
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

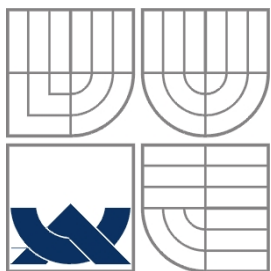
IMPLEMENTACE ZigBee ZAŘÍZENÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

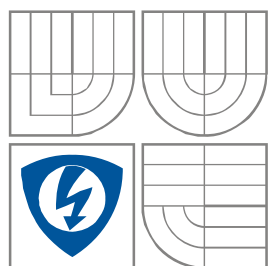
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN ZATLOUKAL

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

IMPLEMENTACE ZigBee ZAŘÍZENÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

THE IMPLEMENTATION OF ZigBee DEVICE IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN ZATLOUKAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Zatloukal
Bytem: Bzenecká 8, Brno, 628 00
Narozen/a (datum a místo): 18. září 1985 v Boskovicích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Implementace ZigBee zařízení v automobilovém průmyslu

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- | | | |
|--|---|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> v tištěné formě | – | počet exemplářů: 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> v elektronické formě | – | počet exemplářů: 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje možnosti využití ZigBee komunikačního protokolu v automobilovém průmyslu, dopravě a logistice. Dále se zabývá způsoby zavedení tohoto protokolu do praxe, včetně řešení typických případů, návrhem a realizací potřebných elektronických zařízení a modulů, sestavením řídicího software a pokusnými měřeními těchto zařízení v reálném provozu.

V první části práce jsou připomenuty základní vlastnosti a parametry ZigBee. Následuje pojednání o možnostech využití ZigBee komunikátorů a jsou nastíněny způsoby jeho začlenění do praxe.

Druhá část práce se věnuje rozboru konstrukce ZigBee systému pro datové přenosy se zaměřením na infrastrukturu, vytvoření schématu komunikačního systému a předběžnému návrhu blokových schémat jeho dílčích členů.

Ve třetí části následuje konkretizace požadovaných funkcí a vlastností jednotlivých členů komunikačního systému a popis jejich hardware realizace.

Čtvrtá část pojednává o vývoji software pro řízení komunikace, připojení a řízení funkce pomocí PC a příslušných programů, použití X-CTU firmy MaxStream pro nastavení čipu XBee a AVR studio 4 firmy Atmel pro nastavení procesoru ATmega16.

Poslední část je věnována kompletaci hardware a software, pokusům s několika členy sítě v laboratorních podmínkách a ukázkám z měření dosahu ve skutečném provozu.

Abstract

This bachelor's thesis describes possibilities of usage of ZigBee communication protocol in automotive industry, transport and logistics. Thesis also deals with ways of practical implementation of ZigBee protocol including typical cases solutions, designing and realization of necessary electrotechnical devices and modules followed by compilation of control software and experimental measurements of these devices in real traffic flow.

In the first part of thesis, there are some basic features and parameters of ZigBee reminded, followed by ways of ZigBee communicator usage description and adumbrating how to perform integration with existing practical systems.

The second part is about analysis of ZigBee data system construction, communication system scheme design and pre-projection of block schemes of its particular cells.

The third part concretizes requested functions and features of these cells and describes ways of its hardware realization.

The fourth section describes controlling software design, connection and controll of functions using PC and additional programs, using of X-CTU software offered by MaxStream Company to set up XBee parameters and using of AVR Studio 4 offered by Atmel Company to set up ATmega16 processor.

The last part is taken by completion of hardware and software, tests with a few of XBee chips and network nodes in laboratory conditions and examples from the real traffic range measurement.

Klíčová slova

ZigBee, Ethernet, XBee, MaxStream, Radiocrafts, komunikační schéma, přijímač infrastruktury, přijímač automobilu, mobilní vysílač, zdrojový kód, sériové programování, AT mód, API mód, transparentní mód, paket, datový tok, Terminal, rámec, vysílání, komunikace.

Keywords

ZigBee, Ethernet, XBee, MaxStream, Radiocrafts, communication scheme, infrastructure receiver, car receiver, mobile transmitter, source code, serial programming, AT mode, API mode, Transparent mode, packet, data flow, Terminal, frame, broadcasting, communication.

Bibliografická citace

ZATLOUKAL, M. *Implementace ZigBee zařízení v automobilovém průmyslu: bakalářská práce*.
Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 52 s., 5 příl.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Implementace ZigBee zařízení v automobilovém průmyslu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Prokopci, Ph.D. a vedoucímu projektu Car2X z oddělení Zvláštní projekty elektrostrategie a výzkumu ve Škoda Auto, Michalu Slavíkovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah:

1. Standard ZigBee a možnostmi jeho využití v praxi	3
1.1. Funkce ZigBee zařízení.....	3
1.1.1. Obecný popis.....	3
1.1.2. Charakteristické parametry	4
1.1.3. Tvorba sítě.....	4
1.1.4. Princip komunikace.....	4
1.2. Použití zařízení v automobilovém průmyslu.....	5
1.2.1. Komunikace s jinými automobily (Car 2 Car Communication)	5
1.2.2. Komunikace s infrastrukturou (Car 2 Infrastructure Com.).....	8
1.3. Převodník ZigBee to Ethernet	9
1.4. Hardware (Access Point).....	9
1.4.1. XBee.....	9
1.4.2. RC 220x.....	10
1.5. Shrnutí základních poznatků	11
2. Řešení problému - návrh komunikačního řetězce.....	12
2.1. Přijímač infrastruktury	13
2.2. Přijímač automobilu	14
2.3. Mobilní vysílač.....	14
3. Realizace Přijímače infrastruktury	16
3.1. Schéma zapojení.....	16
3.2. Deska plošných spojů.....	17
3.3. Osazení DPS.....	18
3.4. Výsledný modul Přijímače infrastruktury	19
4. Vývoj SW	20
4.1. AVR Studio	20
4.1.1. Zdrojový kód	20
4.1.2. Sériové programování	21
4.2. Nastavení čipu XBee	22
4.2.1. AT mód	22
4.2.2. API mód	22
4.2.3. Transparentní mód.....	23
4.2.4. Paketování	23
4.2.5. Datový tok.....	23
4.3. Nastavení v X-CTU.....	24
4.4. Zahájení komunikace	26
4.4.1. Terminal	26
4.4.2. Předávání rámců.....	26
4.4.3. Vysílání přijatých rámců	27

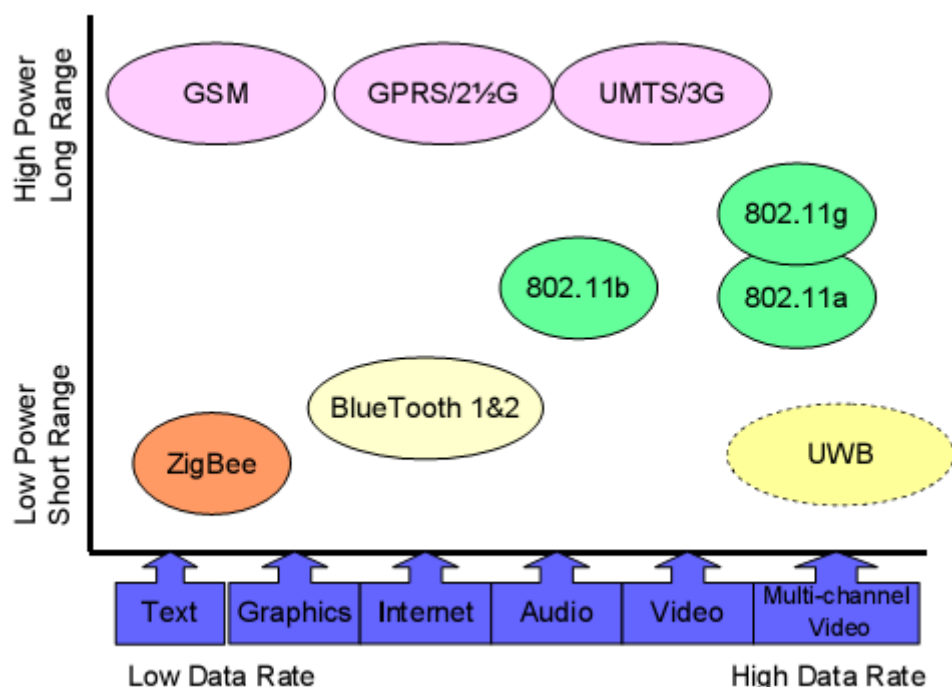
4.5. Komunikace s více PC	27
5. Výsledky práce.....	29
5.1. Měření v provozu	29
5.2. Závěrečné hodnocení.....	30
5.3. Další cíle.....	31
Použité informační zdroje	32
Seznam příloh	36

1. Standard ZigBee a možnostmi jeho využití v praxi

V posledních letech dochází k prudkému rozvoji komunikačních systémů - systémů pro přenos dat. Tato zařízení si rychlým tempem dobývají místo ve společnosti, a to především díky klesající ceně a zavádění nových technologií a postupů skýtajících takřka neomezené možnosti. Se vznikem nových možností získávají zařízení pro přenos dat stále nová uplatnění ve všech možných oblastech lidského počínání. V této práci se budu zabývat jedním z relativně čerstvých produktů na trhu – zařízením ZigBee, později konkrétně jeho použitím v komunikaci automobilu s infrastrukturou.

1.1. Funkce ZigBee zařízení

Přestože se tato zařízení objevila na světovém trhu poměrně nedávno, byla již o nich vypracována spousta materiálů, hodnocení a podrobných charakteristik. Nebudu zde rozvádět detaily funkce, místo toho se pokusím stručně shrnout nejdůležitější poznatky, a parametry, kterými se liší od podobných zařízení a možnosti využití se zaměřením na automobilový průmysl.



obr. 1 – systémy pro přenos dat (převzato z [3])

1.1.1. Obecný popis

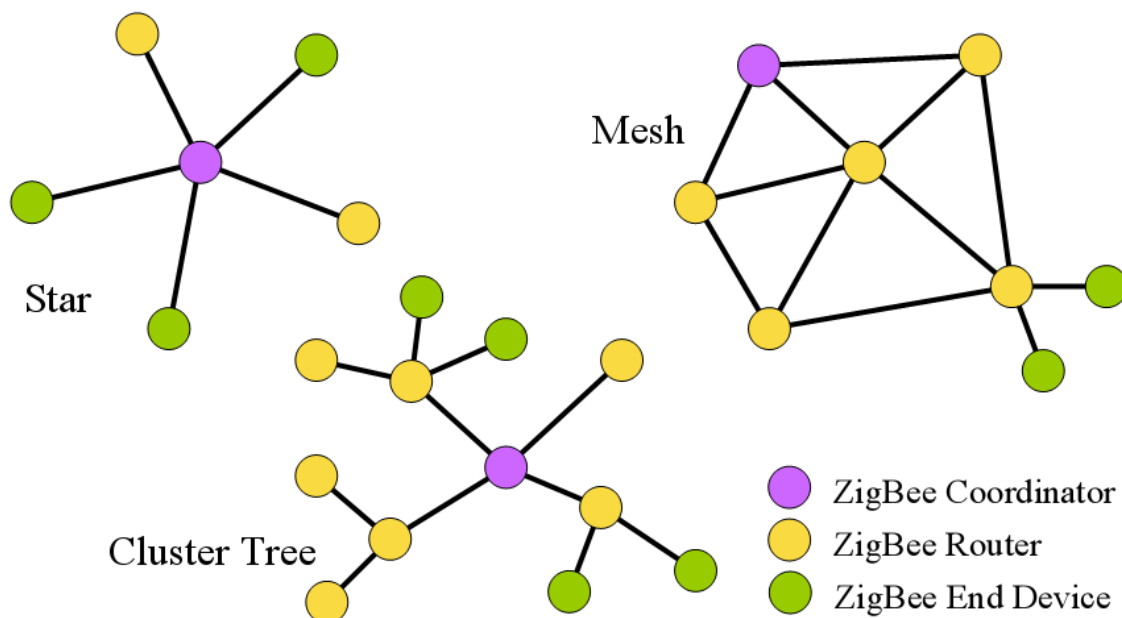
Technologie ZigBee je založena na přenosu dat v bezlicenčním ISM (Industrial, Scientific and Medical) rádiovém pásmu, tedy v pásmu volně přístupném veřejnosti pro vysílání i příjem dat a to bez potřeby licence. Základní celoevropskou podmínkou možnosti vysílání v tomto pásmu je zajistit, aby vyzářený výkon nepřesáhl 100mW. V ISM pásmu pracuje mnoho komunikačních zařízení příbuzných se ZigBee, jako například WiFi nebo Bluetooth. ZigBee pak dále předpokládá přenos dat poměrně nízkou rychlostí, jednoduchým zařízením s nízkým příkonem s malým dosahem. Tato technologie očekává uplatnění například v bateriově poháněných zařízeních nenáročných na přenosovou rychlost.

1.1.2. Charakteristické parametry

V porovnání s již dobře známým zařízením Bluetooth má ZigBee o poznání větší dosah, a to 10 – 75 m (bez přídavného zesilovače), ale nižší přenosovou rychlost. Maximální rychlosti 250kb/s dosahuje na kmitočtu 2,4GHz. Dále je možné zařízení použít v Evropě na kmitočtu 868MHz s přenosem 20kb/s, proti přenosové rychlosti Bluetooth (1Mb/s) to není moc, ale zařízení ZigBee vyniká velmi nízkou spotřebou energie. Navíc vypnuté zařízení ZigBee se dokáže aktivovat a přijmout data již za 15ms zatímco zařízení Bluetooth to trvá asi 3s. Další výhodou ZigBee je schopnost vytvářet různé typy sítí za účasti různých zařízení a to až s 254 členy oproti 8 u Bluetooth.

1.1.3. Tvorba sítě

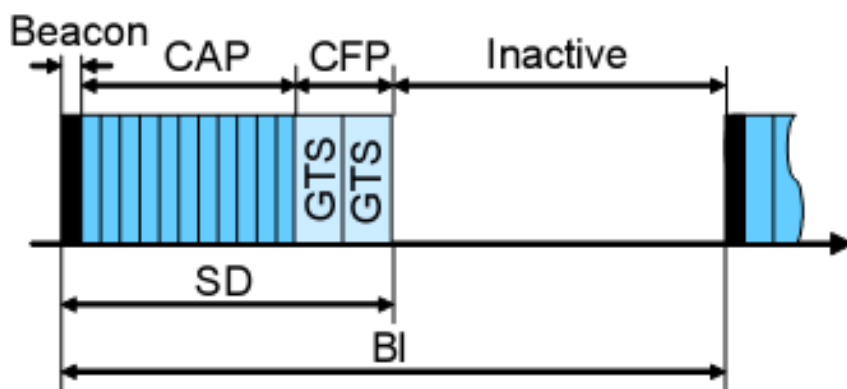
Z obr. 2 je patrné že síť tvoří dva druhy zařízení. Jsou to plnohodnotná zařízení (FFD) a zařízení s omezenými funkcemi (RFD). Každá síť pak musí obsahovat minimálně jedno zařízení FFD, které se tak ujme role síťového koordinátora (PAN coordinator). Zařízení RFD jsou používána převážně v jednoduchých aplikacích bez zvláštních nároků na množství přenášených dat a kvůli své omezené funkci mohou komunikovat pouze se zařízeními FFD, zatímco FFD komunikují jak s RFD tak s FFD.



