

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Implementace protokolu M-Bus

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
Autor: Bc. Jiří Vachta

2012

zadání

## **Anotace**

Bc. Vachta, J. Implementace protokolu M-Bus

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická, 2012, 37 s., vedoucí: doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev.

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 přes rozhraní SPI komunikovat s inteligentním elektroměrem a druhá bude přes USB komunikovat s konzolovou aplikací na PC tak, aby bylo možné využít konzolový výstup pro grafickou aplikaci v různých operačních systémech.

## **Klíčová slova:**

M-Bus, Meter-Bus, Wireless M-Bus, WM-Bus, SRD, CC430, EM-CC430F5137RF900, CC430F5137, CC1101

## **Annotation**

Bc. Vachta, J. M-Bus protocol implementation

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 in two development boards. The first board will communicate over SPI interface with smart power meter and the second will be communicate over USB with PC application. It is for reason of independency on different operating systems.

## **Key words:**

M-Bus, Meter-Bus, Wireless M-Bus, WM-Bus, SRD, CC430, EM-CC430F5137RF900, CC430F5137, CC1101

## 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

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Standard M-BUS (EN 13757)</b>	<b>10</b>
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	18
2.3.4	Nároky z hlediska legislativy a EMC	18
2.3.5	Praktické aplikace Wireless M-Bus	20
<b>3</b>	<b>Implementace Wireless M-BUS (WM-BUS) na platformě Texas Instruments</b>	<b>21</b>
3.1	Idea řešení	21
3.2	Hardwarové prostředky	21
3.2.1	EM-CC430F5137RF900	21
3.2.2	Zdroje přerušení rádiového rozhraní RF1A	22
3.2.3	Nastavení registrů rádiového rozhraní	23
3.2.4	MSP430FET-UIF	24
3.2.5	Frontend pro CC430F5137RF900	24
3.2.6	Struktura programu pro CC430F5137	24
3.3	Softwarové vývojové prostředky	26
3.3.1	Smart RF Studio	26
3.3.2	Code Composer Studio	27
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Přílohy</b>	<b>31</b>
6.1	Obrázky	31
6.2	Tabulky	33

## Seznam zkratk

ACD	Access Demand
ACLK	Auxiliary Clock
AM	Aktivní mód (angl. Active mode)
CDC	Communication Device Class
CEPT	The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
DFC	Data Flow Control
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECC	The Electronic Communications Committee
EMC	Electromagnetic Compatibility
ERP	Efektivní vyzářený výkon (angl. Effective Radiated Power)
ETSI	Evropský ústav pro telekomunikační normy
ETSI	The European Telecommunications Standards Institute
FCB	Frame Count Bit
FCV	Frame Count Valid
HDO	Hromadné Dálkové Ovládání
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial Scientific and Medical band
ISO	International Standard Organisation
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
JTAG	Joint Test Action Group
KNX	Konnex
MCLK	Master Clock
NRZ	Non Return to Zero
OSI	Open Systems Interconnection
RTC	obvod reálného času (angl. Real Time Clock)
RTTE	Radio and telecommunications terminal equipment
SMCLK	Subsystem Master Clock
SoC	Systém na jednom čipu (angl. System-on-Chip)

SRD Short Range Devices

UCS Unified Clock System

VCP Virtual Com Port

Wi-Fi Wireless Fidelity

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 sítě typu IEEE 802.15.4 a jejich odnože. Do sítí IEEE 802.15.4 patří například i velmi zajímavá technologie Zigbee, sítě 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-Fi<sup>1</sup> a jiných zdrojích 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, kdy se zařízení v klidu nachází v režimu spánku s minimálním odběrem, v případě kdy jsou potřeba odeslat data se zařízení “probudí”. Takových zařízení, která vydrží fungovat spolehlivě bez zásahu člověka několik let, je poměrně málo. Jedním z takovýchto technologií může být Wireless M-Bus.

Wireless M-Bus pracuje pásmu 868 MHz, což je v Evropě bezlicenční, subgigahertzové pásmo pro zařízení krátkého dosahu, které nebude muset řešit problémy s vyšší 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. Tyto chytré měřiče umožní 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 jak celkovou spotřebu, tak i náklady pod kontrolou.

---

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

## 2 Standard M-BUS (EN 13757)



Obr. 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 data 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. Rovněž jsou zde řešeny 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

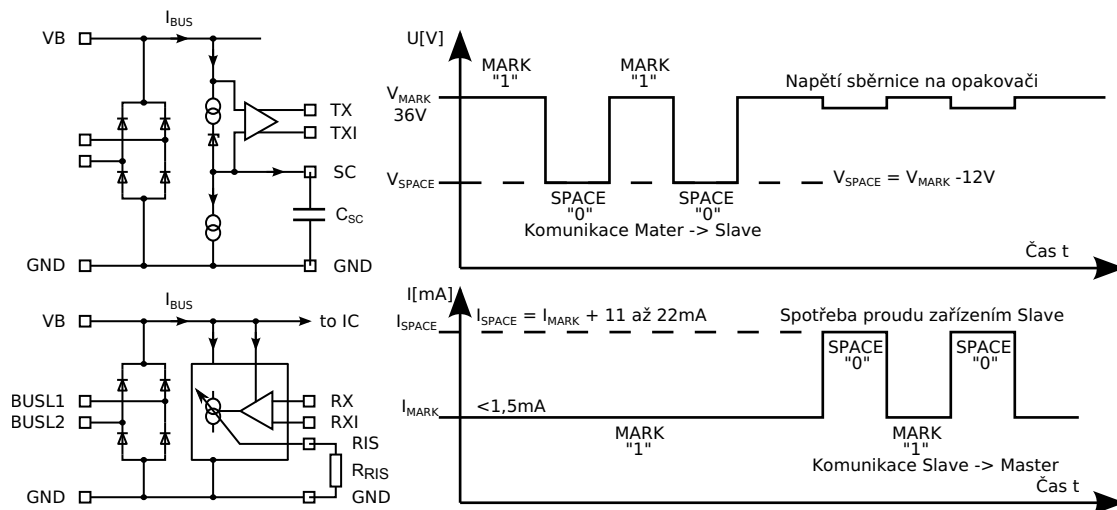
Část 6 obsahuje alternativy k fyzické vrstvě M-Bus pro lokální sběrnice do 5ti měřičů s maximální délkou kabelu 50m.

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.

Tab. 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, adresování, datová integrita	IEC 870
Fyzická	fyzické médium, bitová reprezentace, topologie, elektrické specifikace	13757-2

## 2.1 Fyzická a linková vrstva (EN13757-2)



Obr. 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. Aby Master mohl komunikovat se zařízením Slave, sníží napětí sběrnice na hodnotu 24V (SPACE). V závislosti na vzdálenosti v důsledku odporu sběrnice bude na zařízení Slave hodnota MARK nižší než 36V. Proto Slave s klidovým proudovým odběrem pod 1,5mA zaznamená pouze pokles o 12V a na něj může reagovat. Slave, při své komunikaci na rozdíl od zařízení 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 je 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, 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 rámce a začátkem dalšího, tj. mezi Stop bitem a Start bitem. Linková vrstva definuje čtyři druhy rámců: dlouhý rámec, kontrolní rámec, krátký rámec a rámec obsahující pouze jeden znak. Strukturu jednotlivých typů rámců můžete vidět na Obr. 2.3.

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

Obr. 2.3: Formát rámce M-Bus třídy FT 1.2 dle IEC870-5

Dlouhý rámec začíná Startovacím znakem 68h následovaným polem velikosti L (Lenght), které se v následujícím poli opakuje a které indikuje velikost přenášených dat. Po těchto dvou polích je v rámci znovu pole Start obsahující znak 68h. Dále rámec obsahuje pole C (kontrolní pole, funkční pole, viz Tab. 2.2). Šestý bit tohoto pole udává směr přenosu, dále pro směr Master → Slave obsahuje bity FCB (Frame Count Bit) a FCV (Frame Count bit Valid). Bit FCB značí úspěšné odeslání a může být obsažen v odpovědi jako potvrzení příjmu. Pokud je FCV log.1 je FCB použit, jinak je FCB ignorován. Při komunikaci Slave → Master, bit DFC (Data Flow Control) indikuje, že Slave už neočekává žádná data. ADC (Access Demand) bit indikuje, že Slave je připraven odeslat data s vysokou prioritou, poté může Master vyslat požadavek na tato data. Použití pole C ukazuje tabulka 2.3. Pole adresy A o velikosti 8 bitů (0 až 255 dekadicky) má funkci adresace ve směru Master → Slave. Hodnoty pole A v rozmezí 0 až 250 jsou vyhrazena jednotlivým zařízením Slave, hodnoty 254 a 255 indikují broadcast. Pokud pole A obsahuje hodnotu 253, je tím značeno, že adresace bude probíhat až na síťové vrstvě ISO-OSI. Zbylé adresy 251 a 252 jsou rezervovány pro budoucí použití. Pole CI (Control Information) dlouhého rámce je již součástí aplikační vrstvy. Následuje blok uživatelských dat až 252 bajtů, kontrolní součet součet z dat a znak Stop - 16h.

Kontrolní rámec se oproti předchozímu liší v tom, že pole L má pevnou hodnotu 3 a neobsahuje uživatelská data. Kontrolní součet se v tomto případě počítá z bloků C, A a CI.

Krátký rámec má fixní délku a začátek tohoto rámce označuje Start znak 10h. Kontrolní součet je počítán z bloků C a A, jejich význam byl vysvětlen výše.

Rámec obsahující jeden znak E5h slouží jako potvrzení přijetí dat.

Rámec obsahující jeden znak slouží jako potvrzení přenosu (angl. Acknowledge, ACK) a má hodnotu 0xE5h tj. 229 dekadicky.

