MCU, LoRa, LoRaWAN and Data Processing

www.dupedup.cz

Petr Dušek, 3/2020 – revision 11/2021, 12/2024

Here you find the summary paper related to Internet of Things devices using Microcontroller Units and radio networks LPWAN in the ISM radio bands.

I take a fancy to radio **LoRa** (Long Range) technologies. The LoRa is a proprietary modulation operates in the sub-GHz frequency bands, often in ISM (Industrial, Scientific and Medica) radio bands (433/868 MHz in Czech). The LoRa modulation is based on CSS (**Chirp Spread Spectrum**) - modulates the information signal with some sequences to expand the signal to a larger frequency band. As modulation sequences in LoRa are using linear frequency modulation chirp pulses with high bandwidth to encode information. Chirp pulses are sinusoidal signals with varying frequency over time, determining symbols that represent the information. The number of bits that can be encoded in each symbol is given by the spreading factor (SF). The LoRa modulation has great immunity signal against noise (up to 20 dB below the noise level), high anti-interference ability and immunity against the doppler effect. Data can be transmitted up to long distances (5-10 km). LoRa is intended for small data packet payload (tens of bytes), slow data rates (50 - 20000 bps) and it supports adaptive data rate (ADR). Data rates depends on **Bandwidth** (typically 125, 250, 500 kHz), **Spreading Factor** (7-12) and **Coding Rate** (CR) in Forward Error Correction.

Using LoRa modulation for low data rates has many advantages over the WiFi, Bloutooth, Zigbee or GSM radio networks. Particularly in low price of the radio chip, low power consumption and high radio signal sensitivity around -140 dBm (decibel milliwatts). Some MCUs contain LoRa chip by Semtech (SX1278/76/62 etc.). The radio modules included +20 dBm (100mW) power amplifier and IPEX or SMA connector for 433/866 MHz antenna. Modules support also traditional FSK/OOK modulation, but LoRa improve receiver sensitivity by more than 20dB compared to FSK. LoRa modules supports SPI or UART digital interfaces. I like LoRa SoC on modules provided by HELTEC.

Data from MCUs can be transmitted via LoRaWAN to data servers to control processes eg. via MQTT broker or can be stored and displayed via web interfaces. Sometime I use servers in computer clouds and some cloude services. May be also used lightweight servers created within home local networks created e.g. on Raspberry Pi.

Modulation	SF	Bandwidth [kHz]	Maximum MACPayload size [bytes]	Maximum FRMPayload size[1] [bytes]	Shortest downlink frame duration [s]	Longest downlink frame duration [s]	Shortest uplink frame duration [s]	Longest uplink frame duration [s]
LoRa	12	125	59	51	0.991	2.793	1.155	2.793
LoRa	11	125	59	51	0.578	1.479	0.578	1.561
LoRa	10	125	59	51	0.289	0.698	0.289	0.698
LoRa	9	125	123	115	0.144	0.677	0.144	0.677
LoRa	8	125	250	242	0.072	0.697	0.082	0.707
LoRa	7	125	250	242	0.041	0.394	0.041	0.400
LoRa	7	250	250	242	0.021	0.197	0.021	0.200
GFSK	-	150	250	242	0.0032	0.0421	0.0035	0.0424

[1]- given that $FHDR_{OPTS}=0$

(www.researchgate.net)

1. LoRa

Pro datové radiové spojení bod-bod používám **LoRa** (Long Range) v bezlicenčním radiovém pásmu ISM (Industrial, Scientific, Medical). V ČR jsou to pro LoRa zejména radiové kanály v pásmu 433 MHz nebo 868 MHz. Pro datové radiové spojení jsou vždy použity minimálně dva LoRa moduly, jeden primárně v módu vysílače a druhý přijímače. Pokud je používána síť LoRaWAN je primárně přijímací modul upraven jako gateway schopná přijmout stovky LoRa přijímačů, upravovat parametry jejich spojení a „forwardovat" přijmutá data (např. přes Internet či privátní WAN) na datové servery.

