

## DATOVÉ STRUKTURY STANDARDU 802.15.4

Ing. Michal FUCHS

Ústav radioelektroniky

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

Vysoké učení technické v Brně.

Purkyňova 118, 612 00 Brno

Email: fuchs.michal@phd.feec.vutbr.cz

Při vytváření vlastních elektronických aplikací bychom mnohdy potřebovali, aby mezi sebou naše zařízení komunikovala bezdrátově. Našimi omezujícími kritérii bývá cena a obvodová náročnost. Použitím standardu 802.15.4 a jediného integrovaného obvodu lze zajistit bezdrátovou komunikaci s velmi nízkými náklady. V následujícím textu jsou shrnuty základní vlastnosti protokolu, výsledky z reálného měření spektra a dosahu s planárními dipólovými anténami. V neposlední řadě je část věnována popisu základních datových struktur nižších vrstev standardu, na kterých lze vystavět vlastní komunikační protokol.

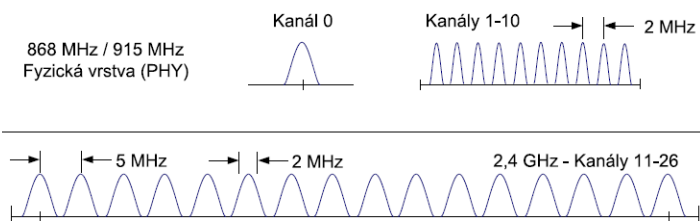
### 1. ÚVOD

Především díky trendům moderní doby, ke kterým bezpochyby patří požadavek mobility a bezdrátového spojení, vzniká v posledním desetiletí řada standardů pro bezdrátovou komunikaci. Každý z nich má svoje umístění v pomyslném trojúhelníku určení, dosahu a rychlosti přenosu. U sítí pro pokrytí rozsáhlých oblastí (WAN) se podle přenosové rychlosti postupně jedná např. o GSM/CDMA, GPRS/3G, LMDS. U bezdrátových sítí LAN např. Wi-Fi (802.11a), Wi-Fi8 (802.11a/HL2). A v odvětví osobních bezdrátových sítí (PAN) jsou to aktuálně standardy ZigBee (802.15.4), Bluetooth 1 (802.15.1)/2 a WiMedia (802.15.3). Popisovaný síťový standard 802.15.4 je zaměřen na oblast automatizace, bezdrátových sensorových sítí a vzdáleného řízení. Charakteristické pro něj jsou nízké přenosové rychlosti, lepší odolnost proti rušení, malá spotřeba a nízká cena.

### 2. STANDARD 802.15.4

#### 2.1. KMITOČTOVÉ ROZDĚLENÍ A MODULACE

Standard 802.15.4 pracuje v nelicencovaném ISM (Industrial Scientific and Medical) pásmu 2,4 GHz a to celosvětově na 16 kanálech o rychlosti 250 kbps s modulací O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying). V Americe na kmitočtu 915 MHz s 10 kanály, modulací BPSK při rychlosti 40 kbps a konečně v Evropě s jedním kanálem o rychlosti 20 kbps a opět s modulací BPSK (Binary Phase-Shift Keying - dvoustavové fázové klíčování) (Obrázek 1) [1][2].



Obrázek 1 – Kmitočtové rozložení kanálů podle [1]

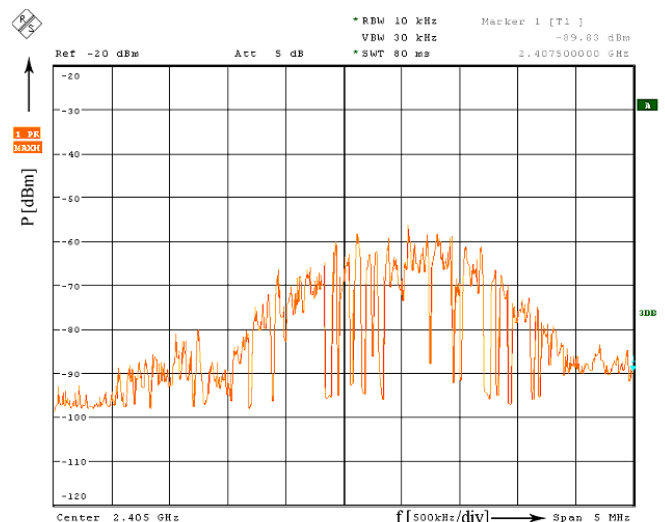
Modulace O-QPSK (ofsetové kvadraturní fázové klíčování) zajišťuje proti klasické QPSK snížení parazitní

amplitudové modulace (z principu O-QPSK při maximální změně fáze o  $\pm 90^\circ$  může dojít k parazitní amplitudové modulaci s hloubkou modulace maximálně 30%). Oproti QPSK lze vysílat symboly dvojnásobnou rychlostí, čímž vzroste přenosová rychlost. To ale současně vede k nárůstu šířky pásma [1].

#### 2.2. SPEKTRUM

Spektrum standardu pracujícím v pásmu 2,4 GHz odpovídá tvarem průběhu funkci *sinc* s potlačenými bočními laloky [1]. Je to charakteristické pro systémy s rozprostřeným spektrem při modulaci O-QPSK.

Za použití spektrálního analyzátoru „Rohde & Schwarz Signal analyzer 20 Hz – 3,6 GHz“ bylo ověřeno spektrum jednoho z kanálů (Obrázek 2). Na vstupu byl zařazen attenuátor 5 dB. Vysílací anténou byl planární dipól pro 2,4 MHz a jako přijímací anténa sloužila dvoupásmová planární anténa pro 1,8 GHz a 2,4 GHz. Vzdálenost obou antén od sebe byla přibližně 20 cm. Vysílací výkon koncového stupně byl -16,6 dBm. Použitým transceiverem byl obvod MC13192 od společnosti Freescale.



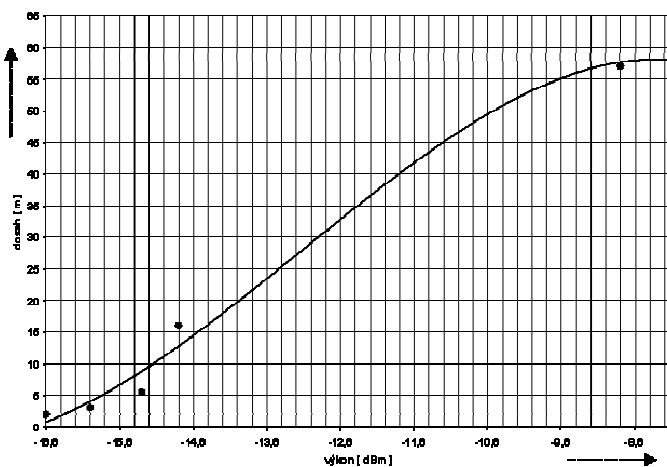
Obrázek 2 – Výkonové spektrum 1. kanálu (MC13192) [1]

Podle specifikace [2] je minimální šířka kanálu pro úspěšné dekodování 2 MHz. Maximální šířka kanálu může teoreticky být 5 MHz. Při větší šíři totiž dojde k překrytí

dvou sousedních kanálů. „Protokol současně definuje vysílanou spektrální hustotu výkonu v oblasti  $|f - fc| > 3,5$  MHz relativním a absolutním limitem, kde  $f_c$  je kmitočet středu kanálu. Pro splnění podmínky absolutního limitu musí být ve zmíněné oblasti boční laloky potlačeny minimálně o 30 dB oproti maximální hodnotě výkonu hlavního laloku. Referenční hladina pro relativní kritérium se určí jako průměr výkonové úrovně v rozmezí  $\pm 1$  MHz od  $f_c$ . A v daném pásmu musí být odstup mezi výkonovými úrovněmi a referenční hladinou alespoň 20 dB. Oba limity by měl transceiver splňovat.“ ([1])

### 2.3. DOSAH

Dosah je závislý především na použitých anténách a vyzářeném výkonu a bývá v rozmezí 10 - 75 m. Reálné měření mezního dosahu uvádí Obrázek 3.



Obrázek 3 – Měření mezního dosahu podle [1]

Měření bylo provedeno v budově při přímé viditelnosti a shodné polarizaci obou antén. Vysílací i přijímací zařízení používalo planárních antén s motivem dipólu. Nejzastší místo, kde zařízení správně přijalo pět po sobě jdoucích paketů s platným kontrolním součtem CRC bylo označeno jako mez dosahu pro daný výkon. [1]

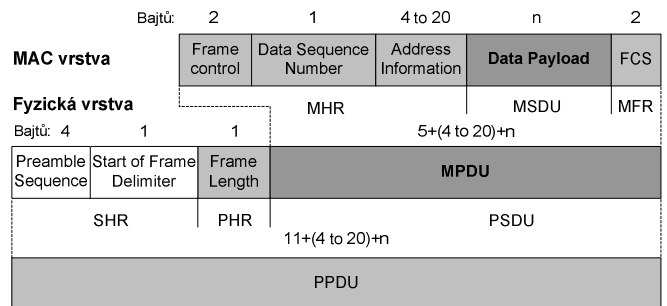
### 2.4. TYPY RÁMCŮ

V komunikaci se používají rámce řídicí, datové, singální a potvrzovací. Každý začíná preambulí (Preamble Sequence). V ní se vysílá sada 32 logických nul, pomocí nichž se přijímač sesynchronizuje s vysílačem. Následuje osmibitový oddělovač rámce (Start of Frame delimiter) značící počátek užitečných dat, který je složen z pevně dané sekvence bitů (E5)<sub>H</sub>. Za ním pokračuje sedm bitů obsahujících délku bloku PSDU (PHY Service data unit) (Obrázek 4 - Obrázek 7). Jednotlivé datové struktury se liší právě obsahem PSDU na fyzické vrstvě resp. Obsahem MPDU na linkové vrstvě. [1][3]

#### 2.4.1. DATOVÝ RÁMEC

Datový rámec (Obrázek 4) je určen k přenosu vlastních užitečných dat. Kompletní, připravený k přenosu, je

označen jako PPDU (PHY Packet Data Unit). Na fyzické vrstvě se skládá z výše popsaného společného bloku a z části MPDU (MAC Packet Data Unit) dodané linkovou vrstvou.

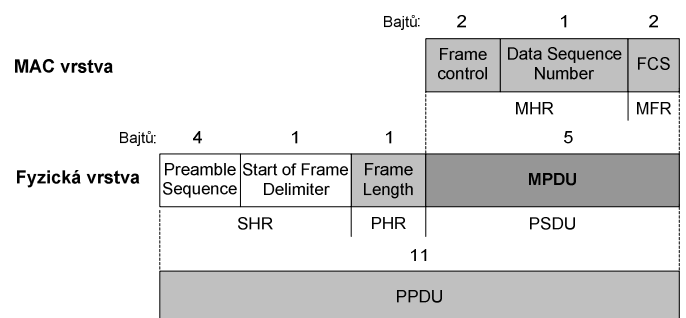


Obrázek 4 – Struktura datového rámce [3]

Podle sedmibitového pole FL správně předpokládáme, že maximální délka MPDU může být až 127 bajtů. V nich jsou dva bajty vyhrazeny k rozlišení typu rámce (Frame Control). Jeden bajt DSN (Data Sequence Number), jež čísluje pořadí rámce, kvůli ověřování souslednosti a zpětnému potvrzování. Dále oblast o rozsahu až dvaceti bajtů pro adresní pole. Všechny adresy v adresním poli jsou volitelné a mohou, ale nemusí v něm být obsaženy. Postupně se jedná o dvoubajtovou adresu cílové sítě (PAN ID, více viz. [1]), dvoubajtovou nebo osmibajtovou adresu cílového zařízení podle toho jestli je již zařízení součástí sítě (má nebo nemá přiřazenou krátkou adresu), dvoubajtovou adresu výchozí sítě (PAN ID) a dvoubajtovou nebo osmibajtovou adresu zdrojového zařízení. Dva bajty pro kontrolní součet FCS (Frame Check Sequence) pro ověření integrity dat. A konečně až 104 bajtů pro užitečná data (Data Payload).

#### 2.4.2. POTVRZOVACÍ RÁMEC

Potvrzovací rámec ACK (Acknowledgment frame) potvrzuje, že data byla přijata správně. Zajišťuje tedy aktivní zpětnou vazbu mezi přijímací a vysílací stranou z níž vysílací strana pozná, že data byla přijata bez chyb. Jedná se o krátký paket o délce jedenácti bajtů, který je odeslán neprodleně po přijetí potvrzovaného rámce. Z originálního, správně přijatého rámce se zkopírují dva bajty „Frame Control“ a jeden bajt „Data Sequence Number“ a stále ještě na úrovni linkové vrstvy MAC se k nim přidá kontrolní součet FCS. Fyzická vrstva provede stejné operace jako u datového rámce jak ukazuje Obrázek 6 z [1].

