

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nasazení protokolu M-Bus v aplikaci "Smart power meter"

Abstrakt

Bc. Vachta, J. Nasazení protokolu M-Bus v aplikaci "Smart power meter"

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická, 2013, 45 str., vedoucí: Ing. Aleš Krutina, PhD..

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na prozkoumání protokolu M-Bus a jeho implementaci do bezdrátových modulů Texas Instruments. Realizovaná knihovna Wireless M-Bus bude vyhovovat normě ČSN EN 13757-4 a standardům pro provoz rádiových zařízení. Protokol M-Bus bude implementován na dvě vývojové desky. Jedna vývojová deska, na kterou bude protokol implementován, bude pomocí integrovaného 12ti bitového A/D převodníku snímat analogové napětí z měřicího transformátoru nebo jiného snímače s výstupním rozsahem 0 až 5V. Změřená hodnota se zapouzdří do protokolu Wireless M-Bus a přes rádiové rozhraní vývojové desky se odešle do desky druhé. Na druhé desce budou data z rámce protokolu Wireless M-Bus extrahována a zobrazena na LCD display.

Klíčová slova:

M-Bus, Wireless M-Bus, WM-Bus, SRD, CC1101, CC2520, MSP430, Texas Instruments Experimenter's Board

Abstrakt

Bc. Vachta, J. M-Bus protocol implementation in the “Smart power meter” application

This thesis is aimed to explore the M-Bus protocol and its implementation in Texas Instruments wireless modules. Implemented Wireless M-Bus library will be conform to standard ČSN EN 13757-4 and standards for electromagnetic compatibility and operation of radio equipment. The protocol will be implemented on the two development boards. The first board, on which be the protocol implementer, will read analog voltage using integrated 12bit A/D converter from the measuring transformer. The measured value will be encapsulated into the Wireless M-Bus protocol and then will be transmitter over radio interface to the second development board. On the second board side, the data will be decapsulated and display on LCD.

Key words:

M-Bus, Wireless M-Bus, WM-Bus, SRD, CC1101, CC2520, MSP430, Texas Instruments Experimenter’s Board

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne:

.....

podpis

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří VACHTA**
Osobní číslo: **E12N0158P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Nasazení protokolu M-Bus v aplikaci "Smart power meter"**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte fyzickou a linkovou komunikační vrstvu protokolu ISO modelu OSI s ohledem na protokol Wireless M-Bus.
2. Zvolte vhodnou obvodovou a programovou realizaci pro vámi navrženou implementaci protokolu wireless M-Bus.
3. Implementaci ověřte v aplikaci "Smart Power Meter".
4. Prezentujte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **User guides Texas Instrumnets, wireles communication**
2. **Datový model dle specifikace ISO/OSI.**
3. **<http://www.m-bus.com/>**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Aleš Krutina

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant diplomové práce:

Ing. Aleš Krutina

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**



L.S.

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Obsah

1 Úvod	9
2 Standard M-BUS (EN 13757)	10
2.1 Fyzická a linková vrstva (EN13757-2)	11
2.1.1 Fyzická vrstva	11
2.1.2 Linková vrstva	12
2.2 Aplikační vrstva (EN13757-3)	14
2.3 Wireless M-Bus (EN13757-4)	15
2.3.1 Fyzická vrstva Wireless M-Bus	15
2.3.2 Linková vrstva Wireless M-Bus	16
2.3.3 Aplikační vrstva Wireless M-Bus	19
2.3.4 Nároky z hlediska legislativy a EMC	20
2.3.5 Praktické aplikace Wireless M-Bus	21
3 Implementace Wireless M-Bus (WM-Bus) na platformě Texas Instruments	22
3.1 Návrh řešení	22
3.2 Realizace	22
3.2.1 Nastavení rádiového rozhraní dle ČSN EN13757-4 na čipu CC1101	22
3.2.2 Nastavení parametrů linkové vrstvy na čipu CC1101	23
3.2.3 Knihovna Wireless M-Bus	24
3.2.4 A/D převodník vysílače	26
3.2.5 Rádiové rozhraní CC1101 a odesílání dat	26
3.2.6 Příjem dat z rádiového rozhraní CC1101	27
3.3 Testovací vysílač Wireless M-Bus s AMB8426-M	28
3.3.1 Program pro testovací vysílač Wireless M-Bus s AMB8426-M	29
3.4 Hardwarové prostředky	29
3.4.1 MSP-EXP430F5438	29
3.4.2 MSP430FG461x Experimenter Board	29
3.4.3 CC1101-EMK	29
3.4.4 MSP430FET-UIF	29
3.4.5 ASIX Presto	30
3.5 Softwarové prostředky	30
3.5.1 Smart RF Studio	30
3.5.2 Code Composer Studio	31
4 Výsledky, možnosti vylepšení	32
5 Závěr	33
6 Přílohy	36
6.1 Obrázky	36
6.2 Schémata	38
6.3 Tabulky	39
6.4 Výpisy kódu	42

Nomenklatura

ACD	access demand
CDC	Communication Device Class
CEPT	The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
DFC	data flow control
DIF	Data Information Field
DSSS	direct sequence spread spectrum
ECC	The Electronic Communications Committee
EMC	electromagnetic compatibility
ERP	Efektivní vyzářený výkon (angl. Effective Radiated Power)
ETSI	The European Telecommunications Standards Institute
FCB	frame count bit
FCV	frame count valid
HDO	Hromadné Dálkové Ovládání
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
ISM	bezlicenční pásmo (The industrial, scientific and medical band)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
JTAG	Joint Test Action Group
OSI	standard pro počítačové sítě (Open Systems Interconnection)
RTTE	Radio and telecommunications terminal equipment
SRD	Zařízení krátkého dosahu (Short Range Devices)
VCP	Virtual Com Port
VIF	Value Information Field
ČTÚ	Český Telekomunikační Úřad
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví

1 Úvod

U bezdrátových sítí krátkého dosahu zaznamenáváme v dnešní době nebývalý rozvoj, objevují se stále nové standardy pro bezdrátovou komunikaci a revidují se staré verze. Z nepřeberného množství nových technologií se podaří prosadit a udržet na trhu jen málokterým. Z perspektivních a aktivně vyvíjených technologií můžeme jmenovat například technologie založené na standardu IEEE 802.15 jako jsou Bluetooth (dnes ve verzi 4.0) nebo síť typu IEEE 802.15.4 a jejich odnože. Do sítí IEEE 802.15.4 patří například i velmi zajímavá technologie Zigbee, síť RF4CE a další. Všechny tyto sítě pracují v bezlicenčním pásmu ISM na 2,4 GHz. Toto pásmo je v dnešní době, zejména ve velkých aglomeracích, čím dál více rušené technologií Wi-Fi¹ a jinými zdroji rušení v tomto pásmu. Většina technologií pracujících v ISM pásmu na 2,4 GHz má poměrně vysoké nároky na napájení, zejména pak špičkové odběry proudu při vysílání, proto je jejich nasazení do zařízení, která mají vydržet v chodu několik let problém. Tento problém se dá snadno vyřešit přerušovaným vysíláním, zařízení v klidu se nachází v režimu spánku s minimálním odběrem a v případě potřeby odeslání dat se zařízení "probudí". Takových zařízení, která vydrží fungovat spolehlivě bez zásahu člověka několik let, je poměrně málo. Jedou z touto technologií může být Wireless M-Bus.

Wireless M-Bus pracuje v pásmu 868 MHz, což je v Evropě bezlicenční, subgigaherzové pásmo pro zařízení krátkého dosahu, které nebude muset řešit problémy s vyšším počtem fungujících zařízení v pásmu ISM na 2,4 GHz. Díky těmto kladům si standard Wireless M-Bus našel cestu do takových zařízení jako jsou chytré měřiče spotřeby elektřiny, tepla i vody, umožňují totiž jednoduchou kontrolu nad spotřebou dnešních domácností. V rámci pilotního projektu ve Vrchlabí jsou nasazeny chytré elektroměry vybavené rozhraním Wireless M-Bus, umožňujícím koncovým uživatelům mít pod kontrolou jak celkovou spotřebu, tak i náklady.

¹Poznamenejme, že např. Bluetooth od verze 3.0 pro své datové přenosy používá také Wi-Fi

2 Standard M-BUS (EN 13757)



Obrázek 2.1: Logo M-Bus

Sběrnice M-BUS (Meter-BUS) byla vyvinuta profesorem Horstem Zieglerem z univerzity Paderborn ve spolupráci s Texas Instruments Deutschland GmbH a Techem GmbH [1]. V mnoha zemích slouží M-Bus pro dálkové odečty z různých měřičů energií. V praxi se můžeme běžně setkat s měřiči spotřeby vody, tepla, plynu i elektřiny. Tento standard specifikuje evropská norma EN 13757, která byla to českých norem ČSN přejata jako:

- ČSN EN 13757-1:2003: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 1: Výměna dat.

Tato část popisuje základní komunikaci mezi měřičem a centrálním datovým kolektorem.

- ČSN EN 13757-2:2005: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 2: Fyzikální a propojovací vrstva.

Tato část popisuje dle ISO/OSI fyzickou a linkovou vrstvu, obsahuje elektrické specifikace sběrnice M-Bus a také přesnou specifikaci datového přenosu po dvou vodičovém vedení.

- ČSN EN 13757-3:2005: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 3: Určené aplikace vrstvy

V této části je řešena problematika aplikační vrstvy dle ISO/OSI, zajišťující příjem a vysílání dat z pohledu aplikace. Uvádí požadavky na výrobce, které musí splnit, aby byla zajištěna kompatibilita mezi zařízeními různých výrobců.

- ČSN EN 13757-4:2006: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 4: Bezdrátová měřidla (Radiometry pro provoz v pásmu 868 MHz až 870 MHz)

Tato část specifikuje bezdrátovou komunikaci wireless M-Bus, její fyzickou a linkovou vrstvu korespondující s 13757-2.

- ČSN EN 13757-5:2009: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 5: Bezdrátový přenos

Část 5 obsahuje různé návrhy pro zvýšení dosahu komunikace Wireless M-Bus.

- ČSN EN 13757-6:2009: Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 6: Lokální sběrnice

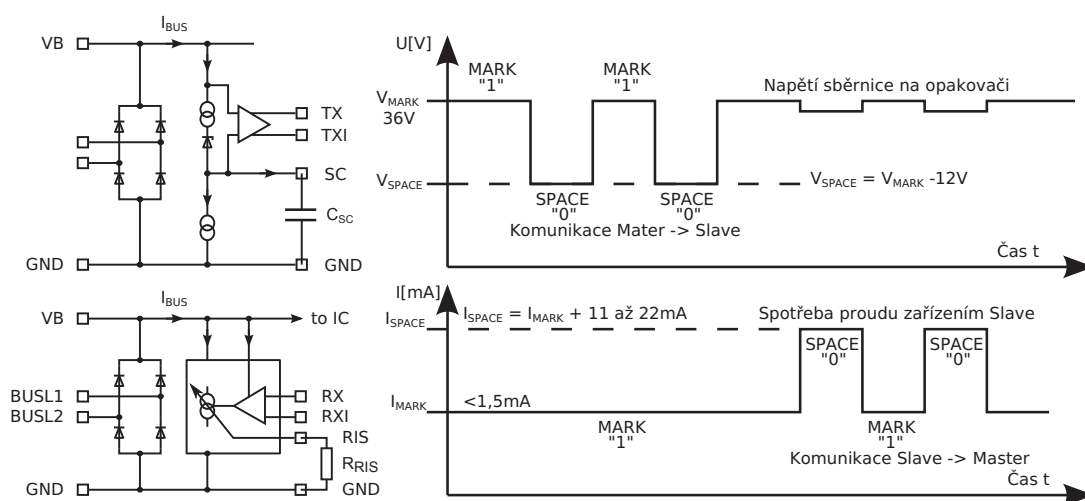
Část 6 obsahuje alternativy k fyzické vrstvě M-Bus pro lokální sběrnice do 5ti měřičů s maximální délkou kabelu 50m.

K výše uvedeným normám se zavázaly tyto státy: Belgie, Česká republika, Dánsko, Estonsko, Finsko, Francie, Irsko, Island, Itálie, Kypr, Litva, Lotyšsko, Lucembursko, Maďarsko, Malta, Německo, Nizozemsko, Norsko, Polsko, Portugalsko, Rakousko, Řecko, Slovensko, Slovinsko, Spojené království Velká Británie, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko.

Tabulka 2.1: M-Bus v kontextu referenčního modelu ISO/OSI

Vrstva	Funkce	Standard
Aplikační	datové struktury, datové typy, operace	13757-3
Prezentační	-	-
Relační	-	-
Transportní	-	-
Síťová	rozšířené adresování (volitelné)	-
Linková	parametry vysílání, formáty rámce, adresace, datová integrita	IEC 870
Fyzická	fyzické médium, bitová reprezentace, topologie, elektrické specifikace	13757-2

2.1 Fyzická a linková vrstva (EN13757-2)



Obrázek 2.2: Princip zařízení M-BUS Master (nahore) a Slave (dole), bitová reprezentace signálu na sběrnici

2.1.1 Fyzická vrstva

Sběrnice M-BUS je napájena napětím 36V (MARK), což je i klidová hodnota. Toto klidové napětí určuje hodnotu log.1. Pokud Master vysílá data směrem k zařízení Slave, moduluje napětí sběrnice. Nižší napětí se označuje jako SPACE(log. 0) a vyšší napětí jako MARK(log.1). Slave musí dle normy detekovat napětí vyšší než $V_{MARK} - 5.5V$ jako Mark a napětí nižší než $V_{MARK} - 8.2V$ jako SPACE. Master obvykle používá pro spolehlivé dosažení hodnoty SPACE snížení napětí sběrnice na hodnotu 24V. V závislosti na vzdálenosti se musí brát v úvahu, že v důsledku odporu sběrnice bude na zařízení Slave hodnota MARK nižší než 36V.

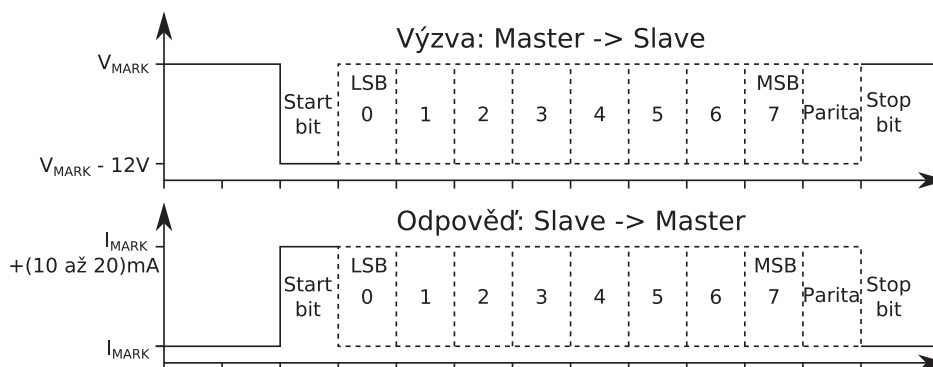
Slave, při své komunikaci se zařízením Master, moduluje svůj proudový odběr takovým způsobem, že klidový stav s odběrem pod 1,5mA reprezentuje hodnotu log.1 (MARK) a zvýšený odběr proudu na 11 až 22mA reprezentuje hodnotu log.0 (SPACE).

Metoda přístupu na sběrnici je tedy typu Master-Slave. Napětí 36V zajišťuje dostatečnou odolnost proti vnějšímu rušení a zároveň je dostatečné pro zajištění spolehlivé komunikace na vzdálenost několika kilometrů.