Radiová datová komunikace LoRa je určena pouze pro nízké objemy přenášených dat (desítky Bytes) a nízké datové rychlosti (od 50 do 50000 bps)
Modulace LoRa je odvozena od CSS (Chirp Spread Spectrum) modulace a používá i některé prvky DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) modulace. LoRa je velmi odolná proti rušení a přijímač je schopen zachytit signál až o 20 dB nižší než je rušivý šum. Parametry radiového spojení a datová rychlost LoRa závisí na nastavení parametrů **Spreading Factor** (SF), **Bandwitdth** (BW) a **Coding Rate** pro použitou Forward Error Correction.
Parametr SF významně ovlivňuje datovou rychlost a je nastavitelný v rozsahu hodnot 7-12. Čím větší je parametr SF, tím větší je dosah, ale nižší dosažitelná datová rychlost (0.3 kbps při SF 12 a 5 kbps při SF 7), větší Time On Air a tím spotřeba radiového čipu. Při větším SF je i menší možný maximální payload v datové paketu (51 B při SF=12 a 220 B při SF=7).
Šířka pásma modulace LoRa je nastavitelná od 62,5 do 500 kHz (je standardně 125 kHz) a též významně ovlivňuje datovou rychlost. Coding Rate pro je taktéž volitelný a to v poměrech 4/5, 4/6, 4/8 a 5/7.

V případě LoRaWAN je fyzická vrstva (PHY) spoje provozována pomocí LoRa a vysílací (koncové zařízení) vyžaduje doplnit o adresní síťové parametry. Pokud se používá „vyjednání" vstupu do sítě pomocí bezpečnějšího vyjednání **OTAA** (Over-the-Air Activation) jde o parametry **Device Identificator** (64 bit DevEUI), **Device Application Identificator** (64 bit AppEUI) a šifrovací aplikační klíč **(**128 bits AppKey). Tyto parametry musí splňovat pravidla konkrétní sítě, ale je možno je vygenerovat např. na portálu TTN https://thethingsnetwork.org. Musí se párově použít v zdrojovém kódu koncového zařízení a v nastavení LoRaWAN Gateway resp. v nastavení LoRaWAN síťového serveru poskytovatele.

V ČR/EU je **omezen výkon vysílání** EIRP v ISM na 10 až 25 mW (14 dBm) a využití pásma (Duty Cycle) na 1 %. To odpovídá radiovému provozu 36 s za hodinu resp. cca 15 min za den. Tomu je nutno uzpůsobit intervaly mezi vysíláním a objemy přenášených dat při programování firmware a nastavení parametry (zejména SF a BW) radiového modulu.

Ve zdrojovém kódu používám pro LoRa API od Sandeep Mistry GitHub - sandeepmistry/arduino-LoRa: An Arduino library for sending and receiving data using LoRa radios. (Semtech SX1276/77/78/79) nebo API GitHub - jgromes/RadioLib: Universal wireless communication library for embedded devices (podporuje SX1278, RF69, CC1101, SX1268 a další)

Pro Point-to-Point používám:

- **LoRa-E32-TTL100** (EBYTE-LoRa) - obsahuje čip SX1278 (433 MHz), pro připojení k MCU se používá UART. Modul má nastavitelný výkon 20, 17, 14 a 10 dBm, 32 radiových kanálů v rozsahu 410-441MHz a datovou air rychlost od 0.3 do 19.2 kbps (defaultně 2.4 kbps). UART rychlost lze nastavit od 1.2 do 115.2 kbps. Pomocí pinů M0 a M1 lze nastavit mody Normal, Wake on Radio, Sleep nebo režim Settings. Lze nastavit topologii broadcast nebo adresování příjemce (mód transparent/fixed). Napájení je 3.3-5V a odběr vysílání/příjem/standby je 120/14/0.01 mA.

- **LoRa RA-02** (Ai-Thinker) - obsahuje čip SX1278 (433MHz), pro připojení k MCU se používá SPI. Nastavitelné je SF 7-12 a šířka pásma (62.5,125,250 kHz). Výkon je pevný 17 dBm. Napájení je 3.3V Odběr vysílání/příjem/standby je 90/12/1 mA.

- **TTGO ESP32 ver.1.0 nebo LoRa32 V2.1_1.6** (https://lilygo.cc/collections/lora-or-gps) - obsahuje čip SX1278 [433Mhz] / nebo SX1276 [868/915Mhz] a MCU ESP32 (Tensilica LX6 dual-core processor, 240MHz, 520 KB SRAM, 8MB FLASH) s podporou WiFi a Bluetooth. Napájení je přes pin BATT z 3,5 – 7V nebo přes USB (do USB lze přímo zapojit i dobíjení z fotočlánku).

2. LoRaWAN

Pro datové radiové spojení se sítí LoRaWAN v pásmu 868 MHz byly použity moduly (koncová zařízení v síti) obsahující na jedné desce MCU i radiový čip LoRa. Jako MCU je použit ESP32 nebo STM32 a pod. Programový kód pro MCU koncového zařízení LoRaWAN musí obsahovat procedury pro obsluhu LoRaWAN (join, re-join, atd) a existuje několik API podporující různé LoRa moduly.

