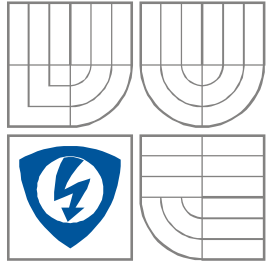


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÉ ZABEZPEČOVACÍ ZAŘÍZENÍ

WIRELESS SECURITY AND SURVEILLANCE SYSTEM

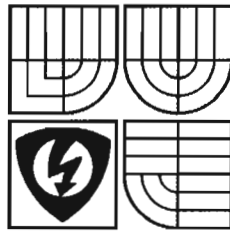
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jiří Výborný

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan Prokopec, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Výborný Jiří, Bc.
Ročník: 2

ID: 88410
Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátové zabezpečovací zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte standard pro bezdrátové datové sítě s malou přenosovou rychlostí ZigBee IEEE 802.15.4 a navrhnete topologii zabezpečovacího systému, který bude monitorovat domácnost nebo rodinný dům. Systém by měl reagovat na otevření dveří, oken, příliš vysokou teplotu (požár) a další. Prostudujte dokumentaci k vhodným typům snímačů a možnost jejich komunikace s moduly ZigBee.

Práce pokračuje realizací navrženého systému (plošné spoje pro snímače, řídicí software pro moduly ZigBee) a vytvořením řídicí softwarové aplikace pro PC.

Navrhnete zapojení snímače a bezdrátového modulu ZigBee, vytvořte desku plošného spoje a naprogramujte řídicí software pro komunikaci mezi snímačem a modulem. Pro každou místnost předpokládejte použití jednoho ZigBee modulu, který bude zpracovávat signály z více snímačů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ZigBee. Dostupné na WWW: <http://www.zigbee.org/>


[2] IEEE Standards: 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), New York: IEEE, 2003.

[3] Dostupné na WWW: <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html>

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí projektu: Ing. Jan Prokopec, Ph.D.


prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Výborný
Bytem: Smetanova 895, Hlinsko v Čechách, 539 01
Narozen/a (datum a místo): 28. února 1984 v Havlíčkově Brodě

(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: Bezdrátové zabezpečovací zařízení

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

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- 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: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí bezdrátového zabezpečovacího systému pomocí standardu IEEE 802.15.4 ZigBee. Návrh se skládá z vytvoření topologie zabezpečovacího systému monitorujícího domácnost (rodinný dům) spárováním jednotlivých koncových zařízení s koordinátorem sítě, který poskytuje základní funkce pro vytvoření sítě. Koncová zařízení jsou použita pro posílání dat z teplotního senzoru DS1631 a magnetických spínačů koordinátoru. Na každém zařízení je zabudovaný ZigBee modul od firmy MeshNetics, který obsahuje mikroprocesor ATmega 1281 a AT86RF230 vysílač / přijímač pracující ve frekvenčním pásmu 2,4GHz. Systém reaguje na otevření / zavření dveří, oken a příliš vysokou teplotu. Pro vyvíjení uživatelské aplikace byl použit částečný ZigBee stack Open MAC, založený na vrstvě MAC (Media Access Control) a vrstvě PHY (Physical). Open MAC také obsahuje tři ukázkové aplikace ve zdrojovém kódu C, z nichž byla jedna upravena a použita pro vývoj vlastní aplikace pro komunikaci mezi modulem a snímači. Stejný návrh byl proveden s modulem od firmy Radiocrafts, ale nemohl být realizován. Všechny navržené desky byly zkonstruovány a testovány v PC programu Terminál.

Klíčová slova

ZigBee, IEEE 802.15.4, bezdrátové sítě, koordinátor, koncové zařízení, stack, bezdrátové zabezpečovací zařízení, RC2204, Radiocrafts, ZDM-A1281-A2, MeshNetics, Open MAC, TWI, AVR Studio, Eagle.

Abstract

This Master's thesis deals with design and construction of a wireless security and surveillance system in ZigBee wireless networks (IEEE802.15.4). The design consists of creating a star network topology with intended monitoring of home area via end device boards paired with coordinator board, which provides basic networking functionality. End device is used to send data from a temperature sensor DS1631 and magnetic reed switches to coordinator. ZigBee module ZDM-A1281-A2 made by MeshNetics company embedded on each board contains a micro controller ATmega1281 and a transceiver AT86RF230 working in a 2,4GHz frequency band. System is able to notice of any door or window move actions and too high temperature. The non-fully functional ZigBee stack, which is called an Open MAC software, based on MAC (Media Access Control) layer and PHY (Physical) layer from MeshNetics, has been used to develop the user software. Open MAC consists of three application samples in C code. One of them was modified by the user for an application of communication between the module and sensors. The same design with module RC2204AT made by Radiocrafts company was tested as well, but it couldn't be executed. All developed boards have been constructed and tested via Terminal PC program.

Key words

ZigBee, IEEE 802.15.4, wireless networks, coordinator, end device, stack, wireless security system, RC2204, Radiocrafts, ZDM-A1281-A2, MeshNetics, Open MAC, TWI, AVR Studio, Eagle.

VÝBORNÝ, J. *Bezdrátové zabezpečovací zařízení*. Brno: *diplomová práce*
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
2008. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Bezdrátové zabezpečovací zařízení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce 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 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Prokopcovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	14
1.1	<i>Vlastnosti a použití ZigBee</i>	14
2	Standard 802.15.4 a protokol ZigBee	16
2.1	<i>Specifikace radiové části standardu</i>	16
2.2	<i>Referenční model ZigBee</i>	18
2.3	<i>Topologie sítě</i>	26
2.4	<i>Vytvoření sítě (strom/hvězda)</i>	28
2.5	<i>Zabezpečení komunikace</i>	29
2.6	<i>Hardware</i>	31
2.6.1	<i>Synchronizace zařízení ZigBee</i>	31
2.6.2	<i>Spotřeba zařízení ZigBee</i>	32
3	Návrh zabezpečení pro rodinný dům	33
4	ZigBee hardware	34
4.1	<i>RC 2200 AT - SPPIO</i>	34
4.2	<i>Modul RC 2204 AT</i>	37
4.2.1	<i>Návrh desky pro senzory s modulem RC2204AT</i>	38
4.2.2	<i>Návrh desek plošných spojů pro senzory</i>	39
4.2.3	<i>Konstrukční uspořádání desky pro senzory</i>	40
4.2.4	<i>Příklad použití RC2200AT-SPPIO kitu a modulu RC2204AT</i>	42
4.2.5	<i>Schéma zapojení převodníku MAX3232</i>	43
4.3	<i>Modul ZDM-A1281-A2</i>	43
4.3.1	<i>Návrh koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2</i>	45
4.3.2	<i>Návrh desek plošných spojů (koordinátor)</i>	46
4.3.3	<i>Konstrukční uspořádání desky (koordinátor)</i>	47
4.3.4	<i>Návrh koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2</i>	47
4.3.5	<i>Návrh desky plošných spojů (koncové zařízení)</i>	49
4.3.6	<i>Konstrukční uspořádání DPS (koncové zařízení)</i>	49
4.3.7	<i>Příklad použití koordinátoru a koncového zařízení</i>	50
5	Digitální teploměr DS1631	51
5.1	<i>Funkční diagram DS1631</i>	52
5.2	<i>Nastavení teploměru řídicím softwarem</i>	53
5.3	<i>Schéma zapojení digitálního teploměru DS1631</i>	55
6	Software	56
6.1	<i>Vývojový diagram řídicího softwaru</i>	56
7	Závěr	58
	Literatura	59
	Příloha A	60
	Příloha B	61
	Příloha C	63

Seznam obrázků

Obr.1.	Obecný OSI model komunikačního protokolu ZigBee	16
Obr.2.	Příklad použití přístupové metody CSMA/CA.....	17
Obr.3.	Referenční model ZigBee protokol stacku.....	18
Obr.4.	Rozhraní mezi síťovou a aplikační vrstvou.....	19
Obr.5.	Rozhraní mezi aplikační vrstvou a MAC vrstvou	19
Obr.6.	Rozhraní mezi fyzickou a síťovou/aplikační vrstvou	20
Obr.7.	Příklad typů funkcí MAC vrstvy	21
Obr.8.	Struktury rámců používaných ve vrstvě MAC.....	21
Obr.9.	Příklad zakládání spojení mezi koordinátorem a koncovým zařízením.....	22
Obr.10.	Navázání komunikace s koordinátorem a) Beacon povoleno b) Beacon zakázán ..	23
Obr.11.	Příklad struktury superrámce.....	24
Obr.12.	Rozhraní mezi podvrstvou MAC a fyzickým rádiovým kanálem	25
Obr.13.	Popis kanálů pro pásma 868 a 915MHz	25
Obr.14.	Popis kanálu pro pásmo 2,4GHz	26
Obr.15.	Závislosti bitové chybovosti BER na šumu SNR pro bezdrátové standardy [5]	26
Obr.16.	Topologie sítě ZigBee typu a) hvězda, b) strom, c) síť (mesh).....	27
Obr.17.	Převod binárního toku dat na modulovaný signál	29
Obr.18.	Půdorys zabezpečeného objektu	33
Obr.19.	Legenda půdorysu objektu	33
Obr.20.	Deska RC2200AT-SPPIO kitu	34
Obr.21.	Modul RC2204AT	37
Obr.22.	Vnitřní uspořádání modulu RC2204AT	37
Obr.23.	Blokové zapojení desky pro senzory s modulem RC2204AT.....	38
Obr.24.	Fotografie navržené (testovací verze) desky pro senzory	39
Obr.25.	Testovací DPS pro senzory (1,5 : 1).....	39
Obr.26.	DPS redukce pro modul (1,5 : 1)	40
Obr.27.	Finální DPS pro senzory (1,5 : 1).....	40
Obr.28.	Konstrukční uspořádání ze strany PS testovací verze (1,5 : 1).....	40
Obr.29.	Konstrukční uspořádání ze strany součástek testovací verze (1,5 : 1).....	41
Obr.30.	Konstrukční uspořádání redukce (1,5 : 1).....	41
Obr.31.	Konstrukční uspořádání ze strany PS finální verze (1,5 : 1).....	41
Obr.32.	Konstrukční uspořádání ze strany součástek finální verze (1,5 : 1)	42
Obr.33.	Příklad použití RC2200-SPPIO a RC2204AT	42
Obr.34.	Schéma zapojení převodníku z RS232 na TTL logiku a naopak.....	43
Obr.35.	Modul ZDM-A1281-A2.....	44
Obr.36.	Vnitřní uspořádání modulu ZDM-A1281-A2.....	44
Obr.37.	Blokové zapojení koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2.....	45
Obr.38.	Fotky zkonstruovaného koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2	46
Obr.39.	DPS s modulem ZDM-A1281-A2 (koordinátor) (1,5 : 1).....	46
Obr.40.	Konstrukční uspořádání ze strany PS (koordinátor) (1,5 : 1).....	47
Obr.41.	Konstrukční uspořádání ze strany součástek (koordinátor) (1,5 : 1)	47
Obr.42.	Blokové zapojení koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2.....	48
Obr.43.	Fotky zkonstruovaného koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2	48
Obr.44.	DPS s modulem ZDM (koncové zařízení) (1,5 : 1).....	49
Obr.45.	Konstrukční uspořádání ze strany DPS (koncové zařízení) (1,5 : 1).....	49
Obr.46.	Konstrukční uspořádání ze strany součástek (koncové zařízení) (1,5 : 1)	50
Obr.47.	Příklad použití koordinátoru a koncového zařízení s moduly ZDM.....	50
Obr.48.	Rozložení pinů [10].....	51
Obr.49.	Funkční blokový diagram DS1631 [10]	52
Obr.50.	Konfigurační registr	53
Obr.51.	Control byte s adresou zařízení (zápis dat)	53
Obr.52.	Command byte (zápis do konfiguračního registru).....	54
Obr.53.	Data byte s nastavením konfiguračního registru	54
Obr.54.	Command byte (Start převodu)	54
Obr.55.	Command byte (Čti teplotu).....	54
Obr.56.	Časové průběhy komunikace teploměru a koncového zařízení po TWI [10].....	54

Obr.57.	Časový průběh komunikace teploměru a koncového zařízení po TWI [10].....	55
Obr.58.	Schéma zapojení snímače s DS1631	55
Obr.59.	Vývojový diagram řídicího softwaru	56
Obr.60.	Průběh přijatých hodnot koordinátorem zobrazený v terminálu na PC.....	57
Obr.61.	Schéma zapojení desky pro senzory	61
Obr.62.	Schéma zapojení koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2	63
Obr.63.	Schéma zapojení koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2	64

Seznam tabulek

Tab.1.	Porovnání základních parametrů standardů pro bezdrátovou komunikaci.....	15
Tab.2.	Frekvenční pásma a datové rychlosti.....	25
Tab.3.	Adresové pole MAC rámce	27
Tab.4.	Transceivery nabízené společnostmi ZigBee Alliance a jejich parametry.....	31
Tab.5.	Nastavené hodnoty různých parametrů v S-registru koordinátoru	36
Tab.6.	Naměřené maximální hodnoty vzdáleností dosahu	36
Tab.7.	Popis jednotlivých pinů modulu RC2204AT	38
Tab.8.	Popis jednotlivých pinů modulu ZDM-A1281-A2	45
Tab.9.	Význam jednotlivých vývodů (pinů) DS1631	51
Tab.10.	Příklady různých teplot na výstupu DS1631 v binárním a hexa tvaru.....	52
Tab.11.	Popis funkce jednotlivých bitů konfiguračního registru [10].....	53
Tab.12.	Závislost doby převodu na rozlišení [10].....	53
Tab.13.	Přehled nabízeného sortimentu teploměrů společností DALLAS	60
Tab.14.	Rozpis součástek použitých při realizaci desky pro senzory	62
Tab.15.	Rozpis součástek pro modul ZDM-A1281-A2 (koordinátor)	65
Tab.16.	Rozpis součástek pro modul ZDM-A1281-A2 (koncové zařízení)	65

Seznam použitých zkratk

API	Application Programming Interface
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
APL (vrstva)	Application (layer)
APS	Application Support Sub-layer
APSDE-SAP	APS Data Entity - Service Access Point
APSME-SAP	APS Management Entity - Service Access Point
CAP	Contention Access Period
CBC-MAC	Cipher Block Chaining - Message Authentication Code
CCM	Counter with CBC-MAC
CFP	Contention Free Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTR	Counter
CTS	Clear To Send
DCD	Data Carrier Detect
DSR	Data Set Ready
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTR	Data Terminal Ready
ED	Energy Detection
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
GPIO	General Purpose Input/Output
GTS	Guaranteed Time Slot
HW	Hardware
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISP	In System Programming
JTAG	Joint Test Action Group
LQI	Link Quality Indication
MAC (vrstva)	Media Access Control (layer)
MCPS-SAP	MAC Common Part Sublayer - Service Access Point
MCU	Microprocessor control unit
MFR	MAC Footer
MHR	MAC Header
MIC	Message Integrity Code
MLME-SAP	MAC Management Service - Service Access Point
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSDU	MAC Service Data Unit
NLDE-SAP	Network Layer Data Entity - Service Access Point
NLME-SAP	Network Layer Management Entity-Service Access Point
NPDU	Network layer Protocol Data Unit
NWK (vrstva)	Network (layer)
Open MAC	Open Source Medium Access Control
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection

PAN	Personal Area Network
PAN ID	Personal Area Network ID
PC	Personal computer
PD-SAP	PHY Data - Service Access Point
PD-SAP	PHY Data - Service Access Point
PHR	PHY Header
PHY (vrstva)	Physical (layer)
PHY PIB	PHY PAN Information Base
PIB	PAN Information Base
PLME-SAP	PHY Management Service - Service Access Point
PPDU	PHY Protocol Data Unit
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RS 232	Recommended Standard 232
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	Request To Send
SHR	Synchronization Header
SPPIO	Serial Port Profile and I/O mapping
SSP	Security Services Provider
TC	Trust Center
TTL	Transistor - Transistor Logic
TWI	Two Wire Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
ZDO	ZigBee Device Object

1 Úvod

Bezdrátové komunikační technologie představují jednu z rychle se rozvíjejících oblastí telekomunikační technologie. Vznik bezdrátové komunikace se datuje do období přelomu 19. a 20. století, kdy italský vědec Marconi prováděl své pokusy s bezdrátovým telegrafem. Dále se bezdrátová komunikace využívá hlavně k přenosu hlasu a obrazu, ať už v analogové nebo digitalizované podobě. Aplikací technologie, která dovoluje využít UHF a mikrovlnná pásma, dochází k rozvoji nízkorychlostních a vysokorychlostních bezdrátových komunikací a bezdrátových sítí.

ZigBee je souhrnný název pro zařízení obsahující bezdrátový komunikační standard IEEE 802.15.4, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenost stovek metrů a uživatelské aplikační rozhraní API (Application Programming Interface). Díky nízkým nárokům na hardware a nízké spotřebě najde uplatnění v oblasti řízení budov, spotřební elektroniky a průmyslu, například v podobě bateriově napájených bezdrátových senzorů.

Zařízení vyvíjená v rámci ZigBee Alliance, která využívají bezdrátový komunikační standard IEEE 802.15.4, poskytují cenově nenákladnou, nízkopříkonovou, bezdrátovou komunikaci pro monitorování a řízení systémů. V současné době patří mezi nové perspektivní komunikační technologie, jejíž specifikace byla vydána v roce 2004, která se snaží vyplnit mezeru mezi rozšířenými technologiemi WIFI a Bluetooth. Zde je totiž mezeru v podobě velké skupiny aplikací, viz kap.1.1, pro které nejsou Bluetooth ani WIFI, případně IrDA, ideálním řešením, i když se dají použít.

V mezinárodním konsorciu ZigBee Alliance se v současné době na vývoji a rozvoji tohoto standardu podílí více než šedesát firem, mezi nimi jsou hlavně uznávané světové firmy a korporace z oboru automatizace (Freescale Semiconductor, Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips, Samsung, Siemens, Invensys a další).

1.1 Vlastnosti a použití ZigBee

Zařízení ZigBee lze použít pro jednoduchou bezdrátovou komunikaci s nízkými požadavky na samotný hardware a napájení. Proto jsou jeho hlavní doménou aplikace s bateriovým napájením, kde v porovnání s technologií Bluetooth poskytuje výrazně nižší spotřebu energie, ale nižší přenosovou rychlost, která však v mnoha aplikacích plně postačuje, viz tab.1. Například dálkové bezdrátové zapínání/vypínání přístrojů v domácnosti (osvětlení, stahování rolet, odmykání a otvírání dveří / oken), nebo ovládání spotřebičů (televize, DVD rekordér, HIFI systém, klimatizace). Nižší přenosová rychlost poskytuje vyšší odolnost proti rušení, což ZigBee předurčuje pro využití v průmyslu, kde může zastávat funkci bezdrátové náhrady sériového přenosu RS-232 nebo RS-485. Zde je nevhodné používat zbytečně složité a drahé WiFi, když požadovaná přenosová rychlost je jen desítky kb/s. Proti dalším bezdrátovým řešením naopak vyniká topologií sítě, kterou může vytvořit díky propracovanému způsobu adresování. Navíc při bezdrátové komunikaci senzoru s řídicím procesem je opět výhodná nízká spotřeba na straně senzoru, takže může být napájen baterií a tedy plně oddělen od rušení ve zbytku systému. [6]

ZigBee je navržena jako jednoduchá a flexibilní technologie pro tvorbu i rozsáhlejších bezdrátových sítí, u nichž není požadován přenos velkého objemu dat.

K jejím hlavním přednostem patří spolehlivost, jednoduchá a nenáročná implementace, velmi nízká spotřeba energie a v neposlední řadě též příznivá cena. Díky těmto vlastnostem nalezne uplatnění v celé škále aplikací :

- Řízení budov - řízení vstupu, osvětlení, klimatizace, rolet apod.
- Automatizace - bezdrátová komunikace senzorů, řízení motorů a regulátorů.
- Zdravotní péče - monitorování pacienta.
- Sport - monitorování tělesných funkcí za pohybu (teplota, tep, tlak apod.).
- Spotřební elektronika - automatické dálkové ovládání domácích spotřebičů.
- Bezdrátová komunikace počítačových periferií - klávesnice, myš apod.
- **Zabezpečovací systémy** - chipové přístupové karty, bezdrátové klávesnice, senzory apod.

Tab.1. Porovnání základních parametrů používaných standardů pro bezdrátovou komunikaci

Obchodní jméno Standard	GPRS/GSM 1xRTT/CDMA	Wi-Fi™ 802.11b	Bluetooth™ 802.15.1	ZigBee™ 802.15.4
Aplikační zaměření	Široké oblasti Hlas & Data	Web, Email Video	Náhrada za kabel	Monitorování & Řízení
Systémové zdroje (paměť)	16 MB a více	1 MB a více	250 kB a více	4 kB – 32 kB
Životnost baterií (dny)	1 – 7	0.5 – 5	1 – 7	100 – 1000 i více
Max. velikost sítě (počet uzlů/sítě)	1	32	7	65 000 (příp. až 2 ⁶⁴)
Přenosová rychlost (kbit/s)	64 – 128	11 000	720	20 – 250
Komunikační dosah (m)	1 000 i více	1 – 100	1 – 10	1 – 100
Výhody	Dosažitelnost, Kvalita	Rychlost, Flexibilita	Cena, Jednoduchost	Spolehlivost, Výkon/Cena

Díky různorodosti předpokládaných aplikací standard definuje tři základní režimy přenosu dat :

- Periodicky se opakující (přenos dat z čidel).
- Nepravidelné přenosy (externí události, např. stisknutí tlačítka uživatelem).
- Opakující se přenosy u nichž je požadavek na malé zpoždění (bezdrátové počítačové periferie – klávesnice a myši).

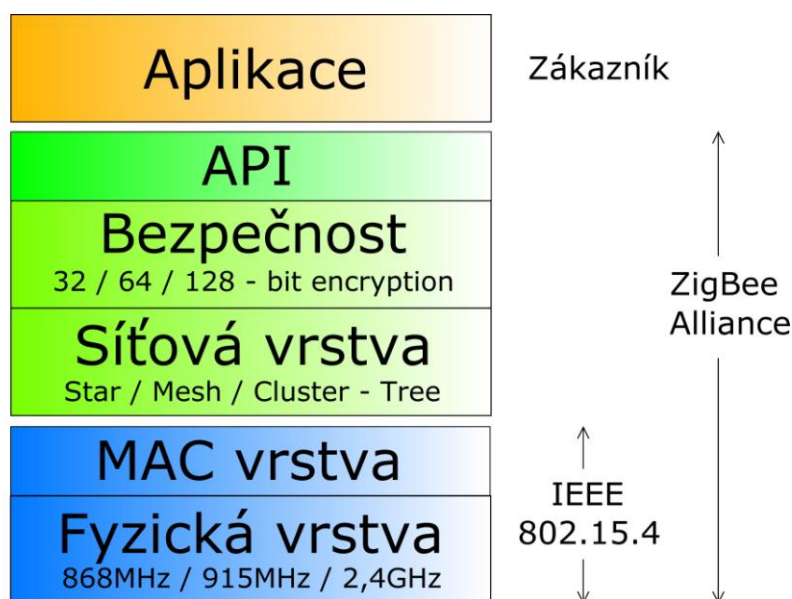
2 Standard 802.15.4 a protokol ZigBee

Stejně jako každý jiný komunikační standard i ZigBee lze popsat OSI modelem. Ten lze rozdělit do třech základních bloků podle toho, kdo zajišťuje jejich strukturu a funkci, viz obr.1.

IEEE 802.15.4 - definuje fyzickou PHY (Physical) a linkovou MAC (Media Access Control) vrstvu OSI (Open Systems Interconnection) modelu

ZigBee Alliance - definuje navíc vyšší vrstvy OSI modelu (síťová a transportní API)

Zákazník - definuje zákaznickou aplikaci v aplikační vrstvě OSI modelu



Obr.1. Obecný OSI model komunikačního protokolu ZigBee

2.1 Specifikace radiové části standardu

Standard je navržen pro bezlicenční frekvenční pásmo ISM (Industrial, Scientific and Medical). Toto pásmo podléhá regulaci na úrovni jednotlivých států. Aby se mohl standard uplatnit ve všech lokalitách, jsou pro něj definována tři rádiová pásma :

Globální použití: Pásmo ISM 2,4 GHz s 16 nepřekrývajícími se kanály a přenosovou rychlostí 250 kb/s.

Amerika a Austrálie: Pásmo ISM 915 MHz s 10 nepřekrývajícími se kanály a přenosovou rychlostí 40 kb/s.

Evropa: Pásmo ISM 868 MHz s jedním kanálem a přenosovou rychlostí 20 kb/s.

