

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

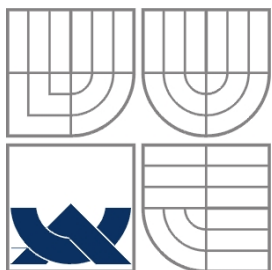
SIMULACE BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

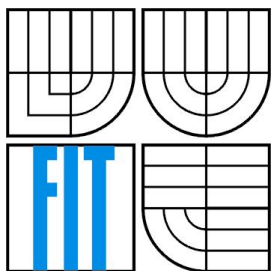
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RICHARD CAPALINI

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

SIMULACE BEZDRÁTOVÝCH SENZOROVÝCH SÍTÍ

SIMULATORS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Richard Capalini

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. František Zbořil, Ph.D.

BRNO 2007

Abstrakt

Bezdrátové sensorové sítě (WSN) byly navrženy pro účely monitorování fyzikálních jevů a řízení procesů pomocí senzorů umístěných na uzlech. Základním principem je proces detekce událostí (jevů), sběr a zpracování dat uzlem. Následuje přenos dat k zájemci. WSN síť typicky tvoří velké množství v řádu až tisíce uzlů a jednu základní stanici. Uzly pak kooperativně šíří data směrem k základní stanici, která je ukládá do paměti a zpřístupňuje je uživatelům např. přes Internet. Tato práce podává ucelený přehled o bezdrátových sensorových sítích a problematice směrování v sensorovém poli. Praktická část je zaměřena na simulaci vybraných směrovacích protokolů zasazených do vhodně zvolených modelů.

Klíčová slova

bezdrátové sensorové sítě, ad-hoc sítě, směrovací protokoly, simulace, j-Sim

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) were designed for purpose of monitoring physical phenomenons and controlling processes by sensors placed in nodes. There are three basic principles: detection of event (phenomenon), data capture and data processing in node. Afterwards data are transmitted to interested node. WSN typically consists of huge number of thousands nodes and one base station. Nodes cooperatively disseminate data towards a base station, which saved them to memory and provide access to users for example over Internet. This work report a comprehensive view of wireless sensor networks and routing tasks in sensor field. Practical part of work is aimed at simulation of choosen routing protocols placed in suitable models.

Keywords

wireless sensor networks, ad-hoc networks, routing protocols, simulation, J-Sim

Citace

Richard Capalini: Simulace bezdrátových sensorových sítí, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2008

Simulace bezdrátových senzorových sítí

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Zbořila, Ph.D.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jméno Příjmení
Datum

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce za možnost pracovat na tomto zajímavém projektu a těším se na další spolupráci.

© Richard Capalini, 2008.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

Obsah.....	1
1 Úvod.....	2
2 Teoretický úvod.....	3
2.1 Síť typu ad-hoc.....	3
2.1.1 Mobilní ad-hoc síť MANet.....	4
2.1.2 Bezdrátové samoorganizující se sítě WMN.....	5
2.1.3 Bezdrátové senzorové sítě WSN	5
3 Směrovací protokoly.....	12
3.1 Klasifikace směrovacích protokolů.....	13
3.1.1 Klasifikace dle struktury sítě.....	14
3.1.2 Klasifikace dle typu operace protokolu.....	19
4 Úvod do simulace ve WSN.....	20
4.1 J-Sim.....	21
4.1.1 Popis balíku SensorSim.....	23
4.1.2 Použití simulátoru J-Sim.....	24
5 Simulace modelů.....	25
5.1 První model.....	26
5.2 Druhý model.....	28
5.3 Třetí model.....	29
6 Závěr.....	32
Literatura.....	33
Seznam použitých zkratk.....	35
Seznam příloh.....	36
Stručný přehled tříd balíku SensorSim.....	37

1 Úvod

Cílem práce bylo prostudovat problematiku bezdrátových sensorových sítí (WSN, Wireless Sensor Network), sítí typu ad-hoc pro účely monitorování, řízení procesů a zaměřit se na komunikační protokoly. Dosažené teoretické znalosti jsou prezentovány na modelech a jejich simulacích ve vybraném simulačním nástroji. Práce je následovně členěna do kapitol.

1. Teoretický úvod. Tato kapitola představuje WSN v kontextu ad-hoc sítí. Stručným charakterizováním mobilní ad-hoc sítě MANet (Mobile Ad-hoc Network) a bezdrátové samoorganizující se sítě WMN (Wireless Mesh Network) je lépe zachycen smysl WSN a její spektrum aplikací. Další podkapitoly se věnují zobrazením WSN na referenční model ISO/OSI a dostupným komunikačním technologiím, standardům vhodných pro WSN.

2. Směrovací protokoly. Tato kapitola si klade za cíl uvést do problematiky směrovacích protokolů jejich klasifikací a detailnějším popisem protokolů Řízené difuze (Directed Diffusion), LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) a SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation). Kapitola je uzavřena tabulkou podávající přehled vlastností jednotlivých protokolů.

3. Úvod do simulace ve WSN. Tato kapitola se věnuje oblasti simulace WSN. Jsou představeny dostupné simulátory a detailněji popsán simulátor J-Sim [20].

4. Simulace modelů. J-Sim je použit pro simulaci tří koncepčních modelů prezentujících směrovací techniky protokolů Řízené difuze, LEACH a SPIN. Dosažené výsledky experimentů jsou prezentovány v podobě tabulek a grafů.

5. Závěr. Zhodnocení výsledků dosaženého úsilí a nastínění dalších možných projektů a námětů pro svou navazující diplomovou práci.

2 Teoretický úvod

Tato kapitola je teoretickým úvodem do bezdrátových sensorových sítí. Bezdrátové sensorové sítě svými vlastnostmi odpovídají síti typu ad-hoc. Následující kapitoly zasazují WSN do kontextu s ostatními ad-hoc sítěmi a poskytují tak vhodný přehled.

2.1 Síť typu ad-hoc

Základní myšlenkou ad-hoc sítí je decentralizovaně vytvořená síť, kde komunikace není řízena žádným centrálním uzlem a spoje mezi uzly jsou dočasně vytvořeny za účelem splnit okamžitou potřebu komunikace. Tento typ komunikace je nazýván „rovný s rovným“ (peer-to-peer). Zmíněný princip decentralizovaných ad-hoc sítí byl úspěšně aplikován v systému Aloha na Havajské univerzitě v roce 1970. Byly aplikovány koncepty protokolů pro náhodný přístup k přenosovému médiu. Aloha je založena na principech jednoskokové (single-hop) výměně paketů. V roce 1973 agentura DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) zadala projekt s názvem PRNET (Packet Radio Network). Cílem projektu byla rádiová komunikace s mechanismem přepínání paketů zajišťujících spolehlivou komunikaci mezi mobilními uzly a terminály. Projekt realizoval víceskokový přenos (multi-hop) umožňující komunikaci na větší vzdálenosti. Projekt byl úspěšný a představil další principy dnes běžně používané, jako je management toku v síti či kontroly chyb. Fyzické řešení sítě omezovalo velikost sítě do 138 uzlů. Toto omezení znamenalo, že se nevyskytla potřeba studovat otázku bezpečnosti či nasazení sítě pro sběr dat, monitorování. V roce 1983 sponzorovala agentura projekt s názvem SURAN (Survivable Radio Network). Cílem projektu bylo odstranit zmíněné omezení a vyvinout tak malé, levné, energeticky nenáročné rádio zařízení s menším dosahem podporující sofistikovanější protokoly pro šíření informace v síti. Hlavní důraz byl kladen na škálovatelnost, bezpečnost a robustnost sítě. Bylo nutné vyvinout nové algoritmy, které byly schopny obstát v síti v řádu tisíce uzlů. Výsledkem projektu byly rádiové směrovače (packet radios) tvořící síť MANet (mobile ad-hoc network). MANet je typ ad-hoc bezdrátové sítě se schopností automatické konfigurace. Rádiové směrovače se mohou pohybovat v prostoru, vytvářet bezdrátové spojení. Topologie sítě je značně dynamická. Ovšem k nasazení většího počtu uzlů k monitorovacím účelům překážela stále jejich pořizovací cena a technologické omezení „hardware“.

Bezdrátové ad-hoc sítě mohou být dále klasifikovány.

- mobilní ad-hoc síť MANet (Mobile Ad-hoc Network)
 - dopravní ad-hoc síť VANet (Vehicular Ad-hoc Networks)
 - inteligentní dopravní ad-hoc síť InVANet (Intelligent Vehicular Ad-hoc Network)
- bezdrátové samoorganizující se síť WMN (Wireless Mesh Network)
- bezdrátové senzorové síť WSN (wireless sensor network)

2.1.1 Mobilní ad-hoc síť MANet

Mobilní ad-hoc síť MANET je autonomní systém mobilních směrovačů a asociovaných koncových uzlů spojených bezdrátovými spoji. Mobilní uzly se mohou náhodně pohybovat. Tvoří tak libovolný graf uzlů a jejich spojů. Obecně uzly v síti jsou omezeny dostupnou šířkou pásma pro přenos signálu a často jsou omezeny i energicky z baterií. Každý uzel má možnost komunikovat s jakýmkoliv jiným uzlem v síti. To znamená, že každý uzel by měl být schopen směrovat příchozí paket vhodnému sousednímu uzlu a nalézt optimální cestu. Předpokládáme-li, že uzly se pohybují v prostoru, může být udržování aktuální informace o topologii sítě značně nákladné na šířku přenosového pásma. Klíčovou rolí v komunikaci tak hrají směrovací protokoly navržené pro MANet. Síť může mít izolovaný charakter nebo připojená k jiné síti, např. Internet.

2.1.1.1 Dopravní ad-hoc síť VANet

VANet je specifická forma sítě MANet. Byla navržena pro komunikaci mezi blízkými dopravními prostředky a blízkými nepohyblivými zařízeními, většinou umístěnými u silnice. Každé vozidlo vybavené VANet zařízením se stává uzlem a je připojeno do bezdrátové ad-hoc sítě s ostatními vozidly. Platí stejné principy jako v ad-hoc mobilních sítích. Každé vozidlo tak představuje mobilní směrovač. Tato technologie umožňuje realizaci mnoha aplikací, např. hlášení havárií, vytížení silničních komunikací, pozice radarů, dopravní omezení. Řidič může rychle zhodnotit situaci a vybrat vhodnou cestu. Další možností je „připojení“ vozidla k Internetu nebo automatické placení parkování. Pro své různorodé účely síť VANet integruje velké množství síťových technologií, např. WiFi (IEEE 802.11 b/g), WiMAX (IEEE 802.16), Bluetooth (IEEE 802.15.1), ZigBee (IEEE 802.15.4).

Dopravní ad-hoc sítě jsou základní komponentou do koncepce inteligentního transportního systému (ITS). Cílem tohoto systému je přispět k bezpečnější a efektivnější dopravě poskytováním aktuálních informací řidiči a to jak o situaci na silnici, tak o technickém stavu vozidla.

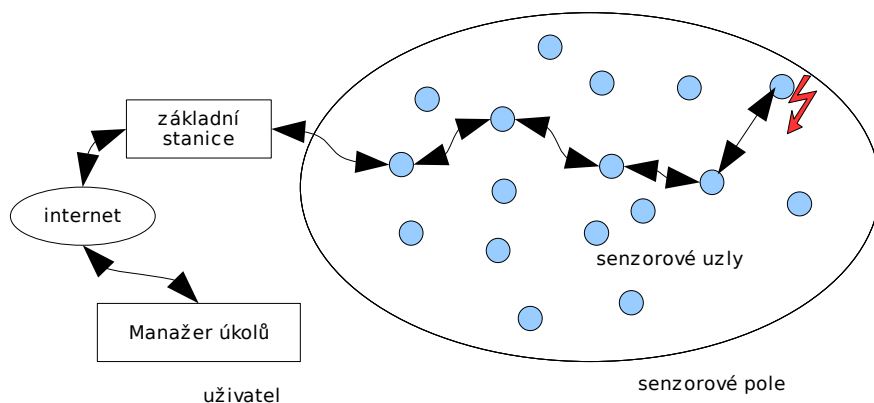
2.1.2 Bezdrátové samoorganizující se sítě WMN

WMN je robustní, škálovatelná a lehce udržovatelná ad-hoc síť. WMN má schopnost dynamické automatické konfigurace, organizace a zotavení po chybě. Uzly mezi sebou vytvářejí „multipoint-to-multipoint“ konektivitu a udržují ji. Princip víceskokové komunikace umožňuje zvýšit pokrytí prostoru bez zvýšení výkonu antény implikující vyšší energetickou náročnost, která je kritická pro WMN klienty jako např. WSN uzlů. Další motivací je poskytnout spojení mezi uzly, které nejsou v přímé linii vidění LOS (line-of-sight). Základními entitami v síti jsou „mesh“ směrovače a „mesh“ klienti (specifické zařízení ve WMN). Každý uzel operuje nejen jako koncová stanice, ale i jako směrovač. „Mesh“ směrovače tvoří páteř WMN a mají minimální pohyb. Jsou vybaveny více bezdrátovými rozhraními a upravenými ad-hoc protokoly. Poskytují přístup k síti jak pro „mesh“ klienty tak pro konvenční klienty (laptop, desktop). „Mesh“ směrovače mohou díky schopnosti mostu/brány propojit WMN s jinými typy sítí, např. Internet, celulární síť, WLAN, WPAN, WMAN či WSN. „Mesh“ klienti mají taky schopnost vytvářet „mesh“ síť (směrování), ale nemají již funkci mostu. Celkově jsou „mesh“ klienti jednodušší jak po stránce „hardware“ tak „software“. Mohou být pak integrováni do zařízení typu PDA, pocket PC, IP telefon, laptop a další. Na rozdíl od mesh směrovačů může být mobilita klientů značná. Aplikace WMN mohou být např. širokopásmová domácí síť, komunitní síť, podniková síť, metropolitní, transportní (ve vlaku).

