

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Využití technologie ZigBee při přenosu dat
z mobilních zemědělských strojů

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Bohuslávek, CSc.

Vypracoval: Petr Koukal

PRAHA 2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Využití technologie ZigBee při přenosu dat z mobilních zemědělských strojů“ vypracoval sám za použití uvedené literatury a po odborných konzultacích s prof. Ing. Zdeňkem Bohuslávkem, CSc.

V Praze dne 20. 11.2011

Petr Koukal

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Zdeňku Bohuslávskovi, CSc. za odborné konzultace a metodické vedení při řešení problematiky diplomové práce.

Abstrakt:

Informační a řídicí technika je obor s širokou oblastí působnosti. V současné době neustálých inovací a technologických pokroků se stává předmětem rozvoje informačních technologií i oblast zemědělství. Tato práce se zabývá využitím bezdrátové technologie ZigBee pro přenos dat z mobilních zemědělských strojů. Je zde podrobně popsán komunikační standard IEEE 802.15.4 a jeho rozšířená část ZigBee. Dále práce pojednává o vhodném využití bezdrátových senzorových sítí v aplikacích zemědělské výroby. Jsou zde uvedeny příklady přenosů dat mezi stroji v rostlinné výrobě, založených na bázi ZigBee. V závěru práce je uveden návrh hardware a software pro řešení bezdrátového přenosu dat z míchacích krmných vozů.

Klíčová slova: ZigBee, přenos dat, zemědělské stroje

Abstract:

Information and Control Engineering is a field with a wide scope. At the present time of continuous innovation and technological progress even the agriculture becomes the subject of IT development. This thesis deals with the use of ZigBee wireless technology to transfer data from mobile agricultural machinery. There is a detailed description of IEEE 802.15.4 communication standard and its enhanced part – ZigBee. Then it deals with the appropriate use of wireless sensor networks in applications for agricultural production. There are examples of data transfers between machines in crop production, based on ZigBee. The hardware and software solution for wireless data transfer from feed mixer wagons is given in conclusion.

Key words: ZigBee, data transmission, agricultural machines

Obsah:

ÚVOD	1
1. POPIS VLASTNOSTÍ TECHNOLOGIE ZIGBEE	2
1.1 STANDARD IEEE 802.....	2
1.2 BEACON-ENABLED / NON-BEACON-ENABLE.....	7
1.3 SUPER-RÁMEC (SUPERFRAME).....	8
1.4 PŘENOS DAT	9
1.5 ADRESACE A SESTAVENÍ SÍTĚ V IEEE 802.15.4 / ZIGBEE.....	11
1.6 FUNKCE SÍŤOVÝCH VRSTEV IEEE 802.15.4.....	12
1.7 LINKOVÁ VRSTVA (MAC).....	16
1.8 ZIGBEE ALIANCE.....	21
1.9 SÍŤOVÁ VRSTVA (NWK)	21
1.10 APLIKAČNÍ VRSTVA (APPLICATION LAYER - APL)	29
2. ŘEŠENÍ SENZOROVÝCH SÍTÍ NA BÁZI ZIGBEE	33
2.1 LOKALIZACE UZLU WSN.....	35
3. POPIS ZNÁMÝCH VYUŽITÍ ZIGBEE V ZEMĚDĚLSKÉ VÝROBĚ	36
3.1 PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ.....	36
3.2 ŘÍZENÍ STROJŮ A TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ.....	40
3.3 AUTOMATIZACE ŘÍZENÍ A SPRÁVY BUDOV.....	41
3.4 SLEDOVÁNÍ MAJETKU.....	41
4. KONCEPČNÍ NÁVRH APLIKACE ŘEŠÍCÍ PŘENOS DAT Z MOBILNÍHO ZEMĚDĚLSKÉHO STOJE	42
4.1 VÁHOVÉ SYSTÉMY KRMNÝCH MÍCHACÍCH VOZŮ	42
4.2 NÁVRH ŘEŠENÍ 1	44
4.3 NÁVRH ŘEŠENÍ 2.....	47
4.4 NÁVRH SOFTWARE.....	54
5. ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK	64
SEZNAM PŘÍLOH	64

Úvod

V současném světě zeměpisné vzdálenosti ztrácejí pomalu na významu. Obor informační techniky se neustále vyvíjí, dlouhodobým trendem se zdá být přenos dat prostřednictvím bezdrátových technologií. Nyní se tento trend projevuje také v oblastech, ve kterých by ho ještě v nedávné minulosti nikdo nepředpokládal. Bezdrátový přenos dat se ukázal jako reálné řešení komunikace nejrůznějších zařízení. Rozšířil se z vědeckých pracovišť až do běžných domácností. Další dnes často zmiňovanou potřebou je snižování spotřeby energií, při zachování stejné mobility přenosu dat. Odpovědí na toto téma může být vývoj nových energeticky nízkonákladových zařízení, která mají tyto schopnosti již ze své konstrukční podstaty. Každé zařízení má však svá specifika a konkrétní požadavky, proto vznikají nové přenosové technologie a standardy.

Diplomová práce se zabývá využitím bezdrátové technologie ZigBee. Popisuje nasazení této technologie pro potřeby přenosů dat z mobilních zemědělských strojů a její využití jakožto komunikačního prvku v bezdrátových senzorových sítích. Cílem práce je zpracovat charakteristiku této technologie a popsat příklady jejího nasazení v zemědělské výrobě. Základ práce je tvořen detailním popisem technických i softwarových vlastností komunikačního standardu IEEE 802.15.4 a dále jeho rozšířením na standard ZigBee. Jsou zde popsány jednotlivé vrstvy pomyslné architektury referenčního modelu dané technologie. Následuje kapitola věnovaná popisu senzorických sítí řešených na bázi ZigBee, společně s představením konkrétních operací přenosu dat mezi zemědělskými stroji. Předposlední kapitola obsahuje koncepční návrh hardware a software pro aplikaci řešící přenos dat ze strojů v rostlinné výrobě. V závěru práce je pak zhodnocena použitelnost a výhody nasazení technologie ZigBee pro potřeby v zemědělství.

1. Popis vlastností technologie ZigBee

ZigBee je standard, který definuje sadu komunikačních protokolů pro bezdrátové sítě. Jedná se o síť krátkého dosahu s nižším objemem přenášených dat. Technologie ZigBee je vybudovaná na standardu IEEE 802.15.4, který dále rozšiřuje organizace ZigBee Alliance. Technologie pracuje v bezlicenčních radiofrekvenčních pásmech. Maximální přenosová rychlost dosahuje 250 kb/s. Její hlavní předností je velmi nízká spotřeba energie, spolehlivost přenosu a jednoduchá implementace. Název ZigBee údajně vznikl na základě podobnosti procesu výměny dat této technologie a pohybu včel uvnitř roje, spojením anglických slov Zigzag (tanec) a Bee (včela).

1.1 Standard IEEE 802

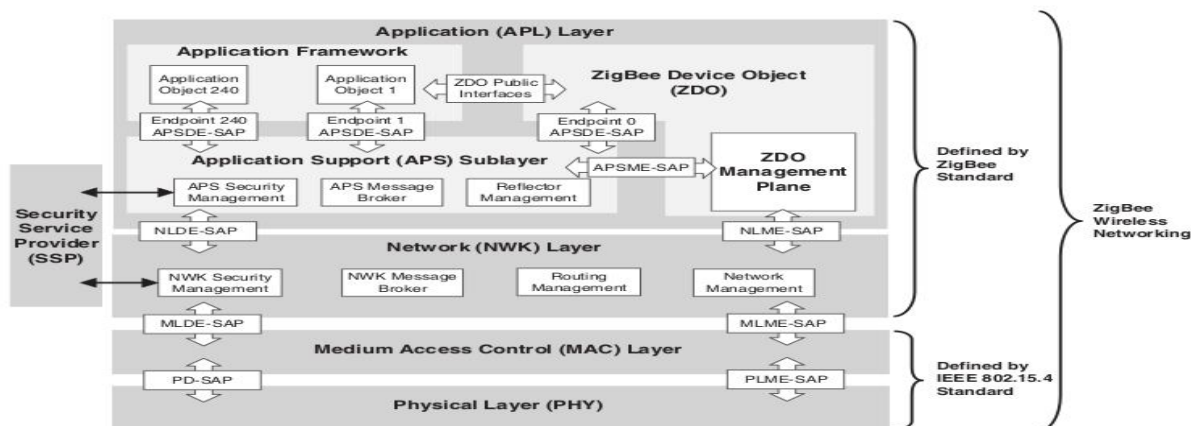
Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (IEEE) za účelem standardizace datových sítí formuloval několik technických norem. Bezdrátové sítě krátkého dosahu jsou zde rozděleny na dvě skupiny, lokální bezdrátové sítě (wireless local area network - WLAN) a bezdrátové sítě osobního charakteru (wireless personal area network - WPAN). WPAN slouží především jako bezdrátové rozšíření dosahu kabelových sítí LAN. Smyslem WPAN není nahradit WLAN, ale snaha, jak zajistit bezdrátovou komunikaci v rámci osobního prostoru konkrétní činnosti. Pro síť WPAN standard přiřadil kategorii s označením IEEE 802.15. Tato norma je dále rozdělena na sedm pracovních podskupin (802.15.1-7), které je možné blíže specifikovat členěním dle přenosové rychlosti, na rychlé (high rate - HR-WPAN), střední (medium rate - MR-WPAN) a pomalé (low rate - LR-WPAN). Například technologie Bluetooth nese označení pracovní skupiny IEEE 802.15.1 a je tak zástupcem MR-WPAN. Naopak ZigBee společně s 6LoWPAN, WirelessHART a MiWi jsou ve skupině IEEE 802.15.4 (LR-WPAN), která se vyznačuje zejména nízkou spotřebou elektrické energie, spolehlivostí přenosu dat, vysokým stupněm zabezpečení, menší přenosovou rychlostí a jednoduchou implementací.

1.1.1 STANDARD IEEE 802.15.4 / ZigBee

Základní myšlenkou rodiny standardů IEEE 802 je vytvoření systému komunikace pomocí tzv. síťových vrstev (network layer). Vrstvy jsou složeny do základního modelu síťové architektury, nazývaného jako OSI (Open System Interconnect) referenční model. Každá vrstva má své specifické funkce a jednotlivé vrstvy komunikují vždy jen s vrstvou nižší, nebo vyšší o jednu úroveň.

Norma IEEE 802.15.4 definuje pouze spodní dvě vrstvy OSI modelu – fyzickou (PHYSICAL layer - PHY) a linkovou (Media Access Control - MAC) vrstvu. ZigBee využívá tyto dvě vrstvy jako svůj základ a pomocí vyšších vrstev definovaných organizací ZigBee Alliance tyto vrstvy dále rozšiřuje. Kompletní síťová architektura standardu ZigBee je zobrazena na obr. 1, nazývá se ZigBee protocol stack.

ZigBee definuje vrstvu síťovou (NetWoRk layer - NWK) a aplikační (Application layer - APL), která v sobě zahrnuje aplikační vrstvu podpůrnou (Application Support - APS), ZigBee objekty (Zigbee Device Object - ZDO) a aplikační framework. Dále je zde vrstva bezpečnostní (Security Service Provider - SSP).



Obr. 1 Struktura ZigBee [5]

První vydání standardu ZigBee bylo zveřejněno v červnu roku 2005 s označením verze 1.0, známé jako ZigBee 2004. Tento standard vychází z normy IEEE 802.15.4-2003. Od té doby byly oba standardy několikrát revidovány a jejich vývoj neustále pokračuje. V současné době má ZigBee dvě oficiální platné varianty. První varianta je nazvaná ZigBee 2006 a jedná se o inovovanou původní verzi. Druhá verze vznikla v roce 2007 a je označena jako ZigBee PRO. Tato varianta s sebou přináší výraznější změny a zásadní vylepšení. Verze PRO je zpětně plně kompatibilní s verzemi staršími, vzestupná kompatibilita od verze 2006 jen částečná. V této práci bude popsán standard verze 2006 s popisem rozšíření ve verzi PRO. Samotná norma IEEE 802.15.4 také prošla řadou inovací. Původní verze z roku 2003 byla postupně rozšiřována a od verze 2007 je její vývoj označován koncovými písmeny. IEEE 802.15.4(a) až do poslední současné verze z roku 2009 - IEEE 802.15.4(g). V této práci, pokud není konkrétně uvedeno jinak, označením IEEE 802.15.4 je myšlena verze standardu IEEE 802.15.4.2006. [1], [2], [3]

1.1.2 Komunikace na fyzické vrstvě IEEE 802.15.4

Komunikace na fyzické vrstvě probíhá mezi vysílačem a přijímačem prostřednictvím bezdrátové radiofrekvenční linky (RF). Fyzická vrstva představuje spodní vrstvu v modelu OSI. Jejím hlavním úkolem je navázání spojení, synchronizace zařízení, modulace a demodulace signálu, tedy zajištění přenosu a příjem dat mezi linkovou vrstvou a přenosovým médiem - fyzickým rozhraním sítě.

Pro specifikaci komunikace norma IEEE 802.15.4 zavádí kombinaci čísel a stránek kanálů. Stránkování kanálu slouží k jemnějšímu dělení frekvence pro konkrétní typ modulace signálu. Existuje 32 tzv. stránek, číslovaných od 0 do 31. Stránka je rozdělena na 27 kanálů, číslovaných od 0 do 26. Standard definuje pouze 3 stránky, zbylých 29 je rezervováno pro další rozšíření, například pro pásmo UWB (Ultra Wide Band). [2]

IEEE 802.15.4 využívá tři radiofrekvenční bezlicenční pásma – 868 MHz, 915 MHz a 2,4 GHz s různou přenosovou rychlostí (20, 40, 250 kb/s). Využívá se zde technika rozprostření vysílacího spektra (DSSS, PSSS) a tři druhy modulace signálu (O-QPSK, BPSK, ASK). Možné varianty rozdělení frekvenčních pásem jsou shrnuty v tabulce 1. [4]

Tab. 1 Frekvenční kanály IEEE802.15.4 [vlastní]

	Frekvence [MHz]	počet kanálů	Čipová rychlost [kchip/s]	Modulace	Bit rychlost [kb/s]	Symbol rychlost [ksymbol/s]	metoda rozprostření
	868-868,6	1	300	BPSK	20	20	Binární
	902-928	10	600	BPSK	40	40	Binární
volitelné	868-868,6	1	400	ASK	250	12,5	20 bit PSSS
	902-928	10	1600	ASK	250	50	5 bit PSSS
volitelné	868-868,6	1	400	Q-QPSK	100	25	16 ortogonální
	902-928	10	1000	Q-QPSK	250	62,5	16 ortogonální
	2400-2483,5	16	2000	Q-QPSK	250	62,5	16 ortogonální

Frekvenční pásma

- 868 MHz (868 - 868,6 MHz) – Pásmo používané především v Evropě. Využívá se jeden kanál. Přenosová rychlost je 20, 100 a 250 kb/s podle typu použité modulace.
- 915 MHz (902 - 928 MHz) – Pásmo používané v Severní Americe, Austrálii, na Novém Zélandu a v různých zemích Jižní Ameriky. Využívá deset kanálů s přenosovou rychlostí 40 kb/s a 250 kb/s.
- 2450 MHz (2.4 - 2.4835 GHz) – Celosvětově používané pásmo, využívá 16 kanálů, přenosová rychlost je zde 250 kb/s. [16]

Modulace a rozprostření signálu

Přenos signálu na úrovni fyzické může být realizován třemi různými druhy modulace.

- BPSK (Binary Phase Shift Keying),
- ASK (Amplitude Shift Keying),
- O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying).

Využívaná technika rozprostření vysílacího spektra:

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum),
- PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum).

BPSK je dvoustavový typ modulace, který využívá techniku přímého rozprostření vysílacího spektra DSSS. Poskytuje přenosovou rychlost 20 kb/s v 868 MHz a 40 kb/s v 915 MHz pásmu. Modulace ASK je založena na amplitudovém klíčování, které je využito ve spojitosti s PSSS rozprostřením signálu pro pásmo 868 a 915 MHz. Q-QPSK modulace využívá 16bitovou kvazi-ortogonální modulaci s pseudonáhodnou sekvencí 4 datových bitů do každého symbolu. Pro pásmo 868 MHz a 915 MHz je volitelná

a poskytuje přenosovou rychlost 100 a 250 kb/s, pro pásmo 2400 MHz je volená standardně s 250 kb/s rychlostí.

V tabulce 1 jsou uvedeny varianty frekvenčních kanálů a k nim odpovídající počet kanálů, typ modulace, přenosová rychlost čipu, přenosová rychlost dat, přenos symbolů a metoda šíření signálu. [5]

IEEE802.15.4.2006 – Norma obsahuje 27 využitelných rádiových kanálů. V pásmu 2450 MHz je 16 kanálů s přenosovou rychlostí 250 kb/s, 10 kanálů v pásmu 915 MHz s 40 kb/s nebo 250 kb/s a 1 kanál v pásmu 868 MHz s 20 kb/s a 100 kb/s přenosovou rychlostí podle druhu zvolené modulace.

IEEE802.15.4.a - 2007 - Rozšíření standardu 2006 přináší několik změn komunikace na fyzické vrstvě. Jedná se o možnost vysílání v novém spektru UWB a novou metodu rozprostření vysílacího spektra CSS (Chirp Spread Spectrum). Přístup k fyzickému médiu přes UWB spektrum je rozdělen na tři vysílací pásma (250-750 MHz, 3100-5000 MHz, 6000-10600 MHz). Navíc je přidána přenosová rychlost 851 a 110 kb/s. Pro UWB je přidána nová přístupová metoda ALOHA.

Je zde 16 standardních kanálů pro frekvenci 2450 MHz, 30 pro 915 MHz, 3 pro 868 MHz, 14 kanálů pro 2450 MHz s CSS a 16 kanálů pro UWB.

IEEE802.15.4.c - 2009 - Přináší nová přenosová pásma 314-316 MHz, 430-434 MHz a 779-787 MHz pro Čínskou Republiku. 8 kanálů s možností modulace signálu MPSK a BPSK (Minimum / Binary Phase-Shift Keying).

IEEE802.15.4.d - 2009 - Navíc nové přenosové pásma pro Japonsko. Frekvenční rozsah 950-956MHz, 8 kanálů pro 780 MHz a 22 pro 950 MHz. Možnost modulace signálu metodou GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying).

IEEE 802.15.4e - Přidána podpora pro aplikace ISA SP100.11a

IEEE 802.15.4f - Podpora fyzické vrstvy pro UWB pásmo na 2,4 GHz a 433 MHz

IEEE802.15.4g - 2011 - Standard není v současné době volně k dispozici. Přináší však podporu pro tzv. Smart grid sítě v průmyslových oblastech. [1]

1.1.3 Typy zařízení a jejich funkce v IEEE 802.15.4 / ZigBee

Podle standardu IEEE 802.15.4 se zařízení zapojené v síti rozdělují:

Dle funkčnosti na dva typy zařízení (Device Types)

- FFD (Full-Functional Device) – zařízení se všemi funkcemi,
- RFD (Reduced-Functionality Device) – zařízení s omezenými funkcemi.

FFD zařízení implementují kompletní protokolový rámec, zajišťují tak veškeré služby, které standard stanovuje. Zařízení RFD z důvodu maximálního omezení hardwarové náročnosti implementují pouze nezbytné protokolové knihovny. [6]

Dle logického zapojení zařízení (Device Roles) - (IEEE 802.15.4 / ZigBee)

- PAN Koordinátor (PAN Coordinator / ZigBee Coordinator - ZC) – typ FFD,
- Směrovač (Coordinator / ZigBee Router - ZR) – zařízení typu FFD,
- Koncové zařízení (Device / ZigBee End Device - ZED) – zařízení typu RFD, FFD.

Zařízení FFD může sloužit jako koordinátor sítě, nebo jako směrovač. Každá síť pracující se standardem ZigBee musí obsahovat alespoň jedno zařízení typu FFD nastavené jako koordinátor sítě – řídicí jednotka. ZC musí být trvale napájen. Úkolem řídicí jednotky je správa a koordinace celé sítě nebo její části. Monitoruje data od koncových zařízení, které může přeposlat dále do jiných systémů.

Směrovač plní roli lokálního koordinátora, rozšiřuje tak rozsah sítě. Posílá zprávy od koordinátora, nebo jiného směrovače dalším zařízením. Může být i sám koncové zařízení.

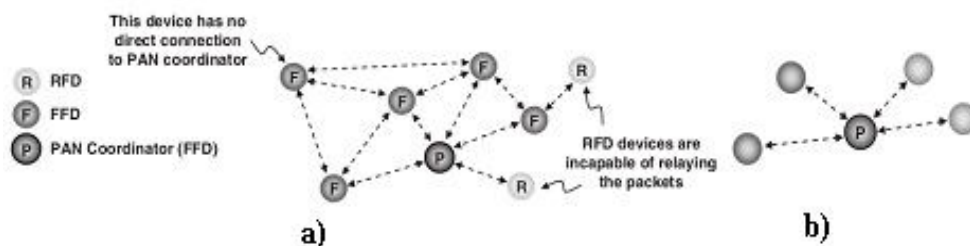
Koncová zařízení typu RFD mohou komunikovat pouze s řídicí jednotkou sítě. Tato zařízení mohou pracovat pouze jako koncová, mohou být napájena na baterie. [7], [3], [5]

Nejjednodušší síť se skládá z jednoho ZC a dalšího zařízení ZR nebo ZED.

1.1.4 Topologie sítě v IEEE 802.15.4

Síť podle IEEE 802.15.4 musí být v jedné ze dvou síťových topologií:

Hvězda - Tato topologie je založena na zařízení typu FFD v režimu PAN koordinátor komunikujícím s ostatními FFD nebo RFD zařízením. Připojená zařízení komunikují pouze prostřednictvím PAN koordinátora.



Obr. 2 Schéma topologie a) Peer to Peer b) Hvězda [5]

Peer-to-Peer - V této topologii nefiguruje centrální koordinátor jako hlavní prvek, ale musí se v této síti přesto nacházet. Libovolné FFD zařízení může komunikovat s každým dalším zařízením. Tímto vznikají cesty s několikanásobnou průchodností sítě, což podporuje spolehlivost, ale zároveň se zvyšuje náročnost komunikace v síti.

Peer-to-Peer síť mohou mít různé tvary uspořádání, standard však žádnou z nich nedefinuje. Až teprve standard ZigBee, který je založený na fyzické a linkové vrstvě IEEE 802.15.4 definuje tři typy síťové topologie. [5]

1.1.5 Přístupové metody na komunikační kanál

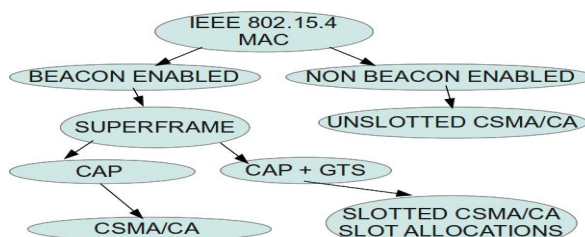
CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

IEEE 802.15.4 obsahuje jednoduchý přístupový protokol komunikace, který má za úkol, aby více zařízení mohlo použít stejný frekvenční kanál. Princip technologie CSMA/CA spočívá v tom, že stanice, která chce vysílat, se před začátkem vysílání paketu přepne do režimu detekce úrovně signálu na daném kanálu (energy detection - ED). Pokud není přenosové médium v režimu „obsazeno“, může ihned zahájit vysílání. V opačném případě čeká na konec právě probíhajícího vysílání a poté znovu otestuje volnost kanálu. Doba čekání s každým neúspěšným pokusem exponenciálně roste, počet opakování je uživatelsky nastavitelný. Vhodný poměr opakování pak může vést k lepšímu využití kapacity kanálu. Existují dvě verze algoritmu CSMA/CA, první je tzv. slotovaná (zarovnaná, slotted CSMA/CA) a druhá neslotovaná (nezarovnaná, unslotted CSMA/CA).

Volba příslušné varianty závisí na režimu použití super-rámce, v obou případech je vysílací signál rozdělen na časové úseky tzv. Backoff period. Délka úseku je nastavena pomocí hodnoty $aUnitBackoffPeriod$. Ve slotované verzi CSMA/CA jsou časové úseky vztaženy k rozsahu jednoho super-rámce a komunikující zařízení proto musí zahájit vysílání synchronizovaně s těmito úseky. V neslotované verzi zařízení nemusí dodržovat synchronizaci vysílání. Super-rámec je popsán v další kapitole. [8], [9]

1.2 Beacon-Enabled / Non-beacon-enable

Na úrovni MAC vrstvy existují dva módy komunikace, mezi kterými volí koordinátor sítě. Komunikace může probíhat s pomocí Beacon rámců (beacon-enabled PAN), nebo bez nich (non-beacon enabled PAN).



Obr. 3 Beacon-Enabled / Non-beacon-enable[vlastní]

1.2.1 Beacon

Beacon v bezdrátových sítích značí doslova jakýsi maják, který slouží k navigaci zařízení v dosahu sítě. Struktura Beacon rámce je uvedena v příloze 1.

Beacon se používá pro dva rozdílné druhy úloh. Pro synchronizaci komunikace mezi zařízeními, nebo pro asociaci připojení nových zařízení. V síti typu beacon-enabled se beacon využívá ve smyslu synchronizace komunikace zařízení i asociace připojených zařízení. V typu nonbeacon-enabled se používá jen pro asociaci nových zařízení. Dle varianty řešení sítě se pak mění i způsob přenosu dat, viz schéma na obr. 3. [10], [5]

1.2.2 Beacon-enabled mode

Beacon-enabled mode je tzv. synchronizační režim. Signalizační rámec je periodicky vysílán PAN koordinátorem a tím se identifikuje ID sítě a synchronizují se již připojená zařízení. V Beacon-enabled módu se využívá tzv. Superframe.

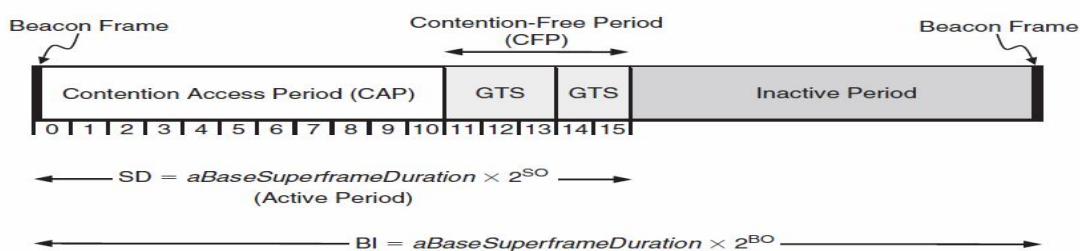
1.2.3 Non Beacon-enabled mode

Non Beacon-enabled mode je tzv. nesignalizační režim. Koordinátor PAN vysílá beacon jen pro potřeby asociace nových zařízení. Zařízení posílají svá data prostřednictvím unslotted CSMA-CA. Koordinátor vysílá požadavky na přenos dat v pravidelných intervalech, komunikace v tomto režimu není plně organizována a není tak zaručeno včasné doručení.

1.3 Super-rámec (Superframe)

Koordinátor PAN vysílá v pravidelných intervalech beacon pakety. Prostor mezi dvěma po sobě jdoucími beacon pakety se nazývá super-rámec (Superframe).

