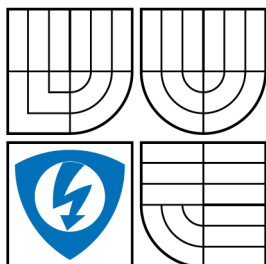


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ENERGETICKY EFEKTIVNÍ ZPRACOVÁNÍ DAT NA UZLECH BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

ENERGY AWARE DATA PROCESSING ON WIRELESS SENSOR NODES

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

OBOR

Teleinformatika

AUTOR PRÁCE
ŠKOLITEL

Ing. VLADIMÍR ČERVENKA
doc. Ing. DAN KOMOSNÝ, Ph.D.

OPONENTI

DATUM OBHAJOBY

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátové senzorové sítě, personální sítě, přenos dat, RTOS.

KEYWORDS

Wireless sensor networks, personal networks, data transmission, RTOS.

Dizertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno.

© Červenka Vladimír, 2014

ISBN 978-80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod	5
1 Současný stav poznání	6
1.1 Operační systémy	6
1.2 Hardwarové platformy	7
2 Cíle práce	8
3 Experimentální analýza protokolových sad	9
3.1 Efektivnost přenosu dat	10
3.2 Výsledky měření	10
3.3 Závěry analýzy	12
4 Energeticky efektivní hardwarová platforma	12
4.1 Požadavky na hardwarovou platformu	12
4.2 Vlastní návrh hardwarové platformy	13
4.3 Hardwarová architektura vyvinuté platformy	14
5 RTOS s podporou mesh komunikace a řízením spotřeby energie	18
5.1 Modifikované jádro	19
5.2 Komunikační protokolová sada	19
5.3 Implementace jádra a protokolové sady	20
6 Experimentální ověření hardwarové platformy EE-WSN	21
6.1 Ověření výkonu	21
6.2 Spotřeba energie v režimu spánku	22
6.3 Přímé zpracování dat na uzlu WSN	24
6.4 Autonomní systém příjmu dat	25
7 Experimentální ověření systému EE-RTOS	26
8 Diskuse	27
9 Závěr	29
Literatura	30
Publikace autora	33
Curriculum Vitæ	35

ÚVOD

Bezdrátové senzorové sítě (WSN, Wireless Sensor Network) jsou kategorií bezdrátových sítí, které jsou charakteristické nízkou přenosovou rychlostí, avšak dlouhým bezobslužným provozem (měsíce až roky). WSN síť je složena ze spolupracujících a velmi omezených zařízení, které zaznamenávají, zpracovávají, uchovávají a odesílají data. Na rozdíl od WLAN (Wireless Local Area Network) jsou WSN sítě typicky samo-organizující (bez nutnosti konfigurace) a striktně optimalizovány pro konkrétní aplikaci. Nejčastěji využívají ke komunikaci radiových vln a jejich dosah může být od centimetrů až po kilometry. Tato práce se soustředí výhradně na senzorové sítě založené na standardu IEEE 802.15.4, který je mj. nejrozšířenějším v této oblasti.

Samotná myšlenka využití vzájemně komunikujících uzlů sahá až k počátkům Internetu. Rozvoj tohoto vědního oboru však dovolil až příchod prvních hardwarových platforem jako je Mica¹. Od té doby prošly senzorické sítě bouřlivým vývojem. WSN přitahují pozornost vědců napříč celého akademického spektra, protože dovolují uplatnit nejrozmanitější myšlenky takřka bez limitů. WSN má velmi bohaté uplatnění. Jedná se především o geolokaci, snímání fyzikálních veličin v průmyslu a zemědělství, sledování namáhání konstrukcí staveb, komunikaci mezi automobily (VANET) a inteligentní domácnosti. Speciálním případem je zdravotnictví WBAN (Wireless Body Area Network) nebo také WBSN (Wireless Body Sensor Network), které je pro své vysoké nároky náročnou oblastí. Úspěšný návrh hardwarové platformy je pak podmíněn znalostí z oborů bezdrátové komunikace, zpracování signálů, kryptografie, senzorických systémů aj.

Motivace pro zvýšení výkonu senzorových uzlů

Bohužel současné senzorické uzly nejsou pro výpočetně náročné aplikace vhodné [20], a proto je pro ně díky omezeným výpočetním a paměťovým prostředkům charakteristické střídání provádění intenzivních výpočtů a běžné funkce. Nedostatek výpočetního výkonu současných WSN platforem se stává hlavním limitujícím faktorem [2, 18, 21]. Jedinou možností je tak využití některé z výpočetně výkonných hardwarových platforem (Imote2, Sun SPOT či MedusaMK-2) na úkor spotřeby energie a pořizovací ceny.

Mezi WSN oblasti typicky vyžadující vysoký výpočetní výkon a zároveň velmi nízkou spotřebu energie, z důvodu co nejdelšího bezobslužného provozu, patří oblast lékařství (WBSN), zabezpečení a perzistentního monitoringu prostředí a konstrukcí staveb. Zde je potřeba signálového zpracování s vysokým rozlišením (komprese, filtrování snímaného signálu) či náročných výpočtů asymetrické kryptografie. Kupříkladu u algoritmů pro detekci srdeční činnosti se využívá dolní propusti realizované FIR (Finite Impulse Response) filtry a u respiračních algoritmů pak pásmové propusti realizované IIR (Infinite Impulse

¹Rok 2001, University of California, Berkeley.

Response) filtry. Zvýšené paměťové a výpočetní nároky mají i aplikace využívající standard 6LoWPAN s podporou RPL, nebo klasicky brány WSN sítí.

Zabezpečení a energetická efektivnost jsou přitom nejdůležitějšími stavebními kameny reálně nasazených WSN aplikací [19]. Vysoký výpočetní výkon a nízké energetické požadavky jsou ale při návrhu platformy zcela protichůdné vlastnosti, a proto musí být nutně zvoleno kompromisní řešení. Vysoký výpočetní výkon však znamená rychlejší zpracování dané úlohy a systém tak může více času strávit v úsporném režimu, což přímo ovlivňuje jeho energetickou efektivitu.

1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Vzhledem k tomu, že sensorické uzly musí být levné a malých rozměrů, není možné je vybavit velkým zdrojem elektrické energie. Situace je dále ztížena skutečností, že jednotlivé uzly musí pracovat bezobslužně z důvodu často obtížného přístupu či velkému počtu zařízení. Ve výsledku pak zařízení musí pracovat za pomoci alternativních zdrojů energie (solární články, vibrace, rádiové vlny, atp.) a vlastní baterie řádově roky. Z uvedeného vyplývá, že energetické požadavky tvoří klíčový parametr návrhu celé sítě. Spotřeba elektrické energie proto byla ustanovena jako největší omezení při návrhu bezdrátové sensorové sítě [32].

Jak bude dále popsáno, největší úspory energie je dosaženo za pomoci úsporných MAC (Medium Access Control) protokolů [23], které mohou snížit aktivitu hardwaru pod 1 % celkové provozní doby uzlu. Sensorické uzly tak pracují jen během velmi krátkých časových intervalů, přičemž se snaží ve velké míře využít dostupných režimů spánku. Proto je v oblasti WSN důležitá i minimalizace spotřeby během režimu spánku. Ta je u aplikací s nízkým datovým tokem dominantní složkou spotřeby a hlavním faktorem limitujícím dobu životnosti uzlů.

1.1 Operační systémy

V minulosti byly pro uzly WSN vytvářeny velmi jednoduché aplikace, např. pro sběr dat, které byly v rámci celé sítě shodné. Síťové protokoly a aplikace byly významně spjaty a společně s protokoly nižších vrstev tvořily monolitický celek. Takový software byl využitelný pouze pro specifické aplikace bez možnosti přidání nové funkcionality. Dnešním trendem je naopak využití sensorové sítě pro širokou škálu aplikací [6]. To však vyžaduje použití vyspělejšího přístupu v podobě operačních systémů (OS). Operační systémy WSN se typicky dělí na *událostně řízené* (event-driven) a *více vláknové* (multithreaded).

Dnes nejrozšířenější operační systémy pro bezdrátové sensorové sítě jsou TinyOS a Contiki OS. Oba operační systémy jsou představiteli událostně řízeného modelu a jsou využívány převážně na akademické půdě a v oblasti vývoje. Jejich kód je veřejně přístupný, což dovoluje snadné úpravy a implementaci nových protokolů. Mezi populární

více vláknové systémy pro WSN patří např. Mantis, Nano-RK či LiteOS. Největší nevýhodou zmíněných systémů, společně např. s operačním systémem SOS je jejich krátký životní cyklus, neboť byly vyvíjeny na akademické půdě a jejich vývojáři již graduovali. Proto nejsou ani nové hardwarové architektury podporovány.

1.2 Hardwarové platformy

Přestože preferovaná oblast využití výstupů této práce je WBSN, pozornost je v této práci věnována tzv. generickým hardwarovým platformám. Vzhledem k šíři aplikační domény WSN je dokonce nemožné porovnávat platformy vyvinuté pro různé specifické aplikace. Výhodou takovýchto řešení je finanční efektivita výroby i nákupu, neboť je možné stejný senzorický modul využít v rozdílných aplikačních oblastech. Mikrokontroléry ATmega128x a TI MSP430 patří v oblasti WSN mezi ty nejvyužívanější. Ty však lze pro svůj nízký výpočetní výkon a omezenou RAM paměť vyřadit. Je jasné, že tyto platformy nebyly vyvinuty pro výpočetně náročné aplikace, ale pro levné a velmi jednoduché snímání fyzikálních vlastností ve svém okolí.

Mezi komerční platformy specificky vyvinuté pro aplikace vyžadující vysoký výpočetní výkon patří Sun SPOT, Intel Mote2 (iMote2), STARGATE, LOTUS a Preon32.

Z pohledu spotřeby energie jsou úsporné módy platform iMote2, Sun SPOT a STARGATE pro potřeby WSN aplikací nevyhovující, přičemž nejlepších hodnot dosahuje platforma Preon32 ve stop režimu (0,086 mW). Ze srovnání RF transceiverů je evidentní, že platformy LOTUS a Preon32 předčí své konkurenty v citlivosti i energetické efektivitě pro příjem a vysílání. Bohužel ani jedna z uvedených platform neposkytuje podporu zabezpečení bezdrátové komunikace. Hardwarové AES akcelerátory RF transceiverů (např. u AT86RF231) jsou díky nezabezpečené komunikaci přes SPI sběrnici snadnou snadno překonatelné.

V posledních letech se v odborné literatuře objevilo několik návrhů hardwarových platform, založených na výkonných mikrokontrolérech *ARM7TDMI-S* a *ARMv7-M*. Konkrétně jde o platformy NetBrick, Opal, Egs, AVS-Extrem, NTU-NSC WSN M3-SuperNode a [18]. Sensorové uzly využívající heterogenních procesorů, jako Medusa MK-2, zde nejsou uvedeny, neboť jsou z logiky věci dražší a nutně zvyšují klidový proud celého systému. To má za následek nižší energetickou efektivitu takovýchto řešení.

Je zřejmé, že každá z HW platform, jak publikovaných, tak komerčních má silné i slabé stránky. Jako nejlepší možnost pro výpočetně náročné aplikace byla například v [14] vybrána platforma Sun SPOT. S respektem k energetické efektivitě výpočetního a komunikačního subsystému však nejvíce vyhovuje platforma Preon32. Ta ale, stejně jako všechny ostatní, nenabízí žádnou kryptografickou podporu.

2 CÍLE PRÁCE

Bezdrátové sensorové sítě se charakterizují využíváním levných a velmi omezených sensorových uzlů. Především z pohledu výpočetního výkonu, paměťového prostoru a výdrže baterie. Typicky je tak z důvodu nízké spotřeby energie sensorový uzel vybaven 8 až 16-ti bitovým mikrokontrolérem s taktovací frekvencí do 8 MHz. Samozřejmě dnes existují i platformy disponující dostatečným výpočetním výkonem jako iMote2, Medusa MK-2, Sun SPOT či Lotus, ale jejich spotřeba energie v aktivním i úsporném režimu je pro potřeby WSN příliš vysoká a mohou tak pracovat typicky jen po velmi omezený čas¹. Cílem této práce je mj. dokázat, že sensorové uzly mohou disponovat dostatečně vysokým výpočetním potenciálem, s hardwarovou podporou DSP algoritmů, výpočtů s čísly s pohyblivou řádovou čárkou a přitom minimálně zachovat energetické a finanční požadavky stávajících systémů.

Jestliže budou jednotlivé uzly bezdrátové sensorové sítě disponovat dostatečným výpočetním výkonem, může být upuštěno od distribuovaných a centralizovaných výpočtů, např. [1, 3] a [22, 24]. Myšlenka přímého zpracování dat přímo na uzlech sensorové sítě není nová, nicméně vždy chyběly prostředky pro její uplatnění v plném rozsahu. Dalším cílem je tak dokázat, že bezdrátové uzly mohou fungovat plně autonomním způsobem, což má přímý dopad na energetické nároky a stabilitu celé sítě, zvláště při výpadku centrálního logického prvku. Zvýší se také podpora mobilních ad-hoc sítí a duty-cycle MAC protokolů. Mimo to se dramaticky zvýší energetická efektivita celého systému, protože nebude nutné bezdrátově přenášet velké objemy dat, ale pouze samotné výsledky, či změny stavů.

Dnes nejrozšířenější protokolovou sadou bezdrátových sensorových sítí je ZigBee Pro, k čemuž také přispívá masivní podpora ZigBee Alliance, která sdružuje přední výrobce elektroniky, národní regulační úřady, university a další. Stále častěji se však hovoří o reálném příchodu IoT, který by měl využívat revoluční 6LoWPAN. Dále je k dispozici řada proprietárních řešení. Výběr správné protokolové sady je přitom pro energeticky efektivní mesh sítě zcela esenciální. Bude proto provedena analýza současných řešení a vybrán vhodný kandidát k vlastní implementaci.

Dosavadní vývoj v oblasti MAC protokolů přiblížil efektivnost řízení spotřeby RF transeiverů k fyzickému maximu a lze předpokládat, že další vývoj bude přinášet jen zlepšení v řádu procent. Změníme-li stávající architekturu (HW/SW) bezdrátových sensorových systémů, můžeme nalézt další možnosti snížení potřeby energie a docílit tak skokového zvýšení energetické efektivity. Mezi hlavní cíl tedy patří návrh a ověření nového energeticky efektivního přístupu přenosu dat v bezdrátových sensorových sítích.

K plné podpoře přímého zpracování dat na sensorovém uzlu chybí systém řízení, resp. operační systém, jenž by zohlednil přísné energetické nároky a podpořil svou funkcí energetickou efektivitu celého systému. Posledním z cílů této práce je tak implementace ope-

¹Např. platforma Sun SPOT může setrvat v aktivním stavu jen 23 hodin [31].

račního systému reálného času (RTOS) s podporou bezdrátových mesh sítí a řízením spotřeby energie. Vzhledem k novým možnostem vyvinuté platformy EE-WSN již provoz RTOS nepředstavuje problém [7] a lze využít cenná vylepšení jako determiničnost jednotlivých úloh, podporu přesné synchronizace, snadnou přenositelnost aplikací a snadnost vytváření aplikací bez nutné znalosti spodních vrstev systému.

Cíle této práce lze shrnout do následujících bodů:

- a) Analýza současných standardů a protokolových sad podporujících mesh komunikaci.
- b) Nalezení nového energeticky efektivního přístupu pro přenos dat v bezdrátových sensorových sítích.
- c) Implementace operačního systému reálného času (RTOS) pro bezdrátové mesh sítě s řízením spotřeby energie.
- d) Navrženou hardwarovou platformou překonat současné paradigma, že uzly bezdrátové sensorové sítě jsou na úkor energie výpočetně omezená zařízení. Tedy dokázat, že sensorové uzly nutně nemusí disponovat výpočetně a paměťově omezenými mikrokontroléry, aby dosáhly nízké spotřeby energie, a to v aktivním i úsporném režimu.
- e) Potvrzení hypotézy H_1 a překonat tak současné paradigma využití distribuovaných a centralizovaných výpočtů na uzlech bezdrátové sensorové sítě.

Hypotéza H_1 : Uzly bezdrátové sensorové sítě mohou být výpočetně nezávislé a jsou tedy schopny provádět výpočty, jako např. 512-bodá FFT, přímo na uzlech s nižší energetickou náročností, než s pomocí distribuovaných výpočtů.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA PROTOKOLOVÝCH SAD

Výběr vhodné komunikační protokolové sady je pro energeticky efektivní bezdrátové mesh sítě zcela esenciální. V dnešní době však neexistuje obecný konsensus ani standard definující protokolovou sadu [37]. V zájmu nalezení vhodné implementace energeticky efektivní komunikační sady, pro splnění prvního z vytyčených cílů, autor provedl sérii následujících měření. Nejprve byly výše uvedené standardy podrobeny testu energetické efektivity a s vybranými kandidáty pak byla provedena detailní analýza, rozdělená do tří scénářů, zaměřujících se na: a) propustnost dat na aplikační vrstvě, b) zpoždění při směrování, c) samoopravnou schopnost sítě. Vybrané scénáře by měly postihnout nejkritičtější vlastnosti WSN sítí pro reálný provoz a tedy podat dostatečné informace k nalezení vhodné implementace pro potřeby této práce.

3.1 Efektivnost přenosu dat

Jak již bylo řečeno, v prvním kroku byly výše uvedené standardy podrobeny testu energetické efektivity na RF transceiveru Atmel AT86RF233 s rychlostí přenosu 250 kb/s, tedy symbolovou délkou 32 μ s. Měřeno bylo potřebné množství energie pro odeslání 1 Byte uživatelských dat. Hodnoty zohledňují veškerou datovou režii spojenou s odesláním zprávy.

Nejlepší energetické efektivity, v rámci mesh protokolů, dosahuje proprietární protokol Lightweight Mesh. Ačkoliv je standard 6LoWPAN velice atraktivní a výrazně se podílí na popularizaci senzorových sítí, z pohledu energetické efektivity jde o zcela nevhodný koncept. Podrobně byl tento standard autorem popsán v [8].

3.2 Výsledky měření

3.2.1 Vyhodnocení dat

Jelikož neexistuje vhodný nástroj pro analýzu zachycených dat, byl v jazyku VBA vytvořen analytický framework, který emuluje funkci RF transceiveru (IEEE 802.15.4) a LWM protokolu. Vzhledem ke zpětné analýze zachycených dat, však musí framework postupovat reverzním způsobem. Při zpracovávání paketu je např. prozkoumáno okolí v rozsahu 54-ti symbolových period (864 μ s) a vyhledáno příslušné potvrzení (ACK). Pakliže není nalezeno, je vyhledán duplicitní přenos paketu atd. Framework lze díky VBA jazyku implementovat do prostředí Microsoft Excel, kde lze spuštěním makra načíst csv soubor a spustit automatizovanou analýzu dat. Skripty dokáží samy detekovat inicializační i finalizační událost, např. sestavení komunikace pro měření propustnosti, či změnu mezilehlého uzlu u testu samo zotavení sítě. Framework obsahuje skripty pro analýzu:

- a) Datové propustnosti na aplikační vrstvě. Lze zobrazit i režii linkové vrstvy, společně s počtem opakovaných přenosů (retransmission) a to jak počtem událostí, tak počtem paketů. Je možné zobrazit statistiky přístupu konkrétních uzlů k médiu, což lze využít i pro ladění hodnot konkurenčního přístupu, tzv. CSMA (Carrier Sense Multiple Access) backoff exponentu, již instalované sítě. Pro případ manuální analýzy je pak možné zapnout vizuální podporu, kdy jsou pakety obarveny dle jejich významu i původce.
- b) Zpoždění při směrování.
- c) Samoopravné schopnosti sítě. Zde je vyhodnoceno časové zpoždění od okamžiku první nedoručené zprávy až po úspěšně doručnou zprávu přes nově nalezenou cestu. Dále je zde uvedena i informace o celkové režii.

3.2.2 Propustnost dat na aplikační vrstvě

Přestože většina WSN aplikací nevyžaduje vysoké přenosové rychlosti, řádově jen desítky kilobitů za sekundu, existují situace (např. aktualizace firmwaru), kdy je potřeba přenést mezi uzly velké množství dat v krátkém čase. Standard IEEE 802.15.4 sice definuje pro pásmo 2,4 GHz maximální přenosovou rychlost linek na 250 kb/s, nicméně aplikační rychlost se v praxi značně liší od uvedené hodnoty.

Z výsledků měření je patrné, že režie ZigBee protokolu způsobuje ještě nižší propustnost a to pro oba případy aktivovaného i neaktivovaného aplikačního potvrzení. Přenosová rychlost LWM je tak na volném kanálu až třikrát vyšší. Jak lze předpokládat, nejvyšší rychlosti je dosaženo pro maximální velikost uživatelských dat. V extrémním případě – tři konkurenčně odesílající uzly s maximální velikostí datové části a aktivním AppACK dosahuje LWM takřka dvojnásobně lepších výsledků. V případě šifrovaného přenosu jsou rozdíly propustností markantnější. LWM dosahuje dokonce třináctkrát vyšší propustnosti oproti BitCloud implementaci.

3.2.3 Zpoždění přeposíláním paketů

Tento scénář se zaměřuje na měření latence mezi uzly v multi hop topologii. Ačkoliv výsledky vypovídají o přibližně srovnatelném zpoždění u obou protokolových sad pro nezabezpečenou komunikaci, je třeba upozornit, že BitCloud využívá směrovacího protokolu AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector). V případě zabezpečené komunikace se výsledky LWM takřka nezměnily a jejich mírné zvýšení plyne z navýšení velikosti paketu o 4 Byte. Nicméně u BitCloud implementace je nárůst zpoždění pro minimální velikost paketu 18krát a pro maximální velikost dokonce 28krát.

Přestože zpracování paketů na koncových uzlech představuje pro BitCloud znatelnou redukci výkonu, propustnost u LWM zůstala pro nešifrovaný přenos téměř beze změny. Na druhou stranu výpočet šifrování přináší u LWM předpokládaný pokles propustnosti, nicméně u BitCloud implementace se další redukce propustnosti neprojevuje.

3.2.4 Samoopravná schopnost sítě

Tento scénář se snaží vyhodnotit schopnost bezdrátové sensorové sítě autonomně reagovat na náhlý výpadek mezilehlého uzlu. Vzhledem k charakteru přenosového média jde o zcela zásadní vlastnost, neboť jde o velmi dynamické a nespolehlivé prostředí. Pro testování byly využity čtyři sensorové uzly v topologii diamantu, přičemž byla měřena doba potřebná k zotavení sítě – nalezení alternativní cesty k bráně a datová režie – celkový objem vysílaných dat. Z výsledků měření je patrné, že LWM vykazuje ve všech dílčích scénářích kratší čas pro zotavení sítě. Je však zajímavé, že LWM dokáže celý proces nalezení nové cesty dokončit v kratším čase než BitCloud, ale vyžaduje k tomu odeslání většího objemu dat.

3.3 Závěry analýzy

Dle zpracovaných výsledků, je zřejmé, že z pohledu rychlosti a efektivnosti přenosu dat vychází protokolová sada LWM nejlépe. Největšího rozdílu propustnosti dat bylo dosaženo s aktivovaným šifrováním, kde LWM předčilo ZigBee Pro dokonce **13 krát**. Přeposílání paketů se směrováním pak představuje pro ZigBee až **30 krát** větší zpoždění než pro LWM. Ze srovnání aplikační a linkové propustnosti je navíc patrná zvýšené režie zpracování dat na koncových uzlech ZigBee. Výsledky také poukazují na skutečnost, že robustnost ZigBee Pro technologie se negativně podepisuje na výkonových nárocích na hardware. ZigBee Pro však představuje funkční a stabilní řešení s širokou podporou aplikačních profilů a především velmi snadný způsob vytváření aplikací.

Pro výběr vhodné implementace je kladen důraz na energetickou efektivitu a podporu mesh komunikace. Z měření vyplývá, že oba kandidáti nabízí stabilní řešení pro zajištění mesh komunikace, ovšem LWM s menší datovou režií a rychlejším zpracováním na téměř hardwaru. Jelikož LWM předčilo BitCloud ve všech scénářích (*a až c*), rozhodl se autor pro využití LWM. Pro dosažení vyššího zabezpečení komunikace a energeticky efektivnějšího přenosu dat však bude potřeba systém LWM modifikovat. Více je úpravám LWM věnováno v kap. 5.2.1.

4 ENERGETICKY EFEKTIVNÍ HARDWAROVÁ PLATFORMA

Nutnost vývoje vlastní platformy vyvstala převážně z faktu, že jak na komerčním trhu, tak v současné literatuře není dostupná HW platforma, splňující níže uvedené požadavky. Hardwarová platforma je navíc vyvinuta pro těsnou součinnost s později prezentovaným softwarovým řešením, díky čemuž lze platformu využít i k demonstraci splnění cíle *b*. Tedy k ověření energetické efektivity navrženého systému přenosu dat v oblasti, prezentovaného v kap. 4.3.1.

4.1 Požadavky na hardwarovou platformu

Kritickým bodem jsou samotné požadavky na platformu, neboť jde o zcela protichůdné vlastnosti.

- a) Výpočetní výkon: Hlavním požadavkem je dostatečně vysoký výpočetní výkon a zároveň však extrémně nízká energetická spotřeba. Platforma musí umožnit signálové zpracování snímaných dat s takovou rychlostí, aby nedocházelo k jejich ztrátě i při vysoké vzorkovací rychlosti (> 500 Hz).
- b) Fyzické vlastnosti: Mezi další vlastnosti pak patří malá velikost, která by umožnila využití platformy v oblasti WBSN, malá váha a přitom dlouhá výdrž zdroje energie.

- c) Podpora bezdrátových mesh sítí.
- d) Bezpečnost. Platforma musí umožnit zabezpečení bezdrátové komunikace, vyhovující aktuálním doporučením NIST (National Institute of Standards and Technology) [30], s minimálním potenciálem k prolomení bezpečnosti např. odposlechem sběrnic, či vyčtením obsahu pamětí.

U všech uvedených vlastností bude hrát roli energetická efektivita řešení jednotlivých subsystémů. Výběr požadavků odráží současné potřeby trhu i výzkumu (viz str. 5).

4.2 Vlastní návrh hardwarové platformy

V následujících kapitolách je popsán návrh vlastní hardwarové platformy, pojmenované EE-WSN (Energy Efficient Wireless Sensor Node).

4.2.1 Návrh výpočetního subsystému

Kritickým bodem návrhu energeticky efektivní platformy je bezesporu výběr vhodné architektury mikrokontroléru, potažmo konkrétní implementace určitého výrobce. WSN aplikace jsou charakteristické velmi krátkou aktivitou a většinu času (běžně 99 %) zůstávají v úsporných režimech. Právě tam jsou mikrokontroléry současných výkonných platform neefektivní.

Patrně nejdůkladnější analýzu vhodnosti architektury ARMv7-M pro WSN aplikace byla provedena v [20]. Jednoznačným závěrem je obhájení dominantní pozice 16-ti bitové platformy (MCU MSP430) díky výborné energetické efektivitě. Studie potvrzuje vyšší výpočetní výkonu procesorů ARM Cortex-M3 ovšem za cenu přibližně dvojnásobné spotřeby energie celého systému při běhu aplikací pod operačním systémem TinyOS.

Přes výše uvedená negativa a stále kontroverznímu postavení procesorů Cortex-M3 v oblasti WSN se autor této práce rozhodl využít nejvýkonnější architektury z rodiny procesoru Cortex-M a sice Cortex-M4F. Ten je obecně pokládán za příliš výkonný a nevhodný pro WSN aplikace. O ojedinělosti využití Cortex-M4 architektury pro WSN aplikace svědčí i fakt, že v současné literatuře existuje pouze jediný návrh hardwarové platformy s tímto procesorem [18]. Ze srovnání spotřeby energie v úsporných režimech pak vyplývá, že tato platforma dosahuje jednoznačně nejvyšší spotřeby. Autor však pevně věří, že pečlivým návrhem hardwarové platformy, využitím plné funkcionality jádra MCU ve spojení s vhodně řešeným firmwarem dosáhne vytyčených požadavků kap. 4.1 a to s ještě nižšími energetickými požadavky. To by mělo v důsledku přispět ke splnění cílů *d* a *e*.

Procesory Cortex-M4 jsou rozšířenou verzí Cortex-M3, a proto přebírají veškeré jeho vlastnosti a doplňují je o řadu rozšíření. Zmíněná rozšíření Cortex-M4 se týkají především podpory DSP (Digitální Signálový Procesor) algoritmů, a urychlených matematických výpočtů pomocí hardwarové MAC_{math} jednotky (Multiply Accumulate). Cortex-M4

tak kombinuje vlastnosti MCU a výkonných DSP. Speciálním případem je vybraný mikrokontrolér ARM Cortex-M4F, který dále rozšiřuje Cortex-M4 o 32 instrukcí integrací hardwarové FPU jednotky (Floating Point Unit).

4.2.2 Návrh zabezpečení

Pro zajištění utajení a integrity dat je využito algoritmu symetrické kryptografie AES, tedy služeb definovaných standardem IEEE 802.15.4. Konkrétně AES-CCM-32 s režimem pouze 4 B. Nicméně standard IEEE 802.15.4 už nedefinuje proces distribuce klíčů a vzájemné autentizace. Pro zajištění šifrovacích klíčů, popř. vzájemné autentizace se dnes nabízí využití asymetrické kryptografie v podobě např. eliptických křivek nebo pomocí hybridního řešení, popsaného v autorově článku [9]. Přestože procesor ARM Cortex-M4 je dostatečně výpočetně výkonný pro implementaci náročných protokolů asymetrické kryptografie, navržený systém k autentizaci využívá opět symetrické kryptografie, konkrétně algoritmu SHA-256 a sdíleného tajemství. Podrobný popis je však nad rámec této práce.

Uvedený výpočet AES-128 či AES-256 přitom může být na navržené hardwarové platformě realizován bez intervence CPU. Procesor tak může být v době výpočtu v režimu spánku, čímž se dále zvyšuje energetická efektivita navrženého řešení. Dle autorových měření je tímto způsobem dosažena redukce spotřeby energie více než stonásobná [10]. Díky integraci akcelerátoru v MCU je možné využít šifrování dat, aniž by data opustila MCU a je tedy nemožné data v otevřené podobě odposlechnout skrze komunikační sběrnici¹.

Vybraný mikrokontrolér sice neobsahuje kryptograficky zabezpečenou část paměti, nicméně data uložená v interních pamětech (Flash, SRAM) lze uzamknout proti vyčtení. Nulováním slova DLW (Debug Lock Word) je přístup k jádru Cortex-M4 a systémové sběrnici přes paměťový přístupový port (AHB-AP) kontrolován autentizačním modulem AAP (Authentication Access Port). Po této změně není debugger schopen přistupovat k jádru nebo systémovým sběrnicím, ale pouze k AAP registrům. Obnova přístupu přes AHB-AP ovšem způsobí, že obsah SRAM a Flash paměti je smazán.

4.3 Hardwarová architektura vyvinuté platformy

Je třeba zdůraznit, že precizní návrh architektury hardwaru je zcela zásadní. Výsledné výkonové a především energetické vlastnosti platformy jsou totiž přímo závislé na kvalitě návrhu. Je proto běžné, že i při využití stejných komponent lze dosáhnout velmi rozdílných výsledků. Jako příklad uvedme měření doby výpočtu AES (128b) algoritmu [15] na platformách MicaZ a TmoteSKY. Přestože obě platformy využívají k výpočtu shodný hardware, Chipcon CC2420, MicaZ je přibližně 15 krát rychlejší. Do určité míry jde samozřejmě i o kvalitní návrh firmware, o němž je zmíněno v následující kapitole 5.

¹SPI nebo UART

Neméně důležitým aspektem jsou také pořizovací náklady, které jsou obecně pro jádra ARM Cortex-M příznivější, než pro 8/16-ti bitové MCU. Překvapivě je tak EE-WSN s výkonným mikrokontrolérem ARM Cortex-M4F více než čtyřikrát levnější ve srovnání s jedním z nejvyužívanějších MCU v oblasti WSN ATmega128L (využitý v platformách Cricket, BNode, Mica2, Mica2Dot, MicaZ, Medusa MK-2). Konkrétně EFM32WG332F256-QFP64 stojí 3,5€, přičemž ATmega128L-8AU 14,51²€.

4.3.1 Autonomní systém příjmu dat

Hlavní výhodou platformy EE-WSN je především velké množství hardwarových akceleračních a řady autonomních modulů (DMA, MPU), které jsou nejen v oblasti WSN unikátní. Vnitřní struktura sběrnic navíc umožňuje paralelní funkci nezávislých (nadřazených) sběrnic. Mikrokontroléry Cortex-M4 jsou vybaveny několika paralelními sběrnici, tvořícími matici AHB (Advanced High-performance Bus) sběrnic, které dovolují MCU využívat několik nadřazených sběrnic. A právě této vlastnosti je využito k návrhu nového energeticky efektivního přístupu pro přenos dat v bezdrátových senzorových sítích. Jde o softwarové řešení, které se opírá o hardwarové možnosti navržené platformy EE-WSN.

Systém sběrnic mikrokontroléru EFM32WG332 využívá systému AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) a tvoří vícevrstvou matici AHB sběrnic, které umožňují komunikaci nadřazených sběrnic s jejich protějšky (AHB slave). Výhodou je možný simultánní přístup k více podřízeným (AHB slave) modulům současně. Periferie jsou pak s AHB sběrnice propojeny přes AHB/ APB (Advanced Peripheral Bus) můstek.

Maticová struktura AHB sběrnice platformy EE-WSN umožňuje při vhodném seskupení paměťových objektů využít paralelního přenosu dat s pomocí DMA modulu ve funkci mastera sběrnice. Je využito vhodného uspořádání periférií s bloky SRAM paměti tak, aby mohla být data mezi dvěma paměťovými místy přenášet bez intervence CPU. Konkrétně jde o nezávislý přenos dat mezi SRAM pamětí a RF transceiverem.

Navržený systém dále prohlubuje myšlenku využití autonomních periférií ve smyslu nezávislého řízení režimů RF transceiveru a to v přesně definovaných intervalech pomocí pomaluběžného časovače. Tyto intervaly samozřejmě vychází z využitého MAC protokolu, přičemž je předpokladem využití např. LPL či LPP technik. Při využití přesného pomaluběžného krystalu lze autonomní systém příjmu dat s výhodou využít i pro synchronní MAC protokoly.

Celý proces je navíc schopen pracovat naprosto samostatně, přičemž stav RF transceiveru je řízen taktéž autonomním způsobem, tedy bez generování přerušování, probuzení CPU a následné obsluhy přerušování. Tím se výrazně šetří energie a zároveň je docíleno vysoké časové přesnosti. Popsaný způsob řešení je závislý na systému PRS (Peripheral Reflex System), který umožňuje nezávislou vzájemnou komunikaci periférií až ve dvanácti kanálech. Periferie jsou rozděleny na tzv. producenty a konzumenty. Poznamenejme, že PRS

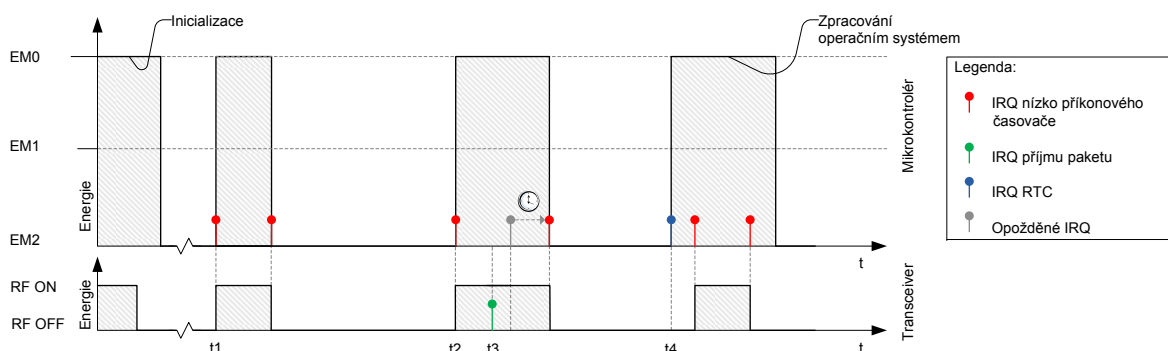
²Cena platná při odběru 10 ks, 13.7.2014 u distributora Mouser Electronics, www.mouser.com.

komunikuje přes APB sběrnici.

I přes extrémně rychlé vyvolání obsluhy přerušení u mikrokontrolerů Cortex-M4, ve 12-ti hodinových CPU cyklech, je možné, že přerušení pro řízení RF transceiveru bude maskováno přerušením s vyšší prioritou a tudíž dojde k časovému posunu okna pro příjem dat od okolních uzlů. Takovéto chování nutně vedle k selhání deterministických procesů MAC protokolu a desynchronizaci celé sítě. Autonomní systém příjmu dat však využívá systému sběrnic dovolující nezávislé řízení RF transceiveru s rychlostí odezvy dvou hodinových cyklů a to i v případě, že CPU vykonává nemaskovatelné přerušení.

4.3.2 Popis konvenčního způsobu

Než bude přistoupeno k detailnímu popisu autonomního systému příjmu dat, bude na obr. 4.1 pro srovnání popsán průběh současného (konvenčního) způsobu přenosu dat na uzlu WSN. Horní osa vyjadřuje spotřebu energie MCU a y je rozdělena na tři energetické hladiny $EM0 - EM2$. Hladina $EM0$ značí aktivní režim CPU a všechny periferie mohou být aktivní. V režimu $EM1$ se nachází CPU v režimu spánku, paměťový systém je aktivní a veškeré periferie mohou být taktéž. $EM2$ pak značí režim spánku, kde je mimo CPU deaktivován i vysoko rychlostní zdroj taktu (HFXO/HFRCO) a veškeré na něm závislé periferie. Nízkofrekvenční oscilátor (LFXO/LFRCO) však zůstává aktivní, a proto je RTC a nízko příkonový časovač stále dostupný. Hladiny $EM0 - EM2$ vyjadřují jen stav systému a nikoliv spotřebu. Spodní osa y pak vyjadřuje spotřebu energie RF transceiveru, přičemž stav $RF ON$ značí aktivní režim transceiveru a $RF OFF$ jeho režim spánku.



Obr. 4.1: Časový průběh konvenčního přenosu dat.

Následuje popis jednotlivých akcí:

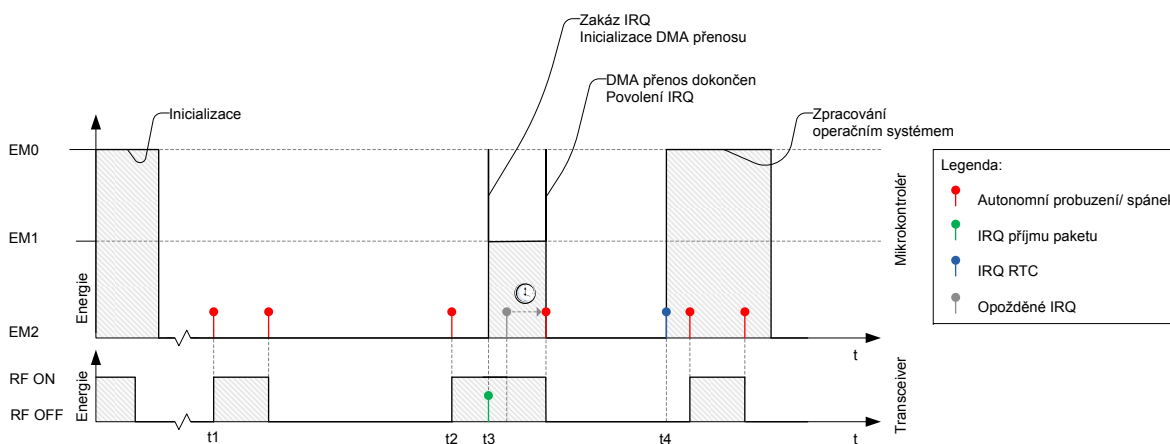
- 1) Celý průběh začíná prvotní inicializací, při které dojde mj. ke konfiguraci protokolové sady a konfiguraci RF transceiveru, po které přechází radiová část do režimu spánku a nakonec se uspí i MCU ($EM2$).
- 2) V čase t_1 dochází k vypršení časovače a generaci přerušení, které probudí CPU ($EM0$). Obsluha přerušení probudí RF transceiver a celý systém čeká čas δ , zda nedojde k příjmu zprávy pro MAC adresu RF transceiveru. Po vypršení druhého

komparátoru časovače nastává přerušení, po kterém dojde k deaktivaci RF transceiveru (přechod od režimu spánku) a MCU přechází do režimu spánku ($EM2$). Tento proces se neustále opakuje se střídou definovanou MAC protokolem.

- 3) V čase t_2 se opět na základě vypršení časovače probudí CPU ($EM0$) a RF transceiver. Ovšem v čase t_3 přichází z RF transceiveru přerušení informující o příchozí zprávě. CPU zahájí přenos zprávy z vyrovnávací paměti RF transceiveru do RAM paměti MCU, přičemž přerušení od časovače je po dobu přenosu maskováno. Po přenosu zprávy dochází k vyvolání opožděné obsluhy přerušení, které uvede radiovou část i MCU do režimu spánku ($EM2$).
- 4) V čase t_3 je vyvoláno přerušení systémového časovače, které probudí CPU ($EM0$) a dochází ke zpracování úloh operačního systému. Průběh zpracování je přerušeno přerušením, jehož postup je shodný s druhým bodem. Po zpracování všech systémových úloh přechází MCU do režimu spánku ($EM2$).

4.3.3 Demonstrace autonomního systému příjmu dat

Popis autonomního systému příjmu dat je předveden na stejném příkladu funkce WSN uzlu, jako v předchozí kapitole 4.3.2 a pro popis průběhu z obr. 4.2 tedy platí stejné podmínky pro spotřebu energie.



Obr. 4.2: Časový průběh autonomního příjmu dat.

Jednotlivé kroky jsou následující:

- 1) Průběh inicializace je shodný, a proto po konfiguraci protokolové sady a konfiguraci RF transceiveru přechází radiová část i MCU do režimu spánku ($EM2$).
- 2) V tomto bodě nastává zásadní rozdíl ve zpracování. V čase t_1 sice také dochází k vypršení časovače, avšak díky vnitřní struktuře sběrnic nedochází ke generování přerušení, ale je generován impuls do jednoho z kanálů systému PRS. Ten zajistí probuzení RF transceiveru, přičemž po vypršení druhého komparátoru časovače je

generován další impuls, který zajistí přechod RF transceiveru do režimu spánku. Po celou dobu příjmu zpráv je CPU v režimu spánku (*EM2*).

- 3) V čase t_2 se opakuje obdobná posloupnost, jako v předchozím bodu. Po příjmu zprávy a následném generování přerušeni RF transceiverem, v čase t_3 , je iniciován přenos zprávy z vyrovnávací paměti RF transceiveru do RAM paměti MCU pomocí DMA kontroléru (*EM1*). Zpráva je tak kopírována do paměti MCU bez intervence CPU. Po dobu kopírování jsou potlačena další přerušeni, přičemž po dokončení přenosu zprávy jsou přerušeni obnovena. Opožděná obsluha přerušeni pak uvede radiovou část i MCU do režimu spánku (*EM2*).
- 4) Zpracování úloh operačního systému pak nastává opět na základě přerušeni systémového časovače (t_4).

Je zřejmé, že navržený systém má potenciál pro další razantní snížení spotřeby energie pro příjem dat v oblasti bezdrátových sensorových sítí. Srovnání výsledků reálného měření spotřeby tohoto a konvenčního systému je dostupné v kapitole 6.4.

5 RTOS S PODPOROU MESH KOMUNIKACE A ŘÍZENÍM SPOTŘEBY ENERGIE

Pro podporu přímého zpracování dat na sensorických uzlech je potřeba systém řízení, resp. operační systém, jenž by zohlednil přísné energetické nároky a podpořil svou funkcí energetickou efektivitu celého systému. RTOS ze své podstaty zajišťuje strukturovaný kód aplikace, jež je dále podpořen přes RTOS API. Uplatněním struktury RTOS lze využít objektově orientovaného přístupu a přitom stále vyžít prostého jazyka *C*. Společně s více vláknovou podporou tak umožňují RTOS systémy lepší správu a aktualizaci jednotlivých komponent, opětovné využití částí kódu a vylepšené testování. Na druhou stranu RTOS vyžadují zvýšené paměťové nároky, které ale pro platformu EE-WSN nepředstavují žádné omezení.

Přestože kap. 1.1 informuje o dostupných operačních systémech pro WSN, žádný z nich nepodporuje architekturu ARM Cortex-M ani RF transceiver AT86RF233. Mimo to, žádný z dostupných operačních systémů pro WSN nenabízí správu řízení spotřeby ani podporu energetických režimů ARM Cortex-M procesorů. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k vývoji vlastní implementace operačního systému pro WSN.

5.1 Modifikované jádro

Pro implementaci je využito FreeRTOS jádra modifikovaného Silicon Labs [34] s podporou energetických režimů mikrokontroléru platformy EE-WSN. Jádro je postavené na implementaci `vPortSuppressTicksAndSleep()` a jako zdroj času lze pro tickless mód využít místo systémových hodin RTC modul, který může být řízen RC oscilátorem. Tím je dosaženo extrémně nízké spotřeby a navíc je možné ponechat procesor i periferie v režimu spánku (*EM2*, viz kap. 4.3.2), aniž by systém ztratil pojem o čase. Klíčový je výpočet `ulReloadValue`, jež slouží jako vstupní parametr funkce `RTC_CompareSet`. Ten přímo ovlivňuje délku spánku MCU a je limitován maximální hodnotou definovanou makrem. Dojde-li v době spánku k vyvolání přerušení, přepočte se pomocí hodnoty RTC (`ulRemainingCounter`) aktuální čas systému.

5.2 Komunikační protokolová sada

Ačkoliv FreeRTOS nabízí IP komunikaci pomocí μ IP či lwIP sady, díky absenci nižších vrstev tohoto nelze využít ke komunikaci mezi uzly WSN. Výběr vhodné komunikační sady se zde opírá o výsledky kap. 3, přičemž detailní návrh vhodné komunikační architektury je popsán v autorových pracích [12, 16, 26]. Stěžejní je podpora mesh komunikace, malé nároky na výpočetní a paměťový systém a efektivnost datového přenosu. Pro adaptaci tak vychází nejlépe protokolová sada LWM. Ta ovšem není ve stávající podobě pro vytyčené cíle příliš vhodná, a proto byla autorem modifikována.

5.2.1 Modifikace komunikační protokolové sady

Následuje výčet inovativních úprav. V rámci přehlednosti bude modifikovaná verze LWM označována jako EE-LWM.

System příjmu dat

Nejvýznamnější modifikací protokolové sady LWM je kompletní změna systému příjmu dat. V současné verzi 1.2.1 je prováděna opakovaná kontrola příchozích zpráv pomocí obslužné rutiny `PHY_TaskHandler()`, která je jednou ze tří funkcí, volaných v rámci `SYS_TaskHandler()`. Úlohou `PHY_TaskHandler()` je mj. vyčtení stavového registru RF transceiveru a kontrola dokončeného příjmu zprávy. Jednotlivé obslužné rutiny `SYS_TaskHandler()` se pak dále větví. Jelikož jsou jednotlivé obslužné rutiny volány v rámci nekonečné smyčky, nutno dodat, že volání `PHY_TaskHandler()` není nikterak deterministické a funkce je volána až po obsluze všech následujících, respektive předcházejících funkcí. Když uvážíme, že samotná rutina `SYS_TaskHandler()` je také jedna z několika rutin nadřazené super smyčky, v níž je i např. `APP_TaskHandler()`, může se

stát, že přijatá zpráva ve vyrovnávací paměti RF transceiveru bude přepsána nově příchozí zprávou, aniž by byly vyšší vrstvy informovány.

Modifikovaná verze EE-LWM využívá pro zpracování příchozích zpráv systému přerušeni. Jakmile RF transceiver indikuje dokončení procesu přijetí zprávy, vygeneruje přerušeni, které probudí MCU z režimu spánku a v rámci obsluhy přerušeni `IRQHandler()` jsou data vyčtena z RF transceiveru do RAM paměti MCU. Po probuzení jádra EE-LWM pak dojde k naplnění struktury `PHY_DataInd_t` a běh protokolové sady pokračuje stejně, jako v původní verzi LWM.

Systém autonomního příjmu dat

Verze zahrnující systém autonomního příjmu dat z kap.4.3.1 pak k výše popsanému přenosu dat z RF transceiveru využívá DMA. Implementace byla doplněna o dvojici přerušeni volaných nízkou prioritou časovačem. V této souvislosti musela být věnována zvýšená pozornost prioritám přerušeni v rámci NVIC kontroléru EE-WSN.

Zabezpečení komunikace

Původní verze LWM umožňuje využít k šifrování softwarovou implementaci algoritmu XTEA, nebo, umožňuje-li to RF transceiver, hardwarové podpory AES. Jelikož navržená platforma EE-WSN obsahuje hardwarový AES akcelerátor, jenž je integrován do MCU, lze zamezit odposlechu hesla či dat přes komunikační sběrnici a navíc může být procesor po dobu výpočtu v režimu spánku. Proto byl šifrovací mechanismus LWM doplněn o podporu integrovaného akcelerátoru. Společně s rychlostí výpočtu v 54 hodinových cyklech jde o významné zvýšení energetické efektivity.

5.3 Implementace jádra a protokolové sady

Kritickým bodem je návrh architektury operačního systému, resp. způsob implementace komunikační protokolové sady. Hledání optimální varianty z pohledu energetické náročnosti bylo doprovázeno sérií reálných měření výkonu, počtu hodinových cyklů procesoru, pro periodické zpracování příchozích a odchozích zpráv, společně se zpracováním snímaných dat pomocí FFT. Více je ke způsobu a obsahu měření věnováno v kap. 7.

Optimální variantou je, dle provedených měření, rozdělení operačního systému do pěti následujících vláken: Řídící vlákno, `Phy_TaskHandler`, `Sec_TaskHandler`, `Nwk_TaskHandler`, `App_TaskHandler`. Přičemž v závislosti na potřebách aplikace může být systém řízení času ponechán na interní implementaci FreeRTOS časovače, nebo lze využít i hardwarové podpory EE-WSN. Řídící vlákno využívá struktury ukazatelů funkcí obslužných rutin a mutex kontejneru. Úlohy jsou tedy zpracovány až na základě získání mutexu. Vlákno `Phy_TaskHandler` obsluhuje RF transceiver, `Sec_TaskHandler` řeší šifrování pomocí integrovaného AES modulu, `Nwk_TaskHandler` má na starost směrování

a přípravu dat k odeslání. Vlákno `App_TaskHandler` je pak určeno pro samotnou uživatelskou aplikaci.

Velmi efektivním je pak způsob implementace vyrovnávací paměti pro příchozí data. Ten pro potřeby FIFO fronty využívá sofistikované struktury systému poštovních schránek (mailbox system), podporované CMSIS-RTOS. Alokovaná paměť je rozdělena do jednotlivých poštovních slotů, odpovídajících struktuře přijímaných zpráv. Po umístění příchozích dat do struktury je poštovní box uzamčen až do doby jeho vyčtení zpracovávajícím procesem. Ten vyčkává až na pokyn v podobě předání signálu a periodicky tak neblokuje čas procesoru. Navíc se tímto způsobem eliminují případy, kdy se proces spustí a data, např. vlivem přerušení s vyšší prioritou, ještě nejsou k dispozici.

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ HARDWAROVÉ PLATFORMY EE-WSN

V této kapitole jsou k dispozici výsledky provedených měření výkonu a energetické spotřeby na platformě EE-WSN za reálných podmínek. Kapitola 6.1 je věnována zejména ověření splnění bodu *d* z vytyčených cílů této práce. Jde tedy o ověření energetické náročnosti výpočtů na vyvinuté platformě EE-WSN. Kapitola 6.3 se pak věnuje naplnění posledního z cílů, bodu *e*, a tady důkazu že sensorové uzly mohou být výpočetně nezávislé a dosáhnout nižší energetické náročnosti, než s pomocí distribuovaných výpočtů. Zejména pro bod *d* jsou dále důležité i energetické vlastnosti platformy v úsporných režimech, kterým je věnována kap 6.2. Poslední část, kap 6.4, prezentuje výsledky reálných měření spotřeby energie pro navržený systém autonomního příjmu, sloužící jako důkaz pro splnění cíle *b*, této práce.

6.1 Ověření výkonu

Přestože oba procesory ARM Cortex-M4 i Cortex-M3 nabízí srovnatelný výkon 1,25 DMIPS/ MHz, výsledky měření dokazují výrazně lepší podporu matematických operací jádra Cortex-M4. Pro demonstraci výkonu a srovnání energetické efektivity vezměme například výpočet rychlé Fourierovy transformace, respektive přímé diskrétní Fourierovy transformace (DFT, Discrete Fourier Transform) posloupnosti délky N .

V této kapitole jsou k dispozici výsledky výkonu prototypových jednotek se zmíněnými procesory ARM Cortex-M4F (EFM32WG990) a ARM Cortex-M3 (EFM32G890) a zástupce 8/16-ti bitových platform Iris, obsahující MCU Atmel ATmega 1281. Pro výpočty FFT na procesorech ARM Cortex-M4F a ARM Cortex-M3 bylo využito knihovny CMSIS-DSP.

Srovnání spotřeby pro různé parametry FFT (počet bodů) je k dispozici v tabulce 6.1. Prezentované výsledky nejsou zcela překvapivé, protože ATmega 1281 není výkonově orientovaným procesorem a řada instrukcí je v případě ARM Cortex-M procesorů vykonána v jediném cyklu. Až dvojnásobný rozdíl ve výkonu mezi ARM Cortex-M4F a ARM Cortex-M3 je způsoben sadou SIMD instrukcí, které, jak již bylo zmíněno, umožňují ARM Cortex-M4 paralelní zpracování dvojice 16-ti bitových dat. Díky lepší energetické efektivitě jádra EFM32G890, na měřené frekvenci 16 MHz, však rozdíl ve spotřebě energie není natolik rozdílný.

Tab. 6.1: Srovnání spotřeby energie pro různé parametry FFT.

FFT	ARM Cortex-M4 ^a Energie [μ J]	ARM Cortex-M3 ^a Energie [μ J]	ATmega 1281 ^b Energie [μ J]
N = 64	2,96	5,34	357
N = 128	6,10	11,01	767
N = 256	12,81	23,11	1670
N = 512	27,68	49,92	3591

^a HFXO = 16 MHz, 3 V. Kompilováno pomocí GNU ARM v4.7.3.

^b HFXO = 16 MHz, 5 V. Kompilováno pomocí AVR/GNU GCC v4.3.3.

Jak bylo možné předpokládat, procesor ARM Cortex-M4F nabízí z měřených architektur nejvyšší výpočetní výkon a v rámci provedených výpočtů i nejvyšší energetickou efektivitu. Ve srovnání s ATmega 1281 dosahuje ARM Cortex-M4F až **130 krát** nižší spotřeby energie pro výpočet 256-ti bodové FFT. Vzhledem k rychlosti výpočtů tak zůstává kritickým parametrem spotřeba energie v režimu spánku.

6.2 Spotřeba energie v režimu spánku

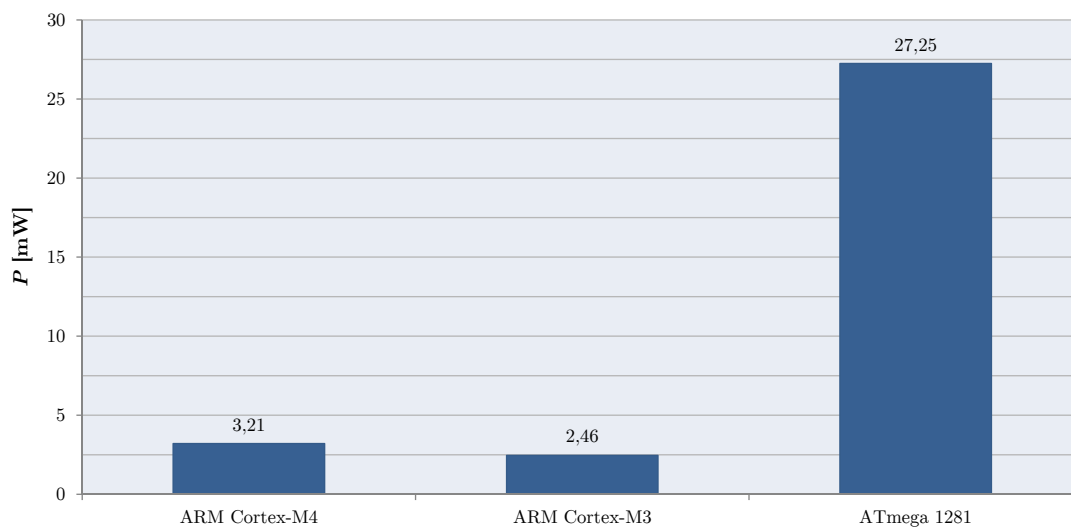
Z principu fungování bezdrátových sensorových sítí plyne důležitost minimální spotřeby uzlů v úsporných módech, neboť zde mohou, v závislosti na potřebách aplikace, setrvat více jak 99 % provozní doby uzlu[36]. Časový průběh aplikací se zpracováním signálů, či jinou výpočetně náročnou operací, je však specifický. Jelikož výpočty na uzlech WSN trvají i několik sekund¹, sensorický uzel by musel trávit před zpracováním další dávky dat i desítky minut v úsporném režimu. To ale aplikace často nedovolují, protože vyrovnávací paměť uzlu pro snímané hodnoty nedokáže pojmout velké množství dat. Navýšení jak externí, tak i interní paměti však nutně vede ke zvýšeným energetickým nárokům. Proto musí výpočty probíhat buď nepřetržitě, nebo jen s velmi malou střídou. Je-li ale bezdrátový uzel dostatečně výkonný, může přes vysokou výpočetní zátěž využívat režimů spánku.

Elektrický příkon pro režimy spánku tří srovnávaných architektur z kap. 6.1 je uveden na obr. 6.1 a obr. 6.2. *Úsporný mód A* představuje *Sleep* mód ARM Cortex-M3/4

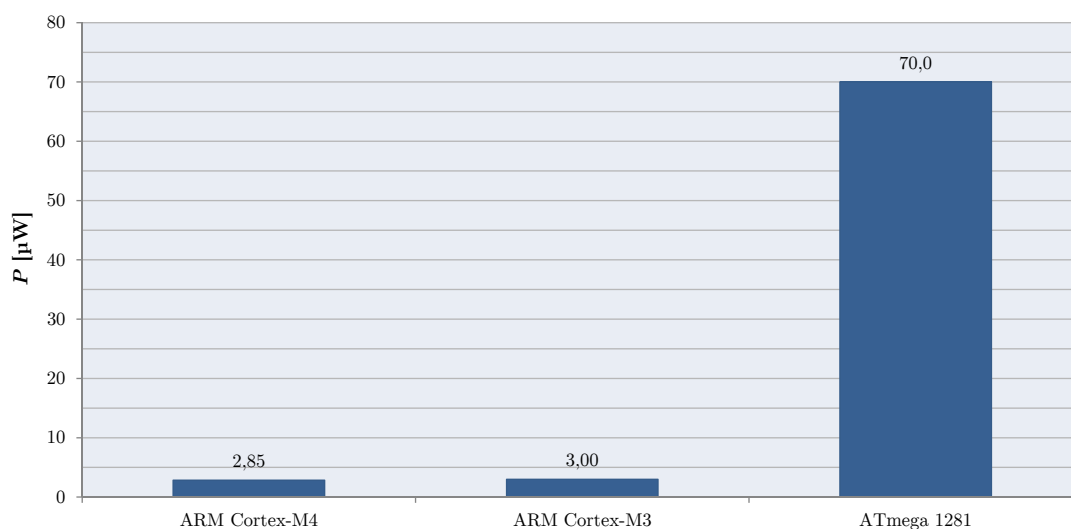
¹Např. výpočet privátního klíče RSA-2048 na ATmega128 (7,37 MHz) trvá 83,26 sekund [33].

a přibližně odpovídá *Idle* módu ATmega 1281, kde je procesor deaktivován, ale paměťový systém a veškeré periferie jsou dostupné. *Idle* mód u ATmega 1281 však zahrnuje i deaktivaci Flash paměti. Tohoto režimu EE-WSN využívá při přenosu dat mezi MCU a RF transceiverem.

Úsporný režim B pak reprezentuje *Deep Sleep* mód ARM Cortex-M3/4 a ekvivalentní *ADCNRM* mód ATmega 1281. Pro *ADCNRM* však chybí bližší specifikace, a proto je v tabulce uveden nižší režim – *Standby* mód. V *Deep Sleep* režimu může EE-WSN díky stále aktivnímu časovači setrvat přesně definovaný čas a využívá jej jako režim spánku.



Obr. 6.1: Srovnání el. příkonu pro úsporný mód A.



Obr. 6.2: Srovnání el. příkonu pro úsporný mód B.

Z uvedených výsledků jednoznačně vyplývá, že prototypové jednotky EE-WSN, ať už ve variantě ARM Cortex-M3 či ARM Cortex-M4, dokáží v režimech spánku směle

konkurovat „ultra low-power“ mikrokontrolerům. V rámci *úsporného módu A* nabízí EE-WSN jednotky až **11 krát** nižší příkon a pro variantu *úsporného módu B* dokonce **24 krát** nižší příkon oproti představiteli 8-bitových řešení – jednotce Iris. Těmito výsledky mj. popíráme závěry rozsáhlé studie [20], která jako zásadní a nepřekonanou výhodu nízko příkonových 8/16-ti bitových MCU, oproti ARM Cortex M3, uvádí právě nízký příkon v režimu spánku. Společně s výsledky předchozí kap. 6.1 lze potvrdit, že sensorové uzly nutně nemusí disponovat výpočetně a paměťově omezenými mikrokontroléry, aby dosáhly nízké spotřeby energie, a to v aktivním i úsporném režimu. Totiž, v obou zmíněných režimech platforma EE-WSN dosahuje výrazně lepších výsledků, než současné sensorové uzly. Přitom nabízí dostatečný výkon pro zpracování např. FFT, FIR, IIR algoritmů s podporou DSP instrukcí a FPU jednotky, podporující výpočty nad čísly s plovoucí řádovou čárkou.

6.3 Přímé zpracování dat na uzlu WSN

V této části jsou srovnány techniky distribuovaných výpočtů a přímým přístupem, blíže specifikovaným v kapitole 6.1. Pro srovnání je tedy opět využito FFT algoritmů, konkrétně algoritmu UPAD, jehož vyčíslení náročnosti, pro několik různých případů, je uvedeno v tab. 6.2 a tab. 6.3.

Tab. 6.2: Náročnost algoritmu UPAD FFT, jeden hop.

FFT	počet přenesených paketů	počet sčítání	počet součinů
N = 64	384	384	192
N = 128	896	896	448
N = 256	2048	2048	1024
N = 512	4608	4608	2304

Tab. 6.3: Náročnost algoritmu UPAD FFT, multi-hop.

FFT	počet přenesených paketů	počet sčítání	počet součinů
N = 64	1344	1344	672
N = 128	5419	5419	2709
N = 256	21760	21760	10880
N = 512	87211	87211	43605

$h=3$

Aby byly ve vyjádření spotřeby energie algoritmu UPAD FFT omezeny režijní ztráty, lze vycházet z energetické náročnosti jednotlivých operací a celkovou spotřebu získat jejich součtem:

$$E = E_{prenosu} + E_{scitani} + E_{soucinu}. \quad (6.1)$$

Spotřeba energie těchto operací je samozřejmě platformě závislá a pro srovnání je využito reálného měření operací na vyvinuté platformě EE-WSN. Výsledné hodnoty celkové spotřeby energie jsou pak k dispozici v tabulce 6.4. Poznamenejme, že jde stále o teoretické hodnoty, protože hodnoty tab. 6.2 a tab. 6.3 nezohledňují saturaci přenosového kanálu, opakovaný přenos zpráv při interferenci či zarušení kanálu.

S využitím výpočetních možností platformy EE-WSN, lze snadno dokázat její energetickou efektivitu při počítání všech bodů, resp. sekcí, FFT na jediném uzlu (viz tab. 6.1). V kontrastu s distribuovanými algoritmy výpočtu FFT vykazuje přímé zpracování pomocí knihovny CMSIS-DSP na platformě EE-WSN v průměru **6236 krát** nižší spotřebu energie pro případ přímé komunikace a **64047 krát** pro případ multi-hop sítě s hloubkou $h=3$. Zdůrazněme, že jde o srovnání dvou rozdílných přístupů zpracování signálů na uzlech bezdrátové sensorové sítě a to na stejné platformě a za rovnocenných podmínek.

Tab. 6.4: Spotřeba energie pro výpočet FFT na uzlu EE-WSN.

FFT	Přímé zpracování Spotřeba energie [μ J]	UPAD FFT (jeden hop) Spotřeba energie [μ J]	UPAD FFT (multi-hop, $h=3$) Spotřeba energie [μ J]
N = 64	2,96	15889,35	55612,72
N = 128	6,10	37075,15	224216,36
N = 256	12,81	84743,19	900396,41
N = 512	27,68	190672,18	3608647,58

* MCLK = 16 MHz, 3,0V

Uvedenými výsledky tak popíráme závěry [1, 3–5], které tvrdí, že distribuované výpočty poskytují flexibilitu, spolehlivost, ale především zvýšení energetické efektivity. Tímto také potvrzujeme hypotézu H_1 ve stanovených cílech práce.

6.4 Autonomní systém příjmu dat

Pro posouzení energetické efektivity navrženého systému autonomního příjmu dat z kap. 4.3.1 bylo využito modifikované protokolové sady LWM, tedy EE-LWM, doplněné o implementaci zmíněného systému z kap. 5.2.1. Tato kapitola tak experimentálně ověřuje navržený systém pro splnění cíle b , této práce.

Tento scénář demonstruje na platformě EE-WSN periodicky přijímání zpráv o celkové velikosti 127 Byte. V prvním případě jde o konvenční způsob popsáný v kap. 4.3.2. a druhý způsob zohledňuje implementaci autonomního systému. V obou případech je měřena mikrokontrolérem spotřebovaná energie pomocí technologie Advanced Energy Monitor. Energie spotřebovaná RF transceiverem je v obou případech shodná. Procesor byl taktován na 48 MHz a napájecí napětí bylo 3,3 V.

Průměrná spotřeba energie pro konvenční příjem dat dosahuje 349,49 μ J, přičemž průměrná spotřeba energie s využitím autonomního systému přenosu dat odpovídá 41,82 μ J. Navržený systém tedy vykazuje ve srovnání s běžným způsobem příjmu **8,36 krát** nižší

spotřebu energie a dokáže tak **ušetřit přes 88 %** energie. V důsledku se jedná o výrazné zvýšení energetické efektivity a tedy o nalezení energeticky efektivního přístupu pro přenos dat ve WSN, čímž došlo ke splnění cíle *b*, této práce.

7 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ SYSTÉMU EE-RTOS

Za účelem demonstrace a ověření vlastností implementovaného operačního systému EE-RTOS byla vytvořena aplikace, jenž by měla představovat zvýšené zatížení. Foto tranzistorem je s frekvencí 1 kHz snímána intenzita okolního osvětlení a každých 0,5 sekund je nad získanými vzorky vypočítána 512-ti bodová FFT, společně s algoritmem pro odhad frekvence s největší energií ve spektru (mimo DC složky) pomocí Sinc interpolace. Tato informace je pak odesílána sousednímu uzlu. Samozřejmě v praxi by bylo vhodné výsledky agregovat do větších celků, nicméně v tomto případě jde o modelový příklad, a proto i velikost odesílané zprávy je vyplněna do 127 Byte. Jelikož aplikace využívá autonomního systému příjmu dat, RF transceiver je periodicky přepínán do režimu příjmu.

Aby bylo možné dosažené výsledky srovnat, byla tato aplikace připravena i v modifikované verzi LWM, tedy EE-LWM. Lze předpokládat, že aplikace bez operačního systému reálného času (EE-LWM) bude vykazovat nižší výpočetní náročnost, neboť je oproštěna od režie RTOS. Ta se projeví např. s každým přerušáním pro získání nových dat z foto tranzistoru, tedy s frekvencí 1kHz. Nutno ale dodat, že aplikace (pod EE-LWM) je striktně jednoúčelová a nedisponuje řadou výhod RTOS systémů (viz kap. 5).

Spotřeba energie, získána pomocí technologie Advanced Energy Monitor, pro jeden běh programu (vzorkování dat a výpočet FFT) 2346 J pro EE-LWM a 4122 J pro EE-RTOS potvrzuje zvýšenou režii běhu RTOS. Nicméně s ohledem na extrémní charakter aplikace a nabízené vlastnosti jde o výborný výsledek. Je nutné upozornit, že ani v jednom případě nešlo o optimalizovaný program a šlo o záměrné testování limitních podmínek. Důležitým závěrem je poznatek, že přestože taktovací frekvence procesoru dosahovala jen poloviny jeho maxima, obě implementace potvrdily bezproblémový chod. Rychlost zpracování a odeslání dat tedy není u obou implementace limitující a dokáží v mezičase využívat režimů spánku.

8 DISKUSE

Jelikož se tato práce zabývá zpracováním dat na uzlech bezdrátové sensorové sítě, bylo nutné pro ověření hypotéz a výsledků zajistit hardwarové i softwarové prostředky. Nejprve byla analyzována dostupná softwarová řešení v podobě operačních systémů Contiki OS, TinyOS a ZigBee Pro, z nichž z pohledu energetické efektivity nejlépe vyhovovala komunikační sada ZigBee Pro [28]. Výsledky reálných měření přinesly několik nových poznatků o chování tohoto systému v praxi. Široký potenciál systému LWM byl identifikován ihned po vydání jeho první beta verze, kdy započalo jeho testování. To vyústilo ve srovnávací analýzu těchto systémů, tedy konkrétně implementace ZigBee Pro – BitCloud a LWM.

Již na počátku analýzy vyšel z pohledu režijní zátěže jako optimální řešení právě LWM. Nízká datová režie se nutně projevila ve vysoké datové propustnosti, kde ve všech testovaných scénářích LWM poráží BitCloud. Velmi odlehčená implementace mesh komunikace se podepsala na rychlé odezvě systému i na 8-bitových MCU, nízkém zpoždění vlivem směrování a nízkých výpočetních a paměťových nárocích. V rámci testování samoopravné schopnosti sítě sice LWM vykazuje kratší čas zotavení, nicméně datová režie pro nalezení alternativní cesty je pro všechny případy vyšší. V souvislosti s hledáním cesty k cíli pomocí broadcast zpráv lze identifikovat několik slabých míst implementace LWM, které lze optimalizovat např. pomocí časovačů (viz [13]). Nicméně pro další vývoj představuje LWM ideální cestu.