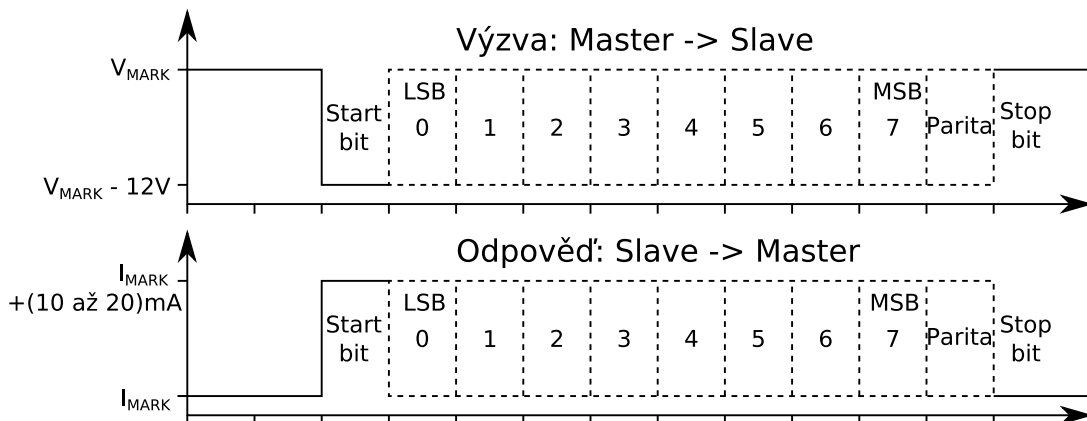
Tab. 2.2: Kontrolní pole C

Bit číslo	7	6	5	4	3	2	1	0
Směr Master → Slave	0	1	FCB	FCV	F3	F2	F1	F0
Směr Slave → Master	0	0	ACD	DFC	F3	F2	F1	F0

Tab. 2.3: Kontrolní kódy pole C protokolu M-Bus

Název	pole C		Typ rámce	Popis
	binárně	hexadecimálně		
SND_NKE	0100 0000	40	Krátký rámec	Inicializace zařízení Slave
SND_UD	01x1 0011	53/73	Dlouhý/Kontrolní rámec	Odeslání dat do zařízení Slave
REQ_UD2	01x1 1011	5B/7B	Krátký rámec	Požadavek na Class 2 data
REQ_UD1	01x1 1010	5A/7A	Krátký rámec	Požadavek Class1 data (Vysoká priorita)
RSP_UD 0	00yz 1000	8/18/28/38	Dlouhý/Kontrolní rámec	Přenos dat Master → Slave při požadavku

x: FDC bit, y: ACD bit, z: DFC bit



Obr. 2.4: Přenos jednoho znaku po sběrnici M-Bus ve směru Master → Slave a Slave → Master

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

### Pošli/Potvrď (Send/Confirm)

#### Kontrolní kód SND\_NKE → Jeden znak kontrolního pole C

Tento typ přenosu se používá při začátku přenosu nebo pokud byl přenos přerušeno, tak při obnovení komunikace. Hodnota bitu FCB je nastavena do log.1 v zařízeních Master i Slave. U zařízení Master pokud je hodnota FCB log.1, nastaví hodnota FCV také na log.1. Zařízení Slave na takovýto znak odpoví potvrzením (E5h).

#### Kontrolní kód SND\_UD → Jeden znak kontrolního pole C

Master odesílá uživatelská data do zařízení Slave, které potvrdí korektní přijetí potvrzujícím znakem E5h nebo v případě nekorektního přijetí toto potvrzení vynechá.

## Dotaz/Odpověď (Request/Respond)

### Kontrolní kód REQ\_UD2 → RSP\_UD

Master si ze zařízení Slave vyžádá Class 2 data. Slave může buď odpovědět RSP\_UD nebo odpověď vynechá. Odpověď je vynechána v případě, kdy není REQ\_UD2 rámec korektně přijat nebo nesouhlasí adresa obsažená v REQ\_UD2.

Standard EN1434-3 vyžaduje handshake typu REQ\_UD2 / RSP\_UD pro Dotaz/Odpověď a typu SND\_NKE / E5h. Všechny další funkce jsou volitelné.

Chybně přijatý rámec může být detekován těmito postupy:

- 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.2.3)

Pokud výše zmíněné postupy detekují chybu, zpráva bude zahozena a potvrzení nebude odesláno. Při komunikaci Master → Slave, Master očekává potvrzení za dobu mezi 11 a (330 bity + 50 ms), pokud Master potvrzení ve stanovené době neobdrží, pokusí se přenos zopakovat ještě dvakrát. Pokud se třikrát nepodaří přijmout validní rámec, Master čeká po dobu minimálně 33 bitů. Rovněž pokud Slave třikrát po sobě odešle chybný nebo poškozený rámec, čeká také po dobu minimálně 33 bitů. Poté se může pokusit Master odeslat SND\_NKE. Pokud pokus 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 zůstává pro data 240 bajtů<sup>2</sup>. Ve fixních i variabilních datových strukturách můžeme nalézt informace o stavu zařízení: nízké nap. napětí, chyba 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 co Slave odpoví znakem 0xE5 v původní rychlosti. Tabulku možných kódů aplikovaných zařízením Master, komunikujícím se zařízením Slave, naleznete v příloze viz. tab. 6.2. 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, naleznete v [1].

<sup>2</sup>M-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 subgahertzovém 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 jsou: voda, plyn, teplo, elektřina, atd. Měřiče energií, vybavené bezdrátovým rozhraním Wireless M-Bus jsou schopny komunikovat jak se stacionárními, tak i s mobilními čtečmi zařízeními. Předpokládá se, že rádiová část měřiče je napájena z baterie a je schopna provozu po dlouhou dobu bez zásahu, tj. bez výměny baterie. Na čtečích zařízeních, ať už stacionární nebo mobilní, není takový požadavek na dobu provozu na baterie a čtečí zařízení mohou být napájena i z externího zdroje.



Obr. 2.5: Logo Wireless M-Bus

### 2.3.1 Fyzická vrstva Wireless M-Bus

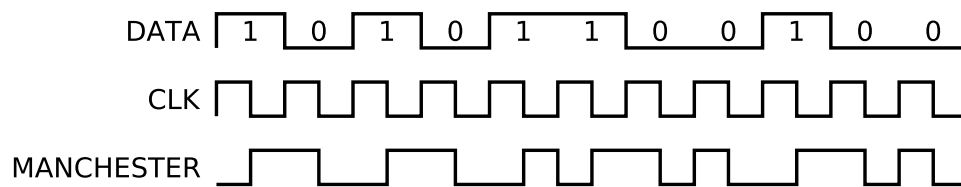
Wireless M-Bus jsou dle normy ČSN EN 13757-4 používá tři pásma pro tři různé módy komunikace: 868,3 MHz pro módy Sx, 868,95 MHz pro módy Tx a 868,33 pro mód R2. definovány tři různé operační módy komunikace. Další parametry jako přípustná odchylka frekvence  $\Delta f$ , čipová rychlost  $f_{CHIP}$  nebo přenosová rychlost naleznete v tab. 6.4. 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.

### Kódování používané 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, výstup kódování Manchester je hodinový signál. Nevýhodou použití Manchester kódování je to, že na přenos jednoho bitu informace je potřeba dvou hodinových taktů.



Obr. 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.

Tab. 2.4: 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

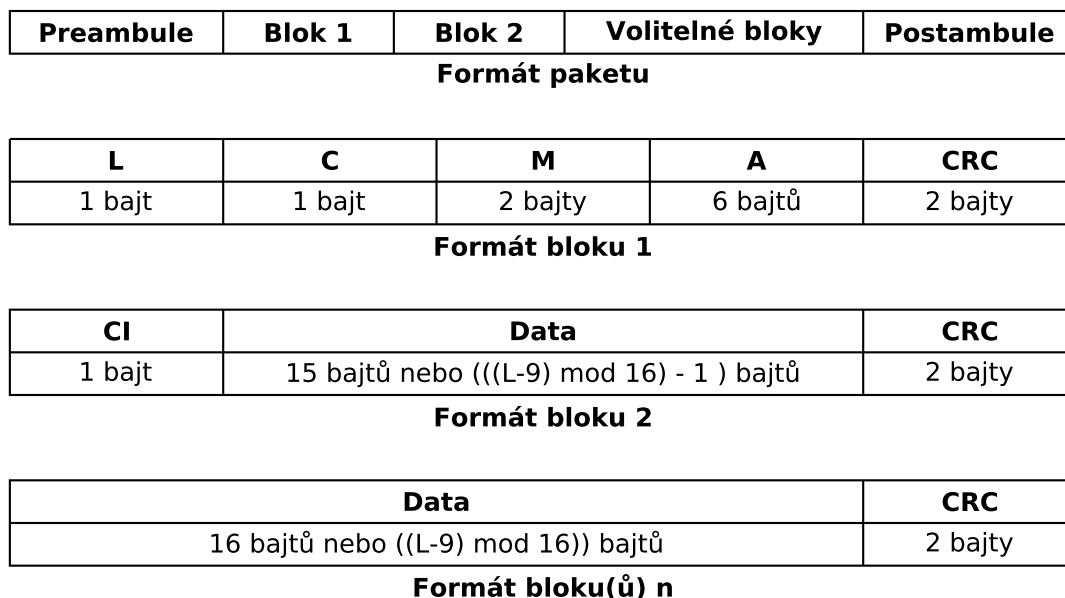
### 2.3.2 Linková vrstva Wireless M-Bus

Paket protokolu Wireless M-Bus tvoří několik bloků. První blok Preamble se skládá z hlavičky a synchronizace. Preamble má tvar:  $n * (01)00011011010010110$ . Hlavička obsahuje alternující “01” a dle čísla  $n$  rozeznáváme hlavičku dlouhou ( $n \geq 279$ ) nebo hlavičku krátkou ( $n \geq 15$ ). První pole prvního bloku je pole délky L obsahující počet bajtů uživatelských dat, kontrolního pole C a adresového pole A. Pole C specifikuje typ rámce, pole M obsahuje identifikaci výrobce, konkrétní význam pole M viz.: [18]. Pole adresy A by mělo být unikátní, což by měl zaručit výrobce nebo uživatel. Pokud je toto pole použito spolu s aplikační vrstvou M-Bus - EN 13757-3, potom by pole CI (Control Information) mělo obsahovat jeden z hodnot:  $0x72$ ,  $0x78$  nebo  $0x7A$ . Když je toto splněno může být pole A použito pro identifikační číslo, číslo verze a číslo identifikující typ zařízení, viz [19].