Upřesňující informace o superframe, tedy o periodě opakování a délce aktivní části, se přenáší v příchozím beacon paketu. Superframe je rozdělen na 16 stejně dlouhých časových intervalů, označovaných jako timeslot (TS), číslovaných TS0 až TS15. Může obsahovat aktivní a neaktivní část (active/inactive period), během které může koordinátor přejít do režimu spánku. Synchronizační interval (Beacon Interval - BI) určuje časový úsek mezi dvěma následujícími synchronizačními signály. Hodnota BI je dána konstantou $aBaseSuperframeDuration$ a parametrem BO (Beacon Order). Hodnota SD (Superframe Duration) vyznačuje délku aktivní periody v rámci celého intervalu super-rámce. Hodnota závisí na konstantě $aBaseSuperframeDuration$ a parametru SO (Superframe Order). Pro parametry super-rámce musí platit poměr $0 \leq SO \leq BO \leq 14$. Viz obr. 4.



Obr. 4 Obsah Super-rámec [5]

Během aktivní části rámce koordinátor komunikuje se všemi zařízeními v rámci PAN sítě. Na obr. 4 je znázorněna varianta super-rámce s CAP (Contention access period), což je doba během které všechna zařízení, která chtějí komunikovat, musí mezi sebou soupeřit o to, kdo dostane slovo a může tak začít komunikovat. Soupeří se v dostupnosti kanálu slotovanou verzí přenosu dat CSMA-CA, to znamená, že je v příchozím beacon paketu přesně dáno, kdy začínají jednotlivé timesloty CAP a tak zařízení pozná, kdy přesně má zkusit ověřit dostupnost kanálu. S následujícím beaconem se opakuje kolo soutěže. [10]

Pro potřeby zařízení, u kterých je nutné získat rychlou odezvu pro přenos dat, je definován superframe s garantovanými timesloty (Garanteed time slot - GTS). Zde zařízení nemusí soupeřit o dostupnost kanálu, ale mají přímo vyhrazený přístup a čas vysílání. Tato část se nazývá perioda bez soutěže (contention-free period - CFP) a nachází se až na konci aktivní části superframe. O toto privilegium si zařízení musí zažádat. V rámci CFP může koordinátor vyhradit až sedm GTS, přičemž jeden GTS může zabírat i více timeslotů, jak je znázorněno na obr. 4. Před využitím CFP musí být však umožněn přístup zařízením, která využijí nepřidělené sloty v části CAP. V rámci CFP není nutná komunikace pomocí slotované CSMA/CA metody, protože zde zařízení mají přesně nastavený okamžik, kdy mohou přistoupit na kanál. [5], [12], [57]

Tyto přístupové metody komunikace s využitím superframe se dají snadno využít pokud vysílá beacon jeden koordinátor, jako tomu je v případě topologie sítě hvězda. V rozsáhlých Peer-to-peer sítích, kde se vyskytuje více FFD koordinátorů, které pracují na stejném kanále, může nastat problém s překrýváním aktivní periody vysílání. Aby nedocházelo ke kolizím při současném přístupu více RFD na jeden kanál, je nutné správně načasovat vysílání aktivní periody jednoho koordinátora na překryv neaktivní části periody druhého koordinátora. Je nutné nastavit tzv. časový offset jednotlivých koordinátorů. V případě většího počtu koordinátorů v rámci jednoho prostoru je smysluplnější nastavit vysílání na rozdílných kanálech, tím se také zvýší propustnost sítě. [10]

1.4 Přenos dat

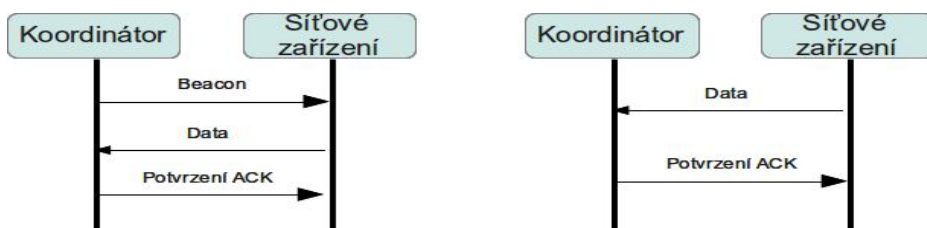
Metoda přenosu dat na úrovni linkové vrstvy, jak již bylo řečeno, je rozdělena podle využití synchronizačního procesu (beacons transmission). Síť může podporovat synchronizační režim (beacon-enabled PAN). Tato varianta je vhodná pro potřeby zvýšení odezvy sítě a přesné řízení komunikace zařízení. Toho však není nutné dosáhnout vždy a proto může být použita síť bez synchronizace (non-beacon enabled). Beacon vysílání se zde používá pouze pro synchronizaci po připojení nových zařízení do sítě (network discovery). Standard ZigBee využívá metody přenosu dat bez synchronizace sítě. [10]

Standard 802.15.4 rozlišuje tři typy přenosů:

- zařízení odesílá data ke koordinátorovi,
- data odesílá koordinátor do zařízení,
- přenos dat mezi zařízeními.

První varianta přenosu je, že zařízení odesílá data směrem ke koordinátorovi sítě. Zařízení, které chce posílat data v beacon-enabled síti, počká na synchronizační beacon vysíláný koordinátorem a vyčte z něj strukturu superframu, podle které se zesynchronizuje na správný čas. Následně odešle data pomocí slotované CSMA-CA metody ke koordinátorovi, ten poté může zpět odeslat potvrzení ACK. Schéma toku dat je na obr. 5 vlevo.

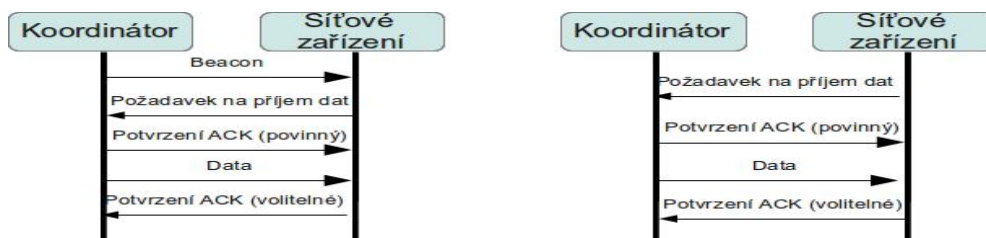
V nonbeacon-enabled síti zařízení přímo odesílá data pomocí neslotované přístupové metody CSMA-CA hned po ověření dostupnosti kanálu. Koordinátor může volitelně odeslat potvrzení ACK. Schéma viz obr. 5 vpravo.



Obr. 5 Data odesílá koordinátor do zařízení [vlastní]

Druhá varianta přenosu probíhá od koordinátora směrem do zařízení, které data přijímá.

Pokud chce koordinátor odeslat data v beacon-enabled síti musí nejprve příjemci naznačit prostřednictvím datového obsahu synchronizačního beaconu, že má data určené právě pro něj (message is pending). Zařízení odchyťává beacon pakety na kanále, na kterém je připojené a když v obsahu beacon uvidí, že koordinátor má data určeny jemu, pošle koordinátorovi pomocí slotované CSMA-CA MAC příkaz, kde žádá o svá data. Koordinátor pak potvrdí požadavek vysláním ACK. Poté ihned začne posílat data pomocí slotované CSMA-CA metody. Přijímací zařízení může následně potvrdit úspěšný příjem prostřednictvím ACK zprávy. Následně koordinátor vymaže indikaci dat pro příjemce v beacon. Schéma této operace je znázorněna na obr. 6 vlevo.



Obr. 6 Data odesílá koordinátor do zařízení [vlastní]

V nonbeacon-enabled síti koordinátor čeká, jestli koncové zařízení pošle pomocí neslotované CSMA-CA metody požadavek, kterým se koordinátora dotazuje, zda neuchovává nějaká data určené jemu (Indirect transfer). Koordinátor odešle potvrzující ACK, kterým informuje, zda má nebo nemá nějaká data pro dotazované zařízení. Pokud koordinátor nemá žádná konkrétní data pro toto zařízení, pak tento stav vyjádří v následujícím ACK rámci nebo datovém rámci hodnotou 0. Zařízení může zaslat zpět potvrzení rámcem ACK. Schéma této operace je znázorněna na obr. 6 vpravo.

Třetí variantou je přenos dat mezi rovnocennými uzly sítě. Zařízení může kdykoli odeslat data pomocí neslotované CSMA-CA druhému zařízení. Přenos zde není jakkoli synchronizován, proto při větším počtu komunikujících zařízení mohou vznikat kolize přenosu.

Díky nutné komunikaci koordinátora se v topologii sítě hvězda dá využít pouze dvou prvních variant přenosu. V sítích peer-to-peer lze využít všechny tři řešení. [5], [9]

Ověřování dat

Komunikace fyzické vrstvy je založena na posílání paketů mezi jednotlivými zařízeními. Příjímač musí mít nějaký mechanismus na ověření, zda jsou doručená data kompletní. Proto každý rámeček v IEEE 802.15.4 nezávisle na typu obsahuje závěrečné pole FCS (Frame Check Sequence). FCS obsahuje 16bitový opravný CRC kód.

1.5 Adresace a sestavení sítě v IEEE 802.15.4 / Zigbee

Standard IEEE 802.15.4 podobně jako v jiných typech sítí využívá pro adresaci jednotlivých zařízení binární adresovací kódy. Jedná se o kombinaci unikátní MAC adresy na linkové vrstvě a lokální adresy na vrstvě síťové. Každé zařízení v síti musí mít jedinečnou adresu. Rozlišujeme dva typy adres:

IEEE 64bitová MAC adresa – Celosvětově unikátní adresa, přiděluje jí organizace IEEE a v rámci každého zařízení je neměnná. Je nazývána také jako dlouhá (long address) nebo rozšířená (extended address) adresa. Skládá se z unikátních horních 24 bitů, tzv. Organizationally Unique Identifier (OUI) a zbyvajících bitů, které jsou vymezeny pro prostor konkrétního zařízení.

16bitová síťová adresa - Adresa jedinečná pouze v rámci jedné sítě, nazývaná zkrácená adresa. Přiděluje ji koordinátor při připojování do sítě. Tato adresa se může měnit při zapojení zařízení do sítě. Zařízení může použít i svou 64bitovou MAC adresu, dle použité topologie sítě. [2]

PAN ID

Každou síť lze jednoznačně určit pomocí 16bitového identifikátoru PAN ID (Personal area network identification). Z toho vyplývá, že v rámci jednoho fyzického prostoru (Personal operating space - POS) je teoreticky možné adresovat až 65535 zařízení ($2^{16} = 65536$). Každou síť s unikátním PAN ID zakládá a spravuje koordinátor. [11]

1.5.1 Asociace a disociace připojených zařízení

Asociace a disociace je mechanismus pro připojení a odpojení zařízení ze sítě. Koordinátor vysílá beacon pakety buď pravidelně (beacon-enabled) nebo náhodně až po obdržení žádosti konkrétního zařízení, které se chce připojit na daný kanál. Zařízení nejprve vyšle žádost o připojení a pak zachycuje beacon pakety. Koncové zařízení podle obsahu pole (beacon order – BO) v přijatém paketu pozná, jestli se jedná o beacon enabled nebo non-beacon enabled síť. Koordinátor poté rozhodne, zda dané zařízení připojí do sítě. [5], [6]

1.6 Funkce síťových vrstev IEEE 802.15.4

1.6.1 Fyzická vrstva (PHY)

Fyzická vrstva zajišťuje tyto úlohy:

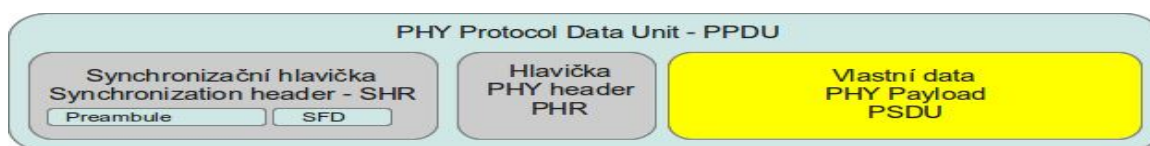
- aktivace a deaktivace vysílače. Vysílač může být ve stavu: přenos, příjem, spánek,
- vysílání a přenos dat,
- detekci síly signálu (Energy Detection – ED) na konkrétním kanálu,
- indikace kvality spojení (Link quality indication – LQI),
- určení volných kanálů (Clear channel assessment - CCA),
- detekce nosné (Carrier sensing) v požadovaném kanálu,
- oprava chyb,
- kódování a modulace dat.

Datová jednotka fyzické vrstvy

Datový rámec na úrovni fyzické vrstvy je nazýván PHY Protocol Data Unit (PPDU) - zkráceně jako paket. Tento standardem definovaný paket v sobě zapouzdřuje rámce z vyšších vrstev. Struktura paketu je graficky znázorněna na obr. 7.

Struktura PPDU (PHY Protocol Data Unit):

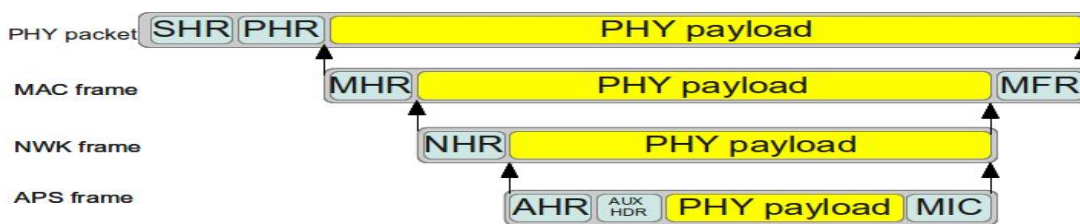
- synchronizační hlavička (synchronization header – SHR),
- hlavička fyzické vrstvy (PHY header – PHR),
- datový obsah (PHY payload).



Obr. 7 Struktura paketu na fyzické vrstvě – PPDU [vlastní]

Synchronizační hlavička (SHR) se skládá ze dvou pomyslných částí: záhlaví (preamble) a oddělovače začátku paketu (start of frame delimiter - SFD). Preamble bývá dlouhá 32 bitů a obsahuje samé logické 0, kterých je využito pro synchronizaci na přijímači. Pro stanovení začátku paketu slouží oddělovač dlouhý 8 bitů (0xE6). Hlavička fyzické vrstvy (PHR) je jedno pole dlouhé 8 bitů. Nejvýznamnější bit (MSB) je rezervovaný a zbylých 7 bitů určuje délku celého PPDU paketu. Datový obsah (PHY payload) se skládá z jednoho pole, které obsahuje samotná data (Physical layer service data unit – PSDU). PSDU má proměnlivou délku, maximálně však 136 bytů a obsahuje data poskytnutá z MAC vrstvy (MAC Protocol Data Unit – MPDU). Obsah jednotlivých rámců z vyšších vrstev bude popsán v další kapitole.[2], [5]

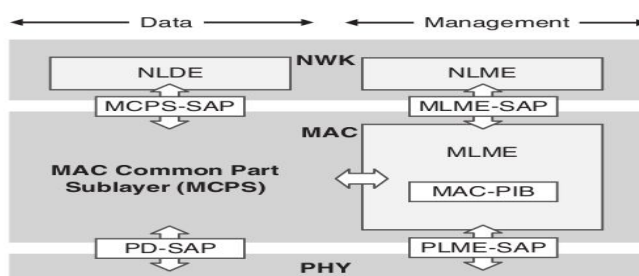
Zapouzdření jednotlivých rámců do fyzického rámce



Obr. 8 Zapouzdření dat v rámci jednotlivých vrstev [vlastní]

1.6.2 Služby fyzické vrstvy (PHY Services)

Mezi přenosovým médiem a linkovou vrstvou nabízí fyzická vrstva dva typy služeb, které jsou přístupné prostřednictvím přístupových bodů (service access point - SAP).



Obr. 9 Struktura mezivrstev nad fyzickou vrstvou [5]

Datové služby fyzické vrstvy (PHY data service -PD). Tato služba umožňuje obsluhovat přenos dat mezi fyzickou a linkovou vrstvou prostřednictvím PD-SAP (PHY layer data service access point).

Management fyzické vrstvy (PHY management service - PLME). Tato služba zabezpečuje prostředky k nastavení komunikace mezi vrstvami prostřednictvím PLME-SAP (PHY layer management entity service access point).

Přístupové body SAP se vyskytují mezi všemi vrstvami konceptuálního modelu jednotlivých síťových vrstev, znázorněno na obr. 9. [5]

1.6.3 Služby primitiv (The Service Primitives)

IEEE 802.15.4 vysvětluje pojem služby primitiv (service Primitives) jako služby pro přenos informací mezi sousedními vrstvami. Vrstva fyzická, linková i síťová posílá informace vyšší vrstvě pomocí vhodné primitivy. Komunikace mezi jednotlivými sousedními vrstvami protokolu jsou řízeny voláním příkazu, funkce, nebo voláním příslušné služby. Existují 4 druhy primitiv:

- <The primitive>. request (žádost)
- <The primitive>. indication (indikace)
- <The primitive>. response (odpověď)
- <The primitive>. confirm (potvrzení)

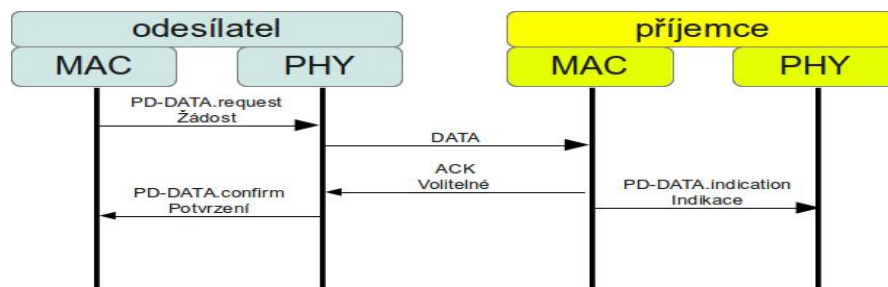
Primitiva request je volána od odesílatele jako žádost na iniciování služby. Indikace znázorňuje událost od služby. Response směřuje od příjemce k odesílateli jako potvrzení jedné operace. Confirm směřuje od služby k uživateli jako potvrzení celkového výsledku všech žádostí. [2]

Datové služby fyzické vrstvy

Datové služby fyzické vrstvy nabízí tři primitiva:

PD-DATA.request, PD-DATA.confirm, PD-DATA.indication

Na obr. 10 je znázorněn mechanismus komunikace mezi dvěma uzly v síti. Výměna dat tedy probíhá mezi fyzickou a linkovou vrstvou obou zařízení. Uzel 1 (odesílatel) chce odeslat data z vyšší vrstvy na vrstvu fyzickou, k tomu využije datovou službu PD-DATA a primitivu request. Z fyzické vrstvy zpět obdrží potvrzení PD-DATA.confirm. Odesílatel odešle data, příjemce může potvrdit příjem ACK rámcem. Na druhé straně uzel 2 (příjemce) po obdržení dat odešle PD-DATA.indication na svou vyšší vrstvu. [5]



Obr. 10 Diagram komunikace uzlů s primitivy fyzické vrstvy [vlastní]

Management fyzické vrstvy

Řídící služby PLME fyzické vrstvy poskytují prostředky k nastavení komunikace a parametrů rádiové části.

Je definováno pět PLME primitiv, které mohou být spojeny se službou request a confirm. Pro nastavení komunikace pomocí parametrů (PIB management) slouží primitiva PLME-GET a PLME-SET. K zapnutí a vypnutí rádia je PLME-SET-TRX-STATE. Pro detekci energie signálu jsou primitiva PLME-CCA a PLME-ED.[2]

PIB (PHY PAN Information Base) obsahuje konfigurační parametry pro řízení fyzické vrstvy. Parametry mohou být zapsány pomocí PLME-SET a přečteny PLME-GET, což je znázorněno na obr. 11.

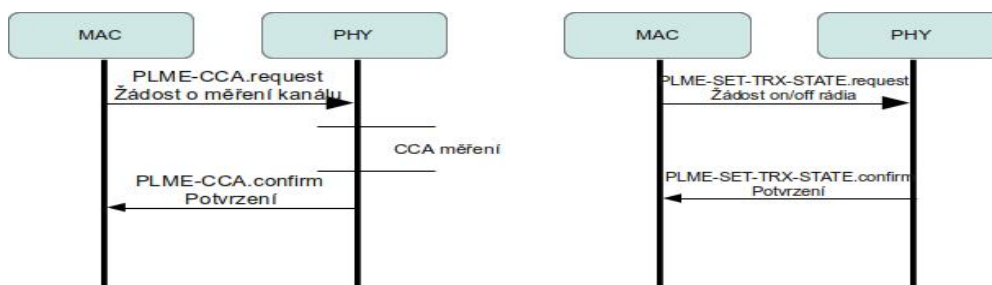
PIB parametry:

phyCurrentChannel - používaný kanál, *phyChannelsSupported* - který kanál, *phyTransmitPower* - vysílací výkon, *phyCCAMode* - mód skenování energie, *phyCurrentPage* - používána stránka na kanálu, *phyMaxFrameDuration* - maximální délka rámce, *phySHRDuration* - délka synchronizační hlavičky, *phySymbolsPerOctet* - počet symbolů na jeden oktet



Obr. 11 Diagram přenosu parametrů komunikace [vlastní]

Plánovaným vypínáním se snižuje celková spotřeba zařízení. Primitiva PLME-ED (Energy detection) poslouží v případě, že chce zařízení přistoupit k sdílení radiového kanálu. Nejprve se musí vyhodnotit, jestli je požadovaný kanál vůbec dostupný. Příkazem PLME-ED.request se vyšle žádost na měření energie v signálu a zpět dorazí výsledek pomocí PLME-ED.confirm. Vrácený údaj může nabývat hodnot 0 až 255, proto se zde neřeší o jakou komunikaci se na daném kanále jedná, ale jen jestli je nebo není dostupný. Ke zjištění volného kanálu pro přenos dat se využívá PLME-CCA (Clear channel assesment). Před vlastním přenosem dat linková vrstva vyšle žádost PLME-CCA.request vrstvě fyzické, ta zapne rádio a provede měření, poté rádio opět vypne. Diagram tohoto mechanismu je uveden na obr. 12 vpravo. Výsledek měření je zpracován pomocí PLME-ED a zpět na linkovou vrstvu je odesláno potvrzení PLME-CCA.confirm, kde se zařízení dozví, jestli je kanál volný (IDLE), obsazen (BUSY), nebo vypnutý (TRX_OFF). [5], [10], [2]



Obr. 12 Měření dostupnosti kanálu s využitím řídicích primitiv [vlastní]

Varianty měření CCA:

- **CCA mod 1** – V tomto režimu se výsledek ED měření porovná s energetickým prahem. Je-li hodnota naměřené energie vyšší než stanovená hranice, kanál je považován za obsazený.
- **CCA mod 2** – Tato metoda využívá výsledek CS (carrier sense). Kanál je považován za obsazený, jestliže je přijatý signál v souladu se standardem fyzické vrstvy po provedení demodulace.
- **CCA mod 3** – V tomto režimu se jedná o logickou kombinaci dvou předchozích módů pomocí (AND/OR).

Režim módu měření se přenáší v PIB parametru *phyCCAMode*. [2]

Komunikaci na fyzické vrstvě dále specifikují dvě konstanty.

aMaxPHYPacketSize - Maximální velikost paketu PSDU, jakou je fyzická vrstva schopna přijmout. Standardně stanovena na 127 bytů.

aTurnaroundTime - Maximální čas obrátky mezi vysláním a příjmem zprávy služby. Standardně nastaven na 12 symbolových period. [5]

1.7 Linková vrstva (MAC)

Linková vrstva (někdy také spojová) je druhá vrstva referenčního modelu, která zabezpečuje přístup a sdílení přenosového média. Uspořádává data z fyzické vrstvy do logických celků známých jako rámce (frames). Poskytuje služby pro asociaci, synchronizaci a adresaci síťových zařízení. Řídí a kontroluje přenos dat na fyzické vrstvě.

MAC vrstva zajišťuje tyto úlohy:

- generování beacon paketů, pokud je zařízení koordinátor,
- synchronizace zařízení dle beacon paketů, v beacon-enabled síti,
- přístup ke kanálům,
- asociace a disociace zařízení,
- adresace zařízení,
- správa garantovaných timeslotů (GTS),
- kontrola přijatých rámců,
- podpora zabezpečení zařízení.

Varianty přenášení dat:

Acknowledged or unacknowledged transmission. Vysílací zařízení buď požaduje potvrzení o úspěšném přijetí dat po příjemci, nebo nepožaduje. Je to volitelné.

Transmission during GTS or CAP. Přenos s přiděleným časovým slotem (GTS), nebo bez něj (CAP). Viz kapitola beacon-enabled a non-beacon-enabled síť.

Direct or indirect transmission. V nepřímém přenosu může koordinátor příjemci poslat pouze oznámení, že má v sobě uloženy data pro něj. Ten si pak svá data vyžádá. Tato doručka se posílá pouze v beacon-enabled sítích koordinátorem sítě. V přímém přenosu jsou data přeneseny rovnou. [5], [10]

1.7.1 Datová jednotka MAC vrstvy

Datová jednotka linkové vrstvy se nazývá MPDU (MAC Protocol Data Unit). Celý datový rámec MPDU je zapouzdřen do obsahové části PSDU paketu na úrovni fyzické vrstvy. Viz schéma zapouzdření dat v rámci jednotlivých vrstev v předchozí kapitole (obr. 8).

Struktura MAC rámce se skládá z hlavičky (MAC header - MHR), vlastních dat (MAC Service Data Unit - MSDU) a zápatí (MAC Footer - MFR).

Hlavička (MHR) se standardně skládá ze čtyř polí. První je pole kontrolní (frame control), další je sekvenční číslo (Sequence number), adresní pole (Addressing Fields) a volitelné pole zabezpečení (Auxiliary security header). Kontrolní pole se dále zanořuje do podrobnějších specifikací. Viz příloha 1. V kontrolním poli se přenáší následující informace: typ rámce (Beacon, Data, ACK, Command), šifrování (1/0), typ přenosu (přímé/nepřímé), potvrzení ACK (1/0), PAN ID komprese (pokud je stejný odesílatel i příjemce), verze délky adresy (16 b/64 b), verze protokolu a mód adresování. Sekvenční číslo určuje pořadí rámce ve vysílání. V poli adresa je uveden zdroj a cíl komunikace. Dle úrovně zabezpečení je vyplněna poslední část hlavičky.

Datová část (MSDU) obsahuje užitečná data k přenosu mezi zařízeními.

Zápatí (MFR) obsahuje 16bitovou FCS kombinaci (Frame Check Sequence), jedná se o kontrolní součet (Cyclic redundancy check - CRC) přijatých dat. [5], [2]

1.7.2 Základní typy MAC rámců

Na úrovni linkové vrstvy jsou definovány základní čtyři typy rámců. Pro komunikaci zařízení složí rámec signální (Beacon frame), řídicí (MAC command frame), potvrzovací (ACK frame) a pro přenos vlastních dat je určen datový rámec (Data frame). Struktura jednotlivých rámců je zobrazena v příloze 1. Maximální délka jednoho rámce je 127 bytů, maximální velikost vlastních dat (MSDU) je 118 bytů.

Beacon frame – Rámec periodicky vysílaný pouze koordinátorem sítě. Jeho účel je synchronizace připojených zařízení a přenos informací o síti. V ZigBee je využit právě jen při objevování sítě.