Jak již bylo řečeno, nutnost vývoje vlastní hardwarové platformy vyvstala z faktu, že jak na komerčním trhu, tak v současné literatuře není dostupná platforma, splňující požadavky kap. 4.1. Bylo přistoupeno ke kontroverznímu řešení v podobě využití procesoru ARM Cortex-M4F. Ten představuje nejvýkonnější procesor ARM Cortex procesorů a kombinuje vlastnosti MCU a výkonných DSP. Disponuje celou řadou hardwarových modulů, včetně DMA, MPU a FPU jednotky, které ve finále umožňují vykonávat např. náročné algoritmy signálového zpracování i nad daty s plovoucí řádovou čárkou.

Experimentální ověření výkonu z kap. 6.1 tak není ničím překvapivým, neboť pro tyto náročné operace byl procesor navržen. Druhou stranou mince jsou však energetické nároky, které v případě jediné známé platformy s ARM Cortex-M4F [18] představují nejhorší energetické vlastnosti režimu spánku ze všech uvedených platform. Stejně tak je tomu i s jinými implementacemi ARM Cortex-M4, např. STM32F4 [35], kde je příkon v režimu spánku až 490 krát vyšší, než u navržené platformy EE-WSN. Tím se dostáváme k hardwarové architektuře EE-WSN, která byla navržena pro těsnou součinnost se softwarem a tvoří tak neoddělitelný celek. Řeč je především o vhodném paměťovém uspořádání vzhledem k využívaným perifériím a využití několikvrstvé maticové sběrnice AHB. Tato sběrniceová struktura pak společně se systémem PRS umožňuje mj. realizaci navrženého autonomního systému příjmu dat (viz. kap. 4.3.1). Důležitost vhodného návrhu hardwarové architektury podtrhují např. výsledky [15], z kterých je patrné, že při využití stejných komponent je možné dosáhnout i patnáctinásobně rozdílných rychlostí zpracování dat.

Navržená platforma EE-WSN je unikátní především v poskytovaném výpočetním výkonu a možnosti využití autonomních periférií. Přesto však dosahuje velmi nízké spotřeby i v režimu spánku, konkrétně 24 krát méně než platforma Iris.

Návrh systému autonomního příjmu dat patří ke stěžejním částem celé práce, na němž stojí splnění cíle *b* a v širším smyslu i *d*. Přestože práce hovoří o systému příjmu dat, obdobný mechanismus je využíván i k odeslání dat. Nicméně vzhledem k tomu, že odesílání dat většinou iniciuje samotný operační systém, není potřeba využívat autonomní systém v plném rozsahu, ale pouze k přesunu dat do vyrovnávací paměti RF transceiveru pomocí DMA. Reálná měření na platformě EE-WSN ukázala pro příjem stejné zprávy 8,36 krát nižší spotřebu energie pomocí autonomního příjmu oproti běžnému způsobu. Tímto způsobem lze tedy ušetřit až 88% el. energie. Dodejme, že realizace tohoto systému je díky jedinečné architektuře možná pouze na platformě EE-WSN.

Jako další podporu přímého zpracování dat na sensorických uzlech byl prezentován systém EE-RTOS a modifikovaná verze LWM, EE-LWM. První ze jmenovaných dovoluje plně využívat výhod RTOS, z kterých mohou těžit jak aplikace, v podobě přesné časové synchronizace, tak samotní aplikační inženýři, kteří se nyní nemusí zabývat nižšími vrstvami systému a mohou se plně soustředit na vývoj specifické aplikace. Ta navíc může být díky systému EE-RTOS jednou z několika simultánně běžících aplikací na sensorovém uzlu, ovšem za cenu mírně zvýšené režie. Systém EE-LWM pak představuje velmi lehkou implementaci mesh protokolu s podporou nízko energetických vlastností platformy EE-WSN. Nejvýznamnějším rozdílem obou implementací je především nedeterminičnost časových událostí v případě EE-LWM, což může mít v určitých aplikacích (např. ve zdravotnictví) fatální následky. V případě vzorkování může docházet k aliasingu a funkce synchronních MAC protokolů je značně omezena. Problémy způsobuje proměnná aktivní doba i asynchronním MAC protokolům (např. Contiki-MAC s phase-lock optimalizací). Oba uvedené systémy pak plně podporují úsporné režimy platformy EE-WSN a mesh komunikaci v rámci bezdrátové sítě.

S odkazem k dosaženým výsledkům kapitoly 6.3 lze potvrdit i hypotézu H_1 a zároveň tak popřít závěry prací [1, 3–5], které tvrdí, že distribuované výpočty poskytují flexibilitu, spolehlivost, ale především zvýšení energetické efektivity.

9 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou bezdrátových sensorových sítí se zaměřením na aplikace vyžadující vysoký výpočetní výkon. Pro uspokojení specifických potřeb těchto aplikací byla představena hardwarová platforma EE-WSN, představující možnou odpověď při hledání současně neslučitelných požadavků na výpočetní výkon a nízkou spotřebu energie. Společně s navrženým systémem autonomního příjmu dokáže významným způsobem zvýšit energetickou efektivitu celého systému. Pomocí série měření byl potvrzen dostatečný výkon platformy, přičemž jeho energetická náročnost je při výpočtu 256-ti bodové FFT až 130krát nižší, ve srovnání s platformou Iris. Stejně tak v režimu spánku dosahuje platforma až 24krát nižší spotřeby. Autonomní systém příjmu dat pak při příjmu paketu vykazuje až 8,36krát nižší spotřebu energie oproti běžnému řešení na téže platformě. V neposlední řadě byla představena dvojice kompletních softwarových řešení. Operační systém reálného času EE-RTOS a modifikovaná verze LWM, tedy EE-LWM. Oba uvedené systémy pak plně podporují úsporné režimy platformy EE-WSN a mesh komunikaci v rámci bezdrátové sítě.

Měřeními byly potvrzeny dosažené cíle, včetně hypotézy H_1 ze str. 9 a bylo tedy dokázáno, že uzly bezdrátové sensorové sítě mohou být dostatečně výkonné pro přímé výpočty algoritmů signálového zpracování, jako např. FFT či aplikace FIR a IIR filtrů, a zároveň vykazují nízkou spotřebu v aktivním i úsporném režimu. Ve srovnání s prezentovaným řešením pak představují distribuované výpočty zcela energeticky neefektivní řešení.

Nutno dodat, že navržený WSN systém profituje z těsné součinnosti hardwaru a softwaru/ firmwaru, bez níž lze jen těžko pokračovat v dalším zvyšování energetické efektivity bezdrátových sensorových sítí. Cenným zjištěním je tedy poznatek, že další zvýšení energetické efektivity WSN systémů vede přes hlubokou znalost dílčích oblastí a holistický přístup při návrhu softwarové a hardwarové architektury.

Výsledky tohoto výzkumu nachází přímé uplatnění v průmyslu i akademické sféře, kde lze hardwarovou platformu společně s operačním systémem bez dalších úprav či znalosti fungování WSN využít. To řeší běžný problém, kdy sensorové sítě využívají experti jiných oblastí výzkumu, jako biologové, geologové či stavební inženýři. Systém autonomního přenosu dat pak nabízí cestu pro další vývoj snižování energetické náročnosti bezdrátových systémů. Uvedené návrhy byly publikovány na konferencích i časopisech s impakt faktorem, viz str.33.

LITERATURA

- [1] Abdelhak, S.; Ghosh, S.; Tessier, J.; Bayoumi, M.; ; aj.: Resource-aware Distributed Split Radix FFT on Wireless Sensor Networks. In *High Performance Embedded Computing, Massachusetts*, 2009.
- [2] Alippi, C.; Camplani, R.; Roveri, M.; Viscardi, G.: Netbrick: A high-performance, low-power hardware platform for wireless and hybrid sensor networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2012 IEEE 9th International Conference on*, 2012, s. 111–117.
- [3] Canli, T.: *Power Efficient Computations and Communication Primitives in Wireless Sensor Networks*. University of Illinois at Chicago, 2010, 202 s.
- [4] Canli, T.; Gupta, A.; Khokhar, A.: Power Efficient Algorithms for Computing Fast Fourier Transform over Wireless Sensor Networks. In *Computer Systems and Applications, 2006. IEEE International Conference on.*, 2006, s. 549–556.
- [5] Chiasserini, C.: On the concept of distributed digital signal processing in wireless sensor networks. In *MILCOM. Proceedings*, ročník 1, 2002, s. 260–264 vol.1.
- [6] Delicato, F.; Pires, P.; Zomaya, A.: Middleware Platforms: State of the Art, New Issues, and Future Trends. In *The Art of Wireless Sensor Networks*, editace H. M. Ammari, Signals and Communication Technology, Springer Berlin Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-642-40008-7, s. 645–674.
- [7] Ellaithy, R. A.: *A Comprehensive Survey on Sensors and Sensors Networks*. Dizertační práce, 2012.
- [8] Červenka, V.; Komosný, D.; Kathiravelu, G.: IETF 6LoWPAN and Sensor Networking. In *ICT2011, Vysoké učení technické v Brně*, 2011, ISBN 978-80-214-4231-3, s. 69–73.
- [9] Červenka, V.; Komosný, D.; Malina, L.; Mráz, L.: Energy Efficient Public Key Cryptography in Wireless Sensor Networks. In *Innovations and Advances in Computer, Information, Systems Sciences, and Engineering*, USA, Berkeley: Springer New York, 2012, ISBN 978-1-4614-3534-1, s. 497–509.
- [10] Červenka, V.; Mráz, L.; Šimek, M.: Reusing AES Coprocessor in Public Key Cryptography. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network*, 2012.
- [11] Červenka, V.; Mráz, L.; Šimek, M.: Integration and Visualization of Adaptive Wireless Sensor Network. In *Poster and Demo Proceedings of 10th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2013)*, 2013.
- [12] Červenka, V.; Mráz, L.; Komosný, D.: Top-Down Architecture for Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Network. In *Proceedings of 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2012)*, 2012, ISBN 978-1-4673-1118-2, s. 91–95.
- [13] Červenka, V.; Mráz, L.; Komosný, D.: Comprehensive Performance Analysis of Lightweight Mesh and its comparison with ZigBee Pro Technology. *Wireless Personal Communication*, 2014, doi: 10.1007/s11277-014-1832-x, v tisku.
- [14] Gajjar, S.; Choksi, N.; Sarkar, M.; Dasgupta, K.: Comparative analysis of wireless sensor network motes. In *Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2014 International Conference on*, 2014, s. 426–431.
- [15] Healy, M.; Newe, T.; Lewis, E.: Efficiently securing data on a wireless sensor network. *Journal of Physics: Conference Series*, ročník 76, č. 1, 2007.

- [16] Šimek, M.; Mráz, L.; Červenka, V.; Pechanec, V.: Adaptive Wireless Sensor Network for Urban Crisis Management. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network*, 2012.
- [17] Šimek, M.; Mráz, L.; Červenka, V.; Botta, M.; Julina, V.: Wireless Light-weight Snow Sensor. In *Poster and Demo Proceedings of 10th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2013)*, 2013.
- [18] Jiang, J.; Claudel, C.: A wireless computational platform for distributed computing based traffic monitoring involving mixed Eulerian-Lagrangian sensing. In *Industrial Embedded Systems (SIES), 2013 8th IEEE International Symposium on*, 2013, s. 232–239.
- [19] Jurdak, R.; Klues, K.; Kusy, B.; Richter, C.; Langendoen, K.; aj.: Opal: A Multiradio Platform for High Throughput Wireless Sensor Networks. *Embedded Systems Letters, IEEE*, ročník 3, č. 4, 2011: s. 121–124, ISSN 1943-0663.
- [20] Ko, J.; Klues, K.; Richter, C.; Hofer, W.; Kusy, B.; aj.: Low Power or High Performance? A Tradeoff Whose Time Has Come (and Nearly Gone). In *Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Sensor Networks, EWSN'12*, Springer-Verlag, 2012, ISBN 978-3-642-28168-6, s. 98–114.
- [21] Ko, J.; Wang, Q.; Schmid, T.; Hofer, W.; Dutta, P.; aj.: Egs: A Cortex M3-Based Mote Platform. In *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on*, 2010, s. 1–3.
- [22] Korkua, S.; Jain, H.; Lee, W.-J.; Kwan, C.: Wireless health monitoring system for vibration detection of induction motors. In *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS), 2010 IEEE*, 2010, s. 1–6.
- [23] Langendoen, K.; Meier, A.: Analyzing MAC Protocols for Low Data-rate Applications. *ACM Trans. Sen. Netw.*, ročník 7, č. 1, Srpen 2010: s. 10:1–10:34, ISSN 1550-4859.
- [24] Lu, B.; Gungor, V.: Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, ročník 56, č. 11, 2009: s. 4651–4659, ISSN 0278-0046.
- [25] Müller, J.; Červenka, V.; Komosný, D.: Taking Advantage of DLNA Technology in Education. In *New Information and Multimedia Technologies (NIMT)*, VUT Brno, 2011, ISBN 978-80-214-4241-2, s. 1–4.
- [26] Mráz, L.; Červenka, V.: Complete System Design Based on Wireless Sensor Network for Disaster Prevention. In *Proceedings of 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2012)*, ročník 10a, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, ISSN 0033-2097, s. 273–277.
- [27] Mráz, L.; Červenka, V.; Šimek, M.: Packet Analyser for IEEE 802.15.4 Networks. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2012)*, 2012.
- [28] Mráz, L.; Červenka, V.; Šimek, M.; Komosný, D.: Comprehensive Performance Analysis of ZigBee Technology Based on Real Measurements. *Wireless Personal Communication*, 2013: s. 2783–2803, ISSN 0929-6212.
- [29] Mráz, L.; Komosný, D.; Červenka, V.; Morávek, P.; Šimek, M.: Open-Packet Analyser Platform for Wireless Sensor Networks Based on IEEE 802.15.4. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2011)*, 2011, ISBN 978-1-4577-1409-2, s. 145 – 149.

- [30] National Institute of Standards and Technology. NIST Special Publication 800-57. [Online]. 2012.
URL http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-57/sp800-57_part1_rev3_general.pdf
- [31] Oracle Labs. Sun Small Programmable Object Technology (Sun SPOT) Owner's Manual Release 2.0. [Online]. 2007.
URL <http://www.sunspotworld.com/docs/Orange/SunSPOT-OwnersManual.pdf>
- [32] Pasha, M. A.; Derrien, S.; Sentieys, O.: A novel approach for ultra low-power WSN node generation. In *Signals and Systems Conference (ISSC 2010), IET Irish*, June 2010, s. 204–209.
- [33] Patil, H. K.; Szygenda, S. A.: kapitola Implementation of Elliptic Curve Cryptography in Wireless Sensor Networks. 2013, s. 173–200.
- [34] Silicon Labs. Simplicity Studio: FreeRTOS - Tickless. [Online]. 2014.
URL <http://www.silabs.com/products/mcu/pages/simplicity-studio.aspx>
- [35] STMicroelectronics. STM32F427xx. [Online]. 2014.
URL <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00071990.pdf>
- [36] Strazdins, G.; Elsts, A.; Nesenbergs, K.; Selavo, L.: Wireless Sensor Network Operating System Design Rules Based on Real-World Deployment Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, ročník 2, č. 3, 2013: s. 509–556, ISSN 2224-2708.
- [37] Tada, Y.; Manju; Singh, V.: A survey on Energy Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Network. In *International journal for research in applied science and engineering technology (IJRA-SET)*, 2014, ISSN 2321-9653.

PUBLIKACE AUTORA

Publikace v časopisech s impaktním faktorem

- 1) ([13]) Červenka, V.; Mráz, L.; Komosný, D.: Comprehensive Performance Analysis of Lightweight Mesh and its comparison with ZigBee Pro Technology. *Wireless Personal Communication*, 2014, doi: 10.1007/s11277-014-1832-x, v tisku. (IF: 0,979)
- 2) ([28]) Mráz, L.; Červenka, V.; Šimek, M.; Komosný, D.: Comprehensive Performance Analysis of ZigBee Technology Based on Real Measurements. *Wireless Personal Communication*, 2013: s. 2783–2803, ISSN 0929-6212. (IF: 0,979)
- 3) ([26]) Mráz, L.; Červenka, V.: Complete System Design Based on Wireless Sensor Network for Disaster Prevention. In *Proceedings of 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2012)*, ročník 10a, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, ISSN 0033-2097, s. 273–277. (IF: 0,244)

Ostatní publikace

- 1) ([11]) Červenka, V.; Mráz, L.; Šimek, M.: Integration and Visualization of Adaptive Wireless Sensor Network. In *Poster and Demo Proceedings of 10th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2013)*, 2013.
- 2) ([17]) Šimek, M.; Mráz, L.; Červenka, V.; Botta, M.; Julina, V.: Wireless Light-weight Snow Sensor. In *Poster and Demo Proceedings of 10th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2013)*, 2013.
- 3) ([9]) Červenka, V.; Komosný, D.; Malina, L.; Mráz, L.: Energy Efficient Public Key Cryptography in Wireless Sensor Networks. In *Innovations and Advances in Computer, Information, Systems Sciences, and Engineering*, USA, Berkeley: Springer New York, 2012, ISBN 978-1-4614-3534-1, s. 497–509.
- 4) ([12]) Červenka, V.; Mráz, L.; Komosný, D.: Top-Down Architecture for Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Network. In *Proceedings of 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2012)*, 2012, ISBN 978-1-4673-1118-2, s. 91–95.
- 5) ([27]) Mráz, L.; Červenka, V.; Šimek, M.: Packet Analyser for IEEE 802.15.4 Networks. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network (EWSN 2012)*, 2012.
- 6) ([16]) Šimek, M.; Mráz, L.; Červenka, V.; Pechanec, V.: Adaptive Wireless Sensor Network for Urban Crisis Management. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network*, 2012.
- 7) ([10]) Červenka, V.; Mráz, L.; Šimek, M.: Reusing AES Coprocessor in Public Key Cryptography. In *Poster and Demo Proceedings of 9th European Conference on Wireless Sensor Network*, 2012.
- 8) ([8]) Červenka, V.; Komosný, D.; Kathiravelu, G.: IETF 6LoWPAN and Sensor Networking. In *ICT2011*, Vysoké učení technické v Brně, 2011, ISBN 978-80-214-4231-3, s. 69–73.
- 9) ([25]) Müller, J.; Červenka, V.; Komosný, D.: Taking Advantage of DLNA Technology in Education. In *New Information and Multimedia Technologies (NIMT)*, VUT Brno, 2011, ISBN 978-80-214-4241-2, s. 1–4.
- 10) ([29]) Mráz, L.; Komosný, D.; Červenka, V.; Morávek, P.; Šimek, M.: Open-Packet Analyser Platform for Wireless Sensor Networks Based on IEEE 802.15.4. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2011)*, 2011, ISBN 978-1-4577-1409-2, s. 145 – 149.

Produkty

- 1) Červenka, V.; Velký, P.; Mráz, L.; Komosný, D. WSN Server Control Centre. 2012.
- 2) Mráz, L.; Komosný, D.; Červenka, V.: Mininode, Platforma pro bezdrátové senzorické sítě založené na standardech IEEE 802.15.4/ Zigbee. 2010.

Curriculum Vitæ

Vladimír Červenka

Osobní informace

Datum narození: 29. dubna, 1986
Místo narození: Brno
Adresa: Berlínská 2747, 390 05 Tábor
E-mail: cervenka.v@email.cz

Vzdělání

2010–2014 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 3058/10, 616 00 Brno, titul: Ph.D.
2008–2010 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 3058/10, 616 00 Brno, titul: Ing.
2005–2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 3058/10, 616 00 Brno, titul: Bc.
2001–2005 Střední škola spojů a informatiky, Bydlišského 2474, 390 11 Tábor

Dodatečné informace ke vzdělání

2009–2010 Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 10, FI-33720 Tampere, Finsko

Ocenění

2010 Magisterský titul s vyznamenáním

Předchozí zaměstnání

2011–2014 *vědecký pracovník*: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Technická 12, 616 00 Brno
2011–2012 *embedded developer*: Herman elektronika, Brněnská 993, 664 42 Modřice

Participace na projektech

2014–2015	OPVK CZ.1.07/3.2.04/06.0005, <i>Moderní síťové technologie</i>
2012–2015	OPVK CZ.1.07/2.2.00/28.0096, <i>Příprava specialistů pro telekomunikace a informatiku - magisterské studium telekomunikační a informační technika</i>
2012–2013	HS-Honeywell, <i>Výzkum přenosu dat v oblasti UWB a technologie IEEE 802.15.4a</i>
2012–2013	FRVŠ1365/2012, <i>Začlenění problematiky bezpečnosti počítačových sítí a technologie Intrusion Prevention System do výuky předmětu Cisco akademie 2</i>
2011–2012	OPVK CZ.1.07/1.3.10/03.0007, <i>Vzdělávání pedagogů pro lepší využití ICT při výuce na základních a středních školách</i>
2011–2013	OPVK CZ.1.05/2.1.00/03.0072, <i>Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)</i>
2011–2013	MPO/FR-TI2/571, <i>Adaptibilní bezdrátové senzorové sítě s vizualizací dat pro krizové řízení</i>
2011–2012	OPVK CZ.1.07/2.3.00/09.0222, <i>Vzdělávací centrum pro zvýšení zájmu mládeže o výzkumné profese v oblasti informačních a komunikačních technologií</i>

Vyžádané přednášky

- *Wireless Sensor Networks in Biomedicine*, University Institute for Technological Development and Innovation in Communication, University of Las Palmas, Španělsko.
- *Advances in Analysis of Wireless Sensor Networks*, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Portugalsko.

Vyžádané recenze

- Elsevier, *Computer Communications*, ISSN: 0140-3664.
- Springer, *Wireless Personal Communication*, ISSN: 0929-6212.
- Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Applied Mathematics*, ISSN: 1110-757X.
- *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, ISSN: 1805-5443.
- *International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOBI 2014)*, ISBN: 978-1-4799-6174-0.
- *6th International Conference on Teleinformatics (ICT 2011)*.

ABSTRAKT

Tato práce se soustředí na energetickou efektivitu dílčích aspektů při zpracování dat na uzlech bezdrátové sensorové sítě (WSN) a snaží se nalézt cesty pro další snížení spotřeby energie pro výpočetně náročné aplikace WSN. Práce nabízí detailní analýzu energeticky efektivních mesh protokolů, společně s přehledem současně dostupných hardwarových platforem. Na základě vlastního výzkumu je pak prezentována výpočetně výkonná sensorická jednotka, na níž je demonstrován navržený systém autonomního přenosu dat pro WSN. V neposlední řadě je pozornost věnována systému řízení, resp. implementaci operačního systému reálného času (RTOS), jenž by zohlednil přísné energetické nároky a podpořil svou funkcí energetickou efektivitu celého systému. Cenným zjištěním je poznatek, že další zvýšení energetické efektivity WSN systémů vede přes holistický přístup při návrhu softwarové a hardwarové architektury a tedy těsné součinnosti hardwaru a softwaru/ firmwaru. Výsledky uvedeného výzkumu nachází přímé uplatnění v průmyslu i akademické sféře, kde lze hardwarovou platformu společně s operačním systémem bez dalších úprav či znalosti fungování WSN využít. Systém autonomního přenosu dat pak nabízí cestu pro další vývoj snižování energetické náročnosti bezdrátových systémů.