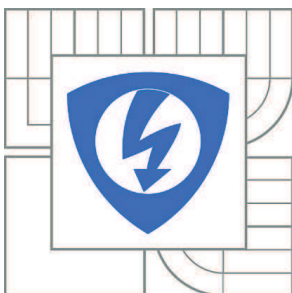


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

AGREGÁTOR BEZDRÁTOVÉ SENZORICKÉ SÍTĚ

CENTRAL UNIT OF THE WIRELESS SENSORS NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

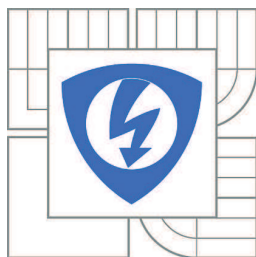
ZDENĚK PTÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVLÍK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Zdeněk Ptáček

ID: 154839

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Agregátor bezdrátové senzorické sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte lokální senzorickou síť založenou na využití bezdrátového komunikačního obvodu nFR24L01+. Senzorická síť bude obsahovat centrální řídicí jednotku pro sběr dat. Optimalizujte síť senzorů pro bateriové napájení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem funkce a ovládáním bezdrátového komunikačního obvodu nRF24L01+ a možností jeho využití pro vytvoření lokální senzorické sítě s topologií hvězdy. Dále pak studii funkce senzorické sítě a návrhem centrální řídicí jednotky sbírající naměřená data. Zároveň je zohledněna možnost bateriového napájení a provedena optimalizace systému.

Klíčová slova

nRF24L01+, senzorická síť, bezdrátová komunikace, časování, bateriové napájení

Abstract

This work deals with function and control description of wireless communication circuit nRF24L01+ and its possible use for the creation of local wireless sensor network of star topology. Further studies of the function of sensor network and designs the central control unit for measured data collecting. At the same time discusses the possibility of the battery supply and system optimization.

Key words

nRF24L01+, sensor network, wireless communication, timing, battery source

Bibliografická citace:

PTÁČEK, Z. Agregátor bezdrátové senzorické sítě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 38 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Agregátor bezdrátové senzorické sítě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne června 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Michalu Pavlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne června 2015

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Výběr modulu	2
1.1 Způsoby bezdrátové komunikace	2
1.2 Bezdrátové moduly s nRF24L01+	2
1.2.1 Bezdrátový modul typ 1	3
1.2.2 Bezdrátový modul nRF T click	3
1.2.3 Bezdrátový modul typ 2	4
1.2.4 Bezdrátový modul s konektorem pro externí anténu	4
2 nRF24L01+	5
2.1 Vlastnosti	5
2.2 Elektrické specifikace	6
2.2.1 Mezní hodnoty	6
2.2.2 Spotřeba režimů	6
2.3 Komunikace SPI	6
2.4 Nastavení a řízení rádiového přenosu	8
2.4.1 Pracovní režimy	8
2.4.2 Rychlost bezdrátového přenosu	11
2.4.3 Frekvence RF kanálu	12
2.4.4 Měření úrovně přijatého signálu	12
2.4.5 Úroveň výstupního signálu	12
2.4.6 Přerušení	13
2.5 Čtení a zápis zprávy	13
2.6 Zásobníky FIFO	13
2.7 Shockburst a Enhanced Shockburst	14
2.7.1 Formát paketu	14
2.7.2 Bezdrátový přenos	16
2.8 Vícenásobný přijímač	17
3 Senzorická síť	18
3.1 Senzorická jednotka	18
3.1.1 Komunikační modul	18
3.1.2 Obslužný mikrokontrolér	18
3.1.3 Zápis dat	18
3.2 Chování sítě	19

3.2.1	Inicializace	19
3.2.2	Připojení nové jednotky	20
3.2.3	Master Identity	20
3.2.4	Komunikace a její vliv na spotřebu	20
3.3	Princip komunikace sítě	20
3.3.1	Komunikační pakety a adresování	21
3.3.2	Praktické využití	22
3.4	Popis programové části v počítači	23
3.4.1	Diagnostika	23
3.4.2	Inicializace	24
3.4.3	Nová jednotka	24
3.4.4	Mapa sítě	25
3.5	Podrobný popis chování centrální jednotky	26
3.5.1	Ověřovací smyčka	26
3.5.2	Inicializace centrální jednotky	27
3.5.3	Hlavní smyčka	28
3.6	Podrobný popis chování ostatních jednotek	32
3.6.1	Inicializační smyčka	32
3.6.2	Smyčka zkušebního vysílání	33
3.6.3	Hlavní smyčka	34
3.7	Postup inicializace nové jednotky	35
3.8	Časování	36
4	Závěr	37
5	Seznam použité literatury	38
	Seznam příloh	39

Seznam obrázků

Obr. 1: Bezdrátový modul Typ 1 [2]	3
Obr. 2: Bezdrátový modul nRF T click [3]	3
Obr. 3: Bezdrátový modul Typ 2 [4]	4
Obr. 4: Bezdrátový modul s konektorem na anténu [5]	4
Obr. 5: Propojení mikrokontroléru s bezdrátovým modulem	7
Obr. 6: Průběh komunikace při čtení a zápisu dat[7]	7
Obr. 7: Stavový diagram[7]	8
Obr. 8: Formát funkce Shockburst[7]	14
Obr. 9: Formát funkce Enhanced Shockburst[7]	14
Obr. 10: Princip přenosu paketů s automatickým potvrzováním[7]	16
Obr. 11: Princip přenosu paketů s automatickým potvrzováním při ztrátě paketu[7]	16
Obr. 12: Princip adres a komunikace více modulů[7]	17
Obr. 13: Koncepční blokové schéma - Přehled sítě	19
Obr. 14: Shromažďovací paket	21
Obr. 15: Příkazový paket	21
Obr. 16: Rozvržení senzorické sítě	22
Obr. 17: Využití sítě v obytných prostorách [6]	22
Obr. 18: Přehledové schéma chování centrální jednotky	26
Obr. 19: Ověřovací smyčka centrální sběrné jednotky	26
Obr. 20: Inicializační smyčka centrální sběrné jednotky	27
Obr. 21: Hlavní smyčka programu centrální sběrné jednotky	28
Obr. 22: Konfigurační pole	29
Obr. 23: Konfigurační pole z počítače	29
Obr. 24: Sestavení konfiguračního pole	30
Obr. 25: Zpracování přerušení	31
Obr. 26: Přehledové schéma chování jednotky	32
Obr. 27: Inicializační smyčka jednotky	32
Obr. 28: Smyčka zkušebního vysílání	33
Obr. 29: Hlavní smyčka programu běžné jednotky	34
Obr. 30: Zpracování přerušení běžné jednotky	35
Obr. 31: Postup inicializace nové jednotky	36

Seznam tabulek

Tab. 1: Mezní hodnoty nRF24L01+[7].....	6
Tab. 2: Spotřeba režimů[7]	6
Tab. 3: Konfigurace režimů[7]	10
Tab. 4: Prodlevy přechodů mezi režimy[7]	11
Tab. 5: Nastavení rychlosti přenosu[7].....	11
Tab. 6: Nastavení úrovně výstupního signálu[7]	12
Tab. 7: Příkazy UART 0	29
Tab. 8: Příkazy UART 1	29
Tab. 9: Příkazy UART 0 běžné jednotky.....	34

Úvod

Co je vlastně senzorická síť? Je to uspořádání tří a více modulů, které mezi sebou dokáží komunikovat. Každý modul může mít jinou funkci a účel, ale všechny dokáží přijímat a vysílat data k ostatním. Každá síť modulů má svou topologii. Moduly se mohou v síti lišit úrovní funkce, kdy je modul nadřazen nebo podřazen dalšímu či periodou vysílání. Některé tedy mohou jen přeposílat naměřená data nadřazeným modulům od modulů na nižší úrovni, které mají za úkol pouze informace sbírat a posílat je o úroveň výše. Topologie sítí je většinou postavena na jednom centrálním sběrném bodu. Tomuto centrálnímu sběrnému modulu jsou přeposílána všechna naměřená data senzory sítí.

Proč a k čemu se používá? Využití bezdrátových senzorických sítí je obrovské, protože jsou schopny shromáždit velké množství informací na libovolně velkém prostoru téměř okamžitě. Jelikož jsou informace posílány vzduchem, není zde zapotřebí datových vodičů. Díky nízké spotřebě je lze opatřit bateriovým napájením, čímž odpadá i nutnost napájecích vodičů a jednotlivé moduly jsou tedy plně mobilní. Tím je zajištěna flexibilita sítě a možnost umístění modulů i do těžko přístupných míst. Bezdrátové senzorické sítě jsou hojně používány jako prostředek pro včasné varování před katastrofami, kdy jsou jednotlivé moduly rozmístěny v klíčových oblastech terénu a zajišťují např. údaje o seismické aktivitě. Interval vysílání jednotlivých modulů je přímo závislý na jejich spotřebě. Čím častější je komunikace, tím vyšší je spotřeba. Proto moduly rozmístěné ve velkém prostředí a závislé na bateriovém napájení mají z pravidla řidší komunikaci, protože výměna baterií v terénu by byla náročná. Dalším využitím je snímání hodnot na malé ploše, kde by napájecí vodiče příliš zneprůhlednili situaci.

Požadavky na senzorické sítě jsou vyšší téměř každým dnem. Je požadována vysoká flexibilita a mobilita, ale také odolnost vůči vnějším vlivům, minimální rozměry, velký dosah, minimální spotřeba pro výdrž po dobu několika let, bezpečný přenos dat zabezpečený šifrováním, minimální chybovost a poruchovost a to vše při zachování nejnížší možné ceny.

Při provozování bezdrátové komunikace je většinou využíváno celosvětově uznávaných pásmem ISM (Industrial, Scientific and Medical radio bands). Pásma ISM jsou pásma pro rádiové vysílání, v nichž je povolen provoz bezdrátových zařízení bez licenčních poplatků, avšak bez garance proti rušení.[1] V jejich oblasti je provozována veškerá radioamatérská technika, vysílače RC modelů, senzorické sítě, technologie Wi-fi a Bluetooth, ale také magnetron mikrovlnné trouby, který může komunikaci rušit. Množstvím používaných zařízení dochází k rušení a interferenci signálů pracujících na stejné frekvenci.

1 Výběr modulu

V dnešní době jsou nejčastějšími rozhodujícími parametry cena a dostupnost. S nástupem asijských států na trh však cena ani dostupnost nejsou problémem, protože nabízený modul si lze pořídit od 20 Kč. Volba nejlevnější nabídky však nemusí být vždy šťastná. Na trhu je mnoho podvrhů, jejichž chování a funkce sice odpovídají originálu, avšak jejich parametry mohou být značně omezeny. Modul tedy může mít kratší dosah, vyšší odběr nebo třeba nepřesnou synchronizaci fázového závěsu. S kvalitou a požadavky roste i cena a tak není problém zakoupit modul i nad 1000 Kč za kus.

1.1 Způsoby bezdrátové komunikace

Nejrozšířenější bezdrátovou komunikací je komunikace rádiová. Při rádiové komunikaci je požadovaná informace na straně vysílače pomocí antény vyzářena do prostoru ve formě elektromagnetického vlnění a na straně přijímače je opět anténou přijata. Vyzářený signál je modulován pomocí frekvenční, amplitudové či fázové modulace.

Dalším rozšířeným způsobem je komunikace optická, kdy jsou vysílačem emitovány a přijímačem detekovány fotony. Popsaný způsob je používán například v dálkových ovladačích, optických závorách či při přenosu dat optickými vlákny.

Sonická komunikace je komunikace na bázi zvuku. Pomocí membrány reproduktoru je vytvořena tlaková vlna, která je mikrofonom zaznamenána. Pokud komunikaci tvoří jen zdánlivě náhodné a nelibé tóny, je vhodnější použít komunikaci rádiovou. Je-li však komunikace provozována pomocí hlasových příkazů jedná se o velmi náročnou aplikaci. Samotné vysílání a přijímání zvuku je jednoduché, náročné je až jeho vyhodnocování a následné zpracování.

1.2 Bezdrátové moduly s nRF24L01+

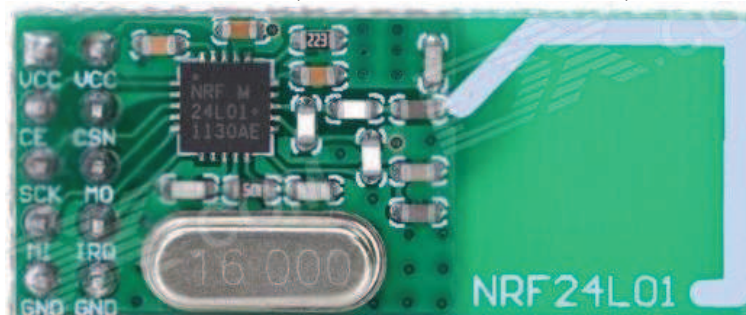
Radiofrekvenční modul nRF24L01+ byl vybrán vzhledem ke své nízké spotřebě a také relativně velkému dosahu, avšak nevýhodou je přítomnost obslužného mikrokontroléru. V dalších částech je proto porovnáno několik typů bezdrátových modulů s čipem nRF24L01+, protože však běžně dostupných bezdrátových modulů nRF24L01+ je více, jsou zde shrnuty jen některé. Zapojení všech zůstává nezměněné nebo s menšími obměnami. Parametry jednotlivých modulů jsou závislé na tvaru a velikosti antény, typu použitého substrátu i návrhu plošného spoje. Některé moduly jsou opatřeny i konektorem pro anténu. Pomocí externí antény lze dosáhnout mnohonásobně vyššího dosahu.

Protože všechny moduly mají osazen stejný nebo podobný čip je nejrozdílnější položkou opět cena a nejvíce ovlivněnými parametry jsou skutečná rychlost přenosu, úspornost a aktivní dosah.

1.2.1 Bezdrátový modul typ 1

Modul na obr. 1 pracuje s maximální přenosovou rychlostí dat 2 Mbps, s možností nastavení 125 frekvenčních kanálů. Obvod musí být napájen v rozmezí od 1,9 V do 3,6 V a jeho proudová spotřeba v neaktivním režimu je 1 μ A. Součástí natisknutého motivu plošného spoje je anténa pracující na frekvenci 2,4 GHz. Obvod obsahuje vestavěný napěťový regulátor. Hmotnost modulu jsou 2 g. [2]

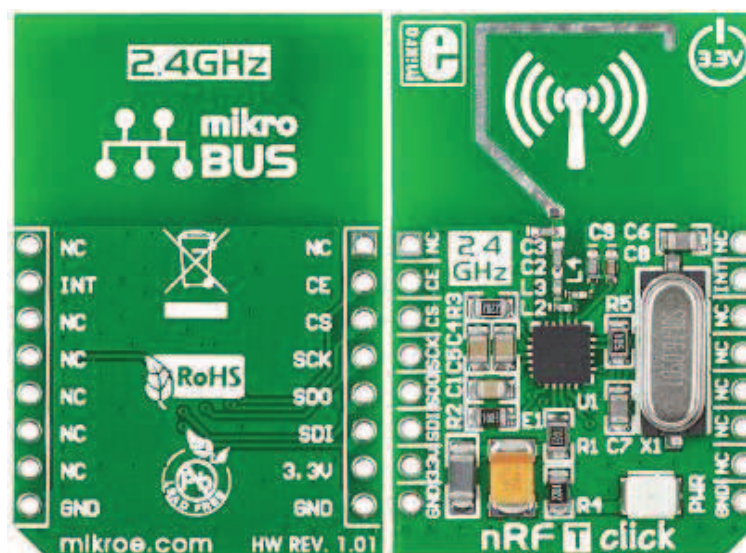
Rozměry: 1.34 in x 0.55 in x 0.43 in (3.4 cm x 1.4 cm x 1.1 cm)



Obr. 1: Bezdrátový modul Typ 1 [2]

1.2.2 Bezdrátový modul nRF T click

Anténa s pracovní frekvencí 2,4 GHz je umístěna přímo na desce plošného spoje, výrobce však nabízí i verzi s SMD anténou pod názvem nRF C Click. Modul podporuje přenos dat rychlostmi 250 kbps, 1 Mbps a 2 Mbps. Hodnota napájecího napětí nesmí překročit hranici 3,3 V. Frekvenční rozsah volitelného pásma se pohybuje od 2400 MHz do 2483,5 MHz.[3] Na desce je osazen čip nRF24L01P a oproti klasickému zapojení i LED dioda, která signalizuje přítomnost napájení. Díky diodě, která je po dobu funkce zařízení neustále napájena, je proudová spotřeba obvodu o něco vyšší. Přesněji o téměř 1 mA, ale při režimu Power Down, který spotřebovává asi 700 nA, je to znatelný rozdíl.