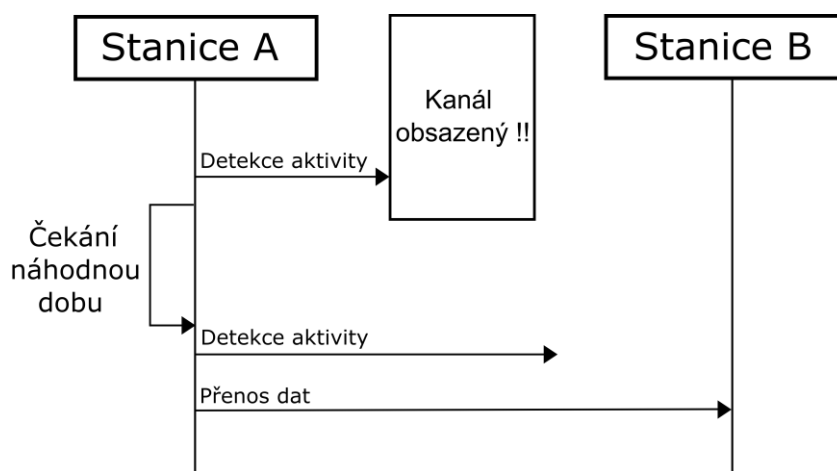
Technologie je založena na implementaci přístupové metody CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) k fyzickému médiu, což znamená, že vlastní rádiová část standardu IEEE 802.15.4 této metody využívá na úrovni fyzické a linkové vrstvy komunikačního protokolu.

Vlastní standard IEEE 802.15.4 definuje komplexní komunikační protokol, který je založen na přenosu datových rámců, viz kap.2.2.

Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) patří do třídy protokolů označovaných jako metody s vícenásobným přístupem (Multiple Access) a nasloucháním nosné (Carrier Sense). Jejich charakteristikou je, že před začátkem vysílání paketu stanice určitý čas poslouchá, zda je přenosové médium volné (zkouší detekovat přítomnost signálu přenášeného z jiné stanice). Pokud ano, může zahájit vysílání. V opačném případě čeká náhodnou dobu před opakováním a snižuje tak pravděpodobnost kolize, viz obr.2.

CSMA/CA na rozdíl od CSMA/CD (Collision Detection) nezjišťují výskyt kolizí současného vysílání více stanic. Při volném médiu nejprve ohlásí ostatním, že bude vysílat a médium si tak „zamluví“. Následně odvysílá datový rámeček. Toto opatření téměř zabrání kolizím, protože všechny uzly vědí o vysílání dříve, než k němu dojde. Kolize jsou nicméně stále možné a nejsou detekovány, takže mají stejné důsledky jako v čistém CSMA.

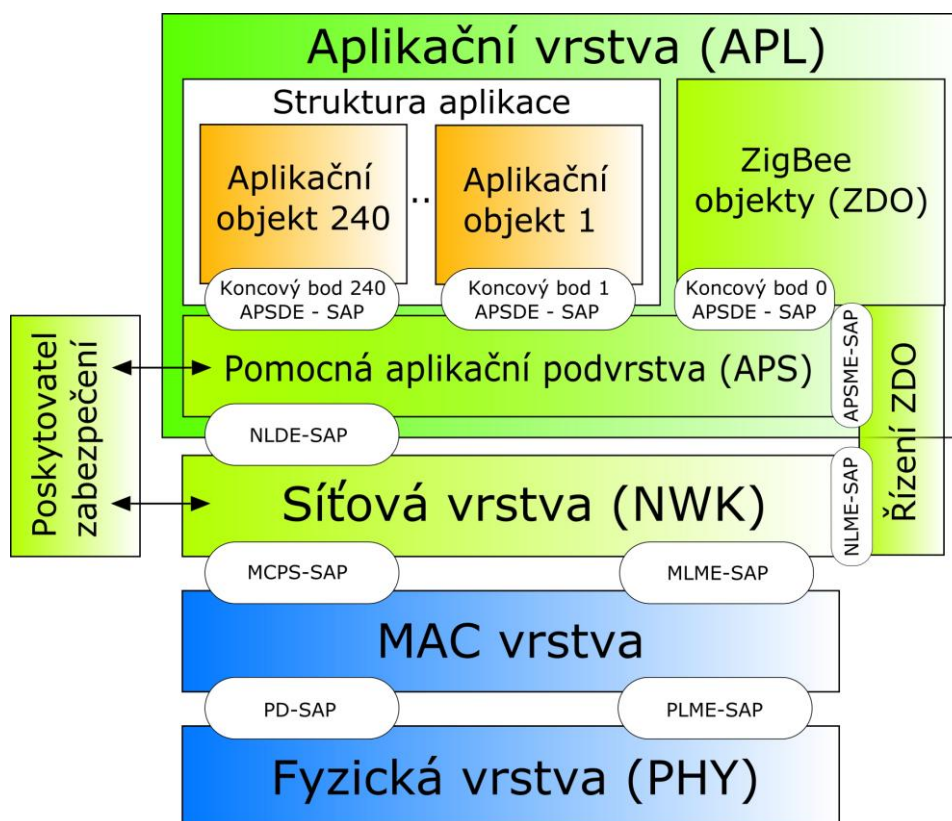
Předcházení kolizím slouží ke zvýšení přenosového výkonu, stanice díky němu nejsou tak „hladové“ při přístupu k přenosovému médiu. CSMA/CA se využívá především v bezdrátových sítích, protože účastníci bezdrátového přenosu nejsou schopni zároveň vysílat a přijímat.



Obr.2. Příklad použití přístupové metody CSMA/CA

2.2 Referenční model ZigBee

Referenční model ZigBee, viz obr.3, vychází ze sedmivrstvého modelu ISO/OSI. Používá však jen ty vrstvy, které jsou významné k dosažení funkčnosti v uvažované oblasti použití. Standard IEEE 802.15.4 definuje dvě nejnižší vrstvy, fyzickou PHY a podvrstvu MAC spojové vrstvy. Nad těmito vrstvami definuje ZigBee Alliance takzvaný ZigBee protokol Stack, který obsahuje síťovou NWK (Network) a aplikační vrstvu APL (Application), viz obr.3 (zeleně).

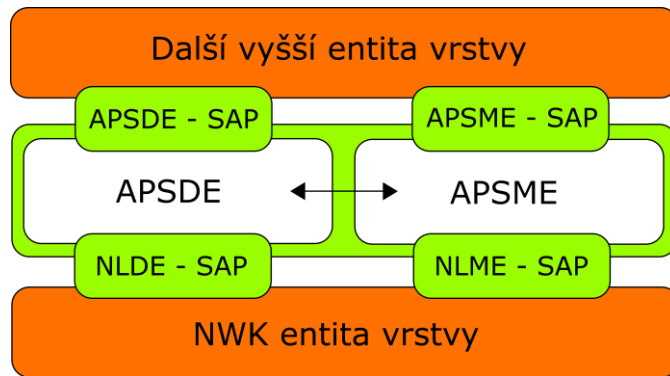


Obr.3. Referenční model ZigBee protokol stacku

Aplikační vrstva (APL) je nejvyšší z vrstev OSI modelu. Je složena z pomocné aplikační podvrstvy APS (Application support Sub-layer), z objektů ZigBee ZDO (ZigBee Device Object) a z aplikačních objektů definovaných uživatelem.

- a) **Pomocná aplikační podvrstva APS** poskytuje rozhraní mezi síťovou a aplikační vrstvou, viz obr.4, pomocí služeb APSDE (APS Data Entity) a APSME (APS Management Entity). První služba disponující rozhraním APSDE - SAP (Service Access Point) přeposílá zprávy mezi vzájemně vázanými zařízeními v jedné síti, poskytuje spolehlivý datový transport a skládání, rozkládání paketů.

Druhá služba s rozhraním APSME-SAP (Service Access Point) má za úkol udržovat vazební (binding) tabulky, umožňující propojit dvě zařízení na základě jejich služeb a potřeb. Obsluhu zabezpečení, zakládání a rušení skupin adres a také udržování databáze vedených objektů.

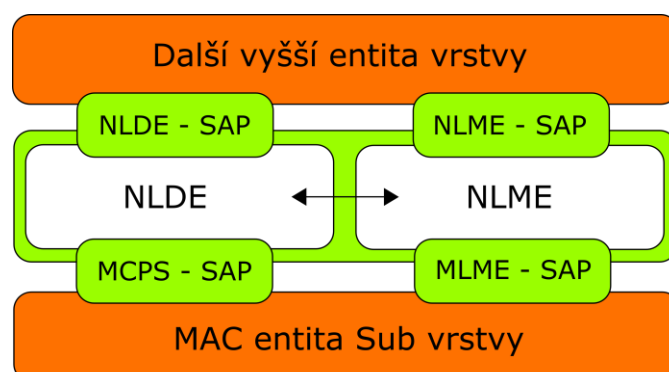


Obr.4. Rozhraní mezi síťovou a aplikační vrstvou

- b) **Objekt ZigBee (ZDO)** definuje roli jednotlivých zařízení v rámci sítě (ZigBee koordinátor, směrovač, koncové zařízení), zavádí, a nebo odpovídá na žádosti spojení a zřizuje zabezpečené spojení mezi zařízeními sítě (volí jeho způsob, jako např. veřejné klíče, symetrické klíče). ZDO také zajišťuje hledání zařízení v síti a zjišťuje jimi poskytované služby. Toto je poskytováno rozhraním NLME-SAP (Network Layer Management Entity – Service Access Point) vrstvy NWK a APSDE-SAP podvrstvy APS. ZDO je speciální aplikační objekt implementovaný v koncovém bodě 0.
- c) V aplikační vrstvě jsou definovány tzv. koncové body. Zařízení může mít nadefinováno max. 240 těchto bodů, kde každému z nich odpovídá jeden aplikační profil (objekt). Uživatelské aplikační objekty se nacházejí na vrcholu ZigBee protokol Stacku. Implementují konkrétní požadavky aplikace dle definovaného ZigBee profilu. ZigBee profil zastřešuje definice možných zařízení, formátů a typů zpráv. Každý profil je určen unikátním 16 bitovým identifikátorem podle specifikace ZigBee Alliance a je číslován od 1 do 240.

Síťová vrstva (NWK) poskytuje rozhraní mezi aplikační a MAC vrstvou, viz obr.5, pomocí služeb NLME (Network Layer Management Entity) a NLDE (Network Layer Data Entity). První služba disponující rozhraním NLME-SAP (Service Access Point) zakládá novou síť (pouze u koordinátoru), člení zařízení do sítě nebo z ní, konfiguruje stack pro potřebné operace a zajišťuje komunikaci. Také jednoznačně identifikuje každé zařízení přidělením síťové adresy (pouze u koordinátoru), zabezpečuje rámce, směruje je k cílovým uzlům a hledá přímé (one-hop) sousední uzly o kterých si ukládá informace.

Druhá služba s rozhraním NLDE-SAP (Service Access Point) má za úkol přenos NPDU (Network layer Protocol Data Unit) k příslušnému zařízení v síti.



Obr.5. Rozhraní mezi aplikační vrstvou a MAC vrstvou

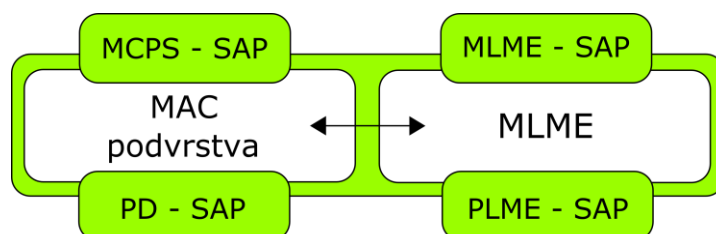
Síťová vrstva používá k zabezpečení SSP (Security Services Provider) poskytovatele zabezpečení. Tato vrstva zajišťuje zabezpečení odchozích rámců, dekodování a ověřování pravosti příchozích rámců. Jako zabezpečovací algoritmus je použit AES (Advanced Encryption Standard) v mírně modifikovaném módu CCM (Counter with CBC-MAC). Síťová vrstva je zodpovědná za realizaci zabezpečení. Vyšší vrstvy se starají o nastavení SSP (nastavení klíčů a udávají jakým způsobem bude použit CCM pro jednotlivé rámce).

MAC vrstva (linková vrstva) je definována standardem IEEE 802.15.4. Poskytuje rozhraní mezi fyzickou a síťovou/aplikační vrstvou, viz obr.6, pomocí služeb MCPS (MAC common part sublayer) a MLME (MAC management service). První služba disponující rozhraním MCPS-SAP (Service Access Point) poskytuje služby pro přenos dat mezi vrstvami MAC. Přijímá a posílá MPDU (MAC Protocol Data Unit) přes rozhraní PD-SAP (PHY Data - Service Access Point).

Druhá služba s rozhraním MLME-SAP (Service Access Point) slouží pro přenos přes rozhraní vrstvy, jejíž funkce mohou být volány. Udržuje databázi objektů náležících MAC vrstvě označována PIB (PAN Information Base) a poskytuje přístup k údržbě přenosu dat MCPS.

MAC vrstva je také zodpovědná za synchronizaci beacons, zabezpečení přístupu na radiový kanál, vytváření síťových beacons pro koordinátor, ověření platnosti rámce a potvrzení příjmu rámce. Ovládání a údržbu GTS (guaranteed time slot) mechanismů, řízení spojení, generaci a rozpoznání adres.

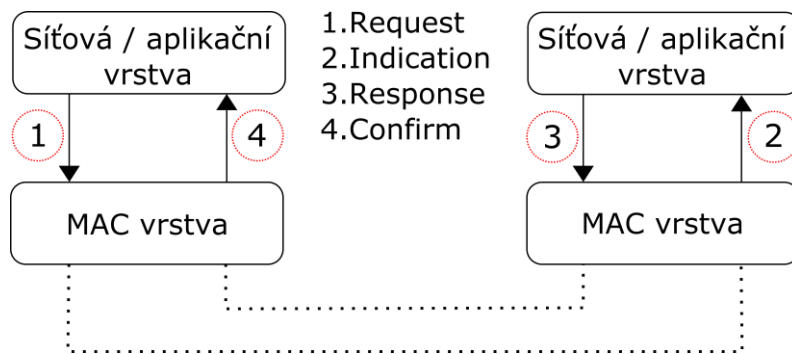
Definuje již samotnou komunikaci mezi jednotlivými zařízeními (uzly sítě) prostřednictvím rámců.



Obr.6. Rozhraní mezi fyzickou a síťovou/aplikační vrstvou

MAC vrstva je určena řadou funkcí, které můžeme rozdělit podle těchto čtyř typů, viz obr.7 :

- **Request** : Je žádost, která je posílána z aplikační/síťové vrstvy k potvrzení, které akceptuje vrstva MAC.
- **Indication** : Indikace je poslána z MAC vrstvy do síťové/aplikační vrstvy. Tato událost souvisí se vzdáleným požadavkem zařízení nebo může být způsobena vnitřní událostí v MAC (například přerušení).
- **Response** : Také odezva je poslána z aplikační / síťové vrstvy do MAC k ukončení nějakého procesu, který byl volán jako první při indikaci (přerušení).
- **Confirm** : Jako první je potvrzení posláno z vrstvy MAC do aplikační/síťové vrstvy k přenosu jednoho i více předešlých skupinových servisních požadavků.



Obr.7. Příklad typů funkcí MAC vrstvy

Jsou definovány čtyři typy komunikačních rámců používaných ve vrstvě MAC buď pro přenos užitečných datových informací, nebo k režijním účelům souvisejících se sestavením, správou a řízením sítě:

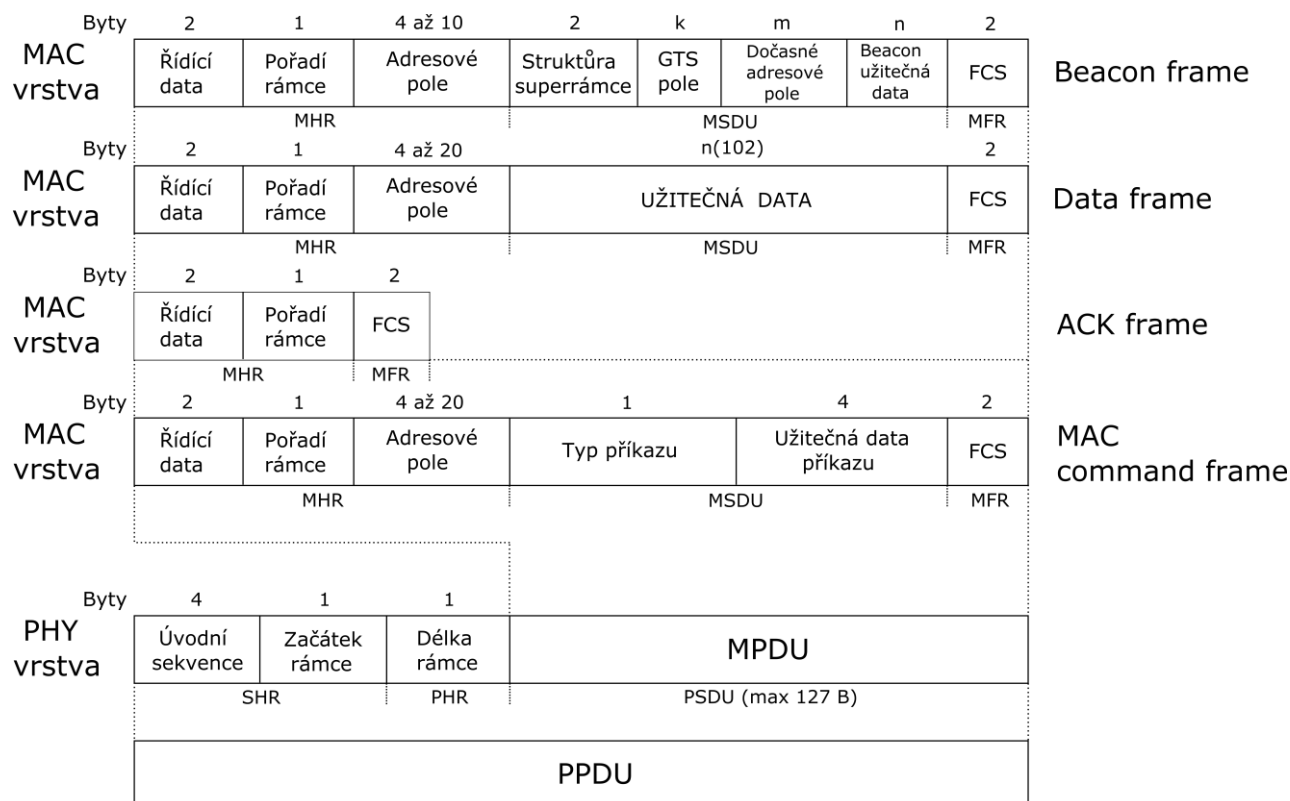
Data Frame – rámeček s délkou užitečných dat 104 bytu slouží pro přenos užitečné informace pro všechny datové přenosy

Acknowledgement Frame – rámeček sloužící pro přenos potvrzovací informace, je využitelný pouze na úrovni MAC pro potvrzovanou komunikaci a je vysílán v takzvaném „mrtvém čase“ ihned po přenosu paketu

MAC Command Frame – rámeček slouží k centrálnímu konfigurování, nastavení a řízení klientských zařízení v síti ZigBee

Beacon Frame – rámeček používaný koordinátorem, který slouží k synchronizaci zařízení v síti a je využíván hlavně při konfiguraci sítě v módu beacon enable (beacon povolen), v němž umožňuje uvádění klientských zařízení do spánkových režimů s extrémně sníženou spotřebou.

Na obr.8 jsou uvedeny struktury jednotlivých typů rámců používaných ve vrstvě MAC. Maximální délka těchto rámců je 127 byte.



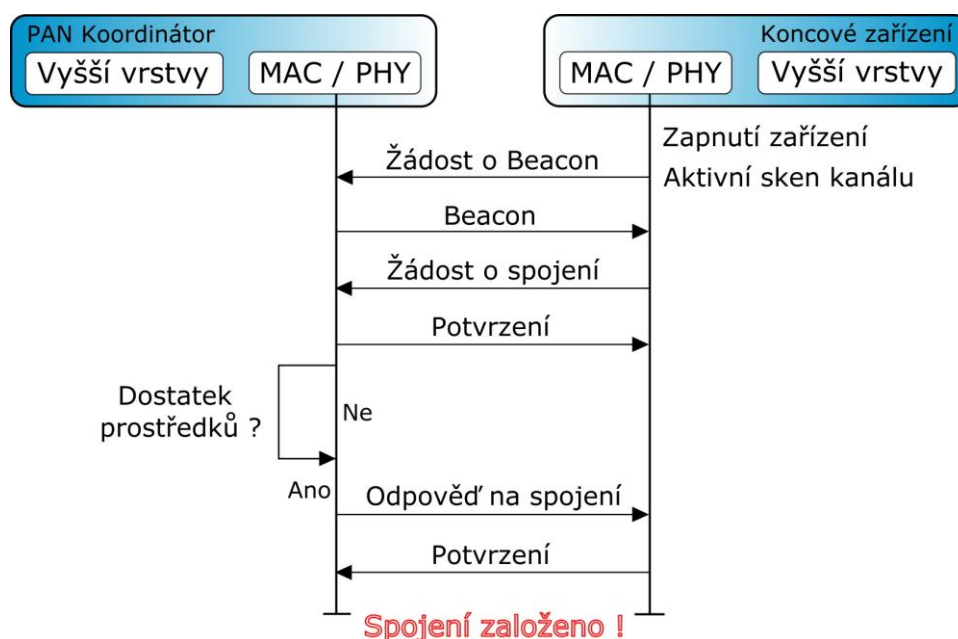
Obr.8. Struktury rámců používaných ve vrstvě MAC

Rámce paketu PPDU (PHY Protocol Data Unit), který je plně definovaný standardem IEEE 802.15.4 a složený z části dodané MAC vrstvou MPDU (MAC Protocol Data Unit) a fyzickou vrstvou PHY (SHR a PHR) :

a) Data frame rámec se skládá z MPDU, který obsahuje mimo přenášených dat MSDU (MAC Service Data Unit) (až 104 B), záhlaví MHR (MAC Header) s informací o adrese přijímací stanice, pořadovém čísle datového paketu a řízení rámce (obsahuje informaci, že jde o Data frame - hodnota 001) i zápatí MFR (MAC Footer) s kontrolním mechanismem rámce FCS (Frame Check Sequence).

b) MAC příkazový rámec (Command frame) složený z MPDU, který obsahuje MSDU (MAC Service Data Unit), kde je umístěn typ a užitečná data příkazu, záhlaví MHR (MAC Header) s informací o adrese přijímací stanice, pořadovém čísle datového paketu a řízení rámce (obsahuje informaci, že jde o Command frame - hodnota 011). Dále zápatí MFR (MAC Footer) s kontrolním mechanismem rámce FCS (Frame Check Sequence). Typy příkazu přenášené v MSDU mohou být následující :

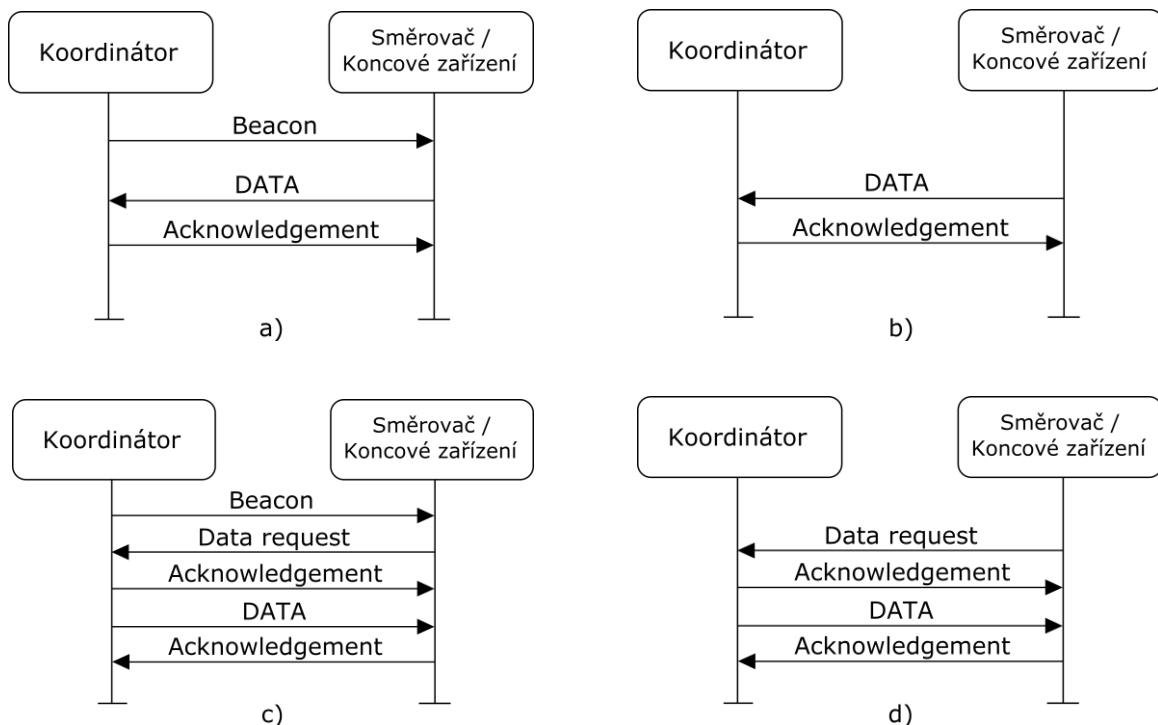
- Žádost o spojení (Association request)
- Odezva na spojení (Association response)
- Zpráva o odpojení (Disassociation notification)
- Žádost o data (Data request)
- Oznámení konfliktu PAN ID (PAN ID conflict notification)
- Žádost o beacon (Beacon request)
- Změna nastavení koordinátoru (Coordinator realignment)
- Ztráta synchronizace (Synchronization loss)
- Žádost o GTS (GTS request)



Obr.9. Příklad zakládání spojení mezi koordinátorem a koncovým zařízením

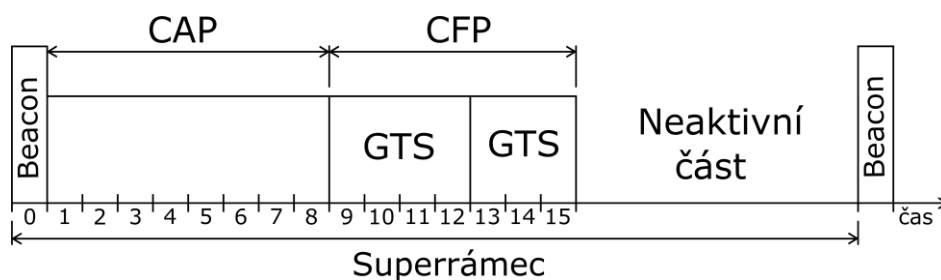
- c) Potvrzovací rámeček (Acknowledge frame) část MSDU úplně vypouští. MPDU obsahuje pouze záhlaví MHR (MAC Header) s informací o adrese přijímací stanice, pořadovém čísle datového paketu a řízení rámce (obsahuje informaci, že jde o ACK frame - hodnota 010). Dále zápatí MFR (MAC Footer) s kontrolním mechanismem rámce FCS (Frame Check Sequence). Tento rámeček je velmi důležitý z hlediska vyslání paketů, protože informuje vysílající jednotku, že přijímač ji bez chyb přijal. Navíc díky pevné délce definuje tzv. quiet time „mrtvý čas“ vytvořený ihned po přenosu paketu.
- d) Beacon rámeček (Beacon frame) se skládá z MPDU obsahující MSDU (MAC Service Data Unit), ve kterém je umístěna struktura superrámce, GTS pole, dočasné adresové pole a Beacon data. Dále záhlaví MHR (MAC Header) s informací o adrese přijímací stanice, pořadovém čísle datového paketu a řízení rámce (obsahuje informaci, že jde o Beacon frame - hodnota 000) a zápatí MFR (MAC Footer) s kontrolním mechanismem rámce FCS (Frame Check Sequence). Struktura superrámce v MSDU obsahuje například :
- Interval přenosu Beaconu (Beacon order)
 - Dobu aktivního superrámce (Superframe Order)
 - Poslední superrámec s využitím CAP slotu (Final CAP slot)
 - Battery Life Extension
 - Association Permit

Pro vlastní přenos na rádiovém kanále je nutné ke každému z těchto čtyř rámečků předávaných vrstvou MAC pomocí služby MCPS-SAP doplnit informaci o úvodní preambule pro časovou synchronizaci přijímače, informaci o začátku rámce (synchronizační hlavička SHR), délce rámce a informaci o přenosové rychlosti použité pro odvyšlání vlastních dat (hlavička PHR) MAC rámce (PHY). Takto doplněný rámeček je označován jako rámeček PPDU (PHY Protocol Data Unit).