První bajt druhého bloku tvoří pole CI (Control Information), konkrétní kódy tohoto bloku jsou v tab.6.2 v porovnání s kódy M-Bus (tab. 6.1) vidíme, že pro odesílání dat existuje stejný kód  $0x51$ . Poslední dva bajty každého bloku tvoří negované CRC, které je počítáno z předcházejících polí. CRC je generováno polynomem:

$$x^{16} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + x^1 + 1.$$





Obr. 2.7: Paket Wireless M-Bus

### Módy komunikace protokolu Wireless M-Bus

- T-mód

V módu častého vysílání - T módu měřič samostatně odesílá data, buď periodicky nebo aperiodicky (když jsou k dispozici). Pro přenos rámce z měřiče k dalším zařízením je použita přenosová rychlost 100 kbps s kódováním 3 out of 6, zatímco komunikace v opačném směru má přenosovou rychlost 32768 kbps a kódování je použito Manchester. Submód T1 je definován jako jednosměrná komunikace, při které měřič nevyžaduje potvrzení od příjemce o přijatém rámcu. Měřič odešle data a přepne se do úsporného režimu. Zatímco submód T2 je definován jako obousměrná komunikace. Měřič po odeslání rámce krátkou dobu vyčkává na potvrzení od příjemce. Pokud měřič neobdrží odpověď přepne se do úsporného režimu. Pokud ve stanoveném čase příjemce odpoví, naváže se obousměrná komunikace mezi měřičem a koncentrátorem.

- R-mód

V módu častého příjmu, R2 módu, měřič samostatně neodesílá změřená data, ale vyčkává na výzvu od koncentrátoru. Měřič je v úsporném režimu a pravidelných úsecích se periodicky probouzí do režimu příjmu a očekává rámec. Když není přijat žádný validní wake-up rámec měřič se přepne zpět do úsporného režimu. V opačném případě se naváže obousměrná komunikace mezi měřičem a koncentrátorem.

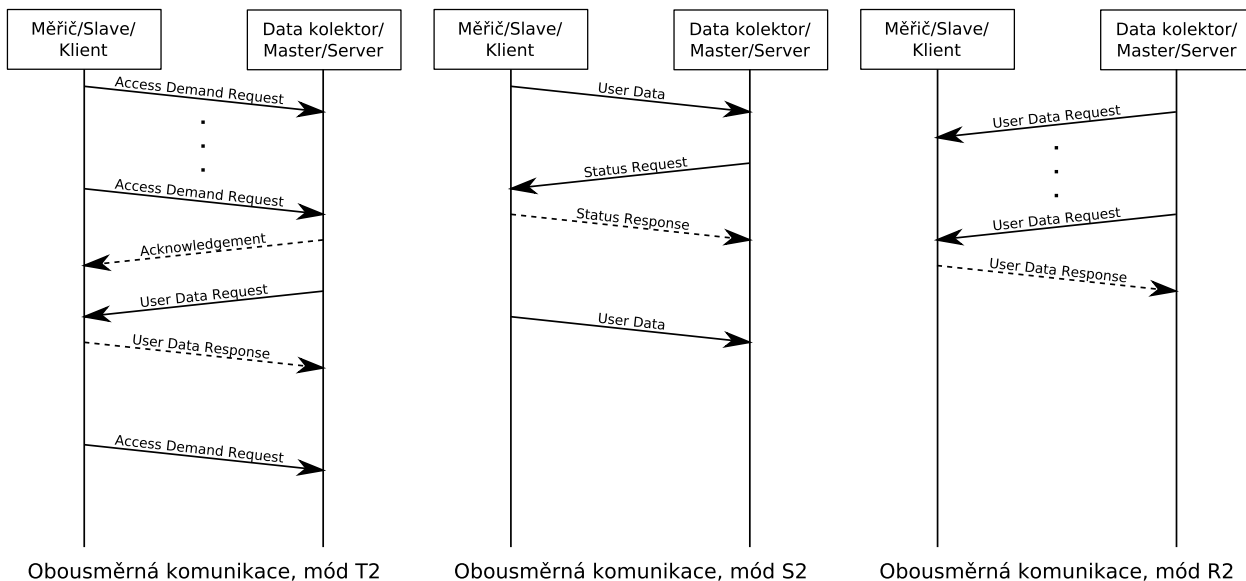
- S-mód

“Stacionární mód”, mód S je určen pro jednosměrnou nebo obousměrnou komunikaci mezi pevnými nebo mobilními zařízeními. Centrální frekvence tohoto módu je 868,3 MHz s dobou provozu 0,02% za hodinu[9]. Chip rate<sup>3</sup> je pro tento mód 32,768 kbps. Pro operační mód S jsou definovány tři submódy: S1, S1-m a S2. Submód S1 se lze použít pro jednosměrnou komunikaci nevyžadující potvrzení o přijetí rámce a je určen pro

<sup>3</sup>Chip rate - přenosová rychlost před kódováním; Pro kódování Manchester je přenosová rychlost poloviční, pro 3-out-of-6 je přenosová rychlost 2/3 z rychlosti před kódováním.

aplikace, kdy se vysílá několikrát za den ke statickému přijímači. Submód S1 používá dlouhou preambuli, zatímco submódy S1-m a S2 používají preambuli krátkou. Pro kódování používají všechny submódy módu S kódování Manchester. Nicméně submód T1 pracuje s jiným kódováním s kódováním 3-out-of-6, na rozdíl od submódu S1, který používá kódování Manchester. Submód S1-m

Přenosová rychlost komunikace je 32768 kbps. Specifikace definuje



Obr. 2.8: Typy přenosu

### 2.3.3 Aplikační vrstva Wireless M-Bus

Mechanismus komunikace z linkové vrstvy do vyšších protokolových vrstev používá pole CI, druhého bloku paketu WM-Bus. Kódy pole CI jsou udány v tab. 6.2 a specifikují strukturu dat vyšší vrstvy. Data následující za polem CI jsou již závislá na aplikační vrstvě M-Bus, jak je definována v [19].

### 2.3.4 Nároky z hlediska legislativy a EMC

V globálním, celosvětovém kontextu řeší požadavky na rádiová zařízení organizace ITU, konkrétně sektor ITU-R. V rámci evropského společenství řeší tyto požadavky evropská organizace 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.6.3), proto je provoz takového 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

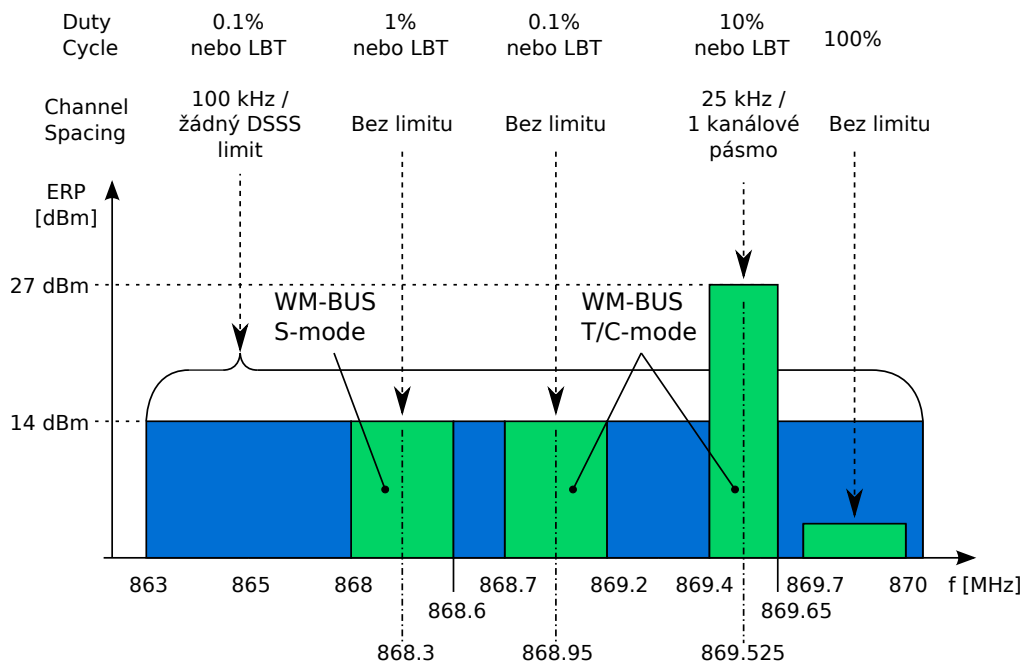


Figure 2.9: Pásmo 868 MHz dle EN 300 220-2 V2.3.1

MHz lze využívat v souladu s rozhodnutím Komise<sup>4</sup> a doporučením CEPT<sup>5</sup> stanicemi krátkého dosahu.

Z hlediska EMC musí zařízení vyhovět standardu ČSN ETSI EN 300 220-1 jež pro pásmo 868,0 až 868,6MHz stanovuje maximální vyzářený výkon(ERP) 25 mW[9].

Konkrétní podmínky využívání rádiových kmitočtů, včetně technických parametrů, jsou stanoveny všeobecným oprávněním<sup>6</sup>, jež vydává místní správce kmitočtové tabulky<sup>7</sup>.

<sup>4</sup>Rozhodnutí Komise ze dne 30. června 2010, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu.

<sup>5</sup>Doporučení CEPT/ERC/REC 70-03 – Využívání zařízení s krátkým dosahem [Relating to the use of Short Range Devices (SRD)].

<sup>6</sup>Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/09.2010-11 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování vysílačích rádiových zařízení krátkého dosahu.

<sup>7</sup>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 akumulčních 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

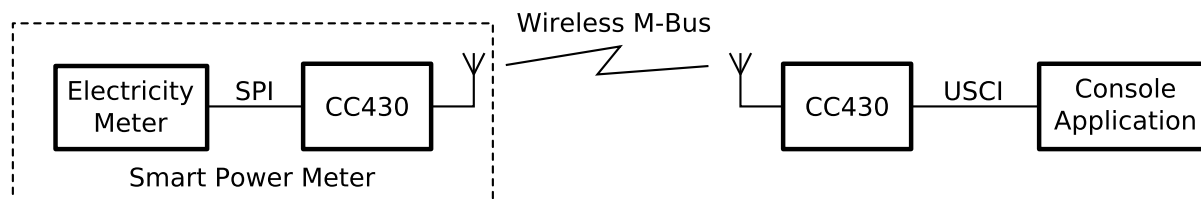


Obr. 2.10: Inteligentní elektroměr Landis+Gyr řady E350 (vlevo) a Landis+Gyr ecoMeter P350 (vpravo)

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

#### 3.1 Idea řešení

Inteligentní elektroměry mají integrované bezdrátové moduly GPRS, Zigbee nebo Wireless M-Bus. Protože v současné době nemám k dispozici

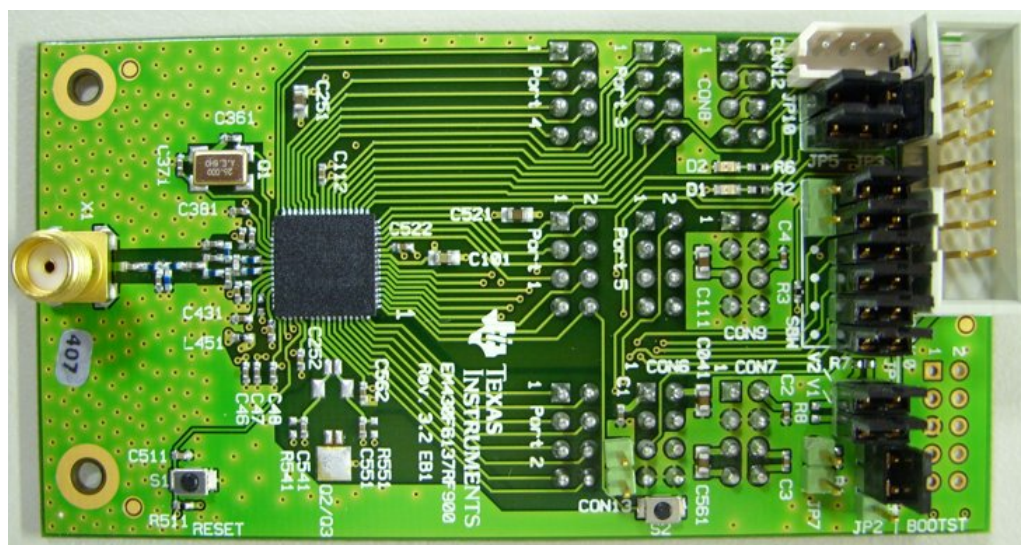


Obr. 3.1: Princip realizace Wireless M-Bus

#### 3.2 Hardwarové prostředky

##### 3.2.1 EM-CC430F5137RF900

EM-CC430F5137RF900 je experimentální deska osazená 16-ti bitovým mikroprocesorem CC430F5137 od firmy Texas Instruments. Jedná se o zařízení System-on-Chip (SoC) s integrovaným subgigahertzovým rádiovým rozhraním. Svými vlastnostmi je rádiová část podobná čipu cc1101<sup>8</sup>.



Obr. 3.2: EM-CC430F5137RF900

#### Zdroje hodinového signálu CC430

Zdroje hodin zajišťuje modul UCS, který poskytuje pět zdrojů hodinového signálu:

- XT1CLK - externí nízkofrekvenční oscilátor 32,768 kHz,

<sup>8</sup>rozdílly naleznete v [2] na str. 543

- VLOCLK - interní nízkofrekvenční oscilátor 10 kHz,
- REFOCLK - interní oscilátor 32,768 kHz ,
- DCOCLK - interní digitálně řízený oscilátor, stabilizovaný pomocí FLL a
- XT2CLK - externí oscilátor pro rádiové rozhraní, typ. 26 MHz.

Těchto pět zdrojů je dostupných třem hodinovým signálům: ACLK, MCLK, SMCLK. Pro signál pomocných hodin ACLK je možné softwarově vybrat všechny výše zmíněné zdroje a DCOCLKDIV, což je zdroj hodin DCOCLK podělený čísly 1, 2, 4, 8, 16 nebo 32. ACLK poskytuje hodinový signál zejména jednotlivým periferním modulům. Pro hlavní hodinový signál MCLK je možné vybrat všechny varianty jako u ACLK. Signál MCLK slouží pro obsluhu CPU a systému. Signál SMCLK je určen pro obsluhu periférií. Pro jednotlivé hodinové signály je možné nastavit různé zdroje nezávisle na ostatních signálech.

### Popis CC430F5137

Tab. 3.1: Základní specifikace CC430F5137

Procesor	
Rozsah napájení:	1.8V až 3.6V
Spotřeba proudu:	160 $\mu$ A/MHz v aktivním módu [angl. CPU Active Mode (AM)] 2.0 $\mu$ A ve Standby módu [angl. Standby Mode (LPM3 RTC Mode)] 1.0 $\mu$ A ve vypnutém módu [angl. Off Mode (LPM4 RAM Retention)] 15 mA v režimu přijímače [angl. Radio in RX, 250 kbps, 915 MHz]
Architektura:	16-Bit RISC
Kmitočet hodin:	až 20MHz
Další periferie:	Dva 16-ti bitové čítače/časovače Integrovaný obvod reálného času (angl. RTC) 12-ti bitový A/D převodník 128-mi bitový AES koprocesor Tříkanálové DMA
Bezdrátové rozhraní založené na CC1101 (RF1A)	
Frekvenční pásma:	Sub-1GHz bezdrátový přijímač/vysílač formálně totožný s CC1101 <sup>8</sup> 300 MHz až 348 MHz, 389 MHz až 464 MHz a 779 MHz až 928 MHz
Data Rate:	0.6 kBaud to 500 kBaud
Čitlivost:	(-117 dBm při 0.6 kBaud, -111 dBm při 1.2 kBaud, 315 MHz, 1% PER)
Modulace:	2-FSK, 2-GFSK, MSK, OOK, FASK
Další vlastnosti:	Automatic CCA před vysílání (pro systémy LBT), Digitální RSSI výstup Kompatibilní se standardem Wireless M-Bus EN 13757-4:2005

Rozsah napájecího napětí 1.8V až 3.6V

Spotřeba: 160 $\mu$ A/MHz v Aktivním módu (AM), 2.0 $\mu$ A ve Standby Módu (LPM3 RTC Mode), 1.0  $\mu$ A v vypnutém stavu (Off Mode, LPM4 RAM Retention), 15 mA při zapnutém přijímači (Radio in Rx, 250 kbps, 915 MHz)

#### 3.2.2 Zdroje přerušení rádiového rozhraní RF1A

Rádiové jádro poskytuje rozhraní signály přerušení. Jsou zde tři programovatelné výstupní signály GDO0, GDO1 a GDO2, které mohou být připojeny na výstupní piny nebo vnitřní logiku přerušení. Pro každý signál přerušení, asociovaný s příznakovým bitem RFIGx v registru RF1AIFG, je vyhrazen bit povolení přerušení

RFIE<sub>x</sub> v registru RF1AIE. V registru RF1AIES lze pomocí bitu RFIES<sub>x</sub> vybrat změnu signálu, při které se má signál přerušit generovat (náběžná nebo sestupná hrana). Vstupní bit RFIN<sub>x</sub> v registru RF1AIN umožňuje dotaz na aktuální stav signálu. Při každém vyvolání přerušit je nutné příznakový bit RFIFG<sub>x</sub> nulovat.

Příznaky přerušit od rádiového jádra obsahují prioritu přerušit a spojují vektor přerušit jádra se signálem přerušit do rozhraní. Povolím přerušit s nejvyšší prioritou se v registru RF1AIV generuje číslo, které udává jaký signál jádra přerušit vyvolalo.

V obsluze přerušit

druhém případě jsou tyto programovatelné signály přístupné přes vektor přerušit CC1101\_VECTOR. V obsluze přerušit od rádiového rozhraní lze z registru RF1AIV vymaskovat jednotlivé příznaky od příslušných signálů.

### 3.2.3 Nastavení registrů rádiového rozhraní

#### 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 přijímaný signál, pokud je naopak šířka pásma příliš velká snižujeme si citlivost přijímače. Požadovanou šířku pásma pro modulaci 2-FSK lze učít Carlsonovým pravidlem 3.1, kde  $\Delta f$  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:  $BW_{FSK=S-MODE} = 2 * (\Delta f + f_{mod}) = 2 * (80kHz + \frac{100kHz}{2}) = 260kHz$ .

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

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

**Kompensace offsetu a driftu frekvence** Frekvenční drift je dán zejména nepřesností referenčního krystalu vysílací strany. Maximální dovolená tolerance krystalu je  $\pm 25$  ppm, což dává frekvenční drift  $\pm 25$  ppm. Pokud je povolena kompensace offsetu vstupní filtr v přijímači je neustále laděn tak, aby vstupní signál byl "zarovnán" se vstupním filtrem. To jestli si můžeme dovolit ignorovat frekvenční offset/drift nám říká index modulace 3.3.

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

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:  $\pm 25ppm + \pm 60ppm = \pm 85ppm$ . Frekvenční drift je dán vztahem  $f_{drift} = f_{nosné} * \pm 85ppm \approx \pm 74kHz$ .

Pro správnou komunikaci je nutné nastavit tyto parametry rádiového rozhraní: frekvenci základního pásma, mezi-kanálovou vzdálenost, číslo kanálu, použitou modulaci, rozsah frekvence, přenosovou rychlost (chip rate), šířku filtru pro příjem. Dále nastavíme požadovaný vysílací výkon. Při nastavování jednotlivých

registrů postupujeme dle tab. 6.4 a nastavíme hodnoty ve Smart RF Studiu[20], kde jednoduše vygenerujeme nastavení pro jednotlivé registry rádiového rozhraní RF1A.

Pro mód S nastavíme frekvenci základního pásma na 868,3 MHz (868,299866 MHz), mezi-kanálovou vzdálenost na 200 kHz (199,951172 kHz ), číslo kanálu 0<sup>9</sup>, modulaci 2-FSK, rozsah frekvence  $\pm 50$  kHz (50,781250 kHz ), přenosovou rychlost (chip rate) na 32,768 kHz (32,7301 kHz), šířku filtru 270,833333 kHz.

Pro mód T nastavíme frekvenci základního pásma na 868,95 MHz (868,299866 MHz), mezi-kanálovou vzdálenost na 200 kHz (199,951172 kHz ), číslo kanálu 0<sup>10</sup>, modulaci 2-FSK, rozsah frekvence  $\pm 50$  kHz (50,781250 kHz ), přenosovou rychlost (chip rate) na 32,768 kHz (32,7301 kHz), šířku filtru 270,833333 kHz.

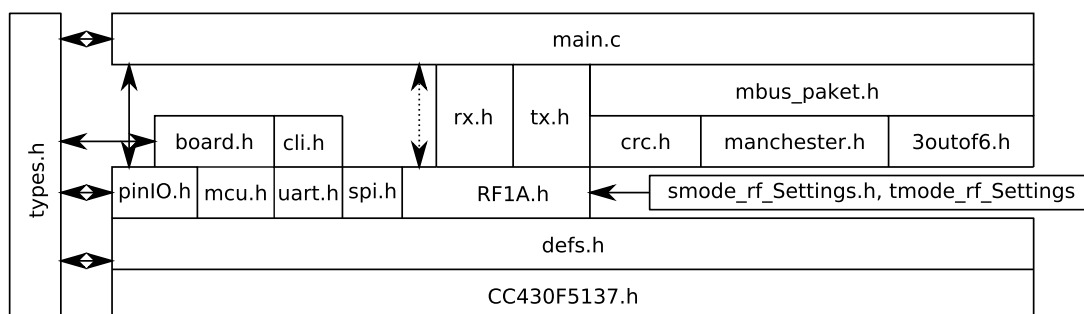
### 3.2.4 MSP430FET-UIF

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 Studia 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.

### 3.2.5 Frontend pro CC430F5137RF900

Tato přídatná deska slouží ke snadné komunikaci PC a vývojové desky přes příkazovou řádku. Příkazová řádka je realizovaná pomocí USCI v režimu USART a k PC je připojena přes USB pomocí obvodu FTDI FT232RL. USART je od FT232RL galvanicky oddělen, nehrozí tak poškození vývojové desky v případě přepětí nebo přepólování USB. Na pomocné desce se dále nachází konektor pro vyvedení sériového portu, připojitelnému přes obvod TI MAX3232. Pro prodloužení doby provozu na baterie se periferní obvody Frontendu napájí z vývojové desky, ale z USB. Na MLW konektoru jsou vyvedeny porty 1 a 4, přičemž jsou vodiče vyvedeny tak, aby byly signálové vodiče a vodiče země na kabelu proložené. Frontend je možné použít i bez vývojové desky jako převodník USB na RS-232.

### 3.2.6 Struktura programu pro CC430F5137



Obr. 3.3: Struktura souborů programu pro CC430F5137

<sup>9</sup>norma ČSN ETSI EN 300 220-1 nepovoluje použití více kanálů

<sup>10</sup>norma ČSN ETSI EN 300 220-1 nepovoluje použití více kanálů



Hlavičkový soubor CC430F5137 obsahuje definice adres jednotlivých registrů procesoru a jejich bitové masky. Nad ním hlavičkový soubor defs.h obsahuje některá často používané definice (TRUE, FALSE, atd.) a makra (např. pro vymaskování bitu). Soubor pinIO.h obsahuje definice jednotlivých pinů na vývojové desce EM-CC430F5137RF900, byl napsán co nejjednodušeji tak, aby obsahoval definice pinů, LED diod a tlačítka. Soubor Board.c obsahuje inicializace I/O pinů, tlačítek a LED diod. Při startu programu je voláno nastavení hodin v mcu.c, použité nastavení je v 1. Knihovna Command line interface (cli.h) slouží pro komunikaci s uživatelem přes konzoli a používá aktivní kód v uart.c. Nastavení komunikace pro konzoli je 19200 Bd, 8 datových bitů, 1 stopbit, bez parity. Z konzolové aplikace bude možné číst data z SPI a nastavit jejich zapouzdření do mbus paketu, který bude přes rádiové rozhraní odeslán na přijímací stranu.

Knihovna m-bus, volaná z main.c, mbus\_paket, definuje “dummy” obsah bloku M, který je dán normou a který obsahuje informaci o výrobci a zařízení a obsahuje aktivní kód pro zapouzdření dat do paketu pro módy S i T a rovněž pro extrakci dat z paketu. Funkce pro obsluhu příjmu dat jsou volané z obsluhy přerušeni, používám RX FIFO THRESHOLD pro 4 bajty, přijímaný paket je zpracováván po 4 bajtech. Aby bylo možné přijmout paket, který je větší než RX FIFO, předpokládá se, že přijímám “nekonečný” paket. Při zjištění konce paketu je generováno přerušeni, při této události mohou paket zpracovat a extrahovat data.

Při odesílání se data zapouzdří, určí se velikost m-bus paketu, pokud je paket menší než 256 bajtů použije pevná velikost paketu nastavením PKTCTRL0 0x00 a velikost se zapíše do PKTLEN registru. Dále se uvolní TX FIFO pomocí příkazu SFTX a zapíší se data k odeslání. Nakonec se povolí přerušeni se pro odeslání a příkazem Strobe(RF\_STX) se data(paket) odešle. Pokud je paket větší než 256 bajtů použije se nastavení pro “nekonečný” paket a paket se rozdělí na jednotlivé části, které jsou jednotlivě odeslány, obdobně jako u paketu menšího než TX FIFO.

---

#### Algoritmus 1 Nastavení hodinových signálů při inicializaci

---

```
// Stop watchdog      WDICTL = WDIPW + WDIHOLD;
/* Nastavení CPU CLK na 12 MHz */
UCSCTL3 |= SELREF_2; /* Nastavení REFO jako reference pro DCO FLL */
UCSCTL4 |= SELA_2;   /* Set ACLK = REFO */

__bis_SR_register(SCG0); /*preruseni kontrolni smycky FLL, chceme nastavovat*/
UCSCTL0 = 0x0000; /* Nejizsi možné nastavení DCOx, MODx viz datasheet */
UCSCTL1 = DCORSEL_5; /* vyber rozsahu DCO 24 MHz*/
UCSCTL2 = FLLD_1 + 374; /* nastavení DCO nasobicky 12MHz */
/* vypocet */
/* (N + 1) * FLLRef = Fdco */
/* (374 + 1) * 32768 = 12MHz */
/* Set FLL Div = fDCOCLK/2 */
__bic_SR_register(SCG0); /* znovupovolení kontr. smycky FLL */
/* cekam az se stabilizuje DCO – nejhorsí možný případ
 * dan n x 32 x 32 x f_MCLK / f_FLL_reference což je
 * 32 x 32 x 12 MHz / 32,768 Hz = 375000 = cyklu MCLK */
__delay_cycles(375000);
/* smyčka dokud chyb příznaky XT1,XT2 & DCO */
do{
    /* shodím příznaky chyby od XT2,XT1,DCO */
    UCSCTL7 &= ~(XT2OFFG + XT1LFOFFG + DCOFFG);
    SFRIFG1 &= ~OFIFG; /* shodím příznaky chyb */
}while (SFRIFG1&OFIFG); /* Test oscilatoru na chybový příznak */
/* REFO jako zdroj pro ACLK a DCOCLK jako zdroj pro MCLK a SMCLK */
UCSCTL4 = SELA__REFOCLK | SELS__DCOCLKDIV | SELM__DCOCLKDIV;
```

---

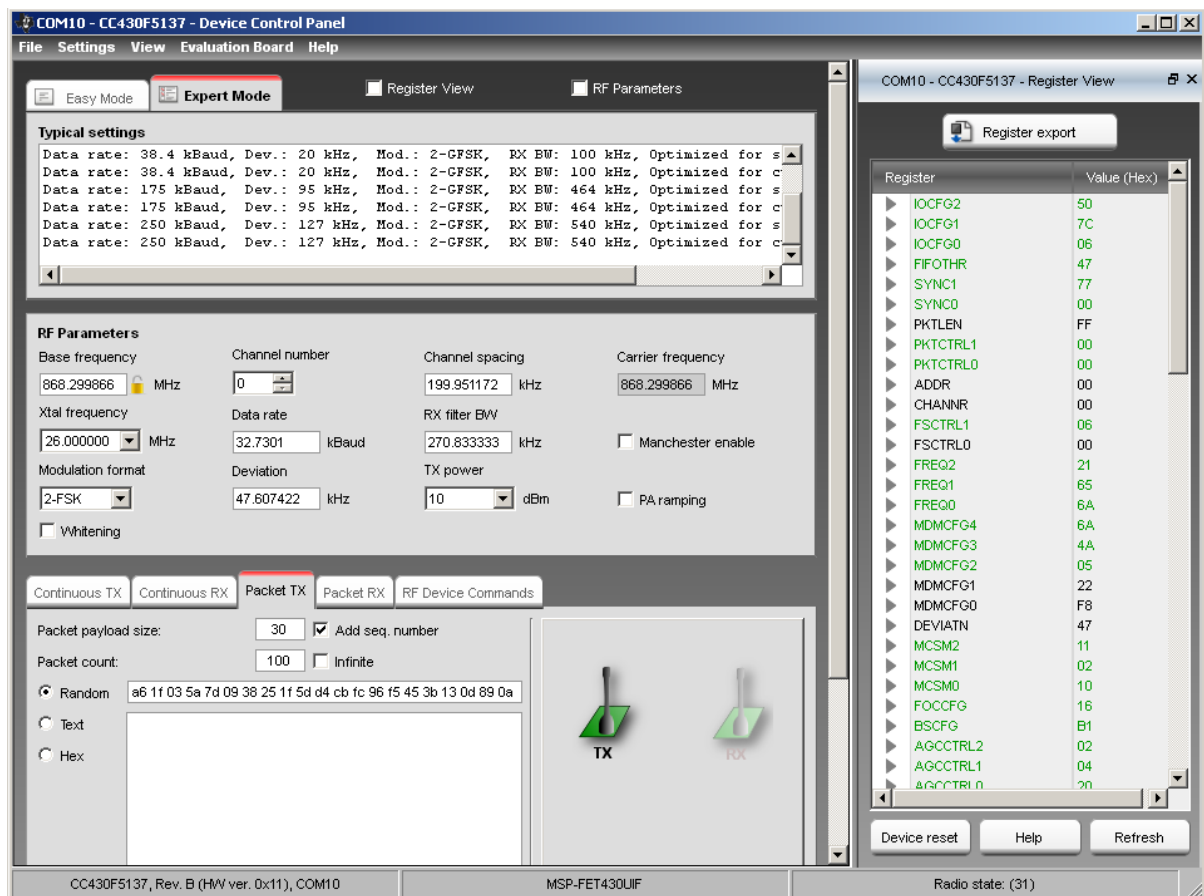
### 3.3 Softwarové vývojové prostředky

#### 3.3.1 Smart RF Studio

Smart RF Studio je nástroj pro vizualizaci rádiového rozhraní bezdrátových modulů Texas Instrument. Umožňuje přímý přístup k registrům rádiového rozhraní přes uživatelsky přívětivé nastavení rádiového rozhraní - mohou si nastavit přímo frekvenci a nemusím počítat obsahy registrů. Základní nastavení je v okně RF parameters, ke nastavuji použitou frekvenci a použitý kanál. Vpravo nahoře, v tomto okně mohu vidět frekvenci nosné. Pro všechny má nastavení je frekvence nosné totožná se základní frekvencí - pro módy S a T Wireless M-bus není použití kanálů dovoleno, resp. existuje zde pouze jeden komunikační kanál. Dále lze ze základních parametrů vysíláče nastavit frekvenční zdvih, šířku kanálu, přenosovou rychlost a použitou modulaci. Lze nastavit i PA ramping, který lze použít pro definovanou amplitudovou modulaci nebo hardwarovou podporu kódování Manchester. použít pro periodické generování a příjem a rovněž umožňuje vygenerování konfiguračních registrů v uživatelsky definovaném formátu. Vysílací výkon lze nastavit v hodnotách: 10, 0, -6 a -12 dBm.

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

Ve Smart RF Studio v1.6.1 jsem generoval nastavení registrů pro jednotlivé módy wm-bus. Nastavení exportovaných registrů je ve výpisech kódu 2 a 3 . Export registrů umožňuje i uživatelsky definovaný export.

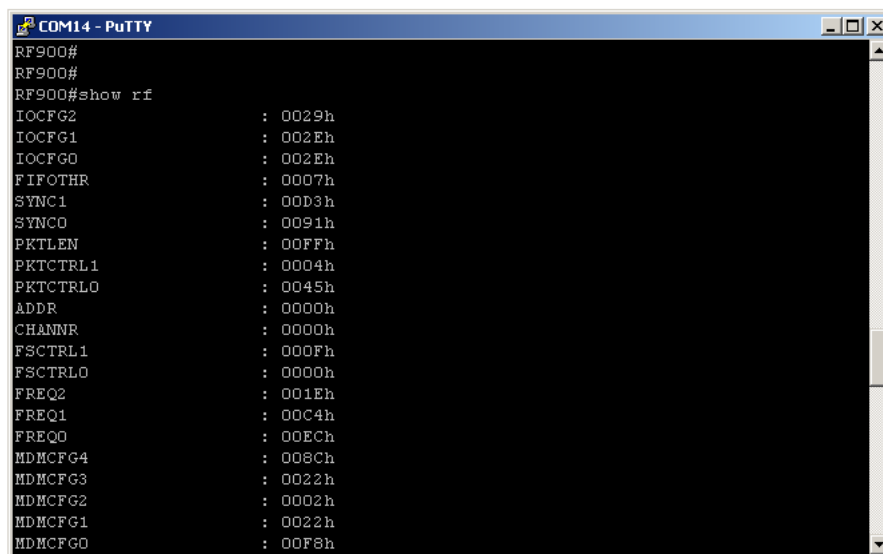


Obr. 3.4: Smart RF Studio 1.6.1 [20]

### 3.3.2 Code Composer Studio

Program pro vývojovou desku byl programován v Code Composer Studiu v5.1. Jedná se o vývojové prostředí od Texas Instruments postavené na vývojovém prostředí eclipse doplněného C compilerem pro mikrokontroléry Texas Instruments CC430 a MSP430. Toto prostředí slouží i pro ladění aplikace a programování. Používám free licenci s omezením velikosti kódu 16kB.

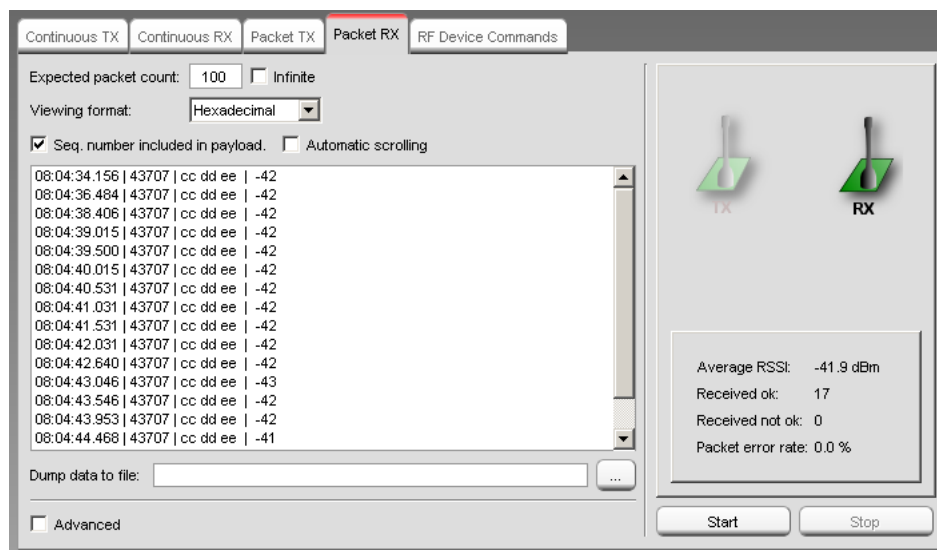
## 4 Výsledky



```
COM14 - PuTTY
RF900#
RF900#
RF900#show rf
IOCFG2      : 0029h
IOCFG1      : 002Eh
IOCFG0      : 002Eh
FIFOTHR     : 0007h
SYNC1       : 00D3h
SYNC0       : 0091h
PKTLEN      : 00FFh
PKTCTRL1    : 0004h
PRTCTRL0    : 0045h
ADDR        : 0000h
CHANNR      : 0000h
FSCTRL1     : 000Fh
FSCTRL0     : 0000h
FREQ2       : 001Eh
FREQ1       : 00C4h
FREQ0       : 00ECh
MDMCFG4     : 008Ch
MDMCFG3     : 0022h
MDMCFG2     : 0002h
MDMCFG1     : 0022h
MDMCFG0     : 00F8h
```

Obr. 4.1: Ukázka vyčtení registrů do konzole

Konzolovou aplikaci jsem vytvořil tak, aby funkcí a strukturou příkazů byla podobná již osvědčeným řešením, které používá Cisco ve svých profesionálních síťových zařízeních řadu let.



Obr. 4.2: Ukázka použití Smart RF Studia pro sniffování

## 5 Závěr

Wireless M-Bus je zatím poměrně neznámým protokolem pro bezdrátovou komunikaci v pásmu pod 1 GHz. Nicméně o neustálý pokroku ve vývoji protokolu u našich západních sousedů svědčí i aktualizace norem DIN EN 13757-4:2011 tedy z roku 2011. Wireless M-Bus si z odečtů dat měřičů energií nachází cestu i do domácí automatizace a inteligentních domů. Už dnes existují řešení Wireless M-Bus pro bezdrátovou komunikaci měřičů energií a informačního panelu. Majitelé těchto inteligentních přístrojů tak mají úplnou kontrolu nad spotřebou energií ve své domácnosti. Je jen na nich jak s touto informací naloží. Je tedy otázkou času až se stane protokol více známým, akceptovaným a uznávaným standardem pro bezdrátovou komunikaci.

Pro Wireless M-Bus jsou mikrokontroléry řady CC430 výborným řešením. Díky svým možnostem umožňují využití nejenom protokolu wireless M-Bus. Procesory jsou schopny například jednoduchou amplitudovou modulaci, umožňují jak synchronní tak asynchronní bezdrátovou komunikaci.

Díky hardwarové podpoře paketování není obtížné vytvořit paket. Protokol Wireless M-Bus má některá svá specifika a proto nelze některé hardwarové podpory plně využít a musíme se částečně spolehnout na software, ale i tak jsou bezdrátové moduly od Texas Instruments nejvhodnějším a nejuniverzálnějším řešením pro bezdrátovou komunikaci. S vývojovou deskou mám plnou kontrolu nad rádiovým rozhraním a nemusím tak spoléhat na výrobce proprietárních čipů, že dodrží všechny normy.

Vývojová deska s CC430 s vnitřním bezdrátovým modulem je ve spojení s knihovnou vyhovující standardům schopna komunikovat i s komerčním řešením pokud nepoužívá šifrování.

Tato práce byla kompletně napsána v programu LyX a vysázena za použití programu pro sazbu L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

