení úspory energie s rychlostí doručování. U sítí s neřízenými kurýry se jedná především o správné rozhodování, kterému kurýrovi nebo stacionárnímu uzlu data předat.

6.2 Postup výzkumu

V dané oblasti jsme již zkoumali problematiku lokalizace uzlů WSN [29] a energeticky úsporné směřování v mobilních WSN [30]. Znalost absolutních nebo vzájemných poloh uzlů může značně přispět k efektivitě směrovacích protokolů v oportunistických sítích.

Následně budeme zkoumat jen komunikaci mezi kurýry a stacionárními uzly, kteří budou neustále v aktivním stavu. Stacionární uzly budou zprávu předávat vždy jen jednomu kurýrovi. Ti se budou moct pohybovat jen na vymezených cestách s tím, že se na křižovatkách mohou odchýlit od své hlavní trasy a že se v dalších krocích budou snažit navrátit na svou trasu. Půjde o ověření návrhu klasifikačních metod pro určování vhodnosti kurýrů.

V dalším kroku bude navržen epidemický protokol, který bude zprávy rozkládat na více kurýrů najednou, pro spolehlivější a rychlejší doručování. Pohyb kurýrů se uvolní, ale stále budou preferovat definované trasy, které se budou v čase obměňovat.

Posledním krokem bude návrh protokolu pro uspávání statických uzlů i kurýrů s ohledem na úsporu energie a rychlost doručování.

Navržené protokoly budou testovány simulací. Podle aktuálních předpokladů se použije simulátor ns-3¹. Tento simulátor je zvolen proto, že již v základní instalaci nabízí hotové moduly použitelné pro simulaci OppNet – rádiové spoje, mobilita, uspávání, energetická spotřeba. Simulace bude zaměřena jen na síťovou a aplikační vrstvu.

¹<https://www.nsnam.org/>

7 Závěr

Tento dokument shrnul základní problematiku směrování v bezdrátových senzorních sítích a jejich variantě – oportunistických sítích. Byl utvořen přehled o stavu vědy, který má pomoci v dalším výzkumu ve vymezeném modelu s neřízenými kurýry. Navržený postup výzkumu popisuje v krocích postupné rozšiřování zkoumání od jednoduchých metod záplavového směrování po metody s minimalizací počtu předávání zpráv a minimalizací spotřeby energie, které jsou cílem dizertační práce.

Reference

- [1] Chong, C.-Y., Kumar, S. P.: *Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges*, Proceedings of the IEEE, Vol. 91, Issue 8, 2003, pp. 1247–1256
- [2] Karapistoli, E., Mampentzidou, I., Economides, A.A.: *Environmental monitoring based on the wireless sensor networking technology: A survey of real-world applications*, International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, Vol. 5, Issue 4, 2014, pp. 1-39
- [3] Devasena, A., Sowmya, B.: *Wireless sensor network in disaster management*, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8, Issue 15, 2015
- [4] Sui, R., Baggard, J.: *Wireless sensor network for monitoring soil moisture and weather conditions*, Applied Engineering in Agriculture, Vol. 31, Issue 2, 2015, pp. 193–200
- [5] Vasuhi, S., Vaidehi, V.: *Target tracking using Interactive Multiple Model for Wireless Sensor Network*, Information Fusion, Vol. 27, 2016, pp. 41–53
- [6] Koushik, C.P., Vetrivelan, P.: *Survey on opportunistic networks in delay tolerant mobile sensor networks*, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 8, Issue 1, 2016, pp. 257–263
- [7] Komnios, I., Kalogeiton, E.: *A DTN-based architecture for public transport networks*, Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications, 2015
- [8] Zhao, J., Cao, G.: *VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad hoc networks*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, Issue 3, 2008
- [9] Malkin, G.: *Routing information protocol version 2*, RFC 2453, 1998
- [10] Perkins, Ch. E., Bhagwat, P.: *Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers*, SIGCOMM '94 Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications, 1994, pp. 234–244
- [11] Wan, T., Kranakis, E., Oorschot, P.: *Securing the Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol (S-DSDV)*, 6th International Conference on Information and Communications Security, 2004, pp. 27-29
- [12] Perkins, C. E., Royer, E. M.: *Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*, Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999, pp. 90-100

- [13] Perkins, C.: *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, RFC 3561, 2003
- [14] Vahdat, A., Becker, D.: *Epidemic routing for partially connected ad hoc networks*, Technical Report CS-200006, Duke University, 2000
- [15] Chen, X., Makki, K., Yen, K., Pissinou, N.: *Sensor network security: A survey*, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, Vol. 1, pp. 52–73
- [16] Bakht, H.: *Survey of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Network*, International Journal of Information and Communication Technology Research, 2011, Vol. 1, pp. 258–270, ISSN-2223-4985
- [17] Kannan, S., Kalaikumaran, T., Karthik, S., Arunachalam, V. P.: *Ant colony optimization for routing in mobile ad-hoc networks*, International Journal of Soft Computing, 2010, Vol. 5, pp. 223–228
- [18] Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., Balakrishnan, H.: *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, Vol. 1, pp. 660–670
- [19] Samar, P., Pearlman, M. R., Haas, Z. J.: *Independent zone routing: An adaptive hybrid routing framework for ad hoc wireless networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, Vol. 12, pp. 595–608
- [20] Brin, S.: *The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine 1*, Computer Networks, 1998, Vol. 30, pp. 107–117
- [21] Yoon, S., Ko, D., Koh, S., Nam, H., An, S.: *PR-RAM: The Page Rank Routing Algorithm Method in Ad-hoc Wireless Networks*, 2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC'2011, 2011, pp. 96–100
- [22] Kumar, G., Mishra, N., Singh, A. P., Kushwaha, O. P.: *A novel (VOL-Routing) Page Rank based on Visit of Links Routing algorithm method in ad-hoc wireless networks*, Proceedings of the 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques, ICICT 2014, 2014, pp. 435–438
- [23] Kumar, R., Mayank, D.: *A Comparative Study of Various Routing Protocols in VANET*, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 4, No 1, 2011
- [24] Al-Sultan, S., Al-Doori, M. M., Al-Bayatti, A. H., Zedan, H.: *A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network*, Journal of Network and Computer Applications 37, 2014, Vol. 37, pp. 380–392

- [25] Li, Y., Bartos, R.: *A Survey of Protocols for Intermittently Connected Delay-Tolerant Wireless Sensor Networks*, Journal of Network and Computer Applications, 2013
- [26] Dhurandher, S. K., Sharma, D. K., Woungang, I., Saini, A.: *Efficient routing based on past information to predict the future location for message passing in infrastructure-less opportunistic networks*, The Journal of Supercomputing, 2015
- [27] Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C. S.: *Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks*, Proceedings of ACM SIGCOMM 2005 Workshops: Conference on Computer Communications, 2005, pp. 252–259
- [28] Ramesh, S., Ganesh, K. P.: *Spray and wait routing with agents in intermittently connected MANETs*, Journal of Artificial Intelligence, Vol. 6, Issue 2, 2013, pp. 123–133
- [29] Široký, D.: *Lokalizace v bezdrátových senzorických sítích*, PAD 2010 Brno, 2010, pp. 139–145
- [30] Široký, D.: *Energeticky úsporné směrování v mobilních WSN*, PAD 2014 Liberec, 2014, pp. 32–37

Zkratky

ACO	Ant Colony Optimization
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
BS	Base Station
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector routing
DTN	Delay Tolerant Network
DoS	Denial of Service
GPRS	General Packet Radio Service
HBPR	History Based Prediction for Routing
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
OppNet	Opportunistic Network
PR-RAM	Page Rank Routing Algorithm Method
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RIP	Routing Information Protocol
TTL	Time To Live
VADD	Vehicle-Assisted Data Delivery
VANET	Vehicular Area NETwork
VOL-RAM	Visit Of Links Routing Algorithm Method
WSN	Wireless Sensor Network
ZRP	Zone Routing Protocol