Obr.10. Navázání komunikace s koordinátorem a) Beacon povolen b) Beacon zakázán
Navázání komunikace koordinátoru c) Beacon povolen d) Beacon zakázán

Standard IEEE 802.15.4 dává možnost použít superrámec, jehož struktura je definována koordinátorem sítě. Superrámec vysílaný koordinátorem je ohraničený beacon rámcem a je rozdělen na 16 stejných slotů. V prvním je vysílán beacon rámeček. Je určen pro synchronizaci, identifikaci sítě PAN (Personal Area Network) a k popisu struktury superrámce. Ve zbývajícím čase může kterékoli zařízení na základě přístupové metody CSMA-CA komunikovat. Každý superrámec může mít aktivní a neaktivní část. Během aktivní části koordinátor komunikuje s příslušnou PAN a v neaktivní části může přejít do režimu spánku (low-power mode). Aktivní část lze dále rozdělit na oblast CAP (Contention Access Period) a CFP (Contention Free Period). V době trvání CAP probíhá komunikace na základě CSMA-CA. Část CFP je složena z několika GTS (Guaranteed Time Slot), které jsou vyhrazeny pro pomalá (low-latency) a prioritní zařízení. Příklad superrámce je uveden na obr.11.



Obr.11. Příklad struktury superrámce

Vysílání superrámce se může opakovat v intervalech 15 ms až 252 s.

Fyzická vrstva (PHY) je definována standardem IEEE 802.15.4 a je to nejnižší z vrstev OSI modelu. Poskytuje rozhraní mezi podvrstvou MAC a fyzickým rádiovým kanálem pomocí RF (rádiová frekvence), viz obr.12. K tomu jsou použity služby PD (PHY Data) a PLME (PHY management service). Tyto služby jsou řízeny jednotkou PLME (PHY Layer Management Entity), která poskytuje údržbu, když je vrstva používána (aktivní).

PLME se také stará o údržbu databáze řízených objektů patřících k PHY. Tato databáze je označována jako PHY PIB (PHY PAN Information Base) informační základna. PIB obsahuje informace o těchto atributách : Aktuální kanál, podporované kanály, vysílaný výkon a CCA mód.

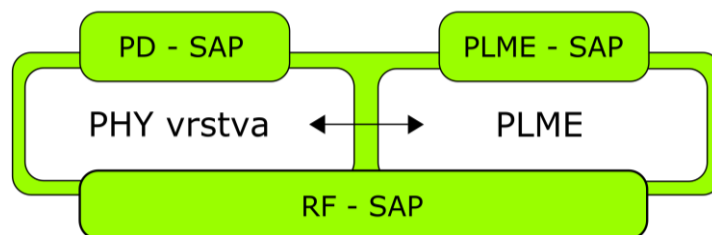
První služba disponující rozhraním PD-SAP (Service Access Point) poskytuje služby pro přenosy a příjem dat. Pro řízení datových procesů existují tři stavy, které je popisují :

- Request** (Žádost o transfér MPDU z podvrstvy MAC do místní entity PHY vrstvy)
- Confirm** (Potvrzení konce přenosu MPDU z místní PHY entity do PHY vrstvy)
- Indication** (Signalizace přenosu MPDU z PHY vrstvy do entity podvrstvy MAC)

Druhá služba s rozhraním PLME-SAP (Service Access Point) slouží pro aktivaci a deaktivaci rádiového spojení, energetickou detekci uvnitř aktuálního kanálu ED (Energy Detection), indikaci kvality spojení LQI (Link Quality Indication), určení zda je kanál volný pro CSMA/CA a výběr frekvenčního kanálu.

Další součástí vrstvy PHY je takzvaný PPDU (Protocol Packet Data Unit) formát. Struktura PPDU se skládá z MPDU (PSDU) dodané vrstvou MAC, SHR a PHR

popsané výše. Nejprve musejí být vysílány nebo přijímány nejméně významné bity LSb.



Obr.12. Rozhraní mezi podvrstvou MAC a fyzickým rádiovým kanálem

Úkolem fyzické vrstvy je vysílání a příjem datových jednotek. Komunikace probíhá na jednom ze tří bezlicenčních radiových pásem ISM (Industrial Scientific Medical), kde je pro přenos v pásmu 2.4GHz použita modulace O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying).

Celkový počet využitelných kanálů v těchto pásmech je 27. V pásmu 868 MHz je možné využít jeden kanál s přenosovou rychlostí 20 kb/s, v pásmu 915 MHz 10 kanálů s přenosovou rychlostí 40 kb/s a zbývajících 16 v pásmu 2,4 GHz s přenosovou rychlostí 250 kb/s jak popisuje tab.2.

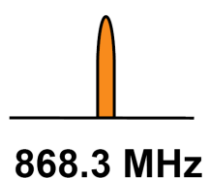
Tab.2. Frekvenční pásma a datové rychlosti

PHY [MHz]	Frekvenční pásmo [MHz]	Počet kanálů [-]	Parametry rozprostření		Parametry dat		
			Chip rate [k chips/s]	Modulace	Bit rate [kbit/s]	Symbol rate [k symbol/s]	Symbol
868	868 - 868,3	1	300	BPSK	20	20	Binární
915	902 - 928	10	600	BPSK	40	40	Binární
2400	2400 - 2483,5	16	2000	O-QPSK	250	62,5	16 stavů

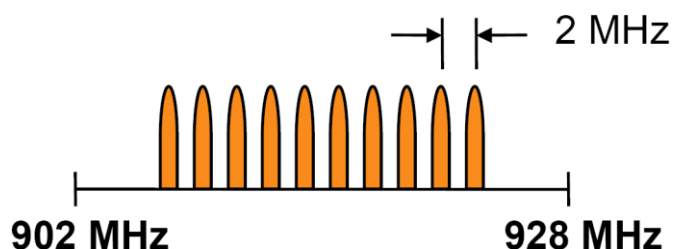
Maximální doba trvání jednoho rámce je 4,25 ms pro 2,4 GHz, 26,6 ms pro 915 MHz a 53,2 ms pro 868 MHz.

Vztahy pro výpočet středního kmitočtu kanálů pro jednotlivá pásma, kde k je číslo kanálu :

Kanál č. 0 :



Kanál č. 1 až 10 :

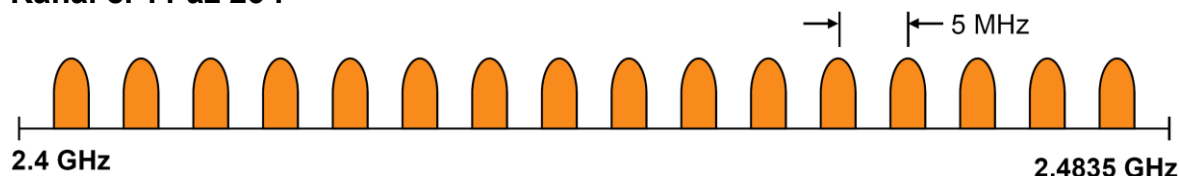


Obr.13. Popis kanálů pro pásma 868 a 915MHz

$$f_c = 868,3 \text{ MHz, pro } k = 0 \tag{1}$$

$$f_c = 906 + 2(k - 1) \text{ MHz, pro } k = 1, 2 \dots 10 \tag{2}$$

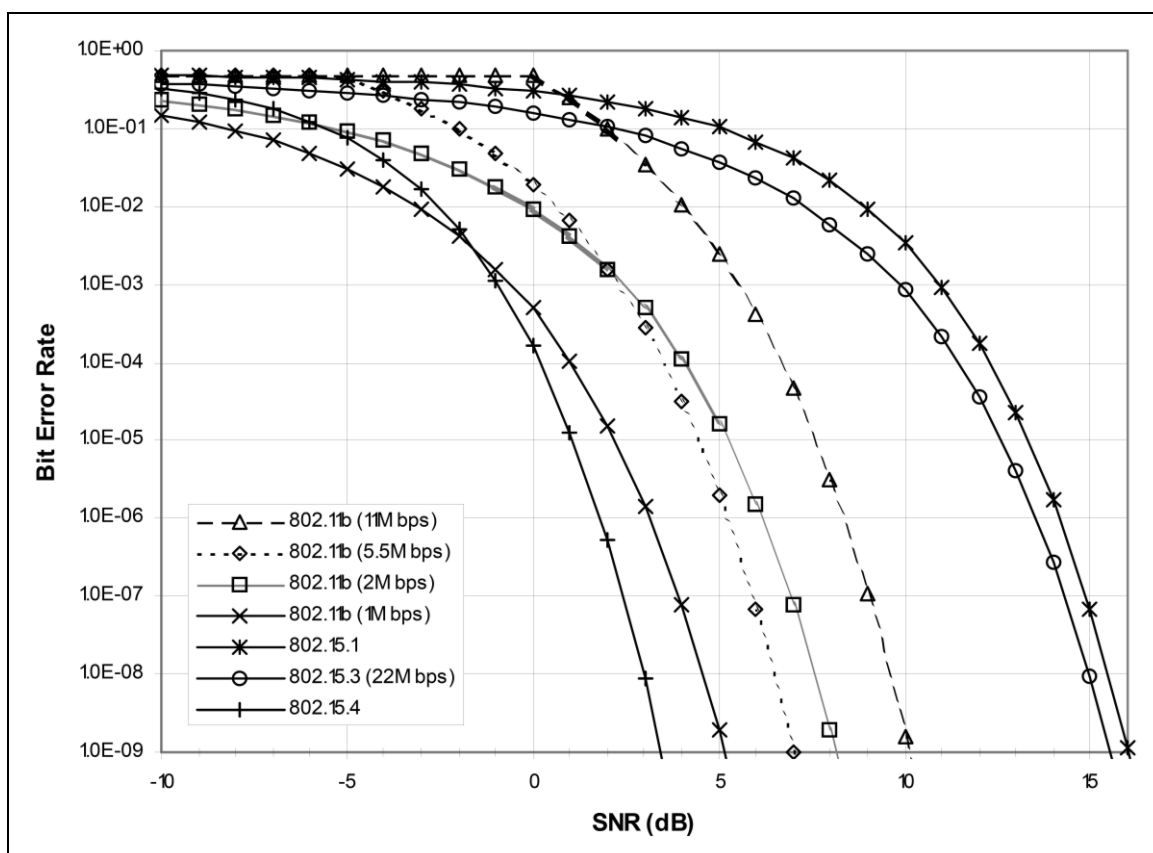
Kanál č. 11 až 26 :



Obr.14. Popis kanálu pro pásmo 2,4GHz

$$f_c = 2405 + 5(k - 1)\text{MHz, pro } k = 11, 12 \dots 26 \quad (3)$$

Pro definici fyzické vrstvy je použit právě standard IEEE 802.15.4, neboť má nejnižší bitovou chybovost u zařízení s velkým šumem, viz obr.15.



Obr.15. Závislosti bitové chybovosti BER na šumu SNR pro bezdrátové standardy [5]

2.3 Topologie sítě

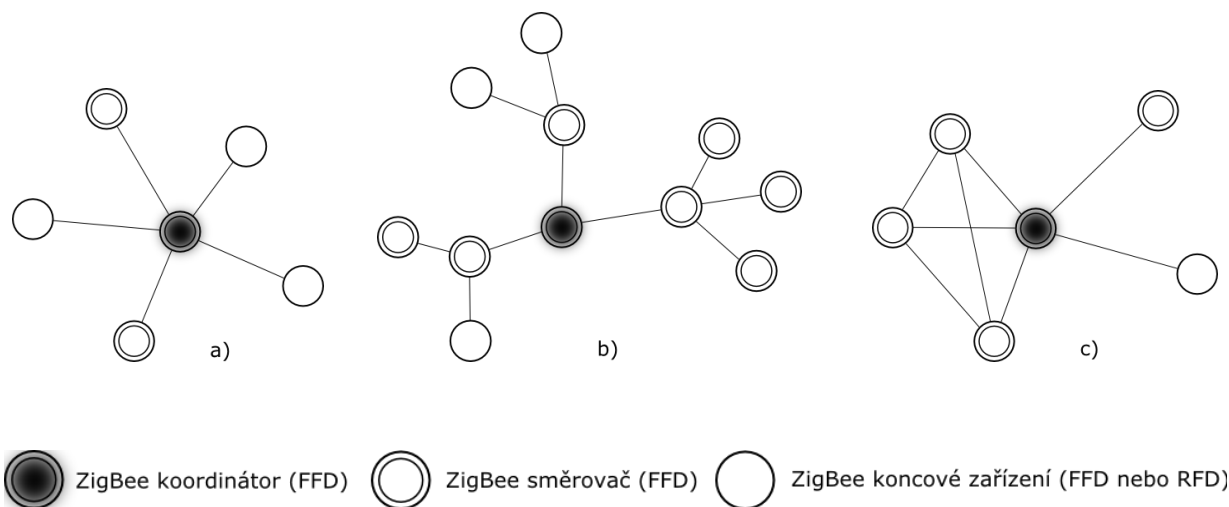
Pro adresaci jednotlivých zařízení v síti lze použít dlouhé (64 bit) nebo zkrácené (16 bit) binární adresovací kódy, viz tab.3. Každou síť lze jednoznačně určit pomocí 16 bitového identifikátoru PAN ID (Personal Area Network ID), který se používá v případě, kdy v jednom prostoru je provozováno více sítí podle standardu IEEE 802.15.4. Lokální adresa zkráceného adresovacího kódu umožňuje v jedné síti adresovat maximálně 65 535 zařízení. Každá síť s jedinečným PAN ID, který slouží pro rozlišení překrývajících se sítí v případě, že v jednom prostoru dochází k vytvoření a sestavení více sítí standardu IEEE 802.15.4, je řízena PAN koordinátorem (centrální stanicí), který jako jediný může síť založit.

Tab.3. Adresové pole MAC rámce

PAN ID zdroje 0/2 byte	Adresa zdroje 0/2/8 byte	PAN ID cíle 0/2 byte	Adresa cíle 0/2/8 byte
Adresové pole			

Síťová vrstva standardu ZigBee podporuje síťové topologie typu hvězda (star), strom (tree) a síť (mesh), která je kombinací obou předchozích sítí, viz obr.16.

Uzly sítě (nodes) jsou buď plně funkční zařízení FFD (Full Function Device), která mohou vykonávat funkce koordinátora i směrovače (opakovače) a nebo redukovaná zařízení RFD (Reduced Function Device), která mohou pracovat pouze jako koncová zařízení. Síť je řízena ZigBee koordinátorem. V topologii typu hvězda komunikují ostatní zařízení, označovaná jako koncová, přímo s koordinátorem. V topologii typu síť a strom koordinátor spouští komunikaci a stanovuje parametry sítě. Síť lze rozšířit použitím ZigBee směrovačů, které slouží jako tzv. opakovače (zesilovače) pro prodloužení komunikační vzdálenosti s koncovým zařízením. V síti typu strom se pro přenos dat a řídicích zpráv používá hierarchické směrování. Topologie typu síť umožňuje samostatnou komunikaci mezi rovnocennými uzly (peer-to-peer). Připojení zařízení k síti by se mělo uskutečnit do 30 ms, probuzení do aktivního módu a přístup na kanál do 15 ms.



Obr.16. Topologie sítě ZigBee typu a) hvězda, b) strom, c) síť (mesh)

Dále lze rozlišit další dva typy sítí a to "*beacon-enabled*" a "*non-beacon*" síť, viz obr.10. V síti "*beacon-enabled*" koordinátor pravidelně vysílá signál, který koncová zařízení využívají k připojení se k síti a vlastní synchronizaci pro následný přenos dat. Pro navázání spojení se tedy používají superrámce popsané v kap.2.2. V "*non-beacon*" síti koordinátor také periodicky vysílá signál, který však slouží pouze k jeho vlastní identifikaci a koncovým zařízením k detekci sítě. Koncová zařízení komunikují s koordinátorem pomocí požadavků na vysílání dat a potvrzovacích rámců. Musí být neustále připraveny podporovat komunikaci mezi rovnocennými uzly.

2.4 Vytvoření sítě (strom/hvězda)

Ukázka vytvoření sítě je pro topologii v síti *Strom* (příp. *Hvězda*) bez šifrování. Síť zakládá PAN koordinátor. Na začátku vyhledává elektromagnetické vlny v okolí. Po dokončení tohoto druhu skenu (energy scan) následuje aktivní skenování (active scan) PAN typu ZigBee na kanálech požadovaných aplikační vrstvou. Na základě výsledků skenování zvolí jeden z 16 komunikačních kanálů (uvažováno jen pásmo 2,4GHz) a přenosové parametry. Podle externě definovaných požadavků zvolí topologický typ sítě. Pro nízkou latenci doručení zpráv je vhodný typ *Hvězda* a v zájmu širokého prostorového pokrytí víc vyhovuje typ *Strom*. Následně deklaruje síť definováním PAN ID.

V případě dvou nejběžnějších typů sítě (*Strom*, *Hvězda*) pokračuje vysíláním beacon rámců. Tyto rámce jsou vysílány v pravidelných intervalech na základě hodnot definovaných koordinátorem. Pomocí nich synchronizují ostatní prvky v síti, aby zabránili zbytečnému rušení. Při inicializaci sítě PAN koordinátor zvolí hodnoty proměnných *maxChildren*, *maxRouters* a *maxDepth*. Hodnota *maxChildren* definuje, jaký maximální počet prvků je dovolený zařízením FFD v síti asociovat. *MaxRouters* informuje o maximálním možném počtu FFD zařízení ve funkci směrovače (routeru). Tato informace je důležitá pro distribuci a přerozdělování síťových adres a směrování paketů v rámci sítě. Počet skoků (hop-ů) od zařízení k druhému zařízení hovoří o počtu zařízení, které musí danou zprávu přijmout (a poté případně poslat) cestou k jeho adresátovi. V případě neudání cílového zařízení se automaticky přiřadí počet skoků ke koordinátoru.

Skok bez udání cílového zařízení tedy definuje hloubku (depth) zanoření síťového prvku v síti. V případě koordinátoru definujeme hloubku (depth) hodnotou 0. V proměnné *maxDepth* je informace o maximální přípustné vzdálenosti (udané ve skocích) prvků od PAN koordinátoru. Složení sítě typu *hvězda* zaručuje to, že hodnota proměnné *maxDepth* je nastavená na 1. V případě nastavení na 0 není možné přiřadit (asociovat) žádné prvky do sítě. Poté, jakmile koordinátor začne vysílat beacon rámce, se mohou ostatní prvky přiřadit do sítě. Směrovače se připojují prostřednictvím aktivního skenu, to znamená, že nejprve vyšlou broadcast-em požadavek na beacon rámeček. Tento požadavek deklarují na více kanálech.

V případě aktivního skenu je možné definovat preferovanou síť pro připojení (na základě PAN-ID). Na žádost o vyslání beacon rámečku musí všechny zařízení schopné vysílání beacon rámců reagovat. Na základě odpovědi si daný směrovač vybere nejvhodnějšího rodiče (parent) pro spojení. Kritéria pro výběr rodiče jsou depth (vzdálenost na počet skoků ke koordinátoru) a LQI (Link Quality Indication). Některé FFD zařízení mohou být omezené jen na spojení prvků pracujících v režimu směrovače (routeru). Koncová zařízení (end devices) jsou schopná aktivního i pasivního (passive scan) skenování.

V případě pasivního skenování zařízení jen zaznamenává rámce vysílané ostatními prvky a vytváří si samo obraz o skladbě sítě. Po zpracování dostatečného množství rámců požádá nejvhodnějšího kandidáta o přiřazení do sítě. Po připojení prvku si rodič (parent) aktualizuje seznam sousedních prvků (Neighbour List) a upraví si routovací tabulky.

2.5 Zabezpečení komunikace

Během přenosu přes fyzické médium může dojít k chybám. Pro odhalení takto vzniklých chyb se používá cyklického kódu (CRC nebo FCS), kdy každý rámeček je doplněn o zbytek po dělení polynomem. Ve standardu ZigBee je použit polynom ve tvaru (4) :

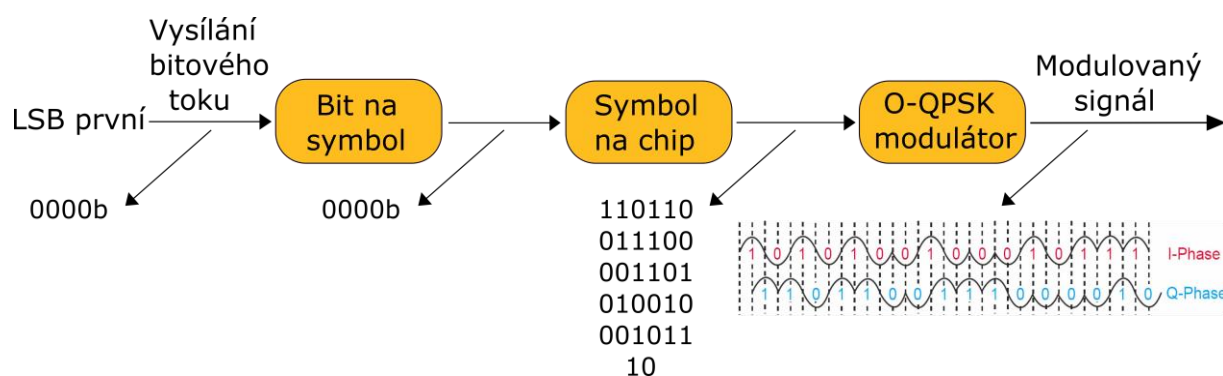
$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (4)$$

Zabezpečován je celý rámeček včetně jeho záhlaví.

Pro zvýšení spolehlivosti přenášených dat je vysílání provedeno technologií DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Každý přenášený bit je zpracován touto sekvencí, každému informačnímu bitu je přiřazena určitá bitová sekvence. Do přenášených dat se tím zavádí mnohonásobná redundance, která na přijímací straně zlepšuje proces rekonstrukce dat.

Celý proces rozprostírá vysokofrekvenční energii na širší frekvenční pásmo než by odpovídalo přímé modulaci uživatelským datovým tokem. Spektrální výkonová hustota (úroveň signálu vysílaná na určitém kmitočtu) je přitom velice nízká, protože celkový vysílací výkon je rozložen do širokého kmitočtového pásma. Procesní zisk tohoto systému je definován jako desítkový logaritmus poměru rozprostření (chip rate) a dat. Přijímač obnovuje data zpětným pochodem. Hlavní výhodou technologie rozprostřeného spektra je především eliminace interferencí (rušení) úzkopásmových zdrojů při klasickém přenosu. Uživatelům, kteří neznají mechanismus vytváření pseudonáhodné sekvence se přenášená data jeví jako šum.