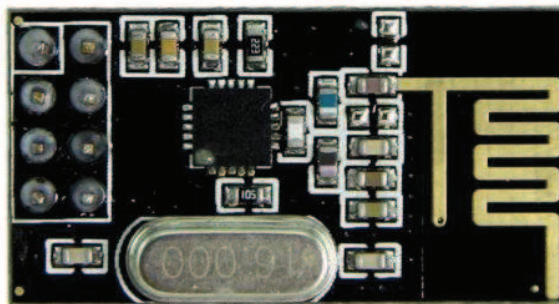


Obr. 2: Bezdrátový modul nRF T click [3]

1.2.3 Bezdrátový modul typ 2

Osazený čip nRF24L01+ podporuje přenosové rychlosti 250 kbps, 1 Mbps a 2 Mbps. Anténa je umístěna přímo na ploše DPS. Modul je možno napájet napětím v rozsahu 1,9 až 3,6 V. Vysílací úroveň je +7 dB a citlivost přijímače ≤ -90 dB. V otevřeném prostranství je schopen komunikovat až na vzdálenost 250 m.

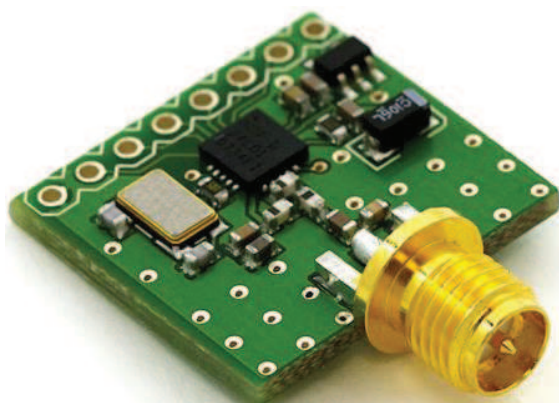
Rozměry 15x29 mm. Modul je zobrazen na obr. 3. [4]



Obr. 3: Bezdrátový modul Typ 2 [4]

1.2.4 Bezdrátový modul s konektorem pro externí anténu

Modul z obr. 4 může být osazen čipem nRF24L01 nebo jeho vylepšenou verzí nRF24L01+. Pro funkčnost musí být připojena externí anténa RP-SMA na SMA konektor, který je zpětně polarizovaný pro využití maximálního radiofrekvenčního rozsahu a má impedanci 50Ω . Na desce se nachází i stabilizátor napětí na 3,3 V, který dovoluje připojení napájecího napětí až 7 V. Při rychlosti přenosu 250 kbps lze dosáhnout komunikační vzdálenosti až 1000 m. Frekvenční pásmo může být nastaveno v rozsahu 2400 MHz do 2525 MHz (125 kanálů).[5] Nevýhodou tohoto modulu je jeho vyšší cena.



Obr. 4: Bezdrátový modul s konektorem na anténu [5]

Ze všech typů modulů je vyvedeno 8 funkčních vývodů, i když se může na první pohled zdát, že jich je více. Viz obr. 1 nebo obr. 2.

Dva kontakty VCC a GND jsou určeny pro napájení pohybující se v rozmezí od 1,9 V do 3,6 V. Další čtyři SCK, MISO, MOSI a CSN jsou určeny pro ovládání modulu pomocí mikrokontroléru přes rozhraní SPI. Přivedením signálu na kontakt CE bude modul uveden do aktivního (vysílacího/přijímacího) režimu. Signálem přerušení z kontaktu IRQ nebo INT je ovládajícím čipu indikován stav komunikace. Více v kapitole 2.3.

2 nRF24L01+

Modul je částečně programovatelný pomocí svých 30 registrů. Ne všechny registry jsou však potřebné a některé není dobré měnit. Mezi ně patří registry skrývající se pod adresami 0x18 až 0x1B, které jsou určeny jen pro testovací účely a změnou jejich obsahu by mohla být způsobena nefunkčnost samotného čipu.[7] Stavové a indikační registry stejně jako registry přijatých paketů jsou určeny jen pro čtení, ale přesto je u převážné většiny podporována možnost čtení i zápisu.

2.1 Vlastnosti

nRF24L01+ využívá celosvětově uznávané pásmo ISM, ve kterém dokáže přenášet informace až na 126 různých RF (radiofrekvenčních) kanálech. Rozhraní přijímače i vysílače je společné. Podporována je také funkce modulace pomocí GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) neboli Gaussova modulace frekvenčního klíčování. Přenos dat může být uskutečněn při rychlostech 250 kbps, 1 Mbps a 2 Mbps. Aby nedocházelo k překrývání pásem, musí frekvenční pásma při rychlosti 1 Mbps mít rozestup 1 MHz. Pro rychlost 2 Mbps musí být rozestup 2 MHz.

Úroveň vysílaného signálu je měnitelná po kroku 6 dBm od -18 dBm do 0 dBm. Odběr při úrovni nejsilnějšího vysílání (0 dBm) je 11,3 mA.

V přijímači jsou zabudovány kanálové filtry a rychlé AGC (Automatic Gain Control) pro zlepšení dynamického rozsahu. Odběr přijímače při rychlosti přenosu 2 Mbps je 13,5 mA. Citlivosti při rychlostech přenosu 2 Mbps, 1 Mbps a 250 kbps jsou -82, -85 a -94 dBm.

Pomocí funkce Enhanced ShockBurst je obstaráváno automatické sestavení paketů, automatická správa přenosu paketů, možnost volby proměnné délky posílané zprávy v rozsahu 1-32 bytů a komunikace s dalšími 6 moduly v síti typu hvězdy.

Správa napájení obsahuje zabudovaný napěťový regulátor a umožňuje rozsah napájecího napětí v rozmezí 1,9 až 3,6 V. V pohotovostním režimu Standby-I je odebíráno 26 μ A a při režimu Power Down jen 900 nA. Z klidových režimů se lze do režimů aktivních přepnout za dobu 130 μ s.

Komunikace je zajištěna pomocí 4 kontaktů rozhraní SPI s maximální rychlostí 10 Mbps. Do FIFO zásobníků přijímaných a vysílaných zpráv lze uložit až 3 zprávy o velikosti 32 bytů.

Pouzdro čipu je 4x4 mm velké, 20 pinové typu QFN. [7]

2.2 Elektrické specifikace

V této části je zobrazen povolený rozsah pracovních hodnot napětí a proudů. Dále je uvedena také předpokládaná spotřeba jednotlivých režimů RF modulu.

2.2.1 Mezní hodnoty

V následující tabulce jsou uvedeny mezní hodnoty bezdrátového modulu nRF24L01+.

Tab. 1: Mezní hodnoty nRF24L01+[7]

Parametr	Minimum	Maximum	Jednotka
VCC	-0,3	3,6	V
Napětí na vstupech	-0,3	5,25	V
Výstupní napětí	VCC	VCC	-
Výkonové ztráty	-	60	mW
Pracovní teplota	-40	+85	°C
Skladovací teplota	-40	+125	°C

2.2.2 Spotřeba režimů

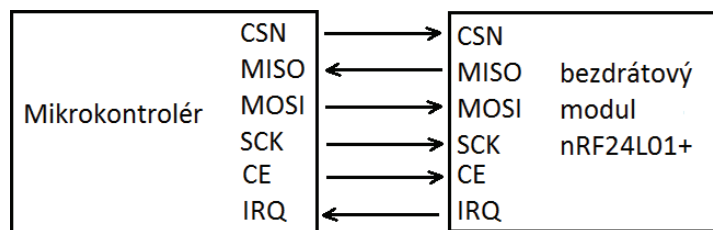
Jako důkaz nízké energetické náročnosti jsou v tab. 2 uvedeny spotřeby jednotlivých pracovních režimů.

Tab. 2: Spotřeba režimů[7]

Režim	Spotřeba	Jednotky
Power Down	900	nA
Standby-I	26	μA
Standby-II	320	μA
TX při nastavování (přechodné)	8	mA
TX	7 – 11,3	mA
RX při nastavování (přechodné)	8,9	mA
RX	12,6 – 13,5	mA

2.3 Komunikace SPI

Pro lepší přenositelnost programu mezi různými druhy ovládajících mikročipů nebylo pro komunikaci SPI (Serial Peripheral Interface) využito zabudovaného rozhraní. Na následujícím obr. 5 je zobrazeno propojení zařízení.

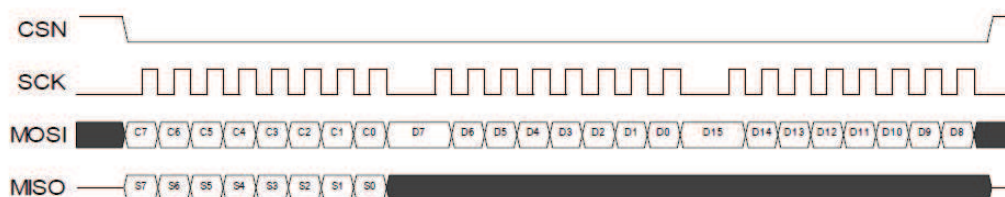
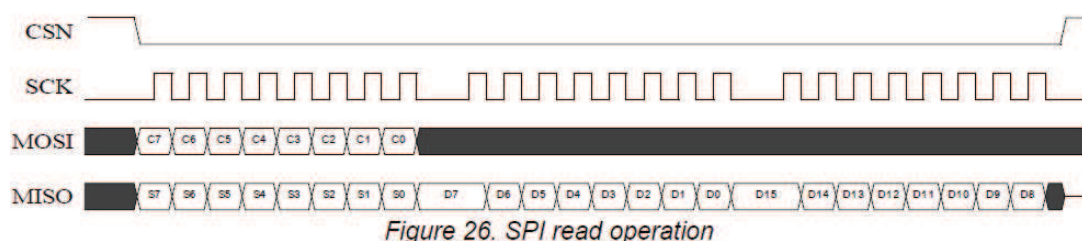


Obr. 5: Propojení mikrokontroléru s bezdrátovým modulem

Na obrázku jsou zobrazeny pouze datové vodiče. Kontakty pro napájení VCC a GND nejsou pro komunikaci potřeba. Pro ovládání modulu jsou použity kontakty SCK, MISO, MOSI a CSN. S jejich pomocí lze zapisovat i číst hodnoty jednotlivých registrů či nahrávat a stahovat pakety ze zásobníků.

Při kladné úrovni signálu na kontaktu CE je modulu signalizováno, že má přejít do aktivního režimu vysílače či přijímače. Samozřejmostí je správnost nastavení všech hodnot registrů. V případě vysílače musí být také nahrána platná data pro odeslání. IRQ (Interrupt Request) je kontakt pro přerušení a může jím být signalizováno například odeslání paketu, obdržení paketu, úspěšné ukončení odesílání, dosažení maximálního počtu opakovaného odeslání nebo, že už není co posílat.

Na následujícím obr. 6 je představen samotný průběh komunikace. Nejprve je přivedeno CSN na hodnotu log. 0 a až poté mohou být mikrokontrolérem posílány hodinové impulzy. Maximální rychlost hodinových impulzů je 10 MHz. S každou náběžnou hranou hodinového impulzu je rozhraním poslán a obdržen jeden bit. Bity jsou posílány od nejvýznamnějšího bitu (MSBit), ale jednotlivé byty jsou posílány postupně (první LSByte). Důležité je tento formát dodržet. Při čtení a zápisu jednobytových registrů je záměna nepostřehnutelná, ale při zapisování více bytových zpráv jako například adres již vzniká problém.



Obr. 6: Průběh komunikace při čtení a zápisu dat[7]

Pro přečtení či zapsání dat musí být nejprve poslána data určující registr, jehož se má operace týkat. Při čtení je vyslán prázdný byte o hodnotě 0xFF a zároveň obdržen výpis požadovaného registru. Pro zápis je nutné k 5 bitové adrese registru přidat i požadavek k zápisu. Ten je ve formě log. 1 na pozici 5. bitu. Jednotlivé registry pak představují pětibytové adresy. Jakmile je požadavek o zápis do registru odeslán je možno poslat samotná data.

2.4 Nastavení a řízení rádiového přenosu

V této kapitole jsou popsány funkce jednotlivých režimů pro přijímání a vysílání, jejich parametry a jak s nimi pracovat. Také je zde popsána frekvenční nastavitelnost vysílaného a přijímaného pásma a rychlost přenosu dat.

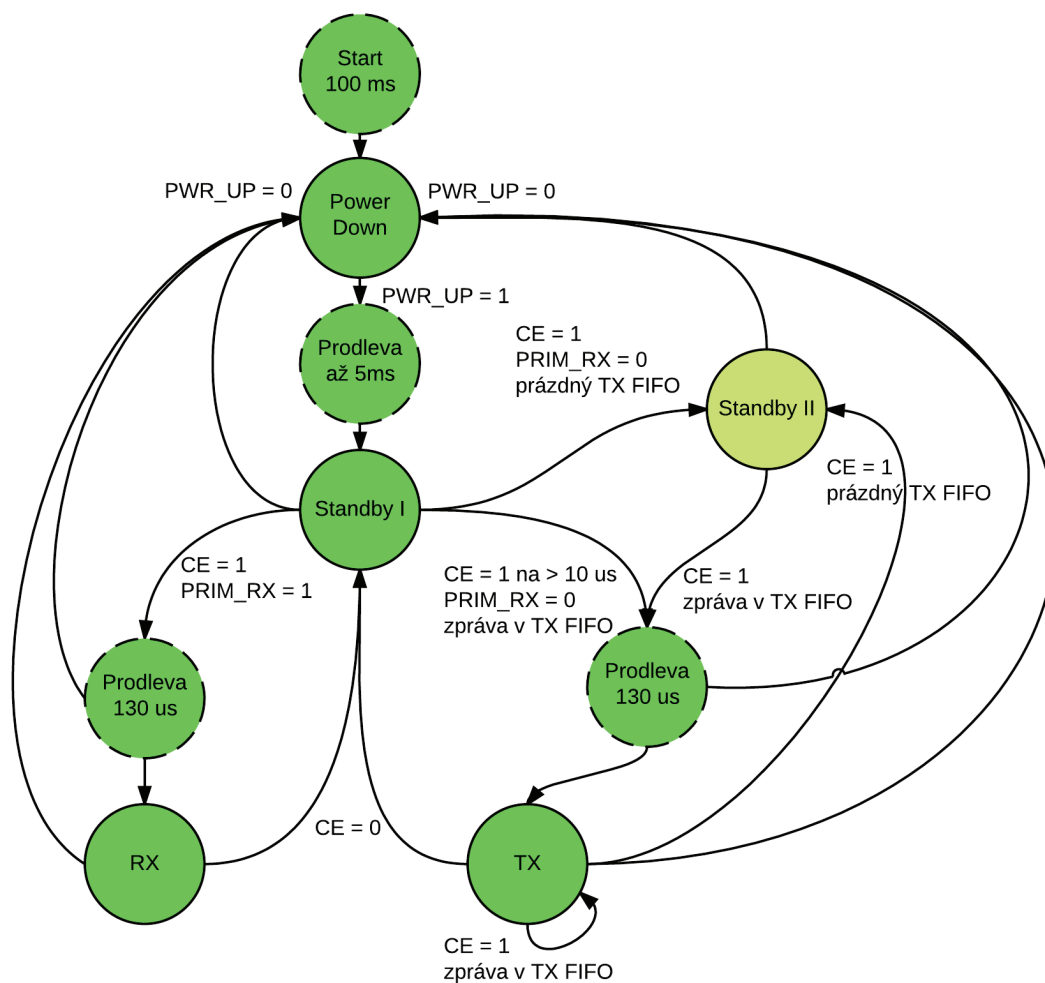
2.4.1 Pracovní režimy

Zařízení lze nastavit do nečinného režimu Power Down, pohotovostního režimu Standby a aktivních režimů TX a RX.