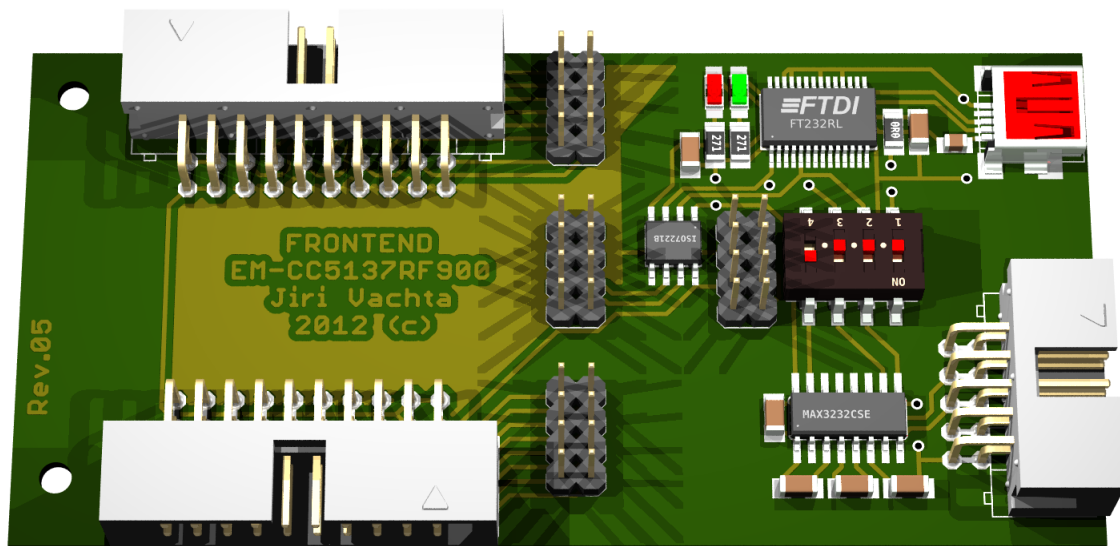
## Seznam literatury

- [1] M-Bus Usergroup. The M-Bus: A Documentation. Rev. 4.8, 1997, 88 s. [online]. [cit. 25.4.2012]. Dostupný také z: <http://www.m-bus.com/files/MBDOC48.PDF>  
a na CDROM:\Dokumenty\MBDOC48.PDF
- [2] Texas Instruments. CC430 Family User's Guide. 2010, 640 s. [online]. [cit. 25.4.2012]. Dostupný také z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau259b/slau259b.pdf>  
a na CDROM:\Dokumenty\slau259b.pdf
- [3] Texas Instruments. MSP430™ SoC with RF Core. 2011, 121 s. [online]. [cit. 25.4.2012]. Dostupný také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f5137.pdf>  
a na CDROM:\Dokumenty\cc430f5137.pdf
- [4] Steinbeis Transfer Center Embedded Design and Networking. Wireless M-Bus Documentation, 2011, 17 s. [online]. [cit. 25.4.2012]. Dostupný také z: [http://www.stzedn.de/wireless-m-bus-stack.html?file=t1\\_files/products/wmbus\\_stack/wireless\\_m\\_bus\\_internet.pdf](http://www.stzedn.de/wireless-m-bus-stack.html?file=t1_files/products/wmbus_stack/wireless_m_bus_internet.pdf)  
a na CDROM:\Dokumenty\wireless\_m\_bus\_internet.pdf
- [5] Wireless M-Bus 2010 Part 4 User Guide, Telit (®), 2010, 45 s. [online]. [cit. 29.4.2012]. Dostupný také z: <http://www.telit.com/module/infopool/download.php?id=4001>  
a na CDROM:\Dokumenty\Telit\_Wireless\_M-Bus\_2010\_Part4\_User\_Guide\_r3-1.pdf
- [6] Texas Instruments. Patrick Seem. Application Note AN067: Wireless MBUS Implementation with CC1101 and MSP430, 2008, 38 s. [online]. [cit. 29.4.2012] Dostupný také z: <http://www.ti.com/lit/an/swra234a/swra234a.pdf>  
a na CDROM:\Dokumenty\swra234a.pdf
- [7] ČESKO. Vyhláška č. 105 ze dne 19. dubna 2010 o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka), In: Sbírka 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](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.
- [8] Český Telekomunikační Úřad. Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/10/04.2011-5 pro kmitočtové pásmo 470–960 MHz, [online]. [cit. 29.4.2012]. Dostupný také z: [http://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok\\_2011/pv-p\\_10-04\\_2011-05.pdf](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
- [9] 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.
- [10] 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. 29.4.2012]. 62 s. Dostupný také z: <http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-Meter%20WP2%20D2.1%20part1%20v3.0.pdf>
- [11] 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. 29.4.2012]. 54 s. Dostupný také z: <http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-Meter%20WP2%20D2.1%20part3%20v1.0.pdf>

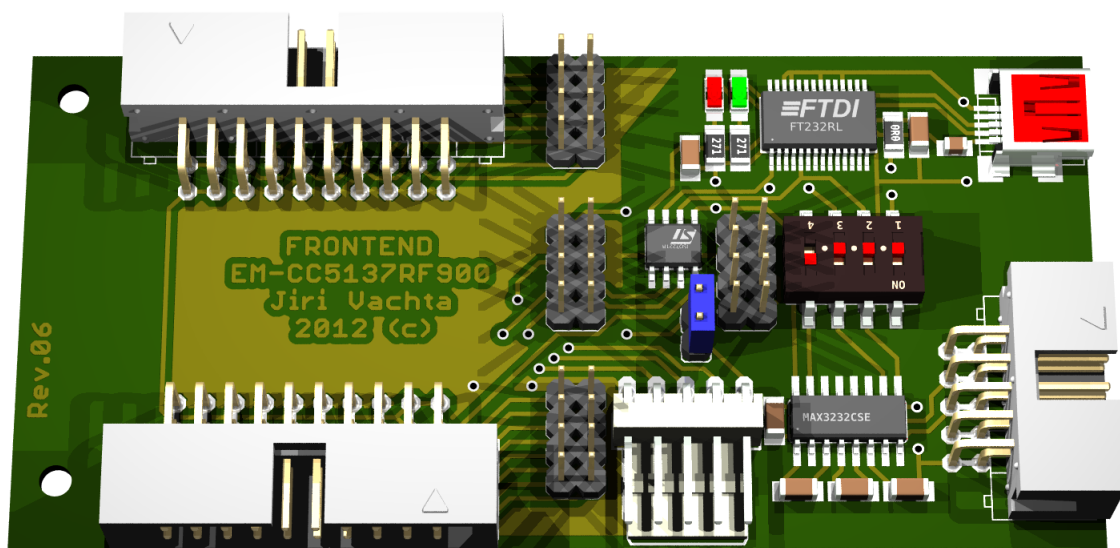
- [12] OPEN meter. Energy Project No 226369. Funded by EC: Part 3: State-Of-The-Art technologies and protocols - Description of State-Of-The-Art communication protocols and data structures. 2009. [online]. [cit. 29.4.2012]. 54 s. Dostupný také z:<http://www.openmeter.com/files/deliverables/OPEN-Meter%20WP2%20D2.1%20part4%20v1.0.pdf>
- [13] Texas Instruments. Claus Kuch. EM430F5137RF900 Rev 3.2 868/915MHz. 2010. 3 s. [CDROM]. Dostupný na CDROM: \Dokumenty\EM4305137\_SchematicPic.pdf
- [14] Texas Instruments. Code Composer Studio™ v5.1 User's Guide for MSP430™ User's Guide. Literature Number: SLAU157t. 2011. 53 s. [online]. Dostupný také z:<http://www.ti.com/lit/ug/slau157t/slau157t.pdf>
- [15] Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.10. 2010. [online]. [cit. 29.4.2012]. 43 s. Dostupný také z:[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [16] Maxim. 3.0V to 5.5V, Low-Power, up to 1Mbps, True RS-232 Transceivers Using Four 0.1µF External Capacitors. 2007. [online]. [cit. 29.4.2012]. 17 s. Dostupný také z:<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
- [17] Chipcon Products from Texas Instruments, Evjen P.M. Application Note AN001: SRD regulations for licence free transceiver operation. 2003. [online]. [cit. 29.4.2012]. 17 s. Dostupný také z:<http://www.ti.com/lit/an/swra090/swra090.pdf>
- [18] 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.
- [19] Komunikační systémy pro měřidla a měřidla s dálkovým ovládáním - Část 3: Určené aplikace vrstvy. 2009. 60 s. Třídící znak 258513
- [20] 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