Převod binárního toku dat na modulovaný signál pro pásmo 2,45 GHz je popsán funkčním blokem na obr.17. Prvním krokem je převod všech binárních dat PPDU na symboly. Každý byte je rozdělen do dvou symbolů, kde nejméně významný symbol je přenesen jako první. Dále je každý symbol mapován do pseudonáhodné posloupnosti s 32 chipy. Chipová posloupnost je pak posílána rychlostí 2 Mchipy/s, kde nejméně významný chip (c_0) je pro každý symbol posílán první.



Obr.17. Převod binárního toku dat na modulovaný signál

Přenášená data mezi jednotlivými účastníky lze dále zabezpečit proti zcizení. Standard definuje tři režimy a to nezabezpečený přístup, přístup na základě práv a zabezpečený přístup. Je-li použit přístup na základě práv, pak síť odmítá rámce od neznámých zařízení.

V zabezpečeném režimu mohou zařízení sítě využít další služby mezi které patří:

- Šifrování dat pomocí AES 128 bit.
- Použití MIC (*Message Integrity Code*).
- Odmítnutí opakujících se rámců (*Sequential freshness*).

Šifrovací standard AES (*Advanced Encryption Standard*) nahrazuje standard DES. Výhodou tohoto nového způsobu šifrování je, že nehrozí útok hrubou silou (tj. vyzkoušení všech možných klíčů).

MIC je kryptografický kontrolní součet, který je zahrnut do vysílaného rámce. Na přijímací straně se provádí stejná operace a hodnotu součtu porovnává s přijatou. Pokud se zpráva během přenosu změnila, budou se hodnoty lišit a rámec je odmítnut.

Jako základní zabezpečení ZigBee se používá AES (*Advanced Encryption Standard*) s klíčem o délce 128 bitů jež je implementován v síťové vrstvě. Pokud je požadováno i zabezpečení MAC Command Frame, Beacon Frame a Acknowledgement Frame je realizováno již v MAC vrstvě pomocí AES. Díky tomu je možné ověřit autenticitu a integritu MAC rámce a zajistit jeho důvěrnost. Při požadavku na ověření integrity je vytvořen MIC (*Message Integrity Code*) o délce 4, 8 či 16 bytů a je vyslán společně s MAC rámcem. V tomto případě je použit AES algoritmus v CTR (*Counter*) módu.

Pokud je nutné zajistit důvěrnost MAC rámce je k němu přidána informace o pořadí rámce a klíče (*Frame Counter, Key Sequence Counter*). Na vysílací a přijímací straně je udržována aktuální informace o čísle rámce. Pokud obdrží přijímací zařízení rámec s neplatným číslem je detekováno narušení bezpečnosti. AES je použit v CBC-MAC (*Cipher Block Chaining*) módu. Při implementaci jak ověřování integrity tak šifrování je použit AES v módu jež je nazýván CCM.

Všechny zařízení v síti určené konkrétním PAN-ID sdílejí jeden síťový klíč (*network key*) a jakékoli dvě zařízení v síti mohou sdílet také spojovací klíč (*link key*). Správu těchto klíčů má na starosti tzv. Trust Center (TC) zařízení (nejčastěji koordinátor). Tento Trust Center autentifikuje zařízení při vstupu do sítě, uchovává a distribuuje bezpečnostní klíče a dává povolení zařízením k používání spojovacího klíče. ZigBee koordinátor může v rámci bezpečnosti povolit připojení zařízení jen na omezenou dobu (definovanou uživatelem). Trust Center pracuje ve dvou režimech :

Residential Mode (obytný, domácí mód) – nižší paměťové nároky

Commercial Mode (průmyslový mód) – vyšší úroveň zabezpečení

Autentifikace i šifrování může být realizované na NWK vrstvě (zabraňuje útokům z venku sítě, společný síťový klíč, minimální požadavky na HW nároky). Šifrování je volitelné a jeho vypnutí neovlivňuje kontrolu integrity zpráv a autentifikace zařízení.

2.6 Hardware

V současnosti je možné nalézt velké množství RF obvodů určených pro provoz v síti ZigBee. V tab.4 jsou uvedeny společnosti a jimi nabízené produkty.

Tab.4. Transceivery nabízené společnostmi ZigBee Alliance a jejich parametry

Výrobce	Chip	Kmitočtové pásmo [MHz]	I_{RX} [mA]	I_{TX} [mA]	Citlivost přijímače [dBm]	Výstupní výkon [dBm]	Napájecí napětí [V]
Freescale	MC13191	2400	37	30	-91	max. 3,6	2,0 až 3,4
Freescale	MC13192	2400	37	30	-92	max. 3,6	2,0 až 3,4
Freescale	MC13193	2400	37	30	-92	max. 3,6	2,0 až 3,4
Chipcon	CC2420	2400	19,7	17,4	-95	0	2,1 až 3,6
Chipcon	CC2430	2400	27	25	-94	0	2,0 až 3,6
Chipcon	CC2431	2400	27	25	-	-	2,0 až 3,6
Chipcon	CC1110	868/915	22	23	-99	max. 0	2,0 až 3,6
Ember	EM250	2400	27	27	-97	3	2,1 až 3,6
Ember	EM260	2400	26	27	-94	4	2,1 až 3,6
Ember	EM2420	2400	19,7	17,4	-90	0	2,1 až 3,6
Ubec	UA2400	2400	-	-	-95	0	-
Atmel	AT86RF210	868/915	14,5	60	-95	12	1,8 až 3,6
Atmel	AT86RF230	2400	15.5	16.5	-101	-17 až 3	1,8 až 3,6

2.6.1 Synchronizace zařízení ZigBee

Synchronizace jednotlivých zařízení v síti ZigBee, potažmo koncových zařízení s koordinátorem sítě je realizována na základě takzvaného rámce beacon. Synchronizační autoritou je zde koordinátor sítě, který v daných okamžicích vysílá synchronizační sekvence, neboli beacon. Sekvence přijímají ostatní zařízení a synchronizují se podle nich s vysílací stranou, tedy s koordinátorem. Tento postup umožňuje koncová zařízení na dlouhou, předem definovanou dobu „uspat“, a značně tak snížit jejich spotřebu. Interval synchronizačních sekvencí může být nastaven v rozmezí 15 ms až přibližně 15 minut. Pro přenos je pak možné využít tzv. super-rámce, začínající právě sekvencí beacon, po nichž následuje interval CFP, kdy zařízení volně soutěží o přístup k médiu. Ten je případně následován intervalem s rezervovanými časovými sloty pro prioritní přenosy GTS. Koordinátor zasílá v sekvenci beacon pro jednotlivá koncová zařízení také informace, zda jsou pro ně k dispozici data, či nikoliv. Pokud ano, koncová zařízení si je vyžádají a přijmou je v rezervovaných slotech. Pokud síť funguje bez sekvencí beacon, dotazují se jednotlivá zařízení periodicky koordinátora. Komunikace potom probíhá bez vyhrazených slotů, viz obr.10.

2.6.2 Spotřeba zařízení ZigBee

Komunikační standard ZigBee je navržen pro aplikace, v nichž zařízení potřebují vysílat a přijímat pouze malé objemy dat a kde je vyžadována extrémně nízká spotřeba. Protokoly jsou proto navrženy s ohledem na co nejmenší spotřebu energie koncových zařízení, u kterých se předpokládá napájení z baterií. Koordinátor a směrovače by však neměly být napájeny bateriově, protože funkčnost sítě je na nich závislá.

Při nejjednodušší topologii hvězda a využití technologie beacon se koncové zařízení aktivuje po přijetí sekvence beacon a vyšle svá data. Koordinátor data přijme a uloží do paměti. Při přijetí další sekvence beacon indikuje koordinátor cílovému zařízení, že pro něj má data. Koordinátor data předá ve chvíli, kdy si je koncové zařízení vyžádá. Tento způsob zaručuje nejnižší spotřebu energie pro koncová zařízení, která jsou většinu doby přepnuta v úsporném režimu (sleep mode). K jejich probouzení dochází v předem definovanou dobu, a poté jsou přeneseny veškeré užitečné informace. Interval synchronizačních sekvencí může být v rozmezí 15 ms až přibližně 15 minut. Koncová zařízení jsou periodicky probouzena a přenášejí data ke koordinátoru sítě. Ten tato data uloží a následně přepošle při probuzení zařízení pro něž jsou tyto data určena. Tento přístup umožňuje extrémně snížit spotřebu koncových zařízení. Největší nároky jsou kladeny na koordinátora, který musí být schopen uložit všechna data pro jednotlivá zařízení.

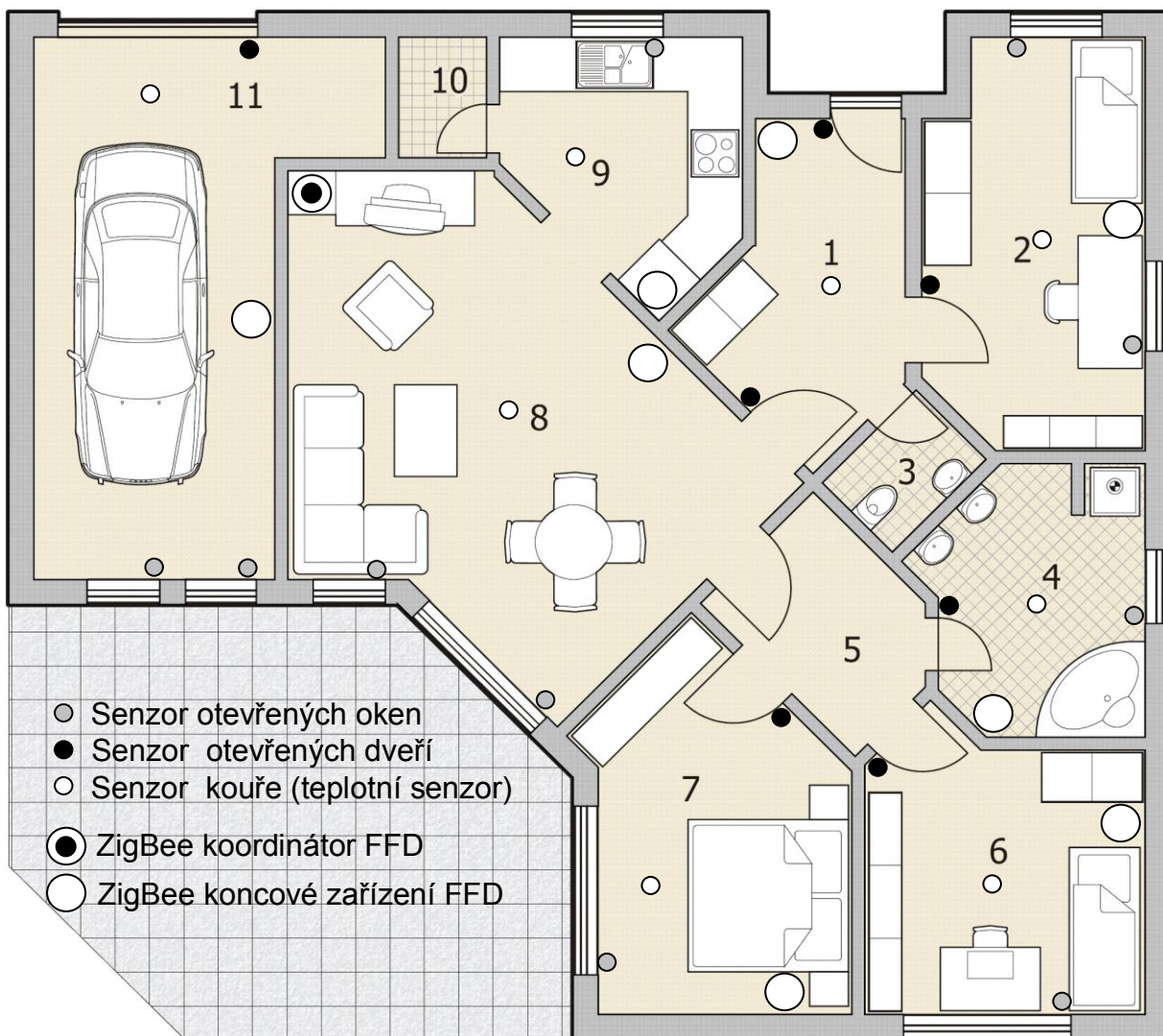
Proudový odběr ZigBee modulu RC2204AT při jednotlivých režimech :

- RX příjem (MCU v módu Idle “naprázdno”, OSC na 8MHz) 30 mA
- TX vysílání (MCU v módu Idle, OSC na 8MHz a výstupní výkon 0 dBm) 27 mA
- IDLE mód (MCU v módu Idle, OSC 32,768kHz) 23 μ A
- PD mód (MCU v Power Down módu, watchdog vypnut) 1,3 μ A

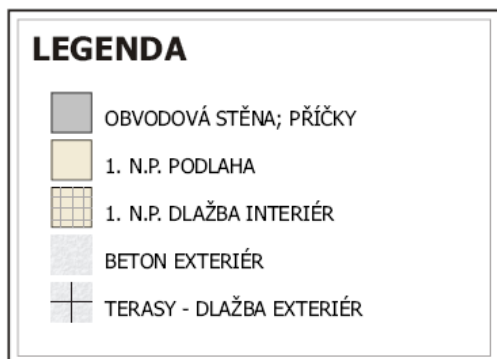
Proudový odběr ZigBee modulu ZDM-A1281-A2 při jednotlivých režimech :

- RX příjem 19 mA
- TX vysílání 18 mA
- (RF část vypnutá, MCU je aktivní 50% času) 14 mA
- PS mód (MCU v Power Save módu) 6 μ A

3 Návrh zabezpečení pro rodinný dům



Obr.18. Půdorys zabezpečovaného objektu



Obr.19. Legenda půdorysu objektu

Při tomto návrhu jsem se pokusil naznačit zabezpečení obytného domu umístěním jednotlivých senzorů v zádveřích 1, dětském pokoji 2;6, WC 3, koupelně 4, ložnici 7, obývacím pokoji 8, kuchyni 9 a v garáži 11. Půdorys je v poměru 1 : 87. Při návrhu je využita topologie hvězda, viz. kap.2.3. Senzor kouře je realizován teplotním senzorem a senzory otevřených oken/dveří magnetickým spínačem. Umístění senzorů je naznačeno na obr.18.

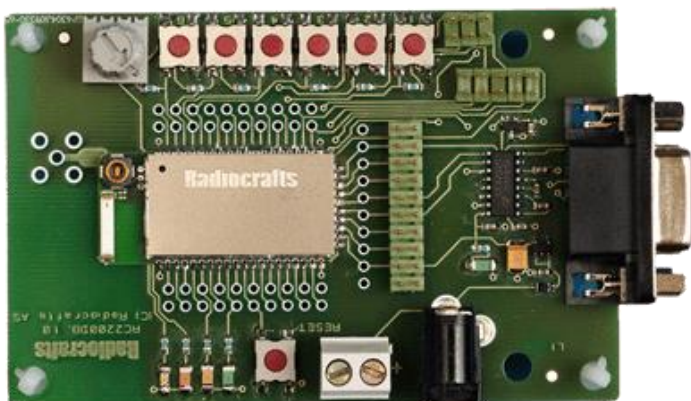
4 ZigBee hardware

- RC 2200 AT SPPIO (kit) + RC 2204 AT (modul) - nelze realizovat
- MeshNetics ZigBit moduly (ZDM-A1281-A2) - zrealizováno

4.1 RC 2200 AT - SPPIO

RC2200AT-SPPIO (Serial Port Profile and I/O mapping) je jeden z demonstračních kitů od společnosti Radiocrafts, který je již před-programován pro převod ZigBee komunikace na sériové rozhraní RS232 a zpět. Kit obsahuje dvě hardwarově totožné desky, viz obr.20. Jedna z nich je nastavena jako koordinátor a druhá jako směrovač. Hlavním prvkem na každé z nich je samotný ZigBee modul RC2200AT, který je řízen mikroprocesorem ATmega 128L (128 kB Flash, 4 kB RAM a EEPROM) a IEEE 802.15.4 RF traneiver 2.4GHz CC2420 od firmy Chipcon. Dále napájecí (stabilizační) obvod pro napájení 6V síťovým zdrojem, 6 mikropínačů pro řízení programu a funkce sítě, LED pro indikaci funkce programu a navázání komunikace, resetovací tlačítko, potenciometr pro nastavení MAC adresy modulu, konektory JTAG a ISP pro programování a v neposlední řadě převodník úrovní ST3232C z RS232 na 3V logiku a naopak.

Rozhraní RS232 slouží pro nastavení jednotlivých parametrů (AT mód) a pro přenos dat (Data mód), které jsou okamžitě převáděny na ZigBee komunikaci a vysílány do sítě.



Rozmístění pinů ISP konektoru na desce odpovídá ISP konektoru používaných u ATMEL programátorů, například AVR ISP MK II.

Kit obsahuje pouze licenci na ZigBee stack (Chipcon/Figure 8 Wireless) uložený v paměti modulu a není k dispozici ve zdrojovém formátu. Proto nelze na tomto kitu vyvíjet vlastní aplikace. [12]

Obr.20. Deska RC2200AT-SPPIO kitu

ZigBee stack od firmy Chipcon je implementován programem ve vnitřní paměti flash řídicího MCU AVR ATmega, kde pracuje i aplikace definovaná (programovaná) firmou Radiocrafts. Tato aplikace se nazývá také SPPIO profil. Moduly použité v tomto kitu jsou hardwarově kompatibilní s moduly RC220xAT, až na rozdíl použitého řídicího MCU a s tím jen velikosti pamětí flash, RAM a EEPROM. Modul RC2202AT používá pro řízení mikroprocesor ATmega325 (32 kB Flash, 2 kB RAM, 1 kB EEPROM) a RC2204AT používá mikroprocesor ATmega64L (64 kB Flash, 4 kB RAM, 2 kB EEPROM). Označení AT u názvu modulu značí pouze verzi s integrovanou ¼ vlnnou, 50 Ω anténou. Další podrobné informace o modulu jsou uvedeny v následující kapitole.

Vytvoření sítě a spárování (binding) těchto dvou desek kitu lze provést nastavením jednotlivých parametrů S-registru modulu pomocí AT příkazů (AT command mode) přes sériový port PC softwarem Terminál, nebo podobným :

a) Nastavení desky označené SPPIO/C jako koordinátor sítě :

- Propojení desky s PC sériovým kabelem k portu COM.
- Na PC je nutné spustit program pro sériovou komunikaci Terminál, nebo podobný. Nastaví se přenosové parametry pro výchozí COM port : rychlost přenosu 19200 (Baud rate), 1 start bit, 1 stop bit, žádná parita a kontrola toku (no parity a no flow control).
- Připojí se napájecí zdroj a rozsvítí se zelená LED dioda indikující správnost napájení. Na terminálu se objeví odpověď od desky "STATUS01".
- Nyní se v terminálu přepne do AT módu zapsáním "+++" a deska odpoví "STATUS05", který znamená, že je zařízení připraveno přijímat příkazy. Zápisem příkazu ATS3 = 1 se deska nastaví jako koordinátor. Přečteme 64bit MAC adresu, nyní už koordinátoru, posláním příkazu ATS4?

b) Nastavení desky označené SPPIO/R jako směrovač :

- Zopakuje se předchozí krok a v třetím bodě se nastaví příkazem ATS3 = 2 deska jako směrovač.

c) Spárování koordinátoru a směrovače :

- Nyní se nastaví z koordinátoru MAC adresa směrovače a naopak. Pošle se příkaz ATS5 = AA-BB-CC-DD-EE-FF-GG-HH, kde ABCDEFGH je 64 bitová MAC adresa cílového zařízení, tedy směrovače. Toto se provede i ze strany směrovače na koordinátor. Provedením zápisu AT0 se přepne zpět do data módu a po zdařeném spárování se obdrží "STATUS06". Nyní se mohou obě zařízení resetovat, nebo vypnout.

d) Start komunikace mezi koordinátorem a směrovačem :

- Znovu se zapne koordinátor a směrovač do sítě, počká se dokud koordinátor neodpoví "STATUS03" a "STATUS02", že je síť připravena k připojení. Směrovač po připojení k síti odpoví "STATUS04" a po úspěšném spárování obě zařízení odpoví "STATUS07".
- Obě zařízení jsou teď spárována a připravena pro přenos dat.

Pro nastavení zařízení (S-registru) pomocí terminálu existuje více příkazů, zde jsou uvedeny nejdůležitější :

- ATIn přečte identifikační číslo produktu
- ATSr? přečte nastavení konfiguračního registru (S-registr)
- ATSr=n nastavení hodnoty *n* parametru na adrese *r* v konfiguračním registru (permanentně)
- ATS? zpětně přečte všechny registry (použito pro ověření nastavení)
- ATCHnn nastavení rádiového kanálu, kde nn = 11...26 (není permanentní)
- ATPWn nastavení výstupního výkonu, kde n = 1...5 (není permanentní)
- ATDA? přečte MAC adresu stávajícího cílové zařízení

Pro správný chod sítě musí být zajištěno, že je použit pouze jeden koordinátor v síti, všechna zařízení mají stejné PAN ID a jsou nastavena na stejném kanále, každé zařízení má jinou MAC adresu a při používání koncových zařízení, jsou vypnuty před zapnutím koordinátoru. Směrovače a koncová zařízení musí být zapínány jeden po druhém.

Nastavení některých parametrů v S-registru koordinátoru pomocí příkazu ATSr = n :

Tab.5. Nastavené hodnoty různých parametrů v S-registru koordinátoru

Parametr	Adresa	Hodnota	Možnosti	Popis
RF_CHANNEL	0	18	11-26	RF kanál pro pásmo 2.4GHz
RF_POWER	1	5	1-5	výstupní výkon
SLEEP_MODE	2	0	0,1	vypnuto
NWK_DEVICE	3	1	1-4	koordinátor
MAC_ADR	4	00-15-20-00-00-00-00-01		64 bitová MAC adresa (koordinátoru)
DEST_MAC_ADR	5	00-15-20-00-00-00-00-02		64 bitová MAC adresa (cílového zařízení)
PAN_ID	6	0	0000-FFFF	PAN ID
MAX_CHILDREN	24	5	1-5	max. počet zařízení v síti
MAX_ROUTER	25	3	1-3	max. počet směrovačů v síti
MAX_DEPTH	26	7	1-7	max.hĺoubka zanořeni v síti
PACKET_LENGTH	7	60	1-68	děĺka paketu
PACKET_TIMEOUT	8	25	0,1,2,25,255	1s
PACKET_END_CHAR	9	0	0,13,10,90	žádný
PACKET_INTERVAL	11	25	1,2,25,255	1s
IO_MASK1	12	0xFF	00,FF	PORT1 vstupní
IO_MASK2	13	0xFF		PORT2 vstupní
IO_MASK3	14	0xFF		PORT1 analog
UART_BAUD_RATE	15	6	0-10	19200
UART_NUM_OF_BITS	16	8	7,8	8 datových bitů
UART_PARITY	17	0	0,1,2	žádná
UART_STOP_BITS	18	1	1,2	jeden stop bit
UART_FLOW_CTRL	19	0	0-4	žádná
AT_ECHO_CHAR	21	1	0,1	echo vypnuté
PRODUCT_ID	23			ID produktu

Komunikace koordinátoru se směrovačem je prakticky vyzkoušena a byly naměřeny maximální komunikační vzdálenosti přes různé překážky v budově (zdi, strop), viz tab.6.

Tab.6. Naměřené maximální hodnoty vzdáleností dosahu

Struktura překážek	Dosah zařízení [m]
Komunikace na volném prostranství	90
Komunikace přes jednu sádrokartonovou příčku	13
Komunikace přes dvě sádrokartonové příčky	10
Komunikace přes cihlovou zeď (tloušťka 30 cm)	5
Komunikace z nižšího patra do vyššího	4
Komunikace přes cihlovou zeď (tloušťka 15cm)	7

4.2 Modul RC 2204 AT

Pro vývoj a testování aplikací je vhodné použít samotné ZigBee moduly RC2204AT od firmy Radiocrafts, navržené pro použití se Zigbee stackem. Tyto moduly žádný ZigBee stack neobsahují, tudíž ani před-programovanou aplikaci. Součástí modulu je pouze poplatek za Chipcon/Figure 8 Wireless ZigBee Stack, ale pro implementaci uživatelského programu je nutné tento stack dokoupit (ve zdrojovém formátu) za poměrně dost vysokou cenu. Z tohoto důvodu tento modul nemůže být použit pro splnění zadání této práce, proto dále jen návrh.



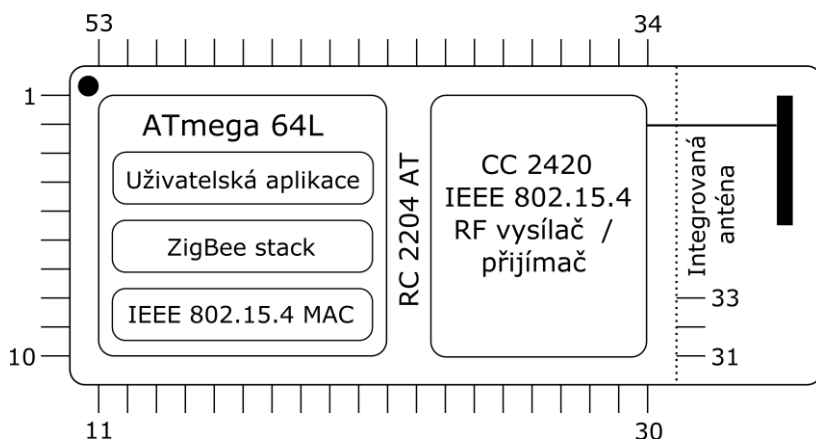
Kompletní modul RC2204AT, viz obr.21, o rozměrech pouhých 16,5 x 29,2 x 3,5 mm poskytuje ZigBee komunikaci na jednom z 16 kanálů v pásmu ISM 2,4GHz založenou na vrstvách PHY a MAC. Součástí je také integrovaná $\frac{1}{4}$ vlnná, 50 Ω anténa.