Stavový diagram

Na stavovém diagramu (obr. 7) jsou zobrazeny jednotlivé pracovní režimy a možné přechody mezi nimi. Režimy lze rozdělit do tří typů. [7]

- Standardní pracovní režim – požadovaný stav užívaný při běžném chodu (plný kruh)
- Možný pracovní režim – režim, ve kterém se může zařízení nacházet, ale pro běžné použití není nezbytný (Standby II)
- Přechodný stav – krátkodobý stav, kdy se čeká na naběhnutí oscilátoru a ustálení fázového závěsu (přerušovaný kruh)



Obr. 7: Stavový diagram[7]

Režim Power Down

Po připojení napájení a asi 100 ms prodlevě se nRF24L01+ nachází v režimu Power Down, ale lze do něj vstoupit z kteréhokoli režimu nastavením konfiguračního bitu $PWR_UP = 0$ v registru *CONFIG*. Je to stav neaktivity a minimálního odběru, nicméně rozhraní SPI je stále aktivní a všechny dosud nastavené hodnoty v registrech zůstávají zachovány a mohou být libovolně přenastaveny. Nastavením bitu $PWR_UP = 1$ přejde čip po prodlevě *Tpd2stby* do pohotovostního režimu Standby-I. Doba *Tpd2stby* se pohybuje od 150 μ s do 4,5 ms. [7]

Po odpojení napájení jsou všechny nastavené hodnoty v registrech ztraceny a před vstupem do režimu vysílače či přijímače musejí být znovu nakonfigurovány.

Režim Standby-I

Pohotovostní režim je využíván ke snížení průměrné proudové spotřeby zařízení při zachování krátké reakční doby. V tomto režimu je aktivní jen část krystalového oscilátoru. Pro přechod do aktivních režimů pro vysílání (TX) či přijímání (RX) lze přejít při nastavení logické úrovně 1 na pin CE. Při nastavení $CE = 0$ dojde opět k návratu do Standby-I. Hodnoty registrů opět zůstávají zachovány a mohou být přes rozhraní SPI měněny. [7]

Režim Standby-II

Oproti pohotovostnímu režimu Standby-I má režim Standby-II poněkud vyšší spotřebu, protože jsou aktivovány přídatné hodinové buffery. Do tohoto režimu zařízení přechází, pokud je stav pinu $CE = 1$ a v registru *CONFIG* je nastaven bit *PRIM_RX* na 0 a neexistují data pro vyslání (zásobník *TX FIFO* je prázdný). Pokud je do zásobníku *TX FIFO* nahrán nový paket, aktivuje se fázový závěs (PLL) a po uplynutí ustalovací doby 130 μ s je paket vyslán. Hodnoty registrů zůstávají zachovány a mohou být přes rozhraní SPI měněny. [7]

Režim RX

Při režimu RX je zařízení používáno jako přijímač. Pro využití tohoto režimu musí zařízení projít režimem Standby-I a tudíž musí mít nastaven konfigurační bit $PWR_UP = 1$. Dále je zapotřebí mít nastaven konfigurační bit $PRIM_RX = 1$ ve stejném registru (*CONFIG*), kterým je indikováno, že zařízení bude použito jako vysílač. Pro samotnou aktivaci musí být ještě přivedena log. úroveň 1 na pin CE.

Podstatou je demodulování signálu z RF kanálu. Demodulovaný signál je následně zpracováván hardwarový jádrem pracujícím na základním pásmu (BPE - baseband protocol engine). Jádro nepřetržitě vyhledává platné pakety. Je-li nalezen platný paket, porovnáním adresy a platného CRC (Cyklický redundantní součet), je obdržená informace paketu umístěna do prázdného slotu v zásobníku RX FIFO. Je-li zásobník plný, je příchozí informace zahozena. Čip zůstává v režimu RX, dokud není konfigurací přepnut do režimu Standby-I nebo Power Down.

Je-li aktivován automatický protokol Enhanced ShockBurst™ zabudovaný v BPE, může čip přecházet i do ostatních režimů, je-li mu to protokolem nařízeno. V režimu RX je dostupný signál Received Power Detector (RPD). Je-li v přijímaném frekvenčním pásmu zachycen RF signál silnější než -64 dBm po dobu delší než 40 μ s, je RPD nastaven na 1. Vnitřní RPD signál je před samotným zápisem do registru filtrován. Blíže popsáno v kapitole 2.4.4. [7]

Režim TX

Režim TX slouží pro vysílání paketů. Před samotným vysláním musí být nahrána zpráva do zásobníku *TX FIFO*. Vstup do tohoto režimu je proveden opět z režimu Standby-I ($PWR_UP = 1$), a to nastavením konfiguračního bitu $PRIM_RX = 0$ a přivedením log. úrovně 1 na pin CE po dobu delší než 10 μs . Zařízení zůstává v režimu TX, dokud není dokončeno vysílání. Při $CE = 0$, přechází modul zpět do režimu Standby-I. Pokud setrvává CE ve stavu log. 1 pokračuje zařízení ve vysílání, dokud není zásobník *TX FIFO* vyprázdněn. Nastane-li situace, kdy je $CE = 1$, ale přesto v zásobníku *TX FIFO* neexistuje paket, jenž by mohl být vyslán, přechází zařízení do režimu Standby-II. Je důležité nenechat zařízení vysílat informace najednou po dobu delší než 4 ms. Je-li aktivována funkce Enhanced ShockBurst™, tento stav nemůže nikdy nastat. [7]

Konfigurace režimů

Následující tabulka popisuje nastavování pracovních režimů kombinací stavu na pinu CE a kombinacemi bitů PWR_UP a $PRIM_RX$ v registru *CONFIG*.

Tab. 3: Konfigurace režimů[7]

Režim	PWR_UP	$PRIM_RX$	Pin CE	Zásobník FIFO
RX	1	1	1	-
TX	1	0	1	Pakety v TX FIFO. Vyslání jednoho či více paketů.
TX	1	0	1 (min. 10 μs)	Pakety v TX FIFO. Vyslání jednoho paketu.
Standby-II	1	0	1	Prázdný TX FIFO.
Standby-I	1	-	0	Neprobíhá přenos.
Power Down	0	-	-	-

Přechody mezi režimy

Přechody mezi jednotlivými režimy nejsou okamžité a každý má určitou prodlevu. Maximální hodnoty možných prodlev jsou vyobrazeny v následující tabulce. Dále následují i požadavky na časování pinu *CE*.

Přechod z režimu RX do režimu TX nebo naopak je stejný jako přechod z pohotovostního režimu Standby-I do režimu RX nebo TX (maximálně 130 μ s). [7]

Tab. 4: Prodlevy přechodů mezi režimy[7]

Název	nRF24L01+	Min	Max	Poznámky
Tpd2stby	Power Down $\rightarrow$ Standby-I		150 μ s	Externí hodinový signál.
			1,5 ms	*Ext. krystal, $L_s < 30$ mH
			3 ms	*Ext. krystal, $L_s = 60$ mH
			4,5 ms	*Ext. krystal, $L_s = 90$ mH
Tstby2a	Standby $\rightarrow$ TX / RX		130 μ s	
Thce	CE = 1	10 μ s		
Tpece2csn	Prodleva od kladné hrany CE po CSN = 0	4 μ s		

* Překročí-li indukčnost L_s hodnotu 30 mH lze prodlevu vypočítat vztahem: [7]

$$T_{pd2stby} = \frac{L_s}{30 \text{ mH}} * 1.5 \text{ ms} \quad (1)$$

2.4.2 Rychlost bezdrátového přenosu

Rychlost bezdrátového přenosu je modulovaná rychlost signalizace, kterou zařízení používá, když vysílá nebo přijímá data. Rychlost může nabývat hodnot 250 kbps, 1 Mbps nebo 2 Mbps. Použitím nižší rychlosti přenosu dat dosáhne přijímač vyšší citlivosti a dosahu, ale při vyšší rychlosti je nižší průměrná proudová spotřeba a menší pravděpodobnost výskytu přeslechů. Rychlost je nastavována nastavením bitů *RF_DR* v registru *RF_SETUP*. Kódování je zobrazeno v tab. 5. Obě zařízení, vysílač i přijímač, musí mít nastavenou stejnou rychlost přenosu.

nRF24L01+ je plně kompatibilní s nRF24L01. Při rychlosti 250 kbps nebo 1 Mbps je potom kompatibilní i s nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 a nRF24E2. [7]

Tab. 5: Nastavení rychlosti přenosu[7]

RF_DR_LOW	RF_DR_HIGH	Rychlost
0	0	1 Mbps
0	1	2 Mbps
1	0	250 kbps
1	1	*Rezervováno (2 Mbps)

* Jestliže je *RF_RD_HIGH* nastaven na 1 nestará se o hodnotu *RF_DR_HIGH*

2.4.3 Frekvence RF kanálu

Frekvence RF kanálu určuje střed kanálu používaný zařízením.

Využitá šířka pásma kanálu je menší než

- 1 MHz při přenosu rychlostí 250 kbps nebo 1 Mbps
- 2 MHz při přenosu rychlostí 2 Mbps

Vysílací frekvence může být nastavena v rozsahu od 2400 MHz do 2525 MHz po kroku 1 MHz. Při rychlosti přenosu 2 Mbps zabírá kanál šířku pásma větší než je frekvenční rozlišení nastavitelného rozsahu. Tím může docházet k překrývání kanálů. Aby se tak nestalo, musí být zajištěn odstup od ostatních kanálů alespoň 2 MHz. Při rychlosti přenosu 1 Mbps nebo 250 kbps je šířka pásma stejná nebo menší než je rozlišení nastavitelného rozsahu a odstup tudíž nemusí být řešen. Nastavená frekvence přijímače a vysílače musí být stejná. [7]

Frekvence RF kanálu je nastavována nastavením registru RF_CH podle následujícího vzorce:

$$F_0 = 2400 + RF_CH [MHz] \quad (2)$$

2.4.4 Měření úrovně přijatého signálu

Úroveň přijatého signálu je měřena detektorem RPD (Received Power Detector). Indikační bit je umístěn ve stejnojmenném registru a určuje, zda je úroveň signálu posledního přijatého paketu vyšší než -64 dBm. Je-li úroveň menší než -64 dBm je $RDP = 0$. Registr RDP lze přečíst kdykoli je zařízení v režimu RX a umožňuje tak alespoň omezeně sledovat aktuální úroveň přijímaného signálu.

V případě, že je obdržen platný paket, je stav RPD uložen a lze z něj tedy určit sílu signálu vlastního vysílače. Při přechodu do režimu RX je však hodnota RPD správná až po uplynutí doby 170 μs ($T_{stby2a} + T_{delay_AGC}$). RPD je závislý na teplotě a jeho prahová hodnota je postupně měněna. Prahová hodnota při -40 °C je snížena o 5 dB a zvýšena o 5 dB při +85 °C. [7]

2.4.5 Úroveň výstupního signálu

Úroveň výstupního signálu lze změnit nastavením bitů RF_PWR v registru RF_SETUP podle následující tab. 6.

Tab. 6: Nastavení úrovně výstupního signálu[7]

RF_PWR	Úroveň výstupního signálu	Proudová spotřeba
11	0 dBm	11,3 mA
10	-6 dBm	9,0 mA
01	-12 dBm	7,5 mA
00	-18 dBm	7,0 mA

2.4.6 Přerušení

Během vykonávání aktivních režimů mohou nastat 3 druhy přerušení, které jsou signalizovány stavem log. 0 na kontaktu *IRQ*. [7]

<i>RX_DR</i>	Byl obdržen paket.
<i>TX_DR</i>	Paket byl úspěšně vyslán. Pokud je aktivována funkce automatického potvrzování, je přerušení vyvoláno až po přijatém potvrzení.
<i>MAX_RT</i>	Přenos selhal. Bylo dosaženo maximálního počtu opětovných vyslání zprávy. Maximální počet opětovného vyslání zprávy je nastaven pomocí registru <i>SETUP_RETR</i> .

Všechny tři signalizace přerušení jsou umístěny ve *STATUS* registru. Je-li některá z nich vyvolána, musí být po vykonání opět nastavena na hodnotu 0. Na kontaktu *IRQ* je nastavena log. 0 tak dlouho, dokud není registr přerušení vyčištěn. Vyčištění registru je provedeno zapsáním log. 1 do bitu vyvolaného přerušení.

2.5 Čtení a zápis zprávy

Velikost zprávy je omezena velikostí FIFO zásobníku, jenž může pojmout až 32 bytů. Pro nastavení odesílané zprávy slouží speciální příkaz *W_TX_PAYLOAD*. Za tímto příkazem jsou vyslána data samotné zprávy a jsou uložena do jednoho ze tří FIFO zásobníků. Pokud je zásobník plný, tedy obsahuje již tři zprávy, a dojde k nahrání čtvrté, je první zpráva skartována.

Čtení přijaté zprávy je prováděno pomocí příkazu *R_RX_PAYLOAD*. SPI funguje na základě posuvného registru a proto, aby byla zpráva vyčtena ze zásobníku, musí být RF modulu něco posláno. K tomuto účelu slouží prázdná instrukce *NOP*. Instrukce *NOP* je tedy vyslána tolikrát, kolik bytů obsahuje přijatá zpráva. Délku přijaté zprávy je možno zjistit vysláním instrukce *R_RX_PL_WID*. Často je také podstatné, ze kterého kanálu zpráva dorazila. Tato informace je vždy pro následující zprávu uvedena bity označenými jako *RX_P_NO* ve *STATUS* registru a je platná jen před přečtením zprávy. Zpráva je po přečtení ze zásobníku RF modulu smazána. [7] Je-li čtena zpráva z prázdného zásobníku, bude každý takto přečtený byte stejný jako poslední byte poslední vyčtené zprávy.

Informace o stavu zásobníků jsou uvedeny v registru *FIFO_STATUS*, s jehož pomocí lze zjistit, zda je zásobník plný či prázdný, přečtením *TX_FULL*, *TX_EMPTY*, *RX_FULL* nebo *RX_EMPTY*.

2.6 Zásobníky FIFO

Každý ze zásobníků *TX FIFO* a *RX FIFO* tvoří 3 buňky pro uložení zpráv o velikosti až 32 bytů. Při postupném uložení tří zpráv jsou zprávy posouvány z jedné do další buňky. Je-li dosaženo stavu, kdy jsou všechny buňky zaplněny, je v případě *TX_FIFO* zásobníku nejstarší zpráva vytlačena ze zásobníku a tím skartována.

Při čtení obsahu zásobníku *RX FIFO* jsou přečteny nejprve první přijaté zprávy. Po přečtení je zpráva ze zásobníku smazána. Posun v zásobníku *RX FIFO* probíhá obdobně, dokud nedojde k zaplnění. V případě zaplnění *RX FIFO* zásobníku nedochází k vytlačování nejstarších zpráv, ale je pozastaveno ukládání nových, po dobu, kdy je zásobník plný. Zásobníky lze vyprázdnit pomocí operací *FLUSH_TX* a *FLUSH_RX*. [7]

2.7 Shockburst a Enhanced Shockburst

Samotnou komunikaci lze uskutečnit dvěma způsoby. Funkce Shockburst obstarává sestavení paketu, časování a znovu odeslání ztracených paketů, ale nelze využít dynamické délky zprávy nebo automatického potvrzování o přijetí. Tyto funkce jsou však podporovány její pokročilejší verzí. Přejít mezi oběma funkcemi je plně automatický a přímo závislý na nastavení registrů. [7]

2.7.1 Formát paketu

Jak už bylo zmíněno, obě funkce jsou využity pro sestavení nebo rozebrání paketu, ale liší se v jeho formátu. Formát paketu sestaveného pomocí Shockburst je složen z bytu synchronizační hlavičky, 3 až 5 bytové adresy, obsahu poslané zprávy a kontrolního součtu. Délka zprávy je nastavena pomocí registrů *RX_PW_Pn* (n značí číslo kanálu). Formát je vyobrazen na obr. 8. [7]

Hlavička 1 byte	Adresa 3 – 5 bytů	Zpráva 1 - 32 bytů	CRC 1 – 2 byty
--------------------	----------------------	-----------------------	-------------------

Obr. 8: Formát funkce Shockburst[7]

Rozšiřující funkce Enhanced Shockburst je obohacena o možnost dynamické délky zprávy, automatické indexace paketu, automatického potvrzování a požadavek o nevysílání potvrzení. Údaje jsou posílány v 3. části formátu, jak je zobrazeno na obr. 9. [7]

Hlavička 1 byte	Adresa 3 – 5 bytů	Informace o paketu 9 bitů	Zpráva 0 - 32 bytů	CRC 1 – 2 byty
--------------------	----------------------	------------------------------	-----------------------	-------------------

Obr. 9: Formát funkce Enhanced Shockburst[7]

Synchronizační hlavička

Hlavička je tvořena posloupností 8 bitů určených k synchronizaci demodulátoru přijímače. Začíná-li adresa prvním bitem o hodnotě log. 1, je hlavička sestavena jako 10101010 a je-li první bit adresy 0, je sestavena opačně (01010101). Tím je zajištěn dostatek přechodů, aby přijímač stihl zareagovat na příchozí data. [7]

Adresa

Položka adresy představuje 3 až 5 bytů adresy vysílače. Adresa je tak přijata jen přijímačem, u něž je nastavena v některém z jeho přijímacích kanálů. Zároveň také zabraňuje přeslechům mezi dalšími moduly. Adresa je nastavena pomocí registru *SETUP_AW*.