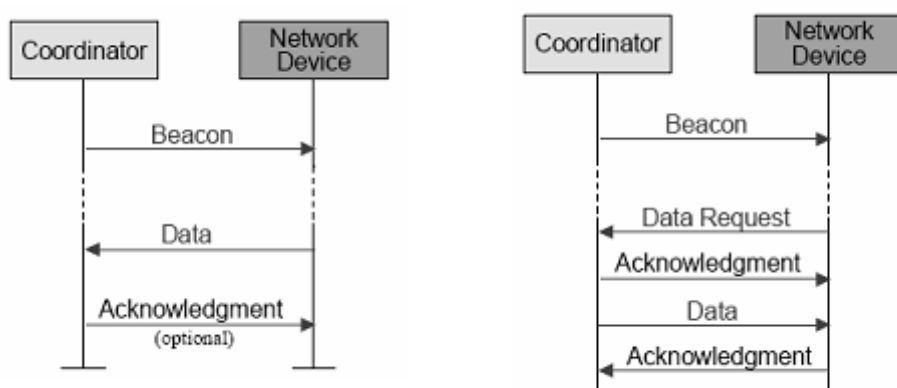
obr. 2 – topologické modely sítí (převzato z [4])

1.1.4. Princip komunikace

Zařízení komunikují většinou pomocí rámců (superframe structure). Ten má vždy 2 části a to aktivní a pasivní. Na počátku aktivní části zařízení vyšle pomocný signál, který slouží mimo jiné k synchronizaci obou zařízení, následuje CAP (contention access period) a dále CFP (contention free period) obsahující guaranteed time slots (GTS) pro odesílání dat. Tuto strukturu zachycuje obr. 3. V druhé části trvání rámce je zařízení v neaktivním stavu, tedy čeká na příjem dat a v této chvíli může být zařízení uvedeno do režimu nízké spotřeby. Celá komunikace dvou zařízení pak může probíhat podle schématu na obr. 4.



obr. 3 – struktura rámce (převzato z [5])



obr. 4 – komunikace dvou zařízení v režimu beacon-enabled (převzato z [3])

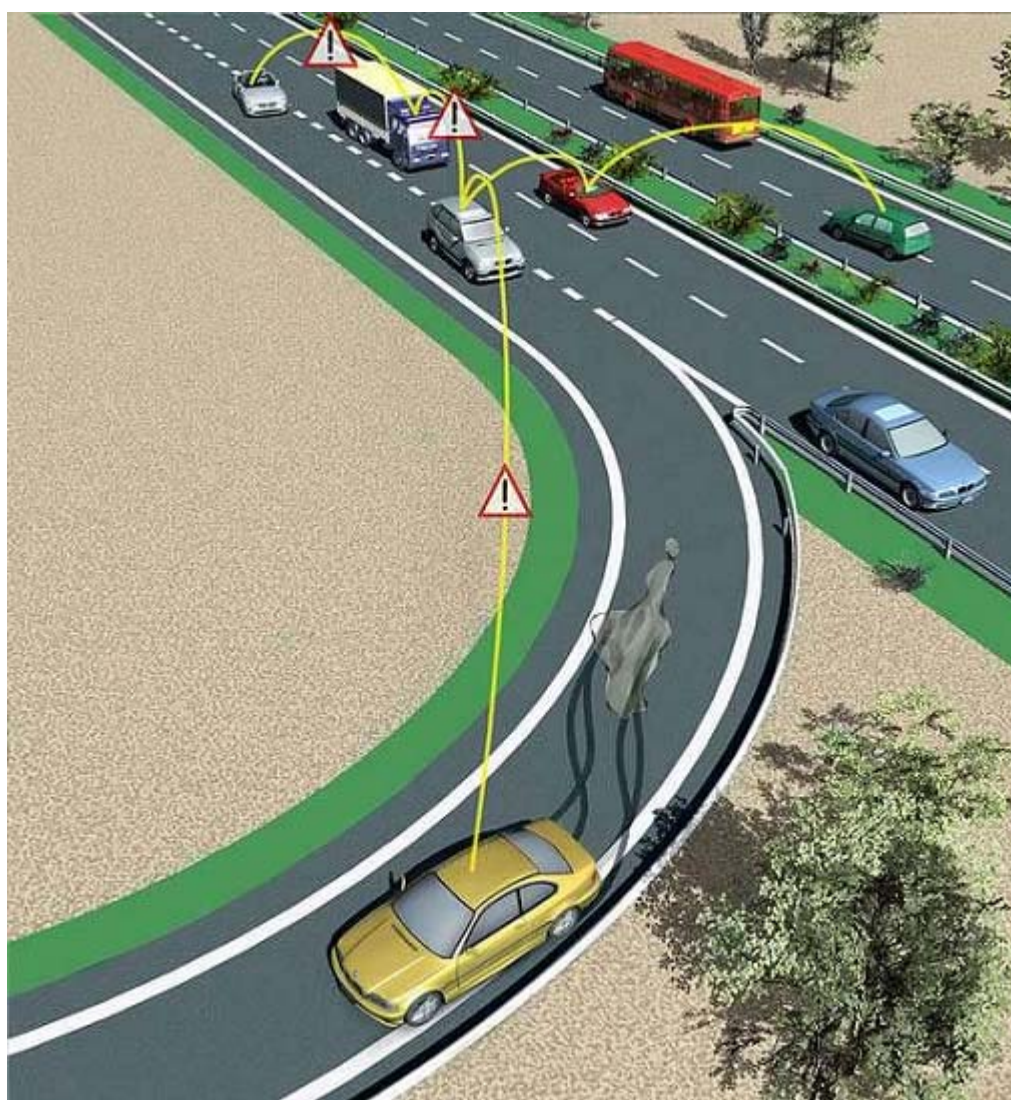
1.2. Použití zařízení v automobilovém průmyslu

Zařízení ZigBee je díky výše uvedeným vlastnostem velmi vhodné pro použití nejen v domácnosti, například k ovládání bezpečnostních zařízení, elektrospotřebičů a domácích systémů, ale i v automobilovém průmyslu, dopravě a přepravě osob a majetku. Rozšíření ZigBee do této oblasti může v budoucnu vést například k eliminaci dopravních nehod, urychlení včasné pomoci, zabránění vzniku škod na majetku v krizových situacích, zefektivnění vyhledávání odcizených vozidel či zvyšování cestovního pohodlí uživatelů, jako je třeba udržování plynulosti provozu. Tohoto výsledku dosáhneme umístěním zařízení ZigBee do každého automobilu pohybujícího se po veřejných komunikacích. Automobily si pak mezi sebou, ale i s dopravní infrastrukturou mohou vyměňovat významné informace bez jakéhokoliv zásahu řidiče do systému.

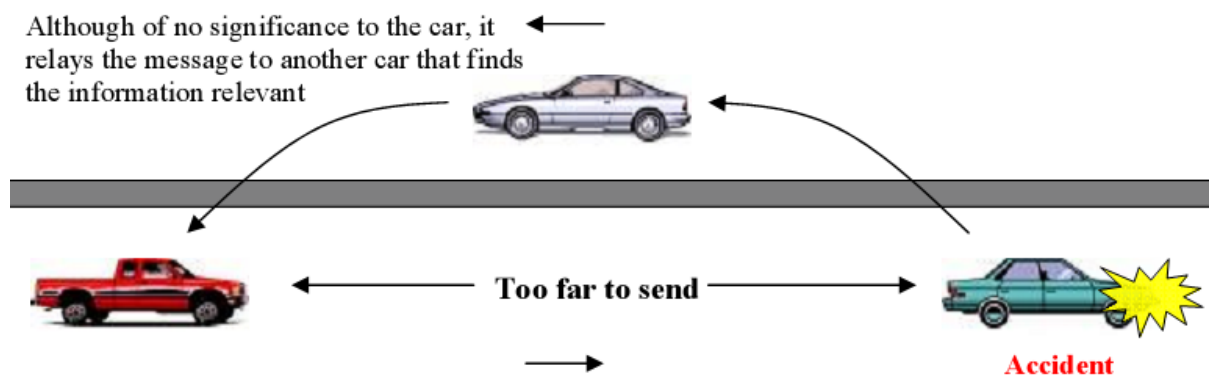
1.2.1. Komunikace s jinými automobily (Car 2 Car Communication)

Bude-li každý automobil vybaven zařízením ZigBee umožňujícím vzájemnou komunikaci, bude snazší vyhnout se krizovým situacím a snížit počet dopravních nehod. Jak ukazuje obr. 5, automobily si vzájemně předávají důležité informace o provozu za použití topologie sítě peer-to-peer. Tato síť se neustále mění podle toho, jak se kolemjedoucí automobily k sobě přibližují resp. vzdalují. V případě krizové situace pak každý automobil předává přijaté informace dalším automobilům (zařízením). Předpokládejme, že dojde

k nehodě žlutého automobilu. Jeho palubní zařízení pak okamžitě vysílá informaci o nehodě a nebezpečí kolize. Tuto zprávu si však nepředávají pouze automobily v nejbližším okolí, ale dostanou ji i automobily jedoucí v opačném směru přestože se jich to zdánlivě netýká. Ty pak mohou zprávu předat opět do opačného směru, čímž varují řidiče blížící se k nehodě. Tímto způsobem není komunikace automobilů omezena dosahem použitých zařízení a je možné data předávat na velké vzdálenosti a to při současném splnění požadavku na omezení maximálního vyzářeného výkonu, jak ukazuje *obr. 5*. Ohrožení řidiči pak mají dost času reagovat na vzniklou situaci. Později může být tento systém použit i pro prevenci dopravních nehod. Může se stát, že žlutý automobil se úspěšně vyhne nehodě, jeho počítač potom vyšle zprávu například o aktivaci systému ABS či ESP a řidiči ostatních vozidel se s předstihem dozví, že v tomto úseku je kluzká vozovka.

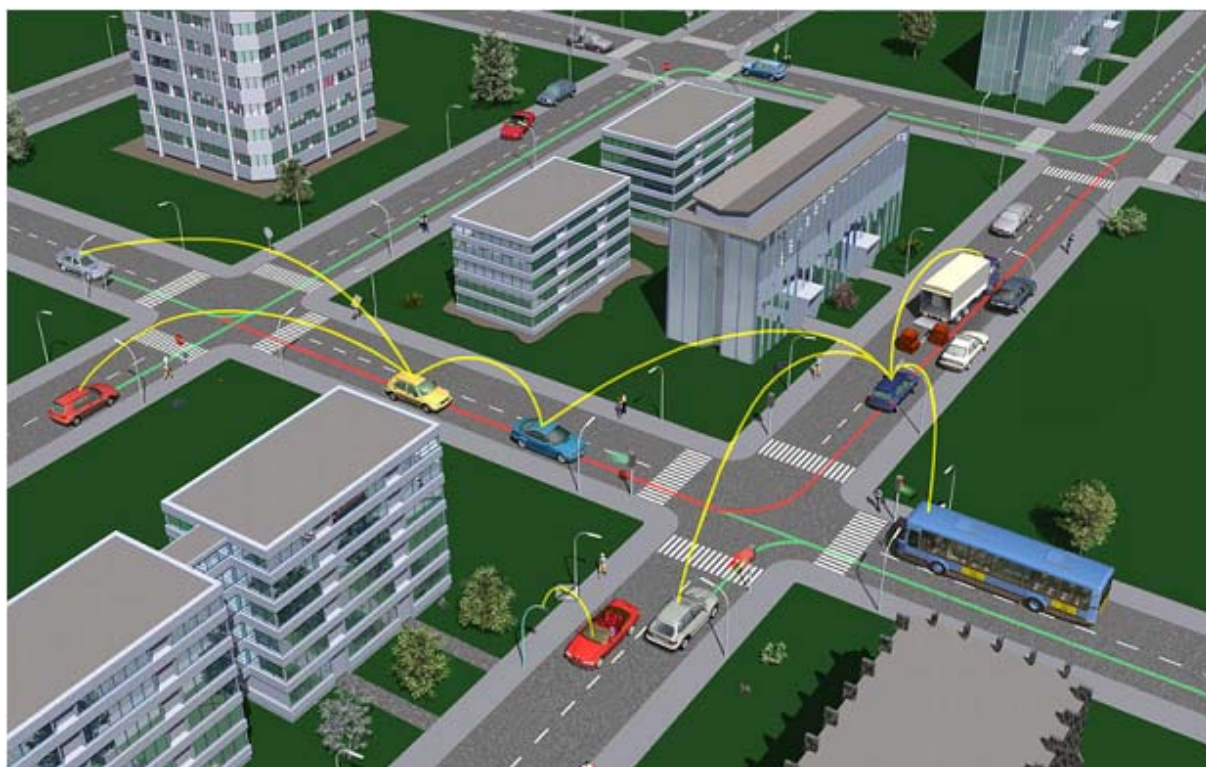


obr. 5 – šíření zprávy o nehodě (převzato z [17])



obr. 6 – řidiči šedého automobilu se zpráva o nehodě nezobrazí, může ji ale předat červenému automobilu, jehož vzdálenost od nehody je větší než dosah palubního vysílače zeleného automobilu (převzato z [6])

Další způsob využití komunikačního zařízení se nabízí ve městech či v hustě obydlených oblastech. Na obr. 7 je zachycena typická situace z městského centra: v hustém provozu dojde k zneprůjezdnění ulice, ať už kvůli nehodě či stěhování. Následně dochází k uváznutí vozidel v této ulici a dopravnímu kolapsu. Pokud jsou však vozidla vybavena zařízením ZigBee pro přenos dat, mohou být včas varována a navedena ke změně trasy. Nemusí zde však jít jen o uživatelský komfort. Automobily vybavené přijímačem mohou být informovány třeba o projíždějícím vozidle záchranné služby nebo pořádkových jednotek ještě dříve než uvidí výstražné světlo nebo zaslechnou zvukové znamení, jenž mnohdy není slyšitelné do poslední chvíle. Řidič pak má více času uvolnit cestu projíždějícímu vozu. Stejný postup je také možné použít v oblastech s dočasným dopravním omezením, atd.



obr. 7 – upozornění na nutnost změny trasy (převzato z [17])

Jedním z nedostatků tohoto systému je ale fakt, že automobily se „učí ze zkušeností“ vozidla, které se již do krizové situace dostalo – tedy uvázlo v dopravní zácpě, uklouzlo na

vlhkém povrchu nebo se zúčastnilo nehody. Ve všech těchto případech je sice čas na to varovat ostatní řidiče, ale pozdě na to zabránit škodám na vlastním vozidle či dokonce svému zranění. Při komunikaci mezi vozidly totiž jde převážně o to, pomoci ostatním řidičům. Je však možné předejít i vlastní nouzi? Ideální by bylo vědět o nebezpečí dříve, než mu někdo podlehne, tedy kdyby silnice sama informovala automobil o svém stavu, případně se dokázala přizpůsobit stavu provozu. Z tohoto důvodu je nutné zabývat se také komunikací automobilu s vozovkou, dopravním značením, infrastrukturou.

1.2.2. Komunikace s infrastrukturou (Car 2 Infrastructure Com.)

Jak již bylo řečeno, zařízení ZigBee vyniká nízkou spotřebou energie a konstrukční jednoduchostí, tedy nízkou cenou. Z tohoto důvodu bude možné umístit vysílač kromě automobilu také v některých částech dopravní infrastruktury. Takovýmto dokonalým informačním systémem dovedeným do praxe je pak možné předejít vážným dopravním nehodám, škodám na majetku, napomoci plynulosti dopravy a v neposlední řadě částečně omezit poškozování životního prostředí.

Představme si například model městského provozu a vůz záchranné služby snažící se projet zácpou. Použijeme-li komunikační zařízení bezprostředně spojené s počítačem řídicím křižovatkou, kterou tento vůz projíždí, můžeme s předstihem přímo z projíždějícího automobilu zařídit, aby křižovatka „ukázala zelenou“ právě v námi požadovaném směru.



obr. 8 – vozidlo záchranné služby v dopravní zácpě (upravený obrázek z [29])

Tento systém však může sloužit i běžnému řízení provozu. Například blíží-li se v noci ke křižovatce jediný automobil, bude mu automaticky umožněn průjezd bez zbytečného zastavování. Není přitom zapotřebí žádné složité konstrukční řešení, či dokonce stavební úpravy v okolí křižovatky. Systém včasného varování může být dále umístěn například v železničních přejezdech a na větší vzdálenost upozornit řidiče o hrozícím nebezpečí či dokonce zobrazit informaci, za jakou dobu bude přejezd uvolněn, což opět zvyšuje plynulost dopravy. Dále můžeme vytvořit mnoho pomocných zařízení jako třeba měřič teploty a stavu vozovky, měřič síly větru či zdůraznit platnost některých dopravních značek v nepřehledné situaci odesláním jejich obrázku přímo na displej palubní desky automobilu. Systémem pro přenos informací může být vybaveno i mobilní dopravní značení při uzavírkách nebo stavebních pracích na nečekaných a špatně viditelných místech.

Za tímto účelem bude potřeba vyvinout zařízení, které má velmi nízkou reakční dobu, dokáže komunikovat i na větší vzdálenosti (řádu desítek až stovek metrů), má nízkou spotřebu energie kvůli případnému solárnímu napájení, má malé rozměry a je levné. Tyto požadavky zcela splňuje zařízení ZigBee a proto je pro použití v komunikaci mezi automobilem a

okolním prostředím zcela ideální. Pokusíme se tedy pro začátek vytvořit jednoduché zařízení na základě ZigBee, které bude varovat před zvýšeným nebezpečím na vozovce, překážkou provozu, tedy nějaký dopravní kužel či výstražný trojúhelník se zabudovaným vysílačem umožňujícím zavčas varovat projíždějící řidiče o vzniklé situaci. Na tomto zařízení pak prozkoumáme (měřeními a pokusy) jeho vlastnosti a chování v reálném provozu a určíme případy kdy je a kdy není vhodné toto zařízení použít a jaké jsou reálné možnosti jeho využití ve výše zmíněných situacích.