Obr.21. Modul RC2204AT

O chod a řízení modulu se stará mikroprocesor ATMEL AVR ATmega 64L (8MHz), který s RF vysílačem/přijímačem CC2420 tvoří hlavní část modulu. Výhody použití tohoto mikroprocesoru spočívají v široké škále možných rozhraní a portů, vhodné pro připojení snímačů :

- UART (rozhraní pro sériovou komunikaci – RS232)
- TWI (rozhraní pro sériovou komunikaci po dvou vodičích)
- SPI (komunikace mezi ATmegou64L a CC2520)
- JTAG a ISP (rozhraní pro programování)
- 64 kB FLASH paměť, 4kB RAM a 2 kB EEPROM
- 2 x 8bitové digitální porty a 1 x analogový nebo digitální
- 32,768 kHz přesné hodiny RTC (Real Time Clock)
- Napájení 2,7 – 3,6 V
- Přenosová rychlost 250 kb/s
- Maximální výstupní výkon 0 dBm
- Pracovní teplota od -30 do 85 °C

Pro snížení spotřeby se koncová zařízení obvykle po nějakém časovém úseku uspávají (Sleep mode), nebo vypínají (Power Down mode). V případě vypnutí už zařízení není součástí sítě. Uspávány mohou být pouze koncová zařízení.



Na obr.22 je naznačeno vnitřní uspořádání modulu. Pro komunikaci mezi mikroprocesorem a RF částí slouží sériové rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface). Pouzdro modulu je osazeno 53 piny s roztečí 1,27 mm. [12]

Obr.22. Vnitřní uspořádání modulu RC2204AT

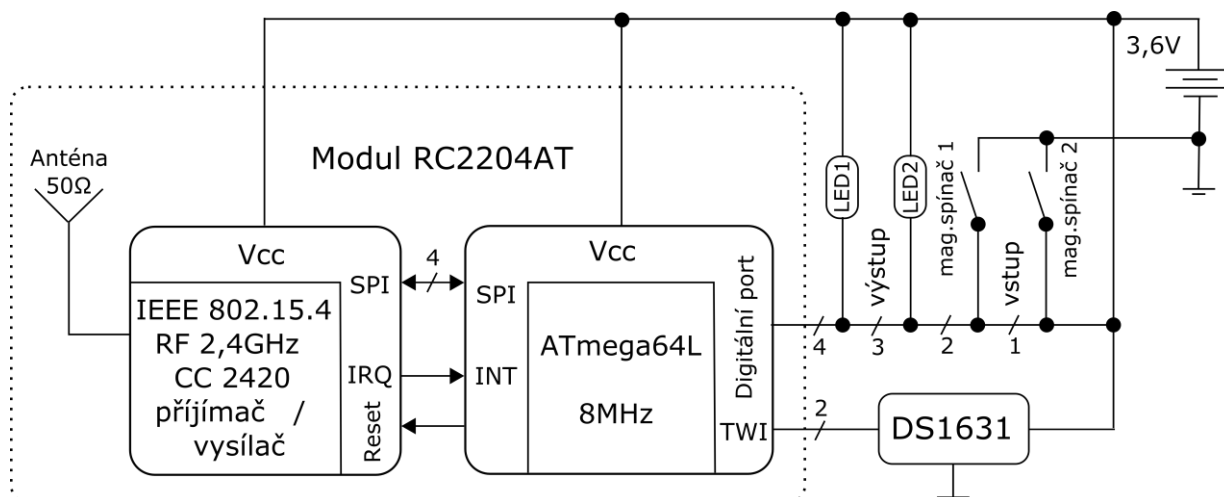
Popis jednotlivých pinů, viz obr.22, využitých při návrhu desky pro snímače je v následující tabulce.

Tab.7. Popis jednotlivých pinů modulu RC2204AT

Číslo pinu	Název pinu	Popis
1	GND	systemová zem
2	Vcc	napájení
4	GND	systemová zem
5	CTS	clear to send
6	RTS	ready to send
8	TXD (SCL)	vysílaná data
9	RXD (SDA)	přijímaná data
10	GND	systemová zem
11	GND	systemová zem
21	PE0	pin 0 portu E
22	PE1	pin 1 portu E
23	PE2	pin 2 portu E
24	PE3	pin 3 portu E
25	PE4	pin 4 portu E
26	PE5	pin 5 portu E
30	GND	systemová zem
31	GND	systemová zem
33	GND	systemová zem
34	GND	systemová zem
36	SCLK	hodiny pro ISP
37	SI	vstup pro ISP
38	SO	výstup pro ISP
44	RESET	reset
53	GND	systemová zem

- Pro rozhraní UART jsou použity piny 5, 6, 8 a 9
- Pro rozhraní TWI piny 8, 9 (TXD ↔ SCL a RXD ↔ SDA) stejné s UART
- ISP konektor je připojen na pinech 21, 22, 36, 37, 38 a 44
- Port E pro digitální vstupy / výstupy

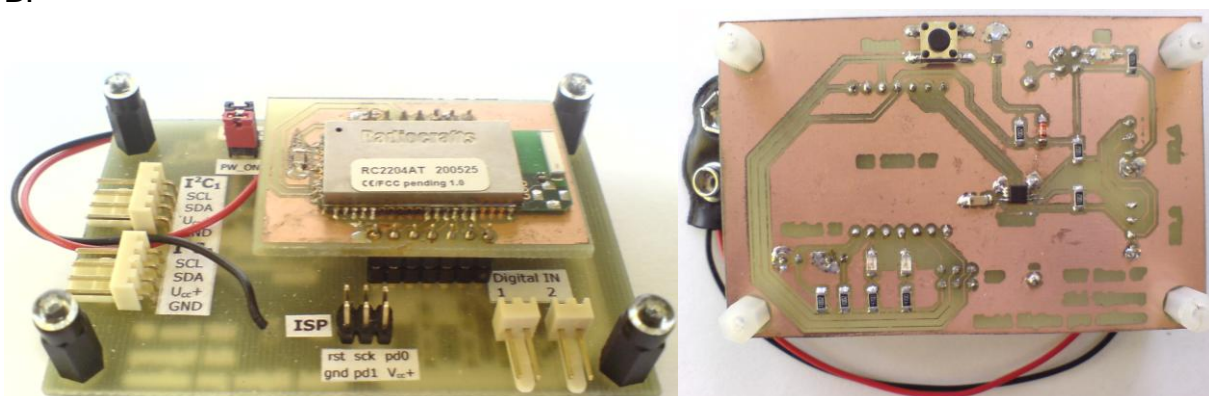
4.2.1 Návrh desky pro senzory s modulem RC2204AT



Obr.23. Blokové zapojení desky pro senzory s modulem RC2204AT

Návrh desky pro senzory vychází z blokového zapojení na obr.23. Místo senzoru požáru je použit digitální teploměr DS1631, viz kap.5, pro senzory otevřených oken a dveří jsou použity jazýčkové magnetické spínače od firmy FESTO.

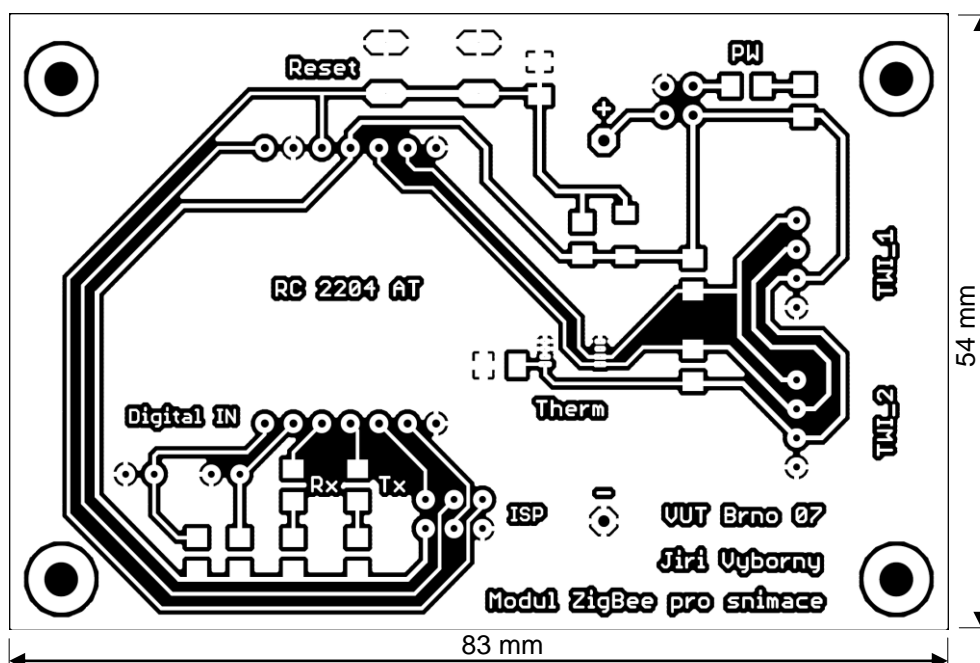
Digitální teploměr je umístěn přímo na desce a k modulu připojen pomocí TWI sběrnice. Pro ISP programování (In System Programing) je na desce umístěn konektor pro připojení k programátoru ISP. Modul je napájen 3,6 V Lithiovou baterií o velikosti 1/2 AA. Pro jednotlivá připojení čidel jsou umístěny na desce také konektory pro případné připojení dalších TWI senzorů a pro dva digitální vstupy magnetických spínačů na vstupních pinech 25 a 26 portu E. Příchozí a odchozí komunikace je znázorňována pomocí dvou barevně odlišených LED diod připojených na výstupní piny 23 a 24 portu E. Napájení desky se zapíná vložením červeného jumperu, kde pro signalizaci správnosti napájení slouží červená LED dioda. Pro snížení odběru proudu jak je požadováno u koncového zařízení, se tato signalizace vypne vyjmutím černého jumperu. Pro resetování celého modulu slouží resetovací spínač, schéma, viz příloha B.



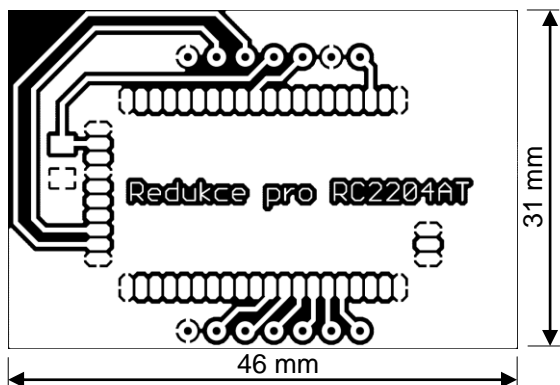
Obr.24. Fotografie navržené (testovací verze) desky pro senzory

4.2.2 Návrh desek plošných spojů pro senzory

Při návrhu desky plošných spojů, byla navržena testovací i finální verze této desky. V testovací verzi je připojení modulu RC2204AT řešeno pomocí redukce ve formě speciální desky jen pro modul, viz obr.26. Tato deska je připojena pomocí dvou jednořadých 7 pinových lišt s roztečí 2,54 mm.

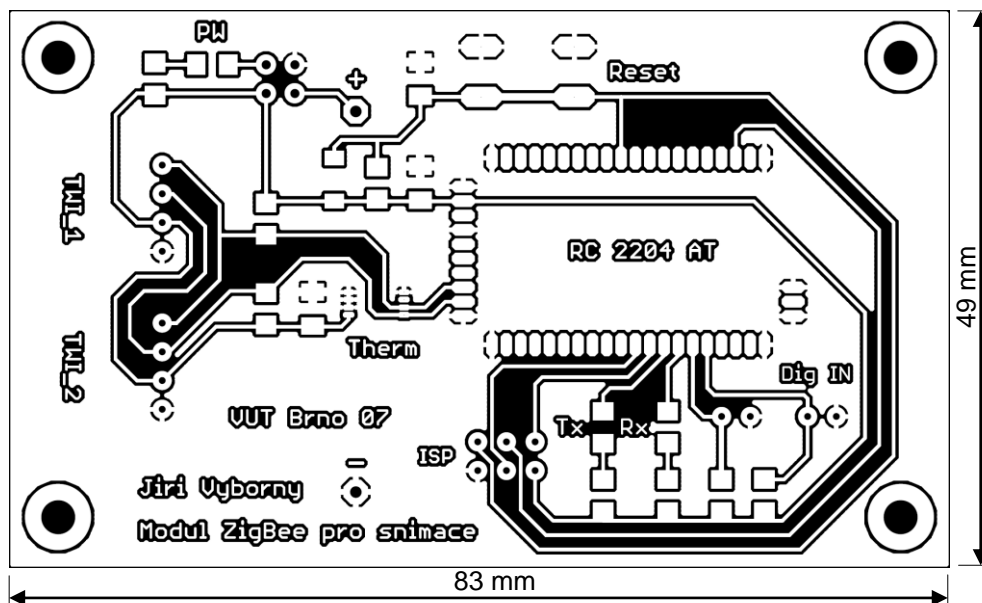


Obr.25. Testovací DPS pro senzory (1,5 : 1)



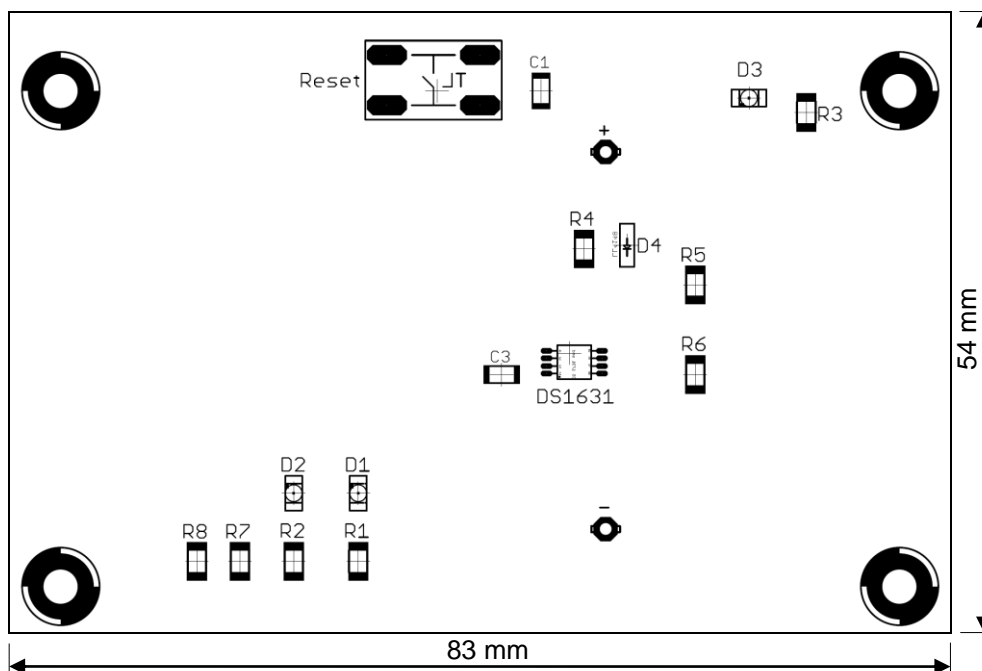
Testovací deska, viz obr.25, byla navržena s cílem možnosti modul kdykoli odpojit a přemístit na jinou desku pomocí redukce. Pro konečné řešení je navržena deska na obr.27. Před pájením modulu je vhodné mezi něj a desku plošných spojů vložit vhodný izolační materiál, například sídu. Realizace byla provedena pouze u testovací verze. Desky plošných spojů jsou navrženy v programu Eagle 4.13.

Obr.26. DPS redukce pro modul (1,5 : 1)

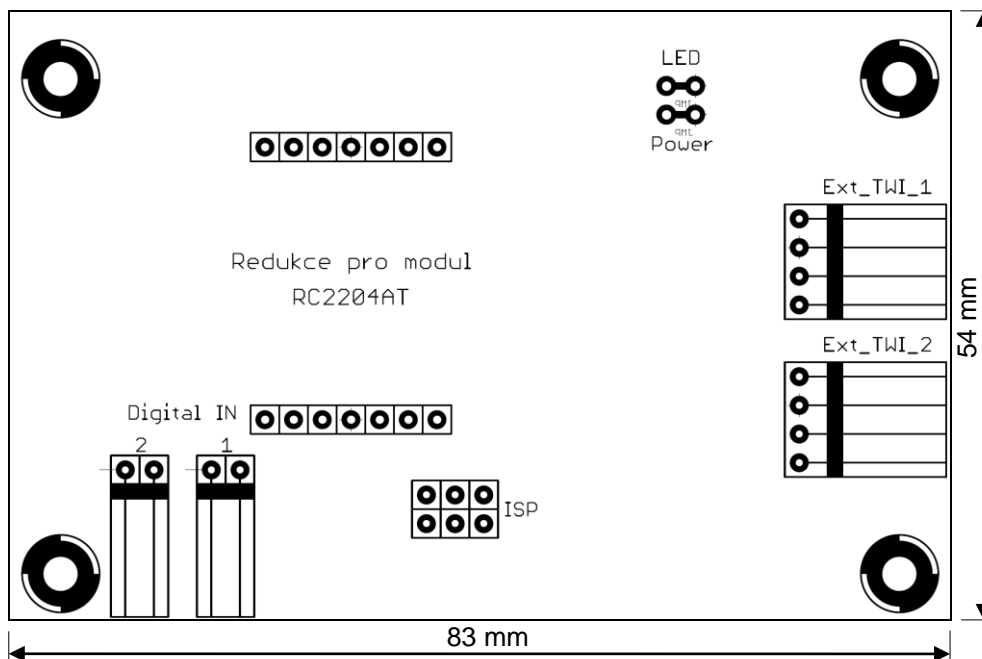


Obr.27. Finální DPS pro senzory (1,5 : 1)

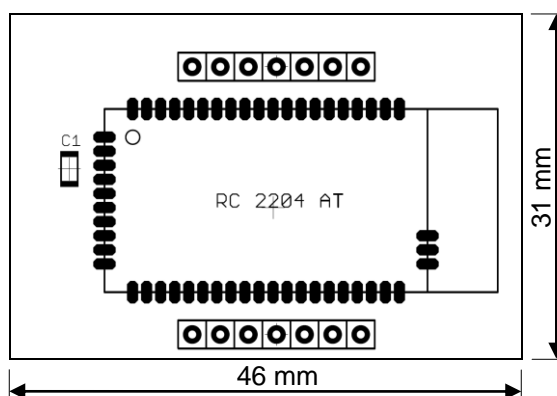
4.2.3 Konstrukční uspořádání desky pro senzory



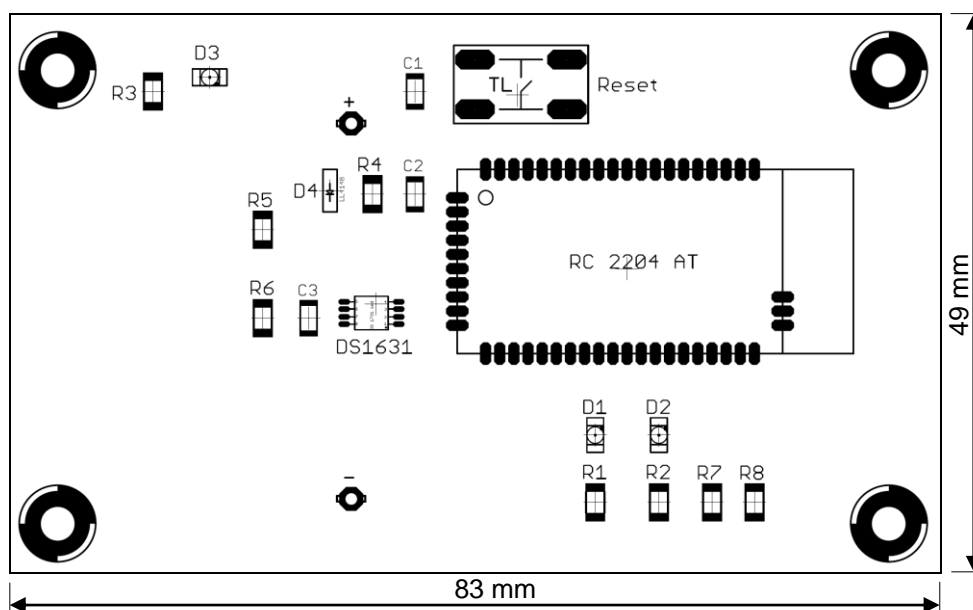
Obr.28. Konstrukční uspořádání ze strany PS testovací verze (1,5 : 1)



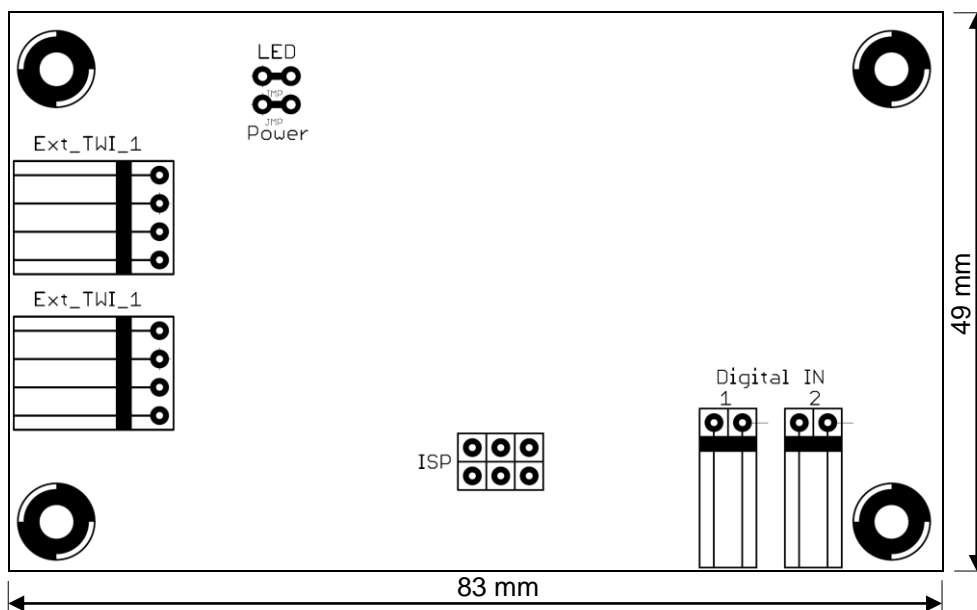
Obr.29. Konstrukční uspořádání ze strany součástek testovací verze (1,5 : 1)



Obr.30. Konstrukční uspořádání redukce (1,5 : 1)

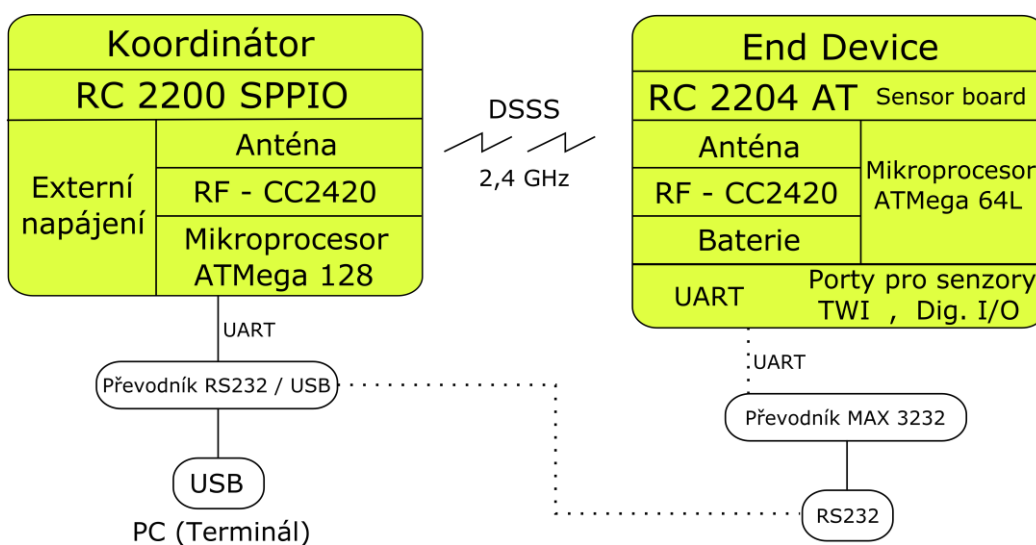


Obr.31. Konstrukční uspořádání ze strany PS finální verze (1,5 : 1)



Obr.32. Konstrukční uspořádání ze strany součástek finální verze (1,5 : 1)

4.2.4 Příklad použití RC2200AT-SPPIO kitu a modulu RC2204AT

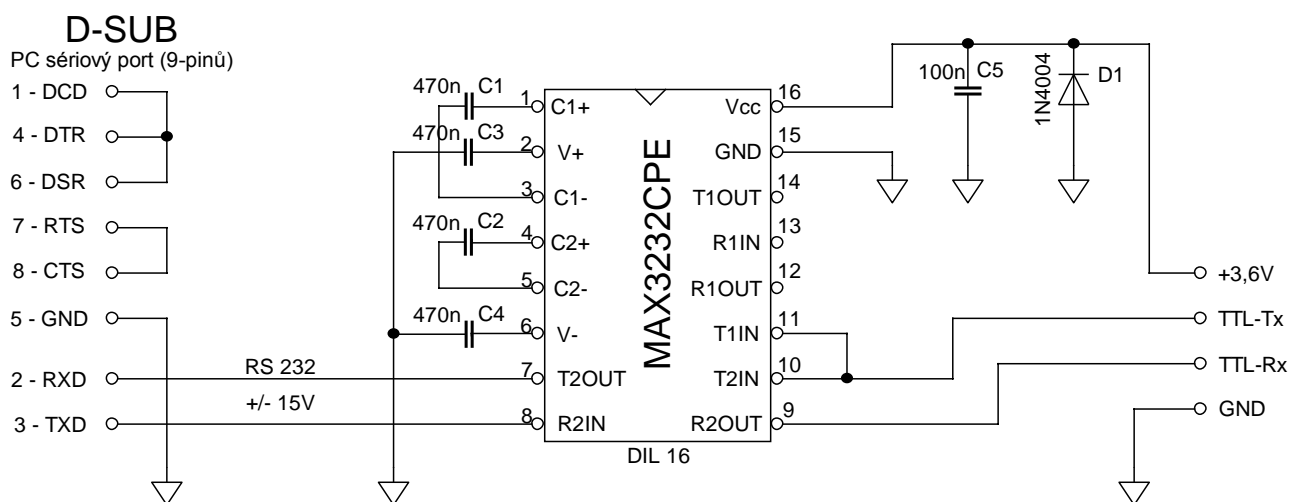


Obr.33. Příklad použití RC2200-SPPIO a RC2204AT

Na obr.33 je příklad praktického použití ZigBee koordinátoru RC2200AT-SPPIO a desky pro senzory jako koncové zařízení s modulem RC2204AT pro bezdrátovou komunikaci. Díky nízké spotřebě ZigBee transceiveru je možné celé koncové zařízení, složené z digitálního teplotního senzoru, mikroprocesoru ATmega64L a ZigBee vysílače/přijímače CC2420, napájet z baterie, což zvyšuje flexibilitu umístění senzoru a zvýšenou odolnost proti rušení. Takto konstruovaná jednotka může na jedno nabití akumulátoru pracovat i roky. To lze přirovnat k výdrži baterií v infra dálkovém ovladači televizoru, přičemž ZigBee umožňuje komunikovat na daleko větší vzdálenosti a bez přímé viditelnosti přijímače.

Strana koordinátoru se zabudovanou aplikací pro komunikaci s PC pomocí RS232 rozhraní je připojena k USB portu PC. Toto propojení je možné přes duplexní USB2.0/RS232 převodník od firmy DIGITUS (nebo jiné). Připojení je pak jednodušší, flexibilnější a pohodlnější než sériový port. Využívá se pak např. virtuální COM3. Pro případ testování programu bez možnosti ZigBee komunikace, jak je to v tomto případě, je pro koncové zařízení navržen převodník UART / RS232, viz. kap.4.2.5. Tento převodník umožňuje posílat a přijímat data mezi prostředím PC (Terminál) a koncovým zařízením (deska pro senzory).

4.2.5 Schéma zapojení převodníku MAX3232



Obr.34. Schéma zapojení převodníku z RS232 na TTL logiku a naopak

Převodník úrovní MAX3232CPE od firmy Maxim je jednoduchá možnost jak zajistit převod z úrovní RS232 (UART) $\pm 15V$ na logiku TTL $3 \div 5V$ a naopak. Jeho schéma zapojení je na obr.34. Pro jeho správnou funkci je potřeba pouze několik kondenzátorů 470nF ($C_1 \div C_4$), 100nF (C_5) a dioda 1N4004 (nebo podobná) proti přepólování. V neposlední řadě konektor DSUB9 pro připojení k sériovému portu PC. Piny DCD (Data Carrier Detect), DTR (Data Terminal Ready), DSR (Data Set Ready), RTS (Request to Send) a CTS (Clear to Send) u konektoru DSUB nejsou pro komunikaci využity. Pomocí tohoto převodníku by se mohla připojit deska pro senzory k PC.

4.3 Modul ZDM-A1281-A2

ZDM-A1281-A2 od firmy MeshNetics, viz obr.35, jsou vysoce výkonné ZigBee moduly s velmi malými rozměry (24 x 13,5 x 2,8 mm) určené pro frekvenční pásmo 2,4GHz. Jejich maximální výstupní výkon je jedním z nejvyšších ve své třídě. Firma MeshNetics disponuje nejen moduly, ale i softwarem, potřebným pro vývoj a testování aplikací v sítích ZigBee.

Pro aplikování již zmíněného ZigBee stacku je možné zdarma použít pouze jeho část, založenou na vrstvě MAC, která se nazývá Open MAC (Open Source Medium Access Control) a je zcela zdarma ke stažení od firmy MeshNetics. Toto omezení neumožňuje použít například zabezpečení sítě a rozsáhlejší topologii, než je hvězda, nebo point-to-point (bod s bodem).



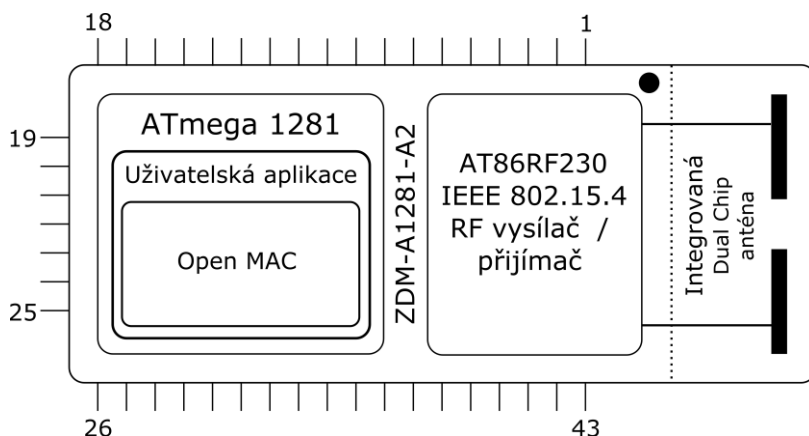
Open MAC obsahuje ve zdrojovém formátu C již předprogramovanou ukázkovou aplikaci Low-power a Range Measurement. Obě tyto aplikace slouží pro měření parametrů kvality sítě, například RSSI (Received Signal Strength Indication), což je jednotka určující kvalitu signálu pro bezdrátová zařízení. Pro naprogramování vlastní aplikace, tedy můžeme vycházet z těchto aplikací. [11]

Obr.35. Modul ZDM-A1281-A2

Hlavní součástí modulu je řídicí mikroprocesor ATmega 1281 a RF vysílač/přijímač AT86RF230 od firmy Atmel. Tyto dvě komponenty jsou propojeny sériovým rozhraním SPI. Pro připojení různých snímačů disponuje ATmega 1281 širokou škálou možností, jak tak učinit. Mezi hlavní periferie a vlastnosti patří :

- UART (rozhraní pro sériovou komunikaci – RS232)
- TWI (rozhraní pro sériovou komunikaci po dvou vodičích)
- SPI (komunikace mezi ATMegou 1281 a AT86RF230)
- 1-Wire (sériová komunikace po jednom vodiči)
- JTAG (rozhraní pro programování)
- 128 kB FLASH paměť, 8 kB RAM a 4 kB EEPROM
- GPIO (9 vstupních/výstupních digitálních pinů)
- 32,768 kHz přesné hodiny RTC (Real Time Clock)
- Napájení modulu 1,8 – 3,6 V
- Přenosová rychlost 250 kb/s
- Maximální výstupní výkon +3 dBm
- Citlivost přijímače -101 dBm
- Pracovní teplota od -40 až +85 °C
- Frekvence mikroprocesoru 4 MHz
- ADC (4 kanály převodníku analog/digital)

Vnitřní uspořádání modulu ZDM-A1281-A2 je naznačeno na obr.36. Pro komunikaci těchto dvou modulů navzájem a tím vytvoření sítě na základě standardu IEEE 802.15.4 musí být implementován (nahrán) do vnitřní paměti flash mikroprocesoru Open MAC software s uživatelskou aplikací, která se stará o správný



chod a řízení dat ze snímačů a jiných zařízení. Vysílání a přijímání dat pak zajišťuje AT86RF230 transceiver na úrovni fyzické PHY vrstvy, který je řízen a nastavován Open MAC softwarem. Povrch modulu tvoří kompaktní stínící kovový plášť. Pouzdro obsahuje celkem 43 pinů.

Obr.36. Vnitřní uspořádání modulu ZDM-A1281-A2

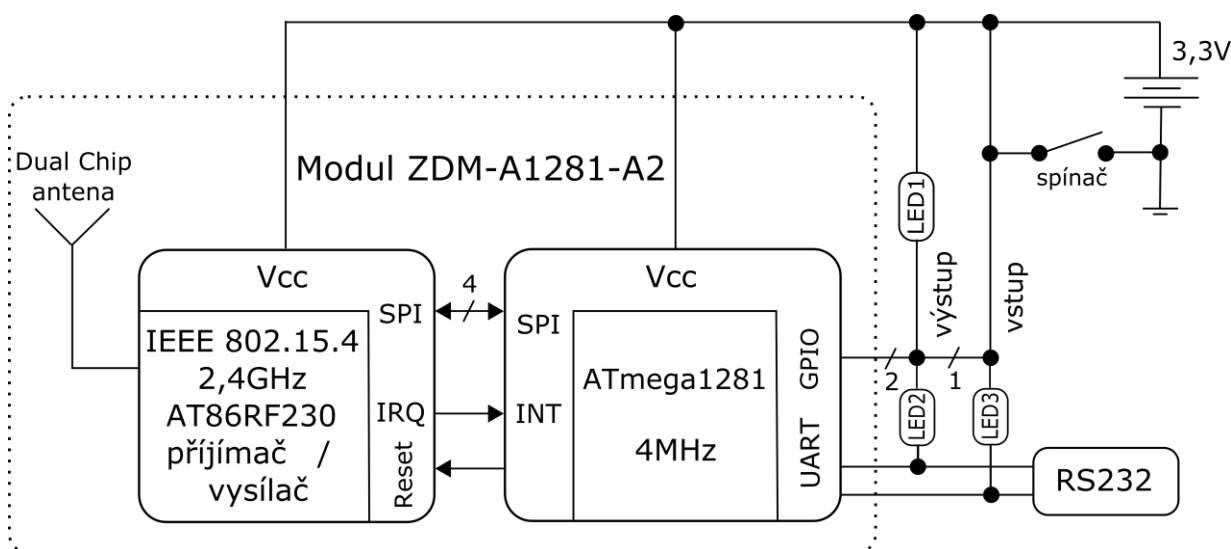
Popis jednotlivých pinů, viz obr.36, využitých při návrhu koordinátoru a koncového zařízení je v následující tabulce.

Tab.8. Popis jednotlivých pinů modulu ZDM-A1281-A2

Číslo pinu	Název pinu	Popis
8	Reset	Reset MCU
9	DGND	digitální zem
11	TWI_CLK	TWI hodiny (výstup)
12	TWI_DATA	TWI data I/O
13	UART_TXD	UART vstup
14	UART_RXD	UART výstup
17	GPIO6	digital I/O pin
18	GPIO7	digital I/O pin
19	GPIO3	digital I/O pin
20	GPIO4	digital I/O pin
21	GPIO5	digital I/O pin
22	DGND	digitální zem
23	DGND	digitální zem
24	D_VCC	napájení Vcc
25	D_VCC	napájení Vcc
26	JTAG_TMS	JTAG test mód
27	JTAG_TDI	JTAG test data IN
28	JTAG_TDO	JTAG test data OUT
29	JTAG_TCK	JTAG test hodin
35	A_GND	analogová zem

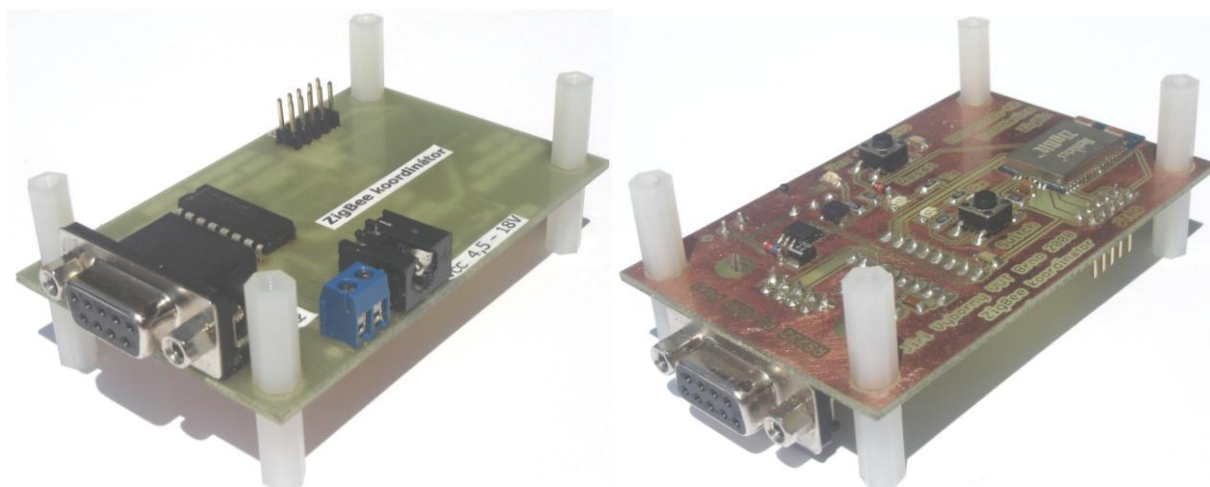
- Pro rozhraní UART jsou použity piny 13, 14.
- Pro rozhraní TWI piny 11, 12
- JTAG konektor je připojen na pinech 26, 27, 28, 29, 8
- GPIO pro digitální vstupy / výstupy

4.3.1 Návrh koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2



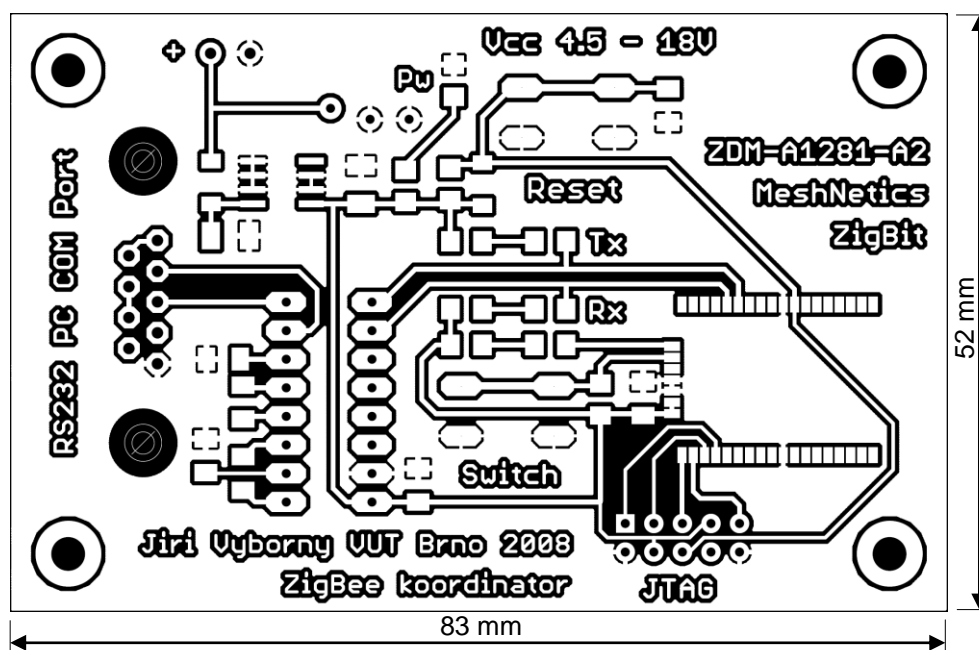
Obr.37. Blokové zapojení koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2

Návrh koordinátoru sítě s modulem ZDM-A1281-A2 vychází z blokového zapojení na obr.37. Deska je navržena tak, aby byl modul připojitelný k PC, a tak mohla probíhat komunikace po sériové lince. O převod mezi 3V logikou a RS232 se stará převodník úrovní MAX3232CPE, který využívá pouze linky TXD a RXD. Řízení toku dat je v tomto návrhu zcela vypuštěno. Na každé z těchto linek je připojena LED dioda, která indikuje směr dat (při úrovni L), tzn. musí být připojené na napájecí napětí a proudově omezeny. Na pinu GPIO4 je připojen spínač a GPIO3 LED dioda, pro uživatelské nastavení a indikaci čehokoliv. Programování modulu je zajištěno pomocí JTAG konektoru, standardně zapojeného pro připojení programátoru, např. AVR JTAGICEII. Napájecí obvod tvoří stabilizátor LE33CD s výstupním napětím 3,3V a jeho maximální vstupní napětí je 18V. Pro připojení se může také použít externí napájení pomocí svorek s diodou proti přepólování. Pro reset MCU je na desce umístěn resetovací spínač. Připojení desky k portu COM PC se může realizovat pomocí již zmíněného převodníku RS232/USB. Schéma zapojení koordinátoru, viz příloha C.



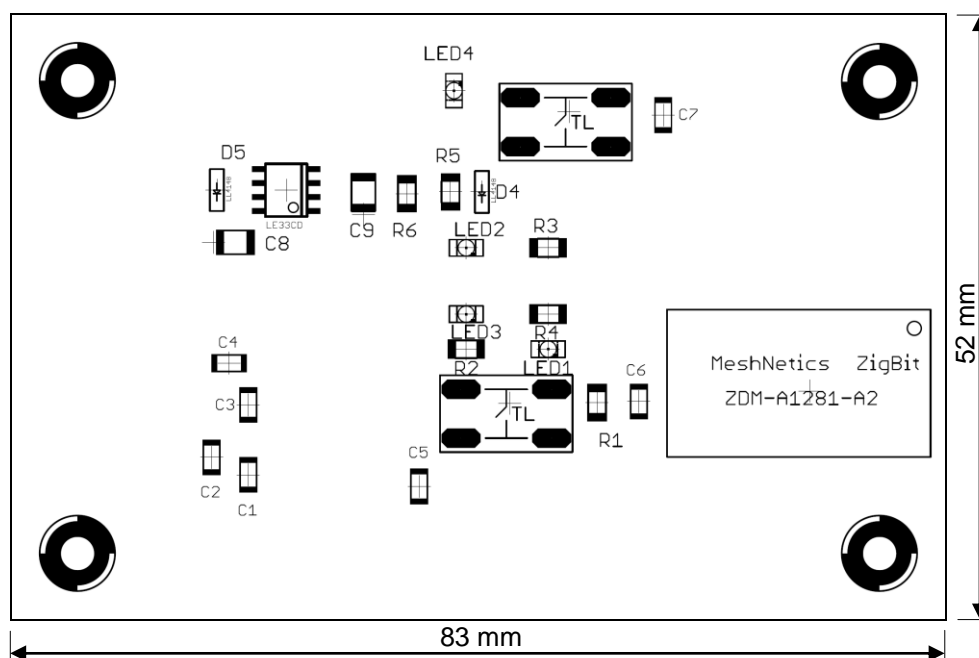
Obr.38. Fotky zkonstruovaného koordinátoru s modulem ZDM-A1281-A2

4.3.2 Návrh desek plošných spojů (koordinátor)

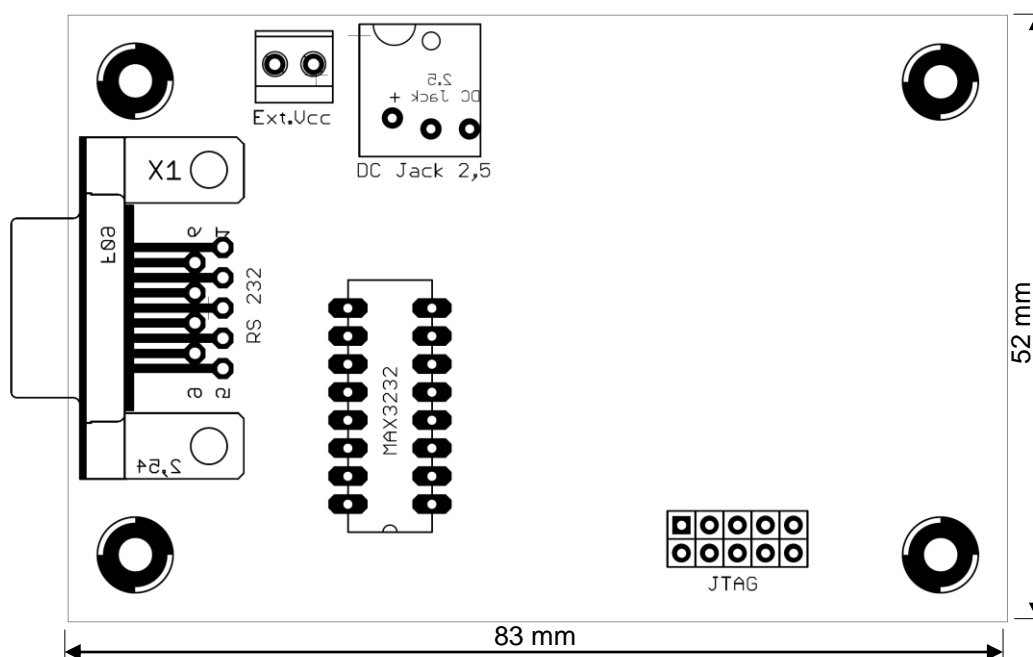


Obr.39. DPS s modulem ZDM-A1281-A2 (koordinátor) (1,5 : 1)

4.3.3 Konstrukční uspořádání desky (koordinátor)



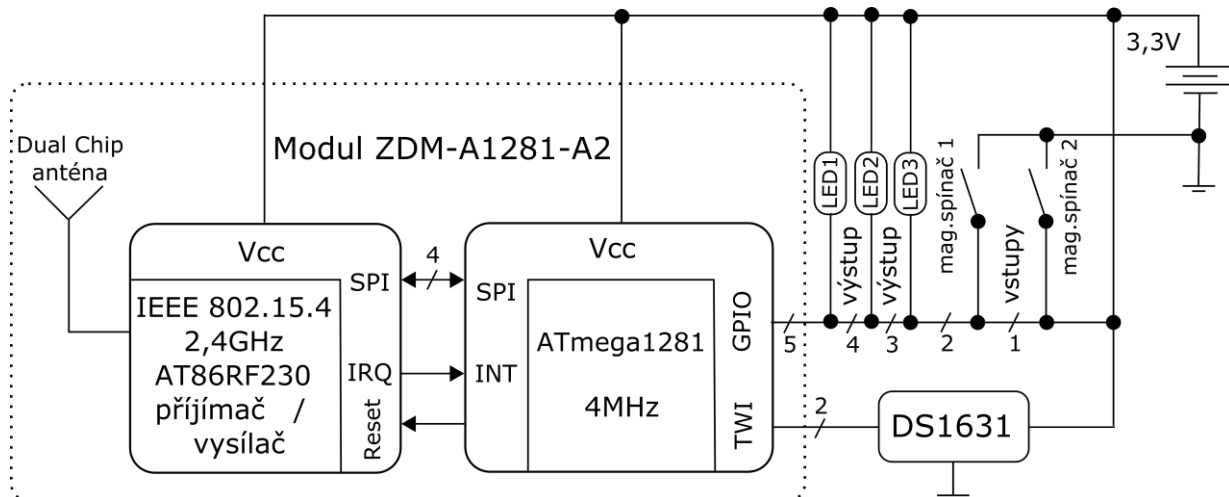
Obr.40. Konstrukční uspořádání ze strany PS (koordinátor) (1,5 : 1)



Obr.41. Konstrukční uspořádání ze strany součástek (koordinátor) (1,5 : 1)

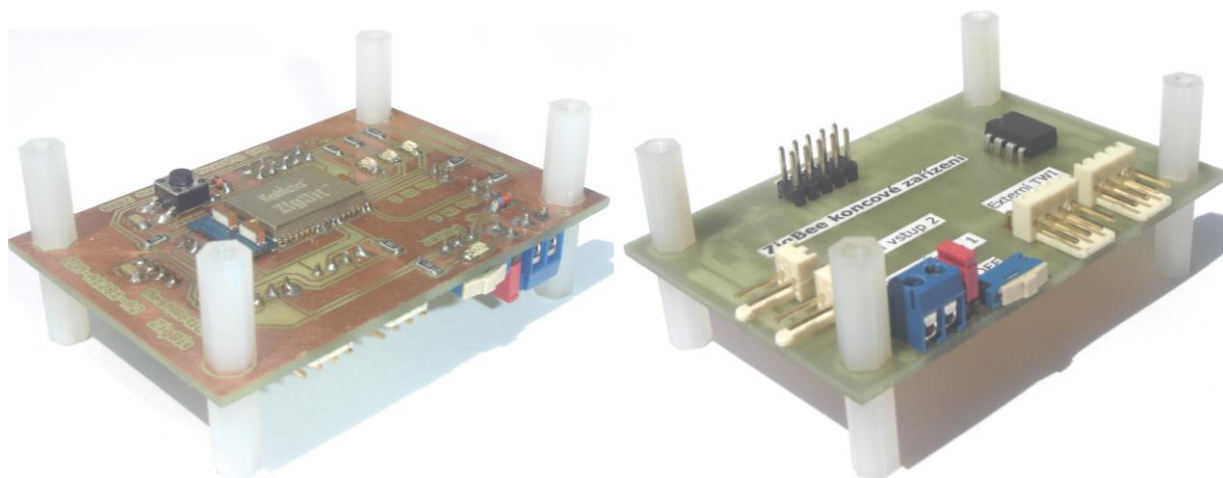
4.3.4 Návrh koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2

Koncové zařízení s modulem ZDM-A1281-A2 je navrženo pro napájení 3 V – 3,6 V baterií o velikosti ½ AA. Návrh podle blokového zapojení na obr.42, vychází také z předešlého návrhu desky pro snímače s modulem RC2204AT. Cílem návrhu je připojit k modulu digitální teploměr, který zde zastupuje čidlo požáru, dále senzory otevřených oken/dveří, které jsou realizovány pomocí magnetických spínačů od firmy FESTO. Na desce jsou proto umístěné dva digitální vstupy pro magnetický spínač 1 (GPIO7) a magnetický spínač 2 (GPIO6). Digitální teploměr DS1531 na sběrnici TWI představuje měření teploty s přesností ¼ °C. Pro připojení více (max. 7) TWI zařízení je sběrnice vyvedena dvěma konektory.



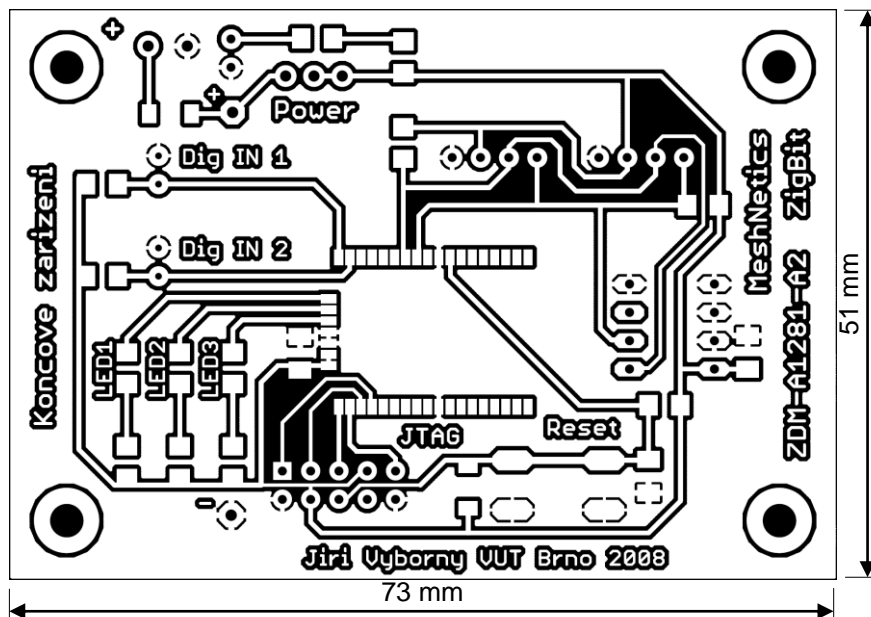
Obr.42. Blokové zapojení koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2

Červená LED dioda (D1) slouží pro ověření správnosti napájení. Pro snížení proudového odběru jí lze vypnout vyjmutím jumperu. Modrá LED dioda (D4) signalizuje odesílání dat z modulu koordinátoru. Žlutá a zelená LED dioda blikáním signalizuje otevřené okno, nebo dveře (Dig IN 1,2). Pro externí napájení je přidána svorka s diodou proti přepólování. Z požadavků pro velmi malý odběr proudu je zařízení vždy na krátký čas uspáváno. Pro reset MCU slouží resetovací spínač. Schéma zapojení koncového zařízení, viz příloha C. [11]



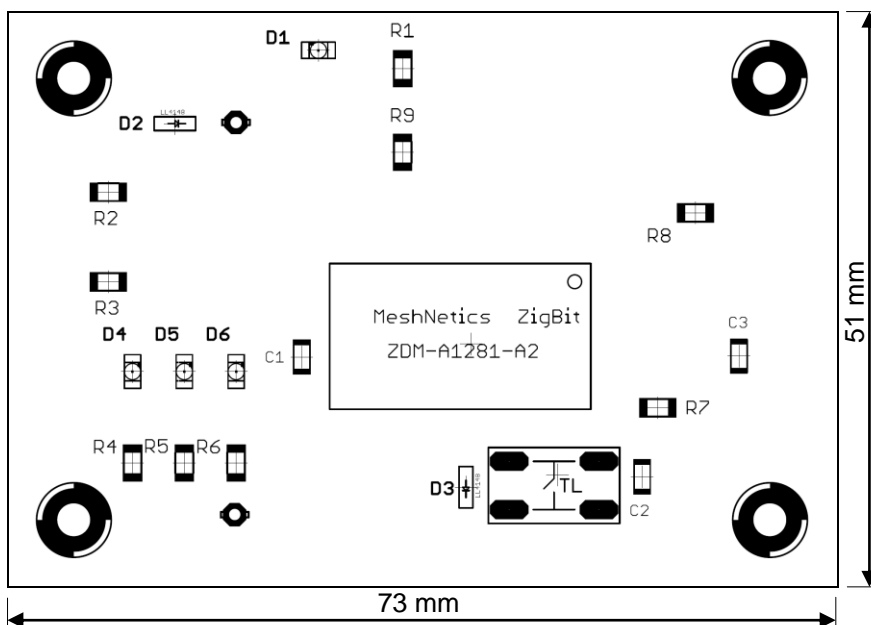
Obr.43. Fotky zkonstruovaného koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2

4.3.5 Návrh desky plošných spojů (koncové zařízení)

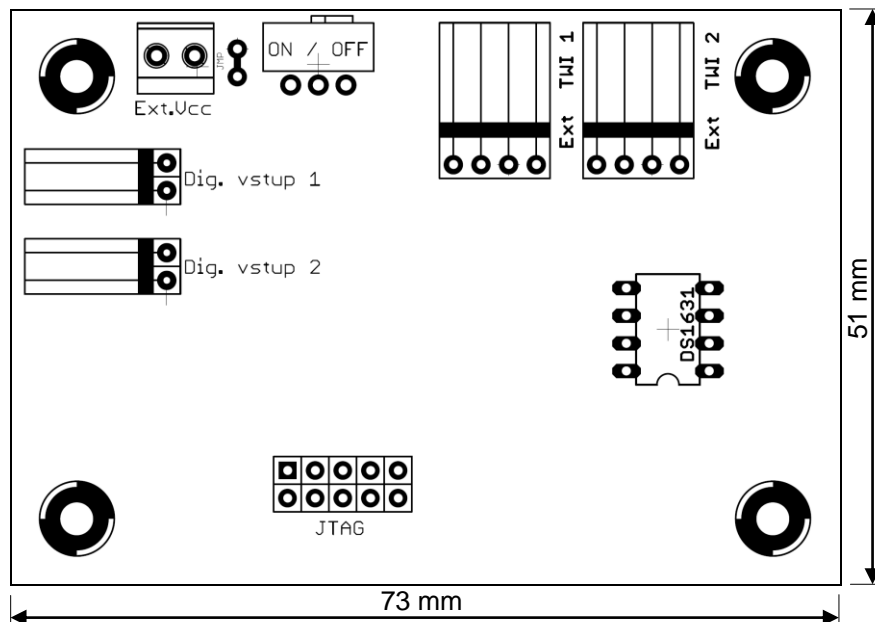


Obr.44. DPS s modulem ZDM (koncové zařízení) (1,5 : 1)

4.3.6 Konstrukční uspořádání DPS (koncové zařízení)

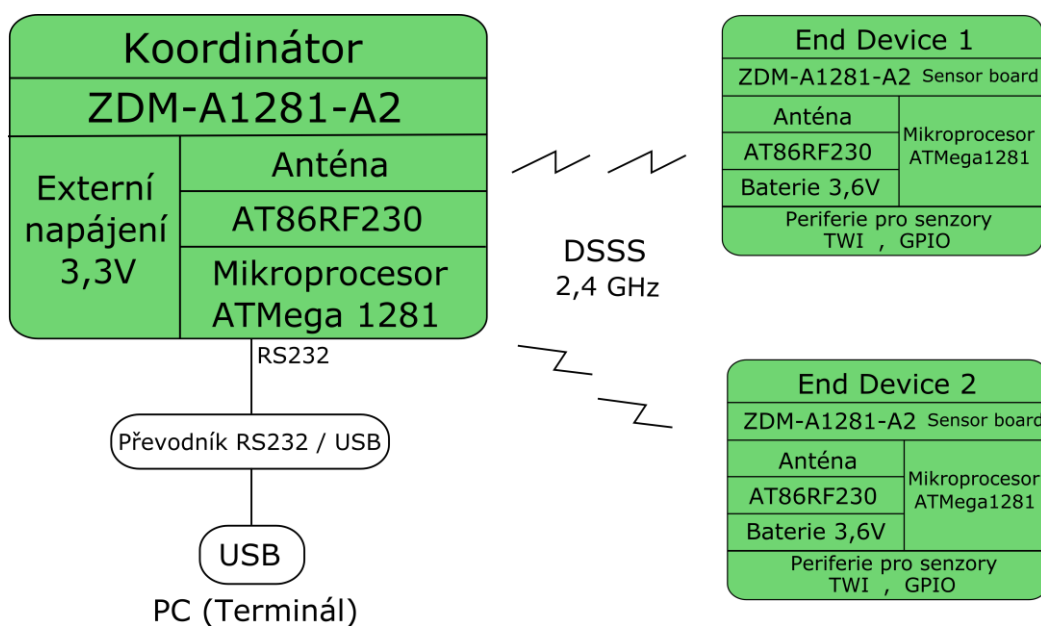


Obr.45. Konstrukční uspořádání ze strany DPS (koncové zařízení) (1,5 : 1)



Obr.46. Konstrukční uspořádání ze strany součástek (koncové zařízení) (1,5 : 1)

4.3.7 Příklad použití koordinátoru a koncového zařízení



Obr.47. Příklad použití koordinátoru a koncového zařízení s moduly ZDM

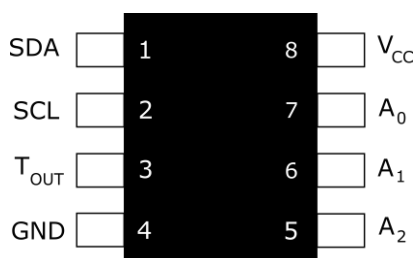
Pro návrh bezdrátového zabezpečovacího zařízení pro topologii hvězda bylo navrženo řešení s PAN koordinátorem a dvěma koncovými zařízeními (End Device) podle obr.47. Strana koordinátoru komunikuje s PC pomocí RS232 (libovolný COM port), nebo s USB. Pro testování aplikace, byl použit převodník RS232/USB.

5 Digitální teploměr DS1631

Programovatelný digitální, strukturálně jednoduchý a přitom velmi výkonný teploměr (termostat) DS 1631 od společnosti DALLAS Semiconductor patří k velice oblíbeným, dnes hodně používaným teploměrům. Umožňuje realizovat spínací funkce nebo zpracování digitalizovaného signálu odvozeného od teploty.

Regulace nebo měřiče teploty patří mezi základní obvodová řešení používaná v elektrotechnice. Využívá se různých základních teplotních fyzikálních vlastností látek s převodem na měřitelný signál – napětí, proud, kmitočet apod. DALLAS Semiconductor připravil rodinu programovatelných digitálních teploměrů s možností realizace regulačních funkcí. Digitální teploměr nevyžaduje pro správnou funkci žádné vnější součástky. Hodnota teploty je v dané toleranci absolutní bez nutnosti korekce. Funkce digitálního výstupu nebo funkce termostatu se nastavuje programově s využitím sériové komunikace jedním vodičem. Popis pinů, viz tab.9.

Základní vlastnosti :



- Teplotní rozsah od -55 °C do 125 °C s rozlišením 0.5°C - 0.0625°C.
- Zprostředkování teploty pomocí 9-12 bitů.
- Převod teploty během 750ms.
- Komunikace pomocí TWI sběrnice.
- Napájecí napětí 2,7V - 5,5V.
- Integrovaný termostat.

Obr.48. Rozložení pinů [10]

Při použití tohoto senzoru se získává přímo číslicový ekvivalent měřené teploty čímž mizí problémy s linearizací a kalibrací, případně převodem A/D, což je v případě číslicového systému výhodné. Sensory jsou kalibrovány již při výrobě. Funkce je založena na měření počtu cyklů teplotně závislého oscilátoru po dobu odvozenou z oscilátoru teplotně stabilního.

Tab.9. Význam jednotlivých vývodů (pinů) DS1631

SDA	datový vodič	
SCL	připojení hodinového signálu	
T_{out}	výstup termostatu	
GND	zem	
A2	adresování IO	
A1	adresování IO	
A0	adresování IO	
VDD	napájení IO	

Teplota je čidlem reprezentována pomocí devíti až dvanácti bitů obsažených ve dvou bytech které jsou posílány po TWI sběrnici. Příklady vysílaných bajtů jsou uvedeny v tab.10. Samotná komunikace s obvodem probíhá dle standardních regulí platných pro komunikaci na sběrnici TWI. Koncové zařízení zde představuje zařízení master, zatímco senzor je slave. [10]

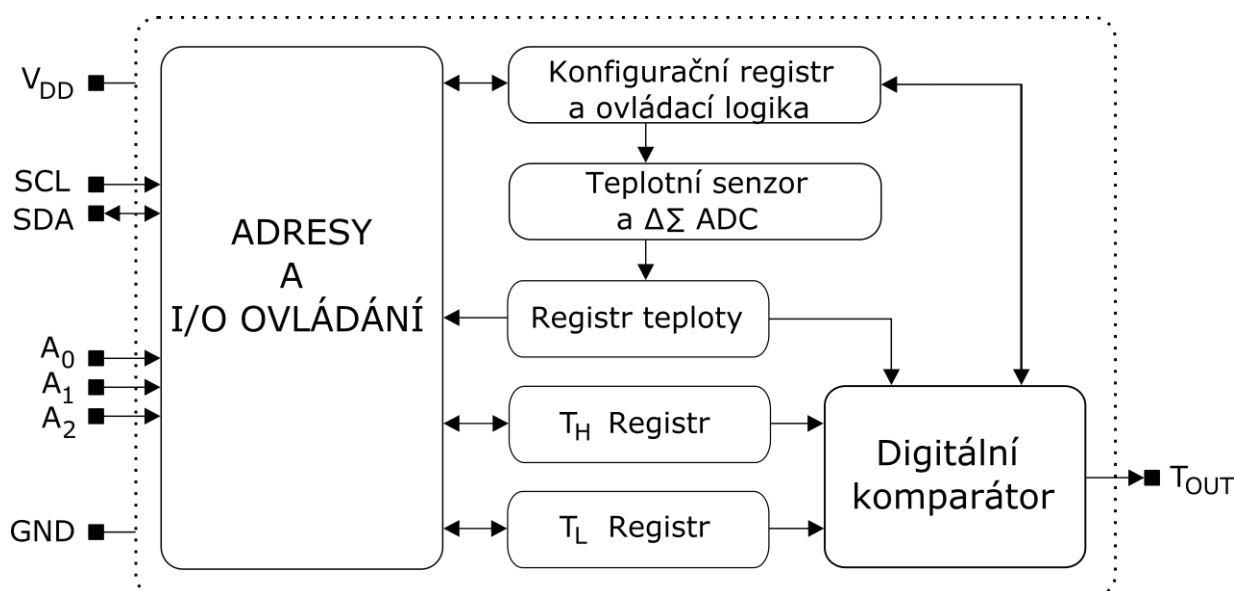
Tab.10. Příklady různých teplot na výstupu DS1631 v binárním a hexa tvaru

TEPLOTA (°C)	DIGITÁLNÍ VÝSTUP (BINARY)	DIGITÁLNÍ VÝSTUP (HEX)
+125	0111 1101 0000 0000	7D00h
+25.0625	0001 1001 0001 0000	1910h
+10.125	0000 1010 0010 0000	0A20h
+0.5	0000 0000 1000 0000	0080h
0	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5	1111 1111 1000 0000	FF80h
-10.125	1111 0101 1110 0000	F5E0h
-25.0625	1110 0110 1111 0000	E6F0h
-55	1100 1001 0000 0000	C900h

5.1 Funkční diagram DS1631

Funkční blokový diagram se skládá z několika částí :

- Konfigurační registr a ovládací logika.
- Teplotní senzor a $\Delta\Sigma$ převodník.
- Registr teploty.
- T_H Registr.
- T_L Registr.
- Digitální komparátor.
- Vstupní/výstupní ovládání.



Obr.49. Funkční blokový diagram DS1631 [10]

Důležitou součástí teploměru je konfigurační registr, viz obr.50, jehož přítomností můžeme nastavit rozlišovací schopnost převodu teploty a režim převodu (kontinuální nebo režim jednoho převodu s následným „standby“ režimem) Popis jednotlivých bitů, viz tab.11. Ostatní bity registru jsou pro termostat, který není v této práci využit.

MSb	6	5	4	3	2	1	0
DONE	THF	TLF	NVB	R1	R2	POL	1SHOT

Obr.50. Konfigurační registr

Tab.11. Popis funkce jednotlivých bitů konfiguračního registru [10]

NÁZEV BITU (UŽIVATELSKÝ PŘÍSTUP)	POPIS FUNKCE
DONE – Převod teploty (Jen pro čtení)	Po spuštění = 1. DONE = 0. Převod teploty právě probíhá. DONE = 1. Převod teploty je kompletní.
R1 – Bit 1. pro rozlišení (Čtení/Zápis)	Po spuštění = 1. Nastavení rozlišení.
R0 – Bit 2. pro rozlišení. (Čtení/Zápis)	Po spuštění = 1. Nastavení rozlišení.
1SHOT – Mód převodu. (Čtení/Zápis)	Po spuštění = Poslední zapsaná hodnota do tohoto bitu. 1SHOT = 1. Jednorázový převod teploty a Standby mode. 1SHOT = 0. Mód neustálého převodu teploty.

Doby převodů teplot se liší nastavením rozlišovací schopnosti teploměru. Lze nastavit rozlišení 9 bitů až 12 bitů, kde se doby převodů zvyšují s rostoucí rozlišovací schopností, viz tab.12.

Tab.12. Závislost doby převodu na rozlišení [10]

R ₁	R ₀	Rozlišení (bit)	Doba převodu (max)
0	0	9	93,75 ms
0	1	10	187,5 ms
1	0	11	375 ms
1	1	12	750 ms

5.2 Nastavení teploměru řídicím softwarem

a) Prvním krokem je nastavení konfiguračního registru, viz obr.56a. Po vyslání „Start“ podmínky je vyslán „Control“ byte, který určí se kterým zařízením se bude komunikovat (zařízení s adresou 000) a jelikož budeme do registru zapisovat, zvolíme směr „Write“ (bit 0 = 0). Poslední čtyři bity jsou dané typem zařízení, viz obr.51. Jeho hodnota pro zápis do registru je 90h.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
(0x90)	1	0	0	1	0	0	0	0

Obr.51. Control byte s adresou zařízení (zápis dat)

Po potvrzení o přijetí teploměrem následuje „Command“ byte, který říká teploměru, že se bude zapisovat a tím nastavovat konfigurační registr, viz obr.52. Jeho hodnota pro zápis do registru je ACh. [10]

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
(0xAC)	1	0	1	0	1	1	0	0

Obr.52. Command byte (zápis do konfiguračního registru)

Po opětovném potvrzení o přijetí se může poslat nastavení konfiguračního registru, viz obr.53, kde je povolen jednorázový převod teploty „1-SHOT MODE“ a rozlišovací schopnost nastavena na 10bitů (0.25°C). Hodnota pro nastavení je 5h. [10]

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
(0x05)	0	0	0	0	0	1	0	1

Obr.53. Data byte s nastavením konfiguračního registru

Po potvrzení o přijetí následuje „Stop“ podmínka.

b) Jako druhý krok je vyslání příkazu „Start převodu“ teploty, viz obr.56b. Posloupnost příkazů je stejná jako v předchozím bodě až na to že se vysílá pouze „Control“ byte a „Command“ byte, který teď představuje příkaz „Start převodu“ a má hodnotu 51h, viz obr.54. Nyní teploměr provedl převod teploty a uložil výsledek v binární podobě do dvou teplotních registrů (2B). [10]

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
(0x51)	0	1	0	1	0	0	0	1

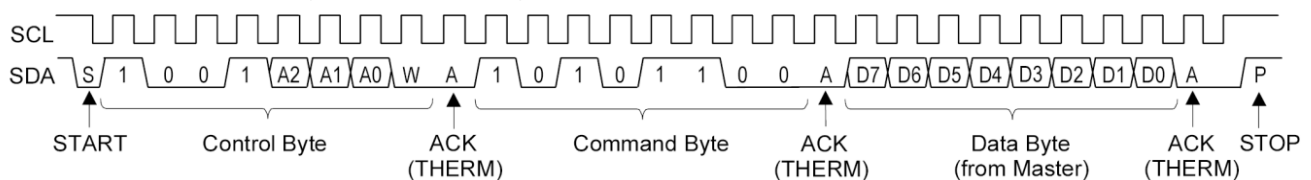
Obr.54. Command byte (Start převodu)

c) Posledním krokem je přečíst teplotu z teplotního registru, viz obr.57. Opět začínáme „Start“ podmínkou a přenesením „Control“ bytu jako v předchozích případech s následným potvrzením od teploměru. Přenesením „Command“ bytu s příkazem „Čti teplotu“, viz obr.55, a znovu potvrzením od teploměru. Dále musí nastat opakovaná „Start“ podmínka, přenesení stejného „Control“ bytu, ale se záměrem číst „Read“ (bit 0 = 1) s hodnotou 91h a znovu potvrzení o přijetí. V této chvíli jsou data přenesena z teplotního snímače do mikrokontroleru. „Command“ byte má hodnotu AAh. [10]

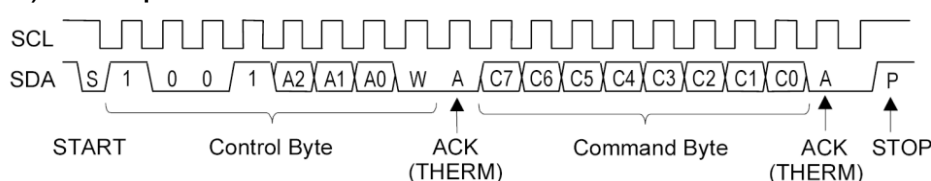
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
(0xAA)	1	0	1	0	1	0	1	0

Obr.55. Command byte (Čti teplotu)

a) Nastavení konfiguračního registru

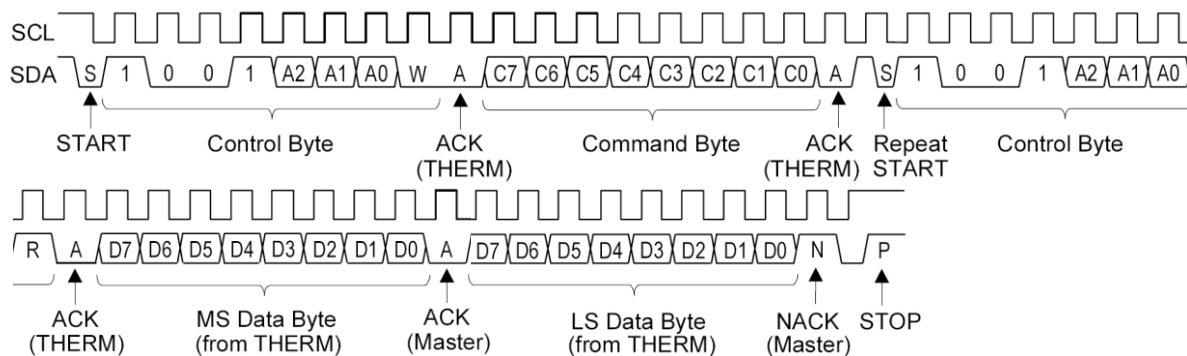


b) Start převodu



Obr.56. Časové průběhy komunikace teploměru DS1631 a koncového zařízení po TWI [10]

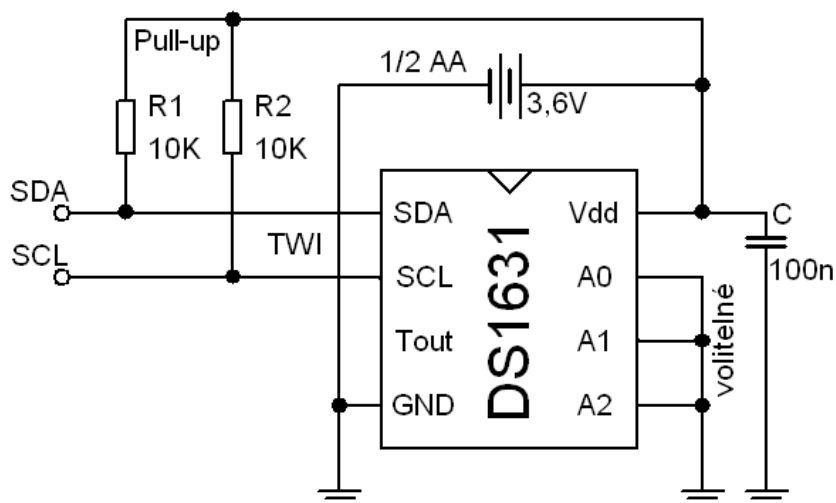
c) Čtení z registru teploty teploměru



Obr.57. Časový průběh komunikace teploměru DS1631 a koncového zařízení po TWI [10]

5.3 Schéma zapojení digitálního teploměru DS1631

Obvodové zapojení senzoru, viz obr.58, je díky použití integrovaného teploměru DS1631 velmi jednoduché. Veškerou komunikaci s teplotními čidly obstarává program a proto nejsou třeba téměř žádné pomocné obvody. Rezistory R_1 a R_2 tvoří „pull-up“.