Data Frame – Datový rámec posílaný mezi zařízeními obsahuje konkrétní informace o délce až 104 bytů.

Acknowledgement Frame (ACK Frame) – Tento rámec se používá volitelně jako zpětné potvrzení přijatých dat mezi všemi zařízeními. Velikost tohoto rámce je 5 bytů, jako jediný neobsahuje vnořené MSDU.

MAC Command Frame – Příkazový rámec slouží pro konfiguraci klientských zařízení. Ve svých parametrech (Command type) přenáší hodnoty nastavení sítě. [2]

Příkazy používané v ZigBee sítích (mimo Beacon Request a GTS Request):

Association Regest (žádost o zařazení do sítě), Association Response (odpověď na žádost o zařazení), Disassociation Notification (oznámení o vyřazení), Data Regest (požadavek na vysílání dat), PAN ID conflict Notification (oznámení o konfliktu PAN identifikátorů), Orphan Notification (oznámení o osiřelém PAN koordinátoru), Beacon regest (žádost o signální rámec), Coordinator realit, (přeladění koordinátoru), GTS Request (žádost o GTS)

1.7.3 Služby linkové vrstvy (MAC Services)

Linková vrstva poskytuje služby na rozhraní mezi fyzickou a vyšší síťovou vrstvou pomocí přístupových bodů (SAP). Výměna dat na úrovni linkové vrstvy je znázorněna na obr. 9.

MAC vrstva používá ke komunikaci mezi vrstvami dva druhy služeb

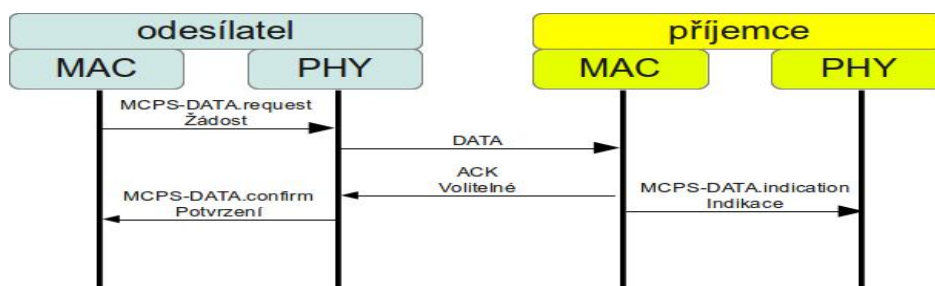
- Datové služby linkové vrstvy (MAC data services) jsou dostupné prostřednictvím MCPS-SAP (MAC common part sublayer service access point).
- Řídící služby linkové vrstvy (MAC Layer Management Entity – MLME) jsou dostupné prostřednictvím MLME-SAP (MAC Layer Management Entity service access point).

Přístupové body SAP se vyskytují mezi všemi vrstvami konceptuálního modelu jednotlivých síťových vrstev, který je znázorněn na obr 1. [2]

Konfigurační atributy jsou uloženy v MAC-PIB (MAC PAN Information Base) podobně jako na fyzické vrstvě. Síťová vrstva však může požádat o parametry jak z vrstvy linkové MAC-PIB, tak i fyzické PHY-PIB. Parametry se předávají pomocí PLME-SAP, MLME-SAP obsahuje konfigurační parametry pro řízení fyzické vrstvy. Parametry mohou být zapsány pomocí PLME-SET a přečteny PLME-GET, což je znázorněno na obr. 1.

Datové služby linkové vrstvy

MCPS-DATA.request, MCPS-DATA.confirm, MCPS-DATA.indication



Obr. 13 Výměna dat z pohledu síťové vrstvy [vlastní]

Na obr. 13 probíhá komunikace na úrovni linkové vrstvy mezi dvěma zařízeními. Zařízení 1 (odesílatel) odešle datový paket pomocí MCPS-DATA.request. Zařízení 2 (příjemce) z linkové vrstvy odešle ACK rámeček a na síťové vrstvě se vyvolá událost MCPS-Data.indication, která informuje síťovou vrstvou o příchodích datech. Na opačné straně příjemce obdrží potvrzení na linkové vrstvě a informuje síťovou vrstvou o úspěšném přenosu pomocí MCPS-DATA.confirm. [5]

Řídící služby linkové vrstvy

Řídící služby MAC vrstvy jsou dostupné prostřednictvím MLME-SAP.

MAC vrstva nabízí 15 primitiv s voláním základních služeb *.request, indication, response, confirm. MAC příkazy v sobě obsahují konstanty, atributy (MAC PIB) (str. 366-374, [2]) a adresu vyšších vrstev pro oznámení úspěchu či neúspěchu volané žádosti.

Nastavení parametrů sítě

Pro nastavení parametrů zařízení slouží příkazy MLME-GET, MLME-SET, MLME-RESET.

MAC Reset

Síťová vrstva může požádat o resetování všech nastavení na MAC vrstvě pomocí příkazu MAC MLME-Reset. Tím dojde k odpojení vysílače před nastavením všech původních proměnných a parametrů z MAC PIB databáze.

Asociace a disociace

Asociace a disociace je mechanismus pro připojení a odpojení zařízení ze sítě.

Používají se tato primitiva: MLME-Associate.request, MLME-Associate.indication, MLME-Associate.response, MLME-Associate.confirm.

Nepřipojené zařízení, které ví, na jaký kanál se chce připojit, požádá koordinátora o asociaci pomocí MLME-ASSOCIATE.request. Tento požadavek se předá ze síťové vrstvy až na fyzickou, kde je odeslán. Koordinátor poté vrátí potvrzovací rámec ACK o přijetí žádosti. Na straně koordinátora dojde k předání indikace žádosti MLME-Associate.indication na síťovou vrstvu, která rozhodne o připojení zařízení do sítě. Koordinátor musí stihnout odpovědět v určitém čase (*macResponseWaitTime*), který má v attributech nastaven žadatel. Rozhodnutí je předáno pomocí MLME-ASSOCIATE.response. V případě, že koordinátor vyhodnotil z parametrů příchozí žádosti, že zařízení má připojit, žadateli přidělí adresu. Zařízení pošle data a potvrdí se příjem. Dále zařízení oznámí své přijetí pomocí MLME-Associate.confirm své vyšší vrstvě a koordinátor si předá nový stav MLME-COMM-STATUS.indication.

Rozdíl je v sítích beacon-enabled, kdy se zařízení nejprve synchronizuje a pak teprve žádá o asociaci.

Odpojování probíhá podobně, jen je rozdíl pokud se chce odpojit koncové zařízení, nebo koordinátor chce odpojit zařízení. Zařízení, které chce odpojit, odešle MLME-DISASSOCIATE.request a po odpovědi předává MLME-DISASSOCIATE.confirm. Případně je možné použít příkaz NWK Leave v datovém rámci síťové vrstvy. [5], [10], [2]

Komunikační stav

Komunikační stav je předáván v rámci zařízení po přenosu primitivy response. Pomocí MLME-COMM-STATUS.indication je předána vyšší vrstvě změna stavu. Může být vyslán v případě neověřených příchozích paketů.

Vypnutí nebo zapnutí vysílače

Vypnutí nebo zapnutí vysílače je možné pomocí příkazu MLME-TRX-Enable.

Správa GTS

Správu GTS zajišťuje PAN koordinátor pomocí primitiv MLME-GTS. O alokaci jednoho garantovaného slotu v CFP z možných timeslotů si žádá zařízení samotné. Koordinátor vyšle nastavení GTS v beacon rámci. Přerozdělení nebo odstranění garantovaného slotu může provést jen PAN koordinátor. V sítích beacon-enabled může NWK požádat o nastavení super-rámce, tak aby koordinátor v části CAP super-rámce po nějaké době vypnul přijímač a ušetřil tím energii. Hodnotou *macBattLifeExtPeriods* v části BLE (viz schéma příloha 1) beacon rámce se nastaví doba, ve které je nutné provést všechny přenosy v CAP.

Osiřelé zařízení

Zařízení, které ztratí kontakt se svojí sítí (vyčerpá všechny pokusy o doručení *macMaxFrameRetires*, nebo mu není doručeno potvrzení ACK v době *macAckWaitDuration*) se stává sirotkem. Zařízení, které opustí síť disasociací není sirotek. Na síti se vyhodnotí chyba komunikace. Může dojít k resetování MAC vrstvy a poté lze zařízení znovu asociovat nebo osiřelé zařízení provede skenování sítě MLME-SCAN společně s Orphan Notification. Kontaktování koordinátoři indikují MLME-ORPHAN.indication NWK vrstvě, ta zjistí, zda bylo zařízení v síti již dříve připojeno a vrátí MLME-ORPHAN.response. Pokud ano, po síti se předá příkaz Coordinator Realignment a zařízení je znovu připojeno, koordinátor indikuje změnu stavu. Nesprávně koordinátoři nevrací nic. [9], [2], [5]

Skenování kanálu

MAC nabízí čtyři možnosti skenování kanálu:

Energy detection scan (ED) – Slouží ke zjištění vhodného kanálu při vytváření sítě PAN koordinátorem. Ke zjištění hladiny energie na zvoleném kanále se volá služba na fyzické vrstvě PLME-ED. Toto měření je volitelné pro RFD zařízení.

Active channel scan – Aktivní skenování je schopnost RFD zařízení, které chce najít koordinátory ve svém dosahu (Personal operating space – POS). Zařízení vyšle požadavek službou MLME k vyslání beacon rámce. Kontaktovaný koordinátor vyšle beacon. V sítích typu beacon-enabled je beacon vyslán ihned, v non beacon-enabled je vyslán pomocí slotované CSMA-CA.

Passive channel scan – Zařízení, které chce najít koordinátory sítě, nevysílá požadavek na beacon, ale jen naslouchá na daném kanále, zdali nebude vyslán nějaký beacon. Lze ho tedy použít jen v síti beacon-enabled.

Orphan channel scan – Jestliže zařízení ztratí kontakt (osiří) s koordinátorem, může pomocí tohoto skenování nalézt svého koordinátora. Kontaktovaný koordinátor ověří, zdali zařízení nebylo v jeho síti, případně ho znovu připojí.

Beacon Notification

Když zařízení přijme beacon s prázdným datovým polem nebo bez žádosti, pak pomocí MLME-BEACON-NOTIFY.indication předá oznámení vyšší vrstvě. Vysílání beacon začíná při MLME-START.request z požadavku NWK vrstvy.

Synchronizace s koordinátorem

V beacon-enabled síti může zařízení požádat o synchronizaci s koordinátorem pomocí MLME-SYNC.request. Zařízení buď přijme jeden beacon, nebo odchyťává průběžně. Při odposlouchávání může synchronizované zařízení na určitou dobu vypnout přijímač a zapnout ho těsně před příchozím beacon rámcem. Pokud zařízení ztratí synchronizaci (nepodaří se mu odchyťt několik po sobě jdoucích beacon, jejichž počet závisí na *aMaxLostBeacons*), předá se MLME- SYNC-LOSS.indication na síťovou vrstvu zařízení.

Převzetí dat od koordinátora

Přenos dat je v sítích nonbeacon-enabled zajištěn pomocí tzv. polling, někdy nazývaného jako nepřímý přenos dat (Indirect transfer, viz kap 1.4 Přenos dat). Koordinátor v sobě může mít uschovaná nějaká data od jiného zařízení, kterému nebyly ještě přímo doručeny. Toto zařízení pomocí MLME-POLL.request a následného Data request příkazu se zeptá koordinátora, jestli nemá data pro něj. Čeká po dobu *macMaxFrameTotalWaitTime*. Pokud se mu dostane odpověď ACK rámcem s hodnotou flag FP=0 (frame pending), pak pro něj žádná data koordinátor nemá. Při FP=1 koordinátor pošle i datový rámcem, příjemce to oznámí MLME-POLL.confirm síťové vrstvě a data jsou indikována MCSP-DATA.indication. [5], [2], [6]

1.8 ZigBee Aliance

1.9 Síťová vrstva (NWK)

NWK je první vrstva, kterou již nspecifikuje standard IEEE 802.15.4. Tato vrstva obsahuje především funkce pro směrování a zabezpečení rámců. Rozšiřuje rozsah působení jednotlivých zařízení vyhledáváním spojových cest metodou Multihop nebo Point to point. Zakládá síť, případně se do ní připojuje a odpojuje. V ZigBee se používá především topologie sítě Mesh, kde se ke směrování využívá otevřený protokol AODV (AdHoc On-demand Distance Vector).

NWK zajišťuje tyto úlohy:

- založení nové sítě, připojení a odpojení od sítě,
- konfigurace zařízení – určí, kdo je koordinátor, směrovač, koncové zařízení,
- přiřazení adres novým zařízením,
- směrování rámců na požadované místo,

- objevování a udržování tras mezi zařízeními,
- prohledávání sousedních zařízení,
- řešení bezpečnosti komunikace.

1.9.1 Datová jednotka NWK vrstvy

Síťový rámec se skládá z dvou základních částí, z hlavičky NWK Header (NHR) a vlastního pole NWK Payload.

NHR obsahuje kontrolní, adresní a sekvenční část informací. Část NWK Payload je proměnné velikosti a obsahuje specifická data pro daný přenos.

Část NHR se skládá z 16bitového kontrolního pole Frame Control, které obsahuje informace o typu rámce (Data, Command), verzi protokolu, typu přenosu, metodě routování, zabezpečení, plných adresách zdroje a cíle. Následuje stejně dlouhé pole Destination Address, které obsahuje 16bitovou adresu podle typu přenosu, buď cílového zařízení či skupiny, nebo ID skupiny sítě pro multicast. Pole Source Address musí obsahovat zdrojovou adresu rámce. Pole Radius určuje rozsah vysílání, s každým připojeným zařízením se zmenšuje. Sequence Number určuje pořadí vysílaného rámce. Destination IEEE Address je plná 64bitová adresa cílového zařízení, pokud se nejedná o broadcast nebo multicast adresu. Následuje plná adresa zdroje, pokud existuje. Pole Multicast Control se zde vyskytuje, pokud jde o multicast vysílání (Multicast Flag=1) a dělí se na tři další pole. Multicast Mode řeší, jestli je vysílání jen pro členy skupiny, nebo i pro nečleny. Nonmember Radius určí rozsah vysílání pro nečleny cílové skupiny. Pro členy je rozsah nastaven podle dalšího pole MaxNonmemberRadius. Pole Source Route Subframe obsahuje další tři pole, pokud je Source Route 1. Relay Count, Relay Index, Relay List značí počet cílových adres. Frame Payload je proměnlivé velikosti podle typu síťového rámce a obsahuje data z vyšší vrstvy. Schéma NWK rámce je v příloze 1. [5], [57]

Základní formát rámce na úrovni síťové vrstvy - NWK Protocol Data Unit (NPDU)

Síťová vrstva rozlišuje dva typy rámců – **datový** nebo **příkazový**, viz příloha 1.

Příkazy síťové vrstvy (NWK Command)

Route request (RREQ) – požadavek na trasu, Route reply (RREP) – odpověď na trasu, Route error (network status) – chyba na trase, Leave – nechat být, Route record – uložení trasy, Rejoin request – vrácení žádosti, Rejoin response – vrácení odpovědi, Link status (ZigBee-Pro) – stav kanálu, Network report (ZigBee-Pro) – síťová zpráva, Network update (ZigBee-Pro) – síťové oživení.

Každý příkaz má odlišný obsah rámce v části NWK Payload. Rozdílné parametry jsou také v NIB. Informační báze NIB (NWK Information Base) obsahuje konfigurační parametry pro řízení síťové vrstvy. Podrobný popis lze dohledat (str. 335-365 [2]).

V rámci NWK vrstvy:

ZigBee Coordinátor dále jen ZC, ZigBee Router dále jen ZR, ZigBee End Device dále jen ZED.

1.9.2 Topologie sítě ZigBee

Standard ZigBee definuje tři typy síťové topologie:

Strom (Tree)

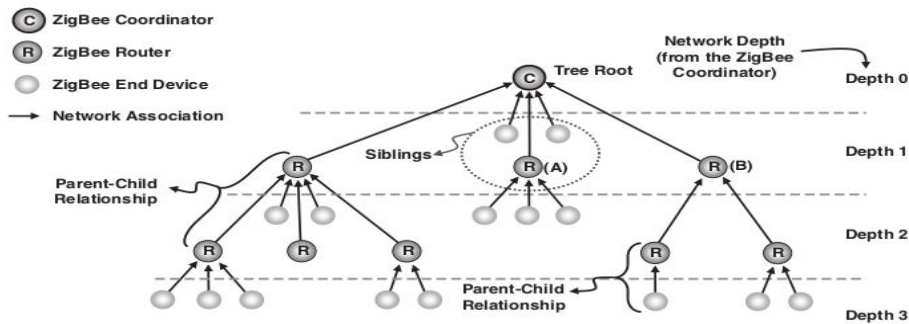
Topologie sítě strom je hierarchicky uspořádaná jako strom, začíná u kořene, který představuje ZC. Rozlišuje se zde, zda je prvek sítě rodič (Parent device), nebo dítě rodiče (Child device). ZC nebo ZR může zaštiťovat roli rodiče pro připojení dalších zařízení, ať v roli dítěte, nebo dalšího rodiče. ZED nemusí komunikovat jen přes ZC, ale mohou využít větvení přes jiného rodiče ve funkci směrovače. Zpráva pro dítě musí být však vždy vedena přes jeho rodiče. S tím je spojena hloubka sítě, termín, kterým se označuje na kolik skoků (hops) je možné z dítěte dosáhnout na kořen stromu (ZC). Sám ZC má tedy hloubku nula a jeho děti hloubku jedna atd. Hierarchické uspořádání umožňuje zvětšit rozsah sítě, ale neumožňuje vytvoření redundantních cest. V případě trvalé ztráty spojení se musí tedy reorganizovat celý strom, což zvyšuje odezvu celé sítě. ZigBee standard obsahuje mechanismus pro přidělování adres všem zařízením ve stromové struktuře, známý jako distribuované přidělování adres (distributed address allocation). Tento mechanismus však nemusí být vývojářem nakonec využit. Na obr. 14 je znázorněno schéma topologie strom, je zde vyznačen vztah rodič-dítě (Parent-Child Relationship), vztah sourozenců (Siblings) a hloubka sítě (Network Depth).

Hvězda (Star)

Základní typ uspořádání. Centrálním prvkem, který vytváří a udržuje síť, je zařízení v roli koordinátora (ZC). S ním pak přímo komunikují všechny ostatní koncové zařízení (ZED, ZR). Nevyužívají se zde alternativní cesty spojení, každý paket musí procházet přes ZC. Jedná se vlastně o první a zároveň poslední stupeň hloubky topologie strom.

Síť (Mesh)

Mesh je typ topologie kombinující vlastnosti typu strom i hvězda. Umožňuje sestavení rozsáhlých sítí s libovolným způsobem propojení. Neexistují zde hierarchické vztahy zařízení. Každé FFD zařízení může kontaktovat jiné FFD i RFD, které je v dosahu. Je zde možnost vytvořit redundantní spojení, kdy koncové zařízení nemusí být připojeno jen přes jeden směrovač, ale může k němu vést více cest. Těchto několikanásobných cest se využívá v případě výpadku daného spojení, kdy se jednoduše zvolí jiná dostupná trasa. Tato funkce se nazývá samooprava sítě (selfhealing). Samooprava sítě však vyžaduje neustálé udržování routovacích tabulek možných spojení, kudy lze správně dojít do zadaného cíle. ZC a ZR musí být neustále aktivní, aby mohly uchovávat data pro právě spící ZED. [5], [10], [12]



Obr. 14 Schéma topologie Strom (Tree) [5]

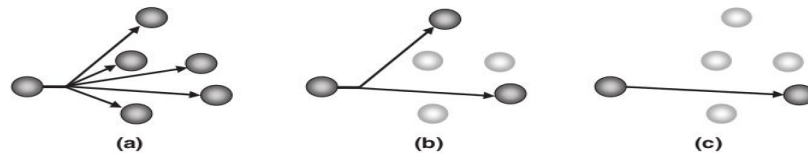
1.9.3 Způsoby vysílání v Zigbee:

ZigBee využívá tzv. multihop komunikaci, to znamená, že zprávu je možné poslat přes více zařízení. Rozsah předání je tzv. hops a je nastaven v NWK rámci jako parametr Radius.

Všesměrové vysílání (broadcast) - Zpráva je určena všem zařízením, které jsou v dosahu a naslouchají bez ohledu na jejich adresu nebo identifikátor. [10]

Vysílání v rámci skupiny (multicast / groupcast) – Zpráva pro určitou definovanou skupinu příjemců.

Bod-bod (unicast) – Zpráva je určena pro konkrétní zařízení na základě síťové nebo MAC adresy. Jedná se o základní způsob komunikace.

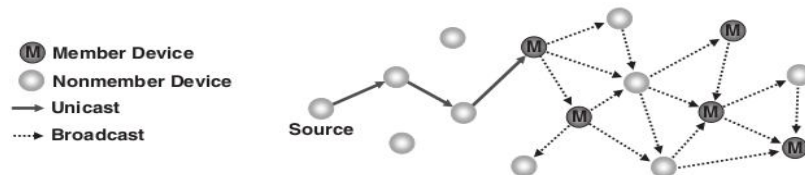


Obr. 15 a) Broadcast, b) multicast c) unicast [5]

Broadcast

Všesměrovým vysíláním (broadcasting) se v sítích dle IEEE 802.15.4 rozumí typ vysílání, kdy je zpráva určena všem zařízením, které jsou v dosahu a naslouchají bez ohledu na jejich adresu nebo identifikátor. V ZigBee je možné odesílat data pouze v rámci jedné konkrétní sítě. Cílová adresa bude mít vždy hodnotu aktuální PAN-ID. Broadcast cílovou adresou se rozumí adresa v krátkém tvaru 0xFFFF. Zařízení, které přijme broadcast rámeček, nejprve zkontroluje, jestli není ono samé myšleným příjemcem, případně rámeček přepošle dál. ZED nemohou rámeček přeposlat. V ZigBee je možné definovat broadcast adresy pro všechny zařízení 0xFFFF, pro všechny aktivní zařízení 0xFFFFD, pro ZC, ZR 0xFFFFC. V rozsáhlejších sítích by bylo neefektivní požadovat po příjmu potvrzovací rámeček, proto se při broadcast vysílání nepoužívá ACK. Místo toho se používá tzv. pasivní potvrzení. ZigBee zařízení, které odeslalo broadcast rámeček se ihned po odeslání přepne do režimu příjemce a čeká, dokud neobdrží od sousedních ZC nebo ZR stejný rámeček. Přeposlaný broadcast značí, že sousední zařízení předává rámeček správně dál. ZR a ZC si udržují záznam o všech všesměrových zprávách v tabulce BTT (broadcast transaction table). Jeden

záznam se nazývá BTR (broadcast transaction record), obsahuje číslo sekvence, adresu odesílatele a dobu platnosti (*nwkNetworkBroadcastDeliveryTime*). Příchozí broadcast se zapíše do BTT a pokud je již zapsán, zahodí se. Pokud se nepotvrdí pasivní potvrzení v době platnosti BTR, může být rámeček odeslán znovu (*nwkMaxBroadcastRetries*). Paměť ZC je značně omezená, proto se využívá náhodně dlouhé zpoždění odeslání tzv. Broadcast jitter, to aby nedocházelo k současnému příjmu více broadcast rámečků z třetí strany (problém nazývaný jako Skrytý uzel). Maximální doba zpoždění je udaná hodnotou *nwkMaxBroadcastJitter* v NWK PIB. [5], [12]



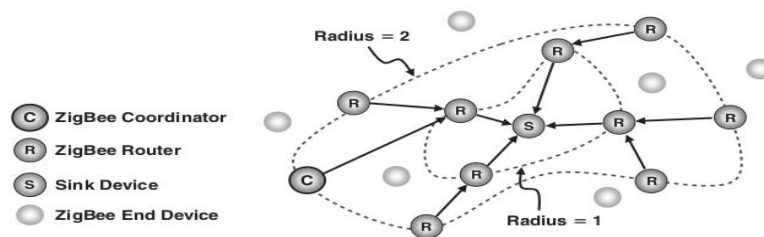
Obr. 16 Multicast vysílání [5]

Multicast

V multicast vysílání je zpráva doručena konkrétní skupině zařízení v rámci sítě. Každá skupina je identifikována 16bitovým multicast ID. Zařízení v jedné skupině se považuje za člena skupiny (Group members), ale může patřit i více skupinám. Každé zařízení si udržuje tabulku společných členů skupiny (*nwkGroupIDTable*). Zařízení nemusí být členem skupiny, aby přes něj mohlo být dosaženo na zařízení, které je ve skupině. Existují dvě metody multicastingu: pro skupiny ve skupině (Member mode) a mimo ni (Nonmember mode). Zařízení ve skupině jednoduše pošle zprávu všem svým kolegům pomocí broadcast adresy se specifikací GroupID. Pokud je vysíláno z nečlenského zařízení, pak toto zařízení nejprve musí zjistit (průzkumem sítě) jak dostat zprávu k zařízení, které už ve skupině je. Viz obr. 16. Mezi předávajícími zařízeními se zpráva přenáší nejprve metodou unicast. Nečlenské zařízení pozná, že zpráva není pro něj. Dále pozná i to, že přišla také od nečlena skupiny, podle parametrů z pole Multicast metod v datovém rámci NWK vrstvy. Příchozí zpráva do členského zařízení změní režim vysílání z unicast na multicast. Ve vysílání multicast se nepoužívá žádné potvrzení, ani pasivní. Zařízení jen před odesláním vyčká náhodnou dobu (*nwkMaxBroadcastJitter*) a poté zprávu odešle. Díky směrovacím BTT tabulkám členské zařízení pozná, že mu přišla stejná zpráva, jakou sám odeslal, tu pak již nepreposílá. Vysíláním multicast může být znovu kontaktováno i nečlenské zařízení, přičemž lze nastavit počet průchodů přes nečlenské zařízení (Nonmember Radius). V ZigBee se multicast používá standardně jen pro přenos datových rámečků, ne příkazových.