1.3. Převodník ZigBee to Ethernet

Při realizaci jakéhokoli datového vysílače či přijímače je samozřejmě velmi důležité vysílači dát nějaká data, která bude vysílat a přijímači pak umožnit předat přijatá data dalšímu zařízení, které je schopné je vyhodnotit. Data pro vysílání mohou být buď uložena přímo v zařízení umožňujícím přenos – toto bude pro začátek náš případ (výstražný trojúhelník), nebo může být zařízení připojeno například k počítači, který se o odesílání dat postará – složitější, ale efektivnější varianta. Přenos dat mezi vysílačem a počítačem (tedy to, aby si obě zařízení „rozuměla“) nám bude zajišťovat takzvaný převodník. Chceme-li, aby byl námi navrhnutý systém nejen vhodný k použití ale i užitečný, nabízející řadu výhod pro uživatele, schopný uplatnit se v provozu a obstát v konkurenci, je zapotřebí začít přemýšlet nad rozšířením působnosti tohoto systému na rozlehlém území, nejen na jednom bodě. Potom můžeme propojit naše zařízení s centrálním počítačem, který zjišťuje stav provozu z veškerých dostupných zdrojů. Vysílače umístěné v blízkosti silnice pak budou mít z centrálního počítače k dispozici přesné údaje týkající se příslušné lokality. Toto spojení bude možné realizovat pomocí Ethernetu, kvůli předpokládanému vysokému počtu použitých vysílačů v infrastruktuře. Spojení pak bude mít dostatečnou přenosovou kapacitu i pro nečekané situace. Za tímto účelem bude tedy nutné realizovat převodník ZigBee/Ethernet.

1.4. Hardware (Access Point)

Co se týká našeho pokusu, pro začátek nám postačí přímé spojení vysílače s PC, abychom mohli na jednoduchém přípravku vyzkoušet možnosti zařízení a podle získaných výsledků se následně rozhodnout, jakým směrem vést vývoj.

Přestože technologie ZigBee je poměrně mladá, jak jsem uvedl v úvodu, můžeme v sortimentu mnoha zahraničních firem zabývajících se vývojem elektroniky najít různé druhy převodníků, modulů a testovacích rozhraní právě pro ZigBee a to mnohdy už i s integrovaným vysílačem.

1.4.1. XBee

Nyní se zaměříme na samotné hardwarové zařízení. K dostání jsou například moduly firmy MaxStream nazvané X-Bee™ a X-BeePro™, jejichž parametry jsou uvedeny v tab. 1. Tyto moduly jsou mimo jiné k dostání v provedení s integrovanou nebo prutovou anténou nebo anténním konektorem a jsou použitelné v mnoha módech v závislosti na zvoleném firmware. Zároveň jsou vyráběna vývojová zařízení pro tyto moduly v různých sestavách dle náročnosti uživatele a počtu obsažených modulů, např.:

- XBee Professional Developer Kit
- XBee-PRO Starter Kit
- XBee Starter Kit



obr. 9 – vývojové prostředí Xbee (převzato z [14])

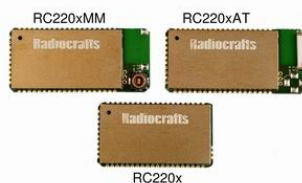
	XBEE™	XBEE-PRO™
Frekvence	ISM 2,4GHz	
Dosah – zástavba	do 30m*	do 100m*
Dosah - přímá viditelnost	do 100m*	do 1.6km*
Vysílaný výkon	1mW (0 dBm)	60mW (18dBm)** 100mW EIRP**
Přenosová rychlost RF	250kbps	
Přenos. metoda/modulace	DSSS/QPSK	
Citlivost	-92dBm	-100dBm
Napájecí napětí	2.8 – 3.4V	
Typický proud (při 3.3V)		
TX	45mA	215mA (při 18dBm)
RX	50mA	55mA
hibernate	<10uA (při 3.0V)	
sleep	<50uA (při 3.0V)	
pracovní režimy	pohotovostní, vysílací, přijímací a konfigurační	
režimy přenosu dat	transparentní a API mód	
podporované topologie sítí	point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, mesh	
počet přep. kanálů	16	12
počet uzlů	65535/ kanál	
rozměry	(2.438cm x 2.761cm)	(2.438cm x 3.294cm)
teplotní prac. rozsah	-40°C až 85°C	
typ antény	SMD, prutová, U.FL konektor	

tab. 1 – parametry modulů Xbee (převzato z [14])

1.4.2. RC 220x

Další možné řešení je z produkce firmy Radiocrfts a sice moduly označované RC2200, RC2202 a RC2204 a opět s možností různých druhů antén. Tyto moduly je možné programovat pomocí PC a k vývoji aplikací je možno využít softwaru a prostředků firmy Atmel:

- WinAVR
- Atmel AVR Studio

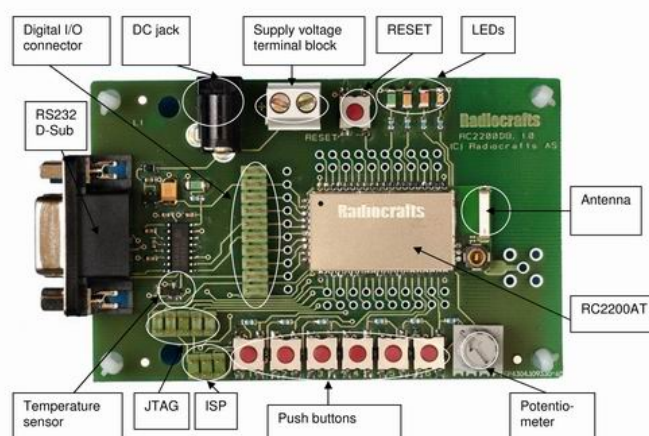


obr. 10 – moduly RC220x (převzato z [14])

	RC2200	RC2204	RC2202
MCU Flash	128 kB	64 kB	32 kB
MCU RAM	4 kB	4 kB	2 kB
MCU EEPROM	4 kB	2 kB	1 kB
MCU hodiny	8 MHz		
Radiová část	IEEE 802.15.4 transceiver, 2.45 GHz, DSSS, O-QPSK, 250 kbit/s		
Radiové rozhraní	RF pin, interní anténa, externí MMCX RF konektor (dle typu)		
I/O piny	8kanál. 10bit. ADC, 32 digitálních I/O, interní OSC 32.768 kHz		
Komun. rozhraní	UART, SPI, JTAG		
Napájení	2.7 až 3.6 V		
Spotřeba	max. 30 mA, Power down mód: 1.3 μ A		max. 26 mA
Prac. teplota	-30 °C až 85 °C		

tab. 2 – parametry modulů RC220x (převzato z [14])

K těmto modulům je rovněž k dostání bohaté příslušenství ve formě vývojových desek umožňujících přímé spojení s PC a sledování činnosti modulu. Tato deska je k vidění na obr.11.



obr. 11 - RC2200DK-SPPIO ZigBee™ vývojový kit (převzato z [14])

1.5. Shrnutí základních poznatků

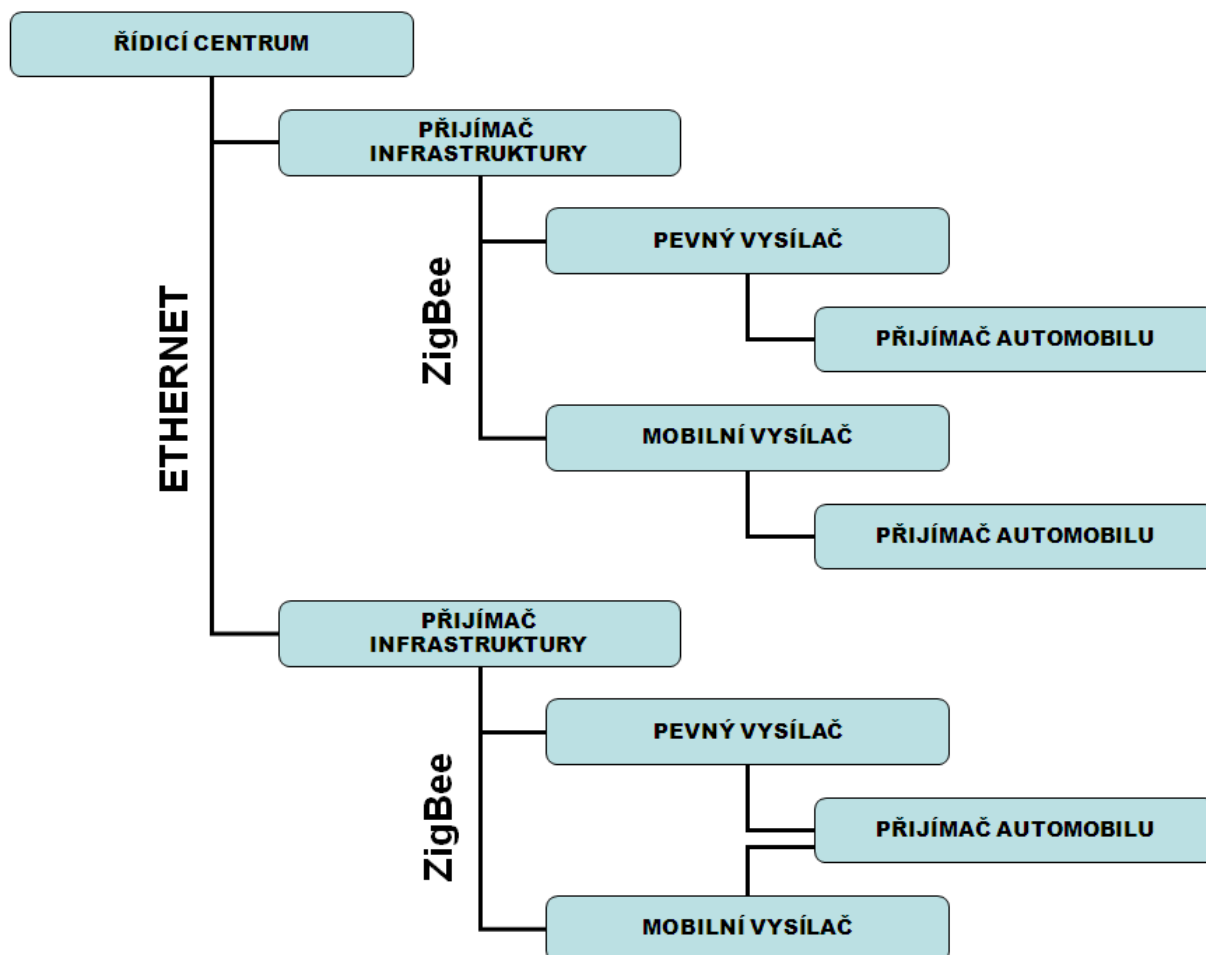
Pokusil jsem se shrnout nejvýznamnější poznatky o zařízení ZigBee a jeho funkci a nastínil jsem možné oblasti a způsoby jeho využití v automobilovém průmyslu a komunikaci. To, do jaké míry jsou tyto vize realizovatelné, zřejmě ukáží pokusy a praktická měření se zařízením ZigBee, na které se zaměřuji ve své další činnosti. Jak jsem se již zmínil v předchozím textu, jako další postupný cíl jsem si zvolil realizaci vysílače pro výstražný trojúhelník, případně zařízení, které bude později možno využít jako tzv. Přijímač infrastruktury (jeho návrh popíšu níže) a jeho analýzu v běžném provozu, se zaměřením na rychlost navázání spojení s automobilem a přenesení dat. Tato rychlost totiž může mít vliv na vhodnost použití zařízení na dálnicích, kde je zapotřebí, aby identifikace a synchronizace vysílače i přijímače proběhla co nejrychleji a zůstal dostatek času pro přenos užitečných dat.

2. Řešení problému - návrh komunikačního řetězce

Navrhujeme-li systém přenášející informace, je nanejvýš důležité vytvořit vhodnou síť, která zajistí přenesení informace v co nejkratším čase a co nejefektivnějším způsobem. V našem případě se jedná o vytvoření sítě schopné fungovat dle výše uvedených požadavků. Návrh je o to složitější, že se jedná o síť, jejíž architektura se bude v čase měnit, resp. je možno vytvářenou síť pomyslně rozdělit na dvě části, jak ukazuje *obr. 12*.

První část bude, co se týká architektury, neměnná, tedy se jedná o spojení centrálního počítače poskytujícího data (dále označován jako Řídicí centrum) a sítě vysílačů určených k distribuci těchto dat do přesných lokalit (dále označován jako Přijímač infrastruktury). Toto spojení je nanejvýš vhodné realizovat pomocí sítě Ethernet a to kvůli jeho výhodám spočívajícím ve vysoké přenosové rychlosti a velké kapacitě pro přenos dat.

Druhá část sítě pak navazuje přímo na síť Přijímačů infrastruktury a zahrnuje prvky Pevný vysílač, Mobilní vysílač a Přijímač automobilu. V tomto prostředí, kde hlavně počet Přijímačů automobilu se bude relativně rychle měnit, již s výhodou použijeme komunikační standard ZigBee, který dokáže pružně reagovat na měnící se počet členů sítě.



obr. 12 – Komunikační schéma navrhované sítě

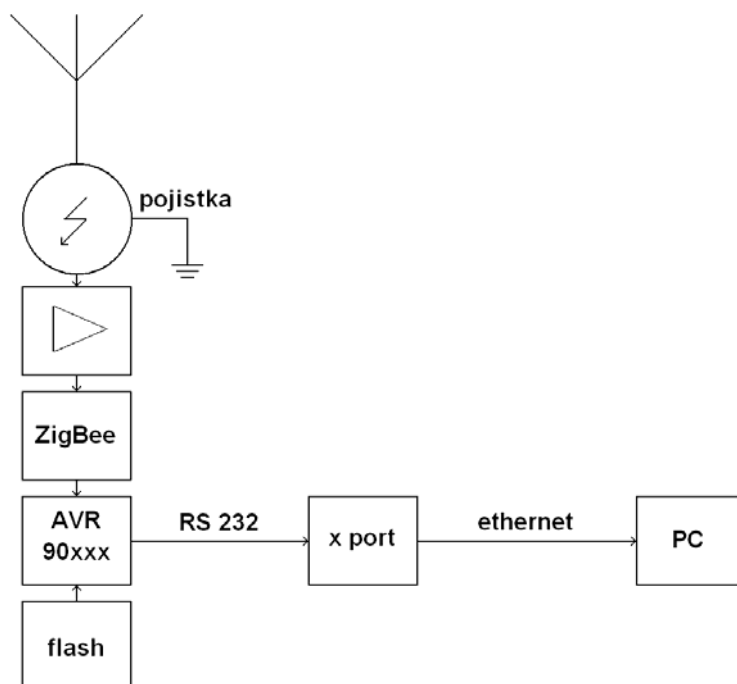
Z obrázku je patrné, že Přijímač automobilu může komunikovat jak s pevnými vysílači umístěnými například v dopravních značkách nebo na sloupech v blízkosti silnice, tak s mobilními vysílači umístěnými převážně v přenosném dopravním značení. Prioritu zpracování dat takto získaných z více zdrojů bude samozřejmě možné nastavit. O přidělování

dat Pevným a Mobilním vysílačům se stará lokální Přijímač infrastruktury, tudíž je snadné poslat požadovaná data přímo z řídicího centra do lokality jejich využití. Dle rozsahu a závažnosti informace pak může přímo Přijímač infrastruktury rozhodnout, kterým konkrétním zařízením ve svém okolí data pošle. Při rozhodování může využít údaje GPS získané z těchto periferních vysílačů.

Pro ověření funkce navrhované sítě a vhodnosti použití standardu ZigBee je zapotřebí HW realizace jednotlivých členů sítě formou vývojových modulů a následná simulace přenosu dat na těchto modulech a to nejen v laboratorním prostředí ale i v reálném provozu. Pokusím se tedy dále navrhnout tato zařízení shodující se s hlavními uzly výše uvedeného komunikačního diagramu.

2.1. Přijímač infrastruktury

Přijímačem infrastruktury rozumíme zařízení, které propojuje obě části vznikajícího systému, tedy ZigBee a Ethernet. Toto zařízení přijímá data z řídicího centra pomocí Ethernetu a přiděluje je ostatním vysílačům pomocí ZigBee. Je rovněž schopné přijmout informace o stavu dopravy od mobilních vysílačů nebo od automobilů. V neposlední řadě může Přijímač infrastruktury kontrolovat stav a funkci ostatních zařízení a v případě problému ohlásit závadu přímo řídicímu centru. Blokové schéma přijímače znázorňuje *obr.13*.