Jako fyzické médium používá M-Bus klasickou telefonní dvoulinku (JYStY N*2*0.8 mm). Kvůli odporu vedení je maximální vzdálenost mezi jednotlivými zařízeními 350 m. Zařízení mohou komunikovat rychlostmi 300 až 9600 Bd. K sběrnici je možné připojit až 250 zařízení typu Slave.

2.1.2 Linková vrstva

Fyzická vrstva klade na linkovou vrstvu několik požadavků: z důvodu synchronizace musí být minimálně každý 11. bit v úrovni log.1 a je vyžadován poloduplexní asynchronní sériový přenos s rychlostmi 300 až 9600 Bd. Synchronizace probíhá při Start bitu a Stop bitu, není ale vyžadována časová mezera mezi koncem jednoho rámcu a začátkem dalšího, tj. mezi Stop bitem a Start bitem. Struktura přenášeného bajtu (znaku) je na obr.2.3.



Obrázek 2.3: Přenos jednoho znaku po sběrnici M-Bus

Pro protokol M-Bus je definován formát linkové vrstvy třídy FT 1.2, který dle IEC 870-5 obsahuje data třídy integrity² I2, tj. se specifickou Hammingovou vzdáleností 4. Formát třídy FT 1.2 definuje tři druhy rámců, které mohou být rozpoznány podle znaku START. Strukturu jednotlivých typů rámců můžeme vidět na Obr. 2.4.

Dlouhý rámeček [Long Frame]	Start 68h	L	L	Start 68h	C	A	CI	Data 0 - 252 Byte	Check Sum	Stop 16h
Kontrolní rámeček [Control Frame]	Start 68h	L=3	L=3	Start 68h	C	A	CI	Check Sum	Stop 16h	
Krátký rámeček [Short Frame]	Start 10h	C	A	Check Sum	Stop 16h					
Jeden znak [Single Character]	E5h									

Obrázek 2.4: Formát rámcu M-Bus třídy FT 1.2 dle IEC870-5

²Třída integrity je měřítkem kvocientu mezi mírou nezjištěných chyb ve zprávě a pravděpodobností chybně přenesených bitů v průběhu přenosu.

Význam polí rámců linkové vrstvy

Pole L (L-Field, Length Field) [1 bajt] Pole L udává množství uživatelských dat, navýšené o hodnotu 3 (pole C,A,CI).

Pole C (C-Field, Control Field) [1 bajt] Nejvyšší bit (MSB) je určen pro budoucí použití, bit 6 indikuje směr přenosu. Bit FCB (Frame Count Bit) indikuje úspěšné vysílání. Pokud Master nedostane odpověď, vyšle identický telegram se stejným FCB. Hodnota 1 bitu FCV (Frame Count bit Valid) značí, že FCB je použit, v opačném případě by měl Slave bit FCB ignorovat. Bity Fx udávají funkci nebo akci zprávy (např. inicializace Slave zařízení, požadavek na data, atd. viz.: [1])

V opačném směru Slave při DCF=1(Data Flow Control) indikuje, že žádná další příchozí data nebude akceptovat. Nastavením bitu ACD=1 (Access Demand) Slave signalizuje požadavek na vysílání dat vysoké priority (Class 1 data).

Tabulka 2.2: Význam pole C

Číslo bitu	7	6	5	4	3	2	1	0
Směr dotazu	0	1	FCB	FCV	F3	F2	F1	F0
Směr odpovědi	0	0	ACD	DFC	F3	F2	F1	F0

Bity FCB a FCV mohou být použity i v případě, kdy Slave v reakci na dotaz odesílá odpověď, jež je větší než jeden rámec tak, že přepíná bit FCB jako požadavek pro příjem další části rámce.

Pole A (A-Field, Address Field) [1 bajt] Adresové pole A identifikuje jednotlivá zařízení Slave při komunikaci směrem ke kolektoru dat (zařízení Master). Adresové pole má velikost 1 bajt, tzn. může nabývat hodnot 0 až 255. Nekonfigurovaný Slave má hodnotu pole A nulovou, konfigurovaným zařízením Slave může být přiřazena hodnota 1 až 250. Adresy 254 (0xFE) a 255 (0xFF) jsou použity pro broadcast - použitím adresy 255 žádný z participujících zařízení neodpovídá, při adrese 254 odpovídají všechna zařízení Slave vlastní adresou, což může vést ke kolizím na sběrnici, a proto se používá pro testování. Adresa 253 indikuje fakt, že adresace bude prováděna na síťové vrstvě ISO/OSI namísto linkové vrstvy. Zbylé adresy jsou určeny pro budoucí použití.

Pole CI (CI-Field, Control Information Field) [1 bajt] Pole CI je již součástí aplikační vrstvy ISO/OSI a bude detailněji popsáno v kapitole 2.2.

Kontrolní součet (Checksum) [1 bajt] Slouží pro identifikaci chyb na linkové vrstvě a vypočte se jako aritmetický součet výše zmíněných polí (bajtů) bez použití přenosu. Jedná se o operaci XOR.

Proces komunikace Linková vrstva rozeznává dva typy handshaku: handshake typu pošli/potvrď (send/-confirm) a typu dotaz/odpověď (request/respond).

- **Pošli/Potvrď (Send/Confirm):** Při tomto korespondenčním provozu buď Master začíná přenos (C-Field=SND_NKE [1]) a Slave potvrzuje znakem 0xE5, nebo Master odesílá data a Slave indikuje korektní přijetí opět znakem 0xE5, nebo potvrzovacím signálem.
- **Dotaz/Odpověď (Request/Respond):** Master si od zařízení Slave vyžádá Class 2 data (data s nižší prioritou než Class 1). Slave může buď odpovědět odesláním svých dat spolu s RSP_UD, nebo odpověď

vynechá. Slave neodpovídá, pokud dotaz není korektně přijat, nebo nesouhlasí-li adresa obsažená v rámci dotazu, která identifikuje zařízení, se kterým Master komunikuje.

Možnosti detekce chyb na linkové vrstvě

- Kontrola Start bitu, Parity a Stop bitu u každého jednotlivého znaku
- Kontrola bloků Start, Check Sum a Stop v každém rámci
- Kontrola druhého bloku Start, parita dvou bloků délky L a počet přijatých znaků (pole L + 6, viz. Obr.2.4)

Při detekci chyby bude zpráva zahozena. Master očekává potvrzení za dobu trvání 11ti bitů a dobou (330 bitů + 50 ms). Pokud Master potvrzení ve stanovené době neoddrží, pokusí se přenos opakovat. Pokud se přenos třikrát nepodaří, Master čeká minimálně po dobu trvání 33 bitů. Rovněž pokud Slave třikrát po sobě odešle chybný nebo poškozený rámec, čeká také minimálně po dobu trvání 33 bitů. Poté se může Master opět pokusit inicializovat přenos. Pokud i toto selže, posouvá se k další adrese.

2.2 Aplikační vrstva (EN13757-3)

Aplikační vrstva vytváří rozhraní mezi systémem a uživatelem. Aplikační vrstvu využívá buď vyšší služba popř. program, nebo samotný uživatel. Blok CI určuje, jaký typ a část dat aplikační vrstvy se mají ve framu vysílat. Druhý bit pole CI definuje, jak budou data přenášena v multibajtovém záznamu. Pokud je bit log.0, budou data přenášena s nejméně významným bitem jako prvním, v opačném případě, kdy je bit nastaven, budou data přenášena s nejvýznamnějším bitem jako prvním. Pole CI může sloužit i pro reset aplikace, tím že mohou být použity i reset subkódy, definující parametry resetu. Hodnota pole 0x73, resp. 0x77 určuje fixní resp. variabilní strukturu dat. Fixní formát má pevně danou délku 16 bajtů. Variabilní datová struktura může mít délku až 255 bajtů, po odečtení velikosti bloků C, A, CI zbývá pro data 240 bajtů³. Ve fixních i variabilních datových strukturách můžeme nalézt informace o stavu zařízení: nízké napájecí napětí, chybu teploty atd. Ve variabilních datových strukturách nalezneme vícero informací, jako jsou například interpretace dat(int/BCD), měřené médium, použitý tarif, měřená veličina aj.

Kódem bloku CI je Master schopný změnit přenosovou rychlost dat, přenosová rychlost se změní poté, když Slave odpoví znakem 0xE5 v původní rychlosti. Tabulku možných kódů aplikovaných zařízením Master, komunikujícím se zařízením Slave, nalezneme v příloze viz tab. 6.3. Na této vrstvě mohou být realizovány případně i další vrstvy jako je např. síťová vrstva pro směrování dat. Podrobnější informace o aplikační vrstvě, včetně všech struktur, nalezneme v [1].

³M-Bus Usergroup doporučuje pro zabránění chybám v komunikaci modemu, pro maximální délku celého rámce 255 bajtů, maximálně 234 bajtů pro variabilní bloky dat

2.3 Wireless M-Bus (EN13757-4)

Wireless M-Bus je v Evropě perspektivní otevřený standard pro automatické měření, který pracuje v subgigahertzovém bezlicenčním pásmu v okolí 868 MHz. Jako standard jej definuje evropská norma EN 13757-4. Obsahem standardu je definování požadavků fyzické a linkové vrstvy protokolu Wireless M-Bus. Wireless M-Bus se primárně zaměřuje na použití v SRD zařízeních pro bezdrátovou komunikaci s měřiči energií jako: voda, plyn, teplo, elektrina, atd. Měřiče energií, vybavené bezdrátovým rozhraním Wireless M-Bus, jsou schopny komunikovat jak se stacionárními, tak i s mobilními čtecími zařízeními. Předpokládá se, že rádiová část měřiče je napájena z baterie a je schopna provozu po dlouhou dobu bez zásahu, tj. bez výměny baterie. U čtecích zařízeních, ať už stacionárních nebo mobilních, není takový požadavek na dobu provozu na baterie a čtecí zařízení mohou být napájena i z externího zdroje.



Obrázek 2.5: Logo Wireless M-Bus

2.3.1 Fyzická vrstva Wireless M-Bus

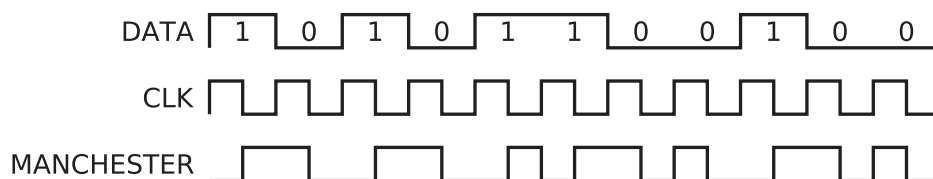
Wireless M-Bus dle normy ČSN EN 13757-4 používá tři pásma pro tři různé módy komunikace: 868,3 MHz pro módy Sx, 868,95 MHz pro módy Tx a 868,33 MHz pro mód R2. Další parametry jako přípustnou odchylku frekvence Δf , čipovou rychlost f_{CHIP} nebo přenosovou rychlost naleznete v tab. 6.2. Všechny tři módy používají modulaci 2-FSK (Frequency Shift Keying), tedy dvoustavovou frekvenční modulaci. Pro některé módy jsou některé parametry fyzické vrstvy stejné, proto je fyzické zařízení schopné s nezměněným hardwarem komunikovat v různých operačních módech.

Používání kódování ve Wireless M-Bus

Wireless M-Bus definuje dvojí možné kódování; kódování Manchester a kódování 3 out of 6.

- Manchester

Kódování Manchester slučuje datový a hodinový signál do jediného signálu. Toto kódování se krom bezdrátových přenosů používá i v sítích LAN, konkrétně v síti Ethernet. Výhodou kódu Manchester je konstantní střední hodnota takového signálu, která je 50% z maximální hodnoty. Princip tohoto kódování je na obr. 2.6. Náběžné hrany CLK ohraničují jeden bit dat a sestupné hrany CLK určují kód Manchester - log.1 je reprezentována náběžnou hranou a log.0 hranou sestupnou. Pokud nejsou vysílána žádná data, resp. vysíláme samé log.0, výstupem kódování Manchester je hodinový signál. Nevýhodou použití Manchester kódování je to, že na přenos jednoho bitu informace je potřeba dvou hodinových taktů.



Obrázek 2.6: Princip kódování Manchester

- 3-out-of-6

Princip kódování spočívá v tom, že každé 4bity (nibble) jsou zakódovány jako 6ti bitová data, přičemž zakódované slovo obsahuje stejné množství nul a jedniček. Zároveň v kódu musí být alespoň dvě změny, tzn. není možné použít "000111" nebo "111000". Takto zakódovaná data jsou přenášena s nejvýznamnějším bitem jako prvním.

Toto kódování by mělo být aplikováno při použití módu častého vysílání (módy T1 a T2), při komunikaci měřiče s koncentrátorem (Slave → Master). Koncentrátor může odpovědět měřiči zprávou kódovanou kódováním Manchester.

Tabulka 2.3: Tabulka kódu "3-out-of-6"

NRZ kód	Desítkově	3-out-of-6	Desítkově	počet změn v kódu
0000	0	010110	22	4
0001	1	001101	13	3
0010	2	001110	14	2
0011	3	001011	11	3
0100	4	011100	28	2
0101	5	011001	25	3
0110	6	011010	26	4
0111	7	010011	19	3
1000	8	101100	44	3
1001	9	100101	37	4
1010	10	100110	38	3
1011	11	100011	35	2
1100	12	110100	52	3
1101	13	110001	49	2
1110	14	110010	50	3
1111	15	101001	41	4

2.3.2 Linková vrstva Wireless M-Bus

Wireless M-Bus specifikuje několik formátů rámce: rámec formátu A a rámec formátu B. Rámec protokolu Wireless M-Bus tvoří několik bloků. První blok Preamble se skládá z hlavičky a synchronizačního slova. Preamble má tvar: $n * (01) + Sync.word$. Hlavička obsahuje alternující "01" a dle čísla n rozeznáváme u S-módu hlavičku dlouhou ($n \geq 279$), nebo hlavičku krátkou ($n \geq 15$), mód T má délku hlavičky $n \geq 19$. Synchronizační slovo je pro S-mód: 0001 1101 1010 0101 10 a pro T-mód 0000 1111 01.

První pole prvního bloku je pole délky L (L-Field) obsahující počet bajtů uživatelských dat, včetně řídicích a adresových bloků a vyjma bloku CRC. Pokud není množství bajtů uživatelských dat dělitelné 16ti beze zbytku (tj. $(L - (C + M + A)) \% 16 \neq 0$), potom poslední blok n bude obsahovat zbývajících $(L - (C + M + A)) \% 16$ bajtů a 2 bajty CRC. Ostatní bloky (krom prvního a případně posledního) obsahují vždy 16 bajtů a 2 bajty CRC.

Další pole prvního bloku je řídicí pole C. Pole C specifikuje typ rámce a dle [4] by toto pole mělo nabývat hodnot $C=0x44$ pro vysílání v submódu S1/T1, kdy nepožadují odpověď, $C=0x06$ pro obousměrný mód S2/T2 a $C=0x46$ pro jednosměrný mód S1/T1.