Koncové zařízení připojují přes bránu LoRaWAN Gateway, která je dále spojena se síťovým řídícím serverem. Je možno si pořídit vlastní LoRaWAN Gateway od levných dvou kanálových pro domácí použití až po osmikanálové pro tisíce koncových nodů a vytvořit si vlastní síť a řídící server, nicméně vhodnější je použít komerční LoRaWAN síť.

Používám komerční síť LoRaWAN provozovanou Českými Radiokomunikacemi, která je v ČR poměrně dobře dosažitelná. Po registraci na ČRA LoRaWAN https://sso.cra.cz lze v portále nakonfigurovat parametry svých LoRaWAN koncových zařízení – pro OTAA doplnit Device EUI, Application EU a AppKey pro každé koncové zařízení. Je možný provoz zdarma při počtu max. 360 zpráv denně a malém počtu zařízení.
Data z koncového zařízení po prvotním OTAA přijmou nejbližší LoRaWAN brány v okolí. Pro uplink (směr dat node -> gateway) je používáno až 9 kanálů v pásmu 868 MHz, šířka pásma kanálu je standardně 125 kHz. Datová rychlost závisí na parametru SF (viz. popis LoRa výše). Protokol umožňuje adaptivně přizpůsobovat parametr SF podmínkám přenosu.

Nasnímaná data před převádím firmwarem v MCU do 10 - 12B formátu a odesílám je jednou za 5 min do sítě LoRaWAN. Při SF7 a délce zprávy 12 B (payload) + 13 B (LoRa header) je TimeOnAir 61 ms, což odpovídá datové rychlosti min. 3,5 kbps. V ČR je omezeno využití pásma (Duty Cycle) na 1% denně (radiový provoz 36 s za hodinu). Při TimeOnAir 61 ms a četnosti 12 zpráv za hodinu to zcela vyhovuje.

Pro kód s využitím LoRaWAN používám API od Heltec Heltec_ESP32/src/lora/API.md at master · HelTecAutomation/Heltec_ESP32 · GitHub (podporuje moduly od Heltec) nebo MCCI LoRaWAN LMIC library od IBM GitHub - mcci-catena/arduino-lorawan: User-friendly library for using arduino-lmic with The Things Network and other LoRaWAN® networks (podporuje LoRaWAN 1.0.2/1.0.3 Class A a Semtech SX1272/SX1276/SX1261/SX1262 a další)

Pro LoRaWAN používám :

- **Heltec Cube Cell HTCC-AB01** (https://docs.heltec.cn https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/) - obsahuje integrovaný čip ASR6501 (obsahuje čip LoRa SX1262 a ARM CortexM0+ 48 MHz, 16 KB RAM, 128 KB FLASH), IPEX pro připojení antény a IO piny. Programování se provádí přes miniUSB - deska obsahuje Serial-to-USB čip CP2102. Napájení je z konektorů pro BAT, dobíjení fotovoltaického článku na pin VS a napájení senzorů z pinu Vext 3,3V. Softwarová podpora od Heltec obsahuje potřebné knihovny i příklady kódu. Modul lze ovládat i přes AT příkazy ze sériového terminálu. Lze použít IDE pro Adruino po doplnění podpory desek ASR650x - https://github.com/HelTecAutomation/ASR650x-Arduino.

- **Heltec LoRa Node 151** – deska obsahuje MCU STM32 L151CCU6 (ARM Cortex M3 48 MHz, 32 KB RAM, 8 KB EEPROM, 256 KB FLASH), čip LoRa SX1276, IO piny, SMA přípoj na anténu a držák pro ½ AA AKU. Programování lze provádět v STMCubeIDE a firmware nahrávat pomocí STM Cube Programmer s použitím USB DFU nebo ST-LINK. V omezené míře lze použít IDE pro Adruino s doplněnou podporou desek STM32 (STMduino) https://github.com/stm32duino/Arduino_Core_STM32. Příklady kódu lze získat z Heltec po registraci ID čipu. Výhodou STM32 je výrazně nízká spotřeba v sleep modech, jistou nevýhodou omezená podpora z IDE Arduino a tedy nutnost používat vývojové nástroje pro STM32.

- **Heltec ESP32 LoRa** - obdobně jako TTGO obsahují ESP32 (MCU Tensilica LX6 dual-core processor, 240MHz, 520 KB SRAM, 8MB FLASH) s podporou WiFi i Bluetooth a čip LoRa Semtech SX1278. Obsahují OLED display. Programování je přes Arduino IDE s doplněnou podporou desek ESP32.

- **Arduino MKRWAN 1300** (https://store.arduino.cc/arduino-mkr-wan-1300-lora-connectivity-1414)- deska obsahuje Arduino Zero (MCU Atmel SAMD21 ARM Cortex M0+, 48 MHz, 32 KB SRAM, 256 KB FLASH) a radiový čip LoRa Murata CMWX1ZZABZ na 868 MHz. Deska je napájena přes konektory BATT 3,5 – 6V nebo USB. Pro

napájení snímačů lze použít Vout 3.3V. Do IDE pro Arduino je potřeba přidat podporu desky s CPU SAMD21. Implemetace protokolu LoRaWAN je v knihovně MKRWAN.

- **TTGO ESP32 ver.1.0 nebo LoRa32 V2.1_1.6** (https://lilygo.cc/collections/lora-or-gps) - pro LoRaWAN je použita Arduino knihovna „MCCI LoRaWAN LMIC library“.

3. LPWAN SIGFOX

Zařízení tvoří modul **SIGFOX WiSOL SFM10R1** na 868 MHz, který je připojen přes rozhrní UART k MCU např. Arduino Nano či Mini. K MCU je připojen snímač.

Data jsou před odesláním pomocí firmware v MCU převedena do 6 -10 B (**max. payload je v Sigfox omezen na 12B**) a následně zasílána jednou za 15 min do sítě SIGFOX (868 MHz) přes nejbližší radiové SIGFOX gateway v okolí. Datová rychlost je max. 100 bps. Nevýhodou sítě Sigfox je omezení v počtu a velikosti odesílaných zpráv.

4. Data Processing

LoRa

Data z vysílacích LoRa/MCU modulů (operační data nebo data ze senzorů) přijímám přijímacím modulem LoRa. Ten je připojen (většinou přes SPI) k MCU, který je připojen do interní WiFi a data jsou forwardována)POST) na interní http serve. Při zpracování se k datům mohou přidat servisní data získaná z přijímacího radiového modulu (SNR, RSSI, délka paketu atd.).

LoRaWAN

V portálu LoRaWAN i Sigfox lze data ukládat do DB na server u poskytovatele nebo nastavit **callback** (v LoRaWAN ČRA se nazýva endpoint), který se aktivuje při přijmutí datového paketu z koncového zařízení. Pomocí callback se data z portálu přepošlou ve formátu JSON v HTTP POST requestu na uživatelské URL podporující HTTP REST API. K datům z klientských zařízení se do JSON přidávají i metadata LoRaWAN. U sítě SIGFOX jsou volitelně hodnoty RSSI, SNR, seqNumber. U LoRaWAN ČRA jsou do JSON metadata přidávána automaticky (viz popis dat dále).

V mém způsobu zpracování data ze zařízení neukládám na serveru poskytovatele LoRaWAN, používám callback na HTTP serveru v cloudu. Na volaném URL aktivuji PHP kód, kterým se z HTTP POST requestu přijmou JSON data. JSON se „rozbalí“ na jednotlivé datové segmenty, data se zkontrolují, převedou z úsporného bitového formátu, upraví se a jako text se zapisují do datového souboru ve formátu CSV na datový server. Při větším počtu dat je vhodné místo CSV/TXT použít SQL DB. Datový soubor obsahuje v každém řádku zaslaný datový paket – zejména datum, čas odeslání dat, metadata z LoRaWAN a samozřejmě vlastní data např. ze snímačů . První řádek v CSV je popis dat. Soubor nebo tabulky DB jsou plněné daty a ukládány na datastore serveru. Použitím logiky Javascript Query API jsou části souborů načítány klientem z browseru. V kódu Javascriptu z načtených dat většinou vytvářím pole dat, jehož položky pak mohou být zobrazeny v prohlížeči např. ve formě textu a tabulky. Vytvořené datové 2D pole používám též jako datový objekt pro API Google Charts (https://developers.google.com/chart/). Nasnímaná data lze tak graficky, např v line grafu, zobrazovat v prohlížeči. V API pro Google Charts lze nastavit různé typy grafů, přizpůsobit nastavení os a mnoho dalších nastavení grafu. Použití API je dobře dokumentované.

Pokud je **senzorem GPS** jsou hodnoty GPS (LAT/LON/ALT) kódovány do 9 B formátu a přes LoRaWAN analogicky způsobem popsaným výše zapisovány do souboru na http serveru. Z datového souboru jsou pak záznamy čteny klientem pomocí Javascript, zpětně rozkódovány na GPS pozice a zobrazeny v prohlížeči. Možné je použití API Google Chart pro grafické zobrazování lokací GPS na mapě nebo export GPS dat do KML souborů.