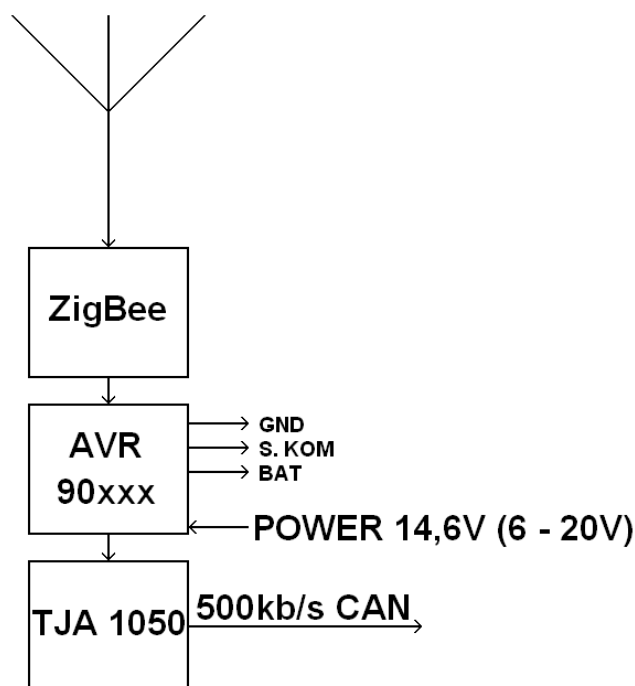
obr. 13 – Přijímač infrastruktury – blokové schéma

Data jsou vysílána a přijímána pomocí společné antény. Pojistka na obrázku naznačuje ochranné obvody zabráňující poškození zařízení vnějšími vlivy. Pro lepší příjem signálu můžeme dále zařadit zesilovač. Nejprve se však pokusíme sestavit zařízení bez tohoto zesilovače, abychom byli schopni lépe pozorovat chování a nedostatky přijímače. Podle teoretických předpokladů by totiž zařízení mělo pracovat správně i bez zesilovače. Blok ZigBee může být realizován například pomocí čipu z produkce firmy Radiocrafts nebo

MaxStream. Mikroprocesor AVR se stará o přenos dat oběma směry, využívá přitom paměť typu flash. Výstup zařízení je znázorněn jako RS 232, tedy sérová linka. Ta se pak dá snadno převést na Ethernet pomocí jednoduchého adaptéru XPort, který je na trhu běžně k dostání. Blok PC zde znázorňuje počítač v řídicím centru.

2.2. Příjímač automobilu

Další podstatnou částí systému je zařízení, které je propojené přímo s obvody automobilu. Toto zařízení se stará o konečné využití přenášených dat, tedy například zobrazení varovného hlášení na obrazovce automobilu nebo použití zvukové výstrahy. V ideálním případě by toto zařízení mělo být obousměrné, tedy schopné nejen získávat informace pro řidiče, ale také v případě nouze odesílat informace např. o aktivaci bezpečnostních systémů automobilu, o rozsahu škody při nehodě a pomocí údajů z GPS urychlit přivolání pomoci. Zde využijeme výhody zařízení ZigBee, kterou je nízká spotřeba energie. Dojde-li například k přerušení kabelů od akumulátoru po nehodě automobilu, stačí pro vyslání nouzové zprávy jen poměrně malý (a levný) záložní zdroj elektrické energie.



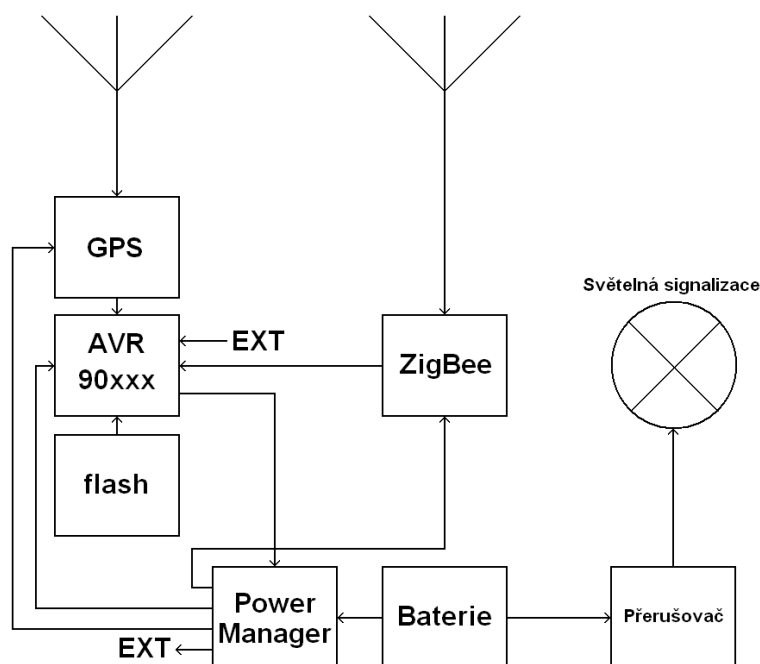
obr. 14 – Příjímač automobilu – blokové schéma

Všechny funkce přijímače jsou opět řízeny pomocí mikropočítače AVR, který získává data od čipu ZigBee, třídí je a předává příslušným systémům, např. obrazovce, audiosystému, řídicí jednotce... Samozřejmostí je, že veškerá komunikace se odehrává po automobilové sběrnici CAN.

2.3. Mobilní vysílač

Mobilní vysílač je zařízení sloužící především k upozornění na nečekané a přechodné nebezpečí, například uzavírky, dopravní omezení atd. Předpokládáme, že tento vysílač bude umístěn v přenosném dopravním značení, např. směrovacích deskách. Varovná zpráva pak

může být libovolně nastavována a měněna podle aktuální hrozby. Upravením HW řešení, tedy odstraněním přebytečných funkcí zajišťujících tomuto vysílači mobilitu můžeme realizovat pevný vysílač, který pak bude tvořit spojovací článek mezi automobilem a Příjímačem infrastruktury. Takto vzniklý pevný vysílač pak může být umístěn v blízkosti silnice a předávat řidičům informace obecnějšího rázu, jako třeba zprávy o počasí, stavu vozovky nebo v případě dopravní zácpy upozornit na vhodnou objíždku. V obydlených oblastech pak může přispívat např. k plynulému průjezdu vozů záchranné služby, pokud bude propojen s ovládáním světelné křižovatky.



obr. 15 – Mobilní vysílač – blokové schéma

Z blokového schématu jsou patrné dvě části pro dvě funkce, které toto zařízení nabízí, a sice část obsahující přerušovač a žárovku zajišťující funkci výstražného světla, tedy standardní vybavení dnes běžně používané směrovací desky, a část zajišťující bezdrátovou komunikaci s okolím (dále jen vysílací část). Tyto dvě části jsou napájeny z baterie a jsou na sobě nezávislé, což přináší výhodu částečného zachování funkce v případě poruchy jedné části. Srdcem vysílací části je opět mikroprocesor AVR, který se stará jak o ovládání komunikace a přenosu dat, tak o řízení napájení s cílem dosáhnout co nejnížší spotřeby elektrické energie. Podle teoretických předpokladů by tak spotřeba vysílací části měla být zanedbatelná v porovnání se spotřebou světelné signalizace. K mikroprocesoru jsou pak připojena dvě periferní zařízení. Jedná se o modul GPS, který slouží pro určení polohy vysílače a modul ZigBee, který se stará o vysílání zpráv. Teoreticky by mohlo být umožněno i připojení dalších přídatných modulů (EXT), rozšiřujících tyto základní funkce.

3. Realizace Přijímače infrastruktury

Stanovil jsem tedy požadavky na funkci a možné využití jednotlivých součástí komunikačního systému. V této kapitole pojednám o praktické realizaci těchto součástí, o postupu při vývoji a výrobě desky plošných spojů (DPS).

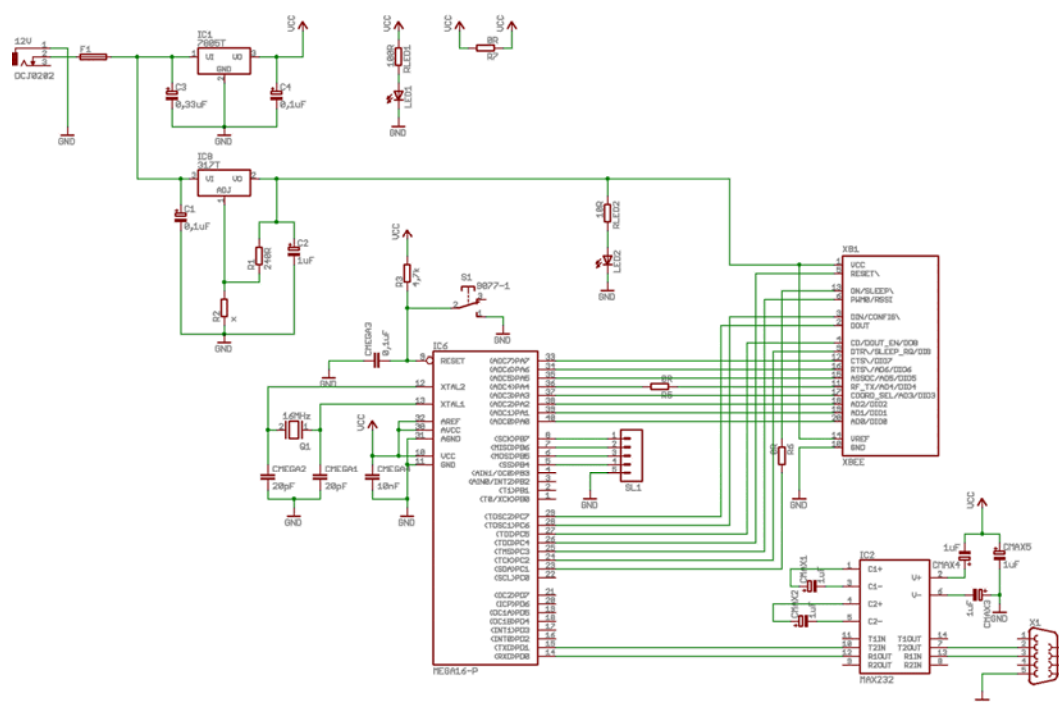
Při návrhu přijímače infrastruktury jsem vycházel z předpokladů a teoretického rozboru uvedeného výše. Některé části jsem však postupem času pozměňoval s ohledem na postupně nabývané vědomosti a nabízené možnosti. Tyto změny by však na předpokládanou funkci přijímače neměly mít žádný vliv. Zařízení, které jsem navrhnul, navíc nese prvky vývojového modulu, které mohou být po ověření jeho správné funkce a před využitím v běžném provozu odstraněny.

3.1. Schéma zapojení

Na schématu zapojení, které je znázorněno na *obr.16*, je patrné propojení několika částí. Napájení je přivedeno pomocí standardního konektoru Jack. Předpokládám jeho hodnotu 12V ss. Ochranu zapojení představuje pojistka F1 hodnoty 200mA. Následují dva napěťové stabilizátory zaručující hodnotu napětí 3V pro čip ZigBee a 5V pro ostatní IO, viz *příloha 5*. Ke každému stabilizátoru je připojena LED indikující jeho správnou funkci.

Vysílací čip ZigBee jsem zvolil z produkce firmy MaxStream. Jedná se o čip označený jako XBee nebo XBee Pro. Obě tyto varianty jsou podle teoretických předpokladů zaměnitelné, podstatný rozdíl je jen ve vysílacím výkonu, a tedy i dosahu tohoto čipu, viz *příloha 1*.

Pro řízení přenosu a zpracování dat jsem použil mikroprocesor ATmega16 z produkce firmy Atmel. Tento mikroprocesor nabízí dostatečné množství vstupně výstupních portů a podporuje funkci sériového programování SPI, což bude výhoda při ladění aplikací ovládajících přenos dat. Právě k tomuto účelu je již ve schématu vytvořen konektor SPI. Dále bylo zapotřebí ošetřit funkce mikroprocesoru jako je RESET a XTAL a zabránit vzniku rušení na napájecích pinech mikroprocesoru pomocí pasivních prvků.

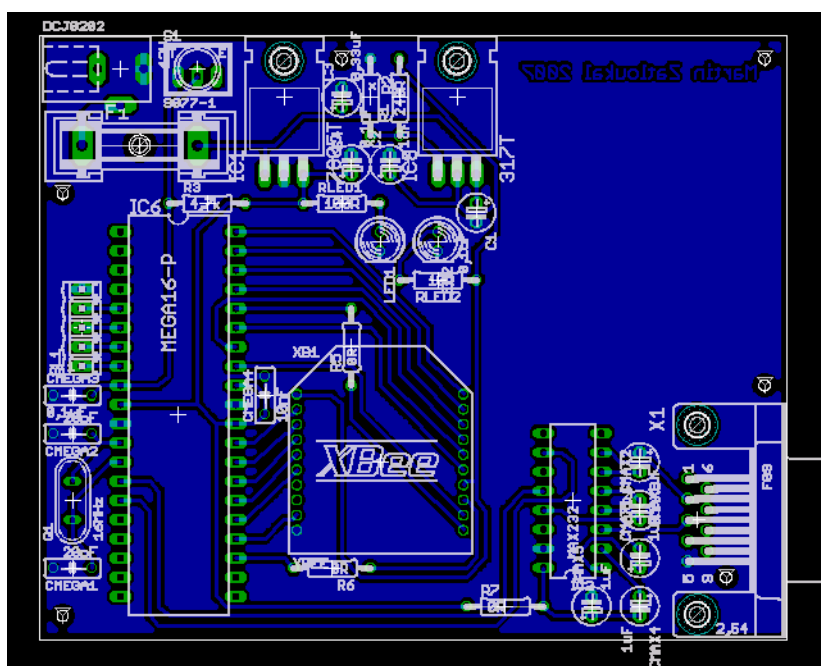


obr. 16 – Přijímač infrastruktury – schéma zapojení

O převod napěťových úrovní z mikroprocesoru na sériovou linku se stará součástka MAX 232, která je připojena k portu D mikroprocesoru a jejíž napájecí piny jsou opět chráněny proti rušení pasivními prvky. Na výstupu je pak standardní konektor RS 232, sloužící jak k připojení k PC (např. pro měřicí účely) tak přímo k Ethernetu pomocí redukce XPort, která je běžně k dostání za poměrně nízkou cenu.

3.2. Deska plošných spojů

Návrh DPS je velmi důležitou částí návrhu elektronického zařízení, její zpracování a rozmístění součástek v rámci DPS mohou ve výsledku ovlivnit mnoho parametrů celého zařízení, jako například rušení, přeslechy mezi datovými vodiči a v neposlední řadě i jeho cenu a to jak pozitivně, tak negativně. DPS kterou jsem navrhnul je znázorněna na *obr. 17*.



obr. 17 – Přijímač infrastruktury – návrh DPS (měřítko 1:1)

Levý horní roh DPS je vyhrazen pro obvody obstarávající napájení přípravku. Jedná se o konektor DCJ0202 (Jack), pojistka (viz výše), stabilizátory napětí s ochranou proti rušení a signalizační LED. Stabilizátory zřejmě nebudou potřebovat chladiče z důvodu předpokládaného nízkého příkonu zařízení. Po ověření tohoto předpokladu v praxi je bude možno nahradit stejnou součástkou v jiném (menším) pouzdře.

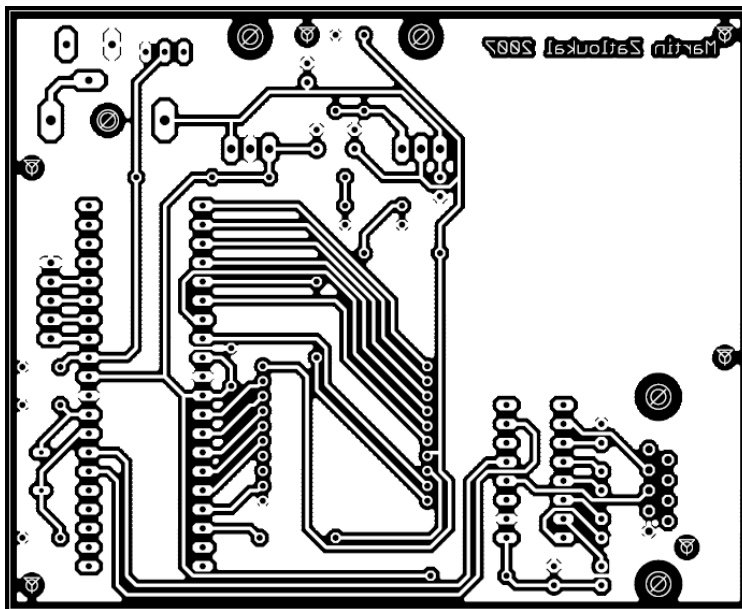
Levá dolní a střední část DPS je vyhrazena pro mikroprocesor, odrušovací kondenzátory, krystal a konektor pro SPI.