Komunikace Many-to-One

V ZigBee sítích je možné mít zařízení, které přijímá zprávy z více zařízení v rámci jedné sítě. Toto zařízení k sobě vytvoří cesty ze všech dostupných ZC a ZR v rámci dosahu nastaveného jako Radius. Tomuto zařízení se říká Sink Device. Viz obr. 17. [5], [9], [10]



Obr. 17 Komunikace Many-to-One [5]

1.9.4 Routování (Routing)

Routováním se rozumí proces výběru, udržování a objevení cesty, kterou bude dosaženo cílového zařízení. Routování má na starosti ZC a ZR. Pro zvolení optimální trasy se poměřují parametry možných variant cest, jako jsou např. délka cesty (počet skoků), kvalita signálu (měření LQI), cena spojení (link cost – vyjadřuje poměr mezi kvalitou a délkou spoje). Existuje několik vzorců pro výpočet ceny spoje. [2] Cena spoje (hodnota výpočtu) má být pro nejvyšší pravděpodobnost správného doručení co nejnižší. Celková cena cesty je suma všech spojení na dané trase. Konkrétní metodu volby optimální trasy určí typ použitého směrovacího protokolu. ZC i ZR vytváří a udržují tzv. routovací tabulky. Tabulky mohou být základní (Routing table), které obsahují údaje (cíl, metoda přenosu, následující skok) pro doručení zprávy na konkrétní trase. Tabulky pro průzkum trasy (Route discovery table) obsahují informace vhodné při vytváření nové trasy, tato tabulka je časově omezená parametrem *nwkcRouteDiscoveryTime*. Tabulky sousedů (Neighbour table) obsahují informace o okolních uzlech v dosahu, aktualizované s každým příchozím paketem. Díky nim je možné v případě nedostupnosti jedné trasy přejít na trasu náhradní, nebo nalézt vhodného rodiče pro připojení jiné části sítě. Parametry jednotlivých tabulek je možné dohledat ve specifikaci ZigBee. [2], [5], [12]

Průzkum sítě (Route Discovery)

Aplikační vrstva může požádat vrstvu síťovou pomocí primitivy NLME-ROUTE-DISCOVERY.request, aby vytvořila trasu pro vysílání do cílového zařízení. Lze požádat o průzkum sítě pro unicast, multicast a many-to-one vysílání. Pro unicast je v požadavku zadána konkrétní adresa cílové stanice, pro multicast ID skupiny. Pokud není zadán žádný požadavek, je tím myšleno najít uzel, do kterého vedou všechny cesty. Pro broadcast vysílání nelze předem naplánovat cestu, protože nelze znát všechny cíle najednou. Pouze ZC a ZR mohou provést průzkum sítě. Naplánování optimální cesty metodou unicast ke konkrétnímu zařízení (např. z A do Z, kde Z je známá adresa) probíhá zjednodušeně následovně: zařízení A začne vysílat metodou broadcast příkazový rámec s žádostí o průzkum sítě. Tento rámec obsahuje adresu cílové stanice, identifikátor žádosti a pole pro cenu cesty. Zařízení mezi rozesláním broadcastu čekají na pasivní potvrzení odeslání svého požadavku. Všechny zařízení, mimo ZED, které poslouchaly na daném kanále a obdržely žádost na průzkum sítě, navýší hodnotu ceny cesty pro daný spoj a zapíší do routovací tabulky hodnotu ceny daného spoje. S každým rozšířením do nové cesty se také mění identifikátor požadavku. Pokud do jednoho zařízení směřuje víc cest, zařízení

postupně přepisuje hodnotu v routovací tabulce na nejnižší variantu ceny pro daný spoj. Zařízení přeposílají rámec s požadavkem, dokud nedorazí do požadovaného zařízení. Cílové zařízení musí poté vyhodnotit celkovou cenu dané trasy a vrátit požadavek zpět do prvního zařízení. Po cestě zpět se může vydat buď stejnou cestou (symetrické směřování), nebo volí vlastní cestu (nesymetrické směřování). Cesta do cíle se nazývá forward route a cesta zpět backward route. [2], [5], [10]

Zdrojové routování (Source routing)

Síťová vrstva v ZigBee umožňuje po průzkumu sítě uchovávat vrácené údaje o nalezených cestách v cache paměti jednotlivých zařízení. Při příštím vyslání tak rámec dostane do cílové adresy přidělený seznam uzlů, které má projít. List spojení má určitý index, který se automaticky inkrementuje po projití daným uzlem. Zařízení používá tuto tabulku místo svých routovacích tabulek.

Oprava a udržování spojení (Route Maintenance and Repair)

Pokud dojde po objevení trasy k její neprůchodnosti, ať změnou konfigurace sítě, nebo např. vlivem okolí, je nutné se pokusit trasu obnovit. Není dobré opravu začít provádět ihned po prvním nezdaru. Je dobré vyčkat na přesáhnutí čítače chyb *nwkcRepairThreshold*, případně zaznamenávat čas úspěšných a neúspěšných přenosů, tím se rozliší trvalá chyba od náhodné.

Oprava trasy v topologii sítě Mesh probíhá následovně: zpráva je přenesena do posledního spolehlivého spoje, odkud se toto zařízení pokusí objevit jinou spolehlivou trasu do cíle metodou objevování sítě. Nová trasa může sdílet původní spoje po opravení chybového místa. Pozměnění původní zápis v routovacích tabulkách na hodnoty opravené trasy. Pokud nastane chyba v komunikaci many-to-one, je oprava snazší. Zařízení, které nedokáže doručit zprávu na obvyklé trase, ji předá náhodnému sousedovi. Ten by měl mít ve svých routovacích tabulkách jak do cílového zařízení zprávu doručit. Jestliže se po opravě sítě stále nedaří zprávu doručit, je nutné začít s vytvořením nové cesty od zdrojového zařízení.[5], [2], [13]

1.9.5 Služby síťové vrstvy (NWK Services)

- Datové služby síťové vrstvy (NWK Layer Data Entity - NLDE)
- Řídící síťové vrstvy (NWK Layer Management Entity - NLME)

Síťové služby jsou dostupné prostřednictvím přístupových bodů (SAP):

- NLDE-SAP (NWK Layer Data Entity service access point)
- NLME-SAP (NWK Layer Management Entity service access point)

Datové služby síťové vrstvy využívá aplikační podvrstva APS (Application Support Sublayer) stejným mechanismem volání pomocí datových primitiv, jako na linkové vrstvě. Řídící služby NLME-SAP využívá ZDO vrstva.

Datové služby síťové vrstvy poskytují tři primitiva:

NLDE-DATA.request, NLDE-DATA.confirm, NLDE-DATA.indication

Řídící služby síťové vrstvy NLME (NWK Layer Management Entity):

Nastavení NIB parametrů NWK. Pomocí NLME-GET/SET se nastaví NIB atributy síťové vrstvy.

Průzkum sítě (Network Discovery)

Pomocí NLME-Network-Discovery volá APS proceduru ke zjištění dostupných sítí v blízkosti zkoumaného zařízení. Primárně se použije aktivní skenování sítě na úrovni linkové vrstvy (NLME-ED-SCAN). Pokud zařízení není schopné aktivního skenování, použije pasivní. Výsledkem skenování vznikne seznam dostupných sítí, obsahující PAN ID, vysílací kanál sítě a verzi ZigBee protokolou. Mohu zde být informace o beacon rámci a nastavení super-rámce.

Založení sítě (Network Formation)

Po průzkumu dostupných sítí může FFD v režimu ZC založit síť na žádost z APS prostřednictvím NLME-Network-Formation. ZC vybere kanál s nejnižším počtem již existujících sítí a zvolí unikátní PAN ID. ZC dostane krátkou MAC adresu 0x0000 a nakonfiguruje super-rámec pomocí služeb MAC vrstvy.

Zřízení ze zařízení ZigBee router (Start Router)

ZR může generovat super-rámec a obsluhovat žádosti jiných zařízení o připojení do sítě. Žádost na stanovení zařízení routrem přichází z APL na NWK prostřednictvím NLME-START-ROUTER.request.

Spojení a odloučení ze sítě (Joining and Leaving a Network)

Požadavkem NLME-Permit-Joining.request lze změnit nastavení *macAssociationPermit*, které říká jestli ZC a ZR může přijímat požadavky na přijetí do sítě. Zařízení se stává dítětem rodiče, ke kterému se chce připojit. Dítě si může průzkumem sítě vybrat nejvhodnější uzel sítě. Poté požádá o připojení primitivou MLME-ASSOCIATE.request. Připojení může být přímé (NLME-Direct-Join) pokud nadřazený rodič už předem obsahuje 64bitovou adresu nadřazenou těmto dětem. Dítě se pak rovnou připojí k tomuto rodiči bez průzkumu sítě, využije jen volání sirotka (MLME-Orphan). Odpojit sám sebe nebo ZED ze sítě může ZC i ZR pomocí NLME-LEAVE.request. Odpojením zařízení ze sítě se odpojí také všechny jeho děti. Pokud se odpojí ZR, musí do sítě vyslat broadcast informaci o tomto činu, aby si ostatní zařízení aktualizovala své routovací tabulky.

Resetování sítě

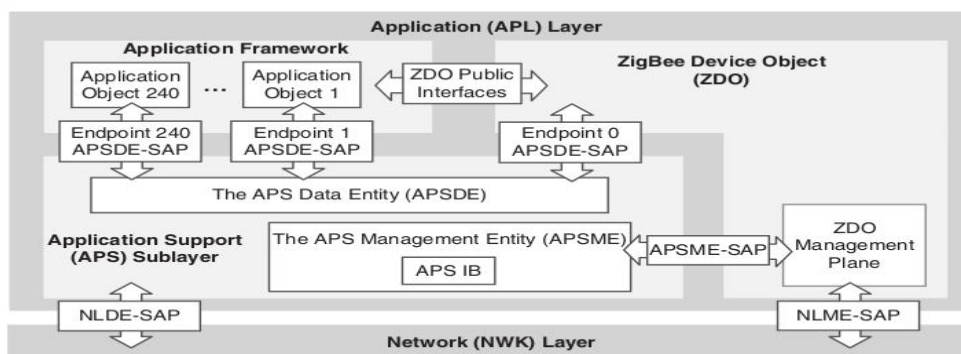
NWK vrstva může požádat NLME-RESET.request o resetování všech nastavení na MAC vrstvě, tak dojde k vymazání všech NIB parametrů, routovacích tabulek a tabulek průzkumu sítě. Reset sítě se provede před připojením nového a po odpojení zařízení ze sítě.

Synchronizace sítě

Pomocí NLME-SYNC lze synchronizovat nebo získat čekající data ze ZC a ZR. Existují dvě varianty synchronizace sítě, s pomocí beacon a bez beacon rámců. [5], [2], [13]

1.10 Aplikační vrstva (Application Layer - APL)

Aplikační vrstva je nejvyšší úrovní ZigBee protokolu. Skládá se ze tří částí, z aplikačního rámce (Application framework) obsahující aplikační objekty (AO), objektů ZigBee zařízení (ZigBee Device Objects – ZDO) a podpůrné aplikační podvrstvy (Application support sublayer – APS). AO jsou voleny výrobcem zařízení.



Obr. 18 Struktura Aplikační vrstvy [5]

1.10.1 Aplikační podvrstva (APS)

APS je rozhraním mezi vrstvou NWK a APL. Poskytuje datové i řídicí služby. Datové služby poskytuje pro AO a ZDO pomocí APSDE (APS sublayer Data Entity) prostřednictvím přístupových bodů APSDE-SAP (APSDE Service Access Point). Řídicí služby APS podvrstvy APSME (APS Management Entity) jsou poskytovány pro ZDO prostřednictvím APSME-SAP. Řídicí parametry jsou definovány v AIB (APS Information Base). [2] APSME na žádost pomocí primitiv APSME-BIND.request a APSME-UNBIND.request mají za úkol spojovat či rozpojovat binding tabulky propojených zařízení. Pomocí APSME-GET.request, APSME-SET.request mohou číst a zapisovat parametry z AIB. Prostřednictvím Group management primitiv mohou přidávat a odebírat koncové body zařízení ze skupinového vysílání. APSDE přebírá data z AO a ZDO zapouzdřené v PDU (Protocol Data Unit). Před předáním síťové vrstvě přidá vlastní hlavičku k PDU, z čehož vznikne celkový rámec (APS data frame). APS rámec může být: datový, příkazový a potvrzovací, viz příloha 1, kde je i znázorněna struktura základního rámce na úrovni APL vrstvy. [2], [5], [13]

APS zajišťuje tyto úkoly:

- udržovat závazné tabulky,
- předávání zpráv mezi vázanými zařízeními,
- správa skupinových adres,

- 64bitová IEEE adresa na 16bitovou síťovou adresou a naopak,
- podpora spolehlivého přenosu dat.

Aplikační podvrstva APS umožňuje čtvrtý druh komunikace pro zařízení, která nejsou jinak schopna odesílat svá data. Stačí, aby zařízení bylo s ZC spojeno v tabulce spojů (Binding table) a poté už jen pošle data do ZC a on vyhledá konkrétní propojené zařízení. Tato metoda se nazývá jako nepřímé adresování (Indirect Addressing). Struktura aplikačního rámce je složena z pole nastavení (Frame Control), které určuje, o jaký typ rámce se jedná, jakou metodou má být vyslán, jaké bude zabezpečení rámce a zda je potřeba vracet ACK potvrzení. V případě nepřímého adresování je zde navíc uvedeno, kterým směrem je rámeček posílán. Dále je v rámci obsaženo pole cílové, případně skupinové adresy, pole s volbou profilu přenosu, zdrojový koncový bod zařízení, čítač vyslaných rámců a nakonec pole příkazů (APS payload).

Binding

Binding slouží ke spojování specificky podobných zařízení, které si mezi sebou mohou bezprostředně vyměňovat data pomocí nepřímého adresování. Bind tabulka obsahuje zdrojovou a cílovou adresu Endpoint, MAC adresu zařízení a přiřazené ID clusteru. [13]

1.10.2 Aplikační framework (Application Framework)

Aplikační framework je prostředí, ve kterém jsou aplikační objekty třetích stran, které spravují nižší vrstvy protokolu ZigBee. V jednom zařízení může být až 240 různých aplikačních objektů. Každý AO obsahuje jedinečnou cílovou adresu (Endpoint) neboli koncový bod 1 až 240. Endpoint 0 je určen pro ZDO a endpoint 255 pro vysílání všem aktivním AO pomocí broadcast. Pomocí koncových bodů lze ovládat více zařízení na stejném kanále.

Ve snaze co nejvíce zjednodušit a sjednotit vývoj aplikací jsou navrženy různé aplikační profily (Application Profile, zkráceně ZigBee profile) pro konkrétní oblast použití. Každý profil má unikátní 16bitový identifikátor (Profile ID), profil má sjednocené příkazy a nastavené parametry. Jednotlivé profily vydává a nové posuzuje pouze ZigBee Alliance. Profil se skládá ze dvou hlavních částí, z tzv. clusters a device descriptions. Cluster je skupina vybraných atributů (Attribute). Každý cluster má 16bitový identifikátor (Cluster identifier), každý atribut má také svůj 16bitový identifikátor (Attribute identifier). Aplikační profil neobsahuje clustery jako takové, ale jen seznam ID clusterů. U každého clusteru se navíc rozlišuje směr jeho použití na vstupní a výstupní (input/output cluster). Jednotlivé příkazy (Command) v rámci clusteru mají 8bitový identifikátor (Command ID).

Existují ZigBee profily veřejné a privátní. Veřejné (Public profiles) jsou volně dostupné prostřednictvím ZigBee Alliance. [1]

Industrial Plant Monitoring (IPM), Wireless Sensor Applications (WSA), Smart Energy (SE), Home Automation (HA), Commercial Building Automation (CBA), Telecom

Applications (TA), Personal Home & Hospital Care (PHHC), Advanced Metering Initiative (AMI), ZigBee RF4CE - Remote Control. [6]

Profily v současné době ve vývoji: ZigBee Smart Energy 2.0, ZigBee Building Automation, ZigBee Retail Services, ZigBee Light Link.

Privátní neveřejné profily (Manufacturer specific profiles) jsou psány vývojáři aplikací k cíleně neveřejnému použití.

Druhá část profilu je popis zařízení (device descriptions), který obsahuje popis vlastností konkrétního zařízení. Jednotlivé popisky zařízení jsou vhodné pro prvotní nastavení sítě, kdy se díky nim mohou zařízení funkčně spárovat.

Data deskriptor slouží k popisu zařízení. Rozlišuje se pět druhů deskriptorů: node descriptor, node power descriptor, simple descriptor, complex descriptor, and user descriptor. Node descriptor představuje typ zařízení (ZC, ZR, ZED) a výrobní nastavení jako je frekvenční pásmo a jiné fyzické vlastnosti. Node power descriptor značí, zda je zařízení na baterie a její stav. Simple descriptor poskytuje hodnotu ID profilu a cluster ID, device ID, Endpoint ID v jedné tabulce. Samotný deskriptor neobsahuje žádné data, pouze odkazy na konkrétní ID. Complex descriptor je volitelný, obsahuje např. sériové číslo a název zařízení. User descriptor může obsahovat další libovolná uživatelská označení dlouhá až 16 ASCII znaků. Descriptor má také svůj 16bitový identifikátor. Správu a výměnu deskriptorů má na starosti ZDO. [5], [13]

1.10.3 ZigBee Device Objects (ZDO)

Zigbee Device Profile (ZDP)

ZDO vytváří rozhraní mezi NWK, APS a AO na vrstvě aplikační framework. ZDO má cílový endpoint nastaven 0. Stejně jako existují profily pro aplikační objekty (ZigBee Profile), tak pro ZDO jsou profily ZigBee Device Profile (zkráceně Device Profile - ZDP). Rozdíl je v tom, že ZDP jsou navrženy pro všechny zařízení ZigBee, nejen pro konkrétní aplikace jako je to v případě profilů AO. ZDP má jen jeden deskriptor, cluster může obsahovat povinné i nepovinné. ZDP provádí své služby pomocí příkazů (Command ZDP) prostřednictvím datových služeb APS podvrstvy.

ZDP může být nastaven jako klient nebo server zařízení. Klientské zařízení je to, které požaduje zjištění informací o dalším zařízení. Serverové poskytuje informace. Služby poskytované ZDO lze tedy rozdělit na klientské (client services) a serverové (server services). Příkazy mohou být z kategorie Device discovery a Service Discovery, Bind management, Network management, Power management. ZDP příkazy lze dohledat ve specifikaci ZigBee. [2]

Device discovery - Pomocí Device discovery mohou jednotlivá zařízení určit identitu ostatních zařízení v síti.

Service Discovery - Touto službou zařízení požaduje, aby cílové zařízení poskytlo podrobné informace o jeho ID profilu či popisu zařízení. Zařízení může také požádat o informace jiného zařízení, o kterém má informace volané zařízení v binding tabulce.

Network management - Do této kategorie služeb patří správa a údržba sítě jako taková, např. nastavení vysílacího výkonu, start, reset a odchod ze sítě, povolení připojení nových zařízení atp.

Bind management - Služby pro řízení a správu spojovacích tabulek.

Power management - Tato kategorie služeb spravuje napájení a správu úspory energie.

1.10.4 Zabezpečení

O bezdrátových sítích je všeobecně známé, že může dojít k odposlechu vysílání a tím k narušení bezpečnosti celého systému. V Zigbee se hledí na dva bezpečnostní aspekty. Prvním je důvěrnost spojení, která je zajištěna šifrováním. Druhým je autenticita přijatých dat a kontrola obsahu. ZigBee standard využívá šifrovací metodu Advanced Encryption Standard (AES), při které dochází ke kompletnímu zašifrování zprávy na straně odesilatele a opětovnému dešifrování na straně příjemce pomocí 128bitového symetrického klíče. Nezašifrovaná data se nazývají plaintext, průchodem šifrovací metodou AES se stávají tzv. ciphertext. Při šifrování se musejí také současně vytvářet klíče k zpětnému dešifrování. Existuje několik metod jak klíče vytvářet a následně šířit mezi komunikující jednotky. [2] Vedle metod šifrování stojí druhá bezpečnostní metoda, která řeší autentičnost doručené zprávy pomocí připojené MIC (Message Integrity Code) do síťového rámce. Příjemce je pak schopný rozeznat, zdali zpráva byla doručena v originální podobě. Kontroluje se zde pořadí vysílaného rámce a jeho struktura pomocí ověřovacích (autorizačních) klíčů. Rámec obsahuje pole s čítačem zabezpečení (Frame Count, Key Sequence Count). S tím je spojena i ochrana proti přehraní rámce jiným. Existuje zde řada metod jak zabezpečit integritu dat a přidělování autorizačních klíčů. Koordinátor sítě zpravidla také spravuje jakousi databázi ověřených zařízení (APS Information Base - *apsTrustCenterAddress*).

V ZigBee sítích je možné samozřejmě komunikovat i nezabezpečenou cestou. Existuje několik úrovní celkového zabezpečení dat. Data mohou být nezabezpečená, šifrovaná, ověřená, šifrovaná i ověřená. Bezpečnost přenášeného rámce je řešena na úrovni síťové i aplikační vrstvy prostřednictvím SSP (Security Services Provider). [2]

Rozlišuje se pět různých klíčů pro bezdrátovou komunikaci v ZigBee.

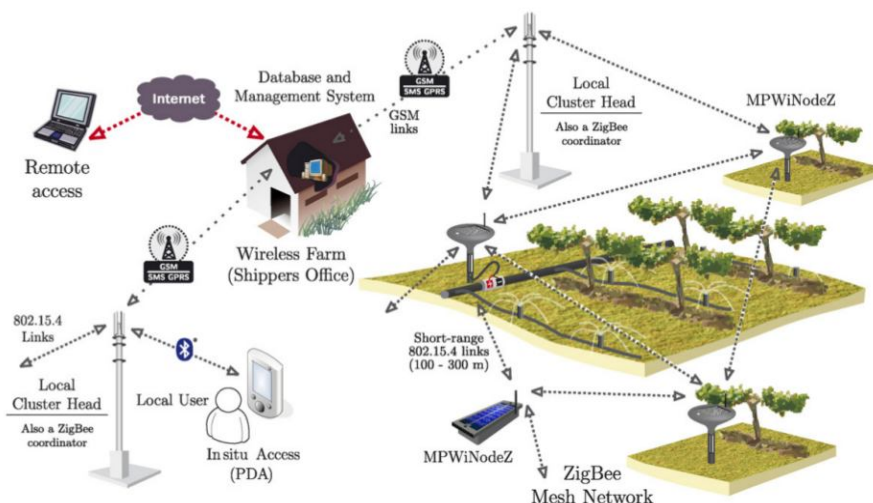
Spojový klíč je sdílen pouze mezi dvěma komunikujícími zařízeními a je použit při vysílací metodě unicast. Síťový klíč je sdílen všemi zařízeními v síti. Generuje a šíří ho koordinátor pro každé spojení metodou broadcast. Hlavní klíč zajišťuje správné předání spojových klíčů, je předem uložen v každém uzlu sítě. Transportní klíč zajišťuje správný přenos ostatních klíčů při žádosti o sdílení těchto klíčů. Poslední typ klíče je pro bezpečnost přenosu hlavních klíčů. [5], [14], [15]

2. Řešení senzorových sítí na bázi ZigBee

Bezdrátová senzorová síť (wireless sensor network - WSN) je tvořena skupinou malých vzájemně komunikujících zařízení rozmístěných v určitém fyzickém prostoru. Požadavkem je monitorování, nebo řízení dat vyhodnocených na bezdrátových senzorech.

Počáteční vývoj WSN byl motivován potřebami vojenských aplikací, kde bylo hlavní prioritou sledování fyzikálních veličin v jednotlivých místech rozlehlého bojiště. Vedle vojenského využití tato technologie brzy našla uplatnění i v civilním sektoru. Kromě environmentálně zaměřených aplikací se WSN používá také ve spojení s akčními členy pro sledování a ovládání pomalu se měnících veličin. Např. v automatizaci budov, výrobních procesech, zemědělství, dopravě, ale třeba i v biomedicínských a herních aplikacích. [10]

Aplikační oblast pro využití bezdrátových senzorických sítí je dnes velice široká. WSN lze využít všude tam, kde je potřeba monitorovat, řídit a klasifikovat objekty, fyzikální veličiny a děje. Zároveň tam, kde není možné instalovat rozvod sítě jinou technologií. Schéma možného využití WSN je na obr. 19.



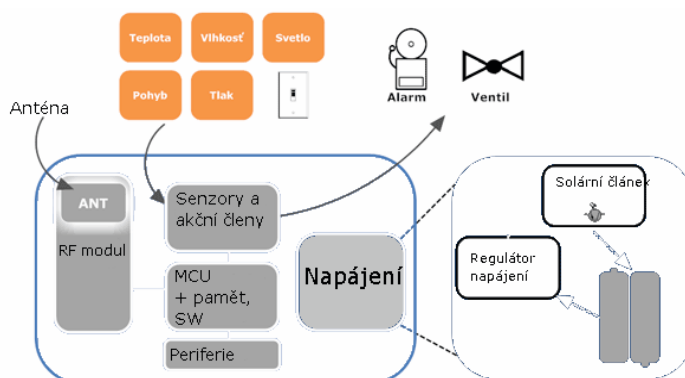
Obr. 19 Schéma WSN precizních vinic [17]

Aplikace WSN mohou být rozděleny z pohledu vojenského a civilního použití. Civilní aplikace lze dále dělit dle sektoru využití na monitoring životního prostředí, detekci katastrof, vědecké aplikace, zdravotnictví, zemědělství, stavitelství, průmysl a na řadu dalších.

Bezdrátové senzorové sítě jsou poskládány z tzv. senzorových polí, které obsahují rozprostřené senzorové uzly. Bezdrátovou senzorovou síť tvoří tzv. uzly (node, mote). Uzel se obecně skládá ze senzorové části, výpočetní části, napájení a rádiového modulu.

Obvyklé části jednoho zařízení ve WSN:

- výpočetní blok - Mikrokontrolér, paměť, vstupní/výstupní porty, A/D převodník,
- anténa a RF transceiver - vysílací části (transmitter) a přijímací části (receiver),
- napájecí blok - zdroj energie, regulátor napětí, akumulátory (Ni-Mh, Ni-Cd, Li-Ion, Li-Pol), alternativní zdroje,
- senzory - integrované obvody s digitálním výstupem snímající fyzikální veličiny,
- akční členy – zapnuto/vypnuto, pomocná nastavení,
- periferie - doplňkové konektory a obvody.



Obr. 20 Schéma uzlu WSN [10]

WSN lze také chápat jako spojení tří hlavních složek sítě, uzlů, bran a software. Obecně bývají prvky WSN jednoduchá, malá a levná zařízení s velmi nízkou spotřebou. Pokud je to možné, zařízení se po provedení úlohy okamžitě přepne do režimu spánku, proto musí být navržena tak, aby měla v tomto režimu co možná nejnižší energetickou spotřebu. Bezdrátovou komunikaci založenou na ZigBee lze do senzoru WSN začlenit pomocí integrovaných ZigBee transceiverů s přenecháním realizace aplikační části sítě na CPU nebo MCU jiného zařízení. Druhou možností je využít kompletních obvodů tzv. SoC (System on Chip - SoC) již obsahujících v jedné součástce jak transceiver, tak MCU s IEEE 802.15.4 MAC a ZigBee stack zajišťující kompletní softwarovou realizaci sítě. Požadavky na prvky WSN jsou: nízká spotřeba a dlouhá výdrž baterie, nízká cena, malé rozměry, robustnost a odolnost vůči chybám, velký počet prvků v síti, samoorganizace (selforganization) a samopravy sítě (selfhealing), zabezpečený přenos, snadná instalace, konfigurace a obsluha sítě, činnost v bezlicenčním pásmu. [10], [18]

Naměřená data z jednotlivých senzorů či celých sensorových polí jsou směrována do základních stanic, kde jsou vyhodnocena, případně přeposílána do centrálních stanic. Data mohou být archivována a sloužit jako znalostní databáze pro konkrétní aplikace. Pro možnost online sledování konkrétních hodnot z jednotlivých WSN je žádoucí data dále distribuovat do sítě internet prostřednictvím přepojovací brány (Gateway). Přemostěním sítě ZigBee do sítě internet se zabývá např. Trchalík [19] a také dokument ZigBee Gateway [20].

2.1 Lokalizace uzlu WSN

Při nasazení WSN v zemědělství je také často nutná znalost vyhodnocení vzdálenosti a polohy jednotlivých uzlů. V sensorových sítích rozlišujeme dva typy měřících metod. Metody založené na fyzikálních principech, kdy měření souvisí přímo s fyzickou polohou uzlu v síti a daným hardware. Metody, které vzdálenost vyhodnocují pouze pomocí informací ze sítě, není potřeba rozšiřující hardware. Lokalizační metody uzlu ve WSN ve své práci popisuje XU [21], kde autor podrobněji představuje jednotlivé metody.