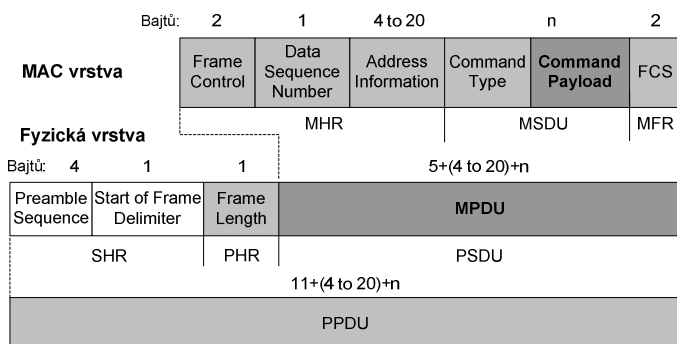


Obrázek 5 – Struktura potvrzovacího rámce [3]

Pokud se po ověření FCS shodují čísla „Data Sequence Number“ z vyslaného rámce a z přijatého ACK rámce, považuje se přenos za úspěšný.

### 2.4.3. PŘÍKAZOVÝ RÁMEC

Slouží pro dálkové řízení, konfiguraci klientů a uzlů sítě. Umožňuje nastavovat koncová zařízení bez ohledu na to jak je síť velká. V části „Frame Control“ musí být nastaveno, že se jedná o příkazový rámec. Oproti datovému rámci se místo pole pro užitečná data „Data payload“ přenáší příkaz složený z typu příkazu CT (Command Type) a z jeho parametrů CP (Command Payload).



Obrázek 6 – Struktura potvrzovacího rámce [3]

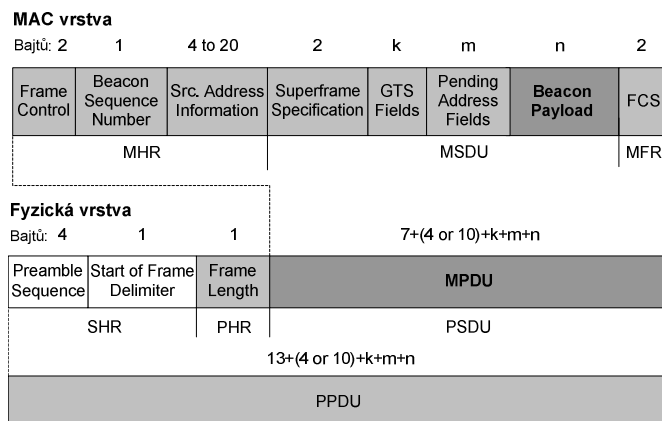
Použitelné typy příkazů CT rámce ukazuje Tabulka 1. Příkaz „Oznámení nedostupného PAN koordinátoru“ (ID 6) začne vysílat každý směrovač, který ztratí synchronizaci s koordinátorem sítě. Pokud ho koordinátor zachytí obvykle vyšle příkaz „Přeladění koordinátoru“ (ID 8), vysílá se také pokud se změní parametry sítě. Nejprve se vyšle jen do uzlů které oznámili nedostupnost koordinátoru a poté broadcastem všem bodům v síti. „Žádost o signální rámec“ vyzve zařízení v dosahu k vyslání signálního rámce. Tak lze zjišovat zařízení v dosahu.

Tabulka 1 – Typy příkazů podle [3]

ID	Jméno	Klient	
		RX	TX
1	Žádost o zařazení do WPAN	Ano	
2	Odpověď na žádost o zařazení do WPAN		Ano
3	Oznámení o vyřazení	Ano	Ano
4	Požadavek vyslání dat	Ano	
5	Oznámení o konfliktu PAN Identifikátorů	Ano	
6	Oznámení nedostupného PAN koordinátoru	Ano	
7	Žádost o signální rámec		
8	Přeladění koordinátoru		Ano
9	Žádost o GTS		
10	Nevyužito		

### 2.4.4. SIGNÁLNÍ RÁMEC

Signální rámec (Beacon Frame) má z uvedených typů nejsložitější strukturu a musí zajistit synchronizaci a správu garantovaných timeslotů (GTS) všem zařízením v síti.