V centrální části DPS je umístěna nejdůležitější součástka, čip Xbee firmy MaxStream. Jeho poloha je zvolena tak, aby byl zaměnitelný s čipem Xbee Pro, který má jiné rozměry (umístění pinů souhlasí). Tento čip má jiné rozteče mezi piny, než je obvyklé, proto nebylo možné mezi nimi protáhnout vodivou cestu. Tento problém jsem řešil použitím několika drátových propojek (R5, R6, R7).

Pravá část DPS je vyhrazena datovému výstupu (vstupu), tedy součástce MAX 232 a konektoru RS 232. V této oblasti jsem rovněž použil kondenzátory pro potlačení rušení

užitečného signálu. Ze stejného důvodu jsem pak všechny volné plochy DPS vyplnil měděnou plochou spojenou s uzemněním (GND).

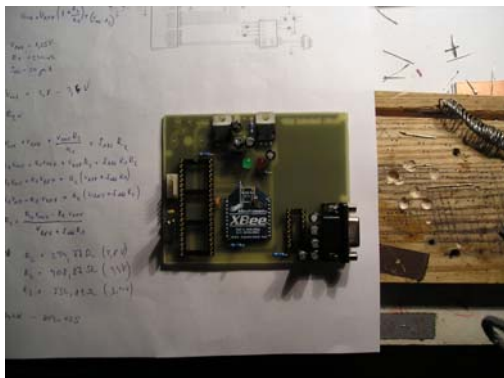
Příští generace této DPS by samozřejmě mohla mít menší rozměry, nebudeme-li trvat na přehledném uspořádání a použijeme-li jiná pouzdra součástek. Například provedení SMD pro ATmega16. Na *obr.18* je přesná šablona pro výrobu DPS v inverzním zobrazení pro technologii využívající pozitivního fotorezistu tak, jak jsem ji zadával do výroby.



obr. 18 – Příjímač infrastruktury – šablona (měřítko 1:1)

3.3. Osazení DPS

Při osazování DPS dle osazovacího plánu vygenerovaného programem Eagle jsem se setkal s několika menšími problémy, které jsem se snažil odstranit s ohledem na minimalizaci nákladů a maximální efektivitu řešení. Jednalo se především o nedostupnost některých součástek na trhu, tyto jsem ve většině případů nahradil alternativními součástkami s nepatrnou úpravou DPS. Dále se vyskytl problém s roztečí pinů u patice pro čip XBee. Zde jsem dosáhl znatelné finanční i časové úspory aplikací vlastního řešení pomocí jednotlivých pozlacených pinů bez pevné rozteče.



obr. 19 – Příjímač infrastruktury – průběh osazování

Pro přesné nastavení napájecího napětí čipu XBee jsem použil nastavitelný napěťový stabilizátor LM317, jehož typické zapojení je znázorněno v katalogovém listu na přiloženém nosiči. Jeho výstupní napětí je možno plynule regulovat v rozsahu 1,2V až 37V pomocí nastavitelného rezistoru. V mém případě jsem zvolil pevný rezistor (R_2), nastavující výstupní napětí na hodnotu 3,0V a jeho velikost jsem vypočetl ze vztahu

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}}(1 + R_2/R_1) + (I_{\text{adj}} R_2), \quad (1)$$

kde $V_{\text{out}} = 3\text{V}$, $V_{\text{ref}} = 1,25\text{V}$, $R_1 = 240\Omega$, $I_{\text{adj}} = 50\mu\text{A}$ (viz katalog). Přípravek pak může pracovat v rozsahu napájecích napětí 6,6 až 12 V, případně i více s doplněním stabilizátorů chladičem, jako ochranou proti tepelnému poškození.

3.4. Výsledný modul Přijímače infrastruktury

V této chvíli mám tedy navrhnoutou a osazenou DPS připravenou k použití. Celou desku jsem před zapojením proměřil a následně odzkoušel pro různá napájecí napětí. Neodhalil jsem žádné problémy a to ani po připojení všech čipů. Mikroprocesor ani vysílací čip nevykazují žádné znatelné chyby, hlásí se bez problémů, nevykazují teplotní ztráty. Chlazení napěťových stabilizátorů se jeví jako dostatečné, indikační LED signalizují správné napětí v obou napájecích větvích obvodu. Proudový odběr je v pořádku, jeho hodnota byla změřena v rozsahu 140 až 170mA, což odpovídá počátečním předpokladům. Tímto jsem tedy zakončil část projektu, věnující se HW řešení. Jeho výsledek je vidět na *obr.20*. V dalším oddíle pojednám o vývoji SW pro řízení komunikace a praktických měřeních v laboratoři a v provozu.



obr. 20 – Přijímač infrastruktury – HW zařízení

4. Vývoj SW

Software vyvíjený pro procesor ATmega16 jsem se snažil vytvořit co nejjednodušší a nejpráhlednější z důvodu snadného ustavení prvotní komunikace a ověření vzájemné kompatibility procesoru a XBee. Tato první verze programu je tedy zaměřena, s ohledem na předpokládané nastavení čipu XBee (viz dále), na soustavné posílání předem známých dat všem okolním síťovým uzlům.

4.1. AVR Studio

Pro správné vytvoření požadovaného programu bylo nezbytné zvládnout základní vědomosti a dovednosti při ovládání programovacího jazyka C a software AVR Studio. Jedná se o freeware určený k programování mikroprocesorů z produkce firmy Atmel, v mém případě k programování procesoru ATmega16. Ke své práci jsem použil verzi programu AVR Studio 4, která obsahuje mnoho užitečných funkcí. V tomto programu jsem svůj zdrojový kód vytvořený v jazyce C přeložil a nahrál přímo do procesoru pomocí funkce sériového programování (ISP) přes externí programátor firmy Atmel AVRISPMKII, připojený k USB portu PC. V tomto místě jsem využil výhody programovacího konektoru SPI, který jsem již zmiňoval v návrhu DPS. Zároveň jsem však odhalil závadu v nekompatibilitě konektorů programátoru a mnou zvoleného univerzálního konektoru. Musel jsem proto vytvořit improvizovanou přechodku mezi těmito konektory. Nově nabytý poznatek jsem ihned aplikoval do schématu zapojení v programu pro návrh DPS, Eagle, a zaměnil původní konektor za nový z knihovny con-rib. Navíc jsem ve schématu pozměnil několik cest a přidal propojení na pin RESET mikroprocesoru. V příští generaci DPS se tedy podobná chyba již nevyskytne.

4.1.1. Zdrojový kód

Dalším postupným cílem bylo vytvoření samotného řídicího software. Pro názornost nyní uvádím náhled sestaveného zdrojového kódu z programu AVR Studio 4, pomocí kterého zajišťuji předávání rámců s pevně definovanými daty do čipu XBee.

-----počáteční část nastavující parametry a chování procesoru-----

```
#include <avr/io.h>                                // Header file
#include <avr/interrupt.h>                          // Interrupt h.
#define FOSC 1843200                               // Clock Speed
#define BAUD 9600
#define MYUBRR FOSC/16/BAUD-1
```

-----funkce pro nastavení výchozího stavu procesoru-----

```
void USART_Init( unsigned int ubrr)
```

```
{
UBRRH = 0;                                // Set baud rate
UBRRL = 6;                                // Set baud rate
UCSRB = (0<<RXEN)|(1<<TXEN);             // Disable receiver, enable transmitter
UCSRC = (1<<URSEL)|(0<<USBS)|(3<<UCSZ0); // Set frame format: 8data, 1stop
bit
}
```

-----úvodní část hlavního programu-----

```
int main( void )
{
    USART_Init ( MYUBRR );                // USART initialization

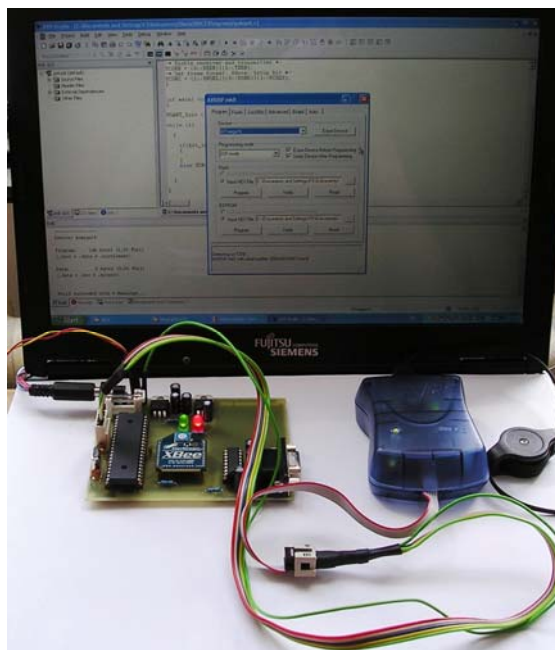
    while (1)
    {
        if(bit_is_clear(UCSRA, UDRE))      // USART flag check
        {
            ;
        }
        else UDR=0x58;                     // Data sending

    }
}
```

-----zakončení programu nekonečnou „vysílací“ smyčkou-----

4.1.2. Sériové programování

Sériového programování je velmi užitečné a je vhodné je použít, máme-li k dispozici procesor, který je podporuje a desku umožňující připojení sériového programátoru. Procesor pak není potřeba odpojovat ze stávajícího umístění, čímž dosahujeme značné časové úspory a nedochází k namáhání a ulamování kontaktů.



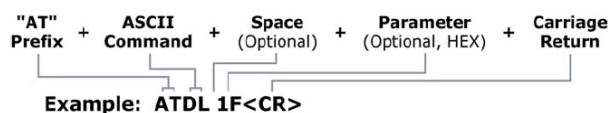
obr. 21 – Programování přípravku

4.2. Nastavení čipu XBee

Pro správnou funkci vysílače/přijímače je zapotřebí nejen vytvoření řídicího programu pro mikroprocesor, ale i správné nastavení parametrů vysílacího obvodu. V tomto ohledu má čip XBee fy. MaxStream výhodu, neboť nabízí několik způsobů nastavení požadovaných parametrů a několik možností provozu (módů). Dle zvoleného módu pak dokáže pracovat v nejrůznějších situacích a funkcích řízen jak pomocí procesoru, tak třeba i pomocí PC. Dále popíšu jednotlivé módy a pokusím se osvětlit základní rozdíly mezi nimi.

4.2.1. AT mód

Je nejvhodnější pro manuální ovládání zařízení připojeného přímo k PC pomocí klávesnice. Odtud je možno snadno zadávat příkazy dle souboru AT příkazů a okamžitě tak měnit nastavení a vlastnosti síťového uzlu. Syntaxe ovládání uzlu pomocí AT příkazů pak může vypadat například podle obr.22



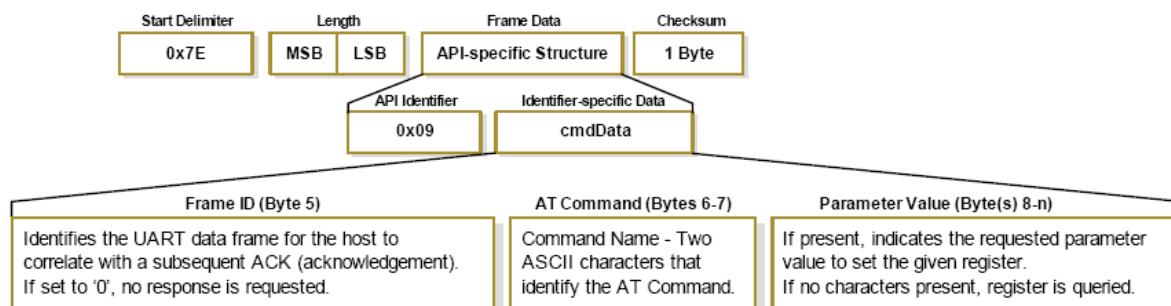
obr. 22 – Syntaxe zasílání AT příkazů (převzato z [16])

Způsob řízení čipu pomocí AT příkazů je tedy přehledný a snadný, vylučuje však automatické ovládání. Naše zařízení je navrženo tak, aby bylo schopné samostatného chodu bez závislosti na okolí, proto tento mód nebudu využívat.

4.2.2. API mód

API mód (Application Programming Interface) je vhodné využít, předpokládáme-li automatické řízení systému. V tomto módu využívá XBee speciálních rámců vysílaných

řídícím členem. Tyto rámce jsou přiváděny na běžný datový vstup, místo užitečných dat však obsahují řídicí informace (mj. AT příkazy) jak ukazuje *obr.23*. Nevýhoda tohoto módu je v náročnosti na procesor, resp. řídicí program, který je velmi složitý a nepřehledný. Toto řízení bude tedy vhodné spíše pro profesionální systémy a rozlehlé sítě. Do budoucna s ním počítám i ve svém projektu, avšak v současné situaci, kdy očekávám jen základní funkci pro využití při pokusných měřeních, se jeho použití vyhnu.



obr. 23 – Příklad složení API rámce (převzato z [16])

4.2.3. Transparentní mód

V transparentním módu je ovládání čipu z hlediska složitosti řídicího programu, nároků na procesor a přenos řídicích dat ze všech módů nejjednodušší. XBee zařízení v transparentním módu se navenek jeví jako náhražka sériové linky, tzn., že všechna data přijatá na vstup obvodu jsou pakétována a rádiově vysílána. Výjimkou budiž stav, kdy na určitou dobu (možno nastavit) vstoupíme do AT módu zadáním příkazu „+++“. Zde je možno zadat AT příkaz pro okamžitou změnu některého parametru vysílače. Po uplynutí nastavené doby zařízení opět aktivuje transparentní mód. V tomto módu jsem oživil své zařízení, neboť zde nehrozí riziko selhávání přenosu v důsledku nedokonalého řídicího programu a je tak snazší měření přenosové rychlosti, chybovosti přenosu atd. Zároveň je možné doladit funkci zařízení pomocí AT příkazů za běhu.

4.2.4. Pakétování

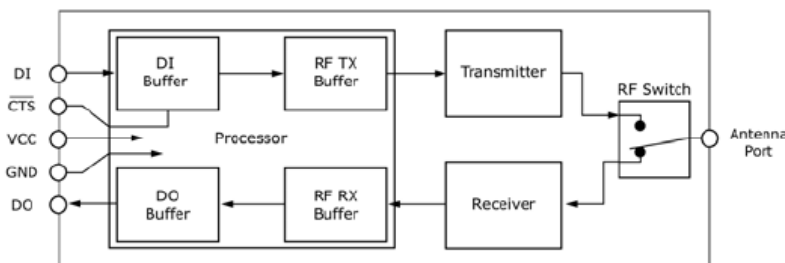
XBee v transparentním módu pracuje takovým způsobem, že všechna příchozí data jsou řazena ve vstupním bufferu, dokud není vyvoláno pakétování. To může být způsobeno dosažením časového limitu, po který nepřibyla do vstupního bufferu žádná další data (parametr RO – možno nastavit), naplněním kapacity paketu nebo zadáním příkazové sekvence GT + CC + GT.

4.2.5. Datový tok

Jak ukazuje *obr.24*, existuje model vysílání a přijímání dat, z něhož je patrná funkce vysílacího čipu. Sériová data jsou, jak již bylo řečeno, shromažďována v DI (Data In) Bufferu. Přiblíží-li se jeho naplnění, aktivuje se signalizace na pinu CTS (Clear To Send Flow Control). Externí procesor tak pozná, že dochází prostor v paketu a přestane posílat data. Následuje pakétování, řazení do fronty v RF TX Bufferu a rádiový přenos pakétů, načež CTS zasignalizuje uvolnění DI Bufferu a schopnost přijímat data od externího procesoru.

Přijímací část čipu funguje obdobným způsobem. Data jsou po rádiovém přenosu a úspěšném přijetí shromažďována v RF RX Bufferu, a po dekódování uchovávána v DO (Data

Out) Bufferu, odkud jsou externím procesorem vyčítána. Dojde-li ke zbrždění vyčítání dat a tím k přetečení DO Bufferu, každá další přijatá data jsou ztracena. DO Buffer můžeme hardwarově ovládat pomocí pinu RTS (Request To Send Flow Control), jehož nulovou úrovní můžeme pozastavit data v DO Bufferu.

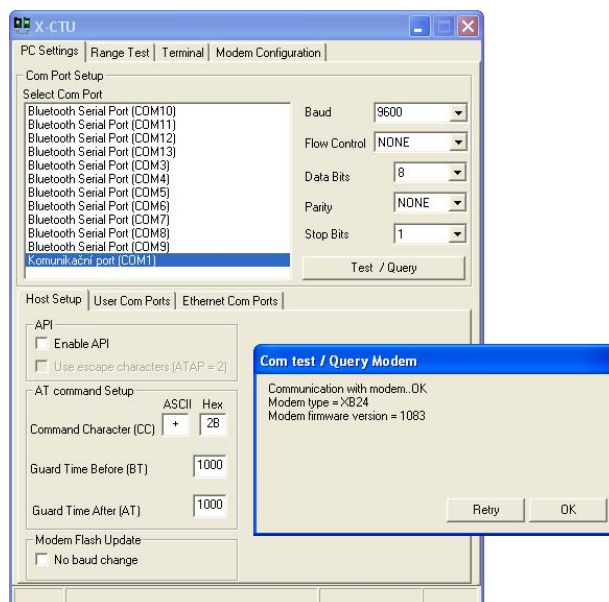


obr. 24 – Blokové schéma datového toku (převzato z [16])

Přepínač v poslední části schématu slouží ke střídavému připojování vstupního a výstupního dílu ke společné přijímací / vysílací anténě.