V adrese musí být obsažena více než jedna změna bitu, aby nebyla detekována při šumu a nedošlo tak k falešné detekci. Zakázaný formát je například 0000FFFFFF. Dalším případem chybného zápisu adresy je opakované přepínání nul a jedniček, jenž může být detekováno jako pokračování synchronizační hlavičky (0101010101). [7]

Informace o paketu

Informace o paketu jsou rozšířením pro funkci Enhanced Shockburst a jsou složeny z 9 bitů, které lze rozdělit do tří částí. Jako první je posláno 6 bitů určující délku, které jsou posílány jen, je-li požadována proměnná délka zprávy (*DPL*).

V další části je posílána informace o identitě paketu. Podle dvoubitové informace je přijímač schopen určit, zda je přijatý paket nový nebo znovu poslaný.

Jako poslední je předávána bitová informace o tom, zda má být po přijetí paketu odeslán potvrzovací signál. Při stavu 1 je potvrzení zrušeno. Tato funkce je použita pouze v případě, že je požadováno automatické potvrzování. Zrušení potvrzování jednoho konkrétního paketu lze operací *W_TX_PAYLOAD_NOACK* ovšem pouze v případě, že je povolena v registru *FEATURE* nastavením bitu *EN_DYN_ACK*. [7]

Zpráva

V jedné zprávě může být jinému modulu posláno až 32 bytů informací. Funkce Enhanced Shockburst poskytuje dva druhy délek zprávy a to délku statickou nebo dynamickou.

Standardně je nastavena pevná délka zprávy. Na straně přijímače je nastavena pomocí registrů *RX_PW_Pn*, kde *n* je číslo kanálu. Pro každý kanál tedy může být nastavena jiná délka zprávy. Na straně vysílače je délka dána počtem bytů poslaných do vysílacího zásobníku. Obě délky se musejí rovnat.

Povolením možnosti proměnné délky zprávy nastavením bitu *EN_DPL* v registru *FEATURE* umožníme vyslání informace o její délce. Na straně vysílače musí být nastaven bit *DPL_Pn* odpovídajícího kanálu v registru *DYNPD*. Je-li očekáván paket s proměnnou délkou zprávy je její délka dekódována automaticky namísto toho, aby se porovnávala s délkou nastavenou v *RX_PW_Pn* registru.

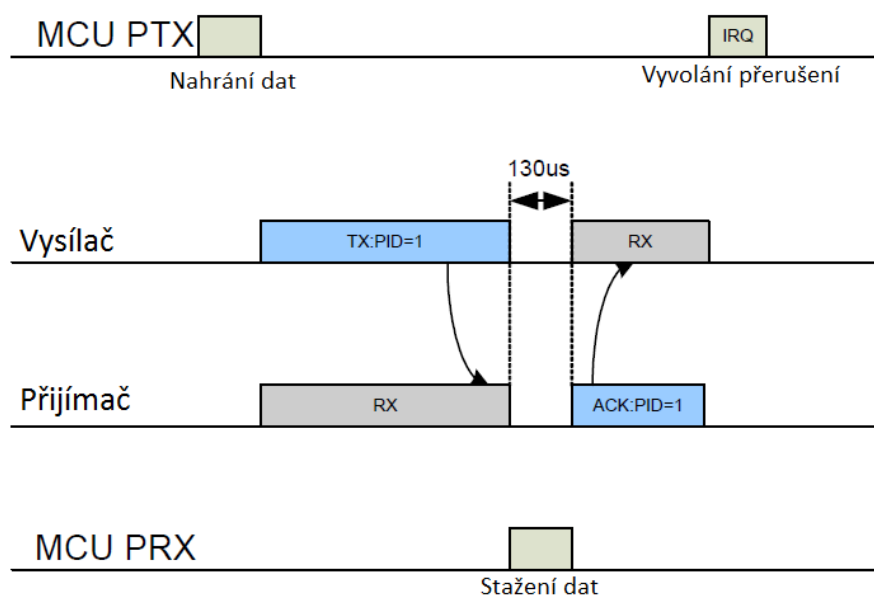
Mikrokontrolér může zjistit délku přijaté zprávy operací *R_RX_PL_WID*. Vracená hodnota se musí vždy pohybovat v rozmezí 0 až 32, je-li hodnota vyšší, pak přijatá zpráva je vadná a musí být vymazána použitím operace *FLUSH_RX*. [7]

CRC (Cyklický redundantní součet)

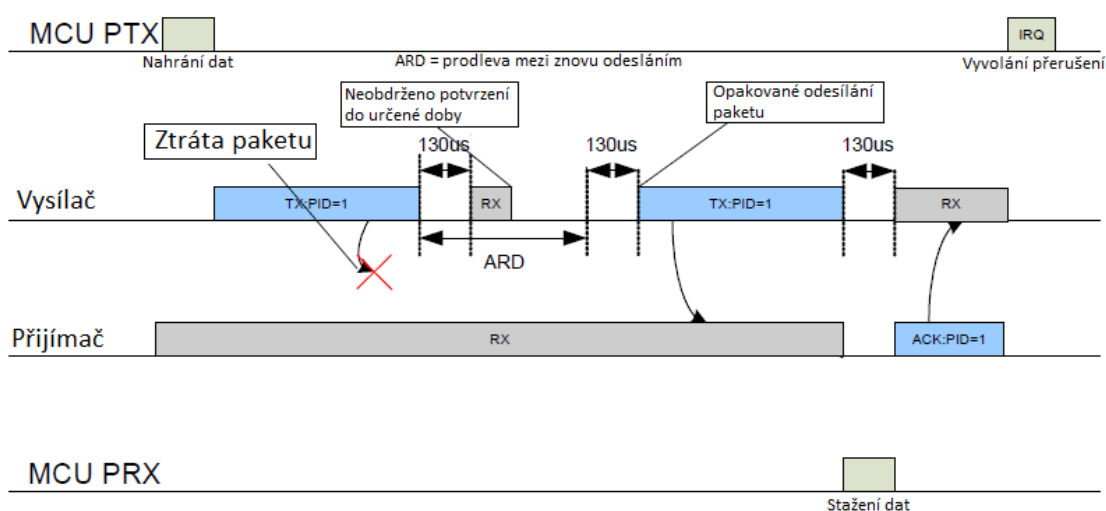
Představuje povinnou chybovou detekci vypočítanou z adresy, informace o paketu a zprávy pomocí polynomu. Počet bytů je nastaven pomocí bitu *CRCO* v *CONFIG* registru. Při selhání CRC není přijat žádný paket. [7]

2.7.2 Bezdrátový přenos

Pokud je paket vyslán a v registru *AA_EN* je povolena funkce automatického potvrzování, je zařízení funkcí ShockBurst nebo Enhanced Shockburst přepnuto do režimu RX a po stanovenou dobu čeká na odpověď. Není-li žádná odpověď obdržena, dochází opět k přepnutí do režimu TX a paket je poslán znovu. Počet pokusů o znovu odeslání je určen hodnotou *ARC* v registru *SETUP_RETR*. Ve stejnojmenném registru může být také nastaveno zpoždění mezi znovu odesíláním zpráv změnou hodnoty *ARD*. Princip je zobrazen na obr. 10 a obr. 11. Je-li dosaženo maximální hodnoty, je vyvoláno přerušení. V případě obdržení paketu stejného jako předchozí, je porovnán CRC a v případě rovnosti je přijatý paket zahozen (vhodné zejména, když je ztracena informace o potvrzení). [7]



Obr. 10: Princip přenosu paketů s automatickým potvrzováním[7]



Obr. 11: Princip přenosu paketů s automatickým potvrzováním při ztrátě paketu[7]

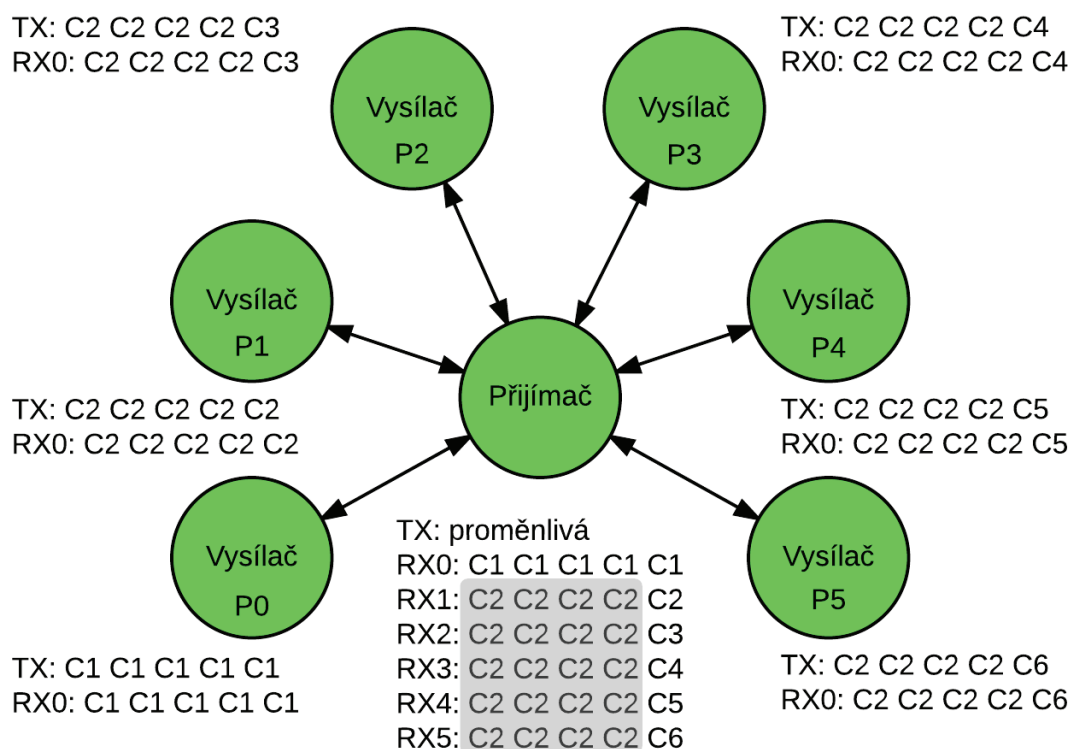
2.8 Vícenásobný přijímač

Každý bezdrátový modul je schopen komunikace až se 6 dalšími moduly. Adresy poslouchaných modulů jsou nastavovány hodnotami registrů RX_ADDR_Pn , kde n je číslo kanálu (PIPE) od 0 do 5. Počet poslouchaných modulů nezávisle na počtu nastavených adres je ovládán pomocí registru EN_RXADDR . Modul nedokáže poslouchat všechny kanály současně. Hlavním důvodem je, že pakety vyslané současně, interferují, čímž dochází ke ztrátě. Při obdržení paketu, je porovnávána nejprve jeho adresová část s adresami nastavenými v registrech. Náleží-li spárovanému vysílači, jsou data uložena do RX_FIFO zásobníku, je zaznamenána délka zprávy a číslo příchozího kanálu, v opačném případě jsou data zahozena.

Pokud je v registru EN_AA nastaveno automatické potvrzování pro daný kanál, pak je přijímač nastaven do vysílacího režimu TX a jako vysílací adresa TX_ADDR je použita adresa daného kanálu, ze kterého byla zpráva obdržena. Poté je odesláno potvrzení o přijetí. Spolu s ním lze také odeslat jinou zprávu. Tuto zprávu je možno nahrát do registru ACK_PLD za pomoci příkazu $W_ACK_PAYLOAD$, jehož posledními třemi bity je určen kanál, na který má být zpráva při potvrzování odeslána.

Při komunikaci více modulů najednou musí být nastaveny správné adresy v registrech TX_ADDR a RX_ADDRn (n zastupuje číslo kanálu). Adresy pro kanál P0 a kanál P1 jsou plně nastavitelné a lze je nastavit v délce 3 až 5 bitů (podle zvolené délky adresy v registru $SETUP_AW$). Adresy pro kanál P2 až P5 sdílí první 4 byty s adresou kanálu P1 a nastavitelný je tedy jen byte poslední.

Pro vysílače, který očekává od přijímacího modulu potvrzení, je důležité, aby jeho adresy TX_ADDR a RX_ADDR_P0 byly totožné, protože kanál P0 je hardwarem použit pro přijímání potvrzení. Vyslané potvrzení nebude přijato ani v případě, že některá z adres P1 – P5 bude stejná jako adresa TX_ADDR . [7]



Obr. 12: Princip adres a komunikace více modulů[7]

3 Senzorická síť

Podstatou senzorické sítě je vzájemná komunikace mezi jednotlivými moduly. Modul nRF24L01+ může komunikovat až s 6 dalšími moduly na jedné frekvenci, ale senzorická síť není tvořena jen pěti nebo šesti moduly. Je potřeba mnohem více senzorů, proto jsou v každé větší bezdrátové síti moduly uspořádány hierarchicky. Za pomoci členění modulů do hierarchie lze tedy vytvořit poměrně rozsáhlou síť, ale čím více je modulů blízko sebe, tím více vzniká přeslechů. Ty lze částečně omezit snížením výkonu.

Pro vytvoření sítě je na výběr hned několik variant. Pro možnost obsluhy více modulů může být využito změny vysílacího kanálu nebo změny přijímacích adres. Hlavní výhodou těchto řešení je nízká spotřeba, protože jednotlivé moduly se musejí dělit o přidělený vysílací prostor, ale nastává také nevýhoda. Při malém počtu mohou být řešení spolehlivá, avšak při počtu větším, nastává problém právě s přiděleným prostorem. Jednotky mají svá vysílací okna, ale s vyšším počtem se vysílací prostor každé jednotky zmenšuje. K síti je tedy možno připojit pouze omezený počet jednotek.

Bylo tedy zavedeno další řešení, u kterého jsou některé moduly využity jako přeposílací stanice. Síť je tedy vytvořena do topologie stromu.

3.1 Senzorická jednotka

Senzorická jednotka, nebo také senzor, je složena ze dvou hlavních částí. První, je komunikační modul nRF24L01+, který obstarává rádiové spojení s ostatními senzory sítě a druhou, je mikrokontrolér, který plní funkci obsluhy a sběru dat z čidel.

3.1.1 Komunikační modul

Pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotkami je využit modul nRF24L01+, jemuž byla věnována předchozí kapitola. V nepřetržitém režimu provozu při maximálním zatížení by při kapacitě baterie 1 000 mAh byl modul schopen komunikovat asi 3 dny a 9 hodin, při opačném extrému v režimu nízké spotřeby pak bez mála 127 let (bez komunikace, pouze režim Power Down). Proto byla zavedena časová okna, s jejichž pomocí se při periodickém vysílání po 1 vteřině doba výdrže prodloužila ze tří dnů na 2 až 3 roky.

3.1.2 Obslužný mikrokontrolér

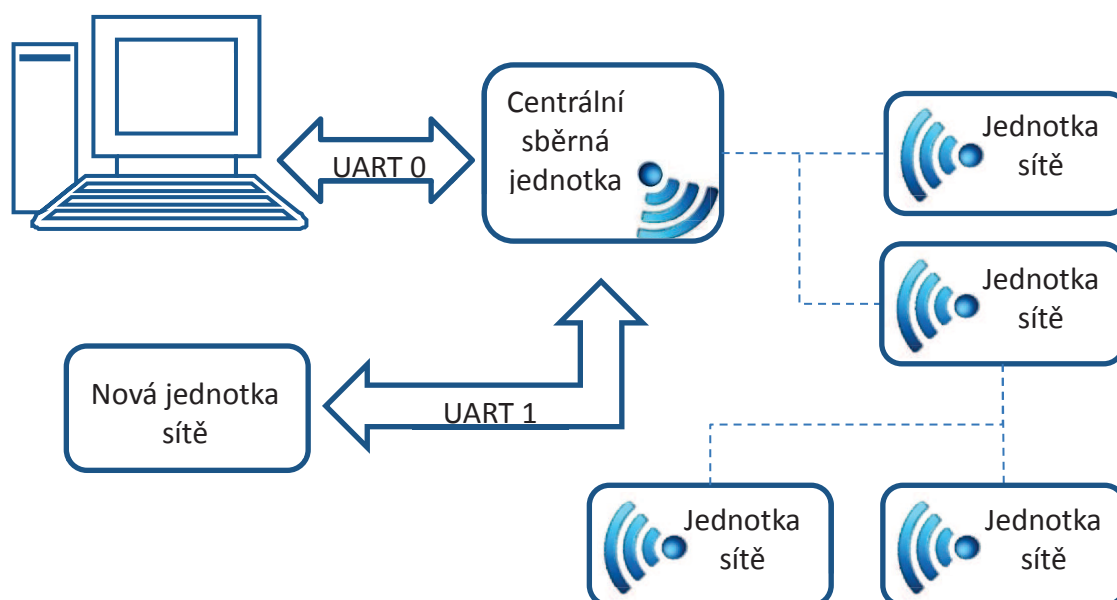
RF modul samotný nedokáže uchovávat hodnoty registrů bez přítomnosti napájení, proto musejí být tyto hodnoty vždy po opětovném připojení napájení znovu nastaveny. Nastavení registrů obstarává obslužný mikrokontrolér, který načítá uložené hodnoty (pokud existují) z paměti EEPROM. V určitých případech sám RF modul zažádá mikrokontrolér o pozornost vysláním signálu přerušení.