Pole M obsahuje identifikaci výrobce, tojčíselný kód jednotlivých výrobců[7] se vypočítá pomocí 2.1.

$$M = [ASCII(1.znak) - 64] \cdot 32 \cdot 32 + [ASCII(2.znak) - 64] \cdot 32 + [ASCII(3.znak) - 64] \quad (2.1)$$

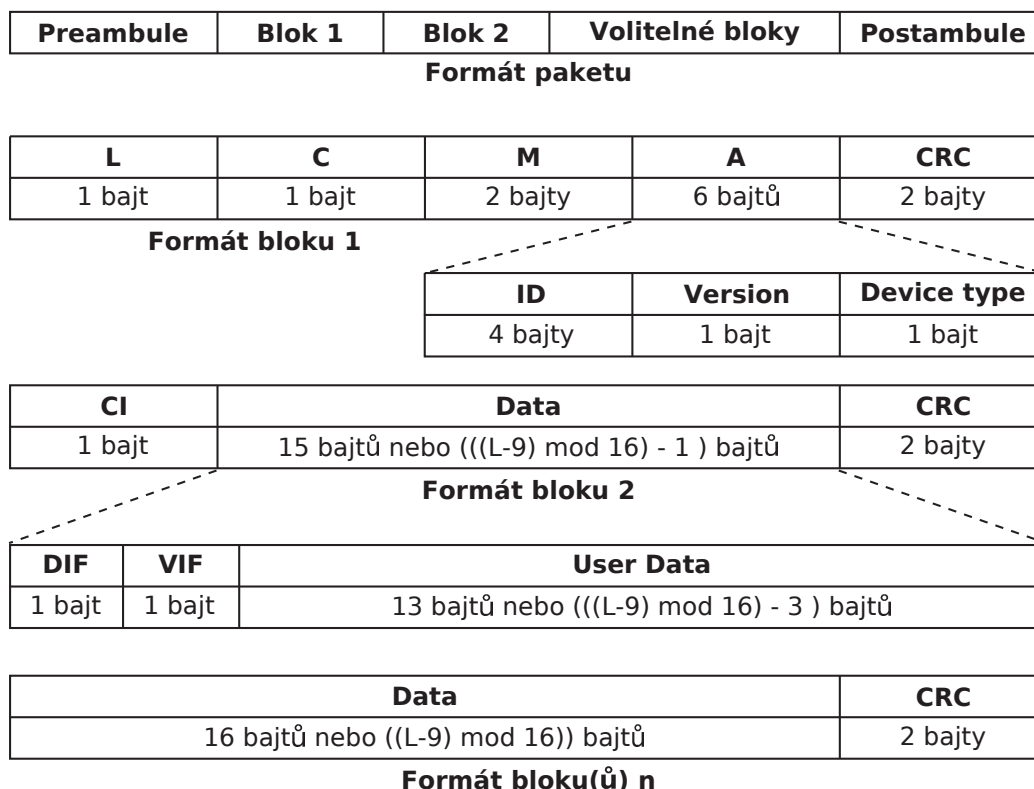
$$\text{pro CEN je } M = [67 - 64] \cdot 32 \cdot 32 + [69 - 64] \cdot 32 + [78 - 64] = 3246d = 0x0CAE$$

Adresové pole A obsahuje identifikační číslo výrobce, které by mělo být unikátní, což musí zaručit výrobce nebo uživatel. Pokud je použita Aplikační vrstva Wireless M-Bus - EN 13757-3 a pokud pole CI (Control Information) obsahuje jednu z hodnot: 0x72, 0x78 nebo 0x7A, tak je pole A ve tvaru: 4 bajty identifikačního čísla, 1 bajt udávající generaci nebo verzi měřiče (toto číslo stanovuje výrobce) a 1 bajt určující typ měřeného média (viz [3]).

Poslední dva bajty každého bloku tvoří negované CRC, které je počítáno z předcházejících polí. CRC je generováno polynomem:

$$x^{16} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + x^1 + 1 \quad (2.2)$$

První bajt druhého bloku tvoří pole CI (Control Information), konkrétní kódy tohoto bloku jsou v tab.6.3. Pole "Control Information" u Wireless M-Bus specifikuje identifikaci aplikační vrstvy. Druhý nejvyšší bajt bloku 2 obsahuje pole DIF, nesoucí informaci o interpretaci dat: formát a rozměr, tzn. jsou-li např. data ve formátu int16, real32, nebo jsou-li zakódována jako 6 digitů BCD. Následující bajt obsahuje VIF, což je doplňková informace dat. Obsahuje údaj o jednotce měřených dat (litry, kilogramy, Watty, atd.). Po těchto bajtech následuje blok uživatelských dat. Pokud uživatelská data zabírají více než jeden bajt, musí být dle [3] sestavena tak aby byl nejméně významný bajt první. Pokud je uživatelských dat více než 13 bajtů, odesílají se v dalším bloku.



Obrázek 2.7: Wireless M-Bus frame format A

Módy komunikace protokolu Wireless M-Bus

- T-mód

V módu častého vysílání (Transmit) - T módu měřič samostatně odesílá data. Buď periodicky a nebo aperiodicky (když jsou k dispozici). Mód T se dále rozděluje na módy T1 a T2. Mód T1 je určen pro jednosměrnou komunikaci a mód T2 pro obousměrnou komunikaci. Pokud měřič vysílá v módu T1, znamená to, že nevyžaduje od příjemce potvrzení o přijetí rámce. Z důvodu úspory energie se obvykle měřič po deslání svých dat přepne do úsporného režimu. Přenosová rychlost je pro mód T1 100 kb/s a používá se kódování 3-out-of-6. Mód T1 se využívá tam, kde jsou data měřena v častých intervalech a případný výpadek dat nemá vliv na měření.

V módu T2 měřič po odeslání rámce krátkou dobu vyčkává na potvrzení přijetí od příjemce. Pokud měřič neobdrží odpověď, přepne se po definovaném čase do úsporného režimu. Pokud ve stanoveném čase příjemce odpoví, naváže se obousměrná komunikace mezi měřičem a koncentrátorem. Měřič v módu T2 komunikuje s příjemcem stejnou rychlostí a kódováním jako v případě módu T1, tj. 100kb/s a 3-out-of-6 kódování. V opačném směru, tj. při komunikaci koncentrátoru s měřičem používá koncentrátor kódování Manchester a datovou rychlost 32,768 kb/s. Mód T2 najde své využití tam, kde ztráta často vysílaných dat může ovlivnit výsledek měření.

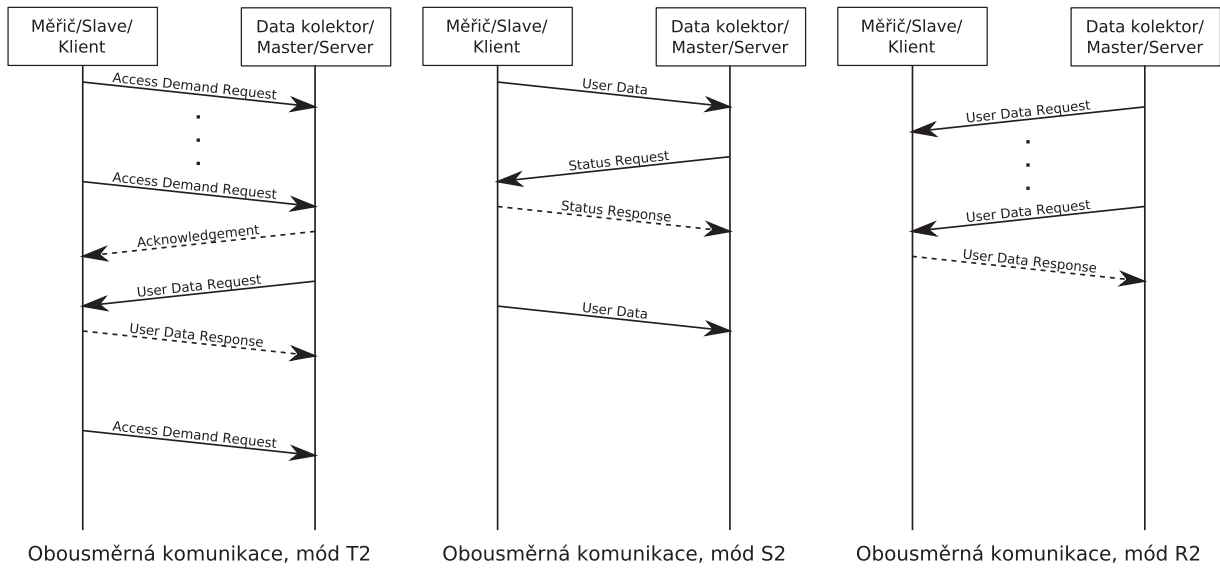
- R-mód

V módu častého příjmu, nebo také módu výzvy (Request) je definována pouze obousměrná komunikace, tudíž je definován pouze mód R2. V tomto módu měřič samostatně změřená data neodesílá, ale vyčkává na výzvu od koncentrátoru. Měřič se v pravidelných časových intervalech "probouzí" z úsporného režimu a očekává wake-up rámeček. V případě, že koncentrátor odesílá wake-up rámeček a měřič ho zaznamená, naváže se obousměrná komunikace mezi měřičem a koncentrátorem. Pokud není přijat žádný, nebo je přijat nevalidní wake-up rámeček, měřič se přepne zpět do úsporného režimu. Mód R2 se může použít tam, kde je kladen velký důraz na úsporu energie, protože většina rádiových modulů spotřebuje při příjmu podstatně méně energie, než při vysílání.

- S-mód

Mód S (Stationary) je určen podobně jako mód T pro jednosměrnou (S1) nebo obousměrnou (S2) komunikaci mezi pevnými nebo mobilními zařízeními. Chip rate⁴ je pro tento mód 32,768 kcps. Pro operační mód S jsou definovány tři submódy: S1, S1-m a S2. Submód S1 lze použít pro jednosměrnou komunikaci nevyžadující potvrzení o přijetí rámce a je určen pro aplikace, kdy se vysílá několikrát za den ke statickému přijímači. Takovým údajem může být například stav vodoměru, u kterého nepředpokládáme velké změny stavu mezi jednotlivými měřeními. Submód S1 používá dlouhou preambuli, zatímco submódy S1-m a S2 používají preambuli krátkou. Všechny S módy používají kódování Manchester.

⁴Chip rate - přenosová rychlost zakódovaných dat; Při použití kódování Manchester je datová rychlost poloviční, při 3-out-of-6 je datová rychlost 2/3tinová oproti rychlosti přenosu zakódovaných dat.



Obrázek 2.8: Typy přenosu

2.3.3 Aplikační vrstva Wireless M-Bus

Všechny telegramy aplikační vrstvy mají proměnnou délku. Informace o délce rámce je součástí linkové vrstvy. Tato informace by měla být známa aplikační vrstvě z důvodu správného dekodování každého telegramu. Každý telegram začíná jedním bajtem CI, který rozlišuje mezi různými typy telegramu a aplikačními funkcemi. Význam zbývajících bajtů telegramu, následujících za polem CI, záleží také na hodnotě samotného pole CI. Dle hodnoty CI můžeme specifikovat hlavičku dat jako 4 bajtovou, 12 bajtovou, nebo se může hlavička úplně vynechat.

Blok VIB (Value Information Block) udává formát uložených dat DIF (Data Identification Field) a údaj o jednotce změřené hodnoty VIF (Value Information Field). Blok VIB má minimálně dva bajty a jeho velikost záleží na tom, je-li nejvyšší bit polí VIF a DIF v log. 1. Nastavením nejvyššího bitu se signalizuje, že v datové struktuře budou použita rozšiřující pole DIFE (DIF Extended) [1 bajt] a VIFE (VIF Extended) [1 bajt]. Počet následujících rozšiřujících polí závisí na nejvyšším bitu předcházejícího bajtu.

Po bloku VIB následuje volitelná hlavička výrobce - pokud je potřeba odeslat specifická data výrobce, má tato hlavička hodnotu 0x0F, nebo 0x1F. V tomto případě následují tato specifická data. V opačném případě by tato hlavička měla být vynechána.

Pole uživatelských dat obsahuje data uložena tak a v takových jednotkách, jak je specifikováno ve VIB.

Tabulka 2.4: Datová struktura aplikační vrstvy odpovědi měřiče

Hlavička dat	VIB	Hlavička dat výrobce	Uživatelská data výrobce
0, 4 nebo 12 bajtů	min. 2 bajty	0 nebo 1 bajt	n bajtů

2.3.4 Nároky z hlediska legislativy a EMC

V globálním kontextu řeší požadavky na rádiová zařízení organizace ITU, konkrétně sektor ITU-R. V rámci evropského společenství spadají tyto požadavky pod evropskou organizaci CEPT a její výbor pro elektronickou komunikaci ECC. Na vzniku evropských norem EN se podílí ECC ve spolupráci s ETSI. Po vydání nové evropské normy přichází proces harmonizace s normami členských států Evropské unie. České normy ČSN u nás spravuje a vydává ÚNMZ. ČSN EN 13757 je harmonizovaná evropská norma pro Wireless M-Bus.

Jak již bylo zmíněno Wireless M-Bus pracuje v bezlicenčním pásmu 868,3 MHz, nicméně ITU-R pásmo 868,3 MHz nedefinuje (viz. Tab.6.1), proto je provoz takovéhoho zařízení mimo evropské společenství vyloučen. V evropském společenství se provoz rádiových zařízení a telekomunikačních koncových zařízení řídí direktivou Evropské komise RTTE 1999/5/EC, která je na rozdíl od norem EN závazná. Úsek 868–869,3 MHz lze využívat v souladu s rozhodnutím komise⁵ a doporučením CEPT⁶ stanicemi krátkého dosahu.

Z hlediska EMC musí zařízení vyhovět standardu ČSN ETSI EN 300 220-1, jež pro pásmo 868,0 až 868,6 MHz stanovuje maximální vyzářený výkon(ERP) 25 mW[11].

Konkrétní podmínky využívání rádiových kmitočtů, včetně technických parametrů, jsou stanoveny všeobecným oprávněním⁷, které vydává místní správce kmitočtové tabulky⁸.

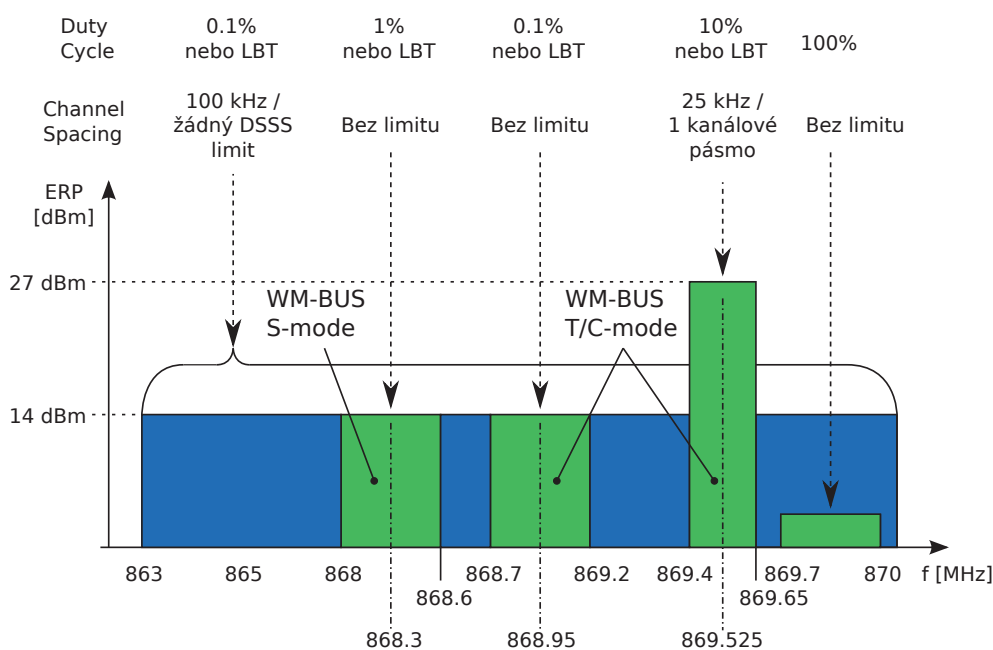


Figure 2.9: Pásmo 868 MHz dle EN 300 220-2 V2.3.1

⁵ Rozhodnutí komise ze dne 30. června 2010, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu.

⁶ Doporučení CEPT/ERC/REC 70-03 – Využívání zařízení s krátkým dosahem [Relating to the use of Short Range Devices (SRD)].