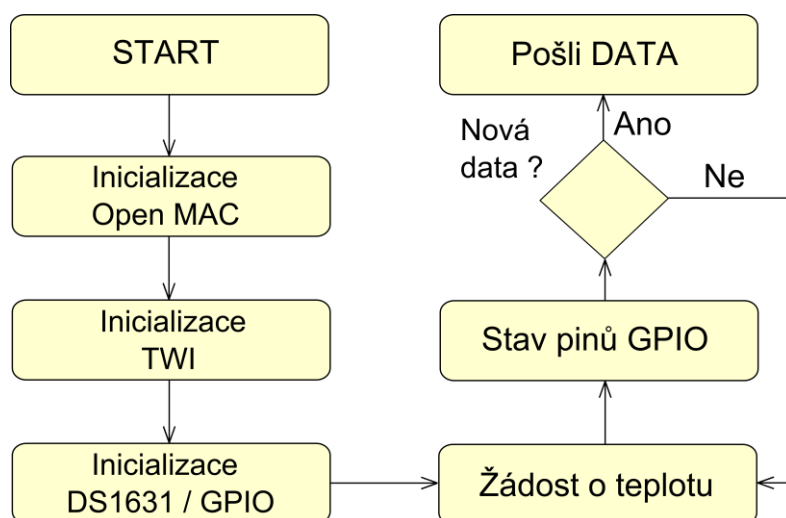


Obr.58. Schéma zapojení snímače s DS1631

6 Software

Pro vývoj a použití uživatelské aplikace na komunikaci modulu se snímači byl použit částečný ZigBee stack Open MAC, dodávaný firmou MeshNetics. Open MAC obsahuje tři předprogramované aplikace pro měření parametrů bezdrátové sítě ZigBee. Uživatelská aplikace je založena na modifikaci aplikace RangeMeasurementTool a přidaného programu pro komunikaci se snímači, viz kap.6.1. Řídící software byl naprogramován v AVR Studiu, nahrán do modulu koordinátoru a testován programem Terminál na PC, viz obr.60.

6.1 Vývojový diagram řídicího softwaru



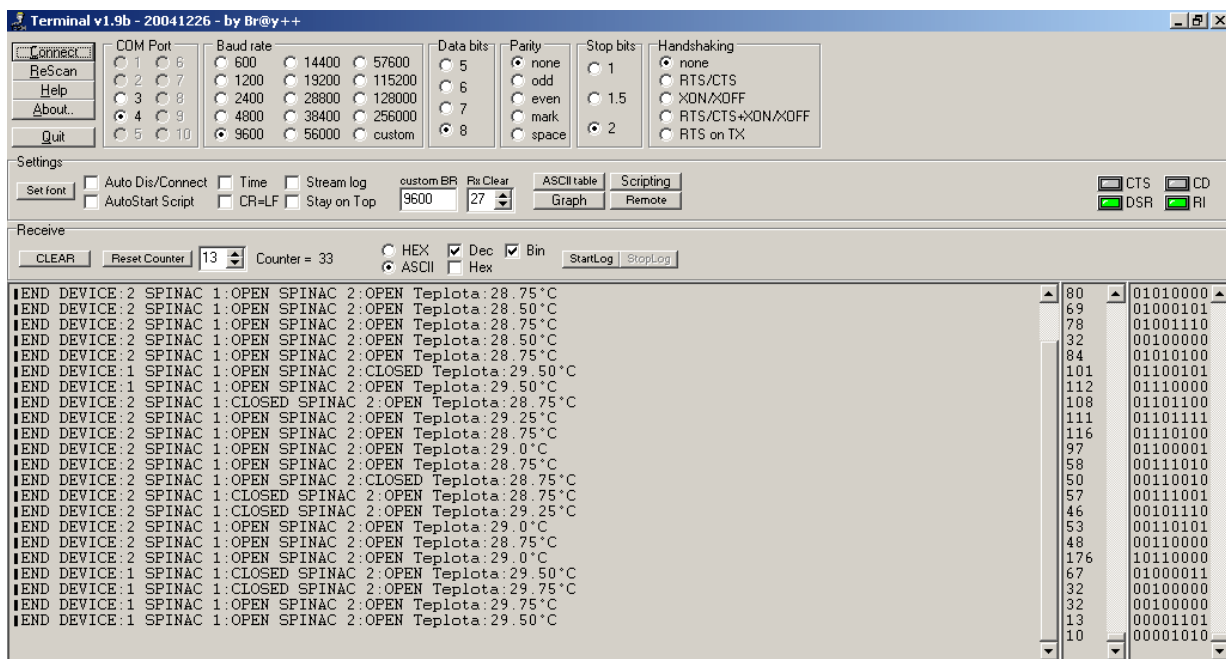
Obr.59. Vývojový diagram řídicího softwaru

Vývojový diagram, viz obr.59, popisuje základní činnosti Open MAC stacku s uživatelskou aplikací pro koncové zařízení. Princip funkce je založen na následujících procesech :

- START koncového zařízení a programu
- Inicializace Open MAC stacku
- Inicializace sběrnice TWI
- Inicializace digitálního teploměru DS1631 a GPIO
- Žádost o teplotu digitálního teploměru DS1631
- Zjistí stavy pinů GPIO6 a GPIO7
- Testování, zda se data z teploměru, nebo stavy pinů změnil.
- Pošle data koordinátoru

Inicializace Open MAC stacku spočívá ve spuštění MAC vrstvy pomocí „MAC_start()“, viz software na CD. Inicializace TWI a teploměru DS1631 se provádí ve funkci „appEntry__main()“. Pro teploměr je to nastavení, viz obr.56a. Samotný program je zpracováván funkcí „DataPrepare()“, která je v pravidelných časových intervalech spouštěna pomocí funkce „sensTestAuxiliary_sendFrameDone()“. Posílání dat je závislé na změně předchozích poslaných dat. Pokud se data nezmění koncové zařízení otestuje znovu stavy pinů a teplotu přijatou od teploměru. Pokud se nově přijatá data od snímačů liší od předchozích, jsou automaticky vysílány koordinátoru ,viz obr.59. Popsaný stack Open MAC s aplikací je popsán na přiloženém CD ve

zdrojovém kódu. Přijímaná data koordinátorem se zobrazují v programu Terminál na PC, viz obr.60.



Obr.60. Průběh přijatých hodnot koordinátorem zobrazený v terminálu na PC

7 Závěr

Při řešení diplomové práce jsem se seznámil se standardem pro bezdrátové sítě ZigBee IEEE 802.15.4, návrhem a realizací jednotlivých zařízení potřebných k vytvoření topologie systému pro bezdrátové zabezpečovací zařízení rodinného domu. Jsou popsány dva návrhy realizace. První z nich je vytvoření sítě pomocí kombinace samostatného modulu a vývojového kitu od firmy Radiocrafts, který se nepodařilo realizovat z důvodu neexistence ZigBee stacku určeného pro samostatný modul. Tato okolnost byla zjištěna až po kompletním návrhu a konstrukci zařízení. Pro druhý návrh jsou použity moduly od firmy MeshNetics, ke kterým je dodáván částečný ZigBee stack Open MAC, založený na vrstvě MAC a vrstvě PHY. Pro vytvoření sítě byl navržen koordinátor, který síť řídí a koncové zařízení pro připojení ke snímačům. Cílem této práce bylo navrhnout systém reagující na příliš vysokou teplotu, otevření/zavření dveří a oken. Pro dosažení těchto požadavků byla v programu AVR Studio vyvinuta vlastní řídicí aplikace pro komunikaci mezi modulem a snímači, která se stala součástí Open MAC stacku použitého v modulech. Jako vhodný typ snímače teploty byl vybrán digitální teploměr DS1631 od firmy Maxim a pro indikaci otevřených/zavřených dveří a oken jazýčkové magnetické spínače od firmy FESTO. Výsledkem této práce je bezdrátová síť s topologií typu hvězda, kterou tvoří zkonstruovaný koordinátor a dvě koncová zařízení. Z důvodu nerealizovatelnosti prvního návrhu a velmi zpožděného dodání modulů od firmy MeshNetics, nebylo možné navrhnout řídicí aplikaci pro PC. Proto byla komunikace koordinátoru s koncovými zařízeními testována pouze v programu Terminál na PC.

Literatura

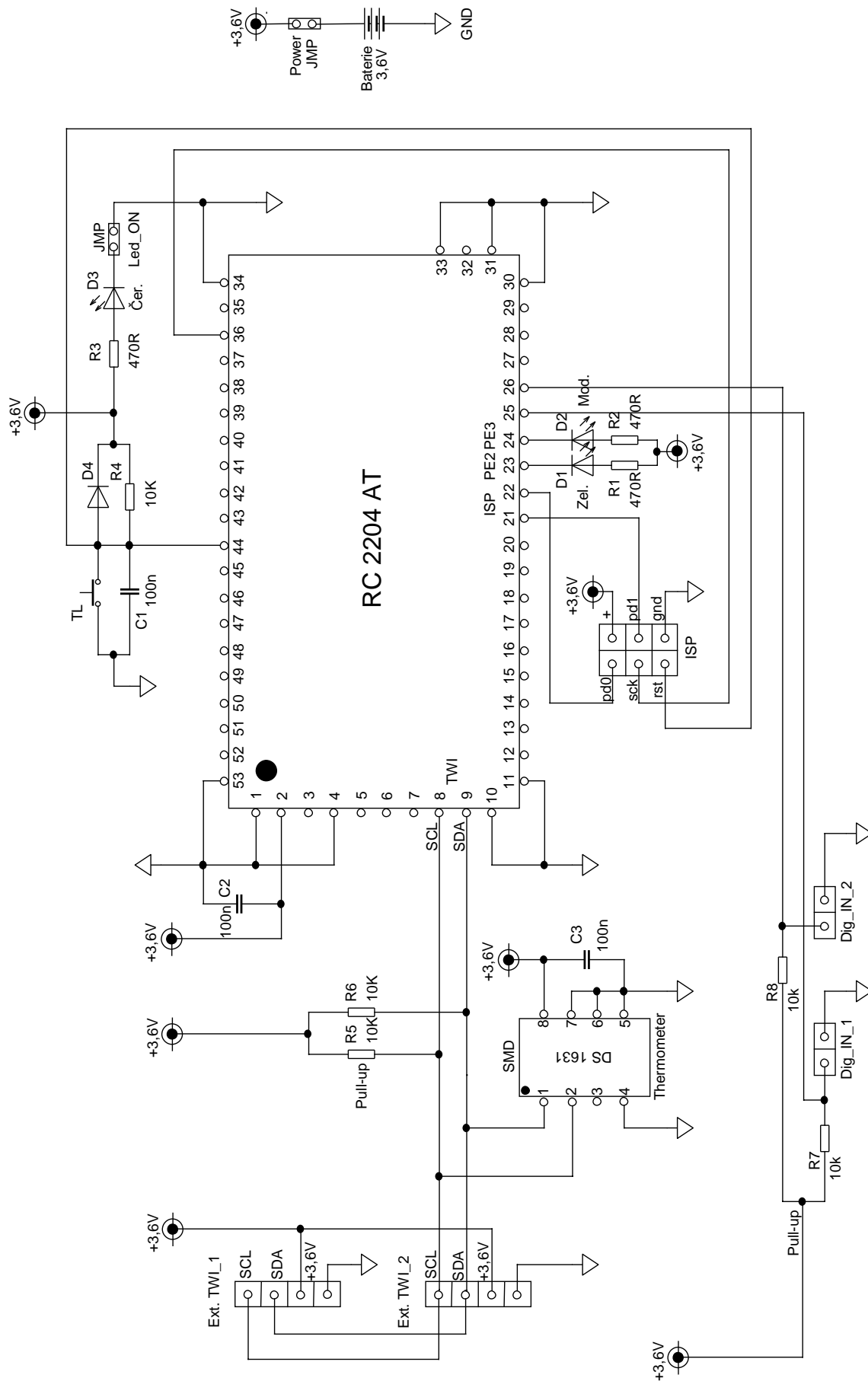
- [1] IEEE Standards: 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), IEEE New York 2003
- [2] Váňa,V.Mikrokontroléry ATMEL AVR Programování v jazyce C. BEN Technická literatura, Praha 2003
- [3] Matoušek,D.Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR.BEN Technická literatura, Praha 2006
- [4] Webový server <http://www.zigbee.org/>.
- [5] Webový server <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [6] Webový server <http://www.hw.cz>.
- [7] Webový server <http://www.automatizace.cz/>.
- [8] Webový server <http://www.marigold.cz/>.
- [9] Webový server <http://www.atmel.com/>.
- [10] Webový server <http://www.maxim-ic.com/>.
- [11] Webový server <http://www.meshnetics.com>.
- [12] Webový server <http://www.radiocrafts.com>.

Příloha A

Tab.13. Přehled nabízeného sortimentu teploměrů společností DALLAS

Typ	Rozlišení	Komunikace	Pouzdro	Poznámka
DS1620	9 – bit	S-3vodiče	8pin DIP	Užití pro teplotní aplikace, průmyslové systémy, zákaznické obvody, teplotní měřiče, teplotní snímací systémy
DS1621	9 – bit	S-2vodiče	8pin DIP	Užití pro teplotní aplikace, průmyslové systémy, zákaznické obvody, teplotní měřiče, teplotní snímací systémy
DS1624	13 – bit	S-2vodiče	8pin DIP	Užití pro teplotní testovací přístroje s 256 byte EEPROM pro záznam informací
DS1626	9 až 12 bit	S-3vodiče	μSOT	Užití pro teplotní aplikace s volitelným rozlišením
DS1629	9 – bit	S-2vodiče	8pin SOIC	Užití pro teplotní aplikace počítačů, telefony, kancelářské přístroje, teplotní snímací systémy
DS1631	9 až 12 bit	S-2vodiče	8pin DIP	Užití pro teplotní aplikace, teplotní měřiče, teplotní snímací systémy, termostat
DS1721	9 až 12 bit	S-2vodiče	8pin SOIC	Užití pro teplotní aplikace počítačů, telefony, kancelářské přístroje, teplotní snímací systémy
DS1722	8 až 12 bit	S-3vodiče	8pin SOIC	Užití pro teplotní aplikace s volitelným rozlišením
DS1726	9 až 12 bit	S-3vodiče	μSOT	Užití pro teplotní aplikace s volitelným rozlišením
DS1731	9 až 12 bit	S-2vodiče	μSOT	Užití pro teplotní aplikace s volitelným rozlišením
DS1775	9 až 12 bit	S-2 vodiče	SOT23-5	Teplotní watchdog
DS1821	8 – bit	S-1 vodič	PR35	Užití pro teplotní aplikace, průmyslové systémy, zákaznické obvody, teplotní měřiče, teplotní snímací systémy
DS1821S	8 – bit	S-1 vodič	8pin SOIC	Užití pro teplotní aplikace, průmyslové systémy, zákaznické obvody, teplotní měřiče, teplotní snímací systémy

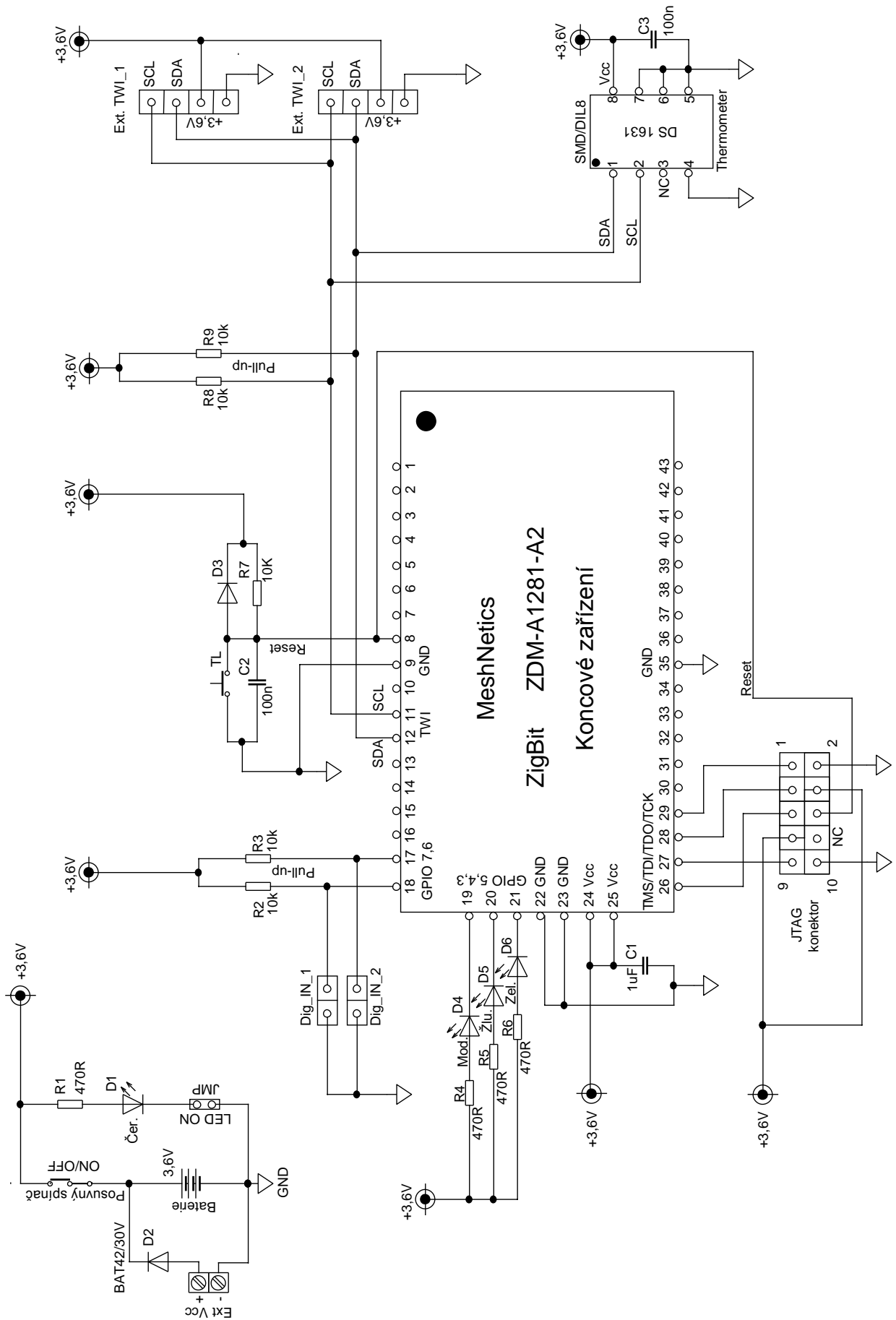
Příloha B



Obr.61. Schéma zapojení desky pro senzory

Tab.14. Rozpis součástek použitých při realizaci desky pro senzory

Součástka	Počet	Hodnota	Pouzdro/Typ	Kat.číslo v GME
R _{1,2,3}	3	470 Ω	R1206	900179
R _{4,5,6,7,8}	5	10k Ω	R1206	900260
C _{1,2,3}	3	100 nF	1206 SMD/keramický, 50V	905081
TL	1		SMD/P-B1720A, 5x5 mm	630124
D ₁	1		1206/Green 35mcd/130°	960045
D ₂	1		1206/Blue 45mcd/130°	960036
D ₃	1		1206/Red 45mcd/130°	960044
D ₄	1		Mini-Melf/univerzální, 75V	917001
Ext TWI _{1,2}	2	PSH02-04W	konektor 4piny/samec	800098
Ext TWI _{1,2}	2	PFH02-04P	konektor 4piny/samice	800086
Dig. IN _{1,2}	2	PSH02-02W	konektor 2piny/samec	800094
Dig. IN _{1,2}	2	PSH02-04W	konektor 2piny/samice	800084
JMP _{1,2}	2	S1G20	lišta/samec, 2,54mm, 1x2piny	832017
ISP	1	S2G20	lišta/samec, 2,54mm, 2x3piny	832023
Jumper	1	černý	Led ON/OFF	832013
Jumper	1	červený	Power ON/OFF	-----
2x7 pinů	2	S1G20	lišta/samec, 2,54mm, 1x7pinů	832017
2x7 pinů	2	SIL15PZ	lišta/samice, 2,54mm, 1x7pinů	824020
DS1631	1		SOIC/Maxim	-----
Dist.sloupky	4	KDA6M3X12	12mm, M3, plastový, černý	623017
Dist.sloupky	4	KDA6M3X08	8mm, M3, plastový, bílý	623104
RC2204AT	1		Radiocrafts/ZigBee modul	-----
43			Celkový počet součástek	



Obr.63. Schéma zapojení koncového zařízení s modulem ZDM-A1281-A2

Tab.15. Rozpis součástek pro modul ZDM-A1281-A2 (koordinátor)

Součástka	Počet	Hodnota	Pouzdro/Typ	Kat.číslo v GME
R _{2,6}	2	470 Ω	R1206	900179
R _{1,5}	2	10 kΩ	R1206	900260
R _{3,4}	2	1 kΩ	R1206	900191
C _{5,7}	2	100 nF	1206 SMD/keramický, 50V	905081
C ₆	1	1 μF	1206 SMD/keramický,25V,X7R	905151
C _{1,2,3,4}	4	470 nF	CK1206/50V, Y5V	905143
C ₈	1	100 nF	CTS 0,15μ/50V, B	907102
C ₉	1	2,2 μF	CTS 2,2μF/25V, B	907118
TL _{1,2}	2	spínač	SMD/P-B1720A, 5x5 mm	630124
D ₁	1	LED	1206/Yellow 60mcd/130°	960043
D ₂	1	LED Rx	1206/Blue 45mcd/130°	960036
D ₃	1	LED Tx	1206/Green 35mcd/130°	960045
D ₄	1		Mini-Melf/univerzální, 75V	917001
D ₅	1		BAT42 SMD	920015
D ₆	1	LED	1206/Red 45mcd/130°	960044
LE33CD	1	stabilizátor	3,3V, SO8	934021
Ext_Vcc	1	svorka	ARK550/2EX	821038
DC Jack	1	SCD-016A	napájecí vidlice, 2,5 mm	806014
D-SUB 9F	1		Cannon 9 pinů, 9,4mm	-----
JTAG	1	S2G20	lišta/samec, 2,54mm, 2x5pinů	832023
MAX3232CPE	1		převodník úrovní, DIL16	-----
ZDMA1281A2	1		MeshNetics/ZigBit modul	-----
30			Celkový počet součástek	

Tab.16. Rozpis součástek pro modul ZDM-A1281-A2 (koncové zařízení)

Součástka	Počet	Hodnota	Pouzdro/Typ	Kat.číslo v GME
R _{1,4,5,6}	4	470 Ω	R1206	900179
R _{2,3,7,8,9}	5	10 kΩ	R1206	900260
C ₁	1	1 μF	1206 SMD/keramický,25V,X7R	905151
C _{2,3}	2	100 nF	1206 SMD/keramický, 50V	905081
TL ₁	1	spínač	SMD/P-B1720A, 5x5 mm	630124
D ₁	1	LED	1206/Red 45mcd/130°	960044
D ₂	1		BAT42 SMD	920015
D ₃	1		Mini-Melf/univerzální, 75V	917001
D ₄	1	LED	1206/Blue 45mcd/130°	960036
D ₅	1	LED	1206/Yellow 60mcd/130°	960043
D ₆	1	LED	1206/Green 35mcd/130°	960045
Ext_Vcc	1	svorka	ARK550/2EX	821038
Dig. IN _{1,2}	2	PSH02-02W	konektor 2piny/samec	800094
Dig. IN _{1,2}	2	PSH02-04W	konektor 2piny/samice	800084
Ext TWI _{1,2}	2	PSH02-04W	konektor 4piny/samec	800098
Ext TWI _{1,2}	2	PFH02-04P	konektor 4piny/samice	800086
JMP _{1,2}	2	S1G20	lišta/samec, 2,54mm, 1x2piny	832017
JTAG	1	S2G20	lišta/samec, 2,54mm, 2x5pinů	832023
Posuv.spínač	1	ESP2010	Úhlový do DPS, ON-ON	-----
Jumper	1	červený	LED ON/OFF	-----
DS1631	1		DIL8/Maxim	-----
ZDMA1281A2	1		MeshNetics/ZigBit modul	-----
35			Celkový počet součástek	