2.1.3 Bezdrátové senzorové sítě WSN

Myšlenka monitorování a řízení pomocí senzorů není nová, ale k jejímu uskutečnění nedostačovala technická úroveň a cena nutných komponent. Dnes toto omezení odpadá a umožňuje nám realizovat řadu aplikací s nasazením WSN. WSN je dle uvedeného dělení třetí ad-hoc sítí. Předešlé charakteristiky ad-hoc sítí WMN a MANet se snažily nastínit účel těchto typů sítí. Všechny tři sítě používají k implementaci aplikace víceskokový přenos paketů, bezdrátovou komunikaci. Společným rysem je nenáročné nasazení, udržování sítě, schopnost adaptace na aktuální topologii a dle aplikace omezení zdrojů pro uzly.

WSN sítě byly navrženy pro účely monitorování fyzikálních jevů a řízení procesů pomocí senzorů umístěných na uzlu. Základním principem je proces detekce událostí (jevů), sběr a zpracování dat uzlem. Následuje přenos dat k zájemci. WSN síť typicky tvoří velké množství v řádu až tisíce uzlů a jedné základní stanice (ZS, Base Station, sink). Uzly pak kooperativně šíří data směrem k základní stanici, která je ukládá do paměti a zpřístupňuje je uživatelům např. přes Internet.

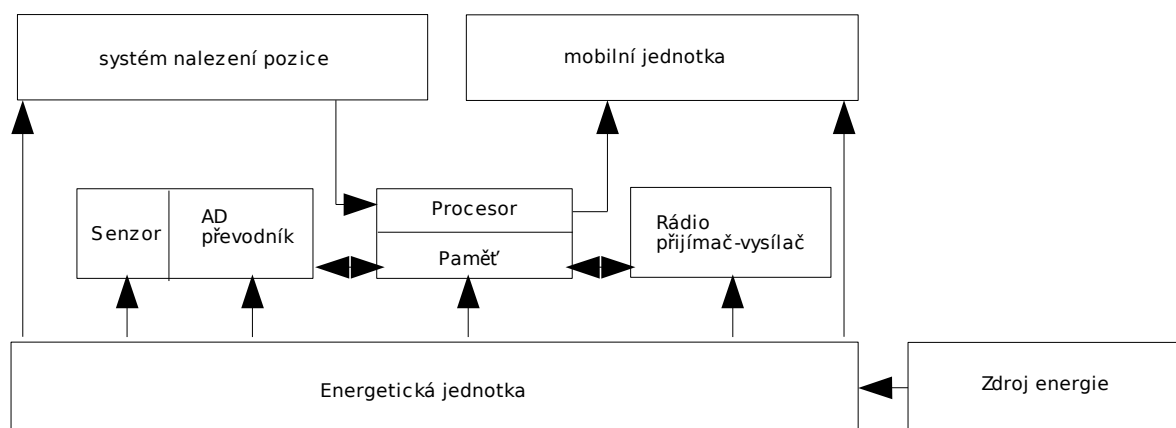


Obrázek 2.1 Model bezdrátové senzorové sítě

Úspěch nasazení WSN je kriticky závislý jak na návrhu „hardware“ tak na protokolové výbavě uzlu. WSN se často používají pro měření v rizikových oblastech, kde by konvenční metody měření byly nákladné či ohrožovaly zdraví obsluhy zařízení. Požadavky na „hardware“ vedly k miniaturizaci uzlů, k efektivnímu využití zdrojů a k nízké výrobní ceně. Velikost uzlů se odvíjí od aplikace. Uzly jsou napájeny ze své vlastní baterie. Neočekává se obsluha uzlů a výměna baterií. Je nutné proto na všech úrovních (hardware, software) zajistit efektivní využití energie. Tento faktor je zásadní pro spolehlivost a životnost celé sítě. Další omezení vyplývající z požadavků na nízkou cenu a jednoduchost uzlu jsou dostupná paměť a výpočetní síla. Vyjmenované omezení jsou předmětem výzkumu a optimalizací při návrhu „hardware“ a komunikačních protokolů, zvláště pak směrovacích a MAC (Medium Access Control).

Základní části sensorového uzlu jsou

- snímací – senzor, AD převodník
- výpočetní – mikrokontrolér
- komunikační – rádio přijímač-vysílač



Obrázek 2.2 Schéma sensorového uzlu [2]

Široké možnosti aplikace WSN implikují jejich různorodost. Různé aplikace vyžadují rozdílné, efektivnější metody komunikace i modely uzlů. Vzniká tak prostor pro výzkum v mnoha vědeckých oblastech.

Výčet pokrytých disciplín ve WSN:

- síť a komunikace v sítích
- zpracování signálů, rádiová komunikace, signály a systémy
- umělá inteligence, optimalizace využití zdrojů
- operační systémy, databáze

2.1.3.1 Aplikace WSN

WSN lze rozlišit dle povahy aplikace na typ periodického měření. Data z uzlů jsou periodicky odesílána do základní stanice. Dalším typem je detekce událostí. Jakmile uzel detekuje signál, překročí signál definovaný práh nebo v případě kompozitní události kooperující uzly rozhodnou o detekci a okamžitě jej odešlou základní stanici. Třetím typem aplikace WSN je sledování (tracking). Kooperující uzly určí polohu cíle, rychlost či směr pohybu. Posledním typem je aproximace funkce a detekce hran. Na základě dat sesbíraných v základní stanici je možné vytvořit např. Mapu (funkci) závislosti fyzikální veličiny na poloze. Nepokryté plochy uzlů je pak možné aproximovat (např. teplotní mapa). Detekce hran představuje problém nalezení oblasti či bodů o stejné hodnotě. V příkladě teplotní mapy bude požár definován svými hranicemi.

Kategorizace aplikací dle [1]:

1. *kategorie*

- charakteristiky: rádiová víceskoková konektivita, dynamické směrování, velké toky dat, „multipoint-to-point“ komunikace, samoorganizující se systémy, velký počet uzlů v síti
- aplikace: monitorování (životní prostředí), národní bezpečnostní systém, armádní aplikace

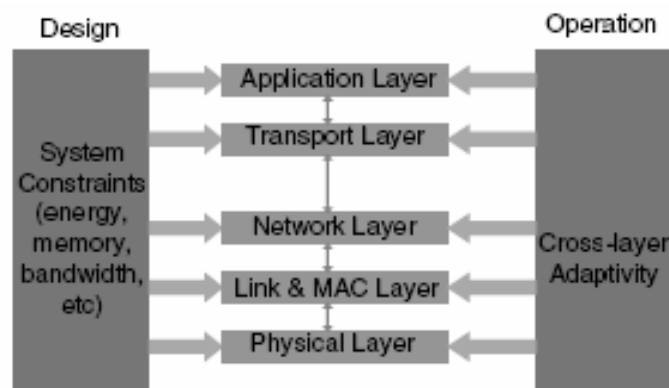
2. *kategorie:*

- charakteristiky: point-to-point (point-to-sink) komunikace, statické směrování, rádiová jednoskoková konektivita, menší prostory (domácnost, výrobní hala, lidské tělo)
- aplikace: domácí řídicí systém (inteligentní dům), RFID (radio-frequency identification) systémy, vypínače osvětlení, bezpečnostní systémy (detektor kouře, termostat)

V následujícím odstavci se věnuji praktickým aplikacím WSN. Aplikace zahrnuté do oblasti inteligentního domu jsou např. automatické řízení již existujících systémů (rozvodů tepla, vody, elektřiny atd.) za účelem úspory energií, zvýšení pohodlí a bezpečí. Dále může poskytovat detailní či agregované informace o spotřebě energií. Armádní aplikace a bezpečnostní monitorování oblasti jsou další vhodné aplikace. WSN může nahradit ostrahu určité oblasti - problém lokalizace a identifikace přátelských/ nepřátelských jednotek. Další aplikace jsou např. automatizace v průmyslu a řízení procesů, distribuovaná databáze (Oracle), monitorování seizmických otřesů, řízení letecké přepravy, monitorování životních funkcí (vzdálený sběr fyzických dat), smart spaces (domácnosti, budovy, kancelář). Aplikací je opravdu velká řada, která předurčuje značné rozšíření WSN do běžného života.

2.1.3.2 Síťový vrstvý model

Bezdrátové ad-hoc sítě používají obecně klasický přístup k návrhu protokolů v kontextu referenčního modelu ISO/OSI. Tento přístup je osvědčeným přístupem poskytujícím relativně modulární, robustní a škálovatelný návrh. Vlastností vrstev/ modulů je ovšem izolovanost. Interakce a závislosti mezi moduly jsou pevně definovány. Tento princip umožňuje izolovaný návrh a implementaci protokolů. WSN sítě jsou charakteristické svými omezeními na zdroje, které nutně musí být promítnuty do návrhu protokolů. Výzkumy v této oblasti naznačují, že nová metodologie [23] napříč vrstvami (cross-layer) je pro WSN vhodnější. Vrstvy jsou v této metodologii na sobě více závislé, což vede ke snížení modularity, robustnosti a tím i propojení fáze návrhu a implementace. Na druhou stranu tento přístup dosahuje vyšší úspory zdrojů a optimalizace.



Obrázek 2.3 Návrh napříč vrstvami [22]

V tomto odstavci uvedu aplikaci sedmivrstvého modelu ISO/ OSI na WSN.

- *Fyzická vrstva (PHY, LI).* WSN nejvíce používá ke komunikaci všesměrové (broadcast) přenosové médium. Na základě šířky pásma (frekvenčního rozsahu) jsou na výběr rádiové vlny, optická komunikace, ultrazvuk, infračervené světlo. Fyzická vrstva řeší problémy s kódováním a modulací jednoho bitu pro přenos. Informace musí být modulována

na tzv. nosný kmitočet (carrier frequency). Základní komponentou je „transceiver“, která v uzlu vykonává funkci vysílače i přijímače. Většinou realizuje „half-duplex“ operaci. Důležitým parametrem je vysílací výkon, který implikuje topologii. Musí být dostatečně vysoký pro spolehlivý příjem příjemcem a zároveň co nejnižší, aby zbytečně nerušil ostatní uzly a šetřil energii.

- *Linková vrstva (LL, L2)*. Značné vědecké úsilí je věnováno linkové vrstvě. Zajišťuje komunikaci mezi sousedními uzly (sousedské okolí). Nutným předpokladem je přímé fyzické spojení mezi dvěma uzly (sousedy). Přístup k sdílenému médiu je řízen pomocí MAC podvrstvě. Cílem této podvrstvy je zamezit kolizím, tedy simultánnímu příjmu dvou a více signálů přijímačem. MAC protokoly se snaží buď plně předcházet kolizím, což vede k vyšší režii komunikace, anebo snížit potřebnou kapacitu kanálu s možnými kolizemi. Pro snížení spotřeby energie je nutné, aby uzly zbytečně nezpracovávaly pakety určené jiným uzlům v okolí. To zajišťuje adresa příjemce na úrovni linkové vrstvy. Její jedinečnost je nutná pouze pro okolí odesílatele. WSN MAC protokoly kromě vlastností propustnosti, zpoždění, spravedlnosti zdůrazňují energetickou efektivitu přepínáním do nízkoodběrových módů. Dle základního principu se dělí na protokoly se soupeřením zúčastněných uzlů a s kalendářem. První zmiňovaný je realizován s nižší režii, nižší latencí a lepší adaptací na změny v síti než u protokolů s kalendářem. Kalendář na druhou stranu omezí počet kolizí na minimum. Výčet MAC protokolů pro WSN [21]: PAMAS (Power aware medium-access with signalling), WiseMAC, B-MAC (Reconfigurable MAC protocol), S-MAC (Sensor MAC), T-MAC (Timeout MAC), D-MAC (Data-gathering MAC), SMACS (Stationary MAC and startup), ReSync (Reservation-based synchronized MAC), TRAMA (Traffic-adaptive medium access)

- *Síťová vrstva (L3)*. Zajišťuje komunikaci mezi koncovými zařízeními (end-to-end). Komunikace probíhá přes mezilehlé uzly (hops). Tato služba implikuje směrovací rozhodování. Klasické WSN mají jednu základní stanici. Rozhodování je tak zjednodušeno pro jeden cíl. Uzly se z důvodu úspory energie většinu času nachází ve spánkovém módu. To může mít vliv na zpoždění, které může být dezinterpretováno jako zahlcení cesty.

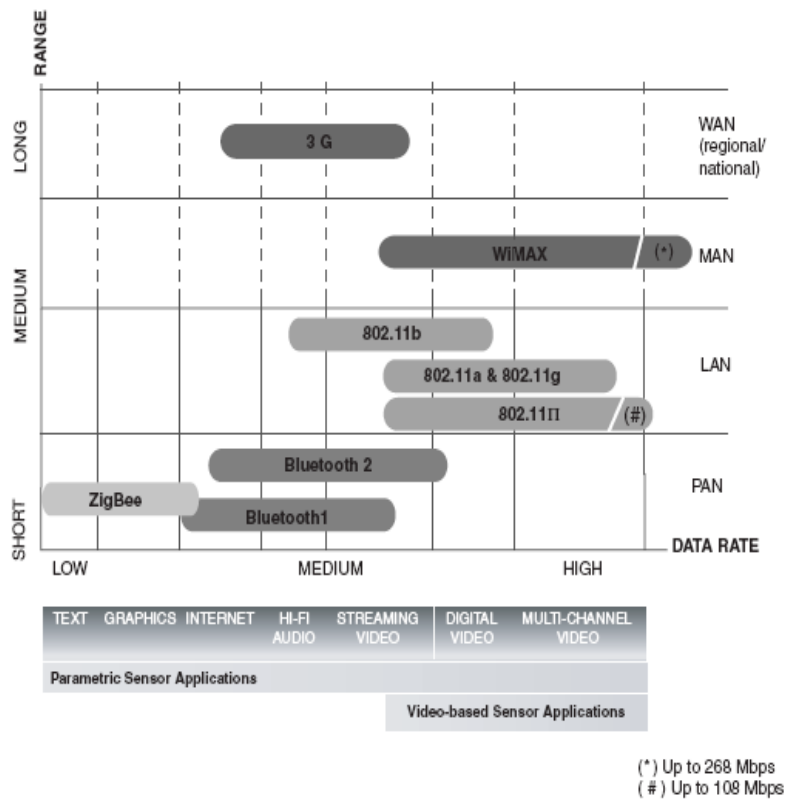
- *Transportní vrstva (L4)*. Poskytuje spolehlivou komunikaci pro koncové procesy, segmentaci větších paketů či streamu, řízení toku pro zamezení zahlcení sítě či příjemce. Ve WSN je řízení toku chápáno jinak. Zpoždění nemusí být způsobeno zahlcením sítě, ale může být způsobeno ztrátovým kanálem, který vyžaduje ještě vyšší redundanci vysílání paketů. Řízení toku je tak vhodné umístit v předešlé vrstvě L3 mezi sousedícími uzly než na celou cestu. Vzhledem k tomu, že ve WSN se posílají malé pakety (nedochází k segmentaci), není transportní vrstva podstatná v komunikačním modelu ve WSN.