⁷ Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/09.2010-11 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování vysílačů rádiových zařízení krátkého dosahu.

⁸ u nás ČTÚ

2.3.5 Praktické aplikace Wireless M-Bus

Již v roce 2010 představila skupina ČEZ svůj pilotní projekt inteligentních odečtů z měřičů energií v mikroregionu Vrchlabí. Vrchlabí bylo zvoleno proto, že má pro záměry zkušebního projektu vhodnou velikost, existují zde zapojitelné obnovitelné zdroje energie i možnost vybudování několika jednotek kombinované výroby elektřiny a tepla. V rámci projektu zapojuje ČEZ chytré elektroměry (Smart Meters), a ty se tak stávají součástí konceptu tzv. chytrých sítí (Smart Grids). Inteligentní elektroměry měří stejně jako klasické elektroměry spotřebu průběžně, ale každých 15 minut ukládají data o kvalitě dodávky: podpětí, přepětí a kolísání frekvence. Také zaznamenávají cizí zásah do konstrukce elektroměru. Získaná data z elektroměrů slouží jak koncovému zákazníkovi, který může přizpůsobit svou spotřebu energie, tak i výrobcům energie, kterým umožní optimalizovat spotřebu a výrobu elektrické energie. Náklady za odebranou elektřinu se mohou díky lepšímu přehledu o spotřebě energie snížit. Chytrý elektroměr se dá přirovnat k inteligentnímu HDO, které je schopné spínat podle více tarifů a lze použít např. pro spínání akumulárních kamen, bojlerů nebo v dnešní době nabíjení elektromobilů ve vhodný čas. Testovací projekt Vrchlabí poběží do roku 2015.

S rozvojem inteligentních sítí se objevují řešení pro inteligentní domácnosti, jedním z takových řešení může být řešení od Landis+Gyr. Inteligentní elektroměr Landis+Gyr a zobrazovací panel ecoMeter P530 můžete vidět na obrázku 2.10.



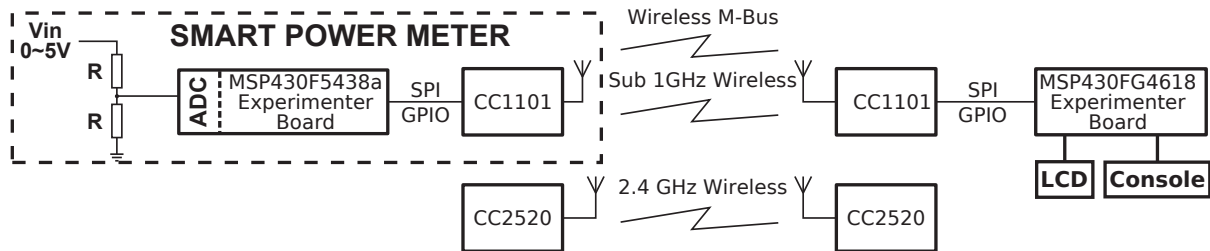
Obrázek 2.10: Inteligentní elektroměr Landis+Gyr řady E350 (vlevo) a Landis+Gyr ecoMeter P350 (vpravo)

3 Implementace Wireless M-Bus (WM-Bus) na platformě Texas Instruments

3.1 Návrh řešení

Protože většina měřičů elektřiny má analogový výstup 0 až 5V, rozhodl jsem se využít integrovaný převodník na vývojové desce MSP430F5438a. Integrovaný 12-ti bitový převodník vývojové desky používá referenční napětí 1.5V, jež je generováno vnitřní napěťovou referencí. Hodnota z A/D převodníku je zapouzdřena do rámce protokolu M-Bus. Rámec M-Bus je dále zapouzdřen do paketu Wireless M-Bus a odeslán rádiovým rozhraním CC1101 do prostoru.

Přijímací transceiver naslouchá a očekává synchronizační slovo. Po jeho přijetí jsou přečtena data z RX-FIFO čipu CC1101 a dále zpracována mikrokontrolérem. Po extrakci dat z paketu Wireless M-Bus a poté z rámce M-Bus jsou přijatá data zobrazena na LCD.



Obrázek 3.1: HW řešení bezdrátového spoje

3.2 Realizace

3.2.1 Nastavení rádiového rozhraní dle ČSN EN13757-4 na čipu CC1101

Základní parametry rádiového rozhraní Pracovní frekvenci volím co nejbližší frekvenci z tab. 6.2, tj. pro S mód 868.299066 MHz a pro T mód 868.949707 MHz. Pro oba módy Wireless M-Bus je použita frekvenční modulace 2-FSK. Datová rychlost je nastavena pro S mód na 32.7301 kBaud a pro T mód 100 kBaud. Dále jsou uvedeny parametry, které je nutno vypočítat.

Šířka pásma filtru přijímače Z důvodu tolerancí výstupní frekvence na vysílací straně je nastavení šířky pásma filtru na přijímací straně velmi důležité. Pokud je šířka pásma malá, vyfiltrujeme si užitečný signál, pokud je naopak šířka pásma příliš velká, snižuje se citlivost přijímače. Požadovanou šířku pásma pro modulaci 2-FSK lze učít Carlsonovým pravidlem 3.1, kde Δf je frekvenční zdvih a f_{MOD} je frekvence modulovaného signálu (pro NRZ přenosová rychlost

$$f_p = 2 * f_{mod} BW_{FSK} = 2 * (\Delta f + f_{mod}) \quad (3.1)$$

Pro S-mód: $BW_{FSK=S-MODE} = 2 * (\Delta f + f_{mod}) = 2 * (80kHz + \frac{33kHz}{2}) = 193kHz$.

Pro T-mód: $BW_{FSK=T-MODE} = 2 * (\Delta f + f_{mod}) = 2 * (80kHz + \frac{100kHz}{2}) = 260kHz$.

Požadovanou šířku pásma pak vypočítáme dle vztahu 3.2.

$$BW_{RX} = \frac{BW_{FSK_{max}} + 2 * f_{drift_{max}}}{0,8} \quad (3.2)$$

Pro S-mód: $BW_{RX=S-MODE} = \frac{BW_{FSK=S-MODE}}{0,8} \doteq 241kHz$.

$$\text{Pro T-mód: } BW_{RX=T-MODE} = \frac{BW_{FSK=T-MODE}}{0,8} \doteq 325\text{kHz}.$$

Kompenzace driftu a offsetu frekvence Frekvenční drift je dán zejména nepřesností referenčního krystalu vysílací strany. Maximální dovolená tolerance krystalu je ± 25 ppm, což dává frekvenční drift ± 25 ppm. Pokud je povolena kompenzace offsetu vstupní filtr v přijímači je neustále laděn tak, aby vstupní signál byl "zarovnán" se vstupním filtrem. Index modulace 3.3 říká do jaké míry můžeme nastavení frekvenční offsetu/driftu ignorovat.

$$h = \frac{\Delta f}{f_{mod}} \quad (3.3)$$

Pokud je index modulace vysoký, dostáváme ve spektru dvě zřetelné špičky a frekvenční offset nemůže být úplně ignorován. Pokud je modulační index nízký, můžeme offset ignorovat. Maximální offset frekvence pro módy S i T je: $\pm 25\text{ppm} + \pm 60\text{ppm} = \pm 85\text{ppm}$. Frekvenční drift je dán vztahem $f_{drift} = f_{nosné} * \pm 85\text{ppm} \approx \pm 74\text{kHz}$.

Kompenzace driftu a offsetu přenosové rychlosti Kompenzace offsetu přenosové rychlosti je nastavována pomocí registru BSCFG. Chyba v kompenzaci offsetu může vyústit v 100% chybovost na příjmu, jako důsledek ztracené bitové synchronizace, nezávisle na síle přijatého signálu. Pro S mód je maximální přípustný drift přenosové rychlosti dle [2] $\pm 2\%$, proto nastavíme první dva bity BSCFG (BC_LIMIT) na $\pm 3.125\%$. Pro T mód je maximální přípustný drift $\pm 12\%$ tzn. BC_LIMIT musíme nastavit na nejbližší vyšší tj. $\pm 12.5\%$.

Kmitočtová deviace Deviace (vychýlení) kmitočtu při frekvenční modulaci FSK nebo GFSK je kontrolována pomocí registru DEVIATN. Pro příjem by měla být hodnota kmitočtové výchylky nastavena co nejbližší k hodnotě, kterou specifikuje Wireless M-Bus. Při nastavování kmitočtové deviace je nutné brát v úvahu, že offset kmitočtu by neměl být větší než dvojnásobek kmitočtového vychýlení. Pokud offset překročí dvojnásobek kmitočtové deviace, může se stát, že chyba přijetí paketu bude 100% bez ohledu na to, jak silným signálem vysílač vysílá. Registr DEVIATN umožňuje nastavení deviace kmitočtu v rozmezí 40 až 80 kHz. Dle tab. 6.2 je pro mód S i pro mód T maximální kmitočtová deviace 50kHz. Pro mód S je zvoleno nastavení 47kHz, umožňující rychlou odezvu. U módu T je vychýlení kmitočtu nastaveno na 40kHz, protože díky většímu offsetu v přenosové rychlosti v tomto módu je výkon přijímače více závislý na nastavení kmitočtové deviace.

Carrier Sense ("Naslouchání nosné") Toto nastavení určuje, jak silný signál (nad úroveň šumu) bude přijímač přijímat. Nastavení Carrier Sense se provádí pomocí registrů AGCTRL a obvykle se nastavuje na citlivostní limit přijímače. Pro S mód -107 dBm a pro T mód -104 dBm.

3.2.2 Nastavení parametrů linkové vrstvy na čipu CC1101

Paketovací engin CC1101 nepodporuje přímo formát paketů Wireless M-Bus, a proto se musí samotný paket sestavovat na úrovni mikrokontroléru a jako celek načíst do TXFIFO. Wireless M-Bus používá k zakódování M-Bus paketů pro T mód kódování 3-out-of-6, které není čipem CC1101 podporováno, a proto se musí provádět kódování pomocí kódovací tabulky. Ačkoliv čip umožňuje kódování Manchester, toto kódování provádí přes celá data včetně synchronizačního slova, což není v souladu se standardem Wireless M-Bus, a musí se provádět opět pomocí kódovací tabulky.

Transceiver CC110 umožňuje pomocí registrů SYNC0 a SYNC1 nastavit až 16ti bitové unikátní slovo synchronizace. Pro delší synchronizační slovo lze synchronizaci opakovat.

U módu S 18ti bitové synchronizační slovo vyžaduje použití část TXFIFO před zakódovanými daty. Synchronizační slovo rozdělíme tak, aby dolních 8 bitů bylo zapsáno do TXFIFO a zbylých 10 bitů rozšíříme částí preamble na 16bitů a zapíšeme do SYNC jako synchronizační slovo. Pro mód T je synchronizační slovo 10ti bitové a jednoduše jej rozšíříme na 16bitů přidáním 6 bitů preamble. Takto rozšířené synchronizační slovo zapíšeme do registrů SYNCx.

3.2.3 Knihovna Wireless M-Bus

Sestavení rámce M-Bus O sestavení rámce se stará kód v části wmbus_packet.c. Rámec je sestaven ve fixní datové struktuře 10bajtů a 2bajty CRC. Při volání funkce encodeTXPacket je umožněno specifikovat přenášená data pomocí parametrů DIF a VIF. Některé tyto základní parametry jsou v hlavičkovém souboru wmbus_packet.h. Rozšířitelná struktura o DIFE a VIFE zatím není implementována. Pokud je dat méně než 7 bajtů, použijí se pro přenos pouze bloky 1 a 2. Pokud je dat více, použijí se bloky n. Sestavení rámce je nezávislé na použité architektuře procesoru.

Výpočet CRC Pro výpočet CRC je použit jednoduchý algoritmus. Vstupem algoritmu jsou předcházející výsledek výpočtu CRC a vstupní data. Při inicializaci, tj. prvním výpočtu CRC je parametr crcReg nulový. Při výpočtu se postupuje od nejvyššího bitu vstupního parametru crcData a porovnává se s nejvyšším bitem crcReg. Pokud jsou nejvyšší bity rozdílné (výsledek operace XOR je jedna), potom se s crcReg provede bitový posun o jeden bit doleva a k této hodnotě se exkluzivně přičte hodnota generujícího polynomu. Pokud je v nejvyšších bitech shoda, provede se pouze bitový posun vlevo. V další iteraci cyklu se posuneme k druhému nejvyššímu bitu crcData a cyklus se opakuje, dokud neporovná všechny bity crcData. Návrátová hodnota je aktuální hodnotou CRC.

Algoritmus 1 Výpočet CRC

```
uint16 crcCalc(uint16 crcReg, uint8 crcData) {
    uint8 i;
    for (i = 0; i < 8; i++)
    {
        // MSB je 1
        if (((crcReg & 0x8000) >> 8) ^ (crcData & 0x80))
            crcReg = (crcReg << 1) ^ CRC_POLYNOM;
        else
            crcReg = (crcReg << 1);
        crcData <<= 1;
    }
    return crcReg;
}
```

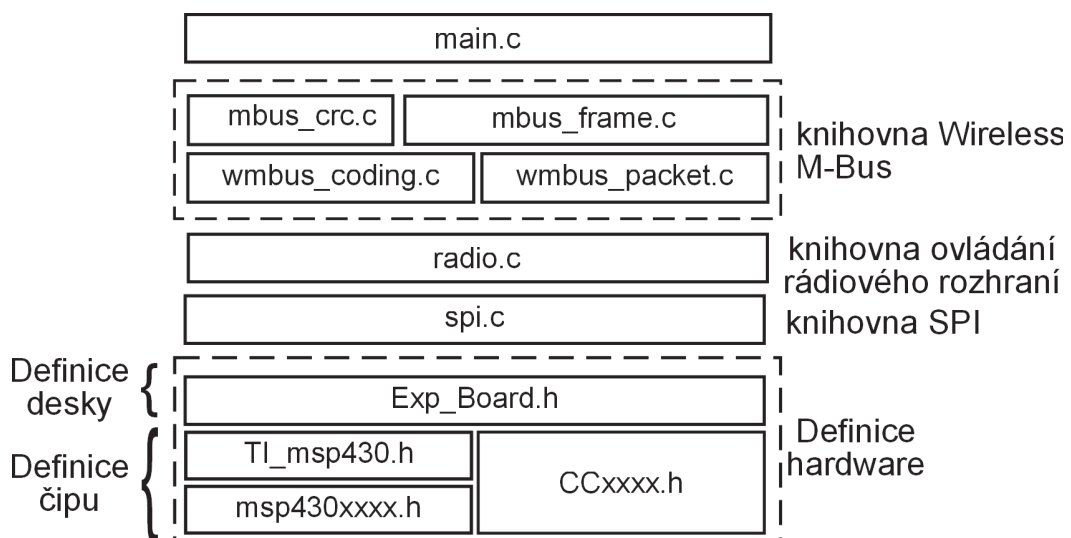
Sestavení paketu Wireless M-Bus Při sestavování paketu Wireless M-Bus přidáváme v případě S módu část synchronizačního slova před Wireless M-Bus paket, pro mód T není tato operace nutná, jak již bylo vysvětleno. Po zakódování dat je na konec paketu přidána postambule. Pro jednotlivá zakódování a dekodování dat jsou použity kódovací tabulky stejné, které jsou uvedeny v [3].

Kódování a dekódování 3-out-of-6 Kódování je prováděno pomocí tabulky o 16ti záznamech, ve které je pro vstupní hodnoty 0x0 až 0xF výstupní kód 3-out-of-6. Převádíme zde vstupní 4 bitovou hodnotu na výstupní 6ti bitovou. Obdobně je řešeno dekódování - pomocí tabulky o 64 záznamech. Nevalidní dekódování je signalizováno znakem 0xFF. Pro zjednodušení používám funkce pro zakódování 16ti bitů dat do 24bitů.