Lze použít i jiné způsoby zpracování dat z LoRaWAN. Testoval jsem cloudové služby **IoT HUB v cloudu Microsoft Azure**. Koncová zařízení (tedy MCU + radiový modul) lze v Azure IoT HUB registrovat a vygenerovat autentizační stringy/klíče. Ty musí obsahovat Connection String přidávaný do dat zasílaných pomocí callback z řídícího serveru radiové sítě na URL Azure HUB. Krom komunikace přes HTTP REST API lze používat i protokol MQTT a pomocí LoRa downlink zpětně ovládat vzdálený proces. Je možné si „naklikat“ cloudové služby, které budou data směrovat do různých úloh a nastavit si pravidla třídění dat pro jednotlivé úlohy, které přijatá data budou dle požadavků zpracovávat (Stream Analytisc Jobs). Např. jen data presentovat do datové struktury pro Power BI a vykreslovat je v grafu.

V případě Azure je většina cloudových služeb placených, krom registrace zařízení v IoT HUB. Pro pouhé vykreslování dat je proto vhodnější použít API jiných cloudových služeb např. IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things.

5. Přílohy

1) Příklady zdrojových kódů - v samostatné příloze.
2) Schema zapojení některých modulů - v samostatné příloze.
3) Formát datové zprávy JSON v LoRaWAN ČRA:

{"type": "D", "data": "{\"cmd\":\"gw\",\"seqno\":200378730,\"EUI\":\"A8610A3237237901\",\"ts\":1585669308366,\"fcnt\":8,\"port\":2,\"freq\":868300000,\"toa\":51,\"dr\":\"SF7 BW125 4/5\",\"ack\":false,\"gws\":[{\"rssi\":-111,\"snr\":2.5,\"ts\":1585669308382,\"tmms\":1269704526356,\"time\":\"2020-03-31T15:41:47.357068000Z\",\"gweui\":\"B827EBFFFF93E544\",\"lat\":49.8717006,\"lon\":14.273884899999985},{\"rssi\":-113,\"snr\":-3.5,\"ts\":1585669308366,\"tmms\":1269704526357,\"time\":\"2020-03-31T15:41:47.357060357Z\",\"gweui\":\"B827EBFFFF1779D6\",\"lat\":49.86272349999999,\"lon\":14.261414999999943},{\"rssi\":-114,\"snr\":-2.8,\"ts\":1585669308378,\"tmms\":1269704526356,\"time\":\"2020-03-31T15:41:47.357063000Z\",\"gweui\":\"B827EBFFFFB95C6B\",\"lat\":49.872463793500934,\"lon\":14.254774807821605}],\"bat\":0,\"**data\":\"c6eb6a8a2467018126**\"}", "tech": "L", "tags": []}

Popis dat:
"seqno": sekvenční číslo generované Network Serverem CRA
"EUI": unikátní identifikátor zařízení DevEUI
"ts": časová značka vygenerované zprávy
"fcnt": sekvenční číslo zprávy, zaslané ze zařízení
"port": komunikační port na zařízení
"freq": pracovní frekvence, na které byla zpráva odeslána [Hz]
"toa": time on air [ms]
"dr": "oRaWAN parametry (spreading factor, šířka kanálu)
"ack": false, true - jako vyžádané potvrzení předchozí DL zprávy; false – všechny ostatní případy
"gws": [{ seznam gateways, které zprávu zachytily
"rssi": úroveň signálu [dBm] přijatého na GW dle GWEUI
"snr": úroveň odstupu signálu o šumu [dB] přijatého na GW dle GWEUI
"ts": lokalizovaný čas příchodu uplink zprávy na centrální LNS, formát Unix epoch timestamp [ms], https://www.freeformatter.com/epoch-timestamp-to-date-converter.html
"time": UTC čas příchodu uplink zprávy na GW dle GWEUI, formát ISO 8601
"gweui": identifikátor LoRaWAN GW, formát 16 HEX znaků
"lat": zeměpisná šířka GW dle GWEUI, formát decimal degrees (DD)
"lon": zeměpisná délka GW dle GWEUI, formát decimal degrees (DD)

"bat": stav baterie koncového zařízení (0=externí napájení, 255=stav baterie není přenášen, 1-254=odpovídá stavu baterie 0-100%
"data": payload / užitná hodnota. Pokud při importu zařízení zadáte i aplikační klíč AppKey, portál payload dešifruje. V opačném přijde zašifrovaný.

4) Formát datové zprávy JSON v SIGFOX

{ **"data" : "38a4",** "time" : "1585920821", "rssi" : "-139.00", "snr" : "12.31", "number" : "81" }