Obr. 6.1: Frontend pro EM-CC430F5137-RF900 Rev0.5



Obr. 6.2: Frontend pro EM-CC430F5137-RF900 Rev0.6

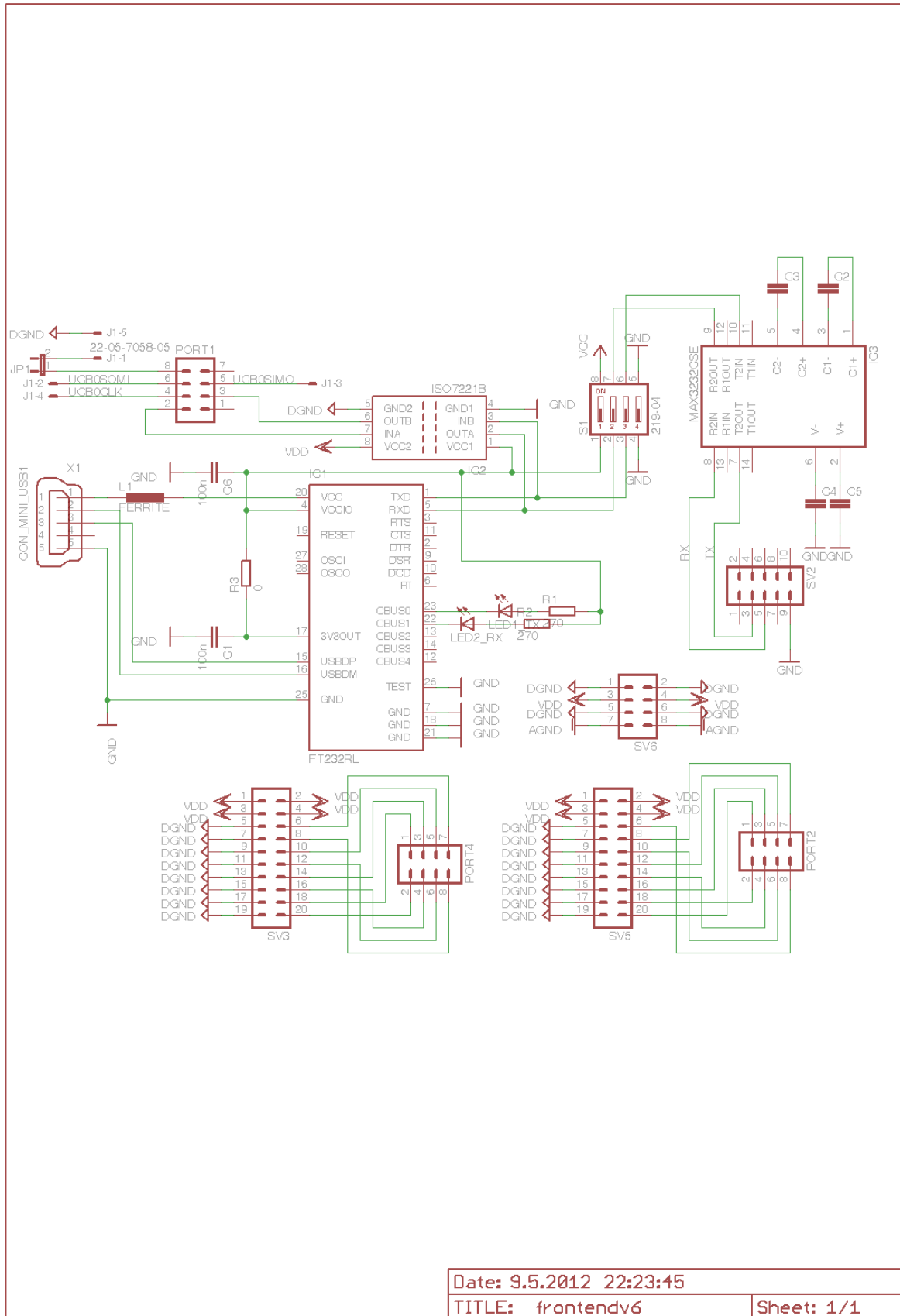


Figure 6.3: Elektrické schéma frontendu pro EM-CC430F5137-RF900 Rev0.6



## 6.2 Tabulky

Tab. 6.1: Kódy pole CI aplikační vrstvy M-Bus používané zařízením Master

Mode 1	Mode 2	Význam	Definice
51h	55h	odeslání dat	EN1434-3
52h	56h	výběr zařízení Slave	Prac. skupina červenec '93
50h		reset aplikace	Prac. skupina '94
54h		synchronizace	návrh
B8h		nastav přenosovou rychlost na 300 Bd	Prac. skupina červenec '93
B9h		nastav přenosovou rychlost na 600 Bd	Prac. skupina červenec '93
BAh		nastav přenosovou rychlost na 1200 Bd	Prac. skupina červenec '93
BBh		nastav přenosovou rychlost na 2400 Bd	Prac. skupina červenec '93
BCh		nastav přenosovou rychlost na 4800 Bd	Prac. skupina červenec '93
BDh		nastav přenosovou rychlost na 9600 Bd	Prac. skupina červenec '93
BEh		nastav přenosovou rychlost na 19200 Bd	návrh
BFh		nastav přenosovou rychlost na 38400 Bd	návrh
B1h		požadavek na čtení kompletního obsahu RAM	návrh Techem
B2h		pošli uživ. data (nestandardizovaný zápis do RAM)	návrh Techem
B3h		inicializace kalibračního módu	Prac. skupina '94
B4h		čtení EEPROM	návrh Techem
B6h		start testu SW	návrh Techem
90h až 97h		kódy použité pro hash	zastaralé/nedoporučeno

Tab. 6.2: Kódy pole CI protokolu Wireless M-Bus dle [19]

Hodnota CI	Význam
0x51	Odeslání dat ze čtecích zařízení k měřiči bez pevně dané hlavičky
0x71	Rezervováno pro alarmová hlášení
0x72	EN 13757-3 aplikační vrstva s plnou hlavičkou
0x78	EN 13757-3 aplikační vrstva bez hlavičky
0x7A	EN 13757-3 aplikační vrstva s krátkou hlavičkou
0x81	Přenosy aplikační vrstvy
0x82	Pro budoucí použití
0xA0 až 0xB7	Výrobce specifická data aplikační vrstvy

Tab. 6.3: 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 [7]
902 - 928 MHz	915 MHz	Ne	Pouze region 2, definice v [7]
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

Tab. 6.4: 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
Mezi-kanálová vzdálenost [kHz]	-	-	-	-	-	60
max. $\Delta f$ [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	oboji	Manchester
Délka preamble [bit]	576	48	48	48	48	96
Mezi-rámcová mezera [bit]	2	2	2	2	2	2
Duplex	ne	ano	ne	ne	ano	ano

Tab. 6.5: Přehled některých výrobců modulů Wireless M-Bus

Výrobce	Typ	Výslací výkon	Citlivost	Provozní napětí	Max. spotřeba				Dosah
					Rx [mA]	Tx [mA]	Standby [ $\mu$ A]	Sleep [ $\mu$ A]	
Ademuis RF	ARF7751A/B/C	14dBm (25mW)	-117dBm	2.0 ~ 3.6V <sup>a</sup>	22	35	< 0.6	< 0.2	1000m
Panasonic	PAN7550	-30 ~ +10 dBm	-109 dBm	1.8 ~ 3.6 V	17	30	-	< 1	-
Radiocrafts	RC1180-MBUS	9 dBm	-106 dBm	2.0 ~ 3.6V	22	37	-	typ. 0.3	-
Telit	ME50-868	14dBm	-108dBm	2.0 ~ 3.6V	26	45	1 nebo 3 <sup>b</sup>	-	2000m
Embit	EMB-WMBMF	14dBm	-122dBm	2.0 ~ 3.6V <sup>c</sup>	<19/13/3 <sup>d</sup>	43	-	-	-

<sup>a</sup>pro verzi ARF7751C low power je napájecí napětí 1.2V

<sup>b</sup>při použití externího wake-up signálu 1uA, při cyklickém wake-up 3uA

<sup>c</sup>rozsah napětí čipu TI CC1120

<sup>d</sup><19 mA (maximální citlivost) 13 mA (omezení citlivost) 3 mA (dlouhá preamble)

**Algoritmus 2** 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 */
const RF_SETTINGS sModeRfSettings = {
    0x50, /* IOCFG2      GDO2 Output Configuration*/
    0x7C, /* IOCFG1      GDO1 Output Configuration*/
    0x06, /* IOCFG0      GDO0 Output Configuration*/
    0x47, /* FIFOTHR     RX FIFO and TX FIFO Thresholds*/
    0x77, /* SYNC1      Sync Word, High Byte*/
    0x00, /* SYNC0      Sync Word, Low Byte*/
    0xFF, /* PKTLEN     Packet Length*/
    0x00, /* PKTCTRL1   Packet Automation Control*/
    0x00, /* PKTCTRL0   Packet Automation Control*/
    0x00, /* ADDR       Device Address*/
    0x00, /* CHANNR     Channel Number*/
    0x06, /* FSCTRL1    Frequency Synthesizer Control*/
    0x00, /* FSCTRL0    Frequency Synthesizer Control*/
    0x21, /* FREQ2     Frequency Control Word, High Byte*/
    0x65, /* FREQ1     Frequency Control Word, Middle Byte*/
    0x6A, /* FREQ0     Frequency Control Word, Low Byte*/
    0x6A, /* MDMCFG4    Modem Configuration*/
    0x4A, /* MDMCFG3    Modem Configuration*/
    0x05, /* MDMCFG2    Modem Configuration*/
    0x22, /* MDMCFG1    Modem Configuration*/
    0xF8, /* MDMCFG0    Modem Configuration*/
    0x47, /* DEVIATN    Modem Deviation Setting*/
    0x11, /* MCSM2     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x02, /* MCSM1     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x10, /* MCSM0     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x16, /* FOCCFG     Frequency Offset Compensation Configuration*/
    0xB1, /* BSCFG     Bit Synchronization Configuration*/
    0x02, /* AGCCTRL2   AGC Control*/
    0x04, /* AGCCTRL1   AGC Control*/
    0x20, /* AGCCTRL0   AGC Control*/
    0xB6, /* FRENDD1    Front End RX Configuration*/
    0x10, /* FRENDD0    Front End TX Configuration*/
    0xE9, /* FSCAL3     Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x2A, /* FSCAL2     Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x00, /* FSCAL1     Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x1F, /* FSCAL0     Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x21, /* FSTEST     Frequency Synthesizer Calibration Control*/
    0xB1, /* PTEST     Production Test*/
    0x3F, /* AGCTEST    AGC Test*/
    0x81, /* TEST2     Various Test Settings*/
    0x35, /* TEST1     Various Test Settings*/
    0x09, /* TEST0     Various Test Settings*/
};

```

**Algoritmus 3** 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 */
RF_SETTINGS tModeRfSettings = {
    0x29, /* IOCFG2      GDO2 Output Configuration*/
    0x2E, /* IOCFG1      GDO1 Output Configuration*/
    0x06, /* IOCFG0      GDO0 Output Configuration*/
    0x47, /* FIFOTHR     RX FIFO and TX FIFO Thresholds*/
    0xD3, /* SYNC1      Sync Word, High Byte*/
    0x91, /* SYNC0      Sync Word, Low Byte*/
    0xFF, /* PKTLEN     Packet Length*/
    0x00, /* PKTCTRL1   Packet Automation Control*/
    0x00, /* PKTCTRL0   Packet Automation Control*/
    0x00, /* ADDR      Device Address*/
    0x00, /* CHANNR     Channel Number*/
    0x06, /* FSCTRL1   Frequency Synthesizer Control*/
    0x00, /* FSCTRL0   Frequency Synthesizer Control*/
    0x21, /* FREQ2     Frequency Control Word, High Byte*/
    0x6B, /* FREQ1     Frequency Control Word, Middle Byte*/
    0xD0, /* FREQ0     Frequency Control Word, Low Byte*/
    0x5B, /* MDMCFG4   Modem Configuration*/
    0xF9, /* MDMCFG3   Modem Configuration*/
    0x05, /* MDMCFG2   Modem Configuration*/
    0x22, /* MDMCFG1   Modem Configuration*/
    0xF8, /* MDMCFG0   Modem Configuration*/
    0x44, /* DEVIATN   Modem Deviation Setting*/
    0x07, /* MCSM2     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x30, /* MCSM1     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x10, /* MCSM0     Main Radio Control State Machine Configuration*/
    0x16, /* FOCCFG    Frequency Offset Compensation Configuration*/
    0x6C, /* BSCFG     Bit Synchronization Configuration*/
    0x03, /* AGCTRL2   AGC Control*/
    0x40, /* AGCTRL1   AGC Control*/
    0x91, /* AGCTRL0   AGC Control*/
    0x56, /* FRENDD1   Front End RX Configuration*/
    0x10, /* FRENDD0   Front End TX Configuration*/
    0xEA, /* FSCAL3    Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x2A, /* FSCAL2    Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x00, /* FSCAL1    Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x1F, /* FSCAL0    Frequency Synthesizer Calibration*/
    0x59, /* FSTEST    Frequency Synthesizer Calibration Control*/
    0x7F, /* PTEST     Production Test*/
    0x3F, /* AGCTEST   AGC Test*/
    0x81, /* TEST2     Various Test Settings*/
    0x35, /* TEST1     Various Test Settings*/
    0x09, /* TEST0     Various Test Settings*/
};

```

---

# 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