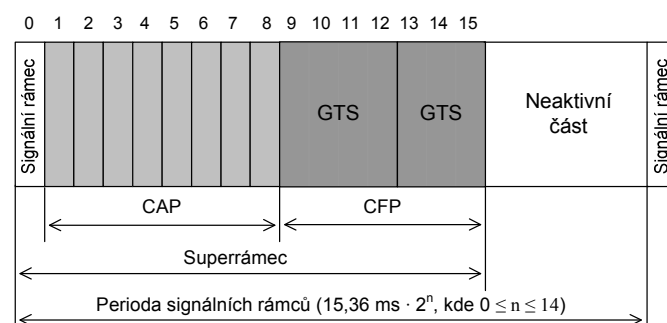


Obrázek 7 – Struktura signálního rámce [3]

Signální rámce (Obrázek 7) přinášejí síti další funkcionalitu. Signální rámce jsou důležité pro síť v uspořádání typu hvězdy a polygonu (více viz. [1]), kde udržují klienty synchronizované. Ti pak mohou sledovat provoz a mít aktivovaný přijímač pouze v okamžicích když očekávají příjem, po zasychnonizování klientů na periodu superrámce. Tak se sníží spotřebovávaná energie.

### 2.4.5. SUPERRÁMEC

Standard IEEE 802.14.5 umožňuje používat tzv. superrámec. Nejedná se o rámec ve smyslu paketu jako u předchozích případů. Superrámec je určité časové schéma jež dělí čas do slotů s různým použitím. Jeho struktura je definována koordinátorem sítě. Superrámec (Obrázek 8) vysílaný koordinátorem je ohraničen signálními rámci a rozdělen na 16 stejných slotů.



Obrázek 8 – Struktura superrámce [1]

V prvním je vysílán signální rámec. Ten je určen pro synchronizaci, identifikaci sítě a k popisu struktury superrámce. Ve zbývajícím čase může jakékoliv zařízení na základě přístupové metody CSMA-CA 1) (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) komunikovat.

Každý superrámec může mít aktivní a neaktivní část. Během aktivní části koordinátor komunikuje s příslušnou součástí a v tzv. neaktivní době může přejít do režimu spánku [1][2]. Aktivní část lze dále rozdělit na oblast CAP (Contention Access Period) a CFP (Contention Free Period). V době trvání CAP probíhá komunikace na základě CSMA-CA. Pro aplikace které vyžadují rychlou odezvu nebo pevnou šíku pásma může koordinátor příslušnému zařízení přiřadit část superrámce. Tyto rezervované části se nazývají garantované timesloty GTS (Guaranteed Time Slots). Koordinátor jich může vyčlenit až sedm přičemž jeden GTS může zabrat i více slotů. Vyhrazené místo pro GTS je v části CFP a začíná ihned po skončení části CAP. V části CAP musí zůstat dostatek místa pro ostatní zařízení a nová zařízení, která se chtějí k síti připojit. Tyto operace se musí uskutečnit ještě před začátkem CFP. Příklad superrámce podle [2] demonstruje Obrázek 8. Přijímač očekává začátek superrámce v přesně definovaných intervalech ( $15,36 \text{ ms} \cdot 2n$ , kde  $0 < n < 14$ ). Interval opakování je tedy volitelný přibližně mezi 15 ms až 252 s.

### 3. ZÁVĚR

Článek si kladl za cíl prvotní seznámení čtenáře s protokolem 802.15.4, jež je „základem“ pro komplikovanější struktury protokolu ZigBee™. Současně představil zmiňovaný standart a uvedl jeho vlastnosti, které jsou pro tento protokol specifické. Mezi ně patří: kmitočtové rozdělení, použité modulační metody, spektrum, cílová oblast využití, přenosové rychlosti a další. Následující část se věnovala seznámení s výsledky z reálného měření spektra a dosahu za použití dipólových planárních antén. Poslední část ukázala struktury rámců, jejichž znalost lze upotřebit při studiu protokolu ZigBee™, nebo při definici vlastního protokolu založeném na 802.15.4.

### LITERATURA

- [1] FUCHS, M. Řízení bezdrátové komunikace pomocí ZigBee. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s., 5 příl.
- [2] GUTIERREZ, Jose A. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003. 679 s. ISBN 0-7381-3677-5.
- [3] LABOID, H., AFIFI, H., SANTIS, C. D. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax, London : Springer, 2007. 450 s. ISBN 1402053967.