4.3. Nastavení v X-CTU

Abychom tedy nemuseli vytvářet složitý a jednoúčelový řídicí program, nastavíme parametry vysílacího XBee čipu pomocí PC a výrobcem nabízené vývojové desky. K tomu účelu můžeme využít software X-CTU dodávaný k XBee čipům firmou MaxStream. Tento program, jak je možno vidět na obr.25, je velmi jednoduchý s intuitivním ovládáním, takže by neměl být problém se v nastavování vyznat, a provést je správně a přesně dle požadovaných vlastností.

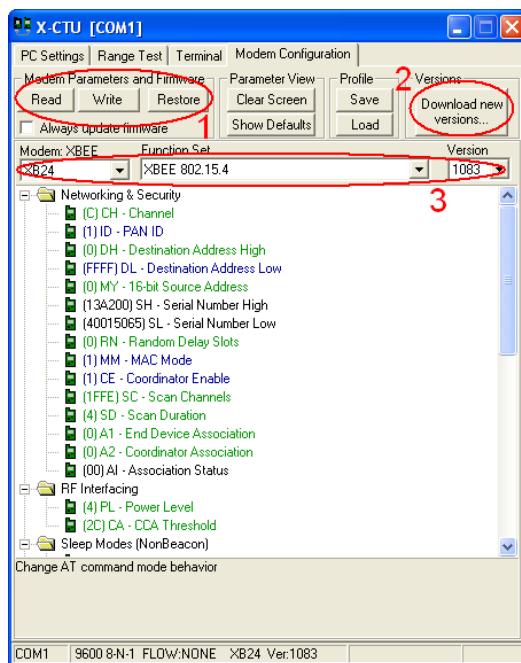


obr. 25 – Úvodní karta X-CTU, ověření typu modulu a firmware

Po přepnutí na kartu „Modem Configuration“ pak máme možnost nastavovat tyto parametry:

- CH – Channel – nastavení používaného kanálu – nastavuji kanál C
- ID – PAN ID – identifikační číslo sítě – rozsah 0-0xFFFF; nastavuji hodnotu 1
- DH – Destination Address High – horních 32 bitů 64-bitové cílové adresy, nastavuji 0
- DL – Destination Address Low – spodních 32 bitů 64-bitové cílové adresy, nastavuji 0xFFFF (broadcast address for PAN) – nastavuji jen u zařízení typu Coordinator vzhledem k uvažované topologii sítě.
- MY – 16-bitová zdrojová adresa – možno i nepoužít – nastavuji 0
- SH – Serial Number High – pouze čtení
- SL – Serial Number Low – pouze čtení
- RN – Random Delay Slots – nastavuji 0
- MM – MAC Mode – umožňuje aktivovat MaxStream hlavičku v paketech nebo nastavit čistě 802.15.4 s nebo bez ACK – nastavuji 802.15.4 NO ACKS
- CE – Coordinator Enable – mění coordinator / end device – nastavuji coordinator
- PL – Power Level – nastavuji 4 - HIGHEST
- SM – Sleep Mode – nastavuji 0 - NO SLEEP
- BD – Interface Data Rate – nastavuji 3 - 9600
- RO – Packetization Timeout – nastavuji 0
- D7 – DIO7 Configuration – nastavuji CTS Flow Control - DISABLED
- D6 – DIO6 Configuration – nastavuji RTS Flow Control - DISABLED
- D5 – DIO5 Configuration – nastavuji 1 - ASSOCIATED INDICATOR
- P0 – PWM0 Configuration – nastavuji 0 - DISABLED
- AP – API Enable – nastavuji 0 - API DISABLED

Ostatní parametry nechávám beze změny, jak byly nastaveny výrobcem. Průběh nastavování parametrů ukazuje *obr.26*.



obr. 26 – Nastavení parametrů čipu a možnosti X-CTU

1: načtení / uložení / obnovení nastavení

2: možnost získat aktuální firmware pomocí Internetu

3: informace o typu produktu, protokolu a aktuálním firmware

4.4. Zahájení komunikace

Zda skutečně dochází ke komunikaci dvou výše popsaným způsobem nastavených čipů, jsme ověřili pomocí dvou PC a dvou vývojových desek dodávaných jako příslušenství firmou MaxStream. Jeden z čipů nastavíme jako Coordinator (informační LED na vývojové desce bliká s $f=1\text{Hz}$) a druhý jako End Device (informační LED bliká s $f=2\text{Hz}$). Pro kontrolu spojení využijeme již zmíněný software X-CTU, a sice záložku „Terminal“. Obě zařízení se po zapnutí napájení automaticky spárují (dle očekávání) podle postupu stanoveného protokolem (postup párování je rozebrán výše). Nyní už můžeme sledovat datové přenosy (pro názornost přenáším pouze text). Odeslaná data jsou v okně zobrazena modře, přijatá červeně.



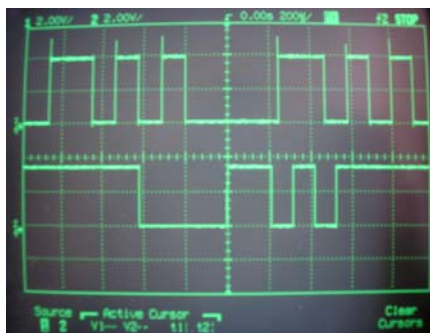
obr. 27 – Komunikace čipů pomocí PC

4.4.1. Terminal

V programu X-CTU v záložce „Terminal“ dále můžeme kromě posílání textu nebo připojování paketů nastavit dodatečně i některé vlastnosti čipu pomocí AT příkazů v dočasně aktivovaném AT módu. Ten vyvoláme implicitně kombinací „+++“ a po vrácení OK ze systému můžeme zadat patřičný příkaz (viz příloha 3) dle syntaxe uvedené výše. Po uplynutí doby, kterou je rovněž možno nastavit (CT – AT Command Mode Timeout) dojde k samočinnému ukončení AT módu a přechodu zpět do Transparentního módu. Karta „Terminal“ dále umožňuje zobrazit odesílané / přijímané znaky v hexadecimálním vyjádření, viz tlačítko Show Hex, jak je rovněž patrné na obr. 27.

4.4.2. Předávání rámců

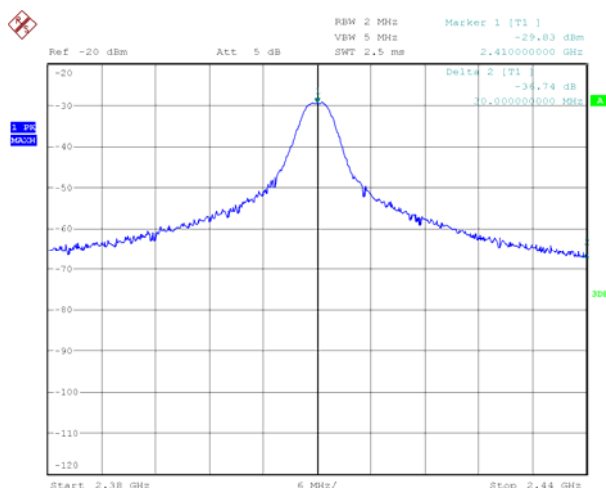
Nyní připojíme náš přípravek k osciloskopu, abychom viděli, zda probíhá předávání dat mezi procesorem a čipem XBee. Jak ukazuje obr. 28, datové rámce vypadají dle předpokladu. Kanál B (dole) zobrazuje vzorový rámec zachycený na desce originálního příslušenství, kanál A (nahore) ukazuje rámec vysílaný našim výrobkem. Rámec, jak je možno vidět na obrázku, se skládá z 1 start bitu (low), 8 informačních bitů a 1 stop bitu (high), nečinná úroveň je high. V tomto místě jsem však odhalil problém s propojením procesoru a XBee. Tento problém nebylo těžké odstranit pomocí neestetické drátové propojky na DPS, kde zřejmě nedopatřením došlo k propojení XBee DI s nevhodným pinem procesoru.



obr. 28 – Průběh signálu na DI pinech XBee

4.4.3. Vysílání přijatých rámců

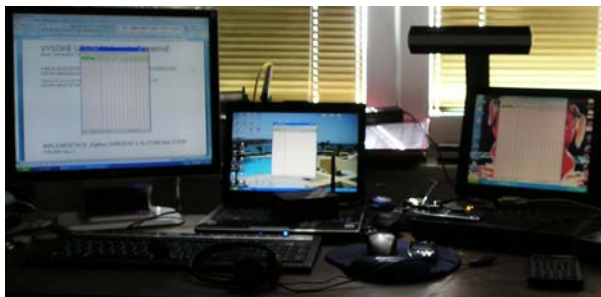
Data tedy již proudí z našeho zařízení, které nyní nazvu vysílač, jelikož přijímací funkce tohoto zařízení je záměrně potlačena (viz zdrojový kód). Ze zobrazení spektra na analyzátoru (viz obr. 29) je patrné, že po odstranění výše uvedené závady je vše v pořádku, čip ve funkci Coordinator vysílá přesně dle protokolu v nastaveném kanálu C.



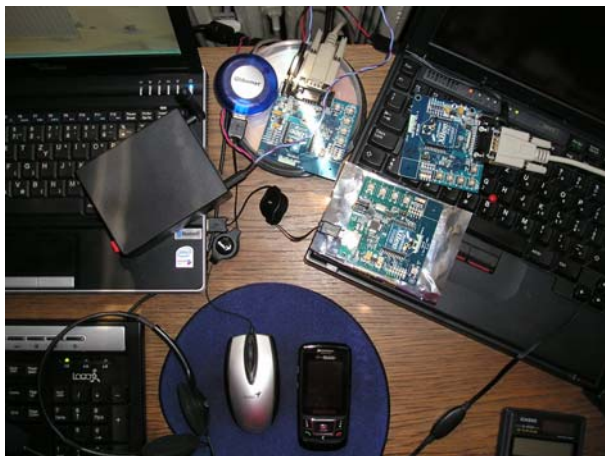
obr. 29 – Spektrum vysílaného signálu

4.5. Komunikace s více PC

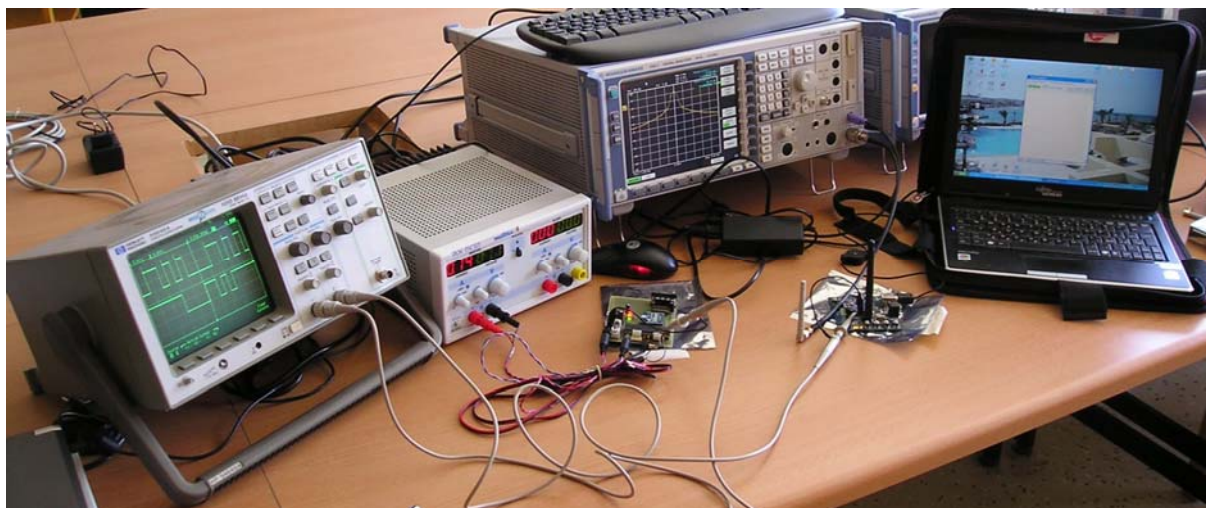
Abych ověřil další možnosti spárování a předávání dat z vysílače k přijímačům, sestavím nyní menší PAN, jejímž středem bude vysílací Coordinator a několik přijímacích End Devices. Coordinator nyní již pracuje automaticky, kontrolován procesorem, ihned po připojení napájecího napětí a bez vnějších zásahů do řízení. Naproti tomu End Devices pracují na vývojových deskách z originálního příslušenství připojené každé k jednomu PC. Naše pokusná síť má tedy celkem 4 členy, jak je vidět na obr. 30 a 31.



obr. 30 – Zapojení měřicího pracoviště - datová komunikace



obr. 31 – Zapojení měřicího pracoviště - zapojení HW



obr. 32 – Zapojení měřicího pracoviště - laboratoř

Toto měření proběhlo bez problémů. Po správném nastavení parametrů XBee modulů je možné vidět na monitorech přijímaná data, což poukazuje na vhodnost použití vysílače pro přenos dat více uživatelům současně. Jelikož celá provizorní PAN pracuje správně a dle očekávání, přesuneme se nyní do reálného provozu pro uskutečnění měření dosahu vysílače a vyhodnocení výsledků práce.

5. Výsledky práce

5.1. Měření v provozu

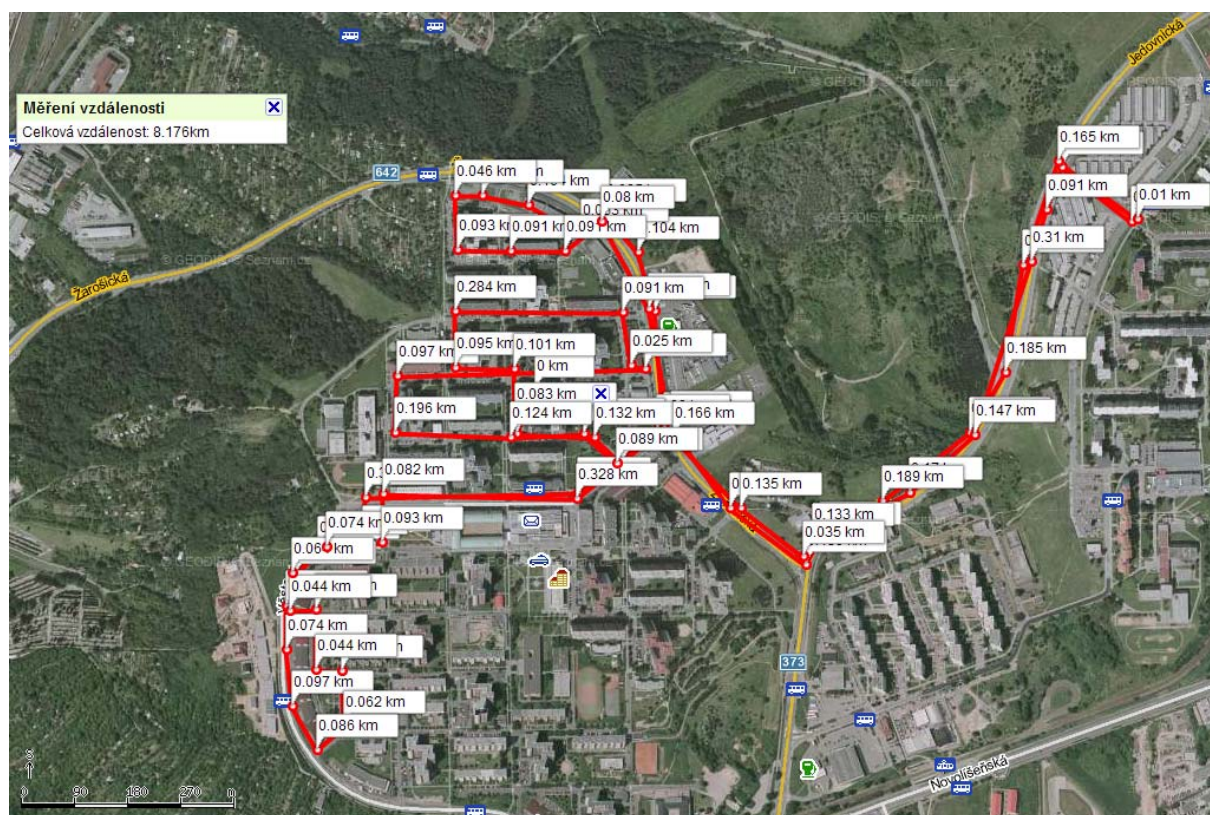
Za účelem ověření parametrů udávaných výrobcem XBee v katalogu jsme provedli test dosahu vysílače, a to jak v zástavbě, tak na přímou viditelnost. Vysílač s čipem XBee jsme nastavili na výstupní výkon 1mW a umístili na stožár na střeše dvanácti podlažního panelového domu v okrajové části města, viz *obr. 33*. V okolí této budovy jsme pak uskutečnili měření pomocí přijímače umístěného na automobilu (*obr. 34*) a následně zakreslili do mapy místa bezchybného příjmu (*obr. 35*). Na toto měření by neměla mít vliv doba potřebná ke spárování vysílače a přijímače po občasných výpadech signálu v rádiovém stínu, neboť se přijímač pohyboval velmi pomalu, rychlostí max. 30 km/hod. Ze změřených hodnot snadno odvodíme následující poznatky:

Dosah vysílače na přímou viditelnost (XBee, 1mW):

- katalogová hodnota: až 100m
- změřená hodnota: až 300m

Dosah vysílače v zástavbě (XBee, 1mW):

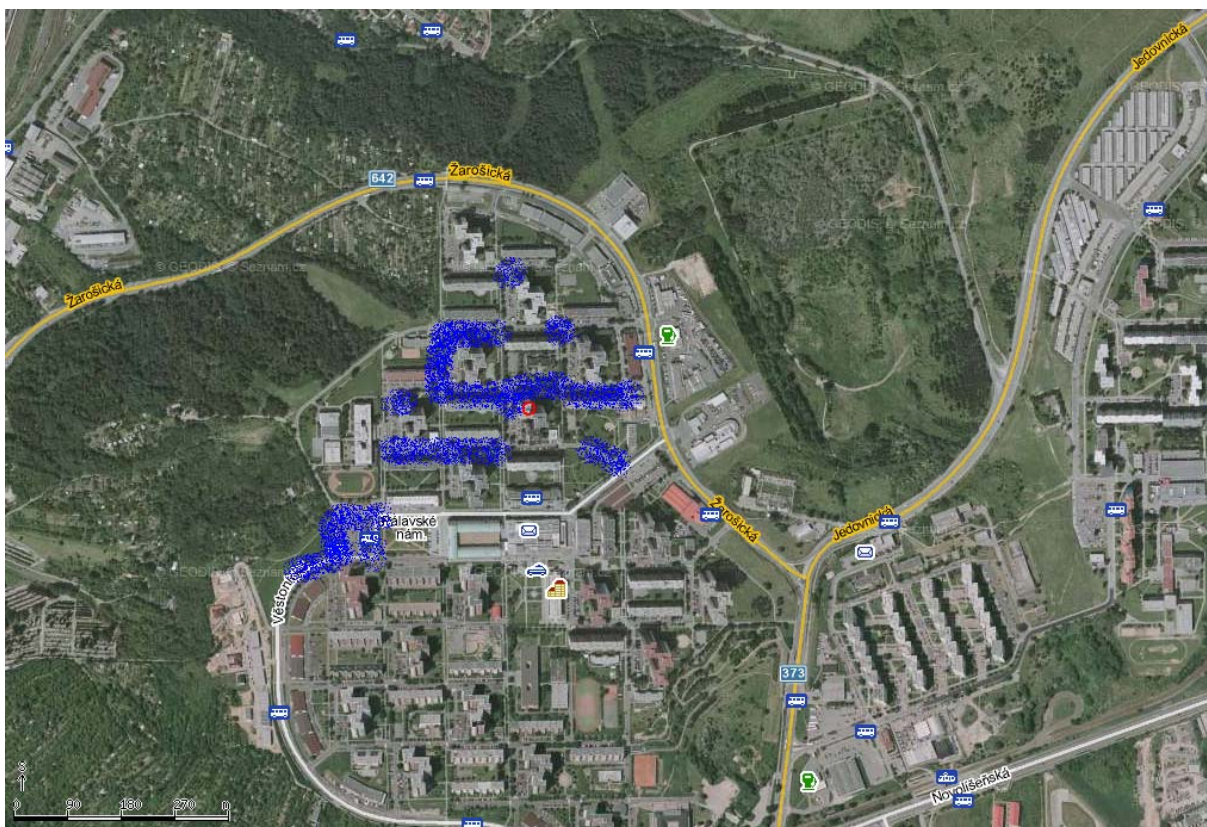
- katalogová hodnota: až 30m
- změřená hodnota: až 60m



*obr. 33 – Měření dosahu – znázornění měřicí cesty (umístění vysílače v bodě 0Km)
(mapa generována pomocí [28])*



obr. 34 – Měření dosahu – umístění vysílače (vlevo) a přijímače (vpravo)



obr. 35 – Měření dosahu – červeně označen vysílač, modře oblast navázání kvalitního spojení (mapa generována pomocí [28])

5.2. Závěrečné hodnocení

Podařilo se nám tedy realizovat funkční vzorek ZigBee komunikátoru s jednoduchým úkolem vysílat data. Tento vzorek nyní můžeme používat k měřením a pokusům a ke zdokonalování řídicího programu.

Po důkladném zkoumání situace a měření jsem dospěl k závěru, že použití standardu ZigBee v automobilovém průmyslu je nejen možné, ale i velmi perspektivní. Tento komunikační protokol bude jistě vhodné využívat podle teoretických úvah, které jsem již zmínil v rozboru situace v počátku své práce. S vhodným software a rozvinutou hardware strukturou bude skutečně možné předcházet krizovým situacím u automobilů vybavených přijímačem pracujícím s protokolem 802.15.4 resp. ZigBee.

5.3. Další cíle

Ve své následující činnosti se hodlám zaměřit na vývoj dalších modulů dle komunikačního schématu (viz *obr. 12*), zdokonalení software, využití API módu k řízení komunikace a předávání datových paketů, vytvoření zpětného kanálu pro sběr informací z infrastruktury, návrh nové, propracovanější DPS a hlavně členu pro komunikaci mezi Přijímačem automobilu a uživatelským rozhraním – obrazovka / audiosystém automobilu.

Použité informační zdroje

- [1] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>
- [2] Sinem Coleri Ergen: *ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary*. September 10, 2004, dostupné na <http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/838/papers/zigbee.pdf>
- [3] University of Edinburgh: *CS4/MSc Computer Networking*. University of Edinburgh, School of informatics, 2005, dostupné na <http://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cn>
- [4] Bob Heile, *Wireless Sensors and Control Networks: Enabling New Opportunities with ZigBee*, ZigBee Alliance, 2006
- [5] Mikko Kohvakka, Mauri Kuorilehto, Marko Hännikäinen, Timo D. Hämäläinen: *Performance Analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for Large-Scale Wireless Sensor Network Applications*, Tampere University of Technology, Finland, dostupné na <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1163619>
- [6] Walid Abla, George Frangieh, Ali Dika: *Inter Car Communication*, American University of Beirut, 2006, dostupné na http://webfea-lb.fea.aub.edu.lb/ece/docs/fyp/2006/10_Report.pdf
- [7] Gérard Segarra, Telematics projects manager, RENAULT SAS: *Activities and Applications of the Car 2 Car Communication: The Renault vision*, dostupné na http://www.car-to-car.org/fileadmin/dokumente/pdf/C2C-CC_presentation_2_Renault.pdf
- [8] Felipe Gil Castineira: *Configuración y aplicaciones para automoción*, Universidade de Vigo
- [9] Dr. Hendrik Zurlinden: *Staufreies Hessen 2015*, 2005
- [10] Enrico Minack: *Evaluation of the influence of channel conditions on Car2X Communication*, Diploma Thesis, Chemnitz University of Technology, 2005 dostupné na <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2005/0157/data/index.html>
- [11] Ed Callaway: *Low Power Consumption Features of the IEEE 802.15.4/ZigBee LR-WPAN Standard*, Florida Communication Research Lab, Motorola Labs, 2003, dostupné na <http://www.cens.ucla.edu/sensys03/sensys03-callaway.pdf>
- [12] ZigBee Alliance: *Bridging ZigBee to Legacy Protocols*, ZigBee Conference San Francisco Open House, March 2, 2005 dostupné na <http://www.zigbee.org/en/documents/KeynoteControl4.pdf>
- [13] Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.: *Mikroprocesorová technika – přednášky*, VUT Brno 2007

- [14] Hardware.cz, <http://www.hw.cz>
- [15] Radiocrafts AS, <http://www.radiocrafts.com>
- [16] MaxStream, Inc.: *XBee manual* a *X-CTU manual* dostupné na <http://www.maxstream.net>
- [17] Car 2 Car Communication Consortium <http://www.car-to-car.org>
- [18] Český telekomunikační úřad <http://www.ctu.cz>
- [19] Advanced Radio Telemetry spol. s r.o. <http://www.artbrno.cz>
- [20] ADI International <http://www.lantronix.cz>; <http://www.olympo.cz>
- [21] Dopravní značení <http://www.flexkv.cz>, <http://www.somaro.cz>
- [22] Elektronika E-Zin <http://elektronika.ezin.cz>
- [23] Folcom – vývoj HW a SW <http://ww.folcom.cz>
- [24] Atmel Corporation – Atmega16 datasheet, <http://www.atmel.com>
- [25] GES Electronics – elektronické součástky, katalogy, <http://www.ges.cz>
- [26] GM Electronic – elektronické součástky, katalogy <http://www.gme.cz>
- [27] Krup computer – hardware a příslušenství <http://www.krup.cz>
- [28] Seznam – mapy <http://www.seznam.cz>
- [29] Gemtree Software, <http://www.gemtree.cz>, 2007)

Abecední seznam zkratek

ABS	Anti-blocking system	System, který zabraňuje blokování kol.
API	Application Programming Interface	Programové rozhraní aplikace
BT	Bluetooth	"modrozub" - bezdrátová technologie připojení periférií v ISM pásmu
CAP	Contention Access Period	Část komunikačního rámce
CE	Coordinator Enable	Volba typu uzlu
CFP	Contention Free Period	Část komunikačního rámce
CTS	Clear To Send	Příznak odesílání dat
DH	Destination Adress High	Část cílové adresy
DI	Data Input	Datový vstup
DL	Destination Adress Low	Část cílové adresy
DO	Data Output	Datový výstup
DPS	Deska Plošných spojů	
ED	End Device	Koncové zařízení
ESP	Electronic Stability Programme	Elektronický Stabilizační Systém, Stabilizace začínajícího smyku
FC	Flow Control	Kontrola datového toku
FFD	Full Function Device	Plně funkční zařízení
GND	Ground	Uzemění
GPRS	General Packet Radio System	Obecný paketový rádiový systém
GPS	Global Positioning System	System pro určování polohy
GSM	Global System for Mobile communications	System pro mobilní komunikace
GTS	Guaranteed Time Slots	Část komunikačního rámce
HW	Hardware	Hardware
CH	Channel	Kanál
IO	Integrovaný Obvod	
ISM	Industrial, Scientific, Medical	Označení bezlicenčního rádiového pásmu
LAN	Lokal Area Network	Místní síť
LED	Light Emitting Diode	Dioda vyzařující světlo
MM	MAC Mode	Typ funkce XBee zařízení
OEM	Original Equipment Manufacturer	V případě software se termín používá pro variantu společného prodeje s vybraným hardware
PAN	Personal Area Network	Osobní síť
PC	Personal Computer	Osobní počítač
PL	Poer Level	Výkonová úroveň
RFD	Reduced function device	Zařízení s omezenou funkcí
RTS	Request To Send	Příznak požadavku na odeslání dat
SH	Serial Number High	Část sériového čísla
SL	Serial Number Low	Část sériového čísla
SM	Sleep Mode	Stav spánku



SMD	Surface Mounted Device	Součástka pro povrchovou montáž
SPI	Serial Peripheral Interface	Sériové periferní rozhraní
SW	Software	Programové vybavení
UMTS	Universal Mobile Telephone Standard	Nástupce mobilní sítě GSM umožňující rychlý přenos dat.

Seznam příloh

Příloha 1 – XBee datasheet	Error! Bookmark not defined.
Příloha 2 – Xbee electrical characteristics	Error! Bookmark not defined.
Příloha 3 – AT commands table	Error! Bookmark not defined.
Příloha 4 – Aktualizované schéma zapojení	Error! Bookmark not defined.
Příloha 5 – Nákres DPS v měřítku 1:1	Error! Bookmark not defined.

Příloha 1 – XBee datasheet

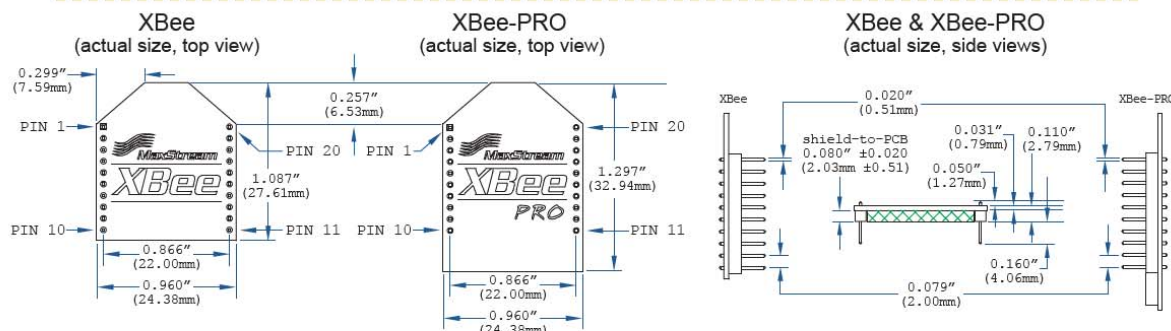
XBee™ & XBee-PRO™ 2.4 GHz OEM RF Modules

Specifications		XBee 	XBee-PRO 
Performance	Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	up to 300 ft. (100 m)
	Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	up to 1 mile (1.6 km)
	Transmit Power Output	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm)*, 100 mW EIRP*
	RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
	Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% PER)	-100 dBm (1% PER)
Power Requirements	Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
	Transmit Current (typical)	45 mA (@ 3.3 V)	215 mA (@ 3.3 V, 18 dBm)
	Idle / Receive Current (typical)	50 mA (@ 3.3 V)	55 mA (@ 3.3 V)
	Power-down Current	< 10 μ A	< 10 μ A
General	Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
	Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
	Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
	Antenna Options	U.FL Connector, Chip Antenna or Integrated Whip Antenna	U.FL Connector, Chip Antenna or Integrated Whip Antenna
Networking and Security	Supported Network Topologies	Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer and Mesh	Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer and Mesh
	Number of Channels	16 Direct Sequence Channels (software selectable)	12 Direct Sequence Channels (software selectable)
	Filtration Options	PAN ID, Channel & Source/Destination Addresses	PAN ID, Channel & Source/Destination Addresses
Agency Approvals	FCC Part 15.247	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
	Industry Canada (IC)	4214A-XBEE	4214A-XBEEPRO
	Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max TX output = 10 mW)

Specifications are subject to change without notice.

* When operating in Europe: XBee-PRO Modules must be configured to operate at a maximum TX power output level of 10 dBm (power output level is set using the PL command). Additionally, European regulations stipulate an EIRP power maximum of 12.86 dBm (19 mW).

Mechanical Drawings




MaxStream®
 355 South, 520 West, ste. 180
 London, UT 84042
 © 2006 MaxStream, Inc.