Fyzikální metody (Range/angle-Based – RB)

- síla signálu (Signal Strength) - přepočítání síly přijímaného signálu (Received Signal Strength Indication - RSSI)
- úhel příjmu (Angle of Arrival – AOA) - znalost natočení směrové antény
- čas příjmu (Time of Arrival – TOA) - doba šíření signálu lineárně závislá na vzdálenosti, nutná časová synchronizace zařízení
- čas přeposlání (Time Difference Of Arrival – TDOA) - doba navracení zpět odesílateli
- rádiová interferometrie (Radio Interferometry - RI) - fázový posun kmitočtu oproti známé frekvenci
- ostatní metody – alternativní metody měření

Metody založené na informacích sítě (Range-Free - RF)

- konektivita (Connectivity) - poloha vztažená k dosahu sousedních uzlů
- počet skoků (Hop-Counting) - počet předání zprávy po cestě k cíli [21]

2.1.1 Lokalizační algoritmy

Ke znalostem polohy a vzdálenosti uzlů sítě mezi sebou pomocí výše zmíněných metod měření je také často nutné určit polohu vzhledem k okolnímu světu. Lokalizační techniky pro určení této polohy lze rozdělit na algoritmy s kotevními uzly (Anchor-Based Localization - ABL) a bez kotevních uzlů (Anchor-Free Localization – AFL). V síti s ABL je poloha uzlu přepočítána dle vzdáleností ke třem (případně čtyřem) referenčním kotevním uzlům se známou pozicí, např. GPS. Bez kotevních uzlů (AFL) je pozice pouze relativní vůči ostatním uzlům v síti. Jsou známé tyto algoritmy Centroid, Cricket, AHLoS, RADAR, APIT, Gradient, APS, DV-hop, P-Grid, MDS-MAP, MDS-MAP(P). [21], [22]

3. Popis známých využití ZigBee v zemědělské výrobě

Bezdrátové senzorové sítě postupně nacházejí uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Našly využití také v oblasti zemědělství, kde právě nabývají na svém významu. Technologie ZigBee pro WSN v zemědělství je sice stále ještě v jakési rané fázi využívání, ale četnost nasazení se postupně rozšiřuje společně s rozvojem precizního zemědělství. Systémy precizního zemědělství jsou založené na detailním monitorování hodnot a informací, které jsou nezbytně nutné pro cílené rozhodování, plánování a evidování agrotechnických postupů i operací. WSN musí umožňovat neustálé získávání aktuálních dat z mnoha zdrojů integrovaných do jednoho systému. Na WSN pro potřeby použití v zemědělství a agropotravinářství jsou kladeny specifické požadavky, které lze rozdělit do několika kategorií, kde každá kategorie zaštiťuje a specifikuje širokou oblast působení v daném sektoru zemědělství. Jednotlivé kategorie se vzájemně doplňují a často jsou mezi sebou propojeny.

WSN pro potřeby v zemědělství

- Environmentální sledování (monitorování životního prostředí, sledování počasí, meteorologických jevů, vegetace, změny prostředí, ekologie).
- Precizní zemědělství (sběr prostorových dat, přesné zavlažování, aplikace hnojiv a řízení sadby, služby pro přenos informací z terénu, vinařství, mapování krajiny).
- Řízení strojů a technologických procesů (navádění a správa mechanizace, „vehicle-to-vehicle“, management a sledování strojní techniky, ovládání robotických systémů a technologických procesů).
- Automatizace řízení a správy budov (ovládání a řízení skleníků, správa a řízení krmení zvířat, monitorování prostředí zvířecích staveb).
- Sledování majetku (identifikace a stav zdravotního stavu zvířat, balení, doprava a inspekce potravin).

Řada činností z výše popsaných kategorií není realizována jen pomocí ZigBee. Přenosy dat jsou zde často založeny na rozšířené GSM-GPRS/3G, Bluetooth či stále častěji WiFi technologii. Právě pro agrotechnické operace je specifické skloubení WSN se znalostí monitorování geografických informačních systémů (GIS). S těmito aplikacemi je často spojena technologie získávání přesné polohy strojních či jiných zařízení pomocí globálního pozičního systému (GPS). [23], [24], [25]

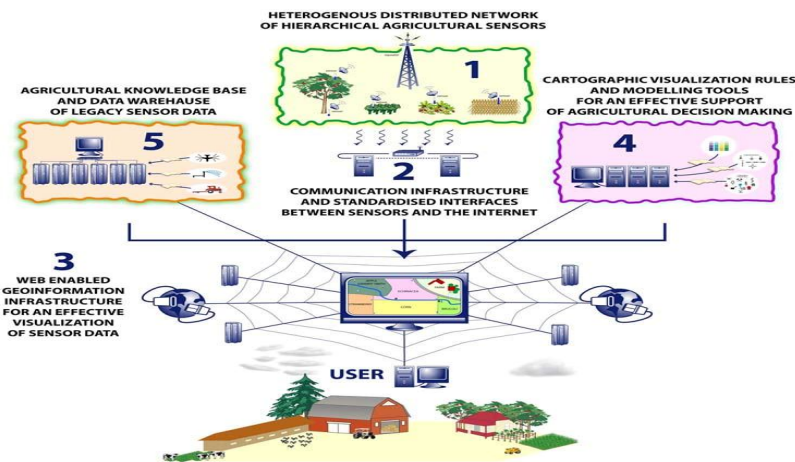
3.1 Precizní zemědělství

Lokálně specifické hospodaření neboli precizní zemědělství je metoda hospodaření využívající moderní technologie pro přizpůsobení pěstebních zásahů aktuálním podmínkám konkrétního místa na pozemku s ohledem na prostorovou a časovou variabilitu sledování vybraných parametrů. Přesné zemědělství představuje klíčový obor pro zavedení

WSN. Zemědělcům může poskytnout cenné znalosti v oblasti poznávání různorodých zemědělských prostředí a vazeb na zvýšení účinnosti agrotechnických operací. Pro získávání údajů o pozemku jsou nejčastěji používány odběry vzorků půd, rostlin, mapování pomocí senzorů nebo metody leteckého a satelitního snímkování. Metodami odběrů vzorků půd se podrobně zabývá Hamouz [27]. Nasbíráním dostatečného množství vstupních údajů je možné vytvořit graficky specializované mapy v GIS aplikacích. Zde se do popředí zájmu dostává právě získávání dat s využitím WSN.

Jedním z pilotních projektů v ČR, zabývajícím se metodiku kartografické vizualizace a modelováním zemědělských dat získaných na základě monitoringu založeného na WSN, je projekt, na kterém spolupracuje Masarykova univerzita s Mendelovou univerzitou v Brně a sdružením WirelessInfo. Projekt nese název „Kartografická vizualizace senzorických sítí pro zemědělství (AgriSensor)“. [28] Projekt AgriSensor technologicky vychází z iniciativy Open Geospatial Consortium (OGC) nazvané Sensor Web Enablement (SWE) [29], která specifikuje způsob připojení libovolných senzorů k síti Internet. AgriSensor je rozsáhlý projekt, který si dává za cíl postihnout komplexní postup, který je nezbytný pro efektivní rozhodování v oblasti řízení precizního zemědělství prostřednictvím heterogenní senzorové sítě a datových služeb. Celý projekt se skládá z několika konceptuálních částí, viz obr. 21.

- Vlastní síť různorodých zemědělských senzorů s hierarchickým uspořádáním uzlů.
- Komunikační infrastruktura mezi senzorovou sítí a prostředím sítě internet.
- Zpracování naměřených dat a zveřejnění online.
- Grafické zpracování geografických map s možností prohlížení vrstev.
- Znalostní báze a datový sklad z předešlých měření.

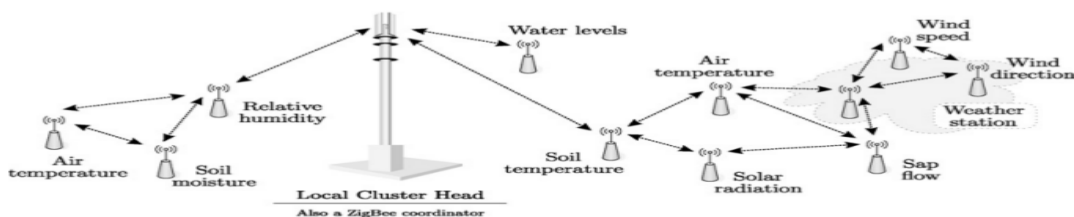


Obr. 21 Struktura projektu AgriSensor [28]

V projektu je navržena implementace sběru dat pomocí senzorů využívajících komunikační technologie ZigBee ve spojení s čidly pro měření teploty a vlhkosti půdy i vzduchu. Jednotlivé senzory vytváří strukturu sítě Mesh. Pro centrální přenos dat je zde navržen druhý okruh komunikace na bázi GPRS případně WiFi, společně s vlastním měřením

slunečního záření. Obr. 22 může charakterizovat strukturu WSN pro danou lokalitu měření. Tento obrázek je však z jiného projektu, který se zabývá využitím bezdrátových senzorů s možností čerpání energie z více zdrojů. Morais [17] se zabývá sběrem dat v prostředí portugalských vinic pomocí jednotek MPWiNodeZ (Multi-Powered Wireless Node ZigBee), které jsou schopny přijímat energii pomocí solárních panelů, hydrogenerátoru a větrné turbíny. Tyto uzly jsou založeny na ZigBee standardu.

Kompletní řešení WSN pro precizní vinařství představuje Peres [30]. Tato práce představuje řešení od hardware vybavení pomocí MPWiNodeZ pro WSN ZigBee síť, kamerový systém a solární napájení, přes obslužný a databázový software iPAGAT až po řešení přenosu dat na internet/intranet skrze GPRS a do osobních zařízení pomocí Bluetooth. Tyto služby jsou implementovány do centrální brány nazvané ZEUS-M128-F32-001-R6. Asi nejznámější experimentální nasazení WSN v zemědělství, respektive ve vinařství, je projekt Camalie Networks LLC realizovaný v oblasti vinic Camalie v USA. Zde je monitorování půdních a atmosférických vlastností v rozsahu vinic prováděno již od roku 2003 až po současnost. S průběžným modernizováním sensorových technologií a rozšiřováním počtu měřících stanic. Dlouhodobým pozorováním parametrů vinice zde bylo dosaženo výrazného zkvalitnění pěstované révy, a to díky cílenému vysazení odlišných odrůd, dle zjištěných vlastností půdy a vhodným kořenovým systémem pro danou lokalitu zjištěných např. snímáním vlhkosti půdy v různých hloubkách. Především však došlo k výrazné redukci spotřebované vody potřebné na závlahu vinic. Pěstební výsledky statisticky zpracované v průběhu let je možné dohledat [31]. Jejich sensorická síť, vyvinutá na University of Berkeley ve spolupráci se společností Intel a na trhu označená jako Crossbow technology Xmesh, která využívá technologii ZigBee jako základ radiokomunikace, je jednou z nejmodernějších sítí měřících půdní vlastnosti. [17]



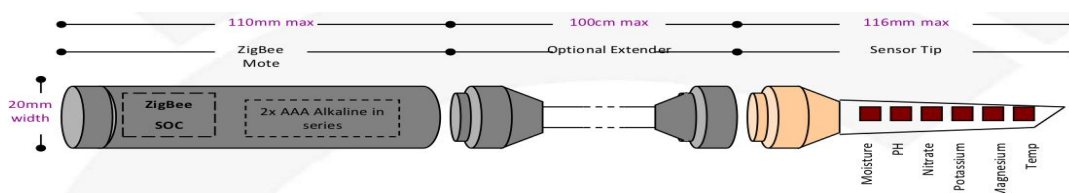
Obr. 22 Schéma rozložení uzlů WSN [17]

Obecnou metodiku nasazení a řízení WSN ve službách monitorování zemědělství se snaží nastolit Escolar Díaz [32]. Environmentálními WSN se zabývá ve své práci Zerger [33], kde se zaměřuje na snímání vegetace kamerami a na monitorování pastvin pro dobytek. Senzory pro měření půdních vlastností se detailně věnuje Kroulík [34], kde rozděljuje tzv. on-the-go senzory dle principu měření:

- elektrické a elektromagnetické senzory, které měří elektrický odpor, kapacitu, nebo vodivost půdy, ovlivněné půdními vlastnostmi,
- optické a radiometrické senzory, které využívají elektromagnetických vln k určení úrovně pohlcené nebo vyzařené energie půdy a jejich částic,

- mechanické senzory, které měří tahovou sílu při práci náradí,
- akustické senzory, které zaznamenávají zvuky při práci náradí v půdě,
- pneumatické senzory, které stanoví schopnost vzduchu pronikat do půdy,
- elektrochemická čidla, která využívají prvků a částic, které doslova vytváří elektrické napětí jako odezvu na působení vybraných iontů; tak je možné sledovat například koncentrace vodíku, draslíku, dusíku apod.

Podrobné porovnání a využití konkrétních senzorů pro měření veličin v zemědělském prostředí sepsal ve svém článku Aqeel-Ur-Rehman [26], kde dále sumarizuje publikované práce na téma WSN a ZigBee technologie v jednotlivých sektorech precizního zemědělství. Jako nejaktuálnější se zdá být v současné době kompletně realizovaný pokusný projekt zavlažování cukrové třtiny v Thajsku [35]. Celý projekt je postavený na Mesh síti ZigBee uzlů s připojením čidel měřících půdní vlastnosti a centrální metodologické stanice. Zavlažování je řízeno po přepočtu naměřených hodnot odesílaných na webový portál prostřednictvím GPRS. Z publikovaných výsledků této práce vyplývá snaha o dosažení nového zemědělského profilu pro ZigBee standard. Na obr. 23 je znázorněna obecná struktura uzlu WSN v zemědělství.



Obr. 23 Obecná struktura uzlu WSN v zemědělství [36]

Výrobci hardware pro senzorové sítě je dnes již celá řada. Jedním z vhodných kandidátů na zajištění kompletních služeb WSN v oblasti zemědělství může být španělská firma Libelium, která vyrábí modulární systém Waspote (obr. 24). Tato platforma je vhodná pro výstavbu nejrůznějších sítí senzorových čidel s přenosem a šířením dat volitelnou metodou včetně ZigBee. Waspote nabízí integraci mnoha senzorů, je možné jej sestavit pro potřeby monitorování prvků životního prostředí. Jedná o modul s plynovým senzorem, určený pro detekci širokého spektra emisí, včetně oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého z lesních požárů, ale také metanu, amoniaku a sirovodíku z farem a líhní, oxidu dusičitého z dopravy, stejně jako vodíku, isobutanu a toluenu z chemických a průmyslových procesů. Mezi možnostmi detekce jsou tlak, váha, hluk, náraz a vibrace, zrychlení, přítomnost kapalin či základní teplota. Dále je Waspote možné použít jako bezpečnostní prvek, monitor logistických operací, detektor radiace atd. Mimo jiné je také vyráběn modul speciálně určený pro precizní zemědělství, který lze osadit až čtrnácti senzory zároveň. Zemědělský modul Waspote tak může měřit teplotu/vlhkost vzduchu a půdy, obsah vody v listech, atmosférický tlak, sluneční a UV záření, rychlost a směr větru, srážky, průměr dřevin a ovoce. Modul je možné osadit GPS lokátorem, další komunikační technologií: GSM - GPRS/3G, RFID, WiFi, Bluetooth, případně vlastní paměti v podobě SD karty. Základním komunikačním prvkem zařízení je Xbee/Xbee-Pro ZB modul od společnosti

Digi. Dosažitelná vzdálenost jednotlivých uzlů je výrobcem udaná pro moduly se ZigBee až na 7 km.[37]



Obr. 24 Multifunkční jednotka Wasp mote [37]

3.2 Řízení strojů a technologických procesů

Získávání dat ze zemědělských strojů a automatické vyhodnocování práce stroje je další neméně důležitou oblastí pro využití bezdrátových přenosů dat. Např. při práci traktoru či samojízdného stroje je možné zaznamenávat jeho teoretickou a skutečnou rychlost, prokluz, otáčky motoru a vývodového hřídele, pozici ramen hydraulického závěsu, tahovou sílu na spodních ramenech hydrauliky, zařazený převodový stupeň, spotřebu nafty. Stejně tak postřikovače, rozmetadla, sklízecí mlátičky a další zemědělské stroje jsou řízeny vlastní řídicí jednotkou, díky které může obsluha v kabině kontrolovat např. okamžitou a průměrnou dávku, ošetřenou plochu, pracovní rychlost, dobu práce, výnos atd. Problémům s použitím snímačů v precizním zemědělství se věnuje Linda [38], z jehož článku vyplývá, že je nutné věnovat pozornost tvorbě kvalitních a přesných vstupních systémů regulačních jednotek řídicího systému s využitím bezkontaktních měření, aby nedocházelo k ovlivnění vstupních informací.

Řídicími čidly bývá vybaven traktor, ale často i duplicitně agregovaný stroj, přičemž každý výrobce pak přináší své originální prvky. Pro dodržení interoperability zemědělské techniky byla navržena mezinárodní norma ISO 11783 [39], zvaná ISOBUS (Binary Unit System) pro jednotné zapojení konektorů přenosové sběrnice a závaznou strukturu komunikačního protokolu. [40] Sběrem a následným uchováváním a zpracováním dat ze senzorů strojní techniky v různých management zemědělských aplikacích (Farm Management Information Systems – FMIS) se zabývají Peets [41] a Nikkilä [42], v jejichž pracích je popsána struktura software aplikace pro FMIS. Vlastním převodem získaných dat ze sběrnice ISOBUS pak práce Iftikhar [43], kde autoři popisují datový formát AgroXML, vhodný právě pro operace s agrotechnickými daty. S vyhodnocením informací také souvisí bezdrátový přenos dat. Přenos naměřených dat je v mnoha případech totiž chápán jen jako manuální předání hodnot nahraných z USB, SD karty či paměťové nábojnice z přístroje do PC. K bezdrátovému přenosu pak často slouží datový tok skrze GPRS. Lze nalézt několik implementací přenosu dat prostřednictvím ZigBee, např. Mayer [44] ve své práci představuje bezdrátový přenos dat z ISOBUS mezi různými zemědělskými stroji prostřednictvím tzv. ESObx modulů komunikujících na základě standardu ZigBee.

Na téma vzájemné komunikace dopravních zařízení či strojů existuje mnoho teoretických prací. Označením Vehicle-to-Vehicle (V2V), Car-to-car, případně všeobecným názvem komunikace stroje se strojem - Machine to machine (M2M) se otevírá široká oblast využití

technologie ZigBee. Jeden realizovaný projekt představila firma CASE IH. Jedná se o komunikační model mezi sklízecí mlátičkou a vedle jedoucím traktorem s návěsem, který je jakoby v područí mlátičky prostřednictvím příkazů přijímaných pomocí ZigBee sítě mezi nimi. Traktor pak přizpůsobuje svou pojezdovou rychlost a směr jízdy v závislosti na mlátičce automaticky, musí být však vybaven motorem s bezstupňovou plynulou regulací otáček vývodového hřídele. Obsluha traktoru se pak může plně věnovat překlada zrna na návěs. [45]

3.3 Automatizace řízení a správy budov

Bezdrátové technologie na bázi ZigBee lze nalézt v oblasti automatizace budov, hospodářských staveb, skleníků, vodohospodářských zařízení i na mnoha jiných podobných pracovištích. Všude tam, kde je potřeba bezdrátové ovládání všemožných spínačů či řízení koncových aplikací s nízkými nároky na odběr elektrické energie a malými konstrukčními parametry. S úsporou energií je také často spojen pojem inteligentních sítí tzv. Smart Grids network, kde je snaha monitorovat veškerá zařízení odebírající elektrický proud, případně průtok vody, plynu atd. a vzápětí je zpětnovazebně regulovat či sledovat jejich aktuální stav v reálném čase. Elektroměry s přenosem dat pomocí ZigBee modulu nabízí např. společnost Freescale, Ember či Texas Instruments. Pro měření a úsporu energií existuje vlastní ZigBee profil.

3.4 Sledování majetku

Dalším využitím technologie ZigBee v zemědělství může být monitorování pohybu dobytka na volných pastvách pro potřeby zlepšení kvality jejich života. Touto problematikou se v jedné z mnoha prací na toto téma zabývá Huiracán [46]. Autor zde sleduje pohyb dobytka pomocí ZigBee a monitorováním úrovně nosného signálu (LQI) ze senzorů umístěných na zvířeti. Pomocí přepočtového algoritmu, který převádí úroveň kvality signálu na teoretickou vzdálenost od přijímačů a pravoúhlého rozmístění snímacích členů ZigBee sítě, je dopočítána trasa a rychlost pohybu zvířete. Výsledky tohoto pokusu dokládají přesnost snímání pohybu v rozmezí 20 m na otevřené planině. Sledováním chování zvěře se ve svých pracích zabývá také Nadimi [47], [48], [49]. Autor zde popisuje monitoring skotu založený na přepočítávání časových hodnot z příchozích paketů do jednoho uzlu sítě ZigBee (routování many-to-one). Pokusným měřením se sledoval pohyb a chování stáda při přesunu za nespásanými porosty. V druhém případě byl senzor vybaven i akcelerometrem a kontrolou pozice přes GPS. Třetí práce zkoumala aktivní a neaktivní dobu pohybu skotu pro potřeby plánování krmiva. Celkovou vhodností nasazení technologie ZigBee pro výzkum v oblasti sledování chování a kvality života hospodářských zvířat se zabývá tentýž autor v práci [50]. Jedním z konkrétních zařízení, které využívá komunikaci ZigBee při monitorování hospodářských zvířat, je např. přístroj Cellulogic WRZ500 Wireless Communicator společnosti AgroLogic, sloužící pro přenos dat do PC ze senzorů klimatizace v kuřecích líhních.

4. Koncepční návrh aplikace řešící přenos dat z mobilního zemědělského stoje.

4.1 Váhové systémy krmných míchacích vozů

Návrh řešení je zaměřen na realizaci bezdrátového přenosu dat z krmných míchacích vozů (dále jen KMV). Do této oblasti spadá komunikace mezi vážící ústřednou KMV tenzometrických vah a externími displeji, případně přenos naměřených hodnot do kontrolních stanišť.

4.1.1 Současný stav

Bezdrátové přenosy dat lze využít i na zemědělských farmách, kde se jimi může řešit např. správa a řízení váhových měřidel krmných systémů pro dobytek či mícháren na biomasu. Mezi prvky správného odměření jedné dávky patří především krmné vozy nebo linky. Ať už se jedná o stacionární či mobilní linky, s automatickým nebo manuálním nakládáním, vždy je nutné nějakým způsobem namíchat určitý objem krmných komponent dle konkrétní receptury. Elektronické váhy na zemědělských strojích vyvozují hmotnost naloženého materiálu pomocí přepočtené deformace ze zatížení tenzometrických snímačů. K těmto vahám bývá připojena programovatelná řídicí ústředna s informačním displejem. Na trhu zemědělských vážících systémů existuje několik výrobců váhových ústředn.

Právě receptura dané dávky je parametr, který se musí do zařízení nějakým způsobem zadat, pokud je tedy ústředna schopna zpracovat více měření v rámci jedné operace. Recepturu je možné průběžně měnit a kontrolovat její stav. Parametry měření je nejčastěji možné zadat manuálně pomocí tlačítek na ústředně, případně na dálkovém ovladači (např. systém DinaTel2 od Dinamica Generale). [51] Některé modely ústředn je možné nastavit na danou recepturu pomocí předem naprogramovaného externího zdroje dat v podobě paměťové nábojnice typu EEPROM, USB flash disku či paměťové karty Compact Flash, jak nabízí např. italská firma PTM (model TopCut A Memory). Alternativní možností je využití datových přenosů GSM sítě. Moderní ústředny lze ovládat také bezdrátově.

Např. americká firma Digi-star umožňuje u svých nejvyspělejších ústředn (modely EZ3600, EZ4600) přenos dat prostřednictvím WiFi pod označením vlastní technologie RF DataLink. [52] U nižších modelů ústředn této firmy je možné na přání nechat zabudovat Bluetooth technologii. Italská společnost Dinamica Generale nabízí svůj vlastní uzavřený komunikační přenos WiNET pro vzájemnou komunikaci mezi zařízeními a připojeným příslušenstvím. [51] Prostřednictvím připojeného modemu lze k ústředně jednak přistupovat a nastavit tak parametry receptur, ale také bezdrátově připojit přídatné příslušenství jako je externí informační panel, tiskárna či další měřicí prvky. Pro centrální bezdrátový přenos dat do sítě firma také využívá WiFi technologii. Příslušenství se k ostatním ústřednám standardně připojuje pomocí rozhraní RS-232.

Firma PTM ve své bohaté nabídce zemědělské techniky nabízí váhové ústředny s možností přenosu dat pomocí WiFi, ale také asi jako jediná s možností připojení externího modulu pro komunikaci pomocí ZigBee (model Graphic Super USB). Bližší informace však firma nesděluje. [53]



Obr. 25 Manuální přenos dat pomocí DTM [54]

Americká firma Avery Weigh-Tronix nabízí u svých vážících indikátorů, stejně jako ostatní prodejci, možnost přenášet data do sběrného PC prostřednictvím datového modulu (Data transfer module – DTM), což je paměťová nábojnice připojitelná portem k ústředně, viz obr. 25. Jako příslušenství k ústřednám lze navíc zvolit připojení modulu pro bezdrátový přenos zaznamenaných dat. Zde firma používá moduly založené na standardu IEEE 802.11b, jedná se tedy o WiFi síť, zařízení je pojmenováno WiPort a výrobcem je firma Lantronix. Pomocí těchto modulů lze k ústřednám také připojit bezdrátově externí displeje (model RD40RF) či tiskárny. U nejpokrokovějších univerzálních indikátorů této firmy (např. Model 3600) lze přímo zvolit jako komunikační příslušenství WiFi modul, nazvaný RM 200 WiFi wireless box, případně lze bezdrátový přenos dat provést pomocí CompactFlash Wifi karty. Pro manuální přenos dat je zde možnost připojení USB paměti či CompactFlash karty. Jednotlivé firmy používají vždy svůj vlastní software pro management naměřených dat. [54]

Novinku letošního roku představila německá firma Siloking. Nabízí bezdrátový terminál, který slouží jako kombinovaný systém vážícího zařízení a ovladače hydraulických funkcí míchacích vozů. Na straně KMV je jen bezdrátový ovládací modul bez nutnosti jakékoli manuální interakce obsluhy, která vše monitoruje ze vzdáleného prostředí, nebo řídí pomocí bezdrátově připojených ovladačů a displejů v kabině řidiče nakládacího vozu. Firma však zatím nezveřejnila, o jakou bezdrátovou technologii se v daném případě jedná. Receptury a naměřená data jsou do stanice s PC přenášena pomocí USB Flash disku.

4.1.2 Návrh řešení bezdrátového přenosu dat ze zemědělského stroje

Požadavky

- Bezdrátový přenos dat z vážící ústředny KMV na vzdálený externí displej.
- Bezdrátový přenos navážených hodnot do centrálního úložiště.
- Bezdrátové nastavení ústředny na konkrétní recepturu komponent k vážení.

První požadavek se vyskytuje v případě potřeby zobrazit naměřená data i na další externí displeje, které jsou nedostupné z měřícího stanoviště. Často např. u vysokých silážních věží. Druhý požadavek má snahu zajistit ulehčení přenosu dat z ústředny do PC. Třetí

požadavek zjednodušuje obsluhu nastavení receptur vážení. Předpokládaná vzdálenost jednotlivých uzlů sítě je v řádu desítek metrů.

4.2 Návrh řešení 1

Při výběru metody řešení přenosu informací z vážící ústředny na externí displej pomocí bezdrátové technologie ZigBee jsem se zaměřil na několik kritérií. Snaha byla vybrat řešení realizačně dostupné, levné a s minimální potřebou cokoli složitě programovat. Zvolil jsem tedy variantu připojení převodníku ze signálu z RS-232 na bezdrátový přenos ZigBee. Cesta dat tak bude z ústředny na piny portu RS-232 a odtud již bezdrátově prostřednictvím ZigBee standardu do dalšího, případně dalších zařízení s převodníky ZigBee/RS-232, kde budou data v původní podobě zobrazena či zaznamenána. Převodník RS-232/ZigBee dále v textu uvádím jen jako RZ.

Navržené řešení vychází z předpokladu, že vážící ústředna je vybavena výstupním obousměrným komunikačním sériovým portem RS-232, případně je možné tento port do ústředny nechat zakomponovat. Většina ústředen nabízí tento způsob komunikace pro přímé připojení k řídicímu počítači, či jako drátové připojení externích tiskáren a jiných příslušenství jako jsou např. rozšiřující displeje. RZ převodník bude pouze suplovat drátovou část spojení těchto zařízení. Díky tomuto převodníku se není tedy třeba soustředit na konkrétní typ ústředny a ani není nutno fyzicky zasahovat do její konstrukce. Navržené řešení dále předpokládá přeprogramování vlastní řídicí jednotky váhy na odesílání dat ve správném výstupním formátu.

4.2.1 Volba hardware 1

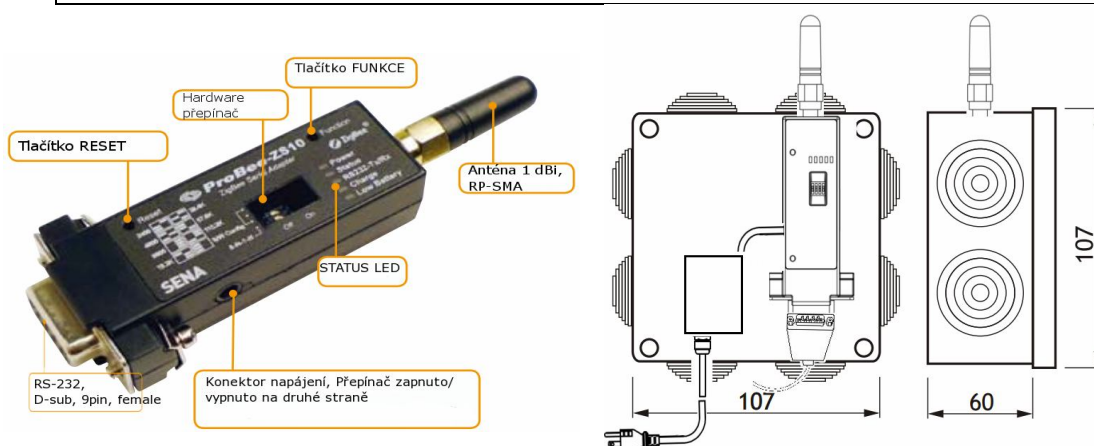
Po prozkoumání cenové nabídky současných dodavatelů jednotlivých konstrukčních součástí pro stavbu převodníku RZ jsem došel k závěru přenechat realizaci konstrukce celého prvku třetí straně. Hotové převodníky na trh dodává několik výrobců v různých provedeních a řadě konstrukčních modifikací.

Jako první návrh jsem zvolil nejlacinější dostupnou variantu RZ převodníku na trhu. Čínský výrobce DTK Electronics ze Shenzhen se specializuje na ZigBee technologie a na světový trh dodává řadu bezdrátových prvků. Měl jsem zájem využít jeho vestavný modul s označením DRF1601, který udanými parametry a především pak implementací kvalitního SoC čipu CC2530F256 od společnosti Texas Instruments, se zdál být ideálním řešením pro tento návrh. Bohužel se tento adaptér v průběhu detailního zkoumání jeho technické dokumentace a konstrukčních parametrů projevil jako nevyhovující pro potřeby výše zmíněného návrhu. Problém nastal především v nedostatečné možnosti konfigurace řízení bezdrátové komunikace, díky specificky jednoduchému firmware tohoto zařízení. Přeprogramování aplikační části ZigBee stacku tohoto zařízení se pro mě jeví jako nereálné. Zařízení by nejspíš vhodně posloužilo jen jako demonstrační prvek ZigBee komunikace.

Pro finální návrh řešení 1 jsem se nakonec rozhodl vybrat již zcela konstrukčně hotový převodník firmy Sena s názvem ProBee-ZS10. [55] RS-232 adaptér s převodníkem na ZigBee s čipem Ember EM250. Jedná se také o tzv. řešení systému v čipu (System on Chip - SoC), což znamená, že čip zařízení v sobě zahrnuje kompletní ZigBee prostředí. Jak část radiofrekvenční, tak i část výpočetní a aplikační v jednom pouzdře. Schéma čipu je uvedeno příloze 3. Tento typ RZ jsem zvolil na základě porovnání technických parametrů, dostupných, funkčně podobných převodníků na trhu. Viz tabulka porovnání v příloze 2. RZ ProBee-ZS10 svou pořizovací cenou představuje druhé nejlacinější zařízení ze všech porovnávaných, jeho parametry však splňují veškeré klíčové potřeby nutné pro nasazení v navržené síti. Toto zařízení vyniká oproti ostatním především díky pokročilé možnosti konfigurace vlastností sítě.

Tab. 2 Vlastnosti modulu ProBee-ZS10

Čip: Ember EM250, integrovaný MCU (12 MHz, 5 kB RAM, 128 kB Flash)
Bezdrátová frekvence: 2,4 GHz (rozsah 2394 – 2507 MHz), 14 kanálů, modulace DSSS, podpora šifrování 128bitové AES
Maximální bezdrátová přenosová rychlost: 250 kbit/s
Protokol: IEEE 802.15.4 ZigBee2007/PRO
Přijímací citlivost: -102 dBm
Vysílací výkon: +20 dBm EIRP (max.), Základní anténa: 1 dBi
Dosažitelná vzdálenost: 400 m (volné prostranství, 1 dBi) až 1,6 km s 5 dBi anténou
Max spotřeba při vysílání: 200 mA (čip 42 mA), při příjmu: 55 mA (čip 36 mA), při spánku pod 10 μ A
Potlačení sousedního kanálu: 40 dB
Rozsah pracovních teplot: -40°C - +85°C
Rozměry modulu: 74 x 31 x 16 mm bez baterie
Přenos signálu RS-232: TXD/RXD, RTS/CTS, DTR/DSR
Příslušenství: 1 dBi anténa, připojení přes RP-SMA konektor, baterie 240, 900 mAh
Modul ProBee-ZU10 je odlišný pouze konektorem USB pro připojení.



Obr. 26 ProBee-ZS10 a schéma uložení [vlastní]

4.2.2 Nastavení a realizace komunikace

Navrhované řešení ZigBee sítě se skládá ze tří komunikačních uzlů. První pomyslný uzel bude představovat vlastní vážící ústředna KMV s připojeným RZ převodníkem ProBee-ZS10. Tento uzel představuje pro naši potřebu nejdůležitější stanoviště, proto musí být tento převodník trvale napájen. Přívod el. energie na toto místo je zajištěn díky nutnosti napájet také vážící ústřednu. RZ zde bude nastaven v režimu koordinátor a bude tak vytvářet hlavní prvek sítě. Druhé stanoviště představuje vzdálený externí displej, zde bude RZ v režimu spícího koncového zařízení napájeného na baterie. Napájení na baterie zde není zcela nutné díky přivedení napájení pro displej. Třetí uzel sítě bude tvořit stanoviště s počítačem. Zde je navrženo využití zařízení ProBee-ZU10, nastavené také v režimu koncového zařízení. Viz schéma zařízení SE1, SE2 a SE3 na obr. 27. Stanovení koordinátora sítě se zdá být logické pro zařízení v místě s PC, ale pro naše potřeby musí být přenos dat mezi SE1 a SE2 nezávislý na třetím prvku, proto síť musí vytvářet právě vážící ústředna jako prvek SE1, který je trvale napájen.



Obr. 27 Schéma navržené sítě [vlastní]

4.2.3 Krytí venkovního modulu

Pro potřeby nasazení navrhovaného modulu ve venkovním prostředí je zcela nutné vyřešit otázku vodovzdorného krytí prvku. RZ ProBeeZS10 není dle výrobce primárně určen pro trvalé nasazení ve vlhkém a prašném prostředí. Plastový obal RZ již na první pohled nesplňuje žádné ochranné parametry, pro naše využití je tedy zcela nedostatečný. Jako návrh bezpečného uložení jsem zvolil namontování do vodotěsné elektroinstalační krabice IP 65 (INST 2708) od výrobce Jangar s rozměry 110 x 110 x 60 mm. Tato krabice má již připravené voděodolné průchodky pro přívodní kabeláž napájení a propojovacího kabelu s D-Sub konektorem. Anténa může být z krabice vyvedená pomocí prodlužovacího pigtailu ESD1000. Případně je možné zvolit anténu s větším ziskem. V navržené krabici je dále potřeba dořešit uchycení modulu, případně vyřešit rozvrstvení prostoru pro přídatnou baterii zařízení. Schéma návrhu na obr. 26.

Cenová kalkulace hardware navržené sítě

Tab. 3 Cenová kalkulace hardware 1

Modul SE1 - ProBee-ZS10 (bez příslušenství)	59\$
Modul SE2 - ProBee-ZS10 (příslušenství + 1 dBi anténa, adaptér DC)	85\$
Modul SE3 - ProBee-ZU10 (USB)	59\$
Napájecí adpatér pro SE1	18\$
Anténa 5 dBi pro SE1	8\$
Pigtail RPSMA pro SE1	7\$
Propojovací kabel Serial RS232 9-Pin Male to Male 2x (10\$)	20\$
Hardware celkem:	256\$ = 4800 Kč
+ Krycí krabice 2x (70 Kč)	140 Kč
+ ostatní	60 Kč
Celkem:	5 000 Kč

(e-shop <http://www.sena.com>, ceny v \$ US / 18 Kč, bez dodání)

Celková cena na pořízení všech komponent pro realizaci navržené sítě je vyčíslena na 5000 Kč. V ceně není zahrnuto pouze dodání a realizace montáže na konkrétní stanoviště.

Posouzení návrhu 1

Navržené řešení s využitím externích adaptérů pro převod výstupních dat jednotlivých zařízení na komunikaci ZigBee se v celkovém součtu bohužel projevilo jako neekonomické a nešikovné, zejména z hlediska nutnosti podřizovat přenos dat stávajícím podmínkám jednotlivých zařízení, které by bylo i tak stejně nutné hardwarově přeprogramovat pro odesílání dat ve správném tvaru. Je zde také problém s nesamostatností jednotlivých adaptérů z hlediska jejich nastavení při případné poruše komunikace. Po vyřešení zmíněných nedostatků se řešení 1 zdá být jako funkční návrh.

4.3 Návrh řešení 2

Pro splnění požadavku, využít navržený hardware ve skutečném provozu zemědělského podniku, je nutné vybrat takové komponenty ZigBee, které je možné integrovat přímo do konkrétních zařízení. Vestavné, tzv. embedded ZigBee moduly, lze pořídit v mnoha provedeních s různými technickými parametry. Moduly jsou dnes již často kompletně připraveny na povrchovou montáž (surface mount device - SMD) do desky plošných spojů (DPS) zařízení, ve kterém chceme implementovat ZigBee funkcionalitu. Modul obsahuje mikrokontroler (MCU), transceiver RF a anténu přímo integrovanou na desce modulu, nebo připojitelnou přes vyvedený konektor. Záleží na konkrétním výrobcu, jak jsou jednotlivé prvky na modulu společně integrovány. Před finálním osazením ZigBee modulu do koncového zařízení je nutné jej otestovat a naprogramovat. Testovat vybrané moduly lze pomocí tzv. vývojových kitů, ve kterých lze také daný modul nastavit pomocí připojeného programátoru. Každý modul má od výrobce v části MCU nahrán nějaký software stack, který se liší v rozsahu svých služeb a velikosti potřebné paměti pro zdrojový kód. Může být dodán tzv. plný ZigBee stack, který obsahuje veškerou

funkcionalitu všech síťových vrstev ZigBee standardu. Jindy je dodán pouze zmenšený firmware obsluhující pouze vrstvu PHY a MAC dle IEEE 802.15.4, vyšší vrstvy komunikace si musí dopsat sám vývojář. S dopsáním uživatelské části firmware jednotlivých modulů je často spojeno také konkrétní vývojové prostředí daného výrobce, které v mnoha případech nebývá právě nejlevnější. Pro analýzu a testování sítě ZigBee je dobré využít nějaký zachytávač ZigBee paketů (packet sniffer), který jednak vypisuje obsah zachycených rámců na konkrétních vrstvách paketu, ale dokáže také graficky zobrazit strukturu připojených uzlů sítě.

4.3.1 Volba hardware 2

Vestavné moduly ZigBee nabízí již většina stávajících výrobců radiotechniky. Velká část současně nabízených modulů dosahuje podobných technických parametrů. Z hlediska pořizovací ceny jsou mezi moduly mírné rozdíly. Podrobně prozkoumat a technicky porovnat všechny dostupné moduly všech firem na trhu je prakticky nereálné. Při výběru vhodného vestavného ZigBee modulu jsem se zaměřil pouze na porovnání modulů určených a certifikovaných pro evropský trh, modulárně již zcela konstrukčně hotových a od jednotlivých výrobců pouze na nejnovější prvky z jejich nabídky. V neposlední řadě jsem porovnával pořizovací cenu jednotlivých modulů. Z výběru jsem vyřadil moduly firem, které své výrobky nedostatečně prezentují nebo u nich neuvádí prakticky žádné rozumné informace. ZigBee moduly firem Jennic, Digi a MeshNetics se díky jejich technicky nejvyspělejším parametrům u daných modulů zdají být nejvhodnější. Nakonec jsem se rozhodl pro moduly firmy Digi kvůli jejich široké modularitě nabídky při jedné z nejnižších pořizovacích cen a především pro jejich řešení dodaného certifikovaného ZigBee stacku. Ten představuje známé řešení svým nastavením, kde není nutné vyvíjet rozsáhlé ovladače pro základní komunikaci ZigBee, která je v našem případě dostatečná.

Jednotlivé moduly, které jsem mezi sebou porovnával, jsou uvedeny v tabulce v příloze 2 a v porovnání na webu Freaklabs [58].



Obr. 28 Moduly XBee ZB

Pro centrální prvek sítě (SE1) jsem zvolil modul Digi XBee-PRO ZB ve verzi SMT s konektorem U.FL pro externí anténu. Jedná se o modul s programovatelnou částí paměti nezávisle na vlastním software v MCU. Tento modul se skládá ze SoC čipu Ember EM357, který představuje hlavní MCU a IEEE 802.15.4 RF transceiver. Je zde nahrán EmberZNet PRO stack, představující kompletní certifikovaný protokol dle standardu ZigBee PRO. Dále modul obsahuje pomocný 8bitový HCS08 Freescale procesor, který

obsahuje zavaděč pro nahrání nového firmware a volný prostor pro uživatelskou aplikaci. Verze SMT označuje modul pro povrchové připájení na DPS, lze nahradit verzí modulu s klasicky vyvednými dlouhými piny.

Jako modul zabudovaný v koncovém zařízení sítě, viz předchozí návrh (SE2), je zvolen typ Digi XBee-ZB SMT. Tento typ neobsahuje programovatelnou část navíc a má nižší vyzařovací výkon s menším dosahem. Na druhou stranu má téměř poloviční spotřebu energie při provozu. Jedná se o verzi s integrovanou PCB anténou. Modul je možné také zaměnit za verzi s konektorem pro externí anténu a dlouhými piny.

Pro stanoviště s PC (SE3) byl zvolen USB XStick ZB, který by měl mít dosah na 50 m.

Pro vývoj vlastních aplikací pro oba moduly je zdarma k mání IDE vývojové prostředí CodeWarrior for Microcontrollers od společnosti Freescale s přidaným SDK prostředím pro XBee moduly. Aplikace se zde píše v jazyce C. Pro základní nastavení modulů skrze PC je zde nabídnut software X-CTU utility, sloužící pro základní nastavení zařízení pomocí AT příkazů a detekci kvality spojení jednotlivých modulů.

Moduly lze nastavit prostřednictvím PC po připojení sériové linky do vývojové desky nebo bezdrátově. Doporučená vývojová deska je Digi XBIB-U-DEV. Nahrát nový nebo upravený firmware do MCU lze pomocí JTAG programátoru. Rozložení jednotlivých pinů je uvedeno v příloze 4. Parametry ZigBee komunikace lze nastavit pomocí AT příkazů nebo API rámců s příkazovými daty. Moduly tak lze nastavit i bezdrátově. Moduly Digi XBee mají možnost být v podobném režimu jako zařízení RZ ProBee z minulého návrhu, tedy že jsou ve stavu tzv. transparentního přenosu dat. V tomto režimu jsou veškerá data přijatá na vstupu obvodu nejprve shromažďována v DI (data in) bufferu a poté po jeho naplnění jsou tzv. paketována do éteru. Přijetí dat probíhá v opačném režimu.

Tab. 4 Parametry modulů XBee

Název	XBee-PRO ZB SMT Programmable	XBee ZB SMT
Čip / MCU	Ember em357 - 192 kB Flash, 12 kB RAM, +MC9S08QE32 s 50,33 MHz, 32kB Flash, 2 kB RAM	Ember em357- 192 kB Flash, 12 kB RAM,
IEEE 802.15.4 stack	EmberZNet PRO	
Frekvence [Ghz]	2,4 GHz (2394 – 2507 MHz), 16 kanálů, modulace DSSS, šifrování 128bitové AES, přenosová rychlost 250 Kbps	
Dosah uvnitř/venku/anténa [m]	90 / 3200 / U.FL	60 / 1200 / PCB
Anténa + konektor	U.FL	PCB
Přijímací citlivost [dBm]	-102	-100 / -102 normal/boost
Vysílací výkon [dBm]	18 při 63 mW, 10 při 10 mW	5 při 3,1 mW, 8 při 6,3 mW
Max spotřeba při vysílání [mA]	114	33 / 45 normal/boost
při příjmu normal/boost [mA]	31 při 3,3 VDC	28 / 31 při 3,3 VDC
při spánku [µA]	1,5	< 1
Napájení [V]	2,7 - 3,6	2,1 - 3,6
Rozměry [cm]	2,199 x 3,4 x 0,305	
Podporované režimy přenosu	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	
Nastavení	API, AT příkazy, X-CTU, PC / bezdrátově	
Vstupy / výstupy	4x10bit ADC, 15xIO, UART (1 Mbps), SPI (5 Mbps)	

Cenová kalkulace hardware 2

Tab. 5 Cenová kalkulace hardware 2

Název	cena [\$]	cena [Kč]
XBee-PRO ZB SMT - Programmable	28,5	513
Xbee ZB SMT - Standard	17,5	315
XStick ZB - USB	49	882
pigtail U-FL - RSMA	3	54
Anténa 5dBi - dipol, konektor RSMA	7	126
Celkem	105	1890

(e-shop <http://www.digi.com>, ceny v \$ US / 18 Kč, bez dodání)

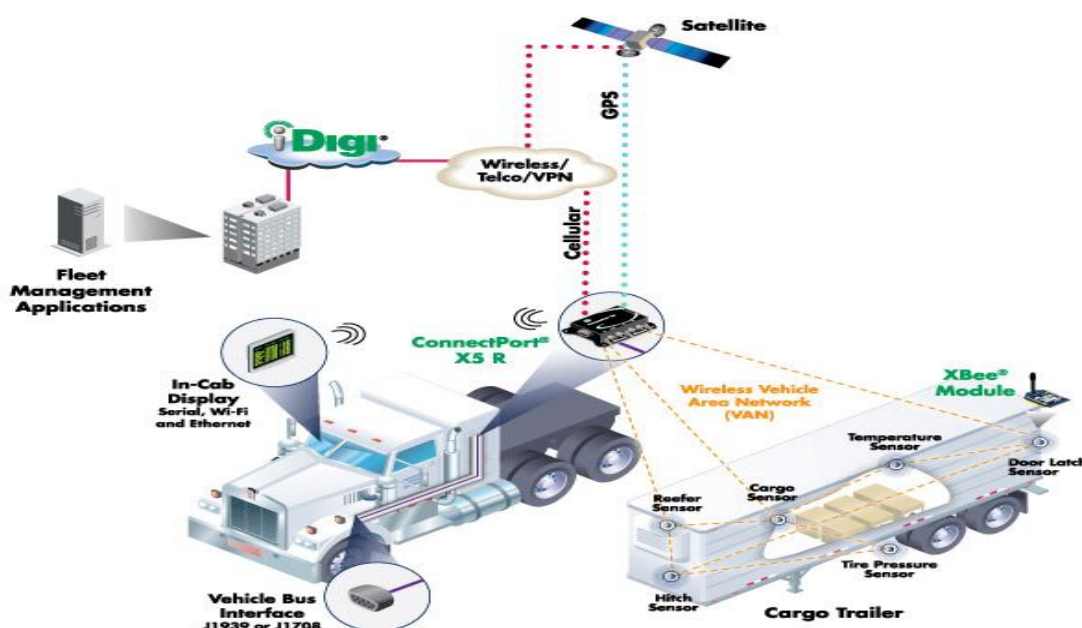
Celková cena za kompletní pořízení modulů XBee je vyčíslena na 1890 Kč.

Posouzení návrhu 2

V tomto případě je však výsledná cena zkreslena nezapočítáním např. vývojové desky (XBIB-U-DEV board USB = 70 \$), která ovšem není nezbytná, a cenou za montáž, případně za vývojový proces návrhu aplikace.

Výslednou cenu naopak hodně navyšuje využití USB jednotky XStick ZB. V případě využití pouze vestavných modulů Xbee ZB, např. pro rozsáhlejší síť s více uzly, se celková cena v průměru sníží. Ceny modulů se také snižují od většího počtu objednaných kusů. Využití vestavných modulů ZigBee se jeví jako funkční řešení pro reálné nasazení v zemědělství.

Pro potřeby rozsáhlejší sítě je možné nasadit ZigBee opakovače signálu (XBee-PRO ZB wall router), případně brány do sítě internet (ConnectPort X4 H). Konkrétně firma Digi dále nabízí možnost vlastní cloud aplikace (iDigi) pro monitorování a management jednotlivých sítí.



Obr. 29 Struktura komplexní sítě založení na XBee [59]

Podobným řešením sítě, jako je představeno na obr. 29, by se dala řešit situace reálného nasazení ZigBee technologie v prostředí zemědělských KVM, kde by jednotlivé senzory XBee zaznamenávaly průběh odvažování přímo na vážící ústředně míchacího vozu a do kabiny řidiče nakládacího vozu by se přenášela pouze aktuální data vážení. Touto koncepcí by se vyřešil problém, kdy řidič musí vylézt z kabiny nakladače, aby mohl manipulovat s váhou. Přejechod mezi navažováním jednotlivých komponent podle zadané receptury je možný buď automaticky po dosažení požadované hmotnosti, nebo s manuálním posunem v postupu vážení, kdy tento krok musí provést obsluha. Tato situace by se dala také vyřešit pomocí konkrétní aplikace vytvořené pro ZigBee moduly.

4.3.2 Nastavení a popis sítě

Následující popis nastavení sítě je původně napsaný pro řešení 1, ale pro řešení 2 je postup téměř identický, jen syntaxe AT příkazů je v případě XBee jiná. Obsahově je však postup nastavení téměř shodný. Následující postup představuje nejjednodušší řešení, jak realizovat navrhovanou síť o třech prvcích. Pro reálné autonomní nasazení Zigbee sítě je vhodné daná nastavení přímo naprogramovat do firmware jednotlivých uzlů sítě.

Založení sítě obstarává koordinátor, je tedy nutné jedno zařízení do tohoto stavu přepnout. Do založené sítě se ostatní směrovače se shodně nastaveným PAN ID připojí automaticky.

Jednotlivá zařízení je nejprve nutné připojit k PC, nakonfigurovat a postupně spárovat komunikaci. Po výchozím nastavení se jednotlivé moduly přepnou do tzv. transparentního režimu, ve kterém pouze přenášejí data na svém vstupu. Nastavení sítě a spárování zařízení se provádí modifikací jednotlivých parametrů S-registru modulu, pomocí AT příkazů poslaných do zařízení v hexadecimálním formátu. Některé funkce lze případně nastavit manuálně na těle RZ. Příkazy je možné zadávat skrze program Hyperterminál v MS Windows či jiný, nebo automaticky pomocí konfiguračního software ProBee Manager dodávaný společností Sena. (X-CTU v případě XBee)

Po připojení modulu k PC a přivedení napájení je nutné v konfiguračním nástroji nastavit správné parametry komunikace sériové linky (standardně COM1, 19200 kb/s, 8 bitů, 1 stop bit, parita a řízení žádné). První zařízení (SE1) je nutné nastavit do režimu koordinátor, následně nastavit vlastní PAN ID, zvolit přenosovou rychlost (baud rate) a přenosový kanál (channel mask). Další zařízení se nastaví na stejné PAN ID jako má koordinátor. Pokud je síť již založená, zařízení typu směrovač nebo koncové zařízení se automaticky připojí do této sítě. Konfiguraci lze kompletně provést v ProBee Manager (X-CTU), kde je možné jednotlivá nastavení uložit jako vzor a poté ho do ostatních prvků tzv. naklonovat. Je zde také možnost aktualizovat firmware zařízení.

4.3.3 Základní konfigurace pomocí AT příkazů:

Režim komunikace zařízení a terminálu se aktivuje příkazem AT, zařízení v případě navázání spojení odpoví OK. Příkaz +++ zavede režim zadávání konfiguračních AT příkazů (AT command mode). Každý příkaz se skládá z prefixu, konstrukce těla příkazu

a ukončovacího znaku. Zařízení vrací buď OK, nebo ERROR. Prefix je AT, tělo se skládá z řetězce znaků, zakončení je <CR> nebo <NL>. Příkaz může být:

dotazovací: AT<příkaz>?<CR> # je vrácena hodnota dotazovaného parametru

vykonávací: AT<příkaz><CR> # vykoná se daný příkaz

konfigurační: AT<příkaz>=<Parameter1>,<Parameter2>,<Parameter3>,...<CR>
nastavení hodnot parametrů

Příkaz ATZ uloží nastavení a resetuje zařízení. Příkazem ATO se přechází do režimu průběžného odesílání dat (Data mode). AT&F slouží jako reset do továrního nastavení. Názvy příkazů je možné zadat zkratkou. Znaménko + spojuje AT a název příkazu.