Kódování a dekódování Manchester Pro kódování Manchester jsou opět použity tabulky specifikované v normě [3]. Pro zakódování je použita tabulka o 16ti záznamech, kdy jsou vstupní 4bitová data zakódována pomocí tabulky do 8mi bitů kódu. Při dekódování se postupuje po 4řech bitech, což snižuje nároky na rozměr tabulky. Výstupní dekódovaná data jsou o rozměru 2 bity a pro získání jednoho bajtu je nutné dekódování 4krát zopakovat.

Struktura programu Program je sestaven tak, aby knihovna Wireless M-Bus byla absolutně nezávislá na hardwaru. Všechny specifické funkce, které jsou závislé na hardwaru jsou implementovány do knihovny rádiového rozhraní. Soubor CCxxxx.h obsahuje adresy rádiových registrů, maskovací bity a jednobajtové příkazy (command strobes) pro čipy CC1101 a CC2520. Soubor msp430xxxx.h je hlavičkový soubor výrobce čipu, nad ním je TI_msp430.h obsahující počáteční inicializace čipu. Exp_Board.h přidává definiční soubor jednotlivé vývojové desky, kde jsou specifikovány jednotlivé periferie příslušící k jednotlivým vývojovým deskám. Když který pin je na desce kde, můžeme přiložit výkoný soubor pro ovládání SPI rozhraní. V tomto souboru se nacházejí pouze instrukce pro zápis a čtení bajtu, sekvenčně i jednobajtově a také inicializace samotného SPI. Nad SPI je už knihovna pro ovládání rádiového rozhraní. Obsahující instrukce pro konfiguraci čipu, pro čtení a zápis do jednotlivých registrů a to i sekvenčně. Dále obsahuje jednotlivá přednastavení rádiových registrů. Z Wireless M-Bus implementuje hardwarově závislou část a nastavení rádiového rozhraní pro jednotlivé módy.

Samotná knihovna obsahuje soubory pro sestavení rámce M-Bus - mbus_frame.c. Výkonný kód mbus_frame vkládá kód pro výpočet CRC. Posupem níže strukturou programu se data "obalují" ve vrstvě wmbus_packet.c kódováním pro příslušný mód Wireless M-Bus pomocí wmbus.coding.c. Poté co jsou data zakódována je k nim přidána synchronizace a postamble. Takto připravená data je možné odeslat do vrstvy rádiového rozhraní.



Obrázek 3.2: Struktura knihovny v návaznosti na rádiové rozhraní CC1101

3.2.4 A/D převodník vysílače

Většina snímačů proudu, které se používají pro vyhodnocení spotřeby, má napěťový výstup 0 až 5V. Protože na vstup napěťového převodníku je možné přivést maximálně hodnotu napětí na pinu AV_{CC} , který je na vývojové desce EXP430F5438 pevně spojen s napájecím napětím desky, je maximální přivedené napětí totožné s napájecím napětím desky. Minimální hodnota napětí je dána napětím na pinu AV_{SS} , který je na výše zmíněné desce spojený se zemí. Rozsah vstupního napětí na pinu mikrokontroléru musí být v rozmezí 0 až V_{DD} (napájecí napětí desky), a to i přesto, že maximální dovolené napětí na pinu je $V_{CC}+0.3V$. Toto musí být zajištěno přidavnými schottkyho diodami.

Pro čtení hodnoty analogového napětí je mikrokontrolér MSP430F5438A vybaven 12ti bitovým převodníkem ADC12. Tento převodník umožňuje rychlý převod analogového napětí a uložení naměřené hodnoty do jednoho z 16ti registrů ADC12MEMx. V mém případě jsem nastavil převodník do módu single-channel, kdy je snímáno napětí jen z jednoho pinu. Během volání funkce je analogové napětí převedeno pouze jednou (lze nastavit vícenásobný převod a výslednou hodnotu průměrovat). Chceme-li pracovat s plným rozlišením, musíme nastavit rozlišení na 12bitů. Od nastavení rozlišení je odvozena doba vzorkování i převodu. Úplnou inicializaci A/D převodníku uvádím v algoritmu2.

3.2.5 Rádiové rozhraní CC1101 a odesílání dat

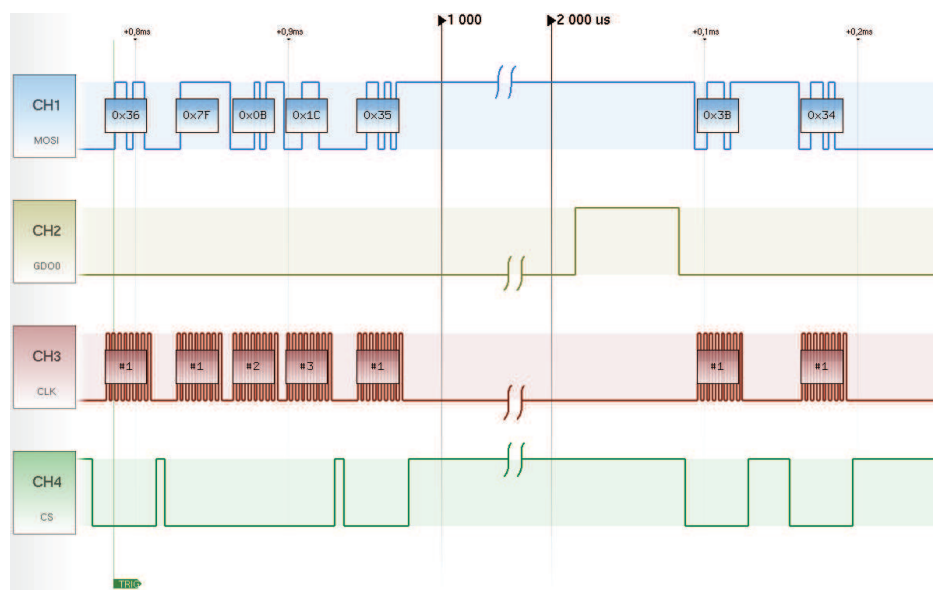
CC1101 je low-cost⁹ transceiver v 20ti pinovém QFN pouzdře. Ovládaný je pomocí 4-vodičového SPI rozhraní a čip sám o sobě se chová jako slave. Přístup k vnitřním registrům je pomocí bajtu hlavičky. Ten obsahuje bit R/W, kterým určím, chci-li do registru zapisovat (1), nebo číst (0). Nastavením bitu B, hlavičkového bajtu, určím sekvenční zápis nebo čtení. Zbýlých 6 bitů hlavičky obsahuje adresu cílového registru (v případě sekvenčního zápisu se jedná o adresu prvního registru v pořadí). Sekvenční zápis musí být ukončen náběžnou hranou CSn. Kromě nastavení hodnot registrů mohou zapsat na SPI speciální jednobajtové instrukce (Command Strokes), které ihned po zápisu vyvolají příslušnou akci. Příkladem může být instrukce SIDLE (0x36), po které přejde transceiver do idle módu.

Při každém zapsaném bajtu na SPI odpovídá transceiver stavovým bajtem (Status byte). Stavový bajt má několik funkcí: rozliší stavy RX, TX a IDLE, informuje o "přetečení" hodnoty FIFOTHr v RXFIFO (FIFO je zaplněno ke hranici FIFOTHr) při příjmu, nebo o "podtečení" FIFOTHr v TXFIFO. Nejnižší 3 bity stavového bajtu informují o tom kolik bajtů je v TXFIFO, nebo RXFIFO ještě volných.

Paketový engine vytváří pakety ve formátu: preamble [8 x n bitů], synchronizace [16/32 bitů], pole délky [8 bitů], pole adresy [8 bitů], pole dat [8 x n bitů] a 16ti bitové pole CRC. Pole délky, adresy a CRC jsou volitelná a jejich zpracování lze vypnout. Pro práci s daty slouží dvě 64-bajtové paměti FIFO: jedna pro odesílání dat - TXFIFO a druhá pro příjem dat - RXFIFO. Ačkoli jsou FIFO pouze 64-bajtové, umožňují odesílání paketů větších než 64 bajtů. Odesílání paketů probíhá ve 3 režimech: fixní délka paketu (délka je nastavena v PKTLEN registru), proměnná délka (délku určuje první bajt dat) a "nekonečná" délka. Pokud potřebujeme odeslat paket o velikosti větší než 64 bajtů např. 500 bajtů nastavíme dva nejnižší bity registru PKTCTRL0 na hodnotu 2(infinite mode) a do registru PKTLEN si připravíme hodnotu zbytku ($500 \% 64 = 52$). Postupně odesíláme naplněná TXFIFO a při zbývajících 52 bajtech přepneme do režimu pevné délky.

Pro signalizaci odeslání paketu lze využít dva vstupně/výstupní piny, na obrázku 3.3 je vidět využití pinu GDO0 k signalizaci odeslání. Zároveň je na obrázku vidět doba, reakce vysílače na instrukci inicializující odesílání (0x35). Náběžná hrana GDO0 informuje o odeslání synchronizace a sestupná o dokončení odeslání paketu.

⁹Cena čipu se pohybuje kolem 150 Kč.



Obrázek 3.3: Odeslání dat v TXFIFO ve režimu pevné délky

Pro příjem "rychlých" dat je vhodné nastavit jeden z GDOx pinů tak, aby generoval hranu při přijetí synchronizace. Tato generovaná hrana pak může být obsluhována přerušením na procesoru a následným přečtením dat z RXFIFO. Při čtení se uvolňuje prostor pro další příchozí data.

Pro identifikaci jednotlivých čipů lze přečíst hodnotu ChipID/Partnum. Z tabulky 3.1 vpravo je zřejmé, že čipy CC1100 a CC1101 jsou nerozpoznatelné. Je to z důvodu vývoje technologie výroby, kdy se u CC1100 podařilo zlepšit parametry natolik, že se výrobce rozhodl pro nový název součástky. Čip CC2500 je registrově totožný s CC1101, avšak pracuje v pásmu 2.4GHz. CC2520 je komplexnější transceiver pracující v pásmech 2.4 GHz oproti CC1101 má například instrukce manipulující s jednotlivými bity registrů popř. TXFIFO i RXFIFO. V tabulce 3.1 vlevo je vidět konflikt při čtení ChipID na různých čípech.

Tabulka 3.1: Rozpoznání čipu CC1101 a CC2520

Typ\Adresa	0x0030	0x0040	Typ čipu	ChipID/Partnum	Version
CC1101	ChipID	PA_TABLE0	CC1100	0x00	0x04
CC2520	TXPOWER	ChipID	CC1101	0x00	0x04
			CC2500	0x80	0x03
			CC2520	0x84	0x00

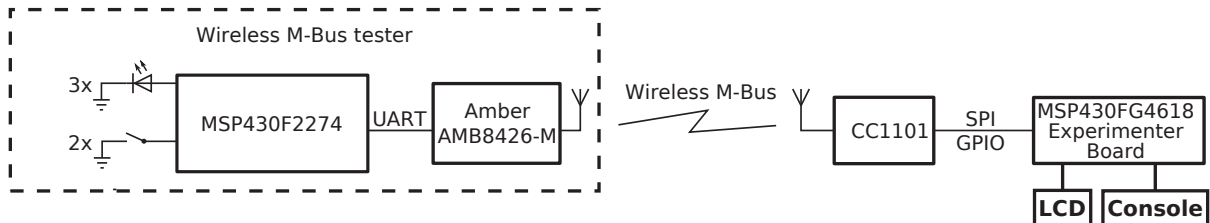
3.2.6 Příjem dat z rádiového rozhraní CC1101

Čip CC1101 je vybaven pamětí pro příjem FIFO (RXFIFO) o velikosti 64 bajtů. Pokud transceiveru pošleme instrukci SRX, čip přejde do režimu příjmu a aktivuje se receiver. Přijímač vyčkává na přijetí synchronizačního slova. Po přijetí synchronizačního slova se začne zaplňovat RXFIFO. O přijetí paketu lze informovat procesor několika způsoby: log.1 na GDOx při přijetí synchronizace, dosažením FIFOTHRESH - to se projeví ve stavovém bajtu nebo případně na vstupně/výstupním pinu GDOx (pokud je tak nastaven), úrovní signálu RSSI a pravděpodobně i jinými.

Pro čtení dat z RXFIFO je vhodné použít sekvenční čtení 0xFF. Uvolňováním RXFIFO vzniká prostor pro další příchozí data. Před započítím příjmu, instrukcí SRX, je vhodné provést příkaz SFRX, který slouží pro vymazání obsahu RXFIFO.

3.3 Testovací vysílač Wireless M-Bus s AMB8426-M

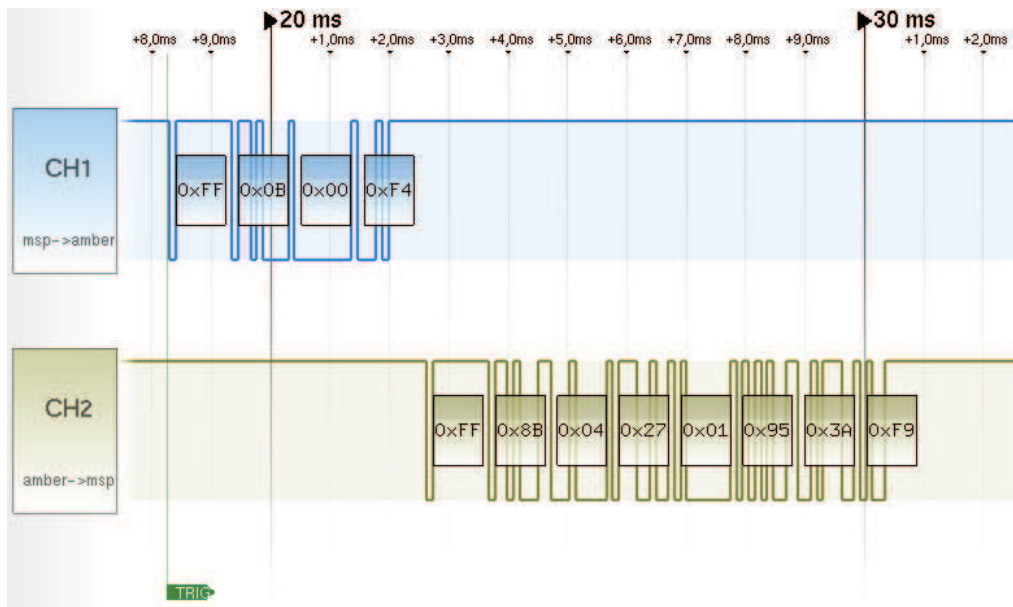
Pro účely testování jsem zakoupil proprietární modul Wireless M-Bus firmy Amber, typ AMB8426-M. Tento modul umožňuje komunikaci v módech S a T protokolou Wireless M-Bus. Komunikace s modulem probíhá po sběrnici UART. Tovární nastavení rychlosti sběrnice je 9600 Baud. S novým firmware by měl modul umět komunikovat i po sběrnici SPI¹⁰.



Obrázek 3.4: Použití testovacího vysílače

Modul pracuje ve dvou režimech vysílání: v režimu bufferovaného přenosu a v příkazovém režimu. Pokud nechceme používat tovární nastavení modulu musíme v příkazovém režimu nastavit jednotlivé parametry vysílače.

Každý příkaz v příkazovém režimu začíná start znakem 0xFF, následuje specifický příkaz, délka parametrů, případně dat, parametry příkazu a jako poslední bajt se připojuje kontrolní součet. Kontrolní součet (Checksum) je dán jako aritmetický součet jednotlivých bajtů bez přenosu (tj. použitím operace XOR po jednotlivých bajtech příkazu). Modul na tento příkaz odpovídá ve stejném tvaru: start znak, přijatý příkaz navýšen 0x80 (MSB nastaven), délka odpovědi, odpověď a kontrolní součet.