For the best in wireless data solutions and support, contact MaxStream, Inc.

phone: (866) 765-9885 (toll-free in U.S. & Canada)
 (801) 765-9885 (worldwide)

fax: (801) 765-9895

web: www.maxstream.net
 (live chat & many other resources available)

Příloha 2 – Xbee electrical characteristics

XBee/XBee-PRO™ OEM RF Modules - 802.15.4 - v1.xAx [2007.01.04]

Chapter 1 - XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

1.6. Electrical Characteristics

Table 1-03. DC Characteristics (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35 * VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7 * VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2 mA, VCC ≥ 2.7 V	-	-	0.5	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} = -2 mA, VCC ≥ 2.7 V	VCC - 0.5	-	-	V
I _{IIN}	Input Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	μA
I _{IIOZ}	High Impedance Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	μA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3 V	-	45 (XBee) 215 (PRO)	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3 V	-	50 (XBee) 55 (PRO)	-	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	μA

Table 1-04. ADC Characteristics (Operating)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{REFH}	VREF - Analog-to-Digital converter reference range		2.08	-	V _{DDAD}	V
I _{REF}	VREF - Reference Supply Current	Enabled	-	200	-	μA
		Disabled or Sleep Mode	-	< 0.01	0.02	μA
V _{INDC}	Analog Input Voltage ¹		V _{SSAD} - 0.3	-	V _{DDAD} + 0.3	V

1. Maximum electrical operating range, not valid conversion range.

Table 1-05. ADC Timing/Performance Characteristics¹

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
R _{AS}	Source Impedance at Input ²		-	-	10	kΩ
V _{AIN}	Analog Input Voltage ³		V _{REFL}		V _{REFH}	V
RES	Ideal Resolution (1 LSB) ⁴	2.08V ≤ V _{DDAD} ≤ 3.6V	2.031	-	3.516	mV
DNL	Differential Non-linearity ⁵		-	±0.5	±1.0	LSB
INL	Integral Non-linearity ⁶		-	±0.5	±1.0	LSB
E _{zs}	Zero-scale Error ⁷		-	±0.4	±1.0	LSB
F _{FS}	Full-scale Error ⁸		-	±0.4	±1.0	LSB
E _{IL}	Input Leakage Error ⁹		-	±0.05	±5.0	LSB
E _{TU}	Total Unadjusted Error ¹⁰		-	±1.1	±2.5	LSB

1. All ACCURACY numbers are based on processor and system being in WAIT state (very little activity and no IO switching) and that adequate low-pass filtering is present on analog input pins (filter with 0.01 μF to 0.1 μF capacitor between analog input and VREFL). Failure to observe these guidelines may result in system or microcontroller noise causing accuracy errors which will vary based on board layout and the type and magnitude of the activity.

Data transmission and reception during data conversion may cause some degradation of these specifications, depending on the number and timing of packets. It is advisable to test the ADCs in your installation if best accuracy is required.

2. R_{AS} is the real portion of the impedance of the network driving the analog input pin. Values greater than this amount may not fully charge the input circuitry of the ATD resulting in accuracy error.

3. Analog input must be between V_{REFL} and V_{REFH} for valid conversion. Values greater than V_{REFH} will convert to \$3FF.

4. The resolution is the ideal step size or 1LSB = (V_{REFH} - V_{REFL}) / 1024

5. Differential non-linearity is the difference between the current code width and the ideal code width (1LSB). The current code width is the difference in the transition voltages to and from the current code.

6. Integral non-linearity is the difference between the transition voltage to the current code and the adjusted ideal transition voltage for the current code. The adjusted ideal transition voltage is (Current Code - 1/2) * (1 / ((V_{REFH} + E_{FS}) - (V_{REFL} + E_{zs}))).

7. Zero-scale error is the difference between the transition to the first valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) * (1 / (V_{REFH} - V_{REFL})).

8. Full-scale error is the difference between the transition to the last valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) * (1 / (V_{REFH} - V_{REFL})).

9. Input leakage error is error due to input leakage across the real portion of the impedance of the network driving the analog pin. Reducing the impedance of the network reduces this error.

10. Total unadjusted error is the difference between the transition voltage to the current code and the ideal straight-line transfer function. This measure of error includes inherent quantization error (1/2LSB) and circuit error (differential, integral, zero-scale, and full-scale) error. The specified value of E_{TU} assumes zero E_{IL} (no leakage or zero real source impedance).

Příloha 3 – AT commands table

XBee/XBee-PRO ZigBee OEM RF Modules v8.x1x Beta [2007.01.04]

Chapter 4 - RF Module Configuration

4.2. Command Reference Tables

XBee/XBee-PRO RF Modules expect numerical values in hexadecimal. Hexadecimal values are designated by a "0x" prefix. Decimal equivalents are designated by a "d" suffix. Table rows are sorted by command category, then by logic of most commonly used.

Special

Table 4-02. Special Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
WR	Special	Write. Write parameter values to non-volatile memory so that parameter modifications persist through a subsequent resets. Note: Once WR is issued, no additional characters should be sent to the module until after the "OK" response is received.	CRE	--	--
RE	Special	Restore Defaults. Restore module parameters to factory defaults. RE command does not reset the ID parameter.	CRE	--	--
FR	Special	Software Reset. Reset module. Responds immediately with an "OK" then performs a reset ~100ms later. Use of the FR command will cause a network layer restart on the node if SC or ID were modified since the last reset.	CRE	--	--
NR	Special	Network Reset. Reset network layer parameters on one or more modules within a PAN. Responds immediately with an "OK" then causes a network restart. All network configuration and routing information is consequently lost. <i>If NR = 0:</i> Resets network layer parameters on the node issuing the command. This option is only supported on Routers and End Devices and must be used with caution. Refer to the "Resetting Coordinator" section for more information. <i>If NR = 1:</i> Sends broadcast transmission to reset network layer parameters on all nodes in the PAN.	RE (when NR=0), CRE (when NR=1)	0 - 1	--

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

Networking & Security

Table 4-03. Networking Commands (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
CH	Networking (Addressing)	Operating Channel. Read the channel number used for transmitting and receiving between RF modules. Uses 802.15.4 channel numbers.	CRE	0, 0x0B-0x1A (XBee) 0, 0x0C-0x17 (XBee-PRO) [read-only]	0
ID	Networking (Addressing)	PAN ID. Set/Get the PAN (Personal Area Network) ID. <i>Coordinator</i> - Set the preferred Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to auto-select. <i>Router / End Device</i> - Set the desired Pan ID. When the device searches for a Coordinator, it attempts to only join to a parent that has a matching Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to join a parent operating on any Pan ID. Changes to ID should be written to non-volatile memory using the WR command. ID changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up).	CRE	0 - 0xFFFF, 0xFFFF	0x0123 (291d)
DH ²	Networking (Addressing)	Destination Address High. Set/Get the upper 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DL, it defines the destination address used for transmission. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN. DH is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0
DL ²	Networking (Addressing)	Destination Address Low. Set/Get the lower 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DH, DL defines the destination address used for transmission. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN. DL is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0xFFFF (Coordinator) 0 (Router/End Device)
MY	Networking (Addressing)	16-bit Network Address. Get the 16-bit Network Address of the module.	CRE	0 - 0xFFFE [read-only]	0xFFFFE
MP	Networking (Addressing)	16-bit Parent Network Address. Get the 16-bit parent Network Address of the module.	RE	0 - 0xFFFE [read-only]	0xFFFFE
SH	Networking (Addressing)	Serial Number High. Read high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
SL	Networking (Addressing)	Serial Number Low. Read low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
RN	Networking (Addressing)	Random Delay Slots. Set/Read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm (used for collision avoidance). If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).	CRE	0 - 3 [exponent]	3
NI	Networking (Identification)	Node Identifier. Stores a string identifier. The register only accepts printable ASCII data. In AT Command Mode, a string can not start with a space. A carriage return ends the command. Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered. This string is returned as part of the ND (Node Discovery) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.	CRE	20-Byte printable ASCII string	--

Table 4-03. Networking Commands (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default																
BH	Networking (Identification)	Broadcast Hops. Set/Read the maximum number of hops for each broadcast data transmission. Setting this to 0 will use the maximum number of hops.	CRE	0 - 7																	
NT	Networking (Identification)	Node Discover Timeout. Set/Read the amount of time a node will spend discovering other nodes when ND or DN is issued.	CRE	0 - 0xFC [x 100 msec]	0x3C (60d)																
ND	Networking (Identification)	Node Discover. Discovers and reports all RF modules found. The following information is reported for each module discovered. MY<CR> SH<CR> SL<CR> NI<CR> (Variable length) PARENT_NETWORK_ADDRESS (2 Bytes)<CR> DEVICE_TYPE<CR> (1 Byte: 0=Coord, 1=Router, 2=End Device) STATUS<CR> (1 Byte: Reserved) PROFILE_ID<CR> (2 Bytes) MANUFACTURER_ID<CR> (2 Bytes) <CR> After (NT * 100) milliseconds, the command ends by returning a <CR>. ND also accepts a Node Identifier (NI) as a parameter (optional). In this case, only a module that matches the supplied identifier will respond. If ND is sent through the API, each response is returned as a separate AT_CMD_Response packet. The data consists of the above listed bytes without the carriage return delimiters. The NI string will end in a "0x00" null character. Once the ND command has finished executing, the API will return one more AT_CMD_Response packet (with no data).	CE	optional 20-Byte NI or MY value	--																
DN	Networking (Identification)	Destination Node. Resolves an NI (Node Identifier) string to a physical address (case-sensitive). The following events occur after the destination node is discovered: <AT Firmware> 1. DL & DH are set to the extended (64-bit) address of the module with the matching NI (Node Identifier) string. 2. OK (or ERROR) is returned. 3. Command Mode is exited to allow immediate communication. <API Firmware> 1. The 16-bit network and 64-bit extended addresses are returned in an API Command Response frame. If there is no response from a module within (NT * 100) milliseconds or a parameter is not specified (left blank), the command is terminated and an "ERROR" message is returned. In the case of an ERROR, Command Mode is not exited.	CRE	up to 20-Byte printable ASCII string	--																
SC	Networking (Joining)	Scan Channels. Set/Read the list of channels to scan. Coordinator - Bit field list of channels to choose from prior to starting network. Router/End Device - Bit field list of channels that will be scanned to find a Coordinator/Router to join. Changes to SC should be written using WR command. SC changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up). Bit (Channel): <table><tr><td>0 (0x0B)</td><td>4 (0x0F)</td><td>8 (0x13)</td><td>12 (0x17)</td></tr><tr><td>1 (0x0C)</td><td>5 (0x10)</td><td>9 (0x14)</td><td>13 (0x18)</td></tr><tr><td>2 (0x0D)</td><td>6 (0x11)</td><td>10 (0x15)</td><td>14 (0x19)</td></tr><tr><td>3 (0x0E)</td><td>7 (0x12)</td><td>11 (0x16)</td><td>15 (0x1A)</td></tr></table>	0 (0x0B)	4 (0x0F)	8 (0x13)	12 (0x17)	1 (0x0C)	5 (0x10)	9 (0x14)	13 (0x18)	2 (0x0D)	6 (0x11)	10 (0x15)	14 (0x19)	3 (0x0E)	7 (0x12)	11 (0x16)	15 (0x1A)	CRE	1 - 0xFFFF[bitfield] (bits 0, 13, 14, 15 not allowed for XBee-PRO)	0x1FFE (All XBee-PRO channels)
0 (0x0B)	4 (0x0F)	8 (0x13)	12 (0x17)																		
1 (0x0C)	5 (0x10)	9 (0x14)	13 (0x18)																		
2 (0x0D)	6 (0x11)	10 (0x15)	14 (0x19)																		
3 (0x0E)	7 (0x12)	11 (0x16)	15 (0x1A)																		
SD	Networking (Joining)	Scan Duration. Set/Read the scan duration exponent. Changes to SD should be written using WR command. Coordinator - Duration of the Active and Energy Scans (on each channel) that are used to determine an acceptable channel and Pan ID for the Coordinator to startup on. Router / End Device - Duration of Active Scan (on each channel) used to locate an available Coordinator / Router to join during Association. Scan Time is measured as: (# Channels to Scan) * (2 ^ SD) * 15.36ms - The number of channels to scan is determined by the SC parameter. The XBee can scan up to 16 channels (SC = 0xFFFF) and the XBee-PRO can scan up to 12 channels (0x1FFE). Sample Scan Duration times (13 channel scan): If SD = 0, time = 0.200 sec SD = 2, time = 0.799 sec SD = 4, time = 3.190 sec SD = 6, time = 12.780 sec	CRE	0 - 7 [exponent]	3																
NJ	Networking (Joining)	Node Join Time. Set/Read the time that a Coordinator/Router allows nodes to join. This value can be changed at run time without requiring a Coordinator or Router to restart. The time starts once the Coordinator or Router has started. The timer is reset on power-cycle or when NJ changes.	CR	0 - 0x40, 0xFF [x 1 sec]	0xFF (always allows joining)																

Table 4-03. Networking Commands (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
AI	Networking (Joining)	Association Indication. Read information regarding last node join request. 0x00 - Successful completion - Coordinator started or Router/End Device found and joined with a parent. 0x21 - Scan found no PANs 0x22 - Scan found no valid PANs based on current SC and ID settings 0x23 - Valid Coordinator or Routers found, but they are not allowing joining (NJ expired) 0x24 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more Routers to join 0x25 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more End Devices to join 0x26 - Cannot join to a node because it was a child or descendent of this device 0x27 - Node Joining attempt failed 0x28 - Device is orphaned and is looking for its parent using Orphan Scans 0x29 - Router Start attempt failed 0x2A - Coordinator Start attempt failed 0xFF - Scanning for a Parent	CRE	0 - 0xFF [read-only]	—

1. Node types that support the command: C=Coordinator, R=Router, E=End Device
2. Command supported by modules using AT Command firmware only

RF Interfacing

Table 4-04. RF Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
PL	RF Interfacing	Power Level. Select/Read the power level at which the RF module transmits conducted power.	CRE	0 - 4 (XBee / XBee-PRO) 0 = -10 / 10 dBm 1 = -6 / 12 dBm 2 = -4 / 14 dBm 3 = -2 / 16 dBm 4 = 0 / 18 dBm	4
CA	RF Interfacing	CCA Threshold. Set/Read the CCA (Clear Channel Assessment) threshold. Prior to transmitting a packet, a CCA is performed to detect energy on the channel. If the detected energy is above the CCA Threshold, the module will not transmit the packet.	CRE	0x24 - 0x50 [-dBm]	0x40 (-64d dBm)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

Serial Interfacing (I/O)

Table 4-05. Serial Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
AP ²	Serial Interfacing	API Enable. Enable API Mode. The AP parameter is only applicable when using modules that contain the following firmware versions: 8.1xx (Coordinator), 8.3xx (Router), 8.5xx (End Device)	CRE	1 - 2 1 = API-enabled 2 = API-enabled (w/escaped control characters)	1
BD	Serial Interfacing	Interface Data Rate. Set/Read the serial interface data rate for communication between the module serial port and host. Any value above 0x07 will be interpreted as an actual baud rate. When a value above 0x07 is sent, the closest interface data rate represented by the number is stored in the BD register.	CRE	0 - 7 (standard baud rates) 0 = 1200 bps 1 = 2400 2 = 4800 3 = 9600 4 = 19200 5 = 38400 6 = 57600 7 = 115200 0x80 - 0x1C200 (non-standard rates)	3
RO	Serial Interfacing	Packetization Timeout. Set/Read number of character times of inter-character silence required before packetization. Set (RO=0) to transmit characters as they arrive instead of buffering them into one RF packet.	CRE	0 - 0xFF [x character times]	3
D7	Serial Interfacing	DIO7 Configuration. Select/Read options for the DIO7 line of the RF module.	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = CTS Flow Control	1
D5	Serial Interfacing	DIO5 Configuration. Configure options for the DIO5 line of the RF module. Options include: Associated LED indicator (LED blinks 1x/sec when the module is powered and 2x/sec when module is associated to a Coordinator).	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = Associated indication LED	1

Table 4-05. Serial Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
P0	Serial Interfacing	PWM Configuration. Select/Read function for PWM0.	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = RSSI PWM	1
RP	Diagnostics	RSSI PWM Timer. Time RSSI signal will be output after last transmission. When RP = 0xFF, output will always be on.	CRE	0 - 0xFF [x 100 ms]	0x28 (40d)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device
2. Command supported by modules using API firmware only

Diagnostics

Table 4-06. Diagnostics Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
VR	Diagnostics	Firmware Version. Read firmware version of the module.	CRE	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set
HV	Diagnostics	Hardware Version. Read hardware version of the module.	CRE	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

AT Command Options

Table 4-07. AT Command Options Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
CT ²	AT Command Mode Options	Command Mode Timeout. Set/Read the period of inactivity (no valid commands received) after which the RF module automatically exits AT Command Mode and returns to Idle Mode.	CRE	2 - 0x028F [x 100 ms]	0x64 (100d)
CN ²	AT Command Mode Options	Exit Command Mode. Explicitly exit the module from AT Command Mode.	CRE	--	--
GT ²	AT Command Mode Options	Guard Times. Set required period of silence before and after the Command Sequence Characters of the AT Command Mode Sequence (GT + CC + GT). The period of silence is used to prevent inadvertent entrance into AT Command Mode.	CRE	1 - 0x0CE4 [x 1 ms] (max of 3.3 decimal sec)	0x3E8 (1000d)
CC ²	AT Command Mode Options	Command Sequence Character. Set/Read the ASCII character value to be used between Guard Times of the AT Command Mode Sequence (GT + CC + GT). The AT Command Mode Sequence enters the RF module into AT Command Mode. CC command is only applicable when using modules that contain the following 'AT Command' firmware versions: 8.0xx (Coordinator), 8.2xx (Router), 8.4xx (End Device)	CRE	0 - 0xFF	0x2B ('+' ASCII)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device
2. Command supported by modules using AT Command firmware only

Příloha 5 – Náskres DPS v měřítku 1:1