Typ zařízení: AT+NODETYPE=n (zkráceně AT+NT=n), kde n značí: 0=neurčeno, 1=koordinátor, 2=směrovač, 3=koncové zařízení, 4=spící koncové zařízení

Vysílací kanál: AT+CHMASK=n (AT+CM=n), n=číslo kanálu v HEX soustavě 12-25, základní nastavení = 0x03FFF000

Identifikace sítě: AT+PANID=xxxx (AT+PI=xxxx), xxxx = 16bit hodnota, základní hodnota je 0000

AT+EPID=xxx...xxx (AT+EI= xxx...xxx), 64bit adresa

Připojení nového zařízení: AT+PERMIT=n (AT+PJ=n), n = doba čekání před připojením v rozmezí 1-254 sekund, pokud zadáme 255, zařízení je připojeno vždy automaticky

Zabezpečení: AT+SECURITY=n (AT+SE=n), kde n 0=vypnuto, 1=zapnuto, při zapnutém šifrování je možné zadat AES 128bit klíč, přímý nebo síťový

Přenos užitečných dat může být dvojího druhu, data lze přenášet jako přídavek ke konkrétnímu příkazu, nebo jako souvislá data v režimu (Data mode). Vysílat lze v obou režimech metodou unicast, multicast i broadcast.

4.3.4 Nastavení sítě:

Z hlediska jednoduchosti a zároveň robustnosti řešení bezdrátové komunikace v síti je navrženo nastavení jednotlivých uzlů sítě takto: Koordinátor SE1 bude svá data vysílat všem připojeným účastníkům sítě. Tím je zaručeno, že do sítě může vstoupit další libovolné zařízení a SE1 (vážící ústředna) s ním bude komunikovat. Stanoviště SE2 (externí displej) bude pouze přijímat data z SE1. Uzel SE3 (osobní PC) přijímá data z SE1, ale sám může data odesílat a tím např. nastavit parametry receptur vážení.

Koordinátor (SE1)

AT+BAUDRATE=19200<CR> # 19200 kb/s rychlost komunikace zařízení

AT+DATABIT=8<CR> # přenos bitu

AT+PARITY=0<CR> # parita žádná

AT+STOPBIT=1<CR> # jeden stop bit

AT+FLOWCTRL=2<CR> # řízení přenosu nastaveno na žádné
 ATZ<CR> # restart zařízení
 AT+NODETYPE=1<CR> # nastaven typ zařízení
 AT+CHMASK= 00001000<CR> # přenosový kanál 12
 AT+PANID=0001<CR> # číslo sítě
 AT+GROUPID=1000<CR> # skupina zařízení 1
 AT+PERMIT=255<CR> # bude vždy pod sebe připojovat nové zařízení
 AT+SECURITY=0<CR> # přenos bez šifrování
 AT+LONGADDR? <CR> # vypsání hodnoty plné adresy, zapsat si ho dobré je
 ATO<CR> # vstup do nastavení Data mode
 AT+TRANSMITMODE=3<CR> # nastaveno trvalé posílání metodou broadcast
 ATZ<CR> # restart a uložení nastavení

SE1 nyní posílá všechny svá data všem účastníkům v síti.

Koncové zařízení (SE2)

AT+NODETYPE=4<CR> # nastavení zařízení na typ spící koncové zařízení
 AT+PANID=0001<CR> # shodné číslo sítě jako SE1
 AT+GROUPID=2000<CR> # nastavení 2. skupiny zařízení
 ATZ<CR> # restart a uložení nastavení,

SE2 je nastaven nyní jen jako posluchač příchozích zpráv.

Koncové zařízení (SE3)

AT+NODETYPE=3<CR> # nastavení zařízení na typ koncové zařízení
 AT+PANID=0001<CR> # shodné číslo sítě jako SE1
 AT+GROUPID=2000<CR> # nastavení 2. skupiny zařízení
 ATO<CR> # vstup do nastavení Data mode
 AT+DESTLA=IEEE koordinátora<CR> # unicast komunikace na adresu koordinátora
 AT+TRANSMITMODE=1<CR> # nastavení trvalé unicast komunikace na def. adresu
 ATZ<CR> # restart zařízení

SE3 je nastaveno na posílání dat do vážící ústředny. Zařízení, která se budou připojovat pod SE1 převezmou jeho parametry komunikace.

Tato nastavení by měla zaručit bezproblémový chod navrhované sítě. Jednotlivé moduly je nyní možné připojit ke konkrétním zařízením a postupně je směrem od koordinátora zapnout. Koordinátor (SE1) založí dle nastavených parametrů síť a zařízení SE2, SE3 se do ní postupně připojí. Nyní je možné z jednotlivých zařízení přenášet data bezdrátově.

Pomocí ATS příkazů jednotlivých S-registrů lze nastavit síť velice podrobně. Registry S11 až S14 konfigurují vlastní zobrazení komunikace, S21-S23 nastavují podrobnosti sítě, S31-S39 nastavují parametry přenosu dat, S51-62 řídí nastavení jednotlivých uzlů. Podrobný popis a rozsahy nastavení lze vyhledat v manuálu RZ. [56] Velikost jednoho přenášeného paketu může být 128 B při nezabezpečeném přenosu, z toho 100 B pro data a 28 B pro hlavičku ZigBee. Při použití síťového šifrovacího klíče je prostor pro data zmenšen o 18 B. Zařízení podporuje tzv. Frequency Agility, což mu umožňuje v případě zarušení nastaveného vysílacího kanálu automaticky přejít na kanál jiný, bez nutnosti restartu komunikace. Pro nastavení XBee modulů lze navíc využít vysílání tzv. API rámců, kterými je možné průběžně měnit či konfigurovat jednotlivá zařízení i bezdrátově.

4.4 Návrh software

Požadavky na aplikaci

Vážící ústředna (programovatelný váhový počítač) představuje hlavní prvek navrhované sítě. Ústředna sama o sobě nabízí základní ovládací prvky vážení a obsluhy připojených příslušenství. Pro návrh aplikace využijeme základních funkcí vážící ústředny. Váha signalizuje řízení nakládání či vykládání komponent dle zadané konkrétní receptury a zaznamenává události spojené s touto operací. Pro bezdrátový přenos dat využijeme stejné hodnoty, které by se standardně zapisovaly na přenosnou paměť při zadání funkce přenosu dat do PC. Tento přenos dat obsahuje záznamy o časovém údaji vážení, kódu přihlášené osoby, kódu místa váhy, kódu receptu a kódu místa vážení (stáje, vepřín apod.). Dále se zde přenáší název a hmotnost vážených komponent, včetně procentuelního výpočtu odchylky od požadované hmotnosti, popis uskutečněné operace (nakládka/vykládka). Zaznamenaná data je nutné do ústředny také zpětně nahrát. Základní parametry navrhované aplikace jsou tedy odvozené ze schopností dané konkrétní vážící ústředny KMV. Návrh aplikace by měl být založen na požadavcích obsluhy zařízení v zemědělském podniku. Aplikace představuje jakýsi manažerský program běžící na PC farmáře.

Typické funkce manažerské farmářské aplikace:

- vytváření a editace databáze komponent,
- vytváření a editace databáze lokací míst vážení, nakládání, vykládání,
- vytváření a editace databáze receptur,
- databáze uskutečněných nakládek a vykládek – historie událostí,
- export a záloha databází,
- zápis receptur na paměťovou patronu, pro manuální přenos dat do ústředny.

Novou funkcí, která musí do programu být implementována, je samostatná část aplikace, která by obhospodařovala bezdrátový přenos dat, řešila nastavení sítě i jednotlivých připojených modulů RZ v síti. V této části aplikace by bylo možné bezdrátově načíst a uložit navážené hodnoty aktuálního vážení, načíst receptury uložené v ústředně, načíst obsah realizovaných činností, nahrát aktualizované receptury zpět do ústředny.

Je nutné přeprogramovat řídicí mikroprocesor vážící ústředny, tak aby svá data správně interpretoval pro přenos dat skrze moduly Zigbee.

Diagram v příloze 5 představuje koncepční model nové části farmářského programu, popisuje, jak by měl probíhat přenos dat mezi vážící ústřednou a centrálním stanovištěm s PC. Nastávají zde situace, kdy chce obsluha váhy začít vážit s aktualizovanou recepturou, potřebuje tak získat data z databáze nových receptur uchovávaných v aplikaci na PC. Zde je nutné na ústředně zvolit funkci pro odeslání žádosti na poslání těchto dat z PC do ústředny, oslovený program načte zadané receptury ze své databáze a obratem je pošle žadateli. Případně zde nastává opačný proces, pokud je obsluha na stanovišti s PC a chce pro další zpracování získat naměřená data z vážící ústředny. Vážící ústředna po přijetí požadavku na odeslání svých dat musí nejprve načíst data uložená v externí paměti a poté je bezdrátově odeslat zpět.

Druhý diagram znázorňuje bezdrátový přenos dat mezi ústřednou a externím displejem, řeší nastavení ústředny před vlastním vážením. Na váze je možné nastavit, zda bude vážit dle receptury nebo jen jednorázově, vykládat či nakládat. V případě práce dle receptury je možné získat nový recept bezdrátově z ústředny, nebo stávající načíst z paměti.

Zvolení sítě a jednotlivých připojených modulů RZ. Je možné zde bezdrátově načíst a uložit navážené hodnoty aktuálního vážení, načíst uložené receptury, editovat receptury, nahrát receptury zpět do vážící ústředny. Do nově vzniklé části programu je možné zakomponovat nastavení sítě pomocí příkazů posílaných jako API rámce. Tímto způsobem je možné realizovat jak bezdrátové nastavení sítě, tak i režim vyžádání dat z druhé strany aplikace.

5. Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat charakteristiku bezdrátové technologie ZigBee, popsat využití této technologie pro senzorové sítě a zmapovat známé aplikace přenosu dat pomocí Zigbee mezi zemědělskými mobilními stroji. V první části práce byl uveden popis technických i softwarových vlastností technologie ZigBee, jenž bylo nutno důkladně nastudovat z dostupné literatury. Nejprve byl představen komunikační standard IEEE 802.15.4 a jeho pomyslné vrstvy síťové architektury. Postupně zde byla uvedena specifika jednotlivých vrstev a komunikace mezi nimi. Takto bylo postupováno až po představení celého ZigBee standardu, který rozšiřuje nejprve popisovaný standard o vyšší vrstvy komunikace. Tato část práce představuje rozsáhlý zdroj teoretických, ale i praktických informací o dané technologii, které bylo nutné uvést pro pozdější správné pochopení dané problematiky.

Navazující druhá kapitola se zabývala senzorickými sítěmi. Byla zde popsána podoba a struktura jednotlivých senzorů, společně s popisem řešení jednotlivých aplikací těchto sítí. Byly představeny konkrétní úlohy s využitím této technologie, kde ZigBee figuruje jako základní prvek bezdrátové komunikace senzorových sítí.

Následující kapitola se orientovala na využití technologie ZigBee jakožto komunikačního prvku v aplikacích zemědělské výroby. Pro tuto část práce bylo nutné zmapovat mnoho vědeckých publikací a prozkoumat řadu již realizovaných řešení ve světě ale i u nás. Tato kapitola přináší ucelený přehled různorodého využití ZigBee a předkládá příklady reálného nasazení této technologie pro odvětví zemědělské techniky.

V závěru práce je uveden návrh řešení bezdrátové sítě založené na ZigBee, vytvořené pro potřeby přenosů dat z mobilních krmných míchacích vozů do jejich příslušenství, případně do centrálního stanoviště se sběrem a manažerským vyhodnocováním přenášených dat. Návrh sítě byl rozpracován do dvou verzí. Byly zvoleny dva odlišné typy hardware, které byly cenově porovnány. V prvním návrhu byl zvolen přenos dat pomocí externích ZigBee převodníků připojených do stávajících vážících ústředí, výstupní signál by byl tak modulován do bezdrátové podoby ZigBee a na druhé straně obdobně přijmut. Tento návrh se však po vyčíslení všech jeho komponent nutných pro realizaci projevil jako neúměrně drahý k výsledku jeho celkové funkce. Toto řešení bylo označeno za nereálné, svou myšlenkou však za konstrukčně funkční.

Druhý návrh se soustředil na porovnání a výběr ZigBee modulu, který by byl vhodný pro celkovou implementaci do jednotlivých zařízení. Z důkladně porovnávaných vestavných ZigBee modulů, dostupných na současném trhu, byl nakonec vybrán prvek firmy Digi s názvem XBee. V návrhu bylo zamýšleno využití jeho dvou odlišných verzí. V práci byl popsán způsob nastavení a realizace zapojení těchto prvků do sítě. Z konceptu navržené sítě vychází v závěru prezentovaný komplexní návrh řešení, kdy je obsluha vážení plně automatizována pomocí sítě ZigBee založené na bezdrátových prvcích XBee. Dále zde

bylo uvedeno kompletní nastavení jednotlivých uzlů navržené sítě, které by mohlo představovat funkční návod pro budoucí realizaci podobné sítě. V poslední části této kapitoly byla popsána koncepční předloha pro naprogramování software, který by představoval manažerskou aplikaci na PC farmáře a obsluhoval tak navržený hardware bezdrátové sítě. Byly zde popsány jeho základní navrhované funkce, řešení jednotlivých částí toho programu bylo schématicky popsáno abstraktními vývojovými diagramy.

Cíl práce byl splněn v plném rozsahu dle zadané metodiky a ve všech bodech její osnovy.

Rozsáhlá teoretická část této práce byla nutná především proto, aby autor práce či později případný čtenář získal kompletní přehled o relativně novém, veřejně méně známém bezdrátovém standardu ZigBee.

Z následujících kapitol pak zřetelně vyplývá, že zemědělství je perspektivním oborem pro využívání této technologie. Spojení popisovaných technologií se zemědělstvím bude mít do budoucna velký potenciál.

Seznam použité literatury

- [1] *ZigBee Alliance* [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://zigbee.org>
- [2] ZigBee Specification. *Document 053474r17*. San Ramon: ZigBee Alliance, Inc., 2008. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/47299139/ZigBee-Specification>
- [3] BRADÁČ, Zdeněk. Bezdrátový komunikační standard ZigBee. *Automatizace*. 2005, roč. 48, č. 4. Dostupné z: <http://automatizace.cz/article.php?a=638>
- [4] HYNIČKA, Ondřej a Karel PAVLATA. Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci. In: *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43411
- [5] FARAHANI, Shahin. *ZigBee wireless networks and transceivers*. Amsterdam: Elsevier; Newnes, 2008, 339 s. ISBN 978-0-7506-8393-7.
- [6] GISLASON, Drew. *Zigbee wireless networking*. Amsterdam: Elsevier / Newnes, c2008, 425 s. ISBN 978-0-7506-8597-9.
- [7] KYSILKA, Radek. ZigBee. In: *Lupa.cz* [online]. 2003 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.lupa.cz/clanky/zigbee/>
- [8] Carrier sense multiple access with collision avoidance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_sense_multiple_access_with_collision_avoidance
- [9] ELAHI, Ata a Adam GSCHWENDER. *ZigBee wireless sensor and control network*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2010, 265 s. ISBN 01-371-3485-1.
- [10] MRÁZ, Lubomír. IEEE 802.15.4/ Zigbee. In: *Aminawson.org* [online]. 2010 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.aminawson.org/cs/tutorial/ieee802154-zigbee.html>
- [11] KOTON, J., P. ČÍKA a V. KŘIVÁNEK. Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee. In: *Access.feld.cvut.cz* [online]. 2006 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>
- [12] LABIOD, H. et al. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX*. Dordrecht: Springer, c2007, 316 s. ISBN 978-1-4020-5396-2. Dordrecht: Springer, c2007, 316 s. ISBN 978-1-4020-5396-2.
- [13] ZigBee e-learning Course. *Jenic.com* [online]. 2007 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.jenic.com/elearning/zigbee/index.htm>
- [14] DAEMEN, Joan. *The design of Rijndael: AES - the Advanced Encryption Standard*. Berlin: Springer, 2002, 238 s. ISBN 35-404-2580-2.

- [15] Advanced Encryption Standard (AES). In: *Federal Information Processing Standards Publication 197* [online]. Department of Commerce/N.I.S.T, 2001 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace. In: *HW.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://hw.cz/Rozhrani/ART1299-ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>
- [17] MORAIS, R. et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2008, roč. 62, č. 2, s. 94-106 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [18] VOJÁČEK, Antonín. Bezdrátová komunikace ZigBee a obvody Freescale. In: *HW.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/bezdratova-komunikace-zigbee-a-obvody-freescale.html>
- [19] TRCHALÍK, R. a P. OČENÁŠEK. Zigbee Gateways, In: Proceedings of the 12th Conference STUDENT EEICT 2006, Brno, CZ, FEKT VUT, 2006, s. 410-414, ISBN 80-214-3163-6
- [20] ZigBee Standards. *ZigBee gateway*. San Ramon: ZigBee Allience, 2011. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/Standards/ZigBeeNetworkDevices/download.aspx>
- [21] XU, Yurong. *Anchor-Free Localization in Mixed Wireless Sensor Network Systems* [online]. Hanover, 2008 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.cs.dartmouth.edu/reports/TR2008-626.pdf>. Disertační. Dartmouth College.
- [22] DULMAN, Stefan. Localization protocols for wireless sensor networks. In: *Docstoc.com* [online]. 2010 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.docstoc.com/docs/42224482/Localization-protocols-for-wireless-sensor-networks>
- [23] WANG, Ning et al. Wireless sensors in agriculture and food industry-Recent development and future perspective. In: *Sciencedirect.com* [online]. 2005 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169905001572>
- [24] KUBÍČEK, Petr et al. Využití bezdrátových senzorových sítí v zemědělství a jejich kartografická vizualizace. In: Geografie pro život ve 21. století: Sborník příspěvků z XXII. sjezdu České geografické společnosti pořádaného Ostravskou univerzitou v Ostravě 31. srpna - 3. září 2010. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2010. ISBN 978-80-7368-903-2, s. 325-334. 2010, Ostrava.
- [25] PANCHARD, Jacques. *Wireless sensor networks for marginal farming in india* [online]. Lausanne, 2008 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://commonsense.epfl.ch/Resources/thesis.pdf>. Dizertační práce. EPFL.
- [26] AQEEL-UR-REHMAN, et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. In: *Computer standards* [online]. 2011 [cit. 2012-03-18]. ISSN

0920-5489. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548911000353>

[27] HAMOUZ, Pavel a Josef SOUKUP. Precizní zemědělství v oblasti regulace zaplevelení. In: *Vědecký ústav fytoosanitární a životního prostředí* [online]. 2006 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: http://www.phytopsanitary.org/projekty/2005/VVF_08_2005.pdf

[28] *Cartographic visualization of agricultural sensor based information* [online]. 2008 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: www.agrisensor.geogr.muni.cz

[29] SENSOR WEB ENABLEMENT. *Open Geospatial Consortia* [online]. 2005 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.opengeospatial.org/>

[30] PERES, Emanuel et al. An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture. In: *Computers and electronics in agriculture* [online]. 2011 [cit. 2012-03-18]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911001529>

[31] *Camalie networks LLC* [online]. 2008 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://camalienetworks.com/>

[32] ESCOLAR DÍAZ, Soledad et al. A novel methodology for the monitoring of the agricultural... *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2011, roč. 76, č. 2, s. 252-265 [cit. 2012-03-19]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911000548>

[33] ZERGER, A. et al. Environmental sensor networks for vegetation, animal and soil sciences. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2010, roč. 12, č. 5, s. 303-316 [cit. 2012-03-19]. ISSN 0303-2434. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243410000504>

[34] KROULÍK, Milan. Senzory pro měření půdních vlastností. In: *Agroweb.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: http://www.agroweb.cz/Senzory-pro-mereni-pudnich-vlastnosti__s1643x58648.html

[35] KAEMARUNGS, Kamol. Development and Deployment of ZigBee Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture in Sugarcane Field. In: *Asia Pacific Advanced Network* [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.apan.net/meetings/ChiangMai2012/Session/Agri/APAN2012KamolAGWG.pdf>

[36] NIZAR HARUN, Ahmad. *Wireless Sensor Network In Agriculture*. Malaysia, 2010. Dostupné z: http://pesona.mmu.edu.my/~hairul/files/MIMOS/WSN_Nizar.pdf

[37] Waspote - The Sensor Device. *Libelium.com* [online]. 2011 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.libelium.com/products/waspote>

[38] LINDA, Miloslav a M. HROMASOVÁ. Problémy s použitím snímačů v precizním zemědělství. *AgriTech Science* [online]. 2011, roč. 13, č. 2, s. 1-5 [cit. 2012-03-19]. ISSN 1802-8942. Dostupné z: <http://www.agritech.cz/clanky/2011-2-2.pdf>

- [39] *ISOBUS Data Dictionary according to ISO 11783-11* [online]. 2010 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://dictionary.isobus.net/isobus/>
- [40] KOVAŘÍČEK, Pavel a Marcela VLÁŠKOVÁ. Perspektivy zemědělské informatiky. In: *Http://svt.pi.gin.cz/* [online]. 2001 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: http://svt.pi.gin.cz/vuzt/poraden/doporuc/r_vyr/kovarice/informat.htm
- [41] PEETS, Sven. Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2012, č. 81, s. 104-112 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911002675>
- [42] NIKKILÄ, Raimo et al. Software architecture for farm management information systems in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2010, roč. 70, č. 2, s. 328-336 [cit. 2012-03-19]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909001859>
- [43] IFTIKHAR, Nadeem a Torben Bach PEDERSEN. Flexible exchange of farming device data. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2011, roč. 75, č. 1, s. 52-63 [cit. 2012-03-19]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910001894>
- [44] MAYER, Henning Jürgen a Christian RUSCH. Self-configuring, Mobile Networks in the Area of Agriculture. In: *1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008* [online]. 2008 [cit. 2012-03-9]. Dostupné z: www.mcg.ethz.ch/papres/Meyer_15.pdf
- [45] BENEŠ, Petr. Kdy začíná budoucnost?. In: *Casefan.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-03-9]. Dostupné z: <http://www.casefan.cz/kdy-zacina-budoucnosti-v-roce-2011-1>
- [46] HUIRCÁN, Juan Ignacio et al. ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2010, roč. 74, č. 2, s. 258-264 [cit. 2012-04-01]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910001584>
- [47] NADIMI, E.S. et al. ZigBee-based wireless sensor networks for monitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2008, roč. 61, č. 2, s. 79-87 [cit. 2012-04-01]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907002013>
- [48] NADIMI, E.S. et al. ZigBee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees. *Biosystems Engineering* [online]. 2008, roč. 100, č. 2, s. 167-176 [cit. 2012-04-01]. ISSN 1537-5110. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511008000834>
- [49] NADIMI, E.S. a H.T. SØGAARD. Observer Kalman filter identification and multiple-model adaptive estimation technique for classifying animal behaviour using wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2009, roč.

- 68, č. 1, s. 9-17 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909000647>
- [50] NADIMI, E.S. et al. Monitoring and classifying animal behavior using ZigBee-based mobile ad hoc wireless sensor networks and artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2012, roč. 82, č. 1, s. 44-54 [cit. 2012-04-01]. ISSN 0168-1699. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911003206>
- [51] Dinamica Generale - Accessories. *Dinamicagenerale.com* [online]. 2010 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.dinamicagenerale.com/dgportal/index.php>
- [52] RF Datalink. *Digi-star.com* [online]. 2007 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z:
<http://www.digi-star.com/products/index.php?cid=3&pid=26>
- [53] *PTM - Pese Technologie Misure* [online]. 2011 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z:
<http://www.ptmsrl.com/index.php>
- [54] *Avery Weigh-Tronix* [online]. 2011 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z:
<http://www.agscales.com/>
- [55] ZigBee Solution. *Sena.com* [online]. 2011 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z:
http://www.sena.com/products/industrial_zigbee/index.php?tab_menu=Serial
- [56] SENA TECHNOLOGIES, Inc. *ProBee-ZS10 User Guide*. Korea, 2010. Dostupné z:
http://www.sena.com/download/manual/manual_probee_zs10-v1.5.pdf
- [57] ZELINKA, Tomáš a Miroslav SVÍTEK. *Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 218 s. ISBN 978-80-247-3232-9 (BROŽ.).
- [58] Zigbee chip comparison. In: *Freaklabs - Open Source Wireless* [online]. 2010 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z:
http://freaklabs.org/images/stories/blog/zigbee_chip_comparison.pdf
- [59] ZigBee Modules and Mesh Modules. *Digi International Inc.* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/>

Seznam obrázků

OBR. 1 STRUKTURA ZIGBEE [5]	3
OBR. 2 SCHÉMA TOPOLOGIE A) PEER TO PEER B) HVĚZDA [5].....	6
OBR. 3 BEACON-ENABLED / NON-BEACON-ENABLE[VLASTNÍ]	7
OBR. 4 OBSAH SUPER-RÁMEC [5]	8
OBR. 5 DATA ODESÍLÁ KOORDINÁTOR DO ZAŘÍZENÍ [VLASTNÍ].....	10
OBR. 6 DATA ODESÍLÁ KOORDINÁTOR DO ZAŘÍZENÍ [VLASTNÍ].....	10
OBR. 7 STRUKTURA PAKETU NA FYZICKÉ VRSTVĚ – PPDU [VLASTNÍ].....	12
OBR. 8 ZAPOUZDŘENÍ DAT V RÁMCI JEDNOTLIVÝCH VRSTEV [VLASTNÍ].....	13
OBR. 9 STRUKTURA MEZIVRSTEV NAD FYZICKOU VRSTVOU [5].....	13
OBR. 10 DIAGRAM KOMUNIKACE UZLŮ S PRIMITIVY FYZICKÉ VRSTVY [VLASTNÍ].....	14
OBR. 11 DIAGRAM PŘENOSU PARAMETRŮ KOMUNIKACE [VLASTNÍ].....	15
OBR. 12 MĚŘENÍ DOSTUPNOSTI KANÁLU S VYUŽITÍM ŘÍDÍCÍCH PRIMITIV [VLASTNÍ].....	15
OBR. 13 VÝMĚNA DAT Z POHLEDU SÍŤOVÉ VRSTVY [VLASTNÍ].....	18
OBR. 14 SCHÉMA TOPOLOGIE STROM (TREE) [5].....	24
OBR. 15 A) BROADCAST, B) MULTICAST C) UNICAST [5]	24
OBR. 16 MULTICAST VYSÍLÁNÍ [5]	25
OBR. 17 KOMUNIKACE MANY-TO-ONE [5].....	26
OBR. 18 STRUKTURA APLIKAČNÍ VRSTVY [5]	29
OBR. 19 SCHÉMA WSN PRECIZNÍCH VINIC [17].....	33
OBR. 20 SCHÉMA UZLU WSN [10].....	34
OBR. 21 STRUKTURA PROJEKTU AGRISENSOR [28]	37
OBR. 22 SCHÉMA ROZLOŽENÍ UZLŮ WSN [17]	38
OBR. 23 OBECNÁ STRUKTURA UZLU WSN V ZEMĚDĚLSTVÍ [36]	39
OBR. 24 MULTIFUNKČNÍ JEDNOTKA WASPMOTE [37].....	40
OBR. 25 MANUÁLNÍ PŘENOS DAT POMOCÍ DTM [54].....	43
OBR. 26 PROBEE-ZS10 A SCHÉMA ULOŽENÍ [VLASTNÍ].....	45
OBR. 27 SCHÉMA NAVRŽENÉ SÍTĚ [VLASTNÍ].....	46
OBR. 28 MODULY XBEE ZB.....	48
OBR. 29 STRUKTURA KOMPLEXNÍ SÍTĚ ZALOŽENÍ NA XBEE [59].....	50