Obrázek 3.5: Požadavek SERIAL_NUMBER_REQUEST poslaný na AMB8426-M

¹⁰Manuál k modulu ze srpna 2012 uvádí, že je nový firmware v přípravě.

3.3.1 Program pro testovací vysílač Wireless M-Bus s AMB8426-M

Pro řízení bezdrátového modulu sem využil mikrokontrolér Texas Instruments z rodiny MSP430x2xx, konkrétně se jedná o typ MSP430F2274. Na mikrokontroléru využívám několik zdrojů přerušení: pro tlačítka, řízení přenosů na UART a A/D převodník pro zjišťování aktuální teploty čipu. Bezdrátovému rozhraní AMB8426-M bude vysílána hodnota aktuální teploty nebo stav tlačítek. Při startu aplikace bude výběr módu pro vysílání nastaven pomocí dvou tlačítek. Výběr je potvrzen LED indikací. Při přenosu teploty je použit watchdog.

3.4 Hardwarové prostředky

K dispozici jsem měl dvě vývojové desky Texas Instruments a dva druhy rádiových modulů. Cílem je, aby navržený protokol Wireless M-Bus fungoval nezávisle na fyzické vrstvě (je jedno jestli použiji bezdrátové moduly pro 1Ghz nebo 2.4Ghz). Vývojové desky jsou typy: MSP430FG461x Experimenter Board a MSP-EXP430F5438. Bezdrátové moduly jsou CC1101-EMK, což je bezdrátový transceiver pracující v sub pásmu 1Ghz a CC2520-EMK, což je rovněž bezdrátový transceiver, který ale pracuje v pásmu 2.4Ghz.

3.4.1 MSP-EXP430F5438

Vývojová deska MSP-EXP430F5438 je poměrně jednoduše přizpůsobitelná pro práci s bezdrátovými moduly, bezdrátové modulky CC1101-EMK lze připojit jednoduše pomocí proprietárního konektoru na desce. Pokud nepoužíváme moduly přímo od Texas Instruments můžeme svůj bezdrátový modul napojit na header, který je stejně tak jako proprietární konektor připojen přímo k mikrokontroléru. Pro připojení externího čipu CC1101 postačí zapojit vodiče 4 vodičové rozhraní SPI(tj.: MISO, MOSI, SCLK, CSn), napájení bezdrátového modulu a pro snadnější komunikaci s čipem je vhodné použít i piny GDO0 a GDO2, které umožní snadnější řízení spotřeby a přechody z úsporných režimů. S určitou mírou nadhledu se dá říci, že deska je více ukázková, nežli univerzální.

Celkem nevhodně jsou na této desce řešeny analogové vstupy, deska má na ukázkou analogový audio vstup, v jehož cestě je operační zesilovač. Samotné piny určující meze AD převodníku jsou na pevně spojeny s napájecím napětím, resp. se zemí v případě $-AV_{SS}$. Jedinině vyvedené analogové vstupy se nacházejí na pinech vyvedených portů 6 a 7. V ukázkové aplikaci používám kanál AD převodníku vyvedený na pin P7.6.

3.4.2 MSP430FG461x Experimenter Board

MSP430FG461x je proprietární vývojová deska určená pro čipy CC11xx, pro experimentování s čipy CC25xx-EMK je nutné upravit piny proprietárního konektoru, jak je vidět na obrázku 6.2 fialovým vodičem. Deska je osazena mikrokontrolérem z rodiny MSP430FG4xxx, konkrétně MSP430FG4618.

3.4.3 CC1101-EMK

CC1101-EMK je bezdrátový modul osazen čipem CC1101. Modul ve vybaven proprietárními konektory pro připojení ke "sniffovací" desce SFR05 a experimentálními vývojovými deskám MSP430FG461x Experimenter Board a MSP-EXP430F5438. Modul není vybaven na plošném spoji vinutou anténou a pro připojení prutové antény disponuje konektorem SMA.

3.4.4 MSP430FET-UIF

Jedná se o JTAG programátor procesorů MSP430, případně JTAG kompatibilních zařízení. Vývojové prostředí Code Composer Studio využívá pro Program a Debug low level USB CDC(Communication Device

Class) a VCP (Virtual Com Port) drivery. Vývojové prostředí IAR Embedded Workbench for MSP430 (IAR EW MSP430) využívá high level MSP430.DLLv3 drivery. MSP430FET-UIF v základním nastavení využívá high level drivery. Toto nastavení je použitelné pro většinu programovacích utilit jako SmartRF Flash Programmer, OLIMEX programmer nebo konzolové programování. Při použití v prostředí Code Composer Studio dojde automaticky k aktualizaci firmwaru MSP430FET-UIF. Touto aktualizací se stane programátor nefunkční v jiných prostředích. Pokud chceme zařízení používat v jiném prostředí použijeme downgrade utilitu, která se instaluje s Code Composer Studiem. Tuto utilitu ve Windows nalezneme ve Start → Programy → Texas Instruments → MSP-FET430UIF Debug Interface jako MSP-FET430UIF v3 to v2 Downgrade.

3.4.5 ASIX Presto

Programátor Asix Presto je poměrně univerzální programátor podporující programování osazených součástek - ISP (In System Programming). Protože je kompatibilní s rozhraním Spy-By-Wire firmy Texas Instruments používal jsem jej pro programování testovacího vysílače. Podstatnou nevýhodou pro mne byla nulová podpora ladění aplikace. Proto jsem musel ladit aplikaci za pomoci tlačítek a led vyvedených na testovacím vysílači.

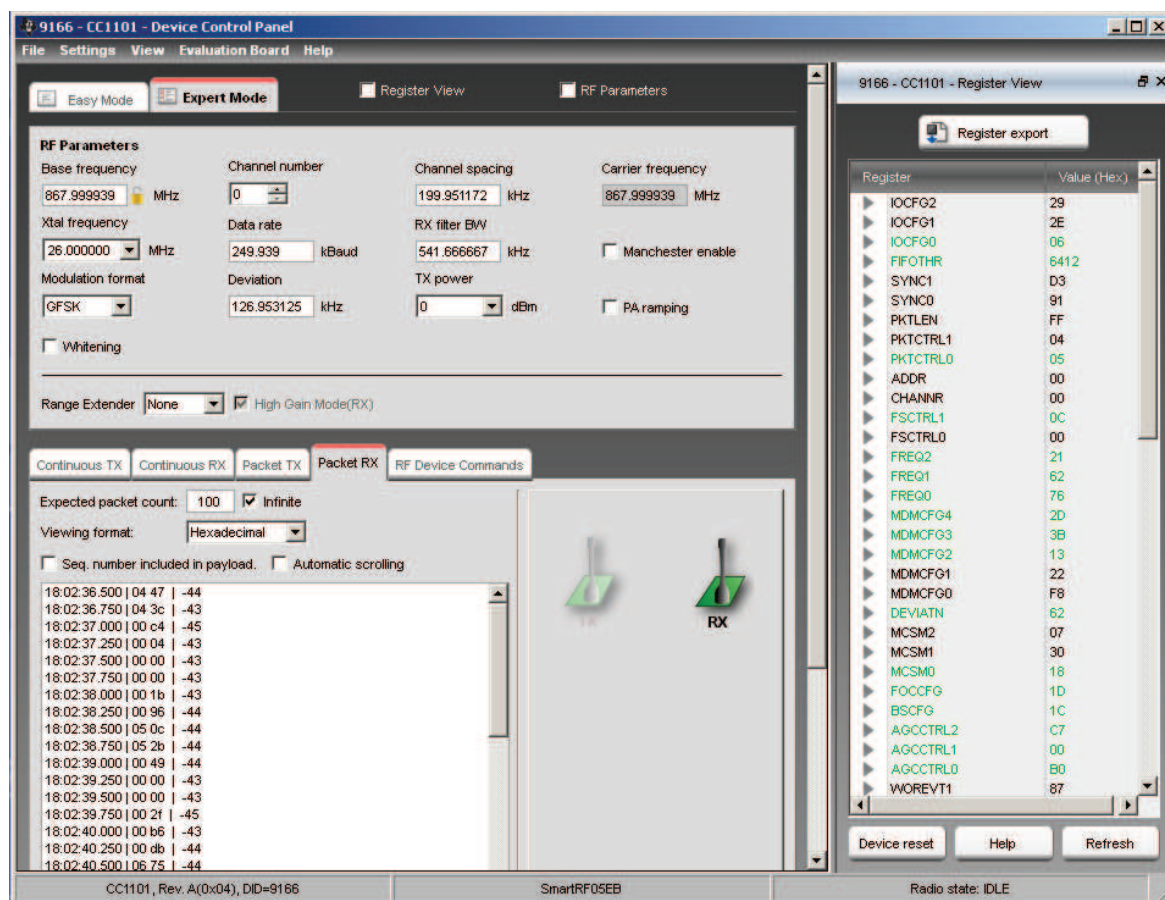
3.5 Softwarové prostředky

3.5.1 Smart RF Studio

Smart RF Studio je nástroj pro vizualizaci rádiového rozhraní bezdrátových modulů Texas Instruments. Umožňuje přímý přístup k registrům rádiového rozhraní. Přes "uživatelsky přívětivé" rozhraní lze nastavit nosnou frekvenci, datovou rychlost, šířku filtru receiveru, modulaci, deviaci frekvence a vysílací výkon. Pro tyto parametry nemusím přepočítávat obsahy jednotlivých registrů. Vysílací výkon lze nastavit v hodnotách: 10, 0, -6 a -12 dBm.

Z hlediska nastavení přijímače pro sniffování je nejdůležitější nastavení správné hodnoty šířky pásma vstupního filtru, abych dosáhl co nejvyšší citlivosti a co nejmenší ztráty dat. Na vývojové desce SmartRF05 je použitý krystal 26 MHz, což je typická hodnota pro XT2CLK, 27 MHz je maximální mezní frekvence, kterou lze pro krystal použít.

Nejvíce se mi osvědčilo Smart RF Studio ve verzi v1.6.1. V této verzi jsem generoval i nastavení registrů pro jednotlivé módy Wireless M-Bus. Nastavení exportovaných registrů je ve výpisech kódu 3 a 4. Export registrů umožňuje i uživatelsky definovaný export.



Obrázek 3.6: Smart RF Studio 1.6.1 [17]

3.5.2 Code Composer Studio

Program pro vývojovou desku byl programován v Code Composer Studiu v5.3. Jedná se o vývojové prostředí od Texas Instruments postavené na vývojovém prostředí eclipse doplněného C compilerem pro mikrokontroléry Texas Instruments CC430 a MSP430. Toto vývojové prostředí má podporu ladění¹¹ aplikace a programování. Používám free licenci s omezením velikosti kódu 16kB.

¹¹Podpora debugging ověřena s připojením pomocí JTAG, pro součástky programovatelné pomocí Spy-By-Wire nebylo ověřeno

4 Výsledky, možnosti vylepšení

Pro ukázkové použití jsem zvolil měření hodnoty analogového napětí z potenciometru pomocí 12ti bitového A/D převodníku, tuto hodnotu korektně zapouzdřil do rámce protokolu M-Bus, poté rámec M-Bus zakódoval příslušným kódováním přidal postambuli a pokud to bylo nutné i část synchronizačního slova. S takto připraveným paketem jsem nastavil rádiové rozhraní na parametry příslušného módu. Takto upravený M-Bus rámec je již korektní paket Wireless M-Bus a je možné ho zapsat do paměti rádiového modulu a inicializovat vysílání.

Pokud se jedná o přijímač, rádiové rozhraní očekává synchronizační slovo. Při přijetí paketu je paket částečně dekódován, aby bylo možné zjistit délku přijatých dat. Po této operaci jsou přijata i zbývající data. Po extrakci dat z rámce M-Bus jsou data zobrazena na LCD.

Jako možné vylepšení bych navrhnul implementaci proměnných datových struktur v rámci aplikační vrstvy protokolu. Wireless M-Bus používá fixní datové struktury dle normy [2]. Variabilní datová struktura na aplikační vrstvě umožňuje nejen podrobnější popis měřeného média (rozšiřitelná o "rozšiřitelné" DIFE a VIFE), ale umožňuje i v rámci aplikační vrstvy vytvořit vrstvu "síťovou" s adresováním více měřičů.

5 Závěr

Wireless M-Bus byl pro mě poměrně neznámým protokolem pro bezdrátovou komunikaci v pásmu pod 1 GHz. Nicméně se jedná o poměrně "živý" protokol, který se neustále implementuje do nových zařízení. O neustálém pokroku ve vývoji svědčí i poslední aktualizace norem DIN EN 13757-4:2011 tedy z roku 2011 u našich západních sousedů. My jsme s přejímáním nových technologií do legislativy o něco pozadu. Wireless M-Bus si krom prostých odečtů dat z měřičů energií nachází cestu i do domácí automatizace a inteligentních domů. Například firma Landis+Gyr na protokolu Wireless M-Bus postavila bezdrátovou komunikaci měřičů energií a informačního panelu. Majitelé těchto "inteligentních" přístrojů tak mají plnou kontrolu nad svou spotřebou energie v domácnosti. Je tedy spíše otázkou času než se stane protokol obecně společnosti více známým, akceptovaným a uznávaným standardem pro bezdrátovou komunikaci.

Díky poměrně nízkým přenosovým rychlostem existuje mnoho aplikací, kam Wireless M-Bus cestu nikdy nenajde, ovšem tam, kde je upřednostňována spotřeba nad přenosovou rychlostí může Wireless M-Bus výborně posloužit. Takovou aplikací mohou být dlouhodobá měření, například při výrobě elektřiny ve fotovoltaických elektrárnách nebo bezdrátová komunikace v automatizaci tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost, například bezdrátové otevírání ventilů. Dokázal bych si představit použití Wireless M-Bus i v zabezpečovací technice.

Pro Wireless M-Bus jsou bezdrátové transceivery Texas Instruments dobrým řešením. Sice díky paketovému enginu neumožňují jednoduchý přenos protokolem Wireless M-Bus, ale díky flexibilitě je toto možné řešit na úrovni mikrokontroléru. Procesory jsou schopny rychle vypočítat CRC při sestavení rámce M-Bus a celkový přenos není zdržen.

Bezdrátové transceivery CC1101 jsou univerzálním řešením pro přenosy v subgigahertzových pásmech např. na mnou používaných 868MHz. Jelikož výrobce čipu deklaruje splnění všech výkonových norem, nemusím mít starosti s vyzařovaným rušením v případě vlastního zařízení.

Tato práce byla kompletně napsána v programu LyX a vysázena za použití programu pro sazbu L^AT_EX.