3.1.3 Zápis dat

Veškerý zápis dat pomocí rozhraní UART je prováděn přes vnitřní FIFO zásobníky, které jsou schopny uložit bez povšimnutí jednotky až 100 bytů. Pro oba UARTy 0 a 1 jsou k dispozici zásobníky pro zápis i čtení.

3.2 Chování sítě

V následujících řádcích je důležité odlišit pojmy jednotka a *centrální* jednotka. Každá senzorická jednotka sítě vykonává jednu ze tří možných funkcí. Jedinou funkci zastává centrální jednotka, která shromažďuje obdržené informace, případně vysílá požadavky a jako jediná má pevný zdroj napájení. V paměti EEPROM uchovává kromě hodnot pro inicializaci RF modulu také adresy a vysílací intervaly o všech jednotkách připojených k síti. Až na výjimky, kdy je třeba poslat informace modulům sítě, se centrální jednotka nachází neustále v přijímacím režimu. Komunikaci přes rozhraní USB/UART lze z počítače prostřednictvím centrální jednotky nastavovat nebo jen číst hodnoty registrů jednotlivých senzorů v síti. Další, nejjednodušší funkci v síti zastává koncová senzorická jednotka, která komunikuje jen se svou nadřazenou jednotkou. Ta pracuje zároveň v režimu opakováče, kdy jsou přijímané informace od podřazených jednotek a přeposílány jednotce nadřazené. Koncepční schéma senzorické sítě je vyobrazeno níže na obr. 13.



Obr. 13: Koncepční blokové schéma - Přehled sítě

3.2.1 Inicializace

Každá senzorická jednotka se po připojení napájení snaží načíst hodnoty parametrů uložených v paměti EEPROM. Mezi parametry se řadí např.: adresy jednotek, se kterými jednotka komunikuje, interval vysílání, doba vysílání, rychlost vysílání, vysílací pásmo atd. Pokud parametry neexistují, znamená to, že modul ještě nebyl do žádné sítě zařazen. Po nastavení všech parametrů přechází jednotky sítě do režimu aktivní komunikace, kdy se v nastavených intervalech pokouší o spojení se svými nadřazenými jednotkami. Nastavení parametrů u centrální sběrné jednotky řešeno obdobným způsobem. Pokud však neexistuje záznam nastavení v paměti EEPROM, čeká jednotka na nastavení z počítače.

3.2.2 Připojení nové jednotky

Pro připojení nového senzoru k síti, musí být senzor připojen k centrální jednotce přes rozhraní UART 1. Prostřednictvím počítače je nová jednotka zařazena do stromu sítě a je jí nastavena volná fyzická adresa. Tato adresa je poté uložena k ostatním adresám sítě v paměti EEPROM. Standardní vysílací interval nově připojeného senzoru je 1 minuta. Interval určuje, jak často senzor odesílá naměřená data nadřazenému senzoru v síti. Hodnotu vysílacího intervalu, stejně jako ostatní hodnoty v paměti EEPROM, lze změnit prostřednictvím počítače. Jakmile je nastavení senzoru hotovo, spojí se centrální jednotka s nadřazeným senzorem nově připojeného senzoru a předává mu informace o nastavení, včetně zvolené adresy. Podrobnější popis je uveden v kapitole 3.7 zabývající se podrobnějším postupem inicializace.

3.2.3 Master Identity

Identifikátor MASTER IDENTITY (MID) představuje druh ochrany při sběru dat mezi sítěmi se stejnými adresami, ale jinými centrálními jednotkami. MID je stanoveno fyzickou adresou sběrné jednotky. Každá centrální jednotka má jedinečné MID, které je používáno při komunikaci mezi jednotlivými senzory sítě.

Může nastat situace, kdy je MID centrálních jednotek shodné. Proto se centrální jednotka snaží o komunikaci s jednotkou se stejnou adresou. Při úspěchu buď svou adresu změní sama, nebo požádá o změnu uživatele (PC). Po změně je opět proveden test „volnosti“ adresy. Více v kapitole 3.5.3. Jeden komunikační kanál je tedy obsazen vlastní adresou centrální jednotky.

3.2.4 Komunikace a její vliv na spotřebu

Při komunikaci je vysláno nejprve MID a poté zbytek zprávy. Tak jednotka pozná, že komunikuje se svou podřazenou, či nadřazenou jednotkou ze stejné sítě. V případě, že více jednotek vysílá najednou, dochází ke ztrátám dat a vlivem toho také k vyšší spotřebě.

Pro snížení spotřeby a zamezení současnému vysílání jsou zavedena „vysílací okna“, kdy každá z jednotek vysílá či přijímá zprávy dle časového plánu. Každá senzorická jednotka však může začít komunikovat v jinou dobu a s jinou periodou, proto jsou o těchto parametrech nadřazené jednotky informovány. Časování však může být nepřesné, proto je u přijímače vytvořena časová rezerva tím, že začíná naslouchat dříve, než začne samotné vysílání podřazené jednotky. Při přijímání v intervalu jedné minuty, o přijímací době 1 ms (poměr aktivity 0,002 %) a kapacitě baterie 1000 mAh, by napájení vystačilo na cca 19,5 roku.

3.3 Princip komunikace sítě

Každému bezdrátovému modulu v síti je nastavena specifická adresa. Je-li požadována i funkce automatického potvrzování, musí komunikace probíhat oboustranně, a proto se adresy obou RF modulů pro vysílání a přijímání musejí rovnat. Moduly mohou komunikovat jedním směrem na jedné adrese a druhým směrem na jiné. Každá jednotka může mít na starost přeposílání zpráv až od 5 jednotek pod sebou. Vysílá-li více jednotek zároveň, mohou být některá data ignorována.

3.3.1 Komunikační pakety a adresování

Pro komunikaci jsou využity dva druhy komunikačních paketů uvedené na obr. 14 a obr. 15. Jeden pro shromažďování dat a druhý pro udělování příkazů. Oba pakety začínají 5 bytovou MID adresou a mohou přenést 1 až 21 bytů.

Shromažďovací paket je využíván pro vyslání zprávy nadřazené jednotce v síti a kromě MID obsahuje také adresu vysílací jednotky, aby počítač věděl, ke které jednotce má zprávu přiřadit. Následuje samotná zpráva. Zpráva je dělena na dvě odvětví, hodnotové a informační. Ověřování podle informačního formátu je prováděno jen v případě, že byl vyslán požadavek na její vyslání.

MID 5 bytů	Adresa vysílací jednotky 5 bytů	Typ zprávy 1 byte	Zpráva 1 - 21 bytů
---------------	------------------------------------	----------------------	-----------------------

Obr. 14: Shromažďovací paket

Příkazový paket je určen pro ovládání jednotlivých senzorických jednotek a s jeho pomocí může být nastavena hodnota výstupního portu či změněna hodnota v paměti EEPROM. Pokud je požadována zpětná vazba, je z určené jednotky vyslána informační zpráva. Zpráva je prověřována podle očekávaného formátu zprávy, který je vytvořen a očíslován spolu s příkazovým paketem. Příkazový paket obsahuje 5 bytovou cestu sítě k cílové jednotce. Každý byte zastupuje jednu úroveň sítě. Může být tedy adresováno 5 úrovní sítě, což je cca 3905 senzorických jednotek.

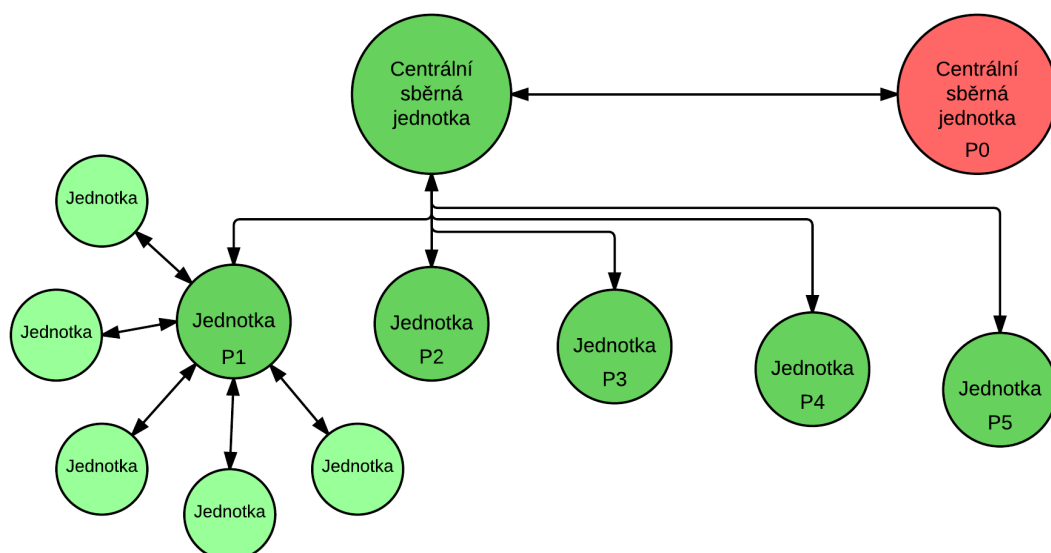
MID 5 bytů	Cesta k cílové jednotce 5 bytů	ID 1 byte	Zpráva 1 - 22 bytů
---------------	-----------------------------------	--------------	-----------------------

Obr. 15: Příkazový paket

Síť je rozvržena do topologie stromu podle obr. 16, kdy je každá jednotka schopna komunikovat s jednou nadřazenou a až pěti podřazenými jednotkami. Centrální sběrná jednotka nemá žádnou nadřazenou jednotku a proto je její volná adresa určena ke komunikaci s jinou sítí. Tato komunikace není záměrná a dochází k ní pouze, jsou-li MID adresy obou sítí stejné.

Přijatý paket od podřazené jednotky (shromažďovací) není nijak zpracováván. Je pouze ověřeno platné MID a poté je uložen do zásobníku, aby spolu s vysílacím intervalem mohl být přeposlán nadřazené jednotce. Tímto způsobem jsou zprávy přenášeny celou sítí až do počítače.

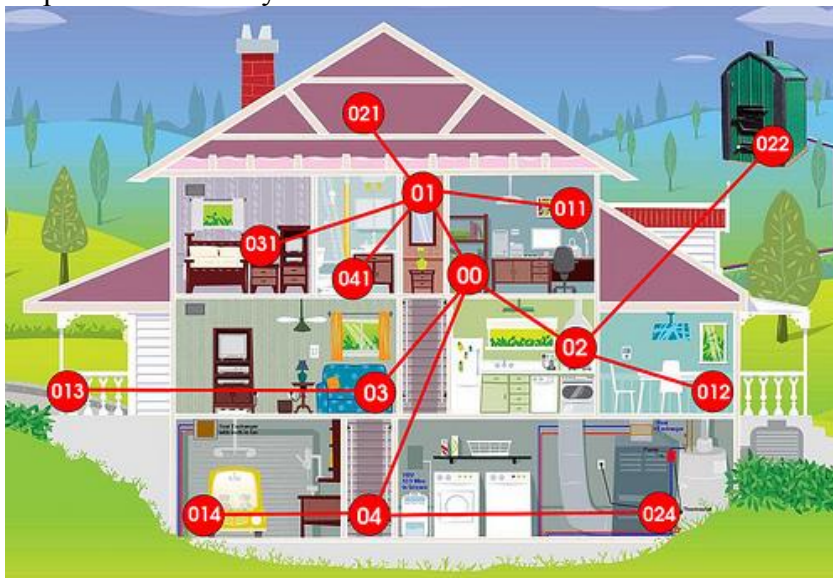
Pokud je přijat paket od nadřazené jednotky (příkazový), je opět ověřeno MID. V případě, že náleží síti, je dále zpracována jeho cesta k cílové jednotce neboli adresa jednotky v síti. V každé jednotce je porovnáván pouze první byte této adresy. Je-li jeho hodnota v rozmezí 0 až 4, pak paket nenáleží této jednotce. Hodnota prvního bytu je smazána a na její místo jsou posunuty hodnoty za ní. Na poslední (páté) místo cesty k jednotce je zapsána hodnota 0xFF, která zastupuje neplatnou hodnotu. Cesta k cílové jednotce je každým přeposláním posouvána až na hodnotu 0xFF FF FF FF FF. V takovémto případě je první byte neplatný a zpráva je vyhodnocena. V případě, že je požadována odezva, je jednotkou odeslána kromě hodnotové, také informační zpráva.



Obr. 16: Rozvržení senzorní sítě

3.3.2 Praktické využití

Následující obr. 17 ukazuje možné využití bezdrátové senzorní sítě v domácnosti. Číslování jednotek zastupuje cestu k cílové jednotce. Na rozdíl od paketu na obr. 15, kdy je postupováno zleva doprava, je v tomto případě postupováno opačně. Nulu na první pozici si lze odmyslet.



Obr. 17: Využití sítě v obytných prostorách [6]

V případě odeslání zprávy jednotce na obrázku výše s označením 013 (vlevo) by příkazový paket vypadal následovně. Jak již bylo zmíněno výše, nulu je možno vypustit a ostatní čísla převrátit. Výsledná cesta k cílové jednotce v hexadecimálním formátu je tedy 0x03 01 FF FF FF. Zpráva vyslaná z centrální jednotky, označené hodnotou 00, je nejprve přeposlána jednotce 3 (03) a poté jednotce 1, tedy jednotce 31 (na obrázku označené jako 013).

3.4 Popis programové části v počítači

Hlavní význam počítače je pro zajištění pohodlné komunikace s uživatelem a zobrazení nashromážděných dat ze sítě. Jednotky sítě jsou přehledně zobrazeny do topologie stromu, kde jsou zobrazeny poslední přijaté zprávy spolu s příchozím časem. Každou jednotku lze libovolně pojmenovat, čímž není ztracen přehled o získaných zprávách i v objemnější síti. Při inicializaci je zajištěna unikátní volba adres, které jsou použity při nastavení obyčejné či centrální jednotky.

V obslužném programu se lze setkat se čtyřmi odděleními neboli záložkami. První je záložka diagnostiky, kde je monitorován datový tok portem. Další dvě slouží pro inicializaci centrální jednotky a nové jednotky a na poslední záložce je zobrazena mapa sítě. Po spuštění programu jsou v 5 vteřinovém intervalu prohledávána připojená zařízení na COM portech. Je-li nalezena centrální jednotka, je navázáno spojení. V případě, že centrální jednotka není nastavena, je uživatel vyzván k zadání inicializačních parametrů. Pokud je jednotka již nastavena a programem spuštěna, je do počítače automaticky zaslána konfigurace sítě. Počítač vytvoří virtuální obraz sítě a začne přidružovat příchozí zprávy jednotlivým adresám. Program se však dokáže připojit k centrální jednotce i dodatečně, kdy je senzorická síť již aktivní. V tomto případě je nahrána konfigurace sítě jen na vyžádání počítače. Zaslání konfigurace sítě je vyžadováno pouze v případě, že v počítači ještě nebyla vytvořena síť nebo na žádost uživatele. Při opětovném odpojení a připojení program konfiguraci nevyžaduje, protože se zánikem předchozí sítě by došlo ke ztrátě zpráv předchozí sítě.

3.4.1 Diagnostika

Záložka *Diagnostika* je zobrazena ihned po spuštění programu. Vlevo na spodní liště je vypsán stav připojení k portu a jeho název. Na liště se dále nachází dvě tlačítka. První je určeno pro opětovné vyhledání k portu. Při kliknutí je okamžitě vyhledána centrální jednotka. Při podržení je zobrazena nabídka, kde je možné si vybrat, na který port bude program připojen. Druhé tlačítko slouží pro řízení toku dat. Program buď port poslouchá a data jsou vypisována do konzolového okna výše, nebo je port ignorován.

Nad lištou se nachází příkazový řádek a vedle něj zaškrťovací pole s popiskem *hex*. Při zaškrtnutí jsou všechna příchozí data převedena do hexadecimální soustavy a pro přehlednost oddělena mezerou. Při zaškrtnutí nebo odškrtnutí políčka nejsou v žádném případě ovlivněna již vypsána data. Dále vpravo se nachází tlačítko s nápisem *Poslat*. Tímto tlačítkem dojde k vypsání obsahu příkazového řádku do konzole a tedy poslání do centrální jednotky, nebo k vykonání příkazu.

Pomocí příkazů mohou být přečteny hodnoty registrů v RF modulu i hodnoty uložené v paměti EEPROM centrální jednotky. Pro přečtení registru slouží příkaz „r>“ a pokračovat zadáním hodnoty registru reprezentovanou hexadecimální hodnotou od 0x00 po 0x1D. Pro přečtení hodnot v paměti EEPROM lze využít příkaz „e>“, který je následován hexadecimální hodnotou určující adresu buňky. Mapa EEPROM paměti centrální sběrné jednotky i obyčejné přeposílací jednotky je uvedena v příloze. Pro samostatné zadání hexadecimální hodnoty slouží příkaz „hex>“. Konfigurace sítě může být kdykoli smazána příkazem „clr“, na který jednotka po dokončení operace odpoví zprávou „ok“. Poté jsou všechny informace o nastavení v EEPROM smazány. Změny se projeví až po restartu centrální jednotky.

3.4.2 Inicializace

Pokud není centrální jednotka nastavena, je zobrazena záložka *Inicializace*. Uživatel je vyzván k zadání níže zmíněných parametrů.

Volba vysílací frekvence je volena v rozsahu 2400 MHz až 2525 MHz. Parametr lze ručně vypsat nebo zvolit z vysunovacího seznamu. Při zadání neplatné hodnoty nebude dovolena žádná další změna.

Dalším nezbytným parametrem je volba adresy centrální jednotky, která bude použita při komunikaci jako adresa MID. Adresa je již z počátku náhodně zvolena a lze ji náhodně změnit stisknutím tlačítka s obrázkem dvou zelených šipek napravo od textového pole nebo ručním zadáním vlastní adresy v hexadecimálním tvaru přímo do textového pole. Pole je vypisováno přes automatický formát a jednotlivé byty jsou odděleny mezerou. Při nekompletní adrese není dovolena žádná jiná změna.

Komunikační rychlost je volena ze tří parametrů. Standardně je nastavena prostřední volba s hodnotou 1 Mbps. Délka zprávy může být zvolena jako statická o délce 1 až 21 bytů nebo dynamická. Standardně je nastavena dynamická délka zprávy, protože je mnohem flexibilnější.

Záložka inicializace je navržena tak, aby byl modul správně nastaven, i kdyby uživatel jen bezmyšlenkovitě potvrdil nastavení. Po inicializaci je do počítače nahrán konfigurační obsah potřebný pro vytvoření virtuální sítě. Ta je zobrazena v záložce *Mapa Sítě*.

3.4.3 Nová jednotka

Při připojení nové jednotky je počítačem obdržena žádost o zařazení do sítě. Nová jednotka bude automaticky přiřazena k větvi sítě s nejmenším počtem jednotek. Úroveň sítě se tedy tvoří postupně s tím, že každá přeposílací jednotka stejné úrovně má stejný počet podřazených jednotek. Spolu s umístěním je také zvolena volná adresa. Poté je zobrazena záložka *Nová jednotka*. V horní části okna je uvedeno, ke které jednotce bude nová jednotka přiřazena. Níže je zobrazena automaticky zvolená adresa. Pokud je jednotka pod nadřazenou jednotkou sama, může být vybrána celá pětibytová adresa. Stisknutím tlačítka napravo bude zvolena jiná náhodně vygenerovaná adresa. V případě, že jednotka pod nadřazenou jednotkou sama není, je adresa volena automaticky bez možnosti změny. Následuje zadání názvu jednotky, pod kterou bude jednotka označována v síti. Standardně je jako název uvedena aktuálně zvolená adresa. Následuje volba vysílacího intervalu ve vteřinách. Interval je možno zadat číselně nebo přetažením posuvníku. Vpravo je zobrazena hodnota intervalu převedená do formátu hodin, minut a vteřin. Ve spodní části okna jsou umístěna dvě tlačítka. Tlačítkem vlevo je zadávání zrušeno. Tlačítkem vpravo jsou zadane hodnoty poslány do centrální jednotky a na mapě je zobrazena nově vytvořená jednotka. V případě, že je potřeba připojit novou jednotku na jinou, než bylo vybráno, může být do příkazového řádku zadán příkaz „AddUnitTo“ následovaný názvem jednotky, ke které má být nová jednotka připojena.

Názvy nejsou ukládány paměti centrální jednotky, ale do složky spouštěcího souboru v počítači, kde je vytvořen soubor obsahující adresy jednotlivých jednotek a jejich názvů. Soubor je vytvářen při nastavení nové konfigurace sítě. Při spuštění bez inicializace je obsah pouze načten.

3.4.4 Mapa sítě

Záložka *Mapa sítě* je zobrazena bezprostředně po sestavení sítě z dat centrální jednotky nebo po novém nastavení. Z vrchní strany je ukotvena centrální jednotka a pod ní jsou automaticky seskupovány podřazené jednotky do hierarchie stromu. První jednotka odvětví je vždy připojena pevně. Pokud je více jednotek na stejné úrovni, jsou rovnoměrně rozestaveny a s centrální jednotkou jsou spojeny křivkou.

Zobrazení centrální jednotky obsahuje pouze adresu a název zatímco zobrazení ostatních jednotek sítě obsahuje navíc ještě údaj času a přijaté zprávy. Za hodnotu času je považována doba příchodu zprávy do počítače nikoli skutečná doba měření. Zobrazení jednotky je shora a zespoda opatřena polokoulemi, které slouží jako místo připojení pro další úroveň jednotek, ale také jako indikace stavu připojení. Polokoule jsou na počátku modré, avšak po připojení jednotky je jejich barva změněna na zelenou. Pokud zpráva dané jednotky nebyla přijata po čas delší než pětinasobek vysílacího intervalu, je jednotka považována za odpojenou a barva polokoule je změněna na červenou. Spolu s polokoulemi mění barvu i spojovací křivky.

Pozice kterékoli jednotky může být změněna uchycením středového bodu a přetažením na požadované místo. Během přetahování je obsah skryt a nově přidané jednotky budou zobrazovány v levém horním rohu. Pro aktivaci automatického uspořádání lze po kliknutí pravého tlačítka myši vybrat z kontextové nabídky položku *AutoArrange*.

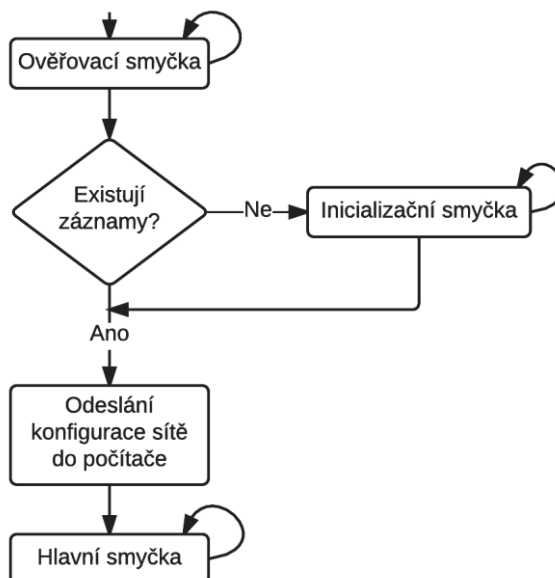
Při dvojkliku na hodnotu poslední zprávy je na pozici jednotky zobrazeno přehledové okno zpráv s titulkem odpovídajícím názvu jednotky. V základním zobrazení jsou v tabulce zobrazeny pouze položky čas a zpráva. Nejnovější zpráva je přidána vždy na první pozici tabulky. Pod tabulkou jsou zobrazena čtyři zaškrťovací pole určující formát zobrazení. První tři pole zastupují sloupce pro zobrazení zprávy ve formátu textu, čísla nebo v hexadecimálním tvaru. Poslední pole slouží pro zobrazení dalších informací o jednotce. Tyto dodatečné informace jsou získávány pomocí již dříve zmíněných příkazových a informačních zpráv. První sloupec odpovídá informacím zadáním v příkazu a druhý sloupec odpovědi. Na spodním okraji okna je uveden aktuální počet přijatých zpráv zobrazené jednotky.

Při organizaci rozsáhlejší sítě může být orientace otevřených oken náročnější. Pokud je okno zobrazeno za jinými okny lze jedním kliknutím na položku zprávy v záložce *Mapa sítě* požadované okno se zprávami jednotky přenést do popředí. V případě dvojkliku na požadovanou jednotku je okno přeneseno do popředí a vycentrováno nad zvolenou jednotkou.

3.5 Podrobný popis chování centrální jednotky

Chování centrální jednotky je určeno třemi hlavními smyčkami. Po připojení k počítači jednotka čeká v ověřovací smyčce, až asociovaný program v počítači zaregistruje její přítomnost.

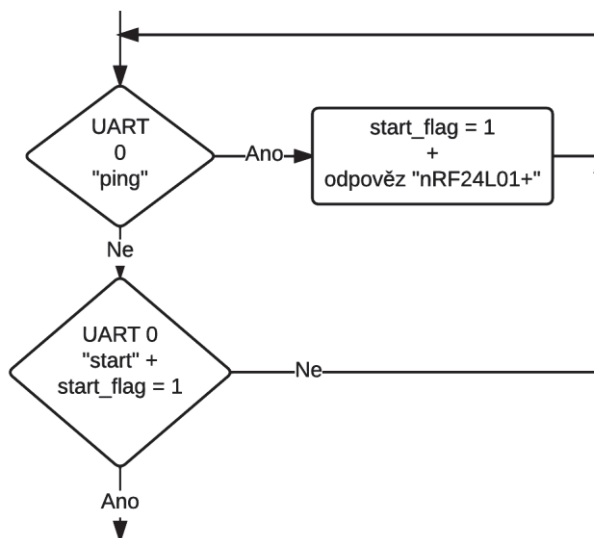
Po spojení je zjištěno, zda je v paměti EEPROM již nějaká konfigurace sítě nastavena. Pokud ne, pak jednotka vyčká na inicializaci od počítače. Během inicializace je nastavován přímo RF modul. Do paměti EEPROM jsou data uložena zpětně až po dokončení inicializace. V následujícím kroku je sestaveno a do počítače odesláno konfigurační pole sítě a centrální jednotka samovolně přechází do hlavní smyčky. Diagram ukazující tento základní princip je uveden na obrázku níže.



Obr. 18: Přehledové schéma chování centrální jednotky

3.5.1 Ověřovací smyčka

Ověřovací smyčka je velmi jednoduchá, a jak je ukázáno na obr. 19, sestává se pouze z ověřování dvou příkazů.

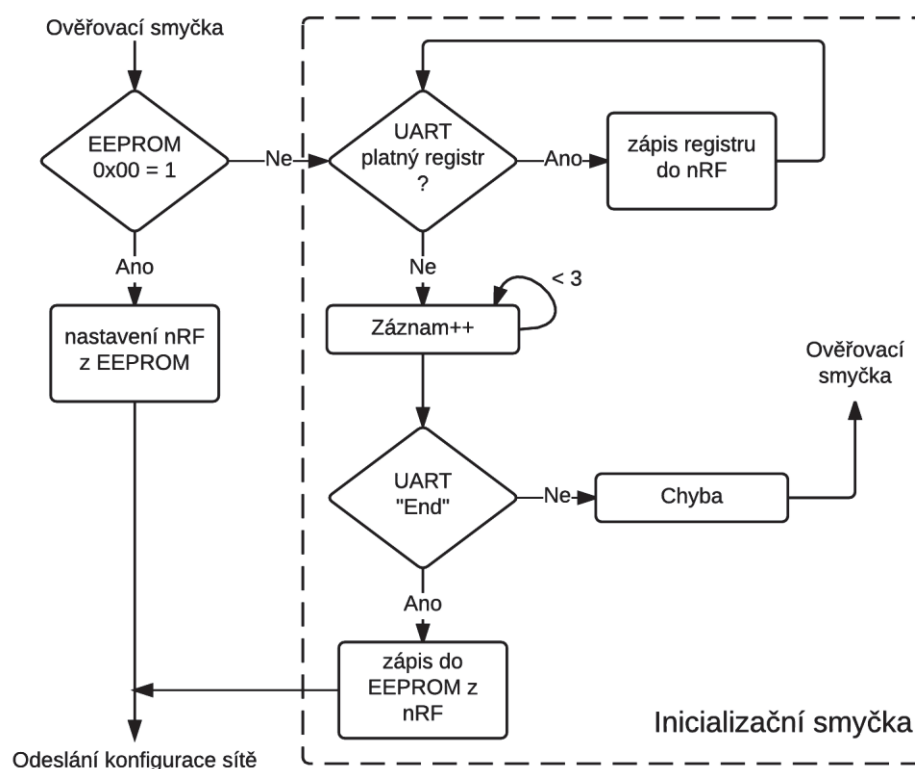


Obr. 19: Ověřovací smyčka centrální sběrné jednotky

Tato smyčka je překonána, obdrží-li jednotka posloupnost příkazů „pingstart“. Při obdržení zprávy odpovídající řetězci „ping“ je počítači poslána odpověď v podobě „nRF24L01+“, aby došlo k oboustrannému spojení. Zároveň je nastavena proměnná *start_flag* na log. 1, kterou je umožněno vykonání následujícího příkazu. Sekvence příkazů není časově omezena, ale nesmí být ničím přerušena. Pokud se tak stane, je proměnná *start_flag* vynulována. Příkaz „ping“ je možno provádět opakovaně bez omezení.

3.5.2 Inicializace centrální jednotky

Na následujícím obrázku (obr. 20) lze vidět inicializační smyčku spolu s ověřením existence záznamů. Záznamy existují, pokud je na adrese 0x00 v EEPROM hodnota 1. Inicializace je tedy přeskočena a z existujících záznamů v EEPROM je nastaven RF modul. Pokud však záznamy neexistují, přechází jednotka do inicializační smyčky, kde čeká na zápis hodnot z počítače. Nejprve je ověřeno, zda poslaný byte je v rozsahu platných hodnot registrů, tedy od 0x00 po 0x1D. Je-li hodnota správná, jsou data registru nastavena. Pokud je ve vstupním zásobníku nedostatečné množství dat, je počkáno na počet odpovídající zvolenému registru. V následujícím případě je diagram na obr. 20 mírně zjednodušený. V případě, že byla zvolena neplatná hodnota registru, je očekáván ukončovací řetězec „End“. Ukončovací řetězec má 3 znaky, proto je v diagramu položka *Záznam++* opakována třikrát, ale pokaždé je nový znak porovnán s odpovídajícím znakem řetězce „End“ a není-li stejný, je do počítačové konzole ohlášena chyba a program se vrací zpět do ověřovací smyčky. Byla-li inicializace úspěšně ukončena, jsou hodnoty nastavených registrů z nRF zapsány do paměti EEPROM a hodnota na adrese 0x00 je rovna 1. Jednotka poté pokračuje odesíláním konfigurace nastavené sítě do počítače.

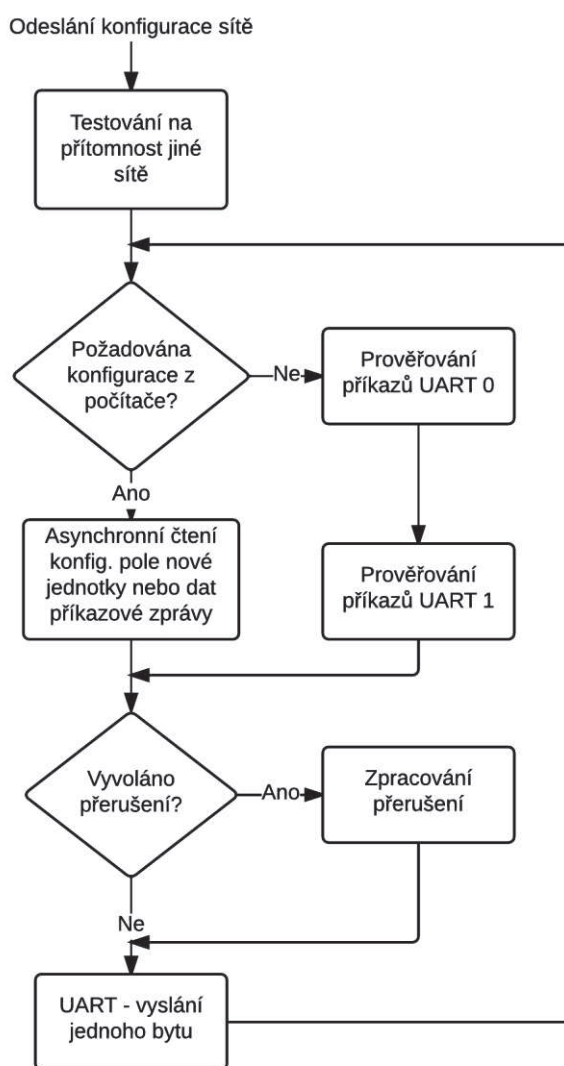


Obr. 20: Inicializační smyčka centrální sběrné jednotky

3.5.3 Hlavní smyčka

Před přechodem do hlavní smyčky je prováděno testování na přítomnost jiné sítě. Testování spočívá ve vyslání zprávy obsahující pouze MID. V případě, že v dosahu bude jiná síť se stejným MID, bude touto sítí vysláno potvrzení o přijetí s aktuálním počtem jednotek této sítě. Vyhodnocení odpovídající zprávy je prováděno níže v bloku zpracování přerušení.

Hlavní smyčka obstarává dvě komunikační části. První zpracovává příkazy z rozhraní UART 0 a 1 a druhá vyhodnocuje vyvolaná přerušení a přeposílá přijaté zprávy do počítače. Pro maximální rychlost je smyčka navržena tak, aby při vykonávání jednoho cyklu byl prověřen jen jeden příkaz a vyslán jeden byte.



Obr. 21: Hlavní smyčka programu centrální sběrné jednotky

Možnosti příkazů rozhraní UART

Vyhodnocování příkazů je prováděno pouze v případě, že není požadována konfigurace z počítače. Zpracovávání příkazů z rozhraní UART 0 zajišťuje komunikaci s počítačem. Tímto způsobem lze snadno zjistit hodnotu kteréhokoli registru nRF modulu nebo paměti EEPROM. Jednotku lze také smazat, zaslat pomocí ní informace jinému modulu v síti nebo jen využít ověřovací příkaz „ping“, který zaručí spojení s počítačem i když je síť již v provozu.

Rozhraní UART 1 má na starost komunikaci s novou jednotkou a obsahuje pouze jeden příkaz. Jakmile je tento příkaz vyvolán, je částečně sestaveno konfigurační pole nové jednotky a počítač požádán o zaslání dodatečných informací.

Tab. 7: Příkazy UART 0

Příkaz	Funkce
Reg + n	Umožňuje čtení registrů z nRF (byte n zastupuje adresu registru)
Epr + n	Umožňuje částečné čtení paměti EEPROM (byte n zastupuje 1 bytovou adresu)
clr	Smazání hodnoty 0x00 v EEPROM (indikace neexistující sítě)
send + L + SA + příkaz	Umožňuje posílání zprávy kterékoli jednotce sítě podle síťové adresy (SA). L zastupuje délku příkazu včetně SA.
ping	Umožňuje detekci centrální jednotky při již spuštěné síti. Jednotka odpoví řetězcem „nRF24L01+running“)
flus	Skartování zpráv v zásobnících TX a RX FIFO

Tab. 8: Příkazy UART 1

Příkaz	Funkce
nRF	Vyslání řetězce „ini“ nové jednotce Částečné sestavení konfiguračního pole Vyslání žádosti o dodatečné informace počítači Indikace „Požadována konfigurace z počítače“

Sestavení konfiguračního pole

Konfigurační pole je složeno z 16 bitů a sestaveno podle obr. 22. První čtyři a posledních pět bytů je sestaveno centrální jednotkou. Jedná se o radiofrekvenční kanál (RF_CH), statickou délku zprávy (RX_PW_Pn), povolení nebo zakázání dynamické délky zprávy (FEATURE a DYNPD) a vlastní adresu centrální jednotky. Dalších 7 bytů je sestaveno až po příchodu konfiguračního pole z počítače.

RF_CH (1 byte)	RX_PW_Pn (1 byte)	FEATURE (1 byte)	DYNPD (1 byte)	TX_ADDR (5 bytů)	Interval (2 byty)	MID (5 bytů)
-------------------	----------------------	---------------------	-------------------	---------------------	----------------------	-----------------

Obr. 22: Konfigurační pole

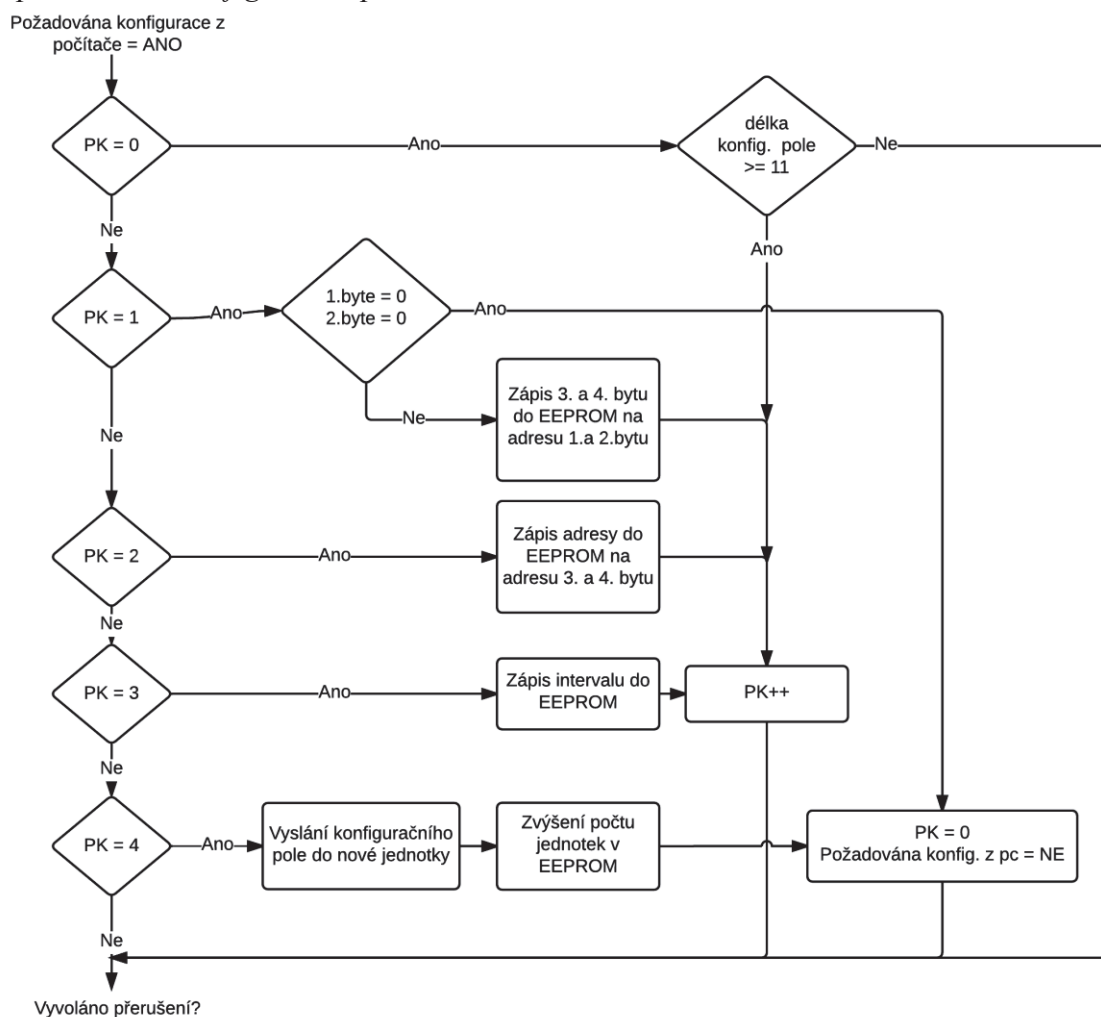
Konfigurační pole z počítače je tvořeno 11 byty. První 4 byty určují pozici senzorické jednotky v síti. Další obsahují novou adresu a vysílací interval.

EEPROM Adresa nadřazené jednotky (2 byty)	EEPROM Adresa nové jednotky (2 byty)	Nová Adresa (5 bytů)	Interval (2 byty)
--	---	-------------------------	----------------------

Obr. 23: Konfigurační pole z počítače

Sestavování konfiguračního pole je provedeno v pěti cyklech, jak je ukázáno na následujícím obr. 24. Nejprve je počkáno na dokončení přenosu části konfiguračního pole z počítače, poté je nastavena proměnná *pozice_konfigurace* ($PK = 1$). Pokud jsou byty 1 a 2 rovny nule, pak byla inicializace jednotky uživatelem zrušena. V opačném případě je zaznamenána do paměti EEPROM hodnota reference na budoucí jednotku.

První 2 byty určují EEPROM adresu, na kterou je dalšími dvěma byty zaznamenána EEPROM adresa nové jednotky. Ve třetím cyklu je zapsána adresa nové jednotky na EEPROM adresu určenou druhými dvěma byty (3. a 4.). V dalším cyklu je zapsán vysílací interval a naposledy inkrementována proměnná PK . Adresa a interval byly zapsány i do konfiguračního pole, které je v poslední fázi vysláno do nové jednotky. Následně dojde ke zvýšení uložené číselné hodnoty počtu jednotek sítě a zrušení módu sestavování konfiguračního pole nastavením proměnných $PK = 0$ a *požadovaná konfigurace z pc = NE*.

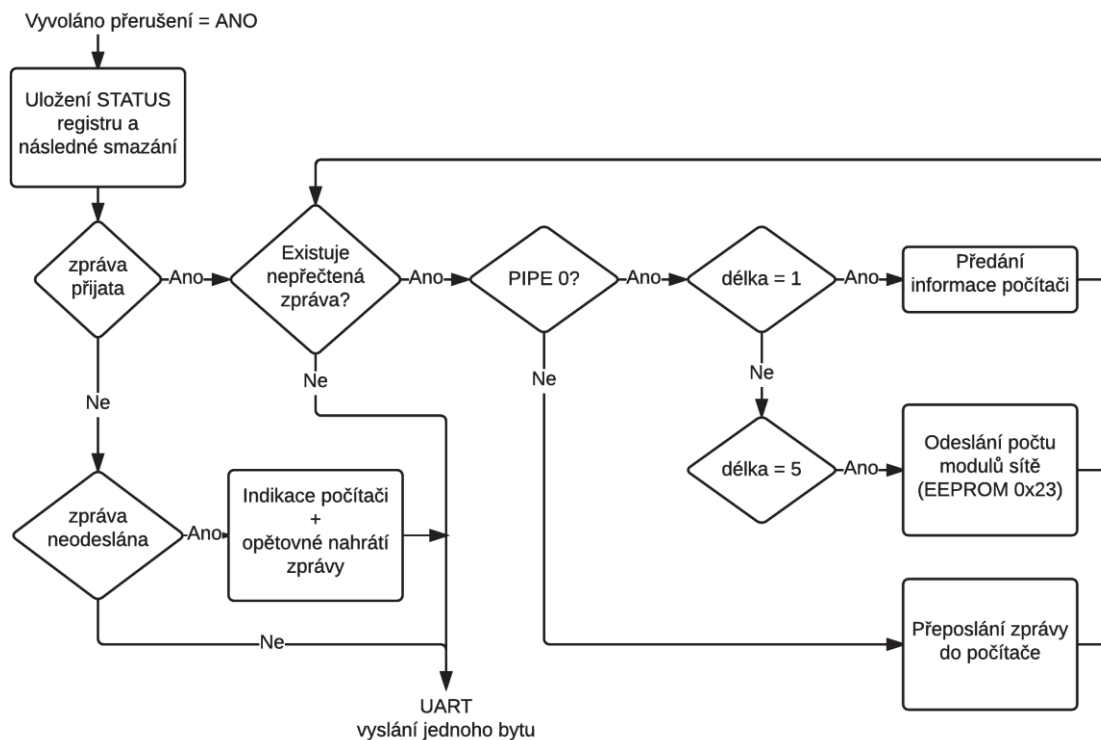


Obr. 24: Sestavení konfiguračního pole

Zpracování přerušení

Při přijmutí několika zpráv najednou v době, kdy je předchozí přerušení zpracováváno, existuje možnost, že bude přerušení ignorováno. Proto musí být indikace přerušení vymazána bezprostředně po vyvolání. Při vyvolání přerušení je nejprve hodnota *STATUS* registru zálohována a poté bezpečně smazána. Se zálohovanou hodnotou je dále pracováno pro zjištění o jaký druh přerušení se jedná.

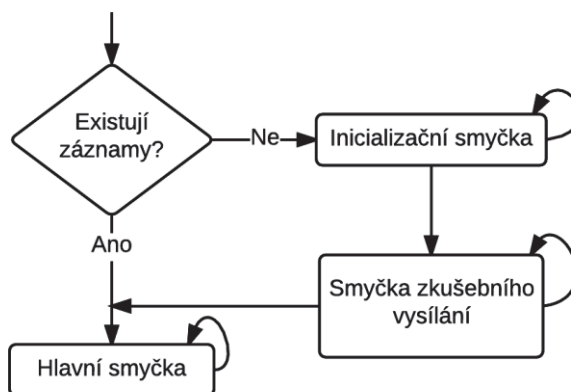
Byla-li přijata zpráva z jiného kanálu než P0, pak je zpráva přes UART 0 přeposlána do počítače. Zprávy z kanálu P0 jsou zvláštní, protože mohou přijít jen od jednotky se stejnou adresou. Kanál P0 je vyhrazen pro komunikaci s centrální jednotkou jiné sítě a jakékoli jiné zprávy ignoruje. Vyhodnocovány jsou pouze zprávy, jejichž délka je 1 nebo 5 bytů. Zpráva s délkou 1 byte je odezvou na vlastní, již poslanou zprávu, a její hodnota určuje počet jednotek v sousední síti. Zachycení zprávy s délkou 5 bytů značí, že byla spuštěna jiná síť se stejným MID. Centrální jednotkou je odeslán počet vlastních modulů a podána zpráva počítači. Zprávy jsou ze zásobníku RF modulu vyčítány tak dlouho, dokud zbývá nějaká ke čtení. Při vyvolání přerušení z důvodu neúspěchu při odeslání zprávy je zpráva opakovaně nahrána pro vyslání a je opět podána zpráva počítači. Dále jednotka pokračuje ve vykonávání hlavní smyčky.



Obr. 25: Zpracování přerušení

3.6 Podrobný popis chování ostatních jednotek

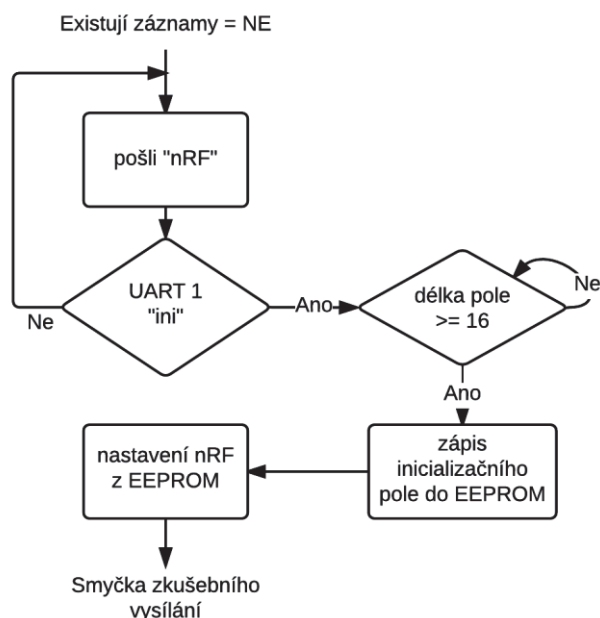
Oproti centrální jednotce má obyčejná jednotka mnohem méně funkcí. Ověřovací smyčka není potřeba, a proto program začíná otázkou, zda existují nějaké záznamy. Pokud záznamy v EEPROM neexistují, je volána inicializační smyčka a poté je provedeno zkušební vysílání. Pokud záznamy existují, dojde pouze k nastavení RF modulu a přechodu do hlavní smyčky.



Obr. 26: Přehledové schéma chování jednotky

3.6.1 Inicializační smyčka

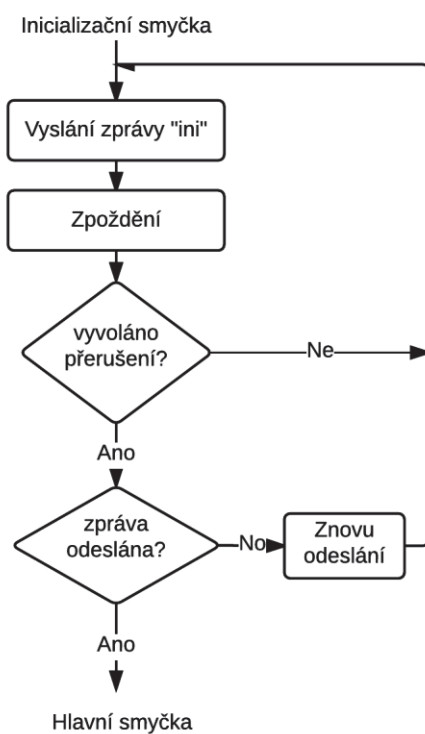
Na obr. 27 lze vidět princip inicializační smyčky obyčejné jednotky. Jednotka v pravidelném intervalu posílá řetězec „nRF“ přes UART 1 a čeká na odpověď centrální jednotky „ini“. Poté čeká, až ji bude posláno inicializační pole a zapíše hodnoty do EEPROM. Nakonec z nových hodnot inicializuje také RF modul a pokračuje do smyčky zkušebního vysílání.



Obr. 27: Inicializační smyčka jednotky

3.6.2 Smyčka zkušebního vysílání

Smyčka zkušebního vysílání slouží pro snadnější navázání spojení s nadřazeným modulem. Nejprve je vyslána zpráva „ini“. Zprávě předchází již zmíněný komunikační formát ve formě MID a adresy vysílače. Protože modul nemůže vysílat neustále z důvodu energetické náročnosti a rušení ostatních jednotek sítě, následuje 50 ms zpoždění. Pokud bylo vyvoláno přerušení, je otestováno, zda zpráva dorazila (potvrzovací pakety), pokud ne, je zpráva opakovaně vysílána. Pokud ano, pokračuje jednotka do hlavní smyčky.

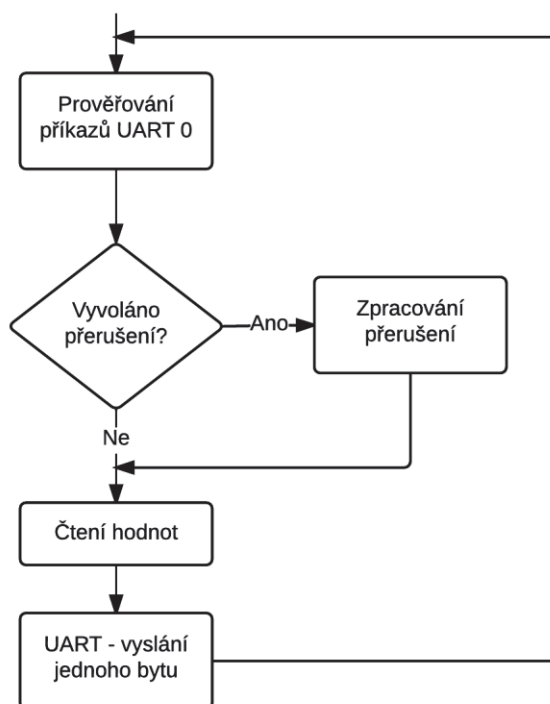


Obr. 28: Smyčka zkušebního vysílání

3.6.3 Hlavní smyčka

Funkce hlavní smyčky je soustředěna na obstarávání přerušení příchozích či odchozích zpráv. Pro testovací účely je možno jednotku připojit přes rozhraní UART 0 k počítači a využít některé základní příkazy uvedené níže, stejně jako vyhodnocení a zpracování při vyvolání přerušení. Funkce čtení hodnot umožňuje číst jakýkoli port nebo ADC převodník a zabalit hodnotu do zprávy. Hodnota je přečtena jen tehdy, je-li čas odeslání zprávy T-1 cyklus časovače. Nakonec je odeslán 1 byte přes rozhraní UART 0, ale vzhledem k tomu, že při běžném použití UART není použit, je funkce přeskočena.

Existují záznamy = ANO



Obr. 29: Hlavní smyčka programu běžné jednotky

Možnosti příkazů rozhraní UART

Na rozdíl od centrální jednotky zde fungují jen 3 základní příkazy určené především pro testování, protože za normálního provozu nejsou nijak využity.

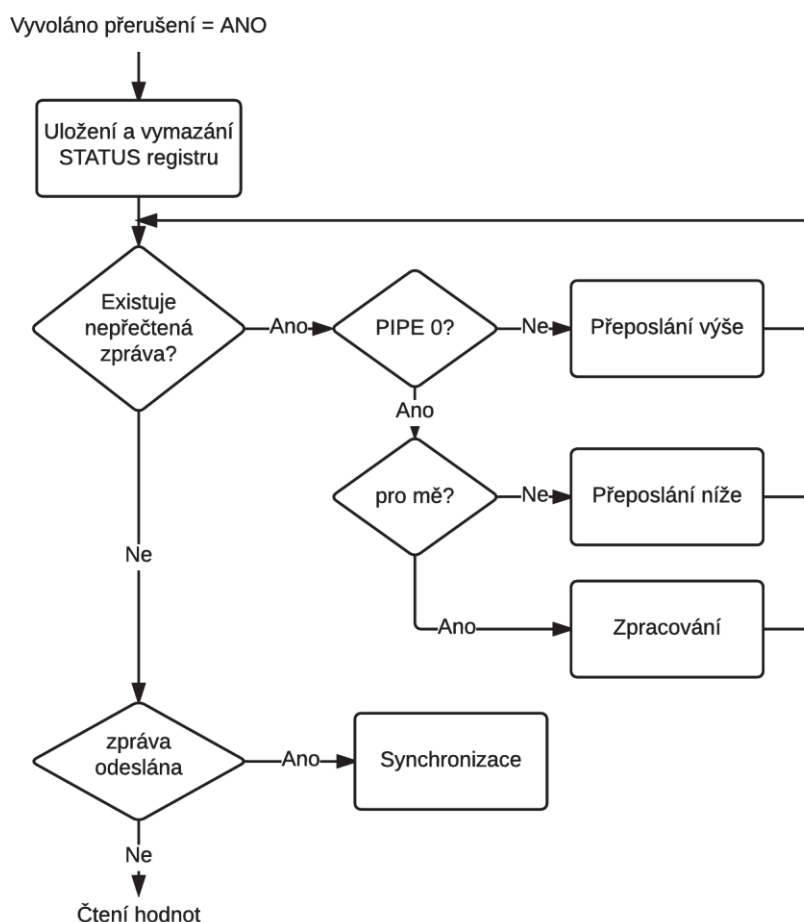
Tab. 9: Příkazy UART 0 běžné jednotky

Příkaz	Funkce
Reg + n	Umožňuje čtení registrů z nRF (byte n zastupuje adresu registru)
Epr + n	Umožňuje čtení paměti EEPROM (byte n zastupuje 1 bytovou adresu)
clr	Smazání hodnoty 0x00 v EEPROM (indikace neexistující sítě)

Zpracování přerušení

Zpracování přerušení probíhá obdobně jako u centrální jednotky. Hodnota *STATUS* registru je nejprve zálohována a následně využita k identifikaci typu přerušení. Pokud byla přijata zpráva, je zjišťováno z jakého kanálu. Zprávy jsou vyčítány tak dlouho, dokud nejsou vyčteny všechny. Zpráva přijatá z kanálu P0 znamená, že byla přijata od nadřazené jednotky. V tomto případě musí jednotka zjistit, jestli je zpráva určena pro ni a v tom případě ji zpracovat, nebo je určena pro některý z jejích podřazených modulů a přeposlat ji. Pokud byla zpráva přijata z jiného kanálu, je pouze přeposlána nadřazené jednotce.

Jedná-li se o odchozí zprávu, která není doručena, pokračuje jednotka ve vysílání ve stejném intervalu, jakmile je přijetí zprávy potvrzeno, jednotka se synchronizuje vynulováním časovače.

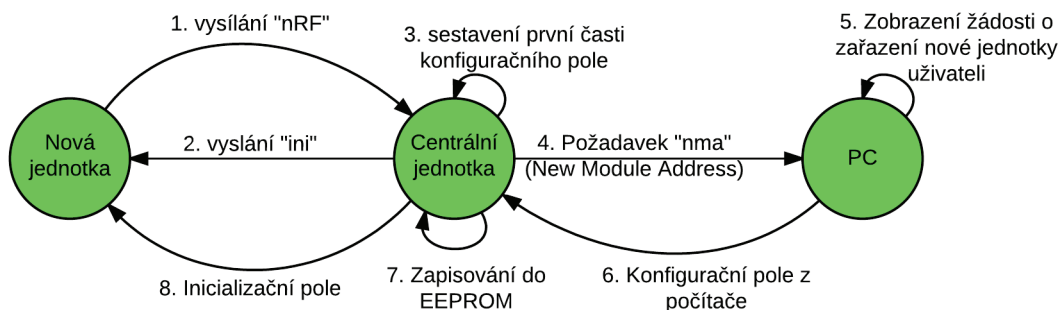


Obr. 30: Zpracování přerušení běžné jednotky

3.7 Postup inicializace nové jednotky

Postup inicializace nové jednotky je názorně vyobrazen na obr.31. Nová jednotka bez inicializace provádí jedinou operaci. V krátkých intervalech, vysíláním řetězce „nRF“ přes UART 1, se snaží o komunikaci s centrální jednotkou. Po připojení k centrální jednotce je zpět vyslán příkaz „ini“, nová jednotka přestává žádat o komunikaci a přechází do inicializační smyčky, kde čeká na příchozí data v podobě 16 bytového inicializačního pole. V centrální jednotce je sestavena první část konfiguračního pole obsahující základní nastavení pro modul nRF a do počítače je vyslána žádost „nma“ o přidělení nové adresy pozice v síti. Poté co počítač nalezne

novou pozici v síti a přidělí adresu, je uživatel dotázán pro zadání časového intervalu a potvrzení připojení nové jednotky. Konfigurační pole z počítače obsahující pozici v síti, novou adresu a interval je ukládáno do paměti EEPROM a sloučeno s první, již dříve sestavou, částí konfiguračního pole. Takto sestavené pole je vysláno k nové jednotce. Po inicializaci funguje nová jednotka jako plnohodnotný člen sítě.



Obr. 31: Postup inicializace nové jednotky

3.8 Časování

Jednotky jsou ve vysílacím režimu jen po dobu vysílání zprávy, ale pro příjem zprávy musí být po celý zbytek intervalu v přijímacím režimu. Oba aktivní režimy jsou pro bateriové napájení energeticky náročné, a proto jsou zavedena časová okna. Časovými okny je řízen proces vysílání a přijímání tak, aby jednotka byla v aktivním režimu jen po nezbytně dlouhou dobu. Po zbytek doby je jednotka převedena do úsporného režimu.

Nadřazená jednotka je nastavena do režimu přijímání 10 ms před začátkem vysílacího okna, aby nedošlo ke zmeškání přenosu. V době začátku okna je podřazenou jednotkou vyslána zpráva. Pokud zpráva není doručena, je opakovaně vysílána. Je-li přijato automatické potvrzení vyslané nadřazenou jednotkou, jsou vyslány i další zprávy (pokud existují). Synchronizace okna je provedena po prvním úspěšném doručení zprávy. Po poslední vyslané zprávě podřazená jednotka čeká po dobu 5 ms na odezvu od nadřazené jednotky v podobě příkazového paketu. Pokud ve stanovené době není přenos proveden, přechází jednotka do úsporného režimu. Je-li příkazový paket přijat, je činnost přijímače ukončena ihned a paket zpracován. Výsledná informační zpráva je vyslána spolu s ostatními v dalším časovém intervalu.

Z pohledu nadřazené jednotky je přijatý příkazový paket nejprve uložen do zásobníku, kde je uchován do příchodu zprávy od jednotky, pro kterou je určen. Aby byl paket vyslán, nesmí přijít zpráva od dané jednotky po dobu 3 ms od přijetí poslední zprávy. Interval je nulován s každou nově přichozí zprávou od dané jednotky. Po uplynutí intervalu je příkazový paket vyslán.

4 Závěr

Na základě důkladného prostudování vlastností a možností bezdrátového modulu nRF24L01+ byla navržena a realizována bezdrátová senzorická síť. Při komunikaci je využito schopnosti RF modulu komunikovat až se šesti dalšími moduly. Síť je navržena do topologie stromu, kdy je každá jednotka schopna komunikovat s pěti podřazenými a jednou nadřazenou jednotkou.

Na vrcholu hierarchie je umístěna centrální sběrná jednotka, která kromě komunikace s podřazenými jednotkami obstarává komunikaci s počítačem. Centrální jednotka určuje hlavní opěrný bod sítě, který zároveň zajišťuje, aby se v okolí nevyskytovala žádná další síť se stejnou konfigurací.

Komunikace jednotek probíhá pomocí dvou druhů paketů. Každá jednotka vysílající nebo přeposílající zprávu, která je určena počítači, komunikuje pomocí sběrného paketu, který obsahuje pouze informace o sledovaném údaji. Pro dodatečné nastavení nebo získání upřesňujících či nestandardních informací, jako jsou například hodnoty registrů RF modulů jednotek či obsah paměti EEPROM, slouží paket příkazový.

Konfigurace nové jednotky je provedena jednoduchým připojením jednotky k centrální jednotce pomocí rozhraní UART. Další konfigurace je již prováděna prostřednictvím počítače.

Jednotky komunikují v přesně daných časových intervalech nazvané jako časová okna, která zaručují snížení celkové proudové spotřeby. Díky nižší proudové spotřebě tak mohou být jednotky napájeny i bateriovým napájením. V případě výpadku napájení se jednotky dokáží se sítí samy synchronizovat.

Sběr a uchovávání přijatých zpráv je zajištěno počítačovým prostředím. Program v počítači také slouží pro nastavení nové jednotky sítě a počáteční nastavení parametrů centrální jednotky. Při inicializaci jsou požadovány jen nezbytné parametry pro funkci sítě, čímž je zaručena výborná přehlednost a snadná konfigurace. V průběhu inicializace může být pro lepší orientaci zvolen vlastní název jednotky. Nastavení je schopen provést i méně zdatný uživatel, který jen bezděčně stiskne potvrzovací tlačítko, protože parametry jsou již přednastaveny.

Při spuštění programu nebo nastavení nové sítě je vytvořen v záložce *Mapa Sítě* virtuální přehled připojené sítě. Jednotky jsou na mapě reprezentovány svým názvem, adresou, časem a hodnotou poslední přijaté zprávy. Podle barevného rozdělení, lze snadno zjistit, které jednotky se aktivně podílejí na komunikaci sítě. Jednotky jsou propojeny spojovacími křivkami, které zpřehledňují jejich zařazení v hierarchii sítě. Poloha jednotek v zobrazení virtuální sítě může být změněna jednoduchým přetažením na požadovanou pozici. *Mapa Sítě* také umožňuje aktivování automatického uspořádání jednotek, kdy jsou všechny jednotky uspořádány do standardního rozložení stromu. Zprávy vybrané jednotky mohou být zobrazeny ve společném okně, kde lze vybrat formát zobrazení.

Program v počítači se dokáže připojit nejen k centrální jednotce, ale také ke kterémukoli aktivnímu portu, a proto je jej možné využít i jako terminál pro jiné aplikace. Pomocí příkazů konzolového okna lze jednoduše diagnostikovat kteroukoli připojenou jednotku v senzorické síti.

5 Seznam použité literatury

- [1] Pásmo ISM. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A1smo_ISM&action=history
- [2] NRF24L01+ 2.4GHz Wireless Transceiver Module. *Deal extreme* [online]. 15.4.2012 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://www.dx.com/p/nrf24l01-2-4ghz-wireless-transceiver-module-126467#.VJJI-1uG91Z>
- [3] NRF T click. *MikroElektronika* [online]. 2012 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://www.mikroe.com/click/nrf-t/>
- [4] NRF24L01+ Module. *Nice gear* [online]. 2012 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://nicegear.co.nz/electronics-gear/nrf24l01-module/>
- [5] Nordic nRF24L01+ Transceiver Module - RP-SMA Connector. *Nice gear* [online]. 2012 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://nicegear.co.nz/wireless/nordic-nrf24l01-transceiver-module-rpsma-connector/>
- [6] RF24Network for Wireless Sensor Networking: Addressing in Detail. *Maniacbug* [online]. 30.3.2012 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://maniacbug.wordpress.com/2012/03/30/rf24network/>
- [7] NORDIC SEMICONDUCTOR. *NRF24L01+ Product Specification* [online]. March 2008 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf

Seznam příloh

A	Mapa EEPROM centrální jednotky	1
B	Mapa EEPROM pro ostatní jednotky	2