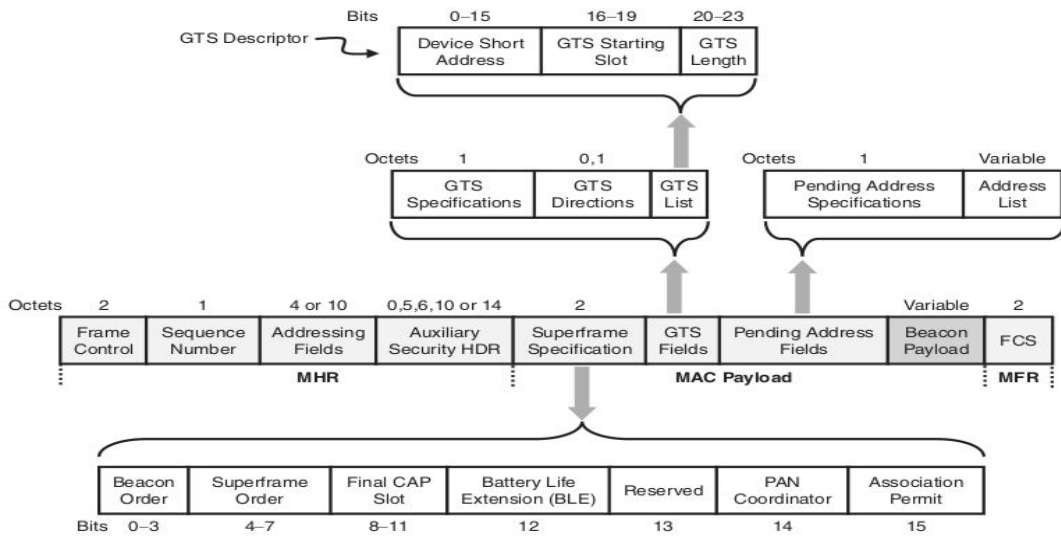
Seznam tabulek

TAB. 1 FREKVENČNÍ KANÁLY IEEE802.15.4 [VLASTNÍ]	4
TAB. 2 VLASTNOSTI MODULU PROBEE-ZS10	45
TAB. 3 CENOVÁ KALKULACE HARDWARE 1.....	47
TAB. 4 PARAMETRY MODULŮ XBEE	49
TAB. 5 CENOVÁ KALKULACE HARDWARE 2.....	50

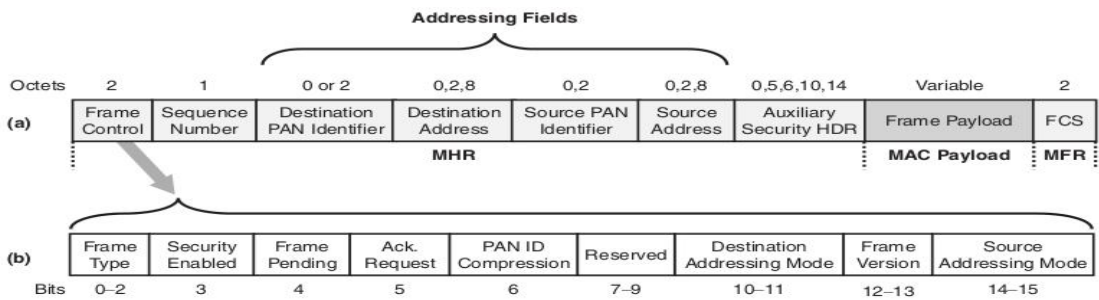
Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 STRUKTURA RÁMCŮ IEEE 802.15.4	II
PŘÍLOHA 2 POROVNÁNÍ ZIGBEE MODULŮ	IV
PŘÍLOHA 3 SENA PROBEE ZS10.....	VI
PŘÍLOHA 4 ROZLOŽENÍ PINŮ NA MODULU XBEE	VII
PŘÍLOHA 5 DIAGRAM APLIKACE FARMÁŘ	VIII

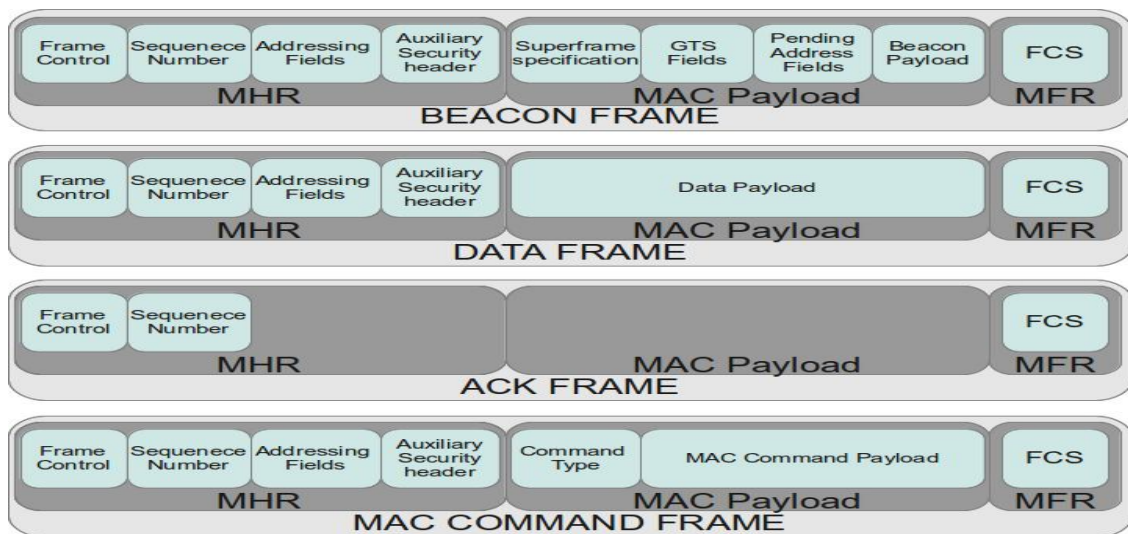
Příloha 1 Struktura rámců IEEE 802.15.4



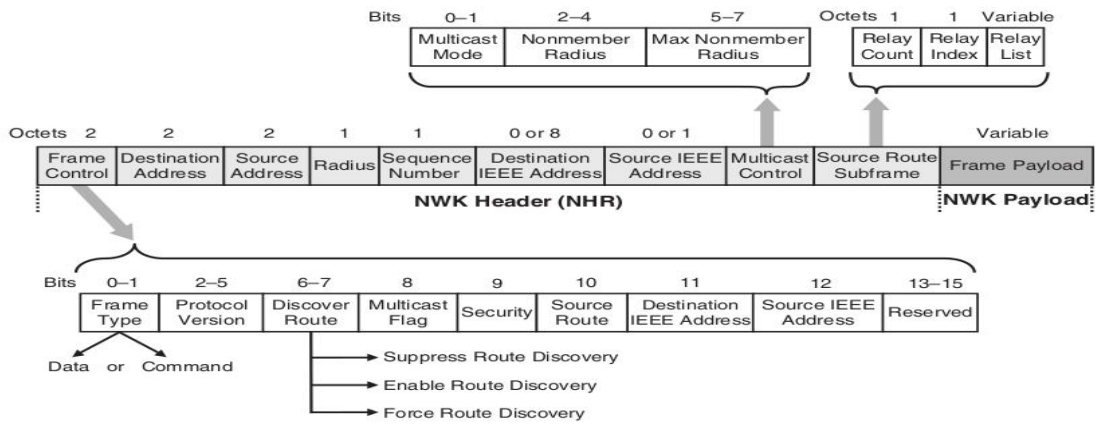
Struktura Beacon paketu [5]



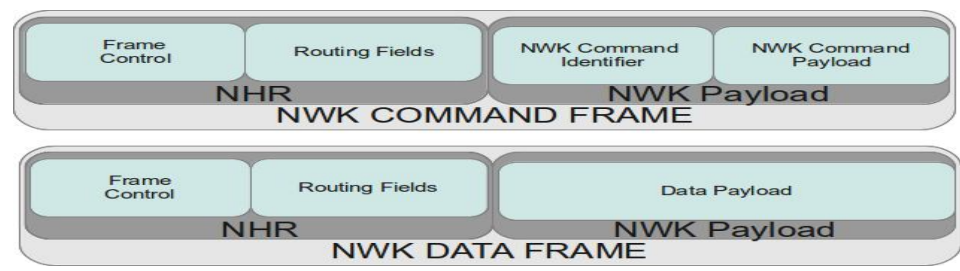
a) Základní tvar MAC rámce b) Podvrstva pole Frame Control [5]



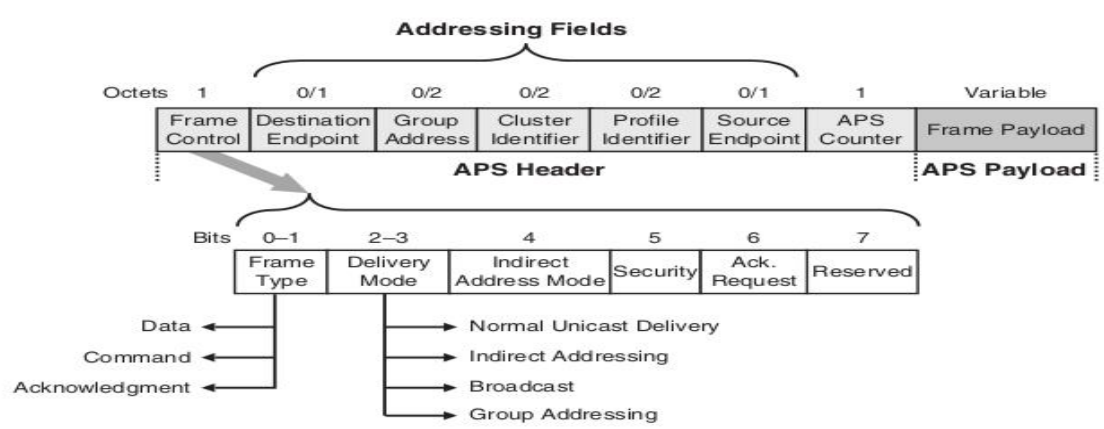
Struktura MAC rámců [vlastní]



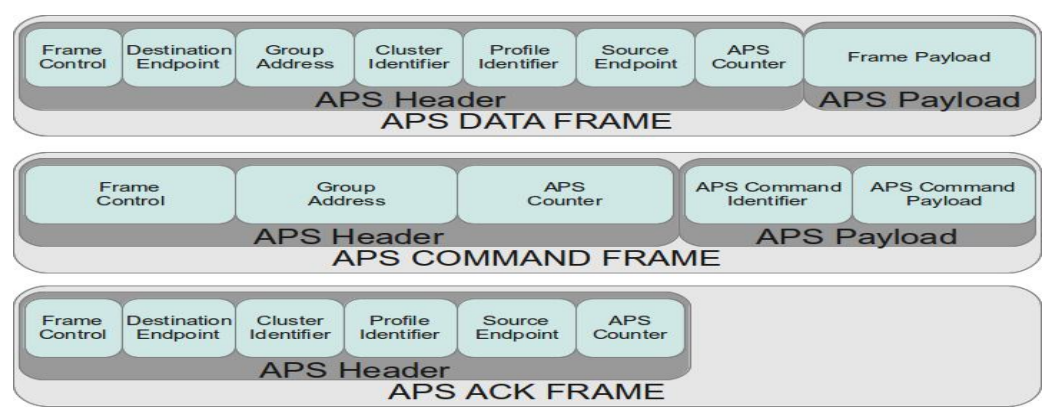
Struktura NWK Protocol Data Unit (NPDU) [5]



Typy rámců NWK vrstvy[vlastní]



Základní tvar APS rámců [5]



Druhy rámců na úrovni APS [vlastní]

Příloha 2 Porovnání ZigBee modulů

Název	ProBee-ZS10	DRF1601	Z4-L2	RC2200DK-SPP10	ZB-2550	RS232 Zigbee	Zigbee-101A	ZigBee802
Výrobce	Sena	DTK Electronic	Ubiquitous Connect	Radiocradls	ICP D.A.S	Prisma Sense	Cooldrives	General Communications
Provedení	adapter	vestavný	adapter	vestavný	box	vestavný	box	box
Čip	SIP - Ember EM250	SIP - TI CC2530F256	SIP - TI CC2530	MCU AVR ATmega 128L + RF Chipcon CC2419	8 B MCU	Digi XBee-PRO ZB	x	Digi XBee-PRO
	12 MHz, 5 kB RAM, 128 kB Flash	8 kB RAM, 256 kB Flash	8 kB RAM, 256 kB Flash	16 MHz, 8 kB RAM, 128 kB Flash	x	2 kB RAM, 32 kB Flash	x	x
IEEE 802.15.4 protokol	ZigBee 2007/PRO	Z-Stack	ZigBee Pro	Z-Stack	x	ZigBee 2007/PRO	x	x
Frekvence [GHz]	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Modulace	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS
Kanály	14	16	x	16	16	12	x	16
Šifrování	128 b - AES	128 b - AES	130 b - AES	131 b - AES	132 b - AES	133 b - AES	134 b - AES	135 b - AES
Přenosová rychlost [Kbps]	250	250	250	250	250	250	250	250
Přijímací citlivost [dBm]	-102	-95	-95	-94	-102	-102	-102	-96
Výsílací výkon [dB]	18	4.5	4	0	9	18	12	4
Max spotřeba při vysílání [mA]	200	35	35	30	x	205	x	35
při příjmu [mA]	55	25	25	27	x	47	x	38
při spánku [μA]	<5	x	1	1.3	x	3.5	x	1
Podporované režimy přenosu	unicast, broadcast, multicast, many to one	unicast, broadcast	Point to Multi point	unicast, broadcast	unicast, multicast, broadcast	unicast, multicast, broadcast	x	x
Nastavení	AT příkazy, ProBee manager, vyzášená konfigurace	AT příkazy omezující manager	ZigBee Manager	AT příkazy	manager ICP D.A.S Utility	Digi Manager	Windows Utility	AT příkazy, API
Anténa + konektor	externí + RP-SMA	externí + RP-SMA	externí + RP-SMA	integrovaná	externí	externí + U.FL RF	externí	externí + RP-SMA
Připrogramování	Pouze firmware změna	JTAG, CC debugger	x	JTAG, ISP, bez licence na stack	x	JTAG	x	x
Pořizovací cena [8]	59	20	x	150	299	x	129	187
Pořizovací cena [Kč]	1062	360	x	2700	5382	x	2322	3366

Název	JN5148 001-M /00/03/04	Jenaić	XBee-PRO ZB SMT - Standard / Programmable	RC24 Lx / HP	RP-M100 / FZ750BS	ZigBee ATZB-24-A2	ZEBRA	ZPMG570	OZS311	MRF24J40MA	ETRX2
Výrobce			Digi	Radiocradfs	Formtech	MeshMetrics	Electronic Laden	RFM	ConnectBlue	Microchip	Telegesis
Čip / MCU	32bit RISC CPU, 128 kB RAM, 128 kB ROM, 128 kB RAM, 4 Mb flash pro program.		Ember em357-192 kB Flash, 12 kB RAM, +MC9S08QE2 50,33 MHz, 32 kB Flash, 2 kB RAM	8 kB RAM, 256 kB Flash, + 4 kB EEPROM, 32 MHz	x	MCU ATmega 1281, 128 kB Flash, 8 kB RAM, 16 MHz, 4 kB EEPROM, RF Atmel AT86RF230	MCU Freescale HC308, RF Freescale MC13192	Ember EMS570, 192 kB Flash, 12 kB RAM, 24 MHz, 1 MB data Flash	MCU ATmega 1281, 128 kB Flash, 8 kB RAM, 16 MHz, 4 kB EEPROM, RF Atmel AT86RF230	ponuze RF MRF24J40-I/ML bez MCU	Ember EM230128 kB Flash, 5 kB RAM
IEEE 802.15.4 stack	jenNet, jenNet-IP and ZigBee PRO		EmberZNet PRO	ZigBee PRO + Smart Energy ZNME SE	ZigBee 2006	BitCloud, eZeeNet, OpenMAC	SMAC, ZigBee Stack	EmberZNet PRO		ZigBee, MWHL, MWHP2P	EmberZnet
Frekvence [GHz]	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5
Modulace	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	DSSS	0-QPSK	DSSS
Kanály	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Šifrování	128 bit, AES	128 bit, AES	128 bit, AES	129 bit, AES	x	129 bit, AES	x	128-bit AES	x	128-bit AES	128-bit AES
Přenosová rychlost [Kbps]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Dosah uvnitř / venku [km]	1 / 1 / 4	90 m / 3,2 km	200 m / 1 km	200 m / 1 km	120 m	100m	10-500 m	x	100 m	x	x
Anténa + konektor	integ / uFI / uFL	PCB, U FL, RF PAD	integ / U FL	integ / U FL	integ / u FL	integ	integ	integ	integ	integ	integ / U FL
Přijímací citlivost [dBm]	-95 / 98	-102	-97 / -99	-98	-98	-101	-92	-99	-101	-95	-98
Výšibací výkon [dBm]	2,5 / 20	18 při 0,3 mW	4 / 20	6,10	6,10	3	3	5	3	0	3
Max spotřeba při vysílání [mA]	15 / 110	110 / 114	34 / 175	38	25	19	x	31	27	23	x
při příjmu [mA]	17,5 / 23	31 / 45	24 / 27	25	2	< 6	3	25	16	19	x
při spánku [mA]	1,3 / 2,6	< 1 / 1,5	0,4 / 1,0	2	2	3,0 - 3,6	2,0 - 3,4 V	1	x	2	x
Napájení [V]	2,7 - 3,6	2,7 - 3,7	2,0 - 3,6	3,3	3,3	3,0 - 3,6	2,0 - 3,4 V	2,1 - 3,6	3,3 - 5,5	2,4 - 3,6	2,1 - 3,6
Rozměry [mm]	18x32/50/41	22x24x3	16,5 x 35,6 x 3,5	17,9x14,9x2,6 / 20,54x27,2x2,6	24x13,5x2	16x13	16x13	27,20x14,75x2,90	23x36x3,1	22,9x33,0	37,5x20,5
Nastavení	Flash Programmer	API, AT, X-CTU	ZNME-CTTool, AT	AT příkazový	bootloader, AT	x	x	x	AT příkazový	AT příkazový	AT příkazový
Teplotní rozsah [°C]	-40 .. +85	-40 .. +85	-30 .. +85	-30 .. +80	-40 .. +85	-40 .. +85	-40 .. +85	-40 .. +85	x	-40 .. +85	-40 .. +86
Vstupy / výstupy	4x12bit ADC / 2x 12bit DACs, 2 UART, 5 SPI	4x10bit ADC, 1xSD	15 IO, 12bit ADC, GPIO	UART, ADC, KEY, GPIO	SPI, UART, I2C, GPIO, 5x ADC	x	x	SPI, UART, I2C, GPIO, 6x 14-bit ADC	x	4 SPI, UART	SPI, UART, GPIO
Pořizovací cena [€]	25 euro	28,5	x	27 euro	26	110	25 euro	25 euro	50	19	20,5
Pořizovací cena [Kč]	450	513	x	675	468	1980	625	625	900	342	370

Příloha 3 Sena PROBee ZS10

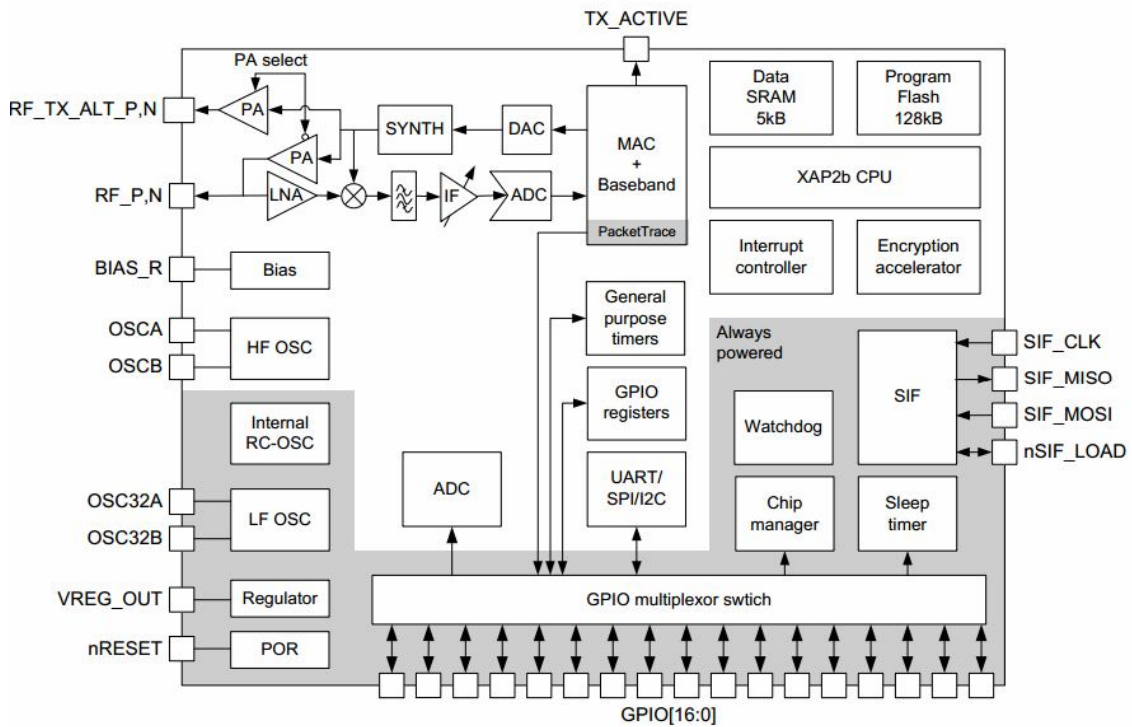


Schéma čipu Ember EM250 [56]

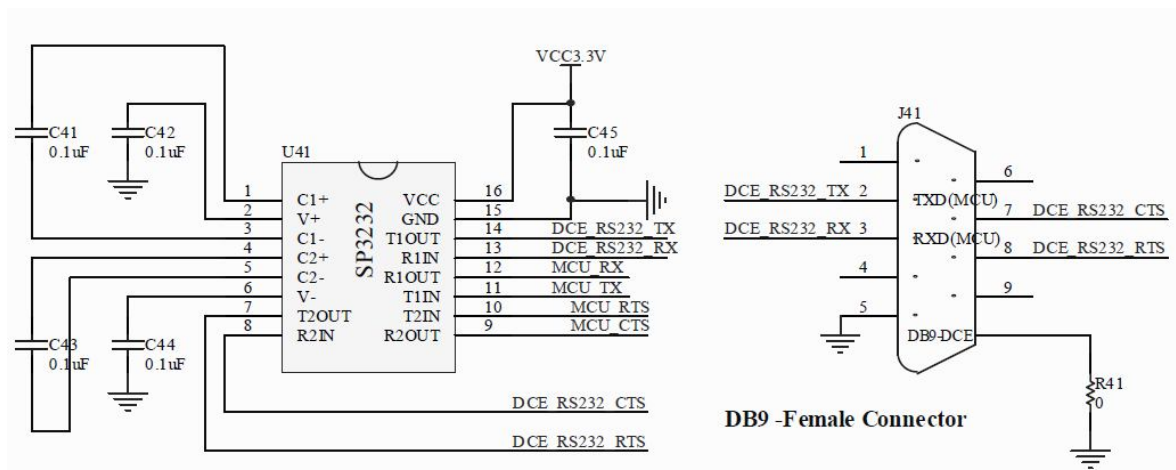
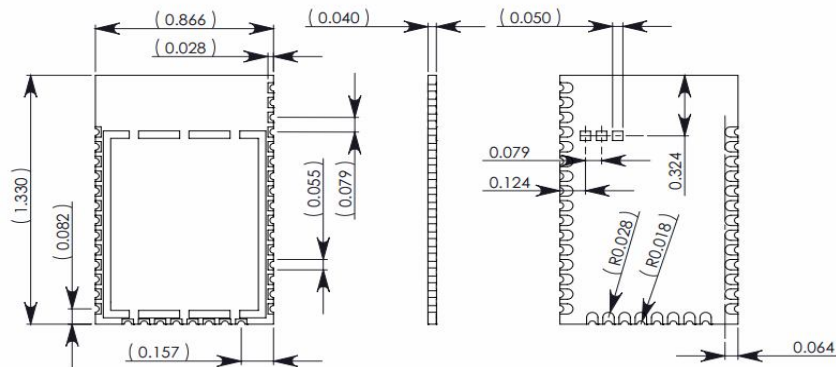


Schéma zapojení převodníku v modulu RS-232 [56]

Příloha 4 Rozložení pinů na modulu XBee



Modul XBee ZB-PRO SMT [59]

Pin #	Name	Direction	Default State	Description
1	GND	-	-	Ground
2	VCC	-	-	Power Supply
3	DOUT / DIO13	Both	Output	UART Data Out / GPIO
4	DIN / CONFIG / DIO14	Both	Input	UART Data In / GPIO
5	DIO12	Both		GPIO
6	RESET	Input		Module Reset
7	RSSI PWM / DIO10	Both	Output	RX Signal Strength Indicator / GPIO
8	PWM1 / DIO11	Both	Disabled	Pulse Width Modulator / GPIO
9	[reserved]	-	Disabled	Do Not Connect
10	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Both	Input	Pin Sleep Control Line / GPIO
11	GND	-	-	Ground
12	SPI_ATTEN / BOOTMODE / DIO19	Output	Output	Serial Peripheral Interface Attention Do not tie low on reset
13	GND	-	-	Ground
14	SPI_CLK / DIO18	Input	Input	Serial Peripheral Interface Clock / GPIO
15	SPI_SSEL / DIO 17	Input	Input	Serial Peripheral Interface not Select / GPIO
16	SPI_MOSI / DIO16	Input	Input	Serial Peripheral Interface Data In / GPIO
17	SPI_MISO / DIO15	Output	Output	Serial Peripheral Interface Data Out / GPIO
18	[reserved]*	-	Disabled	Do Not Connect
19	[reserved]*	-	Disabled	Do Not Connect
20	[reserved]*	-	Disabled	Do Not Connect
21	[reserved]*	-	Disabled	Do Not Connect
22	GND	-	-	Ground
23	[reserved]	-	Disabled	Do Not Connect
24	DIO4	Both	Disabled	GPIO
25	CTS / DIO7	Both	Output	Clear to Send Flow Control / GPIO
26	ON / SLEEP / DIO9	Both	Output	Module Status Indicator / GPIO
27	VREF	Input	-	Not used for EM357. Used for programmable secondary processor. For compatibility with other XBee modules, we recommend connecting this pin to the voltage reference if Analog Sampling is desired. Otherwise, connect to GND.
28	ASSOCIATE / DIO5	Both	Output	Associate Indicator / GPIO
29	RTS / DIO6	Both	Input	Request to Send Flow Control / GPIO
30	AD3 / DIO3	Both	Disabled	Analog Input / GPIO
31	AD2 / DIO2	Both	Disabled	Analog Input / GPIO
32	AD1 / DIO1	Both	Disabled	Analog Input / GPIO
33	AD0 / DIO0	Both	Input	Analog Input / GPIO
34	[reserved]	-	Disabled	Do Not Connect
35	GND	-	-	Ground
36	RF	Both	-	RF IO for RF Pad Variant
37	[reserved]	-	Disabled	Do Not Connect

Příloha 5 Diagram aplikace Farmář