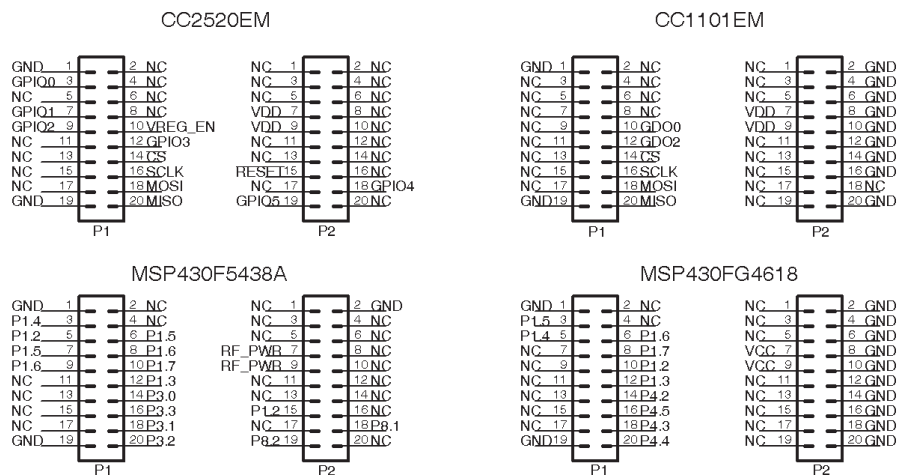
Reference

- [1] M-Bus Usergroup. The M-Bus: A Documentation. Rev. 4.8, 1997, 88 s. [online]. [cit. 25.4.2013]. Dostupný také z: <http://www.m-bus.com/files/MBDOC48.PDF>
a na CDROM:\Dokumenty\Mbus\The_M-Bus_-_A_Documentation_Rev_4.8.PDF
- [2] ČSN EN 13757-4. Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým čtením - Část 4: Bezdrátová měřidla (Radiometry pro provoz v pásmu 868 MHz až 870 MHz). 2006. 36 s. Třídící znak 258513. Cenová skupina 414.
- [3] Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým ovládáním - Část 3: Určené aplikace vrstvy. 2009. 60 s. Třídící znak 258513
- [4] Systémy a zařízení pro dálkové ovládání - Část 5: Přenosové protokoly - Oddíl 2: Procedury linkového přenosu. 1997. 52 s. Třídící znak 334650
- [5] Steinbeis Transfer Center Embedded Design and Networking. Wireless M-Bus Documentation, 2011, 17 s. [online]. [cit. 25.4.2013]. Dostupný také z: http://www.stzedn.de/wireless-m-bus-stack.html?file=t1_files/products/wmbus_stack/wireless_m_bus_internet.pdf
a na CDROM:\Dokumenty\Mbus\wireless_m_bus_internet.pdf
- [6] Wireless M-Bus 2010 Part 4 User Guide, Telit ®, 2010, 45 s. [online]. [cit. 29.4.2013]. Dostupný také z: <http://www.telit.com/module/infopool/download.php?id=4001>
a na CDROM:\Dokumenty\Mbus\Telit_Wireless_M-Bus_2010_Part4_User_Guide_r3-1.pdf
- [7] The Flag association ltd. FLAG Manufacturers ID - Manufacturers identification characters. [online]. [cit. 29.4.2013] Dostupný také z: <http://dlms.com/organization/flagmanufacturesids/index.html>
- [8] Texas Instruments. Patrick Seem. Application Note AN067: Wireless MBUS Implementation with CC1101 and MSP430, 2008, 38 s. [online]. [cit. 6.4.2013] Dostupný také z: <http://www.ti.com/lit/an/swra234a/swra234a.pdf>
a na CDROM:\Dokumenty\swra234a.pdf
- [9] ČESKO. Vyhláška č. 105 ze dne 19. dubna 2010 o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka), In: Sběrka zákonů České Republiky. 2010, částka 38, s. 1178-1296 Dostupný také z: http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf
a z CDROM:\Dokumenty\vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf. ISSN 1211-1244.
- [10] Český Telekomunikační Úřad. Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/10/04.2011-5 pro kmitočtové pásmo 470–960 MHz, [online]. [cit. 29.4.2013]. Dostupný také z: http://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok_2011/pv-p_10-04_2011-05.pdf
a na CDROM:\Dokumenty\pv-p_10-04_2011-05.pdf
- [11] ČSN ETSI EN 300 220-1. Elektromagnetická kompatibilita a rádiové spektrum (ERM) - Zařízení krátkého dosahu (SRD) - Rádiová zařízení pro použití v kmitočtovém rozsahu 25 MHz až 1000 MHz s výkonem do 500 mW - Část 1: Technické vlastnosti a zkušební metody, 2010. 84 s. Třídící znak 87 5015.
- [12] OPEN meter. Energy Project No 226369. Founded by EC. Part 1: Description of current State-Of-The-Art technologies and protocols - General overview of State-Of-The-Art technological alternatives. 2009. [online]. [cit. 29.4.2013]. 62 s. Dostupný také z: <http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-MeterWP2D2.1part1v3.0.pdf>

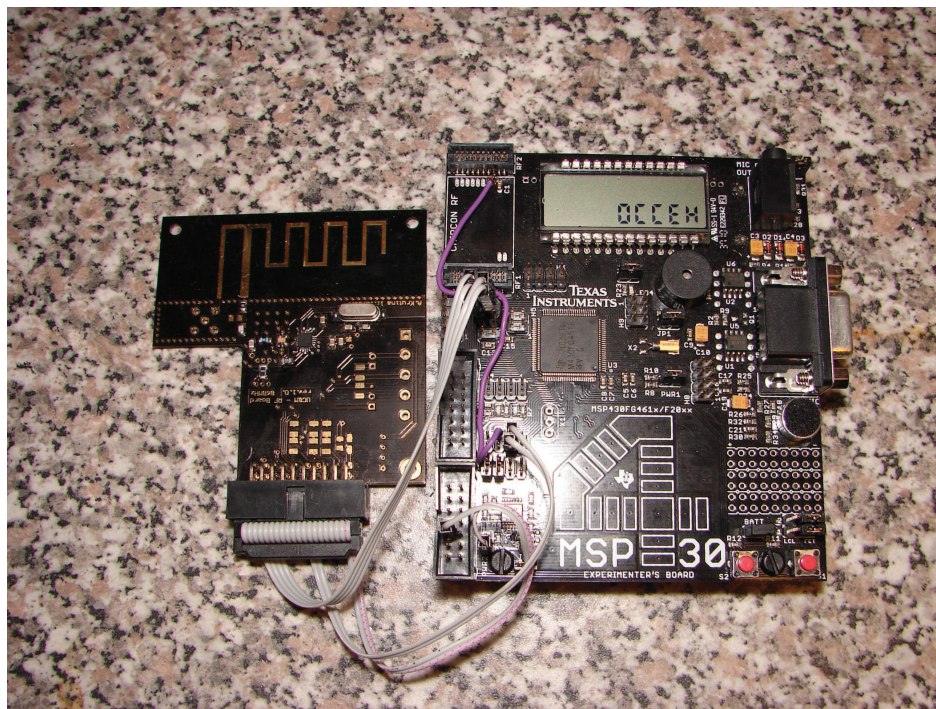
- [13] OPEN meter. Energy Project No 226369. Funded by EC: Part 3: State-Of-The-Art technologies and protocols - Description of State-Of-The-Art wireless access technologies. 2009. [online]. [cit. 29.4.2013]. 54 s. Dostupný také z:<http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-Meter%20WP2%20D2.1%20part3%20v1.0.pdf>
- [14] OPEN meter. Energy Project No 226369. Funded by EC: Part 4: State-Of-The-Art technologies and protocols - Description of State-Of-The-Art communication protocols and data structures. 2009. [online]. [cit. 29.4.2013]. 54 s. Dostupný také z:<http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-Meter%20WP2%20D2.1%20part4%20v1.0.pdf>
- [15] Texas Instruments. Code Composer Studio™ v5.3 User's Guide for MSP430™ User's Guide. Literature Number: SLAU157x. 2013. 49 s. [online]. Dostupný také z:<http://www.ti.com/lit/ug/slau157x/slau157x.pdf>
- [16] Chipcon Products from Texas Instruments, Evjen P.M. Application Note AN001: SRD regulations for licence free transceiver operation. 2003. [online]. [cit. 29.4.2013]. 17 s. Dostupný také z:<http://www.ti.com/lit/an/swra090/swra090.pdf>
- [17] Texas Instruments. Smart RF Studio 7. Verze 1.6.1. [Software]. [přístup 27. listopadu 2011]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/zip/swrc176>. Požadavky na systém: PC Windows 98, Windows 2000, Windows XP (32 bit), Windows Vista (32 bit) and Windows 7 (32 bit).

6 Přílohy

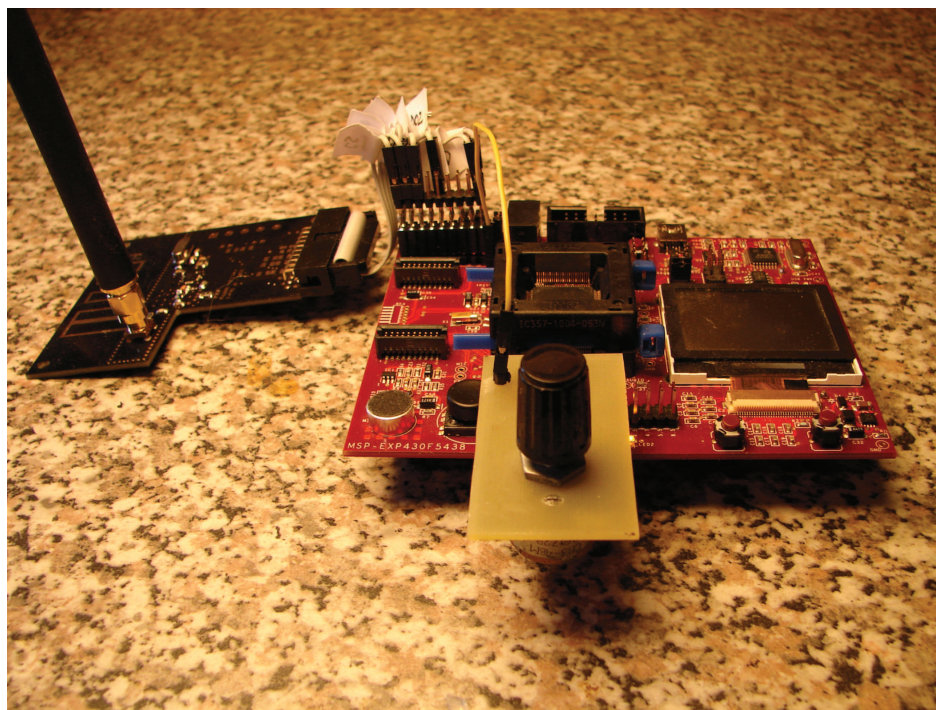
6.1 Obrázky



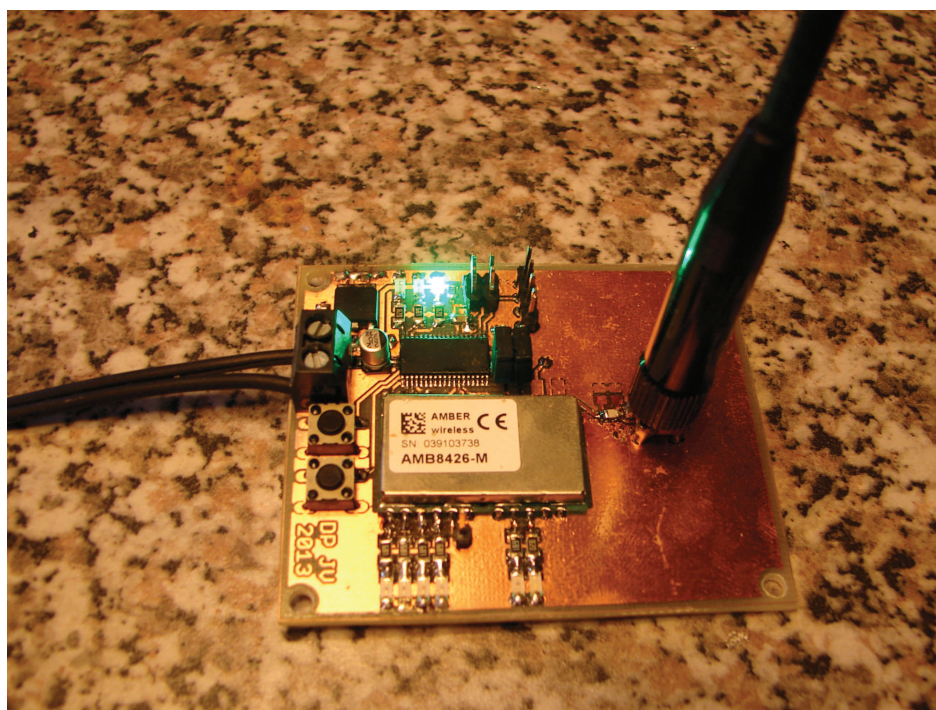
Obrázek 6.1: CC1101 a CC2520 pinout



Obrázek 6.2: Vývojová deska MSP430 Experimenter's Board osazená mps430fg4618 s připojeným rádiovým rozhranním CC1101

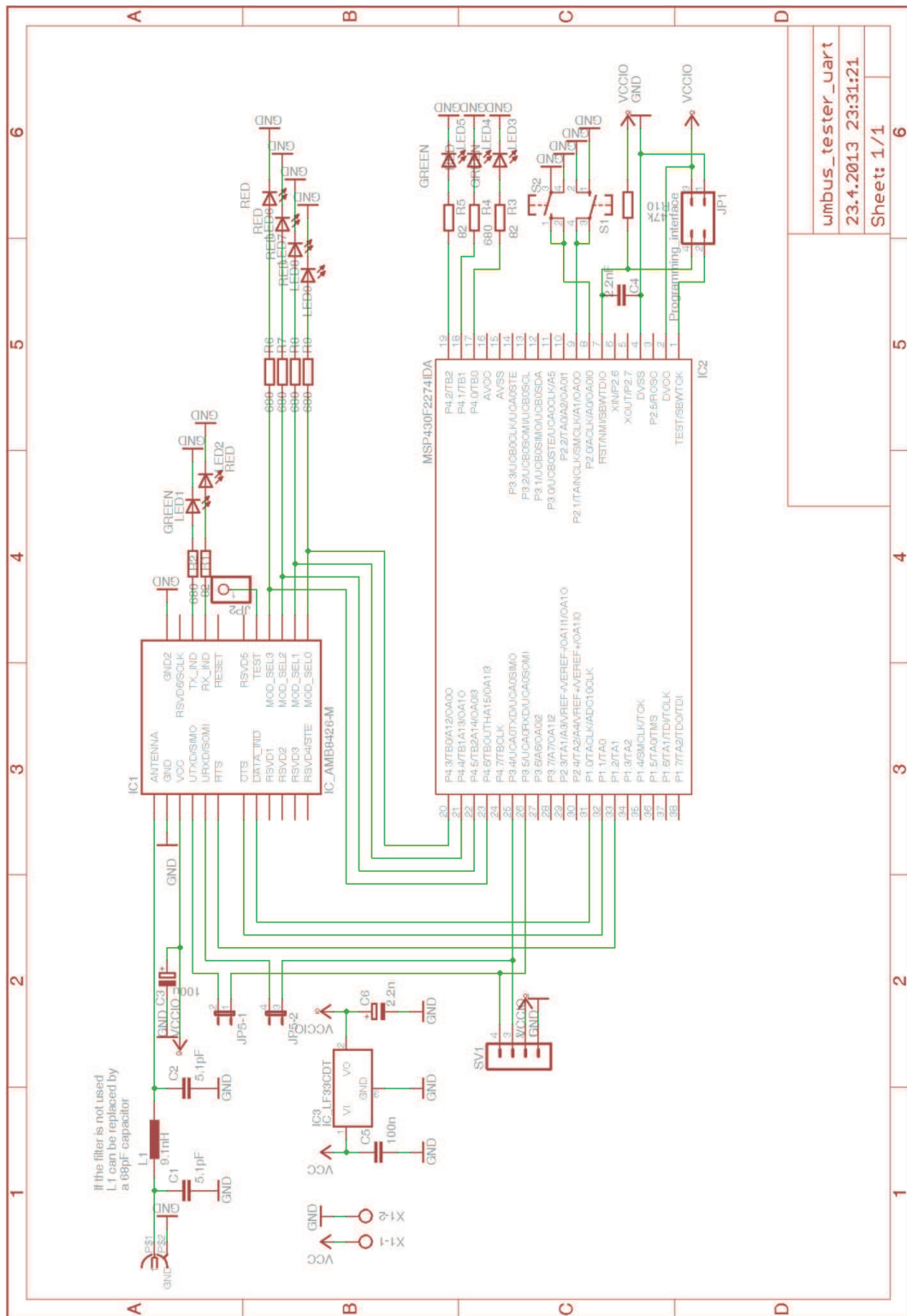


Obrázek 6.3: Vývojová deska MSP-EXP430F5438 osazená mps430f5438a s připojeným rádiovým rozhraním CC1101