- *Session vrstva (L5)*. Hlavní funkcí této vrstvy je vytvoření dialogu mezi účastníky, zachování komunikace za jakýchkoliv událostí a explicitní uzavření tohoto dialogu. Session není ve WSN zatím podstatná.
- *Prezentační vrstva (L6)*. Poskytuje kódování a prezentaci různých znakových sad v jednotném stylu. Ve WSN součástí aplikace.
- *Aplikační vrstva (L7)*. Ve WSN jsou většinou součástí aplikace vrstvy L3, L4, L5, L6, L7.

2.1.3.3 Komunikační technologie

Dostupné technologie pro WSN lze nalézt v IEEE PAN/LAN/MAN technologiích. Poskytují implementace fyzické a linkové vrstvy. Společným prvkem je využívání bezlicenčního pásma ISM (Industrial, Scientific, and Medical) standardizované organizací ITU či pásma U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure). To ovšem znamená rušení WSN jinými systémy ze stejného frekvenčního pásma.

Kromě bezdrátové technologie je možné použít i drátové. Nabízí se výběr sběrnic Profibus, LON, CAN. Nejvíce využívané bezdrátové technologie jsou 1) PAN Bluetooth (IEEE 802.15.1); 2) WLAN WiFi (IEEE 802.11 a/b/g/n); 3) ZigBee (IEEE 802.15.4); 4) MAN WiMax (IEEE 802.26 d/e); 5) RFID (radio frequency identification)



Obrázek 2.4 Diagram vybraných komunikačních technologií [1]

Bluetooth/IEEE 802.15.1 standard pro bezdrátové PAN byl definován na základě Bluetooth v 1.1 Foundation specification. Je to levná, energeticky nenáročná technologie. Používá všesměrovou rádiovou komunikaci na frekvenci 2.4-2.4835 GHz ISM. Technologie je primárně určena jako podpora pro osobní komunikační zařízení např. telefony, myše, klávesnice, sluchátka. Složitost protokolového vybavení a jeho nároků na kapacitu paměti omezuje použití Bluetooth ve WSN. S ohledem na popularitu a rozšířenost lze přesto očekávat její nasazení v komerčních WSN řešeních.

ZigBee je nová, jednoduchá, flexibilní, bezdrátová, komunikační technologie pro přenos menšího objemu dat s velmi nízkou spotřebou energie. Standard 802.15.4 byl vytvořen organizací IEEE v listopadu 2004 a je spravován organizací ZigBee Alliance. Organizace představuje společnou snahu výrobců technologií o standard v této oblasti. Mezi vůdčí společnosti patří např. Motorola Samsung, Atmel a další.

Primární účel technologie je monitorování a řízení systémů v průmyslu a domácím prostředí. Cílem je doplnit mezeru v bezdrátových technologiích Bluetooth, IrDa (Infrared Data Association) a WiFi. Nikoliv být jejich konkurencí. Zmiňované technologie jsou příliš komplexní pro WSN. Poskytují vysoké přenosové rychlosti a dosah implikující energetickou spotřebu. Lze proto očekávat, že ZigBee bude v oblasti monitorování vedoucí komunikační technologií.

Technologie umožňuje propojení nízkovýkonových, technologicky jednoduchých zařízení v sítích PAN s dosahem kolem 75 m v závislosti na lokálních podmínkách šíření signálu. Pro větší vzdálenosti je použito víceskokové ad-hoc směrování. Na rozdíl od IrDA není nutná přímá viditelnost mezi rádiově komunikujícími zařízeními. Sítě ZigBee se automaticky konfiguruje, samoopravují. Přenosová rychlost je srovnatelná se standardem pro sériovou komunikaci RS - 232, tedy 20 – 250 kb/s. Pro přístup k médiu (vysílání na rádiových vlnách) je v ZigBee použita metoda CSMA/ CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Z důvodu odlišných legislativ jsou pro přenosy vyhrazena tři rádiová bezlicenční pásma: 1) 2400 až 2483,5 MHz (celosvětově); 2) 902 až 928 MHz (Severní Amerika, Austrálie) ; 3) 868 až 868,6 MHz (Evropa)

Popis ZigBee OSI modelem se rozpadá na tři základní bloky 1) IEEE.15.4 - definuje fyzickou a linkovou vrstvu; 2) ZigBee Alliance – definuje síťovou a transportní vrstvu; 3) zákazník – definuje aplikace v aplikační vrstvě.

Vlastnost	IEEE standard		
	802.11	802.15.1/Bluetooth	802.15.4/ZigBee
Dosah [m]	~ 100	~ 100	~ 75
Datová propustnost [Mb/s]	~ 2 až 54	~ 1 až 3	~ 0,25
Spotřeba energie	střední	nízká	velmi nízká
Životnost uzle měřena v	minuty až hodiny	hodiny až dny	dny až roky
Velikost sousedského okolí	velké	menší	Velmi malé

Tabulka 2.1 Porovnání vybraných komunikačních technologií [1]

3 Směrovací protokoly

Tato kapitola si klade za cíl uvést do problematiky směrovacích protokolů ve WSN. Protokoly jsou zasazeny do přehledného kontextu kategorií dle [2] a [3]. Uvedu jejich stručný popis a vybrané protokoly Řízené difuze (directed diffusion), SPIN a LEACH jsou podrobeny důkladnější analýze před jejich simulací v simulátoru J-Sim.

V konceptu ISO/OSI referenčního modelu je směrovací protokol řazen do síťové vrstvy. Jeho funkcí je realizovat přenos dat od zdroje k cíli přes mezilehlé uzly při udržení stanovené kvality služby (QoS, Quality of Service) požadované transportní vrstvou. Pojmem směrování se rozumí výběr cest, po které se pošlou data.

Výčet cílů optimalizací ve WSN směrování:

- *Ad-hoc rozmístění uzlů.* Náhodné rozmístění uzlů implikuje vhodný přístup k organizaci uzlů v síti. WSN síť je typicky distribuovaná organizace.
- *Spotřeba energie.* Výpadek uzlu (zdroj dat i směrovač) může znamenat energeticky náročnou reorganizaci sítě a nové hledání cest k cíli. Spotřeba energie je hlavním cílem optimalizací protokolů. Míry používané pro identifikaci energetické efektivity protokolu:
 - energie na správně přijatý bit (paket)
 - energie na přijmutou unikátní událost – spotřebovaná energie od detekce události po její zpracování v základní stanici
 - životnost sítě
- *Složitost protokolu.* Omezení ve výpočetní síle uzlů ústí v hledání jednoduchých směrovacích protokolů a omezuje použití ad-hoc protokolů z MANET či WMN.
- *Odolnost vůči poruchám, robustnost.* Síť musí být schopná plnohodnotně monitorovat daný jev i po výpadku uzlů a posílat data do základní stanice ať už z důvodu problémů v konektivitě či nedostatku energie.
- *Škálovatelnost.* Tato vlastnost je podstatná pro aplikace očekávající růst sítě a požadující zachování výkonnostní charakteristiky.
- *Kvalita služby.* Aplikace může požadovat časové omezení (zpoždění) přenosu dat ze senzoru. Data s vyšším zpožděním mohou být bezcenná. Typické jsou aplikace typu sledování cíle apod.

Ve WSN je úspora energií podstatnější než propustnost sítě. Největší spotřeba připadá na přenos dat. Východiskem je energeticky efektivnější víceskokový přenos spojený s agregací a lokálním zpracováním dat v uzlech. Agregace je spojena s typem směrování soustředící se na data (DC, data-centric). V opozici ke klasickému směrování adresující koncové uzle (AD, address-centric)

se v DC adresují požadovaná data. Ve WSN o velkém počtu uzlů, které měří danou fyzikální veličinu, uživatele většinou nezajímá uzel už z toho postu, že více uzlů pokrývá stejnou měřicí oblast, ale právě měřená veličina. Data z uzlů jsou pojmenována uspořádanou dvojicí „atribut – hodnota“. Kombinací dvojic lze specifikovat uzel či oblast uzlu (za předpokladu, že uzel zná svoji polohu) měřící danou veličinu v daném intervalu.

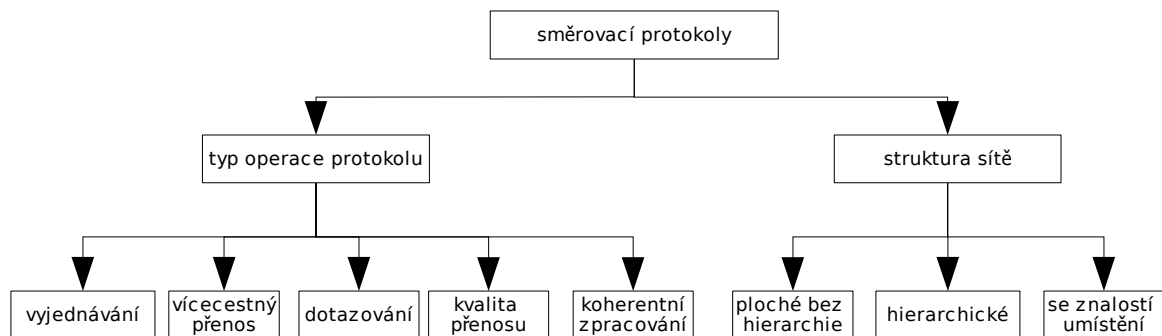
Hlavní myšlenkou DC konceptu je sloučit data přicházející z různých zdrojů do jedné cesty, omezit redundanci, snížit počet přenosů a tak šetřit energii sítě a prodloužit její životnost. Agregace je nejjednodušší technikou „in-network“ zpracování. Nabízí vhodné řešení pro agregované dotazy průměru, minimální hodnoty, maximální hodnoty apod. Dalšími pokročilejšími technikami jsou distribuované zpracování signálu, distribuovaná komprese a agentní sítě.

Metriky agregace:

- Přesnost. Je to důležitá metrika reprezentující rozdíl mezi hodnotou veličiny v základní stanici po procesu agregace a skutečnou hodnotou.
- Zpoždění. Doba mezi odesílatelem (zdroj události) a příjemcem (ZS) je ovlivněna agregační dobou v mezilehlých uzlech

3.1 Klasifikace směrovacích protokolů

Následující schéma na obrázku 3.1. představuje základní kategorizaci WSN směrovacích protokolů dle [2]. Tabulka 3.4. z [2] představuje základní přehled a srovnání směrovacích protokolů pro WSN.



Obrázek 3.1. Schéma klasifikace směrovacích protokolů [2]

Dalším možným dělením protokolů jsou tři kategorie: proaktivní, reaktivní a hybridní. V proaktivních protokolech jsou cesty předem vypočítané a připravené ve směrovací tabulce pro směrování příchozích paketů. Zatímco reaktivní protokoly vypočítávají cesty na základě požadavku. Třetím typem je kombinace dvou předcházejících ideí. Pokud má WSN statický charakter, je proaktivní směrování lepší než režii zatížené reaktivní.

3.1.1 Klasifikace dle struktury sítě

První uvedenou kategorií jsou víceskokové protokoly s plochou strukturou sítě bez hierarchie. Všechny uzly v síti mají stejnou roli a kooperují za účelem splnění uživatelského úkolu. Pro tyto protokoly je typické výše popsaný DC koncept spojený s principy vyjednávání a dotazování. Do kategorie řadíme protokoly SPIN [11] [12] a Řízenou difuzi [9], umožňující eliminaci přenosu redundantních dat implikujících snížení spotřeby energie. Tyto dva protokoly se staly východiskem pro návrh dalších protokolů pro WSN např. SAR (Sequential Assignment Routing) [4], MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm) [6], GBR (Gradient-Based routing) [7], IDSQ (Information-driven sensor querying) [5], CADR (Constrained anisotropic diffusion routing) [5], EAR (Energy Aware Routing) [8].

3.1.1.1 Řízená difuze (Directed Diffusion, DD)

Svémi autory [9] byl představen jako robustní a škálovatelný komunikační protokol pro bezdrátové senzorové sítě.

DD se zásadně liší od IP stylu komunikace, která je založena na doručení mezi koncovými uzly. DD umožňuje realizovat robustní vícecestné (multipath) doručení, empirické adaptování cest a podstatné šetření energií díky agregaci (in-network processing) a reakcí na dotazy. Základní stanice vysílá do senzorové sítě popis úkolu (interest), strukturovaný dotaz uživatele na WSN s popisem dotazu/úkolů ve formě atribut-hodnota párů. Příkladem dotazu je např. „Každých pět sekund v příští hodině pošle mi ze sektoru [a, b] teplotu (detekce narušitele, tlak, chemické složení vzduchu)“. Pokud je množina uzlů identifikovaná, uzly si v lokální paměti uloží záznamy s popisy úkolů a čekají, až vzniklá událost bude vyhovovat dotazu. Záznam každého úkolu pak obsahuje časovou známku a gradienty – informace o svých sousedech, odkud přišel úkol – směry sousedů, přenosová rychlost, hodnota gradientu. Hodnota gradientu vypovídá o spolehlivosti daného uzlu k vytvoření cesty od zdroje k základní stanici. Po té co základní stanice obdrží odpověď na dotaz/úkol, pošle cestu mezi ní a zdrojem. Zdroj až bude mít připraven další data, pošle je k základní stanici po této posílené cestě.

Datová událost je reakce na dotaz od uživatele a obsahuje nasnímané zpracované hodnoty. Je použita agregace, díky které je zredukováno použití přenosového pásma a tak i šetření energie. Uzly disponují pamětí pro uložení těchto dat pro případ předejití opakovaného přenosu stejných dat a poruchy cesty zkrátí zpoždění přenosu. Šíření stejného úkolu (obnovování úkolu) musí být opakováno z důvodu nespolehlivosti WSN. Úkol se nemusí dostat ke všem uzlům. S každým přenosem nového opakovaného úkolu ze ZS se mění políčko časové známky (timestamp). Je to kompromis, režie za zvýšení robustnosti sítě. Každý uzel má paměť, kam ukládá přijaté úkoly a asociovaný seznam gradientů a přijatých či snímaných dat. Pokud se parametry přijatého úkolu shodují s některým záznamem v paměti, ale neshodují se s uloženými odesílateli úkolu, uzel přidá

gradient do seznamu a obnoví časovou známku, dobu platnosti záznamu gradientu a uloží novou hodnotu gradientu odesílatele (přenášoucí rychlost, pravděpodobnost výpadku spojení a jiné). Pokud záznam s úkolem nebyl nalezen, uloží jej do paměti. Pokud vyprší doba všech gradientů v seznamu asociovaného k danému úkolu, je záznam s úkolem smazán z paměti.

Základní stanice pošle do sítě počáteční úkol s cílem zjistit, zda-li existuje uzel schopný odpovědět na dotaz. Tento úkol se liší od běžného akorát delším intervalem přenosu dat z uzlu (rychlost přenosu). Každý uzel si myslí, že zadavatelem úkolu je jeho soused. Je to rys lokální interakce. Pokud byl přijatý úkol uzlem identifikován jako již odeslaný v nedávné době, bude ignorován. Pokud uzel indentifikuje sebe, že spadá do množiny popsané úkolem, začne snímat vzorky nebo porovná snímaný objekt s požadovaným v popisu úkolu. Uzel vytvoří zprávu s popisem datové události a pošle ji unicastem na uzly dle gradientů uložených v paměti v asociaci s daným úkolem. Zpráva je posílána nejvyšší možnou rychlostí ze všech gradientů. Pokud uzel tuto zprávu přijme, porovnává ji se záznamy v paměti s úkoly. Pokud nenalezne výskyt, zprávu vyřadí. Pokud nalezne, vyhledává v paměti s daty událost asociovanou se záznamem v paměti s úkoly. Pokud najde výskyt, zprávu vyřadí. Pokud ne, zprávu uloží a přepošle na další uzel dle vybraných gradientů ze seznamu. Výběr gradientů se provádí na základě rychlosti přenosu dat. Tímto způsobem se zpráva dostane k ZS a ten pak zahájí proces posílení cesty od ZS ke zdroji. Každý uzel na základě sady lokálních pravidel vybere posílenou cestu. Je zřejmé, že DD obsahuje prvky reaktivního směřování, tedy přístup směřování na požádání. Na DD algoritmus lze pohlížet jako na algoritmus databázového modelu s typickými dotazy.

Pokud má být sensorová síť schopna odpovědět na více typů dotazů, prvním krokem je návrh jmenného schématu – popis úkolu (interest), popis datové události. Položka atribut-hodnota je definována svým typem a množinou hodnot.

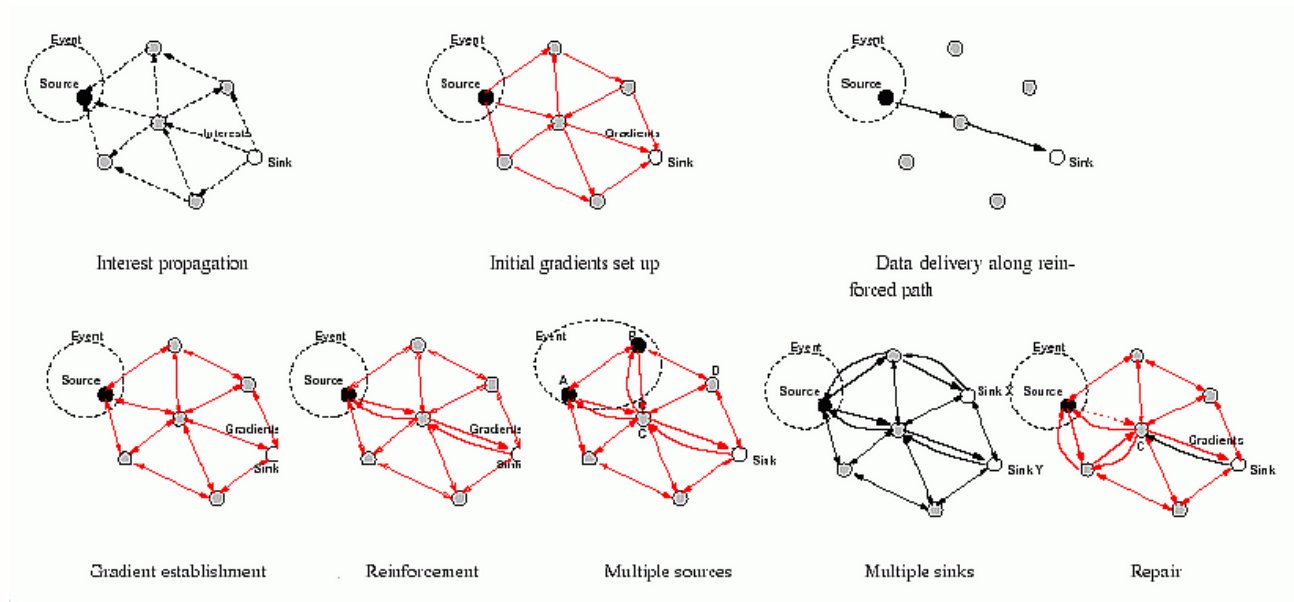
Příklad:

- popisu datové události: (typ=teplota, poloha=S, timestamp=01:23, hodnota=34)
- popisu úkolu (interest): (oblast=S, úkol=teplota, timestamp=00:00, vypršení=01:00, interval=0.5)

poznámka: interval...požadovaná frekvence přenosu datové události, tedy 2x za sekundu
přenos z uzlu v případě detekce události

Fáze algoritmu:

1. šíření popisu úkolu (interest)
2. nastavování gradientů
3. posílení cesty základní stanice – zdroj dat
4. přenos dat od zdroje k cíli



Obrázek 3.2 Model Řízené difuze [9]

3.1.1.2 Rodina protokolů SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

Protokol SPIN [11] a [12] předpokládá, že každý uzel v síti je potencionální základní stanicí. Informace z uzlu je šířena ke všem uzlům. Také je předpoklad, že blízké uzly budou šířit podobná data. Uzly mezi sebou šíří data, pokud příjemce tato data již nemá. Před samotnou výměnou dat, proběhne mezi dvěma uzly fáze vyjednávání. Uzel vysílající data nejdříve pošle příjemci jejich popis (metadata). Příjemce se na základě tohoto popisu rozhodne, zda-li má o data zájem či ne a pošle vysílajícímu uzlu odpověď. Cílem je omezit redundantní přenosy v síti. Velikost metadat musí být mnohem menší než vlastní data. Dle upraveného přístupu k návrhu zásobníku protokolů ve WSN, SPIN aplikační vrstva má přístup k aktuální dostupné úrovni energie uzlu. Vzniká tak další, podstatné hledisko, při rozhodovacích procesech. Data jsou v síti šířena, i když uživatel žádná nepožaduje.

Protokoly rodiny SPIN jsou navrženy tak, aby maximálně omezily nedostatky algoritmu "zaplavování". Autoři protokolu použili principy vyjednávání a adaptace na dostupné zdroje (energie). Uzly si mezi sebou při komunikaci vyměňují tři typy zpráv - ADV, REQ, DATA.

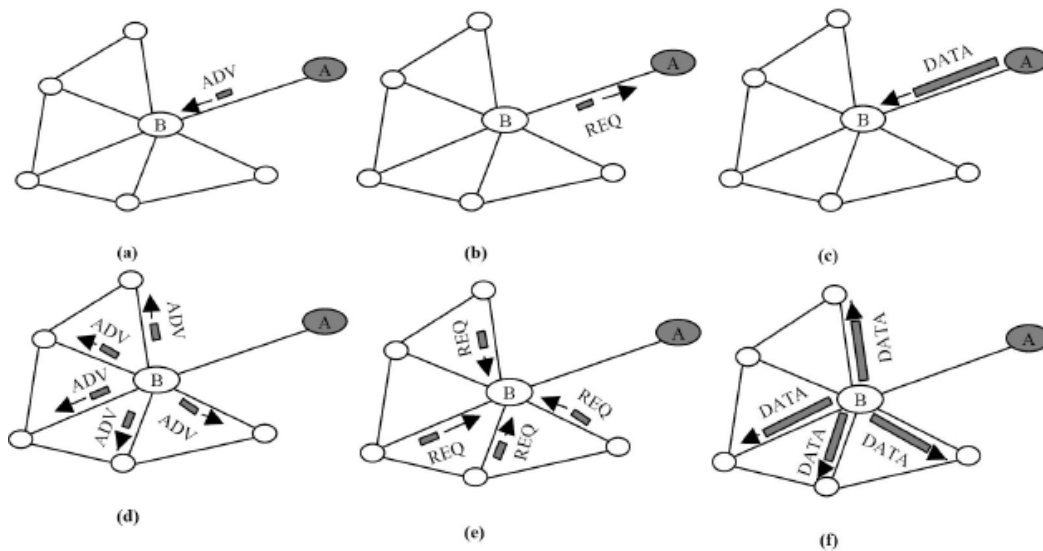
- ADV - uzel oznamuje nová data
- REQ - uzel požaduje data
- DATA - vlastní data

Protokol začíná obdržetím nových dat ze senzoru v uzlu. Uzel provede broadcast zprávou ADV obsahující metadata dat. Pokud příjemce (soused) požaduje data, odpoví zprávou REQ. Následně zpráva typu DATA s vlastními daty je poslána tomuto uzlu. Příjemce proces opakuje a nabízí nová data svým sousedům. Takto jsou data v oblasti šířena.

Rodina protokolů SPIN rozlišuje dva typy protokolů: SPIN-1, SPIN-2. SPIN-2 protokol rozšiřuje tři fáze protokolu SPIN-1 (ADV, REQ, DATA) a zahrnuje do vyjednávání i otázku dostupných zdrojů. Pokud by uzel nebyl schopen dokončit celou komunikaci z důvodu dosažení hladiny energie pod stanovenou mez, omezí komunikaci pouze na příjem zprávy ADV či REQ. Zprávu DATA neodešle. SPIN-1, SPIN-2 protokoly jsou vhodné v prostředí mobilních uzlů. Jsou jednoduché, neudržují žádné stavové informace o sousedních uzlech.

Další varianty protokolu pro různé prostředí:

- SPIN-PP - není rušení od sousedních uzlů; point - to - point komunikace; pakety se nikdy neztratí; energie není hlavním omezením
- SPIN-EC - uzel se zúčastní protokolu, pokud energie uzlu po dokončení všech fází protokolu nepoklesne pod stanovenou mez. Tato mez je systémovým parametrem
- SPIN-RL - řeší ztracené pakety během přenosu u SPIN – PP. Každý uzel si uchovává záznam o všech přijatých zprávách typu ADV. Uzel může požádat o přeposlání zprávy s daty, pokud ji nepřijal v daném časovém intervalu.



Obrázek 3.3 Schéma protokolu SPIN [12]

Dalším typem jsou hierarchické nebo protokoly tvořící shluky (cluster). Princip je využíván v infrastrukturních drátových sítích a byl upraven pro potřeby WSN. Základní myšlenkou je nízká spotřeba energie víceskokového směrování v rámci shluku a redukce počtu vyslaných zpráv základní stanici agregací ve vůdčím uzlu oblasti (Cluster Head, CH). V porovnání s protokoly bez hierarchie

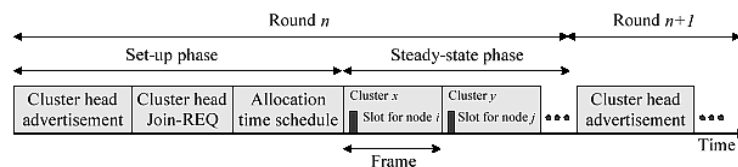
je hlavní důraz v hierarchických protokolech kladen na časování, alokaci přenosového média než na vlastní směrování. Tedy kdy a kdo posílá či zpracovává/ agreguje data.

Na základě metody identifikace CH můžeme rozdělit algoritmy na distribuované a centralizované. V distribuovaném algoritmu se každý uzel nezávisle rozhodne pro svou roli dle náhodné veličiny či na základě zbývající energie. V protipólu je centralizovaný přístup. Bázová stanice na základě dostupných informací (geografická poloha, energie uzlů, okolí každého uzlu) rozhodne, který uzel bude mít jakou roli a zorganizuje sensorové pole.

Základním protokolem je LEACH [10], který poskytuje východiska pro další optimalizace uvedené v protokolech např. PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor nformation Systems) [16], TEEN (Treshold-Sensitive Energy-Efficient sensor network) [14], APTEEN (Adaptive Periodic Treshold-Sensitive Energy-Efficient sensor network) [15], SMECN (Small Minimum Energy Communication Network) [22] a další..

3.1.1.3 LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy)

Algoritmus LEACH [10] je poměrně jednoduchý, ale nezaručuje rozdělení do shluků tak, aby vedoucí uzel každé oblasti byl v dosahu jeden skok (hop) od bázové stanice. Problém rozdělení do oblastí je zásadní pro životnost sítě. LEACH náhodně vybírá vůdčí uzly shluků v sensorovém poli a tato role rotuje s cílem zachovat energickou rovnováhu mezi uzly. Sběr dat je centrálně sbírán bázovou stanicí z vůdčích uzlů v periodickém časování. LEACH protokol rozlišuje dvě fáze – nastavovací (setup-up phase) a ustálenou (steady-state phase). Na obrázku 3.3. je znázorněn časový průběh protokolu.



Obrázek 3.4 Časový průběh LEACH protokolu [24]

V nastavovací fázi jsou vybrány CH a zorganizovány shluky. V ustálené fázi probíhají vlastní přenosy dat dle TDMA (Time Division Multiple Access) kalendáře. V LEACH protokolu je použit distribuovaný přístup k výběru CH. To znamená, že každý uzel se na základě předdefinovaného procenta CH ze všech uzlů a prahu $T(n)$ izolovaně rozhodne, zda v tomto kole zastane roli CH. Uzel se identifikuje jako CH, pokud náhodné číslo v intervalu $(0, 1)$ je menší než hodnota prahu $T(1)$,

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{jestliže } n \in G \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (1)$$

kde p je předdefinované procento CH z celkového počtu uzlů, r je aktuální kolo, G je množina uzlů, které v posledních $1/p$ kolech nebyly CH. To znamená, že po $1/p$ kolech se všechny uzly vystřídají v pozici CH. V LEACH bylo dosavadními výsledky simulací zjištěno, že optimální procento CH je 5 % ze všech uzlů. Pokud uzel identifikuje sebe jako CH, bude šířit všesměrovým vysíláním svou existenci (inzerce). Po té, co se všechny uzly připojí do shluků, CH vytvoří TDMA kalendář, ve kterém každému uzlu přidělí slot s časem, po který může vysílat své data. V ustálené fázi je pak postupně na řadě každý CH dle kalendáře. Ostatní tak mohou šetřit energii vypnutím rádiového zařízení. CH agreguje data od všech uzlů a pošle je bázové stanici. Každý CH komunikuje na jiném kódu metodou CDMA (Code-Division Multiple Access) s cílem odstranit rušení mezi uzly cizích shluků. Spojení CDMA a TDMA vyloučí kolize.

Protokol LEACH je vhodný pro periodické snímání fyzikálních jevů. Další rozšíření protokolu zařazuje práh dostupné energie do procesu identifikace CH a vyjednávání podobné SPIN.

Dalším a posledním typem dle struktury sítě jsou protokoly se znalostí polohy. Uzly jsou adresovány svou fyzickou polohou. Informaci o poloze je možné získat komunikací se satelitem GPS (Global Positioning System).

3.1.2 Klasifikace dle typu operace protokolu

Směrovací protokoly se liší dle typu operace, kterou provádí. Prvním typem uvedeným na schématu 3.1. je vyjednávání. Hlavní ideou vyjednávacích algoritmů je potlačení přenosu duplikovaných a redundantních zpráv mezi senzory pomocí výměny řídicích zpráv před vlastním přenosem dat. Příkladem je protokol SPIN.

Dalším typem jsou protokoly udržující více cest. Cílem je zvýšit propustnost sítě a zvýšit její robustnost v nespolehlivém prostředí WSN. Cenou je zvýšená režie, spotřeba energie a obsazení přenosového pásma, které je spojené s udržováním cest. Příkladem je protokol Řízená difuze.

Třetím uvedeným typem směrování je dotazování. Iniciátor komunikace vysílá do sítě dotaz s popisem žádaných dat. Uzel, který poskytuje data s požadovaným popisem, pošle je do cílové stanice. Dotazy jsou formulovány dotazovacími jazyky vyšší úrovně.

V protokolech vyžadující kvalitativní služby QoS síť WSN musí uspokojit metriky např. zpoždění, spotřeba energie, přenosová rychlost a další. Jedním z prvních protokolů, který zahrnul QoS do rozhodování o směrování byl SAR (Sequential Assignment Routing) [4]. Rozhodnutí o směrování závisí na třech faktorech: dostupné energii, QoS každé cesty a úrovni priority každého paketu. Dalším příkladem je protokol SPEED, který se snaží zajistit určitou rychlost každého paketu v síti. Aplikace tak může odhadnout přibližné zpoždění mezi základní stanicí a cílovým uzlem jednoduchým podělením vzdálenosti hodnotou rychlosti.

Posledním typem jsou protokoly s koherentním zpracováním. Popisují dva příklady zpracování dat v síti – koherentní a nekoherentní. V nekoherentním směrování uzly nejdříve lokálně zpracují snímaná data a pak je odešlou k dalšímu zpracování. Uzly, které provedou další zpracování se nazývají agregátory. V koherentním směrování jsou snímaná data nezpracována a poslána ihned agregátorům. Základem algoritmu je výběr centrálních agregátorů pro sofistikovanější zpracování.

	Klasifikace	Mobilita uzlů	Vyjednávání	Agregace dat	QoS	Škálovatelnost	Udržující více cest	Dotazování
SPIN	bez hierarchie	možná	ano	ano	ne	limitovaná	ano	ano
Řízená difuze	bez hierarchie	limitovaná	ano	ano	ne	limitovaná	ano	ano
GBR	bez hierarchie	limitovaná	ne	ano	ne	limitovaná	ne	ano
MCFA	bez hierarchie	ne	ne	ne	ne	dobrá	ne	ne
CADR	bez hierarchie	ne	ne	ano	ne	limitovaná	ne	ne
EAR	bez hierarchie	limitovaná	ne	ne	ne	limitovaná	ne	ano
LEACH	hierarchie	fixní zs	ne	ano	ne	dobrá	ne	ne
TEEN, APTEEN	hierarchie	fixní zs	ne	ano	ne	dobrá	ne	ne
PEGASIS	hierarchie	fixní zs	ne	ne	ne	dobrá	ne	ne
SMECN	hierarchie	ne	ne	ne	ne	nizká	ne	ne
SAR	QoS	ne	ano	ano	ano	limitovaná	ne	ano
SPEED	QoS	ne	ne	ne	ano	limitovaná	ne	ano

Tabulka 3.1 Souhrn klasifikace a srovnání směrovacích protokolů [2]

4 Úvod do simulace ve WSN

V této kapitole se chci věnovat problematice simulování WSN. Zmíním aktivní projekty nabízející prostředí pro simulaci WSN a vyberu jeden simulátor, který podrobím hlubšímu studiu a použiji jej k simulaci navržených konceptuálních modelů. Dle [17] jsem vybral následující zástupce simulátorů: TOSSIM, Ns-2, OMNeT++ a J-Sim .

Tossim představuje simulátor určený pro WSN uzly vyvinuté na univerzitě v Berkeley používající operační systém TinyOS. Simulace nejen testuje algoritmy, ale i implementace pro TinyOS. Tossim umožňuje kompilaci aplikací přímo napsaných pro TinyOS. Vývoj aplikací je tak snazší. Simulátor poskytuje prostředí pro experimenty s protokoly na všech vrstvách síťové architektury ISO/OSI. K dispozici je vizualizér TinyViz a skriptovací prostředí Tython – Java implementace skriptovacího jazyka Python.

Ns-2 je široce používaným simulátorem v oblasti počítačových sítí. Jedná se o dvojjazyčný simulátor používající jazyky C++ a Tcl. K dispozici je kvalitní vizualizér Network Animator (NAM). Aktuální situace kolem simulace WSN je v Ns-2 dle mého názoru nepřehledná. Framework SensorSim nemám v době psaní práce k dispozici. Po delší době jsem objevil jiná rozšíření jako je Mannasim [18] poskytující GUI generátor Tcl skriptů.

OMNeT++ poskytuje komponentní architekturu pro modely. Komponenty jsou psány v jazyce C++ a jsou integrovány do větších komponent a modelů v hierarchickém systému za použití jazyka NED (NEtwork Description). K dispozici je kvalitně zpracované GUI a rozšíření pro WSN simulace např. Castalia [19], NesCT [21], MACSimulator [21], MIXIM [21]. Castalia je mladé rozšíření poskytující realistický bezdrátový kanál, model rádia a linkové vrstvy. MACSimulator poskytuje možnost simulace energeticky efektivních MAC protokolů (T-MAC, S-MAC, L-MAC, CSMA). NesCT umožňuje integraci programů pro TinyOS psané v nesC do OMNeT++. V projektu MIXIM je pak snaha spojit zmiňovaná rozšíření do jednoho celku.

4.1 J-Sim

J-Sim je diskrétní, událostně řízený „opensource“ simulátor implementovaný v jazyce Java. K dispozici je aktuální verze 1.3 [20]. Simulátor představuje princip autonomní komponentní architektury (ACA). Základní princip spočívá v hierarchické struktuře komponent. Na celý model lze pohlížet jako na komponentu, která obsahuje další – v hierarchii níže položené – komponenty. A ty mohou obsahovat další komponenty. Rozhraní komponenty definují porty. Komponenty se tak navzájem propojují přes tyto porty. Celý princip by měl imitovat návrh integrovaných obvodů (IC). IC čip je definován svým účelem/funkcí a množinou vstup/výstup vzorů (reakce komponenty na vstup). Jakmile na port komponenty dorazí data, komponenta okamžitě zpracuje data v novém vláknu. Uvedený přístup ulehčuje vývoj, testování a integraci komponent ve stylu „plug-and-play“. Spojením architektury ACA a jazyku Java vzniklo platformově nezávislé, rozšiřitelné a znovu použitelné prostředí. J-Sim poskytuje obecné rozhraní pro integraci s různými skriptovacími jazyky (Perl, Tcl, Python). Ve verzi 1.3 je podpora pouze pro Jacl – Java implementace jazyka Tcl – s rozšířením Java/Tcl. J-Sim je podobně jako Ns-2 dvojjazyčné prostředí. Jazyk Java byl vybrán k implementaci modulů a skriptovací jazyk Tcl/Java k integraci a konfiguraci komponent v procesu experimentování. Na rozdíl od Ns-2, veřejné třídy/metody/atributy mohou být v Tcl přístupné bez nutnosti explicitního exportu.

J-Sim nabízí rozšiřující balíčky pro sítě (INET internetworking framework), bezdrátové sítě, senzorové sítě a diferencované služby (Diffserv framework). Spojením bezdrátového balíčku se

senzorovým vzniká platforma pro simulaci WSN. Sensorový balík je odvozen od rozšíření SensorSim v Ns-2 simulátoru. Ten je ovšem v době psaní práce nedostupný.

V literatuře [26] je uveřejněn „patch“ určený primárně pro simulaci WSN směrovacích protokolů. „Patch“ se zatím neobjevil v oficiální verzi simulátoru.

Rozšíření „patche“:

- *Podpora návrhu napříč vrstvami.* Vyšší vrstvy mohou nyní komunikovat s nižšími vrstvami díky novým portům v komponentách a kontraktům mezi komponentami.
- *Strukturovaná MAC vrstva umožňující integraci nových MAC protokolů.* Usnadnění implementace novým MAC protokolů (neperzistentní CSMA přidána).
- *Implementovány nové směrovací protokoly.* J-Sim tak poskytuje implementované protokoly LEACH, Řízená difuze, GPRS a další protokoly pro ad-hoc (AODV, RIP).
- *Základní třídy pro vizualizaci rozmístění a pohybu uzlů a definování topologie.*

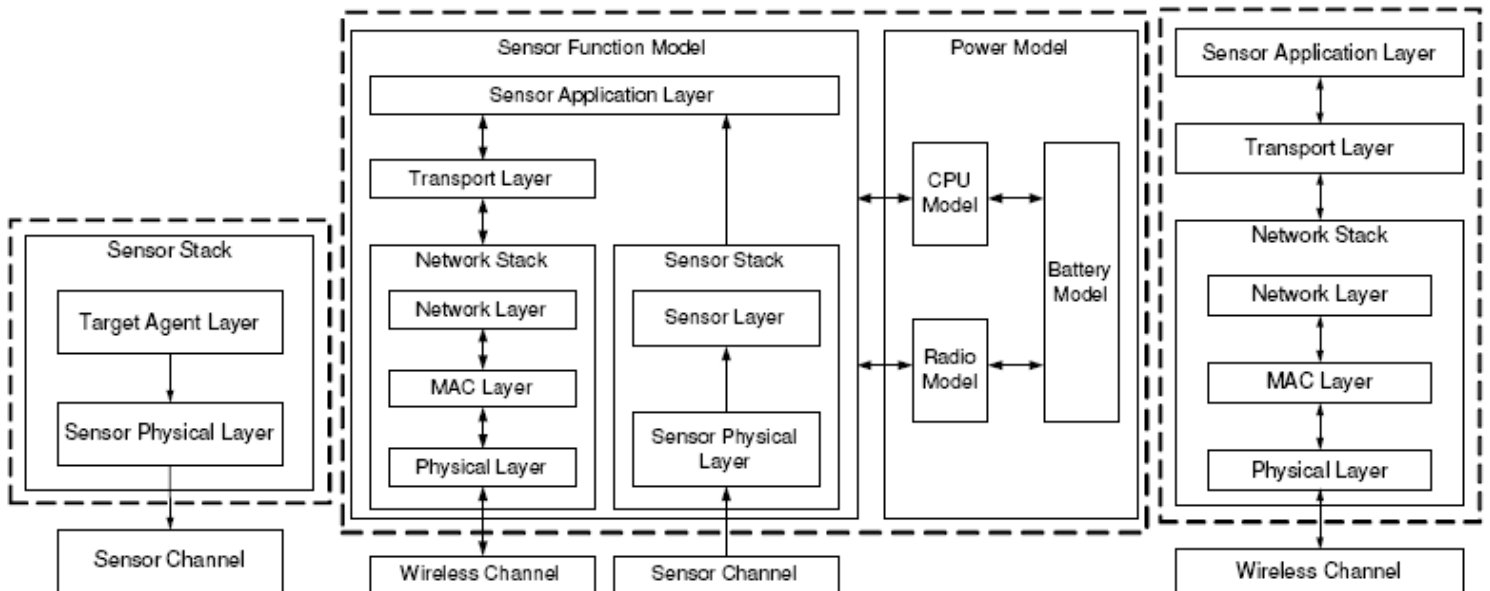
WSN framework rozlišuje tři základní typy uzlů:

- *Cílový uzel (target node).* Je zdrojem měřeného jevu. Vysílá signály omezené dosahem (radius) o nastavitelné frekvenci s nastavitelným počtem vzorků (sample) na sdílený *senzorový kanál (sensot channel)*. Sensorový kanál je disjunktní k bezdrátovému kanálu, který je určen pro komunikaci mezi sensorovými uzly.
- *Senzorový uzel.* Uzel snímá signál (paket) od cílového uzlu a plní funkci směrovače.
- *Základní stanice (sink, base station).* Uzel určený pro sběr dat ze sensorového pole. Neočekává se energetický problém, proto není tento model zahrnut do modelu uzlu a také není uzel vystaven senzory.

Z obrázku 4.1. je zjevné, že sensorový uzel je nejkomplexnější model. Základní stanice je vybavena pouze vlastní aplikací a komunikační technologií.

Senzorový uzel je popsán modely:

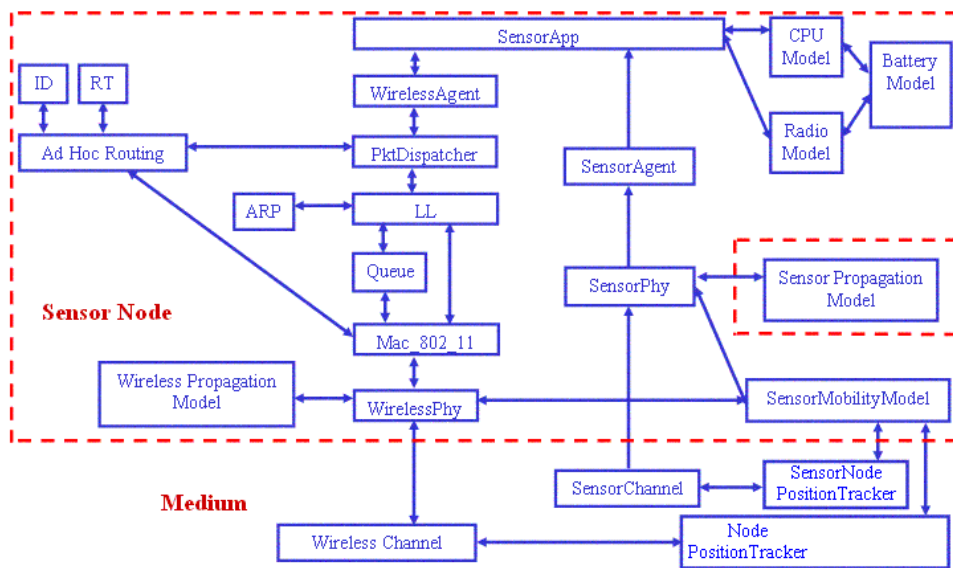
- *Funkční model.* Sestává z částí protokolového zásobníku pro senzor (sensor stack) za účelem snímání signálu z měřeného jevu a protokolového zásobníku pro bezdrátovou komunikaci (network stack). Nejvyšší vrstvou je aplikační vrstva vykonávající funkci směrování i vlastní aplikace, zpracování naměřených dat formou agregace. Aplikační vrstva spolu s transportní vrstvou spojuje sensorový zásobník s bezdrátovým zásobníkem.
- *Energetický model.* Realizuje model baterie a spotřebičů energie – procesor CPU, rádio komunikace.



Obrázek 4.1 Zleva model cílového uzlu, senzorového uzlu, základní stanice [27]

4.1.1 Popis balíku SensorSim

J-Sim poskytuje základní množinu síťových komponent pro tvorbu modelů, poskytuje pomocné utility (spotřeba paměti, orientovaný graf propojení komponent), třídy pro tvorbu grafů za doby běhu (plotrů) i výstup naměřených dat do souborů. Zatím bezdrátové rozšíření nepodporuje vizualizaci v Network Animator z Ns-2. Aplikačně specifické modely pak vznikají definováním tříd dědicích z komponent frameworku a dle potřeby předefinováním metod. Framework s aplikovaným patchem od N.Merizzi pro simulaci WSN v J-Sim je implementován v balíku drcl.inet.sensorsim. Následuje stručný popis tříd

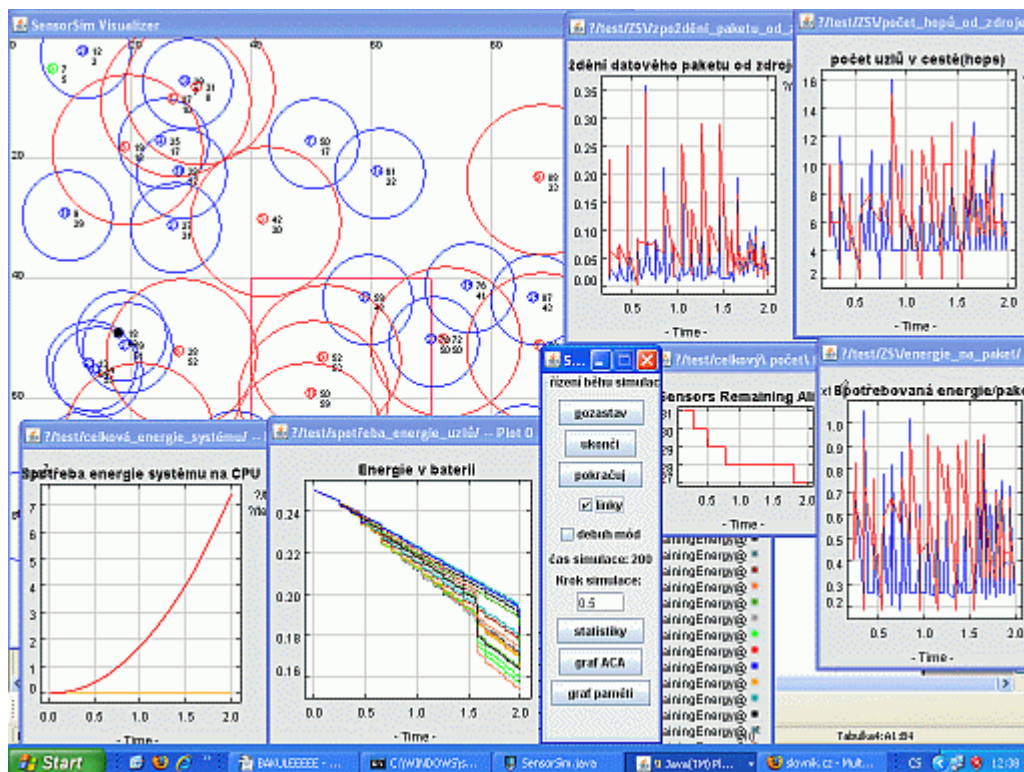


Obrázek 4.2 Spojení komponent senzorového uzlu [27]

Jak již bylo zmíněno, cílový uzel vysílá po senzorovém kanálu signály. Senzorový uzel je snímá a po bezdrátovém kanálu posílá pakety k základní stanici. Oba přenosy jsou jiného charakteru a tak vyžadují i jiné modely šíření – senzorový (sensor propagation model) a bezdrátový (wireless propagation model). Senzorový uzel přijme a detekuje signál pouze v případě, že výkon signálu je větší rovno hodnotě předdefinovaného prahu. Výkon snímaného signálu je vypočten na základě senzorového propagačního modelu (otřes, zvukový). Podobně je model šíření aplikován na bezdrátovou komunikaci (volný prostor, two-ray ground model, nepravidelný terén). Model mobility umožňuje simulaci pohyblivých uzlů. Energetický model reaguje na nastavení operačního módu modelu rádia. Rádio přijímač-vysílač se nachází právě v jednom stavu: „nečinný, uspaný, vypnutý, vysílající, přijímání“. Rádio a CPU model oznamuje funkčnímu modelu svůj stav a z funkčního modelu lze rádio a CPU stav měnit. Stručný popis tříd je k dispozici v příloze.

4.1.2 Použití simulátoru J-Sim

Možnosti se nabízejí dvě. Jak již bylo zmíněno, J-Sim podporuje rozhraní pro skriptovací jazyk. Za tímto účelem poskytuje konzoli, kam je možno příkazové struktury vkládat či načíst soubor se skriptem. Během procesu simulace lze příkazy ovlivnit její průběh. Příklad detailně okomentovaného souboru se skriptem [26] je k dispozici na CD. Další způsob je psaní kódu v Javě s využitím balíků simulátoru ve spojení s jednoduchým grafickým vizualizérem. Svoji práci jsem hlavně zaměřil na použití vizualizéru na obr. 4.3.

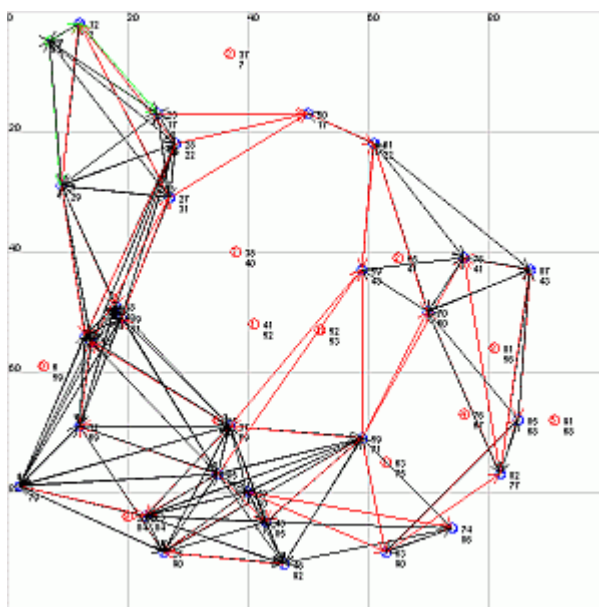


Obrázek 4.3 GUI WSN vizualizéru

Pro své potřeby jsem podstatně rozšířil jeho funkčnost. Vizualizér tak nyní nabízí připravené scénáře modelů, ovládání běhu simulace, vizualizaci pozic a pohybů uzlů, vizualizaci komunikace, výstup naměřených dat do plotrů během simulace tak i do souboru pro zpracování po skončení experimentu. Poskytuje dialogová okna s informacemi o nastavení rádiového rozhraní, energetické spotřeby a další aplikačně specifická data. Konzole je spuštěna příkazem `java drcl.ruv.System`, vizualizér pak příkazem `java visualSensorNet.SensorSim`.

5 Simulace modelů

Tato kapitola uvede simulace třech konceptuálních modelů prezentující směrovací techniky protokolů Řízená difuze, LEACH a SPIN. Následující obrázek 5.1 popisuje vzniklou topologii dle nastavení simulace z tabulky 5.1.



Počet sensorových uzlů	30
Počet cílových uzlů	12
Rozměry scény [x, y] [m]	100 x 100
Rozměry buňky antény [x, y] [m]	20 x 20
Vysílací radius cílového uzlu [m]	25
Dosah sensorů [m]	15
Frekvence[MHz]/vlnová délka [m]	914/0,33
Přenosová rychlost [Mbps]	1
Vysílací výkon [W]	0,096
CSThresh [W]	$1 \cdot 10^{-9}$
RXThresh [W]	$6 \cdot 10^{-9}$
CPTthresh [dB]	10
Energie v baterii [J]	0,25
RTS práh [B]	0

Obrázek 5.1 Topologie modelu WSN sítě o 30 uzlech

Tabulka 5.1 Nastavení simulace WSN

Šíření rádiosignálu popisuje model otevřeného prostoru. Uzly jsou v přímé viditelnosti a závislost přijatého výkonu signálu na vzdálenosti mezi vysílačem a příjemcem popisuje Friisova rovnice pro volný prostor.

$$P_{rcvd}(d) = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (2),$$

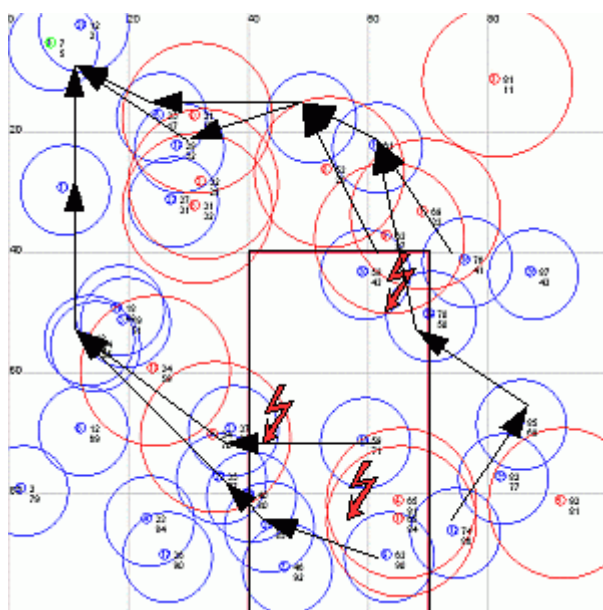
kde P_{tx} je vysílací výkon, G_t a G_r je zisk antény vysílače respektive příjemce, d je vzdálenost mezi vysílačem a příjemcem, λ je vlnová délka a $L \geq 1$ je suma ztrát v elektronických obvodech.

Dle hodnoty parametru RXThresh je uzel schopný správně přijmout paket a předat ho MAC vrstvě do vzdálenosti 105 m.

5.1 První model

Obrázek 5.2. popisuje model používající směrovací techniky Řízené difuze. Základní myšlenkou je zachytit pohyb vozidla v dané oblasti. Červené body představují cílové uzly (vozidlo), modré sensorové uzly. Kružnice kolem uzlů jsou vysílací dosahy, respektive snímání dosahy senzorů. Základní stanice (zelený uzel) je zobrazena na pozici [7, 5]. Vozidla se náhodně pohybují po scéně s náhodnou rychlostí s uniformním rozložením z intervalu 0 a 12 m/s

V první fázi se šíří v sensorovém poli popis úkolu (interest) a vytváří záznamy s gradienty. Sensorové uzly, umístěné a schopné snímat pohyb v definované oblasti popsané v úkolu, detekují pohyb vozidla (otřes, seismický model šíření) a připraví data do paketů pro plánovaný přenos dle požadovaného intervalu uvedeného v popisu úkolu s mezilehlými uzly dle gradientů. Uvedené metriky měření výkonu Řízené difuze jsou jak pro posílené tak i pro neposílené cesty. Základní modul protokolu Řízené difuze je implementován ve WSN rozšíření J-Sim.



Obrázek 5.2 První model WSN

Doba simulace [s]	200
Velikosti paketů [Byte]:	
Popis úkolu (interest)	126
Data a popis dat	126
Popis úkolu:	
Oblast [m]	[<40,70>, <40,100>]
Doba platnosti úkolu [s]	922s
Interval přenosu dat k ZS	20s/5s
Obnovovací frekvence šíření úkolu	20s

Tabulka 5.2 Vybrané parametry modelu

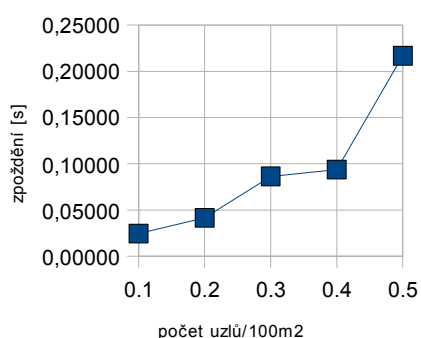
	Posílené cesty	Neposílené cesty
Průměrné zpoždění přenosu datového paketu od zdroje do ZS [s]	0,07459	0,09804
Počet přijmutých datových paketů základní stanicí	169	170
Průměrný počet skoků od zdroje do základní stanice	6,96449	7,03529
Průměrná energie přenosu datového paketu od zdroje do ZS [J]	$5,3012010 \cdot 10^{-4}$	$5,75502 \cdot 10^{-4}$

Tabulka 5.3 Výsledky simulace 30 uzlů pro posílené i neposílené cesty

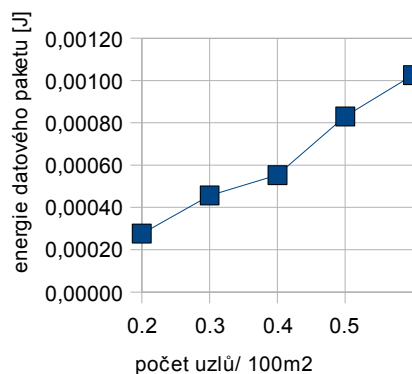
Následující tabulky sumarizují výsledky simulace pro 30 uzlů a základní stanici:

Počet nefunkčních uzlů	4
Průměrné zpoždění datového paketu od zdroje do základní stanice [s]	0,08635
Počet přijmutých datových paketů základní stanici	339
Počet všech přijmutých paketů základní stanici	459
Procento datových paketů přijmutých základní stanici	73,9 %
Počet všech přijmutých paketů v systému	13781
Počet přijmutých datových paketů v systému	6513
Procento datových paketů v systému	47,26 %
Průměrný počet skoků přenosu datového paketu od zdroje do základní stanice	7,0
Počet kolizí v systému	35639
Průměrný počet kolizí na sensorový uzel	1149,64516
Celkové množství spotřebované energie v systému [J]	2,19921
Průměrná spotřeba energie přenosu datového paketu od zdrojového uzlu do ZS [J]	$5,52878 \cdot 10^{-4}$

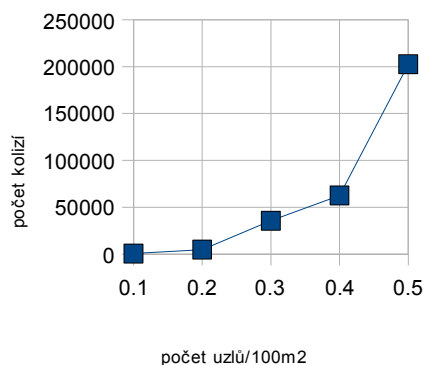
Tabulka 5.4 Výsledky simulace prvního modelu pro 30 uzlů



a)



b)



c)

a) Graf závislosti zpoždění přenosu datového paketu od zdrojového uzlu události do ZS na hustotě uzlů.

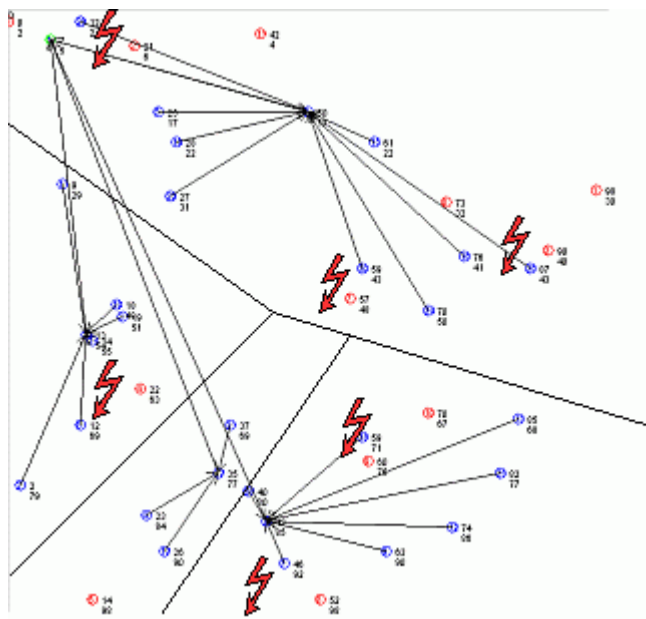
b) Graf závislosti spotřebované energie přenosu datového paketu ze zdrojového uzlu události do základní stanice na hustotě uzlů.

c) Graf závislosti počtu kolizí v systému na hustotě uzlů.

5.2 Druhý model

Obrázek 5.3. popisuje model používající směrovací techniky hierarchického protokolu LEACH. Základní myšlenkou je periodické měření teploty v senzorových uzlech. Sensorové uzly posílají dle kalendáře TDMA svá snímaná data do svých CH. Vůdčí sensorové uzly CH pak posílají data do základní stanice. Všechny uzly používají CSMA jako svoji MAC subvrstvu.

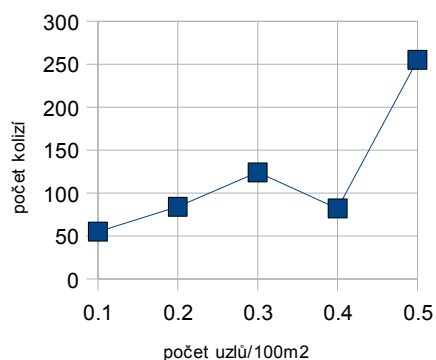
V protokolu LEACH je vhodné, aby všechny uzly byly v dosahu základní stanice. Proto je volena velikost buňky 100 x 100 m pokrývající celou scénu. Základní modul protokolu LEACH je implementován v rozšíření od Merizzi. Modul byl implementován dle originálního protokolu autorů LEACH ze simulátoru Ns-2.



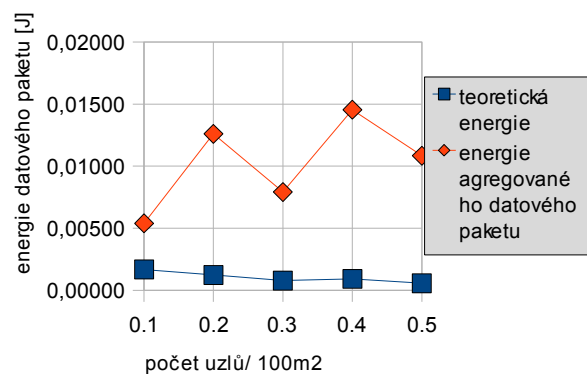
Doba simulace [s]	200
Velikosti paketů [Byte]:	
CH ADV	94
JoinToCH	94
ScheduleFromCH	94
Data	178

Tabulka 5.5 Vybrané parametry modelu

Obrázek 5.3. Druhý model WSN



a)



b)

- a) Graf závislosti počtu kolizí v systému na hustotě uzlů.
- b) Graf závislosti spotřebované energie přenosu agregovaného datového paketu shluku na hustotě uzlů. Teoretická hodnota udává spotřebovanou energii na uzel účastníci se agregace.

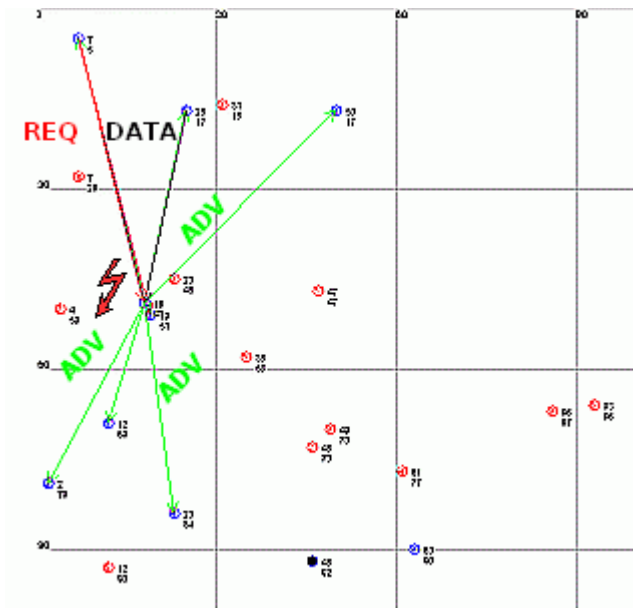
Následující tabulka sumarizuje výsledky simulace pro 30 uzlů a základní stanici:

Počet nefunkčních uzlů	5
Průměrné zpoždění přenosu datového paketu od CH do základní stanice [s]	0,00142
Počet přijmutých datových paketů základní stanici	29
Počet všech přijmutých paketů základní stanici	54
Procento datových paketů přijmutých základní stanici	53 %
Počet všech přijmutých paketů v systému	1277
Počet přijmutých datových paketů v systému	277
Procento datových paketů v systému	21,69146 %
Počet kolizí v systému	124
Průměrný počet kolizí na sensorový uzel	4
Počet kolizí v základní stanici	4
Celkové množství spotřebované energie v systému [J]	0,35077
Celkové množství spotřebované energie pro rádio komunikaci v systému [J]	0,33871
Celkové množství spotřebované energie pro CPU v systému [J]	0,01205
Průměrný počet oblastí, vůdčích uzlů na kolo	3,125
Průměrná spotřeba energie přenosu agregovaného datového paketu shluku do ZS [J]	0,00792
Průměrná teoretická hodnota spotřeby energie na uzel účastníci se agregace [J]	$7,77085 * 10^{-4}$

Tabulka 5.6 Výsledky simulace druhého modelu pro 30 uzlů

5.3 Třetí model

V třetím, posledním modelu je použita technika směrování protokolu SPIN. V konceptu SPIN se šíří informace mezi všemi uzly. Každý uzel by měl mít ve své paměti uloženy stejná data. Pokud uzel detekuje překročení definovaného prahu snímané teploty, všesměrově inseruje metadata svých dat (ADV paket, zelená šipka) a očekává požadavek uzlů (REQ paket, červená šipka) na přenos vlastních dat (Data paket, černá šipka).



Obrázek 5.4 Třetí model WSN

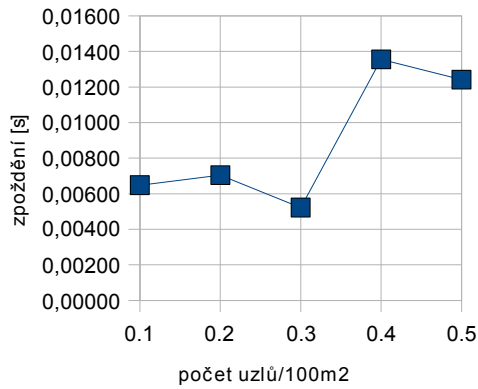
Doba simulace [s]	200
Velikosti paketů [Byte]:	
ADV	94
REQ	94
Data	278

Tabulka 5.7 Vybrané parametry modelu

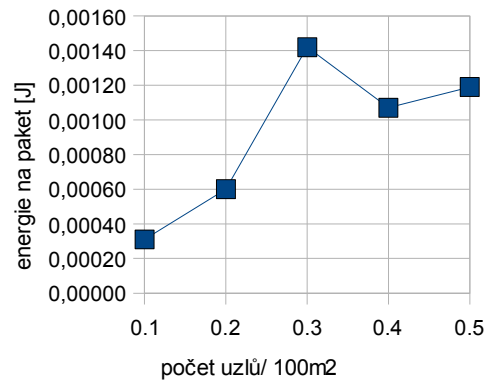
Následující tabulka sumarizuje výsledky simulace pro 30 uzlů:

Počet nefunkčních uzlů	6
Průměrné zpoždění přenosu datového paketu z CH do základní stanice [s]	0,00521
Počet přijmutých datových paketů základní stanici	50
Počet všech přijmutých paketů základní stanici	267
Procento datových paketů přijmutých základní stanici	18,726598%
Počet všech přijmutých paketů v systému	13420
Počet přijmutých datových paketů v systému	1557
Procento datových paketů v systému	11,60208 %
Počet kolizí v systému	11031
Průměrný počet kolizí na sensorový uzel	355,83871
Celkové množství spotřebované energie pro CPU v systému [J]	0,04300
Celkové množství spotřebované energie pro rádio komunikaci v systému [J]	2,56592
Celkové množství spotřebované energie v systému [J]	2,60893
Průměrný počet skoků přenosu datového paketu od zdroje do základní stanice	7,98
Průměrná spotřeba energie přenosu datového paketu od zdroje do ZS [J]	0.00142

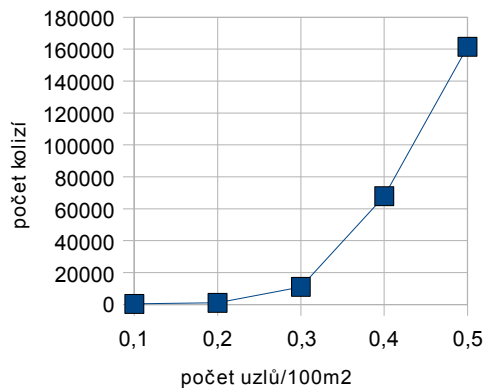
Tabulka 5.8 Výsledky simulace třetího modelu pro 30 uzlů



a)



b)



c)

- a) Graf závislosti zpoždění přenosu datového paketu od zdrojového uzlu události do ZS na hustotě uzlů.
- b) Graf závislosti spotřebované energie přenosu datového paketu ze zdrojového uzlu události do základní stanice na hustotě uzlů.
- c) Graf závislosti počtu kolizí v systému na hustotě uzlů.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s technologií bezdrátové sensorové sítě, principy řízení toku informací a komunikačními protokoly v těchto prostředích. Možnosti simulace protokolů byly představeny v praktické části práce. Zmapoval jsem nabídku dostupných simulačních nástrojů a vybral „opensource“ simulátor J-Sim. Detailně jsem se seznámil s jeho možnostmi simulace WSN a vytvořil tři modely používající směrovací techniky Řízené difuze, LEACH a SPIN. J-Sim poskytuje kvalitní dokumentační a nástrojovou podporu v LAN, WAN drátových sítích. Jinak je tomu u bezdrátového rozšíření pozbývající rozumné dokumentace a ještě hůře pak v rozšíření pro WSN. Bylo proto nutné studovat zdrojové texty rozšíření a učit se stylem pokus – omyl. Na druhou stranu jsem byl tak nucen porozumět parametrům fyzické vrstvy a MAC 802.11 subvrstvy.

Uvedené výsledky simulace si kladou za cíl představit možnosti simulátoru než realistické chování protokolu. Důvodem je nejen použití WLAN 802.11 technologie, která nevyhovuje požadavku WSN. V době psaní práce nebyl dosud standard IEEE 802.15.4 (ZigBee) implementován v simulátoru. Domnívám se, že modely vhodně využívají směrovacích technik protokolů. První model realizuje strukturovaný dotaz na sensorové pole. Druhý model ukazuje periodické měření oblasti a třetí model okamžité šíření události po jejím vzniku formou lokálního vyjednávání mezi uzly. Směrovacích protokolů pro WSN je značné množství. Důvodem je různorodost aplikací a fakt, že efektivní směrování musí reflektovat požadavky dané aplikace.

Svoji práci v problematice WSN považuji za úvodní seznámení a chci se jí nadále věnovat v praktických projektech při dalším studiu na FIT ve spolupráci s ústavem inteligentních systémů. Možnosti směrování jsou nepřehledné. V modelech jsem nastínil možnosti detekce, sledování cíle či monitorování prostředí. WSN považuji za užitečnou a perspektivní technologii schopnou integrace se systémy v průmyslu i běžném životě.

Literatura

- [1] Sohraby, K., Minoli, D., Znati, T. *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2007. ISBN 978-0-471-74300-2.
- [2] Al-Karaki, J. N., Kamal, A. E. *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Iowa State University.
- [3] Ilyas, M., Mahgoub, I. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing*. CRC Press, Florida, 2005. ISBN 0-8493-1968-4.
- [4] Sohraby, K., Pottie, J. *Protocols for self-organization of a wireless sensor network*. IEEE Personal Communications, 2000.
- [5] Chu, M., Haussecker, H., Zhao, F. *Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks*. The International Journal of High Performance Computing Applications, 2002.
- [6] Ye, F., Chen, A., Liu, S., Zhang, L. *A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks*. Proceedings of the tenth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2001.
- [7] Schurgers, C., Srivastava, M. B. *Energy efficient routing in wireless sensor network*. McLean, 2001.
- [8] Shah, R. C., Rabaey J., *Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks*. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2002.
- [9] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D. *Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. Proceedings of ACM MobiCom '00, 2000.
- [10] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. *Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks*. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00), 2000.
- [11] Kulik, J., Heinzelman, W. R., Balakrishnan, H., *Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks*. Wireless Networks, 2002.
- [12] Heinzelman, W., Kulik J., Balakrishnan, H., *Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks*. Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference (MobiCom '99), 1999.
- [13] Rodoplu, V., Meng, T. H. *Minimum Energy Mobile Wireless Networks*. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 1999.
- [14] Manjeshwar, A., Agarwal, D. P. *TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks*. 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.

- [15] Manjeshwar, A., Agarwal, D. P. *APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks*. Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, 2002.
- [16] Lindsey, S., Raghavendra, C. *PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002.
- [17] Přehled simulátorů ist-cruise[online]. [cit.2008-05-04]. Dostupné na URL:
< <http://www.ist-cruise.eu/cruise/Public%20documents/wp123-wsn-simulation-tool-knowledgebase/simulation-tool-comparison-matrix/> >.
- [18] Mannasim simulátor [online]. [cit.2008-05-04]. Dostupné na URL:
<<http://www.mannasim.dcc.ufmg.br/>>.
- [19] Castalia simulátor [online]. [cit.2008-05-04]. Dostupné na URL:
<<http://castalia.npc.nicta.com.au/>>.
- [20] J-Sim simulátor [online]. [cit.2008-05-04]. Dostupné na URL: < <http://www.j-sim.org/>>.
- [21] OMNetT++ ad-hoc frameworks [online]. [cit.2008-05-04]. Dostupné na URL:
< <http://www.omnetpp.org/pmwiki/index.php?n=Main.MobileAdhocFrameworks> >.
- [22] Krishnamachari, B. *Networking Wireless Sensors*. Cambridge University Press, 2005.
- [23] Salatas, V. *Object Tracking Using Wireless Sensor Networks*. Hellenic Naval Academy, 2006.
- [24] Melodia, T., Vuran, M. C., Pompili, D. *The State of the Art in Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks*. Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [25] Ruay-Shiung Chang, Chia-Jou Kuo *An energy efficient routing mechanism for wireless sensor networks. Advanced Information Networking and Applications*, 20th International Conference on Volume 2, 2006.
- [26] Merizzi, N., Poehlman, W. F. S. *J-Sim and the Demand for Wireless Sensor Network Simulation*. McMaster University, Canada, 2005.
- [27] Sobeih, A, Hung-Ying, T. *J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.

Seznam použitých zkratek

WSN	Wireless Sensor Network (bezdrátové senzorové sítě)
MANet	Mobile Ad-hoc Network (mobilní ad-hoc sítě)
VANet	Vehicular Ad-hoc Networks (dopravní ad-hoc sítě)
WMN	Wireless Mesh Network (bezdrátové samoorganizující se sítě)
ISO/OSI	International Organization for Standardization/Open systems Interconnection
DD	Directed Diffusion (Řízená difuze)
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
LOS	Line-Of-Sight (přímá linie vidění)
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
ZS	základní stanice (Base Station, Sink)
RFID	Radio Frequency Identification
AC	Address-Centric (adresování koncových uzlů)
DC	Data-Centric (adresování dat pomocí metadat)
CH	Cluster Head (vůdčí uzel oblasti)
GUI	Graphical User Interface
MAC	Medium Access Control
LL	Link Layer
PHY	Physical layer
IrDa	Infrared Data Association

Seznam příloh

Příloha 1. CD se zdrojovými texty

Příloha 2. Stručný přehled tříd balíku SensorSim

Stručný přehled tříd balíku SensorSim

Cílový uzel

- *TargetAgent*. Poskytuje generování signálu dle nastavení časovače a šíří jej nižším vrstvám k přenosu přes sensorový kanál. Třída implementuje rozhraní *ActiveComponent* a dědí třídu *Module*.
- *TargetPacket*. Implementuje paket zapouzdřující signál.
- *SensorMobilityModel*. Popisuje lokaci, rychlost a typ mobility cílového uzlu. Dědí z třídy *drcl.inet.mac.MobilityModel*. Typ mobility může být náhodný pohyb nebo s definovanou trajektorií. Během procesu náhodného pohybu je s uniformním rozložením z intervalu 0 a nastavitelnou horní hranicí nalezena rychlost a náhodný cílový bod v oblasti simulace. Po dosažení cílového bodu je proces opakován.
- *SensorPositionReportContract*. Defínuje kontrakt, tedy výměnu informací mezi *SensorPhy* a *SensorMobilityModel*.
- *SensorPhy*. Implementuje fyzickou vrstvu. V protokolovém zásobníku cílového uzlu přijme *SensorPhy* signál z *TargetAgent* a dotáže se komponenty *SensorMobilityModel* na aktuální pozici. Vzniklý paket zapouzdřující signál s pozicí přepoše na komponentu sensorového kanálu (*SensorChannel*).

Senzorový kanál

- *SensorNodePositionTracker*. Hlavní funkcí třídy je rozhodování, které uzly jsou ve vysílacím rádiu cílového uzlu a měly by přijmout kopii signálu. Udržuje informaci o lokaci všech uzlů v sensorovém poli.
- *SensorChannel*. Přepoše kopii signálu od cílového uzlu všem sensorovým uzlům na základě odpovědi od komponenty *SensorNodePositionTracker*. Poskytuje možnost nastavit fixní zpoždění šíření signálu.
- *AcousticChannel*. Dědí třídu *SensorChannel*. Provádí výpočet zpoždění šíření signálu

dle vzorce zpoždění $\tau = \frac{s}{v}$, kde v je rychlost zvuku a s vzdálenost mezi sensorovým a cílovým uzlem.

Senzorové modely šíření signálu

- *SensorRadioPropagationModel*. Je abstraktní třída pro různé modely šíření signálu.
- *SeismicProp*. Provádí výpočet přijaté síly signálu na základě vysílacího výkonu signálu, vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem a tlumícího faktoru. Model šíření otřesu.
- *AcousticProp*. Provádí výpočet přijaté síly signálu v modelu šíření zvuku.

Senzorový uzel

a) Senzorový protokolový zásobník

- *SensorPhy*. Třída realizující příjem kopie signálu z cílového uzlu s aplikací modelu šíření. Pokud je výkon přijatého signálu pod prahem (atribut *SensorPhy*), signál není přijat. Jinak je přeposlán do vyšších vrstev.
- *SensorAgent*. Implementuje senzorovou vrstvu. Přijme signál ze *SensorPhy*, zpracuje a pošle vyšším vrstvám. Funkcí komponenty je extrahovat/vypočítat aplikačně specifická data z přijmutého signálu např. výkon, SNR (signal-to-noise ratio), poloha cílového uzlu atd.

b) Aplikační vrstva a transportní vrstva

- *SensorApp*. Třída implementující aplikační vrstvu. Dostane data ze *SensorAgent*, zpracuje je a přešle do transportní vrstvy.
- *SensorPacket*. Definuje strukturu paketu, který má být poslán individuálně (unicast) přes bezdrátový kanál do základní či specifické stanice nebo všesměrově (broadcast) všem uzlům v dosahu vysílání.
- *WirelessAgent*. Třída dědí třídu *Protocol*. Implementuje transportní vrstvu mezi *SensorApp* a bezdrátovým protokolovým zásobníkem. Příchozí data ze *SensorApp* zapouzdří do *SensorPacket* a pošle nižší vrstvě.

Bezdrátový protokolový zásobník

Simulátor zatím podporuje pouze standard IEEE 802.11 MAC vrstvy. Standard IEEE 802.15.4/ZigBee je v procesu vývoje.

- *PktDispatcher*. Komponenta s funkcí IP vrstvy. Vyšším vrstvám poskytuje služby doručení dat a zapouzdřuje příchozí *SensorPacket* do paketu *InetPacket*.
- *ARP*. Komponenta implementující ARP protokol (address resolution protocol). Ve WSN simulaci je přeskočena.
- *LL*. Komponenta implementující linkovou vrstvu. Příchozí paket od *PktDispatcher* (*InetPacket*) zapouzdří do *LLPacket* a pošle do fronty (komponenta *Queue*) paketů bezdrátové síťové karty.
- *Mac_802_11*. MAC vrstva implementující IEEE 802.11. V případě chyby, oznámí ji komponentě ad hoc routing. Podporuje IEEE 802.11 PSM (Power Saving Mode). Příchozí *LLPacket* zapouzdří do *Mac_802_11_Packet* – jiná MAC vrstva implikuje jinou třídu modelující MAC rámeč. Velikost rámce včetně všech zapouzdření (0B aplikačních dat) je 78B. Dle specifikace MAC 802.11 má rámeč režii 28B (34B, Ns-2 zdroj).

- *WirelessPhy*. Komponenta implementující fyzickou vrstvu. Pro přijetí paketu z kanálu musí být výkon signálu větší rovno nastavenému prahu. Výkon signálu je vypočítán komponentou *WirelessPropagationModel*. Nastavitelné atributy:
 - *CSThresh* (carrier sense threshold). Práh v jednotkách Watt pro úspěšnou detekci rámce (signálu) v PHY vrstvě. Pokud je výkon přijímaného signálu menší, je nepřijat na PHY vrstvě.
 - *RXThresh* (receive power threshold). Práh v jednotkách Watt pro úspěšné přijetí rámce (signálu) pro MAC vrstvu. Pokud je výkon přijímaného signálu menší, je nepřijat na MAC vrstvě.
 - *CPTthresh* (capture threshold). Práh v jednotkách dB pro úspěšné přijetí rámce (signálu) při simultánním přijímání více rámců. Vybere se rámeček s nejvyšším výkonem signálu a vypočítá se poměr výkonu tohoto signálu k sumě výkonu ostatních signálů rámců. Pokud je hodnota poměru větší než hodnota prahu, je rámeček přijat a ostatní ignorovány. Jinak jsou rámce v kolizi a nepřijaty.
- *RadioPropagationModel*. Základní třída, ze které dědí další specifické modely šíření – model otevřeného prostoru, Two-ray Ground Model, model nerovného terénu.
 - Model otevřeného prostoru. Jednoduchý model aplikující se na LOS cesty mezi vysílačem a přijímačem. Závislost přijatého výkonu signálu na vzdálenosti mezi vysílačem a příjemcem $d \geq d_0$ popisuje Friisova rovnice pro volný prostor.
 - Two-ray Ground Model. Model je použit, pokud existuje LOS cesta. Odraz rádiových vln od země je uvažován.
 - Model nerovného terénu. Jedná se o pokročilejší model šíření signálu.
- *Antenna*. Komponenta modeluje všesměrovou nebo směrovou anténu. Všesměrová je implicitně nastavena.
- *Channel*. Komponenta sdíleného bezdrátového média. Kopie paketu jsou posílány uzlům, pokud jsou přímými sousedy zdrojového uzlu z paketu.
- *NodePositionTracker*. Komponenta určuje sousedství mezi uzly na základě polohy uzlů v suboblastech. Suboblast je část celkové simulační plochy. Uzly ve všech suboblastech přímo sousedících se suboblastí vysílajícího uzlu jsou tohoto uzlu přímými sousedy.