Obrázek 6.4: Testovací vysílač Wireless M-Bus s msp430f2274 a proprietárním rádiovým rozhraním Amber AMB8426-M

6.2 Schémata



Obrázek 6.5: Schéma testovacího vysílače/přijímače Wireless M-Bus

6.3 Tabulky

Table 6.1: ISM pásma jak je definuje ITU-R

Frekvenční rozsah [Hz]	Centrální frekvence [Hz]	Dostupnost v Evropě	Dostupnost ve zbytku světa
6,765 - 6,795 MHz	6,780 MHz	Částečná	Subjekt s lokálním povolením
13,553 - 13,567 MHz	13,560 MHz	Ano	
26,957 - 27,283 MHz	27,120 MHz	Ano	
40,66 - 40,70 MHz	40,68 MHz	Ano	
433,05 - 434,79 MHz	433,92 MHz	Ano	Pouze region 1, definice v [?]
902 - 928 MHz	915 MHz	Ne	Pouze region 2, definice v [?]
2,400 - 2,500 GHz	2,450 GHz	Ano	
5,725 - 5,875 GHz	5,800 GHz	Ano	
24 - 24,25 GHz	24,125 GHz	Ano	
61 - 61,5 GHz	61,25 GHz	Částečná	Subjekt s lokálním povolením
122 - 123 GHz	122,5 GHz	Částečná	Subjekt s lokálním povolením
244 - 246 GHz	245 GHz	Částečná	Subjekt s lokálním povolením

Tabulka 6.2: Operační módy WM-BUS jak je specifikuje ČSN EN 13757-4:2006

Operační mód	S1	S2	S1-m	T1	T2	R2
Frekvence [MHz]	868,300	868,300	868,300	868,95	868,95	868,330
Tolerance frekvence	±60 ppm	±25 ppm	±60 ppm	±60 ppm	±25 ppm	±20 ppm
Počet kanálů	1	1	1	1	1	11
vzdálenost kanálů	-	-	-	-	-	60kHz
max. Δf [kHz]	±50	±50	±50	±50	±50	±6
f_{CHIP} [kHz]	32,768	32,768	32,768	100	100; 32,768	4,8
Přen. rychlost [kbit/s]	$f_{CHIP} * \frac{1}{2}$	$f_{CHIP} * \frac{1}{2}$	$f_{CHIP} * \frac{1}{2}$	$f_{CHIP} * \frac{2}{3}$	$f_{CHIP} * \frac{1}{2}$; $f_{CHIP} * \frac{2}{3}$	$f_{CHIP} * \frac{1}{2}$
Kódování	Manchester	Manchester	Manchester	3 out of 6	obojí	Manchester
Délka preamble [bit]	576	48	48	48	48	96
Bitů mezi rámci [bit]	2	2	2	2	2	2
Duplex	ne	ano	ne	ne	ano	ano

Table 6.3: Kódy pole CI protokolu Wireless M-Bus dle [3]

Hodnota CI	Význam
0x50	reset aplikace
0x51	Odeslání dat(Master -> Slave)
0x52	Výběr zařízení slave
0x5C	synchronize action
0x70	Slave to Master: report of application errors
0x71	Slave to Master: report of alarms
0x72	EN 13757-3 aplikační vrstva s plnou hlavičkou [12bajtů]
0x78	EN 13757-3 aplikační vrstva bez hlavičky
0x7A	EN 13757-3 aplikační vrstva s krátkou hlavičkou [4bajty]
0x81	rezervováno pro budoucí použití CEN-TC294
0x82	rezervováno pro budoucí použití CENELEC-TC205
0x90~0x97	manufacturer specific (obsolete)
0xA0~0xB7	Výrobce specifická data aplikační vrstvy
0x00~0x4F, 0x54~0x58	rezervováno pro aplikace založené na DLMS
ostatní	Rezervováno

Table 6.4: Přehled čipů s bezdrátovým rozhraním firmy Texas Instruments

Název	Frekvenční pásmo	Typ
CC430	Sub 1GHz ISM	SoC
CC1100	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1100E	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1101	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC110L	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1110	Sub 1GHz ISM	SoC
CC1111	Sub 1GHz ISM	SoC, USB
CC113L	Sub 1GHz ISM	Receiver
CC113L	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1120	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1121	Sub 1GHz ISM	Tranceiver
CC1150	Sub 1GHz ISM	Transmitter
CC115L	Sub 1GHz ISM	Transmitter
CC1175	Sub 1GHz ISM	Transmitter

Název	Frekvenční pásmo	Typ
CC2530	2.4 GHz	SoC
CC2531	2.4 GHz	SoC, USB
CC2533	2.4 GHz	SoC
CC2430	2.4 GHz	SoC
CC2431	2.4 GHz	SoC
CC2520	2.4 GHz	Transceiver
CC2500	2.4 GHz	Transceiver
CC2510	2.4 GHz	SoC
CC2511	2.4 GHz	SoC, USB
CC2540	2.4 GHz	SoC, USB
CC2550	2.4 GHz	Transmitter

Table 6.5: Přehled některých výrobců modulů Wireless M-Bus

Výrobce	Adenuis RF	Panasonic	Radiocrafts	Telit	Embit	Amber
Typ	ARF7751A/B/C	PAN7550	RC1180-MBUS	ME50-868	EMB-WMBMF	AMB8426-M
Vysílací výkon	14 dBm (25mW)	-30 až +10 dBm	9 dBm	14 dBm	14 dBm	11 dBm
Citlivost	-117 dBm	-109 dBm	-106 dBm	-108 dBm	-122 dBm	-100 dBm
Provozní napětí	2.0~3.6V ¹²	1.8~3.6V	2.0~3.6V	2.0~3.6V	2.0~3.6V ¹³	2.2~3.6V
Spotřeba Tx [mA]	35	30	37	45	43	38
Spotřeba Rx [mA]	22	17	22	26	<19/13/3 ¹⁴	24
Standby [µA]	<0.6	neuváděno	neuváděno	1 / 3 ¹⁵	neuváděno	<0.3
Sleep [µA]	<0.2	<1	typ. 0.3	neuváděno	neuváděno	neuváděno
Dosah	1000m	neuváděno	neuváděno	2000m	neuváděno	700m

6.4 Výpisy kódu

Algorithm 2 Testovací aplikace ADC12_A

```

/* * main.c */ #include <msp430.h>
int temp;
int main(void) {
    WDTCIL = WDIPW + WDTIOLD; // Stop WDT
    /*
     * ADC12SHT0x = 0000b = 4 ADC12CLK sample-and-hold time cycles
     *                                     //for ADC12MEM0 ~ ADC12MEM7 //not used
     * ADC12MCS = 0b = Multiple sample conversion is not used
     * ADC12REF2_5 = 0 reference 1.5V is used
     */
    ADC12CTL0 = ADC12SHT12 //ADC12SHT12 - sample-and-hold
                //time ADC12MEM8 ~ ADC12MEM15 = 64 ADC12CLK cycles
                + ADC12ON //enable ADC12 core
                + ADC12REFON; //reference generator on
    ADC12CTL1 = ADC12CSTARTADD_12 //start address ADC12MEM12
                + ADC12SHP; // Use sampling timer
    ADC12CTL2 = ADC12RES_2; //12 bit
    ADC12MCTL12 = ADC12INCH_12;
    ADC12IE = ADC12IE12; // Enable interrupt A12
    P7SEL |= BIT6; // P7.4 ADC option select
    P1DIR |= BIT1; // P1.1 output
    while (1) {
        ADC12CTL0 |= ADC12ENC;
        ADC12CTL0 |= ADC12SC; // Start sampling/conversion
        __bis_SR_register(LPM0_bits + GIE); // LPM0,
        //ADC12_ISR will force exit
    }
}
#pragma vector = ADC12_VECTOR
__interrupt void ADC12_ISR(void) {
    switch (__even_in_range(ADC12IV, 34)) {
        case 30: // Vector 30: ADC12IFG12
            temp = ADC12MEM12;
            if (temp >= 0x7ff) // ADC12MEM = A0 > 0.5AVcc?
                P1OUT |= BIT1; // P1.1 = 1
            else
                P1OUT &= ~BIT1; // P1.1 = 0
            ADC12CTL0 &= ~ADC12ENC;
            ADC12CTL0 &= ~ADC12SC;
            __bic_SR_register_on_exit(LPM0_bits); // Exit active CPU
            break;
        default:
            break;
    }
}

```

Algorithm 3 Nastavení registrů pro mód S

```

/* Deviation = 47.607422, Base frequency = 868.299866 */
/* Channel number = 0, Carrier frequency = 868.299866 */
/* Modulation format = 2-FSK, Manchester enable = false */
/* Sync word qualifier mode = 15/16 + carrier-sense above threshold */
/* Preamble count = 4, Channel spacing = 199.951172 */
/* Data rate = 32.7301, RX filter BW = 270.833333 */
/* Data format = Normal mode */
/* CRC enable = false */
/* Device address = 0, Address config = No address check, TX power = 10 */
regVal_t SMODE_regval[] = {
    CC110x_IOCFCG2, 0x50, /* GDO2 Output Configuration */
    CC110x_IOCFCG1, 0x7C, /* GDO1 Output Configuration */
    CC110x_IOCFCG0, 0x06, /* GDO0 Output Configuration */
    CC110x_FIFOTHR, 0x47, /* RX FIFO and TX FIFO Thresholds */
    CC110x_SYNC1, 0x77, /* Sync Word, High Byte */
    CC110x_SYNC0, 0x00, /* Sync Word, Low Byte */
    CC110x_PKTLEN, 0xFF, /* Packet Length */
    CC110x_PKTCTRL1, 0x00, /* Packet Automation Control */
    CC110x_PKTCTRL0, 0x00, /* Packet Automation Control */
    CC110x_ADDR, 0x00, /* Device Address */
    CC110x_CHANNR, 0x00, /* Channel Number */
    CC110x_FSCTRL1, 0x06, /* Frequency Synthesizer Control */
    CC110x_FSCTRL0, 0x00, /* Frequency Synthesizer Control */
    CC110x_FREQ2, 0x21, /* Frequency Control Word, High Byte */
    CC110x_FREQ1, 0x65, /* Frequency Control Word, Middle Byte */
    CC110x_FREQ0, 0x6A, /* Frequency Control Word, Low Byte */
    CC110x_MDMCFG4, 0x6A, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG3, 0x4A, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG2, 0x05, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG1, 0x22, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG0, 0xF8, /* Modem Configuration */
    CC110x_DEVIATN, 0x47, /* Modem Deviation Setting */
    CC110x_MCSM2, 0x11, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_MCSM1, 0x02, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_MCSM0, 0x10, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_FOCCFG, 0x16, /* Frequency Offset Compensation Configuration */
    CC110x_BSCFG, 0xB1, /* Bit Synchronization Configuration */
    CC110x_AGCCTRL2, 0x02, /* AGC Control */
    CC110x_AGCCTRL1, 0x04, /* AGC Control */
    CC110x_AGCCTRL0, 0x20, /* AGC Control */
    CC110x_FREND1, 0xB6, /* Front End RX Configuration */
    CC110x_FREND0, 0x10, /* Front End TX Configuration */
    CC110x_FSCAL3, 0xE9, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL2, 0x2A, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL1, 0x00, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL0, 0x1F, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSTEST, 0x21, /* Frequency Synthesizer Calibration Control */
    CC110x_PTEST, 0xB1, /* Production Test */
    CC110x_AGCTEST, 0x3F, /* AGC Test */
    CC110x_TEST2, 0x81, /* Various Test Settings */
    CC110x_TEST1, 0x35, /* Various Test Settings */
    CC110x_TEST0, 0x09, /* Various Test Settings */
    // Terminate array
    0, 0x00
};

```

Algorithm 4 Nastavení registrů pro mód T

```

/* Deviation = 38.085938, Base frequency = 868.949707 */
/* Channel number = 0, Carrier frequency = 868.949707 */
/* Modulation format = 2-FSK, Manchester enable = false */
/* Sync word qualifier mode = 15/16 + carrier-sense above threshold */
/* Preamble count = 4, Channel spacing = 199.951172, Data rate = 100.174 */
/* RX filter BW = 325.000000, CRC enable = false, Whitening = false */
/* Device address = 0, Address config = No address check, TX power = 10 */
regVal_t TMODE_regval[] = {
    CC110x_IOCFIG2, 0x29, /* GDO2 Output Configuration */
    CC110x_IOCFIG1, 0x2E, /* GDO1 Output Configuration */
    CC110x_IOCFIG0, 0x06, /* GDO0 Output Configuration */
    CC110x_FIFOTHR, 0x47, /* RX FIFO and TX FIFO Thresholds */
    CC110x_SYNC1, 0xD3, /* Sync Word, High Byte */
    CC110x_SYNC0, 0x91, /* Sync Word, Low Byte */
    CC110x_PKTLEN, 0xFF, /* Packet Length */
    CC110x_PKTCTRL1, 0x00, /* Packet Automation Control */
    CC110x_PKTCTRL0, 0x00, /* Packet Automation Control */
    CC110x_ADDR, 0x00, /* Device Address */
    CC110x_CHANNR, 0x00, /* Channel Number */
    CC110x_FSCTRL1, 0x06, /* Frequency Synthesizer Control */
    CC110x_FSCTRL0, 0x00, /* Frequency Synthesizer Control */
    CC110x_FREQ2, 0x21, /* Frequency Control Word, High Byte */
    CC110x_FREQ1, 0x6B, /* Frequency Control Word, Middle Byte */
    CC110x_FREQ0, 0xD0, /* Frequency Control Word, Low Byte */
    CC110x_MDMCFG4, 0x5B, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG3, 0xF9, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG2, 0x05, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG1, 0x22, /* Modem Configuration */
    CC110x_MDMCFG0, 0xF8, /* Modem Configuration */
    CC110x_DEVIATN, 0x44, /* Modem Deviation Setting */
    CC110x_MCSM2, 0x07, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_MCSM1, 0x30, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_MCSM0, 0x10, /* Main Radio Control State Machine Configuration */
    CC110x_FOCCFG, 0x16, /* Frequency Offset Compensation Configuration */
    CC110x_BSCFG, 0x6C, /* Bit Synchronization Configuration */
    CC110x_AGCCTRL2, 0x03, /* AGC Control */
    CC110x_AGCCTRL1, 0x40, /* AGC Control */
    CC110x_AGCCTRL0, 0x91, /* AGC Control */
    CC110x_FREND1, 0x56, /* Front End RX Configuration */
    CC110x_FREND0, 0x10, /* Front End TX Configuration */
    CC110x_FSCAL3, 0xEA, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL2, 0x2A, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL1, 0x00, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSCAL0, 0x1F, /* Frequency Synthesizer Calibration */
    CC110x_FSTEST, 0x59, /* Frequency Synthesizer Calibration Control */
    CC110x_PTEST, 0x7F, /* Production Test */
    CC110x_AGCTEST, 0x3F, /* AGC Test */
    CC110x_TEST2, 0x81, /* Various Test Settings */
    CC110x_TEST1, 0x35, /* Various Test Settings */
    CC110x_TEST0, 0x09, /* Various Test Settings */
    // Terminate array
    0, 0x00
};

```

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto diplomovou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis