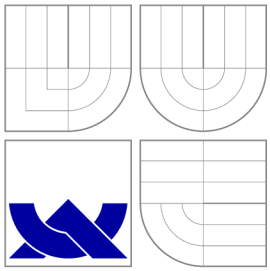
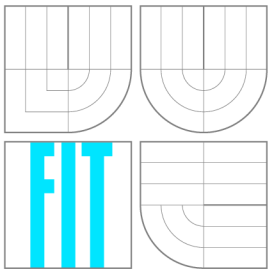


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

BEZDRÁTOVÁ METEOROLOGICKÁ STANICE

WIRELESS WEATHER STATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — MARCEL KEBÍSEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JIŘÍ HUSÁK
SUPERVISOR

BRNO 2016

Abstrakt

Cieľom tejto práce je navrhnúť a implementovať systém pre bezdrôtové meranie meteorologických veličín, ich analýzu a sprostredkovanie užívateľovi s možnosťou zdieľania na internete. Systém bol navrhnutý s využitím bezdrôtového vývojového kitu SensorTag, ktorý slúži ako modul pre meranie a uchovávanie meteorologických hodnôt. Aplikácia pre MS Windows umožňuje prenášať namerané hodnoty z kitu technológiou Bluetooth LE, zobrazovať ich užívateľovi v podobe prehľadných grafov a zdieľať ich na najpoužívanejšom meteorologickom portáli.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to design and implement a system used for wireless measurement, analysis and display of weather data. The system was designed using wireless development kit SensorTag, which is used for measurement and storing the data. MS Windows application is capable of data transfer from the development kit by Bluetooth LE technology and displaying the data in interactive charts. It is also capable of sharing the data on the most widely used weather station website.

Kľúčové slová

meteorologická stanica, bluetooth, sensortag

Keywords

weather station, bluetooth, sensortag

Citácia

Marcel Kebísek: Bezdrátová Meteorologická Stanice, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2016

Bezdrátová Meteorologická Stanice

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne, pod vedením Ing. Jiřího Husáka. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....
Marcel Kebísek
18.5.2016

Poďakovanie

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu práce Ing. Jiřímu Husákovi za priateľský a ústretový prístup a pomoc pri tvorbe tejto práce.

© Marcel Kebísek, 2016.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Meteorológia a kit SensorTag **4**
2.1 Atmosféra a veličiny . . . 4
2.1.1 Teplota vzduchu . . . 4
2.1.2 Atmosférický tlak . . . 5
2.1.3 Relatívna vlhkosť vzduchu . . . 6
2.2 SensorTag . . . 6
2.2.1 Puzdro . . . 6
2.2.2 Doska . . . 6
2.2.3 MCU . . . 8
2.3 Senzory . . . 9
2.3.1 Teplota . . . 9
2.3.2 Relatívna vlhkosť . . . 11
2.3.3 Barometrický tlak . . . 12
2.3.4 Ďalšie senzory . . . 14

3 Bezdrôtová komunikácia **15**
3.1 Úvod . . . 15
3.2 Bezdrôtové technológie . . . 15
3.2.1 Wi-Fi . . . 16
3.2.2 ZigBee . . . 17
3.2.3 Bluetooth Low Energy (BLE) . . . 19
3.3 Porovnanie . . . 21

4 Návrh systému **22**
4.1 Existujúce riešenia . . . 22
4.2 Programovanie kitu SensorTag . . . 22
4.2.1 Vývojové nástroje . . . 22
4.2.2 TI-RTOS . . . 23
4.2.3 Referenčný dizajn . . . 23
4.3 Desktopová aplikácia . . . 24
4.3.1 Weather Underground . . . 24
4.4 Blokový návrh . . . 24

5 Implementácia systému **26**
5.1 Firmware . . . 26
5.1.1 Aplikačné vlákna . . . 26
5.1.2 Aplikačný protokol . . . 27
5.1.3 Spotreba energie . . . 28
5.2 Klient . . . 28
5.2.1 Knižnica SensorTag . . . 28
5.2.2 Uchovávanie histórie . . . 30
5.2.3 Trieda Wunderground . . . 30
5.2.4 Užívateľské rozhranie . . . 30
5.3 Zhodnotenie implementácie . . . 32

6 Rozšírenie zadania **33**

7 Záver **35**

A Obsah CD **39**

B Návod na inštaláciu a použitie **40**

Kapitola 1

Úvod

Oproti predchádzajúcim generáciám človek v súčasnej dobe disponuje nesmiernymi výhodami spostredkovanými elektronikou a číslicovou technikou. Každý z nás sa bežne stretáva s osobnými počítačmi či inteligentnými mobilnými telefónmi. Avšak málokto vníma aj iný svet číslisovej techniky – miniatúrne počítače skryté v iných zariadeniach od kuchynských spotrebičov až po automobily. Tieto zariadenia doslova riadia dnešný svet. Ich primárnou úlohou nie je interakcia s človekom, ale s reálnym svetom. Množstvo z nich sa už dnes dokáže pripojiť k internetu a využívať jeho výhody na rôzne účely. Táto rozvíjajúca sa oblasť výpočetnej techniky sa nazýva Internet Of Things – IoT (Internet Vecí).

Typický príklad IoT aplikácie je tzv. inteligentná domácnosť. Sústava mikropočítačov autonómne kontroluje, analyzuje a riadi množstvo aspektov typickej domácnosti – osvetlenie, kúrenie, bezpečnostný systém, zábavnú techniku a podobne.

Cieľom tejto práce je navrhnúť a implementovať časť takéhoto systému – aplikáciu pre bezdrôtové monitorovanie meteorologických veličín, ich analýzu a sprostredkovanie užívateľovi s možnosťou zdieľania na internete. Základným prvkom je bezdrôtový vývojový kit SensorTag od firmy Texas Instruments.

Nasledujúca kapitola práce má za úlohu v prvej časti uviesť čitateľa do problematiky meteorológie a merania meteorologických veličín. V druhej časti predstavuje vývojový kit SensorTag, popisuje jeho stavbu a periférie. Analyzuje jeho procesor a ďalšie komponenty a hlavne sa zameriava na popis a fungovanie použitých čidiel.

Tretia kapitola uvádza čitateľa do problematiky bezdrôtovej komunikácie. Vyberá a analyzuje tri dôležité bezdrôtové technológie – Bluetooth, Wi-Fi a ZigBee. V závere kapitoly porovná popisované technológie s ohľadom na aplikáciu v tejto práci a výhody resp. nevýhody oproti ostatným.

Štvrtá kapitola sa venuje analýze podobných existujúcich riešení a návrhu samotného systému. Predstavuje aplikačné prostredie kitu SensorTag a princípy jeho programovania. Ďalej popisuje zvolené technológie pre implementáciu užívateľskej aplikácie na PC a návrh jej súčastí a funkcionality. V závere uvádza a popisuje blokový návrh výsledného systému.

Piata kapitola popisuje spôsob implementácie systému navrhnutého v štvrtej kapitole. Vyberá zaujímavé časti riešenia a popisuje problémy, ktoré pri implementácií nastali a spôsob ich riešenia. V závere hodnotí výslednú implementáciu, spotrebu energie, výhody a nevýhody.

Šiesta kapitola popisuje činnosť nad rámec zadania tejto práce a jej výsledky.

Záverečná kapitola rekapituluje výsledky práce, hodnotí úspešnosť a splnenie bodov zadania a zaoberá sa možnosťami pokračovania vrámci diplomovej práce.

Kapitola 2

Meteorológia a kit SensorTag

Prvá časť tejto kapitoly popisuje meteorologické pozadie tejto práce. Predstavuje základné meteorologické veličiny, ich fyzikálne princípy a spôsoby ich merania.

Druhá časť predstavuje čitateľovi základný hardwarový prvok tejto práce - vývojový kit SensorTag. Popisuje jeho vonkajšiu a vnútornú stavbu, jednotlivé komponenty a ich najdôležitejšie vlastnosti. Do detailov sa venuje čidlám použitým v tejto práci, ich fyzikálnym a elektronickým princípom a uvádza ich technické parametre.

2.1 Atmosféra a veličiny

Atmosféra je plynný obal obklopujúci zem. Ide o zmes plynov (dusík, kyslík, oxid uhličitý), vodnej pary, kvapalných a pevných častíc (aerosólov)[9]. Z rôzneho hľadiska je možné merať mnoho vlastností určitej vzorky atmosféry. V nasledujúcich sekciách sú popísané tie vlastnosti, ktoré majú väčší význam v tejto práci.

2.1.1 Teplota vzduchu

Teplota je stavová veličina popisujúca termodynamický stav telesa, ktorej hodnota je daná smerom tepelnej výmeny medzi dvoma telesami. Teleso, ktoré stráca teplo v prospech druhého telesa má vyššiu teplotu [27].

Základnou jednotkou pre meranie termodynamickej teploty je Kelvin (K). Kelvinova stupnica vychádza z bodu absolútnej nuly (teplota, pri ktorej majú molekuly ľubovoľnej látky nulovú kinetickú energiu) a trojného bodu tekutiny VSMOW (špeciálne upravenej vody), definovaného ako 273,16 stupňov Kelvina.

V meteorológií sa častejšie používa Celsiova stupnica. Pôvodne vychádzala z bodu topenia vody a bodu varu vody. V súčasnosti vychádza z Kelvinovej stupnice, pričom stupeň Celsia je ekvivalentný stupňu Kelvina, absolútna nula má hodnotu -273,15°C a trojný bod VSMOW má hodnotu 0.01°C.

Meranie teploty sa dá realizovať dvoma spôsobmi. Prvým je privedenie meracieho prístroja do rovnakej teploty ako meraný objekt (uvedenie do termodynamickej rovnováhy), pričom teplota samotného prístroja môže byť stanovená. Druhý spôsob je meranie infračerveného žiarenia vyžarovaného meraným objektom a stanovenie teploty na základe tohto merania. V tomto prípade nie je potrebný termodynamický kontakt medzi meradlom a meraným

objektom.

Vzduch v atmosfére je zahrievaný zemským povrchom, ktorý sa zahrieva najmä dopadajúcim slnečným žiarením. Na zemský povrch dopadá len asi 45% celkového množstva slnečného žiarenia. Veľká časť sa odrazí od vrstiev atmosféry a oblačnosti a časť sa v atmosfére rozptýli. Zemský povrch sa zahrieva veľmi nerovnomerne, čo je kľúčovým predpokladom pre vznik všetkých atmosferických javov.

S aktuálnou teplotou súvisí tzv. rosný bod. Ide o teplotu, pri ktorej pri aktuálnom atmosférickom tlaku dosiahne nasýtenosť vzduchu vodnými parami 100% a pary začínajú kondenzovať. Rosný bod sa dopočítava z teploty vzduchu a atmosférického tlaku vzťahom:

$$T_{DEW} = 243.04 * \log \frac{H}{100} + \frac{\frac{17.625*T}{243.04+T}}{17.725 - \log \frac{H}{100} - \frac{17.625*T}{243.04+T}}$$

Teplota vzduchu sa meria vo výške 1,5 až 2 metre nad povrchom, mimo priameho slnečného žiarenia, v dostatočnej vzdialenosti od stien budov či iných objektov akumulujúcich teplo a mimo dosahu akýchkoľvek iných rušivých vplyvov.

2.1.2 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak je tiaž vyššie položeného stĺpca atmosféry na jednotku povrchu. Základnou mernou jednotkou je Pascal (Pa), alebo Newton na meter štvorcový. V meteorológií sa používa takmer výhradne jednotka hektopascal (hPa) [27].

Atmosférický tlak sa meria buď tekutinovým, aneroidným alebo elektronickým barometrom. Pri meraní tekutinovým barometrom sa najčastejšie používa ortuť. Sklený stĺpec je v hornej časti uzavretý a naplnený ortuťou, v dolnej časti sa nachádza otvorený zásobník na zvyšnú ortuť. Kvapalná ortuť priťahovaná gravitáciou tvorí v hornej časti stĺpca vákuum, ktorého výška závisí od sily, ktorou pôsobí vzduch na ortuť v zásobníku. Odtiaľ historicky pochádza aj ďalšia jednotka na meranie tlaku vzduchu – milimetre (palce) ortuťového stĺpca.

Aneroidný barometer obsahuje rozťažiteľné kovové jadro, vyrobené zo zmesi dvoch kovov (napr. berýlium a meď). Toto jadro (zvyčajne sa používa niekoľko za sebou) je zavesené na pružine. Zmeny v atmosférickom tlaku spôsobujú roztiahnutie alebo zmrštenie jadra. Tieto zmeny sú prenesené na mechanický ukazateľ, z ktorého sa odčíta hodnota.
Princípy elektronických barometrov sú rozpracované v inej kapitole.

Atmosférický tlak pôsobí na objekty v atmosfére zo všetkých strán, ale pôsobí aj na samotný vzduch. Nakoľko je plyn narozdiel od kvapaliny stlačiteľný, atmosférický tlak klesá s rastúcou výškou exponenciálne.
V rôznych nadmorských výškach je teda tlak vzduchu rôzny. Aby sa vylúčila táto premenná a namerané hodnoty mohli byť použité v širšom kontexte, prepočítava sa nameraný absolútny tlak v závislosti na nadmorskej výške a teplote na tlak pri hladine mora. Prepočet je vyjadrený vzťahom:

$$P_S = P(1 - \frac{0.0065h}{T+0.0065h+273.15})^{-5.257}$$

Štandardná hodnota atmosférického tlaku sa pri hladine mora udáva ako 1013,25 hPa.

2.1.3 Relatívna vlhkosť vzduchu

Schopnosť vzduchu absorbovať vodnú paru závisí od jeho teploty. Čím je vzduch teplejší, tým viac vodnej pary dokáže absorbovať [27].

Relatívna vlhkosť vzduchu je percentuálna hodnota, ktorá vyjadruje akú časť z maximálneho možného množstva vodnej pary vzduch obsahuje pri danej teplote a tlaku.

S vlhkosťou vzduchu súvisí aj jav zvaný *pocitová teplota* alebo *heat index*. Ide o vyjadrenie spravidla vysokej teploty vzduchu so zohľadnením jeho vlhkosti. Ľudské telo sa ochladzuje potením – produkciou vody na povrchu tela, ktorá pokožku ochladzuje svojím odparovaním. Vysoká hodnota vlhkosti vzduchu významne redukuje schopnosť vody odparovať sa z pokožky. To má za následok znížený odsun tepla z tela a pocity prehriatia. *Heat index* bude teda vyšší ako skutočná teplota vzduchu.

2.2 SensorTag

SensorTag je bezdrôtový vývojový kit od firmy Texas Instruments, zameraný na vývoj a prototypovanie bezdrôtových aplikácií. Kit poskytuje vysoký výpočetný výkon, nezávislý kontrolér RF bezdrôtového modulu a množstvo periférnych čidiel pre snímanie okolitého prostredia, pri zachovaní kompaktnosti a nízkej spotreby energie.

2.2.1 Puzdro

Kit je uzavretý v čiastočne priehľadnom plastovom puzdre s gumovým protišmykovým poťahom. Na puzdre sú perforované otvory pre správnu funkciu vstavaných senzorov a viditeľnosť LED diód. Na oboch stranách hornej časti puzdra sa nachádza mechanizmus pre prenášanie tlaku z puzdra na vnútorné tlačítka kitu.

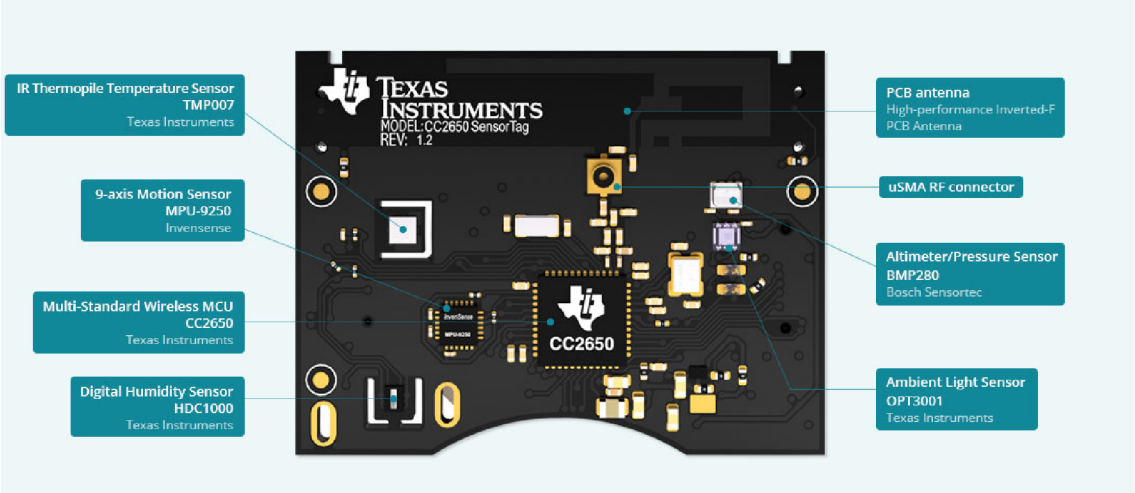
Celkové rozmery puzdra sú 5 cm × 6.7 cm × 1.4 cm.

Obrázok 2.1: Predná a zadná strana puzdra kitu. Tlačítka sú umiestnené na bokoch v hornej časti puzdra. Prevzaté z [26].

2.2.2 Doska

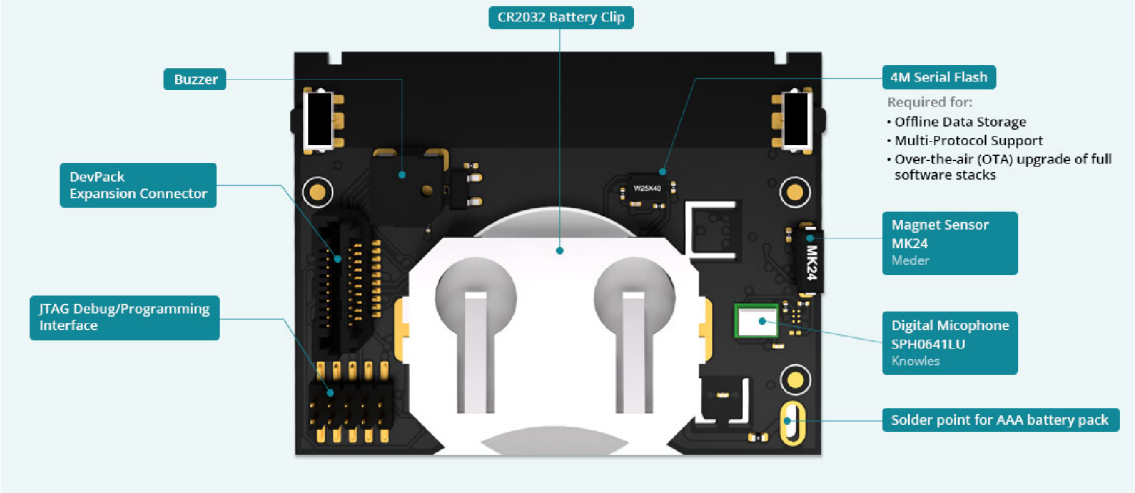
Všetky súčasti kitu sú umiestnené na jedinej viacvrstvovej doske PCB (Printed Circuit Board) spolu s klipom pre batériu. Hornú časť zaberá vstavaná anténa typu IFA (Inverted-F

Antenna). Na prednej strane priamo pod anténou sa nachádza konektor μSMA pre pripojenie externej antény. V strednej časti nachádza jednotka MCU (Microcontroller Unit) typu CC2650 a okolo nej sú rozmiestnené čipy jednotlivých senzorov. Snímač barometrického tlaku BMP280, snímač intenzity svetla OPT3001, pohybový senzor MPU-9250, a čiastočne odizolované čipy pre snímanie teploty TMP007 a vzdušnej vlhkosti HDC1000. V ľavej dolnej časti sú umiestnené vývody pre pripojenie externého napájania.



Obrázok 2.2: Predná strana dosky kitu s popisom jednotlivých prvkov. Prevzaté z [26].

Zadnej strane dosky dominuje klip pre umiestnenie batérie typu CR2032 a dvojica tlačítiek smerujúcich na boky dosky. V pravej časti na boku dosky sa nachádza magnetický spínač MK24, nevolatilná Flash pamäť a digitálny mikrofón SPH0641LU. V ľavej časti sa nachádza bzučiak a konektory pre debugovacie rozhranie JTAG (Joint Test Action Group) a rozhranie pre pripojenie rozširujúcich modulov DevPack.



Obrázok 2.3: Zadná strana dosky kitu s popisom jednotlivých prvkov. Prevzaté z [26].

2.2.3 MCU

MCU CC2650 od firmy Texas Instruments je zariadením typu Sytem On Chip (SoC) zamerané na nízkoenergetické bezdrôtové aplikácie využívajúce technológie Bluetooth Smart, ZigBee a 6LoWPAN [23].

Ako hlavnú výpočetnú jednotku obsahuje 32-bitový procesor architektúry ARM Cortex-M3 taktovaný na 48 MHz, na ktorom beží užívateľská aplikácia a vyššie vrstvy protokolov. Procesor Cortex-M3 poskytuje nízkonákladnú platformu s minimálnymi požiadavkami na pamäť a nízkou spotrebou, pri zachovaní vysokého výpočetného výkonu a nízkeho reakčného času na prerušenie.

Hlavný procesor dopĺňa modul RF Core, obsahujúci procesor architektúry ARM Cortex-M0, ktorý v kombinácií s AD (Analog-Digital) prevodníkmi obsluhuje analógové RF obvody. Stará sa o časovo kritické aspekty bezdrôtových protokolov a zostavuje pakety z dát od hlavného systému a naopak. Bezdrôtové rozhranie poskytuje hlavnému CPU ako vysokoúrovňové API (Application Programming Interface), čím významne znižuje záťaž hlavného procesoru a uvoľnuje zdroje pre užívateľskú aplikáciu. Modul RF Core má vlastný 4-KB blok pamäte a beží z oddelenej ROM (Read Only Memory). Nie je programovateľný užívateľom.

CC2650 obsahuje modul Sensor Controller, ktorý umožňuje vykonávať množstvo úkonov súvisiacich s ovládaním senzorov celkom nezávisle od hlavného CPU, pričom ten sa môže venovať aplikácií, alebo šetriť energiou v režime spánku. Hlavným prvkom modulu je Sensor Controller Engine, čo je proprietárny CPU optimalizovaný na mimoriadne nízku spotrebu energie. Príkladmi použitia sú: analógové snímanie cez vstavané AD prevodníky, digitálne snímanie cez GPIO (General Purpose Input Output) s možným využitím I^2C a SPI (Serial Peripheral Interface), komunikácia cez UART (Universal Asynchronous Transmitter/Receiver) na čítanie alebo debug senzorov, kapacitné snímanie, čítače, snímanie klávesníc a pod.

CC2650 obsahuje množstvo ďalších modulov ako napríklad moduly pre rozhrania I^2C, I2S, SPI či UART, časovače, watchdog, generátor náhodných čísel, μDMA kontrolér, AES modul, GPIO, real-time hodiny a ďalšie. Bloková schéma celého systému je na obrázku 2.4.

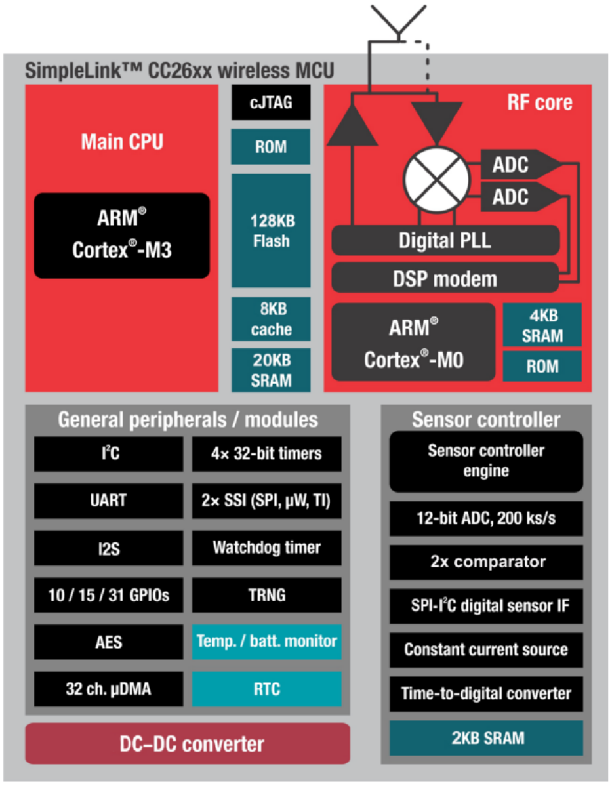
V nasledujúcich tabuľkách je prehľad spotreby I_{CORE} jadra MCU v rôznych režimoch prevádzky. K tejto spotrebe treba pripočítať spotrebu I_{PERI} pre aktívne periférie.

Tabuľka 2.1: Spotreba jadra I_{CORE} v rôznych režimoch.

Režim	Spotreba I_{core}
Reset	100 nA
Shutdown	150 nA
Standby	1 - 2.7 μA
Idle	550 μA
Active	1.45 mA
Radio RX	6.1 mA
Radio TX	9.1 mA

Tabuľka 2.2: Spotreba periférií I_{PERI}.

Modul	Spotreba I_{PERI}
RF Core	237 μA
μDMA	130 μA
Timers	113 μA
I^2C	12 μA
I^2S	36 μA
SSI	93 μA
UART	164 μA



Obrázok 2.4: Bloková schéma systému CC2650. Prevzaté z [23].

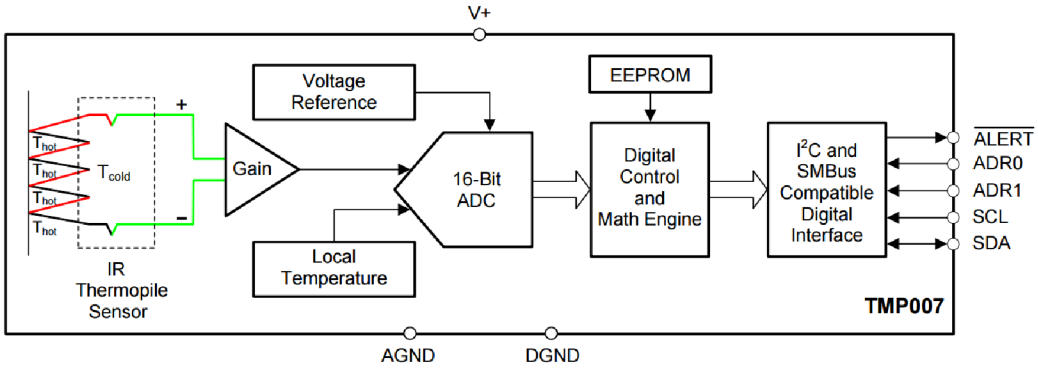
2.3 Senzory

2.3.1 Teplota

Ako primárny senzor na meranie teploty slúži senzor TMP007 od firmy Texas Instruments. Tento senzor poskytuje dva druhy merania – meranie okolitej teploty a bezkontaktné meranie teploty objektu meraním emisií infračerveného žiarenia. Takýto spôsob merania je vhodný pre aplikácie, kde je žiadúce meranie teploty objektu bez priameho kontaktu s meraným objektom [25].

TMP007 je plne integrovaný elektro-mechanický systém založený na použití termoelektrických článkov na meranie infračerveného žiarenia vyžarovaného objektom, ktoré transformuje na odpovedajúcu úroveň eletrického napätia. Táto hodnota prechádza cez 16-bitový analógovo-číslicový prevodník do vstavaného výpočetného modulu, ktorý z nameraných

hodnôt určí výsledné teploty a zapíše ich do odpovedajúcich registrov prístupných cez komunikačné rozhranie (kompatibilné s I^2C a SMBus protokolmi). Bloková schéma celého systému je na obrázku 2.5.



Obrázok 2.5: Bloková schéma senzoru TMP007. Prevzaté z [25].

Ako základ pre všetky merania slúži vysoko presný vstavaný senzor pre meranie teploty puzdra – efektívne teda aj okolitej teploty prostredia. Meranie teploty objektu T_{OBJ} je založené na rozdiele teplôt na dvoch styčných bodoch. Teplý styčný bod absorbuje cez teplovodivý povrch žiarenie emitované objektom. Studený styčný bod je termicky prepojený s puzdrom a jeho teplota je ekvivalentná teplote puzdra T_{DIE}. Teplota teplého styčného bodu je ekvivalentná rozdielu energie absorbovanej od objektu a emitovanej samotným puzdrom. Výstupné napätie článku V_{SENSOR} je potom závislé od rozdielu teplôt na týchto dvoch bodoch. Ide teda o senzor diferenciálneho typu. Známa teplota T_{DIE} a napätie V_{SENSOR} umožňuje dopočítať približnú teplotu objektu T_{OBJ} podľa vzťahu:

$$T_{OBJ} = \sqrt[4]{T_{DIE} + \frac{V_{SENSOR}}{\varepsilon\sigma}}$$

kde:

- σ = Stefan-Boltzmannova konštanta = 5.67×10^{-12} W/(cm^{2}K^4)
- ε = Emisivita, $0 < \varepsilon < 1$, faktor závislý od objektu, $\varepsilon = 1$ pre absolútne čierne teleso

V každom meracom cykle TMP007 určí priemernú hodnotu V_{SENSOR} a T_{DIE} z N meraní, kde N je možné špecifikovať v rozsahu 1-18 pomocou konfiguračného registra. Následne dopočíta hodnotu T_{OBJ} a umiestni hodnoty do príslušných registrov.

Senzor TMP007 je na doske PCB kitu SensorTag z troch strán izolovaný, aby sa minimalizovalo rušenie merania teplotou dosky PCB.

Parametre senzora:

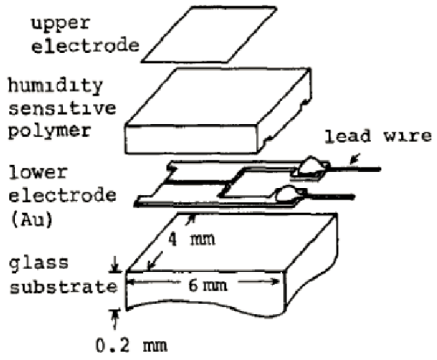
- Rozsah: -40°C až +125°C. Je možné bezkontaktne merať teplotu objektu mimo tento rozsah za predpokladu, že teplota samotného senzora tento rozsah neprekročí.

- Presnosť - vnútorný 14-bitový senzor:
  - · max ±1°C v rozsahu 0°C až 60°C
  - · max ±1.5°C v rozsahu -40 až +125°C
- Rozhranie: kompatibilné s I^2C a SMBus protokolmi
- Prevádzkové napätie: 2.5 V - 5.5 V
- Spotreba:
  - · aktívny – 270 μA
  - · neaktívny – max 2 μA
- Rozmery: 1.9 mm × 1.9 mm × 0.625 mm

2.3.2 Relatívna vlhkosť

Na meranie relatívnej vlhkosti slúži senzor HDC1000 od firmy Texas Instruments. Nakoľko relatívna vlhkosť je funkciou teploty vzduchu a nasýtenosti vzduchu vodnou parou, obsahuje toto zariadenie dva senzory v jednom puzdre – rezistívny senzor pre meranie okolitej teploty a kapacitný senzor pre meranie vzdušnej vlhkosti [24].

Kapacitné meranie vzdušnej vlhkosti je založené na použití vlhkocitlivého polyméru ako je polyvinylalkohol (PVA) ako dielektrickej vrstvy v jednoduchom kondenzátore. Na vrstve oxidu hlinitého sú umiestnené dve elektródy zo zlata alebo platiny, pričom vrchná elektróda umožňuje vzdušnej vlhkosti prechádzať na strednú dielektrickú vrstvu. Medzi elektródami je vrstva vlhkocitlivého polyméru. Vzdušná vlhkosť prestupuje cez hornú elektródu na vlhkocitlivý polymér, ktorý prijíma resp. stráca vlhkosť až do dosiahnutia rovnovážneho stavu s okolitým vzduchom. Zmenou vlhkosti polymérovej vrstvy sa menia kapacitné vlastnosti celej sústavy. Kapacitný senzor je teda vlastne kondenzátor s vlhkocitlivým polymérom ako izolačnou vrstvou a premennou kapacitou [6].

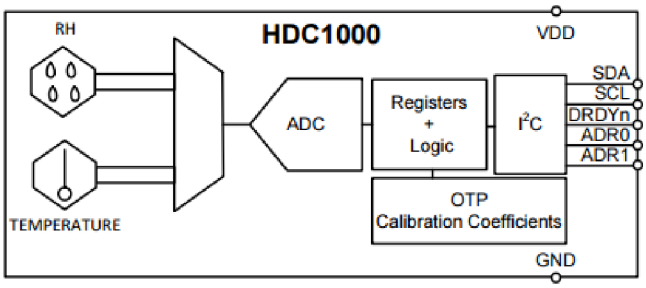


Obrázok 2.6: Schéma konštrukcie kapacitného senzora. Prevzaté z [6].

Citlivé časti meracích jednotiek sú umiestnené na spodnej strane zariadenia, čo znižuje riziko znečistenia alebo zanesenia. Hodnoty z meracích jednotiek prechádzajú cez analógovo-číslicové prevodníky s nastaviteľným rozlíšením – 8/11/14 bitov pre vlhkosť a 11/14 bitov pre teplotu. Vnútorná logika zariadenia zabezpečí výpočet výsledných hodnôt (senzor je továrensky kalibrovaný) a ich umiestnenie do príslušných registrov. Tie sú prístupné cez

rozhranie I^2C.

Zariadenie má dva módy – mód spánku a merania. Väčšinu času sa nachádza v móde spánku. Keď cez rozhranie I^2C obdrží príkaz na meranie – prejde do módu merania, získa merané hodnoty, vypočítané hodnoty umiestni do registrov, nastaví bit DRDY (data ready) a prechádza späť do režimu spánku. Vďaka tomuto režimu má zariadenie dlhodobo veľmi nízku spotrebu energie, čo ho robí vhodným na batériou napájané aplikácie.



Obrázok 2.7: Bloková schéma senzoru HDC1000. Prevzaté z [24].

Senzor HDC1000 je na doske PCB kitu SensorTag čiastočne odizolovaný, aby sa zabránilo ovplyvneniu výsledkov merania teploty od dosky PCB.

Parametre senzora:

- Rozsah merania relatívnej vlhkosti: 0% až 100%.
- Teplotný rozsah: -40°C až +125°C.
- Presnosť merania relatívnej vlhkosti: ±3%.
- Presnosť merania teploty: ±0.2°C.
- Prevádzkové napätie: 3V - 5V.
- Spotreba v režime spánku: 200nA.
- Spotreba v režime merania: 820nA - 1.2μA, v závislosti od frekvencie a rozlíšenia.
- Rozmery: 1.6mm × 2.0mm

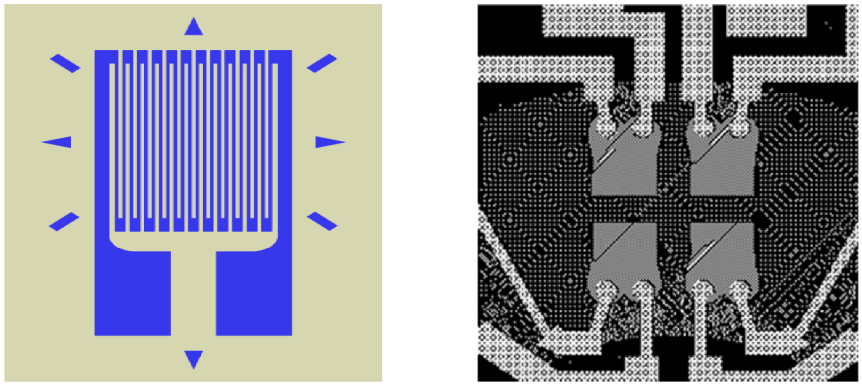
2.3.3 Barometrický tlak

Na meranie barometrického tlaku slúži senzor BMP280 od firmy Robert Bosch GmbH. BMP280 je senzor pre absolútne meranie barometrického tlaku, špeciálne navrhnutý pre mobilné a nízkoodberové aplikácie. Zariadenie obsahuje rezistívny teplotný senzor špeciálne optimalizovaný pre teploty okolo 25°C (slúži na korekciu výsledkov merania tlaku), piezoodporovú meraciu jednotku pre meranie tlaku a logické obvody pre výpočty korekcií a absolútneho tlaku spojené s digitálnym rozhraním kompatibilným s I^2C a SPI protokolmi [2].

Piezoodporové meranie tlaku vzduchu je založené na piezoodporovom jave. Pri pôsobení sily na teleso dochádza k jeho deformácii. Pokiaľ teleso po doznení pôsobiacej sily zostane deformované, deformácia sa nazýva plastická, pokiaľ sa vráti do pôvodného stavu, deformácia sa nazýva elastická. Elektricky vodivé materiály vykazujú pri deformácii zmenu elektrického odporu [10], [13].

Monokryštalický kremík vo forme tenkých doštičiek vykazuje veľmi dobré elastické vlastnosti, preto snímacie elementy z tohto materiálu poskytujú dobrú odolnosť voči mechanickému starnutiu a hysteréze.

Na zadnú stranu silikónovej doštičky sa vyleptá obrazec s meandrovitým usporiadaním, tvoriaci z doštičky veľmi tenkú membránu s veľkým povrchom tvoreným jednotlivými záhybmi. Veľkosť a hrúbka tejto membrány závisí od želaného rozsahu. Deformácia spôsobená tlakom vzduchu tvorí veľké mechanické pnutie na hranách membrány. Polovodičové rezistory na prednej strane prevádzajú piezoodporovým javom zmeny v tomto pnutí na zmeny v odporových vlastnostiach. Pre zvýraznenie týchto zmien bývajú rezistory usporiadané do tzv. Wheatstonovho mostíka.



Obrázok 2.8: Schéma membránového obrazca a detail mostíka so štyrmi piezoodpormi. Prevzaté z [10] a [3].

Pre spracovanie výstupného signálu je potrebná rozsiahlejšia logika, nakoľko takéto usporiadanie je náchylné na chyby spôsobené zmenou teploty a nelineárnu prevodovú charakteristiku. Výstupné napätie ovplyvnené snímacou jednotkou prechádza cez analógovočíslicový prevodník do vstavaného IIR (Infinite Impulse Response) filtra. Nakoľko atmosférický tlak je náchylný na krátkodobé zmeny spôsobené napríklad prúdom vzduchu na senzor alebo otváraním / zatváraním okien a dverí, tieto krátkodobé rušenia sú potlačené IIR filtrom. Úroveň filtrácie je možné vhodne nastaviť podľa aplikácie. Logický blok vykoná interpretáciu výsledku a korekciu podľa nameranej teploty a nakoniec pošle výsledné hodnoty na komunikačné rozhranie.

BMP280 sa podobne ako ostatné senzory prepína medzi meracími cyklami do režimu spánku, čo významne znižuje celkovú spotrebu energie. Je uzavretý v kovovom puzdre a poskytuje nastaviteľnú úroveň prevzorkovania v závislosti od aplikácie (možné vybrať vhodný kompromis medzi požadovanou presnosťou a spotrebou energie). Zariadenie poskytuje okrem hodnoty barometrického tlaku aj hodnotu okolitej teploty, ktorá však odpovedá teplote puzdra, ktorého teplota môže byť ovplyvnená teplotou dosky PCB, vnútorným zahrievaním zariadenia a podobne. Nameraná teplota je preto v zásade o niečo vyššia ako skutočná okolitá teplota a je potrebné brať tento fakt do úvahy.

Parametre senzora:

- Teplotný rozsah: -40°C až +85°C s plnou presnosťou od 0°C do +65°C. Typicky najvyššia presnosť je pri +25°C.
- Tlakový rozsah: 300 hPa až 1100 hPa
- Presnosť merania tlaku: ±1.0 hPa v rozsahu od 0°C do +65°C, ±1.7 hPa v celom teplotnom rozsahu
- Presnosť merania teploty: ±1.0°C v rozsahu od 0°C do +65°C, ±0.5°C pri cca 25°C.
- Prevádzkové napätie: 1.71 V až 3.6 V
- Spotreba: 2.8 μA až 4.2 μA pri 1 meraní za sekundu
- Rozmery: 2.0mm × 2.5mm

2.3.4 Ďalšie senzory

Kit SensorTag obsahuje okrem vyššie popísaných aj ďalšie senzory, ktoré nie sú pre aplikáciu v tejto práci dôležité. V stručnosti sú popísané nižšie.

Snímač okolitého osvetlenia

Snímač OPT3001 od Texas Instruments sníma intenzitu viditeľného svetla. Citlivosť snímača je navrhnutá tak, aby odpovedala charakteristike, akou intenzitu svetla vníma ľudské oko. Je teda vhodný pre aplikácie, kde je dôležité určenie intenzity osvetlenia s ohľadom na ľudskú činnosť. Senzor má potenciál nahradiť v takýchto aplikáciách fotodiódy a fotorezistory, ktorých vnímanie neodpovedá ľudskému [22].

Pohybový senzor

Zariadenie MPU-9250 od firmy InvenSense ktorý poskytuje snímanie pohybových vlastností v deviatich osiach. Kombinuje v jednom puzdre nezávislý trojosový akcelerometer a gyroskop a trojosový magnetometer od firmy Asahi Kasei Microdevices. So 16-bitovými AD prevodníkmi nezávislými pre každý snímač a logikou DMP (Digital Motion Processor^{TM}) spolu s rozhraním I^{2}C poskytuje toto zariadenie vysokú rýchlosť, presnosť a odolnosť pre rozličné druhy aplikácií [11].

Magnetický spínač

Magnetický spínač MK24 od Standex Electronics je mimoriadne kompaktné mechanické zariadenie, ktoré pri prevádzke nevyžaduje priame napájanie. Spínač je konštruovaný pre aplikáciu na povrch PCB, vhodný pre priestorovo obmedzené aplikácie [19].

Kapitola 3

Bezdrôtová komunikácia

Kapitola uvádza čitateľa do problematiky bezdrôtovej komunikácie. Uvádza najdôležitešie spôsoby členenia bezdrôtových technológií a popisuje podstatné rozdiely jednotlivých kategórií. Do detailov sa zameriava na tri bezdrôtové technológie - Bluetooth Low Energy, ZigBee a WiFi. Analyzuje ich z hľadiska rádiovej technológie, architektúry a konštrukcie sietí, dosahu a prenosových rýchlostí a spotreby energie. V závere uvádza porovnanie jednotlivých technológií z hľadiska použitia v tejto práci.

3.1 Úvod

Bezdrôtovou komunikáciou sa v telekomunikačných technológiách označuje taká komunikácia, pri ktorej signál prenášajú elektromagnetické vlny alebo iné médium bez potreby fyzického kontaktu komunikujúcich strán, narozdiel od rôznych foriem fyzických medií ako sú drôty a podobne. Neberúc do úvahy primitívne formy bezdrôtovej komunikácie, ako sú svetelné či dymové signály, siahajú počiatky modernej bezdrôtovej komunikácie do prelomu 19. a 20. storočia a spájajú sa s menami ako H. Hertz či G. Marconi.

Súčasný význam pojmu slúži na odlíšenie digitálnych zariadení, komunikujúcich bez použitia vodičov od tých, ktoré vodiče na komunikáciu potrebujú. Možnosti použitia sú dnes veľmi široké siahajúce od mobilných telefónov, rádiovysielačiek a osobných počítačov, cez priemyselné a strojové využitie, až po satelitnú navigáciu a vesmírny výskum.

Osobitným v súčasnosti sa rozvíjajúcim odvetvím je tzv. Internet Vecí (Internet Of Things), ktoré zahrňuje množstvo malých a nenáročných zariadení slúžiacich na zber a interpretáciou údajov a riadenie reálnych procesov. Prípady použitia zahrňujú inteligentné ovládanie a správu domácností a budov, monitorovanie životného prostredia, priemyselnú výrobu, správu infraštruktúr, systémy v doprave a zdravotníctve a mnoho ďalších.

V súčasnej dobe majú bezdrôtové komunikačné technológie v modernom svete nenahraditeľný význam, s miliardami ľudí denne spoliehajúcimi sa na ich správne fungovanie.

3.2 Bezdrôtové technológie

Spolu s rozvojom osobných počítačov a osobnej elektroniky sa rýchlo rozvíjali aj technológie umožňujúce bezdrôtovú komunikáciu v týchto odvetviach. Podľa konkrétneho určenia (dosahu, prenosovej rýchlosti) sa dajú rozdeliť do nasledovných kategórií [21]:

- **WPAN** - Wireless Personal Area Network

  Bezdrôtové osobné siete sú technológie navrhnuté pre krátky dosah (do cca 10 m) a nízke prenosové rýchlosti. Často bývajú optimalizované pre nízku spotrebu energie a batériou napájané aplikácie. Najbežnejšími technológiami sú Bluetooth a IrDA, spolu s rozvíjajúcimi sa ZigBee a UWB.

- **WLAN** - Wireless Local Area Network

  Bezdrôtové lokálne siete sú navrhnuté pre vysoké prenosové rýchlosti (do 200 Mbps) a dosah rádovo v desiatkach metrov. Najtypickejším zástupcom je Wi-Fi podľa štandardov 802.11a/b/g a nový vysokorýchlostný štandard 802.11n, navrhnutá pre doplnenie alebo nahradenie káblových sietí pre broad-band internetové pripojenie.

- **WMAN** - Wireless Metropolitan Area Network

  Bezdrôtové metropolitné siete sú navrhnuté pre rýchlosti do 75 Mbps v dosahu až niekoľkých kilometrov. Zástupcami sú rôzne verzie technológie WiMAX a Mobile WiMAX.

- **WWAN** - Wireless Wide Area Network

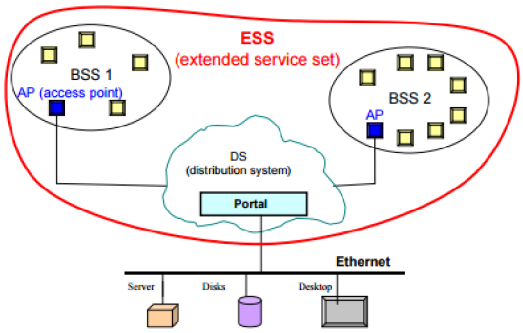
  Bezdrôtové mobilné siete v súčasnosti poskytujú rýchlosti od stoviek Kbps až po desiatky Mbps vo veľkých oblastiach pokrývajúcich celé regióny až štáty. Najbežnejšími technológiami sú mobilné siete GSM/GPRS/EDGE alebo nová vysokorýchlostná technológia LTE. V súčasnosti sú dopĺňané technológiami tretej generácie ako UMTS a HSDPA.

Vzhľadom k téme tejto práce budú detailnejšie rozobrané a porovnané tri bezdrôtové technológie, ktoré poskytujú vývojové kity SensorTag – Wi-Fi a najmä ZigBee a Bluetooth Smart (BLE).

3.2.1 Wi-Fi

IEEE 802.11x alebo Wi-Fi je bezdrôtová WLAN technológia, umožňujúca elektronickým zariadeniam vytvárať a pripájať sa k sieťam rôznej topológie. Štandard IEEE 802.11 bol prvý krát schválený v roku 1997, posledná verzia je IEEE 802.11ac z roku 2014. Názov a logo Wi-Fi je trademarkom Wi-Fi Alliance, označovať sa ním môžu len zariadenia, ktoré okrem štandardu prejdú schválením touto inštitúciou. Nakoľko sa ale označenie Wi-Fi stalo synonymom pre tieto technológie ako celok, budeme ho v ďalšom texte takto chápať [12], [7].

Wi-Fi je založená na bunkovej architektúre, pričom každá bunka (BSS – Basic Service Set) je sadou Wi-Fi staníc. Prístup ku komunikačnému médiu je riadený sadou pravidiel nazývaných koordinačná funkcia (coordination function). Wi-Fi definuje hlavnú Distributed Coordination Function (DCF) a voliteľnú Point Coordination Function (PCF). Najjednoduchšou konfiguráciou je Independent BSS (IBSS), ktorá implementuje topológiu ad hoc, priame spojenie dvoch alebo viacerých zariadení bez definovanej štruktúry. Rozšírenejšou konfiguráciou je pripojenie jednotlivých BSS k širšej sieti, tzv. Extended Service Set (ESS). ESS je sada jednej alebo viacerých BSS sietí spojených tzv. distribučným systémom (Distribution System), ktorý nie je štandardom špecifikovaný. Stanice priamo pripojené k distribučnému systému sa nazývajú prístupové body – Access Points (AP). Prístupové body umožňujú ostatným staniciam vrámci BSS komunikáciu so stanicami z iných BSS.



Obrázok 3.1: Typické zapojenie Wi-Fi siete. Prevzaté z [7].

Wi-Fi pracuje hlavne v pásme 2.4 GHz (časť zariadení pracuje v 5 GHz pásme a existujú varianty aj pre iné pásma, ktoré nebudeme spomínať). Frekvenčné pásmo je rozdelené do 14 čiastočne sa prekrývajúcich kanálov, každý 22 MHz široký. Pre multiplexing (riadenie prístupu k médiu) sa používa jedna z troch techník:

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
- Complementary Code Keying (CCK)
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

V nasledujúcej tabuľke je prehľad prenosových rýchlostí (teoretické maximá, závisí od konfigurácie a ďalších faktorov) a dosahu pre jednotlivé verzie technológie.

Tabuľka 3.1: Porovnanie jednotlivých verzií Wi-Fi.

Štandard	Pásmo	Rýchlosť [Mb/s]	Dosah [m]
802.11a	5 GHz	54	30
802.11b	2.4 GHz	11	30
802.11g	2.4 GHz	54	30
801.11n	2.4/5 GHz	600	50
802.11ac	5 GHz	1300	

Wi-Fi implementuje bezpečnostný protokol Wireless Equivalent Privacy (WEP), ktorý sa ukázal ako nespoľahlivý a pri dostatočne vyťaženej sieti bolo časovo nenáročné šifru prelomiť. Neskôr boli implementované zlepšené bezpečnostné mechanizmy WPA v roku 2002 a WPA2 v roku 2004, využívajúce šifrovanie na báze AES. Siete zabezpečené týmito mechanizmami sa v súčasnosti považujú za bezpečné.

Technológiu Wi-Fi implementuje v súčasnosti ešte vyvíjaná verzia kitu SensorTag založená na báze MCU Texas Instruments CC3200.

3.2.2 ZigBee

ZigBee je nízkonákladová, nízkoenergetická bezdrôtová sieťová technológia zameraná na vývoj riadiacich a monitorovacích zariadení s dlhou výdržou batérie. ZigBee začala vyvíjať firma Motorola v roku 1998. V roku 2002 sa pridali ďalšie firmy a vznikla aliancia ZigBee Alliance. Štandard IEEE 802.15.4 popisujúci PHY a MAC vrstvy nízkorýchlostných WPAN sietí (LR-WPAN) bol schválený v roku 2003 a na jeho základe bola v roku 2004 schválená špecifikácia ZigBee [12], [20].

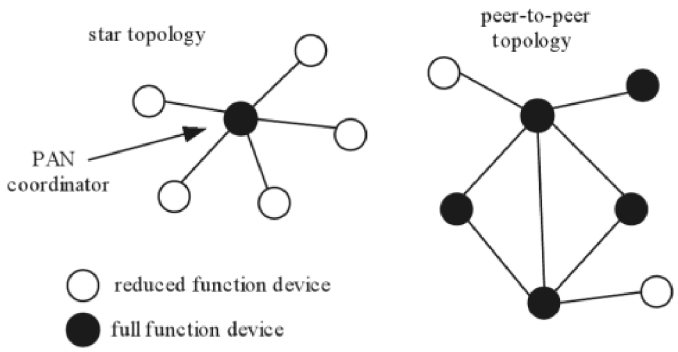
ZigBee poskytuje podporu pre samoorganizované multi-hop mesh siete pri veľmi nízkej spotrebe energie. Do siete môžu byť pripojené dva typy zariadení:

- Full-function Device (FFD)
- Reduced-function Device (RFD)

RFD zariadenia sú zamerané na veľmi jednoduché aplikácie – napríklad svetelný spínač alebo pasívny pohybový senzor. Potrebujú vymieňať len minimálne množstvo dát a v jeden moment môžu byť spojené len s jedným FFD zariadením. RFD zariadenia je možné implementovať s minimálnymi nárokmi na pamäť a výpočetnú kapacitu – teda za minimálnu cenu. FFD zariadenia poskytujú všetky funkcie podľa štandardu IEEE 802.15.4 a môžu operovať v troch módoch – ako PAN koordinátor, koordinátor alebo zariadenie. FFD môže komunikovať s inými FFD alebo s RFD.

Štandard popisuje siete až do veľkosti 65 535 uzlov v dvoch druhoch sieťových topológií – topológia typu hviezda a peer-to-peer topológia. Pri topológií typu hviezda jednotlivé zariadenia komunikujú s jediným centrálnym zariadením nazývaným PAN koordinátor, ktorý je zodpovedný za celú funkcionalitu siete. Každé FFD zariadenie môže operovať ako PAN koordinátor a vytvoriť si vlastnú sieť. Všetky siete typu hviezda fungujú nezávisle od ostatných vďaka mechanizmu, ktorý vyberie taký PAN identifikátor, ktorý sa momentálne nepoužíva v rádiovom dosahu. Akonáhle je zvolený PAN identifikátor, PAN koordinátor umožní zariadeniam pripojiť sa do siete.

Topológia typu peer-to-peer umožňuje všetkým zariadeniam komunikovať s ľubovoľným zariadením v dosahu. Táto topológia umožňuje vytvárať zložitejšie sieťové štruktúry ako napríklad cluster-tree. RFD zariadenie sa môže do takejto siete pripojiť iba ako listový uzol, kvôli tomu, že môže byť pripojený len k jednému FFD. Ktorékoľvek z FFD zariadení v takejto sieti môže slúžiť ako koordinátor a poskytovať synchronizačné služby ostatným zariadeniam alebo koordinátorom. Jedno z FFD zariadení v takejto sieti slúži ako celkový PAN koordinátor.



Obrázok 3.2: Topológia sietí ZigBee. Prevzaté z [20].

ZigBee pracuje v nelicencovaných a ISM pásmach – globálne pásmo 2.4 GHz a naviac 909 MHz - 928 MHz na americkom kontinente a 868 MHz v Európe. V pásme 2.4 GHz rozdelenom na 16 kanálov je možné dosiahnuť teoretické maximá až do 250 Kb/s, s moduláciou typu OQPSK (Offset-Quadratue Phase-Shift Keying) a DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum). Ostatné pásma – 868 MHz v jednom kanáli a 915 MHz v 10 kanáloch tiež využívajú DSSS, ale v kombinácií s BPSK (Binary Phase-Shifting Keying) moduláciou.

Dosahujú teoretické maximá až do 20 Kb/s a 40 Kb/s v tomto poradí. Dosah sa pohybuje rádovo v desiatkach metrov až do 100 metrov v závislosti od povahy prostredia.

Bezpečnostný mechanizmus je definovaný štandardom 802.15.4. ZigBee používa pre jeho implementáciu 128-bitové šifrovacie kľúče.

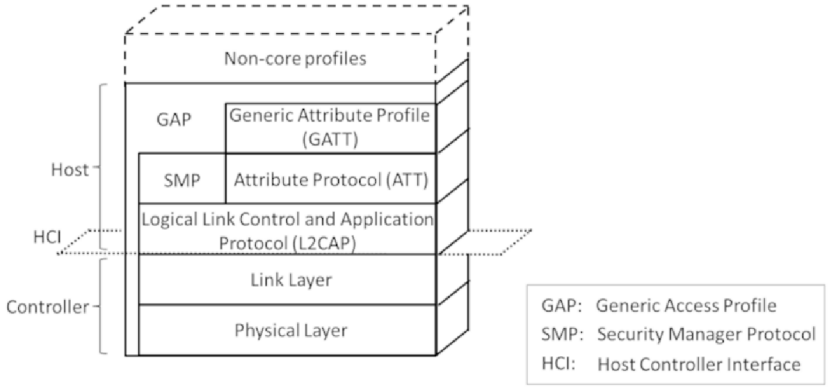
Technológia ZigBee je podporovaná kitom SensorTag na báze MCU Texas Instruments CC2650.

3.2.3 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (Bluetooth Smart – BLE) je rozvíjajúca sa komunikačná technológia pre krátke vzdialenosti vyvinutá skupinou Bluetooth SIG. Narozdiel od pôvodných verzií technológie Bluetooth, BLE je zameraná na inú skupinu aplikácií – nízkoenergetické riešenie pre monitorovacie a riadiace aplikácie. BLE je nezávislou časťou špecifikácie Bluetooth 4.0 z roku 2010, popri klasickej podobe Bluetooth. Narozdiel od podobných technológií ako ZigBee alebo 6LoWPAN, ktoré zaznamenávajú nárast v aplikáciách vyžadujúcich konštrukciu multi-hop sietí, BLE predstavuje single-hop riešenie pre iný druh aplikácií v oblastiach zdravotníctva, osobnej elektroniky a energetiky. Hojné rozšírenie klasickej technológie Bluetooth môže predstavovať výhodu v šírení BLE do nových zariadení [12], [20], [7], [8].

Protokolový zásobník BLE je podobne ako pri klasickom Bluetooth rozdelený na Host a Controller. Controller sa skladá z fyzickej vrstvy a vrstvy Link, pričom býva implementovaný ako jeden celok spolu s RF obvodmi. Host obvykle beží na užívateľskom procesore a zahŕňa vyššie vrstvy funkcionality a abstrakcie. Komunikácia medzi Controller a Host prebieha cez štandardizované rozhranie HCI.

V súčasnej dobe napriek určitej podobnosti nie je BLE spätne kompatibilná s klasickým Bluetooth, teda zariadenie, ktoré implementuje iba BLE nemôže komunikovať cez klasický Bluetooth. Obvyklým riešením je implementovanie tzv. dual-mode zariadenia – takéto zariadenie implementuje aj klasický aj BLE protokolový zásobník nad spoločnou fyzickou vrstvou.



Obrázok 3.3: Diagram protokolového zásobníku BLE. Prevzaté z [8].

BLE pracuje v ISM pásme 2.4 GHz rozdelenom na 40 kanálov, každý široký 2 MHz. BLE definuje dva druhy kanálov – propagačné (Advertising channels) a dátové (Data channels). Tri propagačné kanály slúžia na vyhľadávanie zariadení a služieb, nadväzovanie spojení a vysielanie typu broadcast. Dátové kanály slúžia na obojsmernú komunikáciu medzi spojenými zariadeniami. Mechanizmus na striedanie kanálov tzv. Frequency Hopping sa používa na eliminovanie problémov so šírením RF signálu. Mechanizmus vyberá pre určité časové úseky

jeden z dostupných dátových kanálov. Ako modulácia sa používa systém GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), ktorý je jednoduchý na implementáciu a vyžaduje nízku spotrebu energie.

Prenosová rýchlosť na fyzickej vrstve je 1 Mb/s a dosah sa pohybuje rádovo v desiatkach metrov.

Zariadenia môžu cez BLE komunikovať dvoma spôsobmi – spojeným a nespojeným. V prípade, že zariadenie potrebuje iba vysielať dáta, môže ich naslepo vysielať na propagačných kanáloch vrámci propagačných paketov (advertising packets). Zariadenia zamerané iba na príjem dát cez propagačné vysielanie sa nazývajú skenery (scanners). Obojsmerná komunikácia vyžaduje spojenie medzi dvoma zariadeniami. BLE definuje na Link vrstve dve roly zariadení – master a slave. Propagujúce zariadenie alebo advertiser (v role slave) vysiela na propagačných kanáloch, že je pripojiteľné. Druhé zariadenie – initiator (v role master) čaká na takúto propagáciu. Initiator môže potom zaslať advertiserovi žiadosť o spojenie (Connection Request), čím sa vytvorí spojenie medzi dvoma zariadeniami. Následná výmena dát prebieha na dátových kanáloch, pričom pakety sú identifikované náhodne zvoleným 32-bitovým identifikátorom.

Zariadenie v roli master môže spravovať viacero spojení s viacerými slaves, pričom zariadenie v roli slave môže byť pripojené len k jednému masterovi. Takáto sieť má topológiu typu hviezda a vrámci technológie Bluetooth sa nazýva piconet. V súčasnosti narozdiel od klasického Bluetooth (ktoré umožnuje spájanie sietí – scatternet) môže BLE zariadenie patriť iba do jednej piconet siete.

Zariadenie typu master riadi komunikáciu na spojení – určuje časové úseky kedy slave musí načúvať a kedy môže prejsť do spánku (pre riadenie prístupu k médiu využíva schému TDMA – Time Division Multiple Access), poskytuje parametre pre Frequency Hopping mechanizmus a podobne.

Aplikačná vrstva BLE je založená na frameworku GATT, ktorý spravuje tzv. služby, charakteristiky a popisky. Na tejto úrovni sa rozlišujú role klient a server. Server je zariadenie spravujúce nejaký druh dát, prijíma GATT požiadavky a vracia príslušné odpovede (napríklad rôzne senzory a podobne). Klient iniciuje GATT požiadavky a príjima odpovede (napríklad PC, smartphone a podobne).

Server spravuje súbor poskytovaných služieb (Services), napríklad meteorologická stanica môže poskytovať službu Teplotný snímač, ktorá obsahuje charakteristiky aktuálna teplota a merací interval. Služba je súbor charakteristík (Characteristics), ktoré spolu logicky súvisia a väčšinou obsluhujú konkrétnu funkcionalitu. Charakteristika je konkrétna dátová hodnota, napríklad aktuálna teplota. Popisok (Descriptor) môže poskytovať doplňujúce informácie o charakteristike, napríklad jednotku merania, rozsah a podobne. Služby, Charakteristiky a Popisky sa spoločne označujú ako atribúty (Attributes) a majú pridelený 128-bitový identifikátor UUID.

GATT poskytuje funkcionalitu na správu týchto informácií ako je napríklad vyhľadávanie služieb a charakteristík podľa UUID, vyhľadávanie všetkých charakteristík pre danú službu a podobne. Ďalej poskytuje mechanizmus pre čítanie (read) a zápis (write) hodnôt charakteristiky.

GATT ďalej poskytuje podporu pre tzv. notifikácie a indikácie (notifications, indications). Klient si môže vyžiadať notifikácie pre danú charakteristiku a server mu hodnotu zašle v momente, keď bude dostupná. To je užitočné napríklad pri periodickom meraní nejakej hodnoty – klient nemusí neustále vykonávať polling serveru a informáciu dostane. Indikácie sú podobného charakteru ako notifikácie, s tým rozdielom, že server vyžaduje od klienta

potvrdenie prijatia správy.

3.3 Porovnanie

Najvýznamnejším rozdielom troch popísaných technológií je ich zameranie. Zatiaľ čo Wi-Fi je zameraná na zariadenia s relatívne dostatočným zdrojom energie, ponúka vysoké prenosové rýchlosti na pomerne veľké vzdialenosti.

ZigBee a BLE sú zamerané na aplikácie s nízkou spotrebou energie, ale pri nižšom priamom dosahu a relatívne nízkych prenosových rýchlostiach.

Nie je možné priamo porovnať spotrebu energie týchto technológií pomocou jedinej metriky. Autori článku [5] testovali spotrebu energie na prenose určitého objemu dát. Priamou spotrebou dosiahla BLE výsledok zhruba polovičný oproti ZigBee, na druhú stranu potrebovala približne štvornásobný čas spojenia.

Tabuľka 3.2: Porovnanie spotreby energie BLE a ZigBee pri prenose dát.

	BLE	ZigBee
Connection time	1150 ms	250 ms
Sleep current	0.78 μA	4.18 μA
Awake current	4.5 mA	9.3 mA

Výhodou ZigBee oproti BLE sú nepochybne širšie možnosti konštrukcie sietí a schopnosť multi-hop komunikácie. Hodí sa preto hlavne na novokonštruované projekty a priemyselnú aplikáciu.

Výhodou BLE oproti ZigBee je vyššia rozšírenosť a podpora tejto technológie v modernej osobnej elektronike. Hodí sa preto najmä na užívateľské aplikácie s využitím existujúcich zariadení.

Kapitola 4

Návrh systému

Táto kapitola analyzuje softwarové prostredie kitu SensorTag a popisuje návrh výsledného systému. Výsledný systém má za úlohu zbierať meteorologické informácie pomocou kitu SensorTag, prenášať ich bezdrôtovým protokolom do PC, analyzovať a vhodným spôsobom zobraziť užívateľovi, s podporou pre zobrazenie na webovom portáli.

Pre implementáciu meteorologickej stanice budú využité senzory pre meranie teploty, tlaku a vlhkosti. Ako komunikačná technológia bola zvolená BLE, hlavne kvôli dostupnosti tejto technológie vo väčšine súčasných notebookov a mobilných zariadení.

4.1 Existujúce riešenia

Trh s osobnými meteorologickými stanicami je veľmi široký – od jednoduchých domácich displejov s vonkajším teplotným senzorom až po profesionálne systémy s množstvom komponentov pre meranie najrôznejších veličín. Systém navrhovaný v tejto kapitole si nekladie za cieľ priblížiť sa spektru poloprofesionálnych staníc typu Davis Instruments [4] či už presnosťou výsledkov alebo rozsahom meraných veličín. Výhodou tohto systému sú miniatúrne rozmery, nezávislosť na stálom napájaní alebo pripojení k internetu a pohodlné užívateľské rozhranie v podobe aplikácie na PC. V neposlednom rade sú to do budúcna aj široké možnosti zdokonaľovania a rozširovania tohto systému.

Najviac podobným komerčným produktom je systém od firmy Netatmo [16]. Tento systém ponúka implicitné užívateľské rozhranie v podobe mobilnej aplikácie, čo je podobné riešenie ako v tejto práci – narozdiel od obvyklej hardwarovej konzoly. Systém Netatmo obsahuje viac meraných veličín ako táto práca, avšak za cenu väčších rozmerov vonkajšieho modulu.

4.2 Programovanie kitu SensorTag

4.2.1 Vývojové nástroje

Pre vývoj firmvéru pre mikrokontroléry od Texas Instruments je dostupných niekoľko vývojových nástrojov. Hlavným nástrojom je Code Composer Studio - IDE odvodené od známeho open source IDE Eclipse. Okrem základných funkcií odvodených z Eclipse poskytuje toto IDE pracovné postupy pre preklad a debugging aplikácií na mikrokontroléry Texas Instruments, pluginy pre importovanie referenčných projektov, nástroje pre debugging cez JTAG sondy rady XDS, nástroje pre prácu s TI-RTOS a podobne.
Najnovšou možnosťou je tzv. CCS Cloud - online vývojové prostredie založené na cloude.

Toto online IDE predstavuje zjednodušenú verziu desktopového CCS. Obsahuje základné funkcie textového editoru, nástroje pre import referenčných dizajnov a po nainštalovaní browser pluginu aj nástroje pre flashovanie a debugging mikrokontrolérov.
Pre vývoj tejto aplikácie bola používaná najmä online verzia prostredia CCS. Dôvodom bola jednoduchosť použitia – bez potreby ďalších nastavení alebo prídavných nástrojov (flashovanie mikrokontroléru, spájanie .hex súborov a pod.). Navyše sú všetky nástroje dostupné prakticky odkiaľkoľvek - priamo cez webový prehliadač.

4.2.2 TI-RTOS

TI-RTOS je sada nástrojov pre mikrokontroléry od Texas Instruments, ktorej hlavnou časťou je real-time operačný systém TI-RTOS Kernel, spolu s ďalšími podpornými nástrojmi (drivery pre obsluhu hardvéru, knižnice pre sieťovú komunikáciu, správu súborových systémov a podobne). TI-RTOS Kernel je preemptívny multi-vláknový real-time operačný systém určený pre synchronizáciu časovo kritických úloh systému (bezdrôtová komunikácia, obsluha hardvéru) a užívateľskej aplikácie (resp. aplikácií).
Mimo obsluhy hardvérových a softvérových prerušení je základným prvkom tohto systému tzv. Úloha (Task). Úlohy predstavujú nezávislé vlákna, ktoré paralelne vykonávajú svoj kód. Zdanlivý paralelizmus je dosiahnutý prepínaním procesoru z jednej úlohy na druhú. Úloha môže mať nasledovné stavy:

- Running - úloha sa práve vykonáva
- Ready - úloha je naplánovaná na vykonanie
- Blocked - úloha je zablokovaná
- Terminated - úloha je ukončená
- Inactive - úloha je na zozname neaktívnych úloh

Úlohy sa spravujú pomocou systému priorít, ktoré definujú poradie vykonávaných úloh, umožňujú prerušenie vykonávanej úlohy úlohou s vyššou prioritou a podobne. TI-RTOS Kernel poskytuje ďalšie nástroje pre medziprocesovú komunikáciu ako sú semafory, fronty alebo časovače.

Pre obsluhu protokolového zásobníka BLE obsahuje TI-RTOS framework Indirect Call (*ICall*) a úlohu *GAPRole*. Úloha GAPRole poskytuje jednoduché API pre použitie vrámci aplikácie. Služby, ich parametre, charakteristiky, vlastnosti, veľkosti dát a ďalšie potrebné súčasti sa dajú jednoducho deklarovať pomocou dátových štruktúr a následne používať pomocou funkcií z GAPRole API. GAPRole počas behu aplikácie obsluhuje väčšinu udalostí BLE protokolového zásobníku a aplikačnému vláknu posiela iba najpotrebnejšie. Tým sa redukuje záťaž na aplikačné vlákno a redukuje sa aj množstvo potrebného kódu pre obsluhu bezdrôtovej komunikácie.

4.2.3 Referenčný dizajn

Referenčný dizajn je aplikácia predprogramovaná na kite SensorTag, demonštrujúca využitie aplikačného prostredia, senzorov a BLE. Mobilné aplikácie od Texas Instruments a iných tvorcov väčšinou využívajú na strane kitu SensorTag práve tento firmware.

Referenčný dizajn obsahuje súbor nezávislých úloh a im príslušiacich služieb v zmysle BLE, z ktorých každá obsluhuje jeden prvok kitu SensorTag (čidlo, LED, bzučiak, tlačidlo..). Vonkajšia idea je taká, že užívateľ pripojený cez BLE ku kitu má možnosť ovládať prostredníctvom jednotlivých služieb jednotlivé prvky. Väčšina služieb vychádza z rovnakej šablóny. Šablóna obsahuje okrem povinných charakteristík GATT frameworku: read/write charakteristiku pre aktiváciu/deaktiváciu prvku, read/write charakteristiku pre konfiguráciu prvku (perioda snímania), notifikačnú charakteristiku pre prenos nasnímaných dát.

Pomocou týchto služieb a ich charakteristík má pripojený užívateľ možnosť ľubovoľne aktivovať/deaktivovať jednotlivé senzory, v obmedzenom rozsahu nastavovať periódu merania, čítať a prijímať notifikácie nameraných dát. Neaktivované senzory sú v stave spánku a ich vlákna sú pozastavené, takže dizajn je energeticky efektívny.

Vďaka širokým možnostiam tohto dizajnu a jednoduchosti úprav pre potreby konrétnej aplikácie, bude firmvér výsledného systému vychádzať z referenčného dizajnu.

4.3 Desktopová aplikácia

Pre implementáciu desktopovej časti systému bola zvolená technológia Microsoft .NET Framework v kombinácií s jazykom C#. Táto technológia poskytuje nástroje zapuzdrujúce Bluetooth API systému Windows a umožnuje prácu s BLE na úrovni služieb a charakteristík. Navyše všetko vrámci frameworku určenom pre tvorbu GUI a desktop aplikácií.

4.3.1 Weather Underground

Weather Underground (Wunderground) je komerčná služba pre monitorovanie a predpoveď počasia prostredníctvom internetu. Okrem iného poskytuje aj zázemie pre sieť amatérskych automatických meteorologických staníc. Majiteľ takejto stanice má možnosť výmenou za svoje dáta sa zadarmo pripojiť do komunity takýchto staníc, zdieľat svoje namerané dáta a využívať výhody, aké takáto rozšírená komunita poskytuje.

Množstvo komerčných meteorologických staníc (resp. softvér pre ich obsluhu) poskytuje implicitne podporu pre zdieľanie dát na tomto portáli.

Portál sprístupňuje svoje služby cez jednoduché webové API založené na protokole HTTP. Výsledný systém bude poskytovať podporu pre zdieľanie dát na tomto portáli.

4.4 Blokový návrh

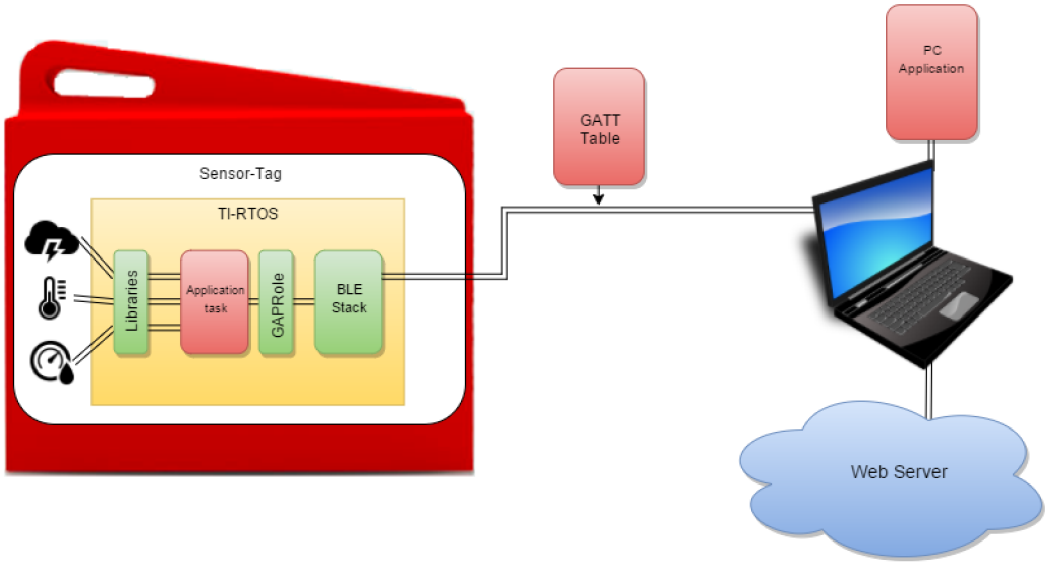
Ako základ pre firmvér bude slúžiť referenčný dizajn kitu SensorTag, resp. tri služby a im príslušné vlákna - teplotný senzor, barometrický senzor a vlhkomer.

Nakoľko sa nepredpokladá, že spolu s meteo stanicou bude neustále bežať aj klientská aplikácia na PC, bude treba upraviť tieto služby tak, aby merali dáta nezávisle na pripojení ku klientovi a aby sa na kite uchovávala história meraní od posledného pripojenia. Táto história sa potom nárazovo prenesie klientovi.

Ako rozhranie medzi klientskou aplikáciou a službami na kite bude treba navrhnúť vhodný aplikačný protokol, umožňujúci nárazovo prenášať väčšie množstvo dát podľa potreby (história meraní).

Desktopová aplikácia na PC bude cez tento protokol komunikovať s kitom, uchovávať namerané dáta, vhodným spôsobom ich zobrazovať užívateľovi a umožňovať zdieľanie na portáli Wunderground.

Blokový návrh výsledného systému je na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1: Blokový diagram navrhnutej aplikácie.

Kapitola 5

Implementácia systému

Kapitola popisuje spôsob, akým boli jednotlivé časti systému implementované. Predstavuje zaujímavé časti riešenia a popisuje prípadné problémy, ktoré pri implementácií nastali a ich riešenie.

5.1 Firmware

Firmware aplikácie pre kit SensorTag je napísaný v jazyku C. Ako základ firmwaru bol použitý referenčný dizajn aplikácie SensorTag. Z neho boli vybraté tri aplikačné vlákna pre obsluhu použitých senzorov a upravené pre potreby aplikácie. Drivery pre komunikáciu so senzormi poskytol TI-RTOS.

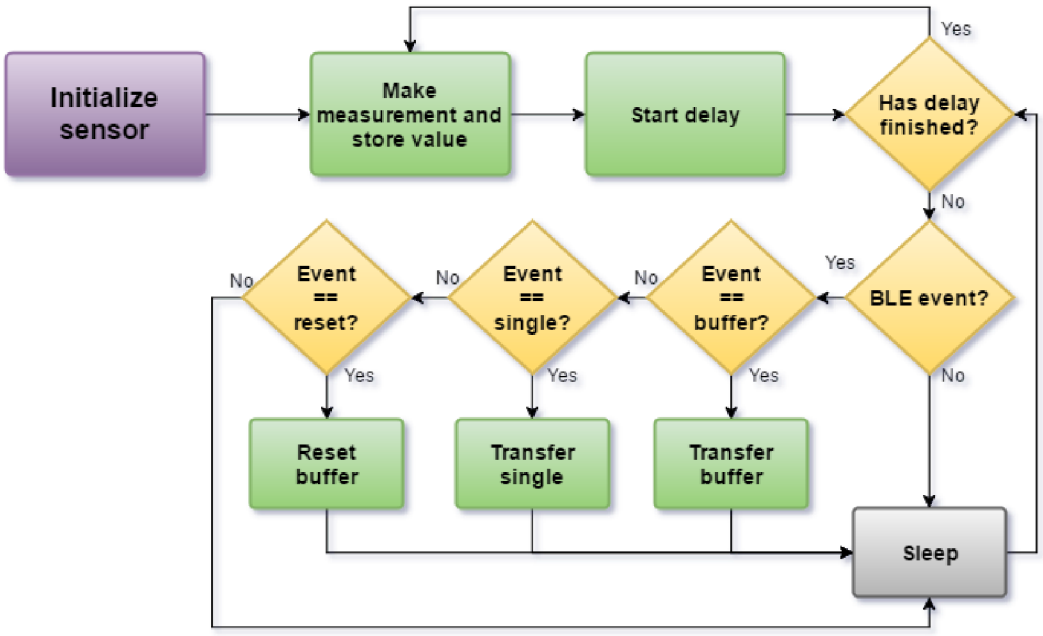
5.1.1 Aplikačné vlákna

Aplikačné vlákna pre jednotlivé použité čidlá sú implementované v súboroch `SensorTag_Bar.c`, `SensorTag_Hum.c` a `SensorTag_Tmp.c`. Každé vlákno obsahuje okrem podporných funkcií a makier jednu inicializačnú funkciu, ktorá po štarte úlohy zaregistruje callbacky pre eventy od BLE, inicializuje počiatočné hodnoty charakteristík a inicializuje driver senzora. Ďalej obsahuje funkciu `static void sensorTaskFxn(UArg a0, UArg a1)`, ktorá obsahuje hlavnú slučku vlákna, funkciu `void processCharChangeEvt(uint8_t paramID)`, ktorá obsluhuje príchodzí event od BLE a funkcie `static void transferBuffers()` a `static void resetBuffer()`, ktoré obsluhujú jednotlivé funkcionality aplikačného protokolu popísaného nižšie.

Hlavná slučka vlákna má nasledovný priebeh. Na začiatku sa kontaktuje driver senzora a vyžiada sa meranie. Po uplynutí doby merania stanovenej datasheetom konrétneho čidla sa pomocou drivera prečítajú namerané hodnoty z registrov senzora. Získané dáta sa uchovajú do bufferu a slučka čaká stanovenú dobu do začiatku nového merania. Táto slučka môže byť prerušená príchodzím eventom od BLE, indikujúcim zmenu riadiacej charakteristiky. Na základe hodnoty riadiacej charakteristiky sa vykoná príslušná akcia podľa aplikačného protokolu popísaného v sekcii 5.1.2.

Blokový diagram behu aplikačného vlákna je na znázornený na obrázku 5.1.

Namerané dáta sa uchovávajú do dátovej štruktúry podobnej kruhovému bufferu. Ide o staticky alokované pole a jeho aktívny index. Keď sa pole naplní, novo zapisované položky prepisujú najstaršie. V tejto implementácií má pole veľkosť 128 položiek – pri 5 minútovom intervale má teda pamäť pre viac ako 10 hodín merania.



Obrázok 5.1: Blokový diagram behu aplikačného vlákna.

5.1.2 Aplikačný protokol

Motiváciou pre vytvorenie aplikačného protokolu popisovaného v tejto sekcii bola potreba nárazovo prenášať vopred neznáme množstvá dát – históriu meraní uchovávaných v kite. Logickým krokom pri jeho návrhu bolo zapuzdrenie už všetkej potrebnej funkcionality nad frameworkom GATT do tohto protokolu. Klient má teda možnosť komunikovať so všetkými troma službami prostredníctvom jednotného rozhrania.

Aplikačný protokol je postavený nad službou frameworku GATT minimálne nasledovnej štruktúry – jedna notifikačná charakteristika pre prenos dát preddefinovanej šírky a jedna read/write charakteristika o šírke 1B ako riadiaci prvok. Prenosová charakteristika má štandardný nulový stav. Riadiaca charakteristika má štandardný stav 0x00. Komunikáciu nad protokolom inicializuje klient zápisom do riadiacej charakteristiky. Protokol rozlišuje štyri riadiace stavy:

- 0x00 – štandardný (neaktívny) stav
- 0x01 – žiadosť o prenos celého bufferu
- 0x02 – žiadosť o prenos najnovšej hodnoty
- 0x03 – žiadosť o reset bufferu

Po prijatí žiadosti o prenos najnovšej hodnoty (0x02) zapíše kit do prenosovej charakteristiky poslednú hodnotu z bufferu a táto tam zostane až kým klient nevynuluje riadiacu charakteristiku (prechod späť do neaktívneho stavu).

Po prijatí žiadosti o reset bufferu (0x03) kit resetuje index bufferu. Ďalšie žiadosti je možné obslúžiť až po opätovnom vynulovaní riadiacej charakteristiky.

Po prijatí žiadosti o prenos celého bufferu (0x01) kit zapíše do prenosovej charakteristiky aktuálny rozsah (počet hodnôt) prenášaného bufferu. Následne počká 75 ms

(`BUFFER_TRANSFER_PREAMBLE_DELAY`) a v cykle nad bufferom v každej iterácií: zapíše do prenosovej charakteristiky aktuálnu hodnotu a počká 25 ms (`BUFFER_TRANSFER_DATA_DELAY`). Dáta sa prenášajú v poradí od najstaršieho po najnovšie. Po prenose všetkých položiek sa vynuluje prenosová charakteristika a ďalšie žiadosti je možné obslúžiť až po opätovnom vynulovaní riadiacej charakteristiky.

5.1.3 Spotreba energie

V nižšie uvedenej tabuľke uvádzam približnú spotrebu energie kitom SensorTag v rôznych fázach činnosti firmware. Celková výdrž batérie však bude závisieť na viacerých faktoroch. Tým najdôležitejším je samotná kapacita batérie – počítame s obvyklou kapacitou článku CR2032 okolo 210-225 mAh [18]. Existujú aj články označované ako tzv. High Capacity, je možné že ich kapacita bude o niečo vyššia. Ďalším dôležitým faktorom je umiestnenie meracieho modulu a to z dvoch dôvodov. Ak meriame vonkajšie podmienky a kit je vystavený nízkym teplotám alebo naopak priamemu slnku a vysokým teplotám, batéria degraduje a jej životnosť sa znižuje. Druhým dôvodom je dostupnosť pre manipuláciu z dôvodu manuálneho spustenia BLE propagácie. Vo firmware je možné nastaviť, že sa propagácia po cca 1 minúte automaticky vypne – toto je implicitný stav. Ak je však zariadenie umiestnené na menej dostupnom mieste a bolo by nepohodlné pri každom pripojení manuálne aktivovať tlačidlom propagáciu, je možné ju nechať zapnutú neustále – takéto nastavenie ale negatívne ovplyvní spotrebu energie a výdrž batérie.

Namerané hodnoty ukazujú, že kapacita bežného článku by mala byť dostatočná pre 2-3 mesiace nepretržitej činnosti.

Tabuľka 5.1: Orientačné hodnoty spotreby energie v rôznych fázach činnosti.

Fáza činnosti	Spotreba
Idle	0.12 mA
Meranie vlhkosti	0.35 mA
Meranie tlaku	0.35 mA
Meranie teploty	1.0 mA
Prenos dát	0.65 mA

Uvedená tabuľka ukazuje namerané hodnoty spotreby energie v rôznych fázach činnosti. Výsledky sú merané bežným multimetrom, ktorého presnosť pri takýchto meraniach je skôr orientačná a tak by sa malo k výsledkom aj pristupovať.

5.2 Klient

Klient predstavuje v tejto práci desktopovú PC aplikáciu, obsluhujúcu implementovanú funkcionalitu kitu. Aplikácia je napísaná v jazyku C# s využitím frameworku .NET, ktorý poskytuje nástroje pre prácu s Windows Bluetooth API na úrovni služieb a charakteristík v zmysle GATT. Pre vytvorenie užívateľského rozhrania je využitý framework WPF.

5.2.1 Knižnica SensorTag

Komunikácia s kitom SensorTag pomocou vyššie popísaného aplikačného protokolu je zapuzdrená v DLL knižnici SensorTag. Knižnica obsahuje triedu SensorTagConnection, ktorá obsahuje metódy pre pripájanie, odpájanie, zápis/čítanie hodnôt z podporovaných charakteristík, ale aj metódy vyššej úrovne poskytujúce funkcionalitu aplikačného protokolu.

GUID adresy jednotlivých služieb podľa aktuálneho firmvéru sú obsiahnuté priamo v triede SensorTagConnection. Pripojenie sa realizuje vytvorením inštancie triedy SensorTagConnection a zavolaním metódy `async void Connect(GeneralCallback callback)`. Metóda vyhľadá v dosahu zariadenie propagujúce žiadané služby, pripojí sa k nemu a vytvorí zoznam potrebných charakteristík. Po úspešnom pripojení zavolá poskytnutý callback.

Väčšina funkcionality triedy SensorTagConnection je navrhnutá systémom štartovacia funkcia - callback. Je to kvôli trom hlavným dôvodom:

- väčšina metód tried `GattDeviceService` a `GattCharacteristic` (triedy frameworku .NET) je implementovaných asynchrónne
- GATT notifikácie od zmenenej charakteristiky sú asynchrónne udalosti
- funkcionality aplikačného protokolu ako prenos bufferu sú časovo relatívne náročné operácie

Vďaka tomuto prístupu môže byť práca s triedou SensorTagConnection neblokujúca - namiesto čakania na hodnotu, či dokončenie operácie sa riadenie vráti volajúcemu a po dokončení sa zavolá obslužná funkcia (callback).

Popíšem to na príklade prenosu jedinej hodnoty z bufferu teplomeru. Klient požiada o prenos volaním metódy `void RequestSingleTemperatureValue(GeneralCallback callback)`. Metóda zapíše do riadiacej charakteristiky odpovedajúci príkaz a vráti riadenie. Keď kit zapíše do notifikačnej charakteristiky vyžiadanú hodnotu, charakteristika vyšle notifikáciu o zmene. Táto notifikácia je zaznamenaná triedou `GattCharacteristic` a preposlaná funkcii `async void TemperatureChangedEventHandler(...)`, ktorá je prihlásená na odber notifikácií z danej charakteristiky. Táto funkcia spracuje prijatú hodnotu, uloží ju ako atribút objektu a zavolá callback predaný klientom na začiatku operácie. Následne môže klient metódou `double GetConvertedTemperatureSingleValue()` prečítať prenesenú hodnotu konvertovanú na typ `double`.

Prenos bufferu je realizovaný rovnakým spôsobom, je však potrebné riešiť správnu identifikáciu prichádzajúcich notifikácií a odlíšenie dátových "paketov"od riadiacich. Na to bol implementovaný systém takzvaných tiketov. Pre obsluhu notifikácie musí mať operácia voľný aspoň jeden tiket. Obsluhou notifikácie sa vždy jeden tiket spotrebuje. Na začiatku každého prenosu sa operácií pridelí práve taký počet tiketov, ktorý je potrebný na jej realizovanie – najčastejšie ide o 1 tiket pri začiatku prenosu. Podľa typu prenosu sa pri obsluhe prvej notifikácie môže počet tiketov navýšiť o počet prenášaných hodnôt. Týmto spôsobom je zaručená synchronizácia notifikácií odosielaných kitom a prijímaných klientom. Prenosová operácia obslúži práve taký počet notifikácií, ktorý jej prináleží a zároveň dokáže podľa počtu zostávajúcich tiketov odlíšiť riadiace a dátové notifikácie – a tým napríklad vo vhodnom momente operáciu ukončiť a zavolať príslušný callback.

Pri používaní metód triedy SensorTagConnection je vhodné prideliť operácií určité časové okno - ak po jeho uplynutí nebol invokovaný príslušný callback, je možné operáciu prehlásiť za neúspešnú. Veľkosť časového intervalu závisí od konkrétnej implementácie aplikačného protokolu – obecne je to

$$T_{OPERATION} = T_{PREAMBLE} + (BUFFER_SIZE * T_{TRANSFER}) + T_{RESERVE}$$

5.2.2 Uchovávanie histórie

Pôvodný návrh počítal so serializáciou histórie merania do súborov niektorého serializačného formátu (JSON, XML). Po návrhu vedúceho práce bola nakoniec história merania implementovaná s využitím lokálnej databázy.

História sa ukladá do lokálnej databázy Microsoft SQL Server. Pre prácu s databázou a ORM mapovanie je využitý Entity Framework. Hlavným prvkom histórie je trieda `WeatherRecord`, ktorá uchováva záznam o počasí v jednom momente histórie. Uchováva časovú známku záznamu a teplotu, vlhkosť a tlak v type `double`. Táto trieda je pomocou Entity Frameworku mapovaná do databázy.

Za zmienku stojí mapovanie preneseného bufferu na časové známky. Nakoľko kit SensorTag nemá informácie o reálnom čase, ani záznamy prenášaného bufferu nemajú informáciu o absolútnom čase. Ak však poznáme chronológiu preneseného bufferu a periódu merania, vieme jednotlivé záznamy spätne namapovať na reálny čas, začínajúc aktuálnym časom mínus perióda merania, pokračujúc postupne po jednotlivých záznamoch.

Pre určitú uniformitu sa záznamy mapujú na časové známky zaokrúhlené vždy na celú päťminútu (pri perióde merania 5 minút). Odchýlka medzi časovou známkou záznamu a skutočným časom tohto merania sa teda môže pohybovať v intervale $\langle 0, 5)$ minút, v závislosti od rozdielu času prenosu a poslednej celej päťminúty. Pre meteorologické účely je takáto presnosť dostatočná a dosiahnutá uniformita dát zjednodušuje prácu.

5.2.3 Trieda Wunderground

Pre prenos dát do aplikácie Weather Underground bola implementovaná trieda Wunderground, zapuzdrujúca konverziu objektu `WeatherRecord` do podoby pre webové API a samotnú komunikáciu so serverom cez protokol HTTP. Pre upload dát do aplikácie Wunderground je nutné mať na portáli vytvorenú amatérsku meteostanicu a mať k dispozícií jej ID a prístupový kľúč. Po poskytnutí týchto údajov je možné do triedy nahrať želaný záznam a zavolať metódu `bool Upload()`, ktorá vracia úspešnosť operácie.

5.2.4 Užívateľské rozhranie

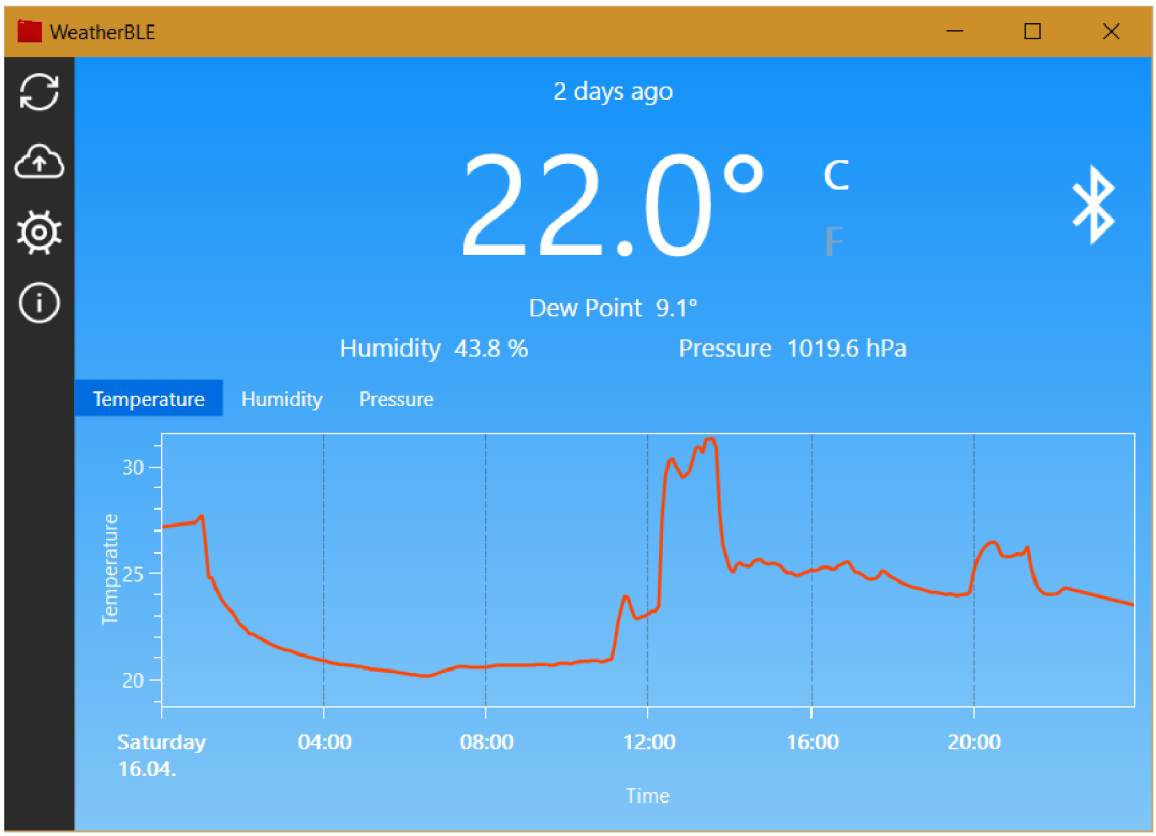
Užívateľské rozhranie je implementované vo frameworku WPF, frontend napísaný v jazyku XAML a code-behind v jazyku C#. Je navrhnuté ako jednookienková aplikácia, zaberajúca implicitne cca ¼ obrazovky. V ľavej časti sa nachádza vertikálny toolbar, v strednej časti informácie o aktuálnom stave počasia a aplikácie, v dolnej časti grafy jednotlivých veličín v čase. Podoba užívateľského rozhrania je na obrázku 5.2.

Toolbar v ľavej časti obsahuje 4 tlačidlá. Prvé tlačidlo slúži na obnovenie dát – aplikácia sa pripojí ku kitu SensorTag, prenesie uložené buffre, namapuje doposiaľ neuložené záznamy a aktualizuje GUI.

Druhé tlačidlo slúži na synchronizáciu naposledy prenesených dát s portálom Wunderground.

Tretie tlačidlo zobrazí nastavenia aplikácie – je možné špecifikovať ID a prístupový kľúč k portálu Wunderground, mód synchronizácie s Wunderground (jeden záznam / všetky záznamy). Ďalej je možné špecifikovať nadmorskú výšku – pokiaľ je zadaná, tlak sa bude zobrazovať prepočítaný na hladinu mora.

Posledné tlačidlo zobrazí informácie o aplikácií.



Obrázok 5.2: Grafické užívateľské rozhranie aplikácie.

V pravej hornej časti sa nachádzajú informácie o aktuálnom počasí. Tieto vychádzajú z posledného preneseného záznamu. Zobrazuje sa čas merania tohto záznamu, teplota vzduchu, dopočítaný rosný bod, relatívna vlhkosť vzduchu a atmosférický tlak. Atmosférický tlak sa v závislosti od nastavenia zobrazuje buď ako absolútny tlak alebo relatívny tlak (prepočítaný na hladinu mora). V pravej časti sa nachádza symbol Bluetooth, ktorý pulzovaním indikuje aktívne spojenie s kitom a progress barom aktívny prenos. Užívateľ má priamo vedľa aktuálnej teploty možnosť zmeniť jednotku zobrazenej teploty.

V pravej dolnej časti sa nachádza blok s troma kartami – pod každou kartou sa nachádza graf príslušnej veličiny v čase. Zobrazenie grafov je realizované použitím knižnice OxyPlot. Táto knižnica umožňuje zobrazovanie rôznych druhov grafov a do určitej miery interaktívnu manipuláciu. Poskytuje široké možnosti prispôsobenia a grafických úprav – široká funkcionalita je ale bohužiaľ takmer nedokumentovaná.

Zobrazené grafy jednotlivých veličín je možné interaktívne posúvať, približovať a vzďalovať, skúmať presné hodnoty v jednotlivých časoch a podobne.

5.3 Zhodnotenie implementácie

Implementovaný systém spĺňa všetky požiadavky špecifikované zadaním. Meteorologická stanica v podobe vývojového kitu SensorTag je schopná autonómne zbierať meteorologické údaje o prostredí. Po pripojení bezdrôtovým protokolom k PC vybavenom technológiou Bluetooth LE je možné namerané údaje zobrazovať v atraktívnom užívateľskom rozhraní, analyzovať a uchovávať v interaktívnych grafoch a zdielať na najpoužívanejšom meteorologickom portáli.

Spomeniem niektoré nevýhody plynúce zo zvolenej implementácie. Pri zdieľaní dát na webovom portáli je bežné, že dáta sa nahrávajú na server v reálnom čase. Takéto riešenie by však vyžadovalo neustále bežiaci PC s periodickou aktualizáciou dát, čo je v rozpore so zadaním, ktoré požadovalo systém nezávislý na neustálom pripojení k PC. Riešením by mohlo byť použitie novej verzie kitu SensorTag, podporujúcej pripojenie cez Wi-Fi (v čase písania tejto práce tento kit ešte nebol dostupný). Zdieľanie dát na server by sa tak mohlo diať priamo v kite SensorTag, bez potreby prostredníka (PC).

Ďalšou nevýhodou je obmedzená kapacita bufferov jednotlivých veličín, daná veľkosťou pamäte pridelenou jednotlivým úlohám v zmysle RTOS. Riešením by mohlo byť využitie flash pamäte kitu, prípadne iné externé riešenie.

Možnosti ďalšieho rozšírenia sú široké. V prvom rade by mohlo ísť o zapojenie ďalších čidiel z kitu SensorTag, napríklad svetelný senzor. Pripojenie externých senzorov je možné, avšak nastávajú pri ňom nevýhody. Samotný kit SensorTag neobsahuje piny pre pripojenie vlastných zariadení. GPIO piny mikrokontroléru sú dostupné po pripojení debugovacej sondy. Táto sonda však vyžaduje vlastné napájanie cez USB port, čím sa stráca elegancia a flexibilita miniatúrneho bezdrôtového zariadenia.

Kapitola 6

Rozšírenie zadania

Nad rámec zadania tejto práce som sa venoval skúmaniu možností využitia kitu SensorTag v ďalších aplikáciách. Zvažoval som možnosť pripojenia externého senzora pre rozšírenie meraných veličín. Experimentoval som napríklad s ultrazvukovým vzdialenostným senzorom HC-SR04 [14] využiteľným pre meranie výšky snehovej pokrývky. Najväčšou nevýhodou takéhoto riešenia je už spomenutá absencia vývodov GPIO pinov mikrokontroléru na doske kitu SensorTag. Pre pripojenie externého senzora by bolo potrebné mať pripojenú debugovaciu sondu s USB napájaním, čím sa strácajú výhody bezdrôtovosti a kompaktnosti kitu, nehovoriac o tom, že zariadenia mimo puzdra sú značne citlivejšie na nepriazeň prostredia.

Nakoniec bolo rozhodnuté preskúmať ďalšiu alternatívu využitia. Ide o využitie kitu ako tzv. Shock Recorder – zariadenie využívané na monitorovanie podmienok pri preprave zásielok. Takéto zariadenie sa pri odoslaní vloží do zásielky a v priebehu prepravy meria a prípadne zaznamenáva fyzikálne veličiny dôležité pre zachovanie stavu zásielky. Najčastejšie ide o meranie preťaženia (G-Force) – odtiaľ názov Shock Recorder – u ktorého prekročenie limitných hodnôt indikuje neopatrné zaobchádzanie so zásielkou, pády a celkovo porušenie prepravných podmienok. Ďalej sa často merajú ďalšie veličiny ako teplota, prípadne vlhkosť a úroveň osvetlenia.

Existujúcim riešením sú napríklad produkty radu TRE od spoločnosti Newsteo [17].

Zariadenie typu SensorTag je na takéto určenie veľmi vhodné – svojimi kompaktnými rozmermi a hmotnosťou je možné ho vložiť do väčšiny zásielok, obsahuje všetky čidlá pre meranie potrebných veličín a bezdrôtová konektivita umožňuje napríklad využitie mobilných zariadení pre užívateľské rozhranie.

Príklad implementácie takéhoto zariadenia demonštrujem na využití svetelného čidla. Svetelné čidlo je možné použiť na detekciu neoprávneného otvorenia zásielky – pri otvorení zásielky sa zvýši úroveň osvetlenia na čidle a túto skutočnosť je možné zaznamenať. Implementácia pre kit SensorTag je podobná ako v meteorologickej stanici. Samotné začatie merania je oproti zapnutiu kitu oneskorené, aby mal užívateľ čas uzavrieť zariadenie do zásielky. Úloha RTOS v slučke meria aktuálnu hodnotu osvetlenia s frekvenciou 10 krát za sekundu. Pokiaľ nameraná úroveň prekročí experimentálne získanú prahovú hodnotu, zaznamená sa časová známka tohto prekročenia využitím funkcie `Clock_getTicks()`, ktorá vracia v 32 bitovej hodnote počet hodinových taktov od zapnutia mikrokontroléru [1]. Zá-

[1] Výpočet ukazuje, že 32 bitov u kitu SensorTag pretečie za približne 9 hodín. Pri reálnej aplikácií by bolo vhodné predĺžiť tento interval napríklad počítadlom pretečení alebo s využitím RTC modulu s vonkajšou inicializáciou.

roveň sa aktivuje červená LED dióda na doske kitu, indikujúca prekročenie povolených limitov. U kitu SensorTag tu nastáva menšia komplikácia z dôvodu, že svetelné čidlo je na doske umiestnené priamo vedľa červenej diódy. Tým pádom ďalšie merania sú výrazne ovplyvnené svitom tejto diódy. V demonstračnej aplikácií sa to rieši jednoducho zastavením merania pri prekročení limitov, v reálnej aplikácií by bolo vhodné zamyslieť sa nad inou užívateľskou indikáciou, ktorá neovplyvňuje výsledky ďalších meraní.

Testovanie ukázalo, že demonstračná aplikácia funguje správne berúc do úvahy jej jednoduchosť. Pri použití bežnej nepriehľadnej lepenkovej škatule zariadenie zaznamenalo a rozsvietením LED indikovalo aj letmé alebo čiastočné otvorenie škatule. Pri použití nástroja pre prácu s GATT, napríklad mobilnej aplikácie [1] alebo linuxového command line nástroja `gatttool` je možné zápisom hodnoty 0x01 do riadiacej charakteristiky získať 32 bitovú časovú známku tejto udalosti.

Hlbšie spracovanie tejto témy nedovolili časové možnosti, každopádne princíp bol demonštrovaný na optickom senzore. Podľa tohto príkladu by bolo možné implementovať využitie ďalších čidiel s rovnakým princípom. Využitie akcelerometra pre detekciu prudkých pohybov či voľného pádu by si vyžiadalo starostlivejšiu prípravu – najmä testovanie výstupných hodnôt v rôznych situáciách a následná identifikácia nebezpečných situácií a stanovenie prahových hodnôt. Pre zásielky s kritickou orientáciou by bolo možné využiť gyroskop v kombinácií s pevným umiestnením zariadenia vrámci zásielky na detekciu prílišného náklonu alebo zmien v orientácií. Po implementovaní vhodného užívateľského rozhrania by bolo možné takýto systém využiť v reálnom svete.

Kapitola 7

Záver

V predchádzajúcich kapitolách bolo čitateľovi najprv priblížené teoretické pozadie riešenia tejto práce. Pred započatím návrhu bola preštudovaná zvolená hardwarová platforma – vývojový kit SensorTag. Preskúmané boli vlastnosti jeho MCU a hlavne senzorov neskôr použitých v práci. Ďalej boli preštudované a porovnané tri vybrané bezdrôtové technológie a zdôvodnená voľba technológie Bluetooth Low Energy pre implementáciu v tejto práci.

Ďalším bodom bola analýza vývojových nástrojov a aplikačného prostredia kitu SensorTag. Bola preskúmaná referenčná aplikácia a na tomto základe bol vytvorený konceptuálny návrh výsledného systému.

Vrámci implementácie firmware bol navrhnutý aplikačný protokol pre komunikáciu PC s kitom a na jeho základe boli implementované tri aplikačné vlákna pre jednotlivé použité senzory, vychádzajúce z referenčného dizajnu. Vývojový kit slúži ako autonómny merací modul, ktorý pravidelne zaznamenáva a uchováva namerané hodnoty meteorologických veličín. Najdôležitejšou časťou aplikácie pre PC je knižnica SensorTag s triedou SensorTagConnection, ktorá implementuje funkcionalitu aplikačného protokolu na strane PC. S využitím tejto knižnice bola implementovaná desktopová GUI aplikácia, umožňujúca pripojenie k meraciemu modulu, prenos nameraných dát a zobrazenie užívateľovi. Ten má navyše možnosť dáta synchronizovať so známym meteorologickým portálom.

Implementácia bola otestovaná v skutočnom prostredí a po dobu niekoľkých dní bez problémov plnila svoj účel. Týmto boli splnené jednotlivé body zadania. Nad rámec zadania boli načrtnuté ďalšie možnosti využitia bezdrôtového vývojového kitu, konkrétne jeho využitie ako zabezpečovacieho zariadenia v zásielkovej doprave. Princíp bol demonštrovaný na využití optického senzora ako detektora neoprávneného otvorenia zásielky.

Pre pokračovanie v rámci diplomovej práce sa otvára mnoho možností. Jednou z najzaujímavejších môže byť implementácia tohto systému s využitím novej očakávanej verzie kitu SensorTag CC3200 WiFi, ktorá by mohla plniť bežné úlohy ako synchronizácia dát s webovým portálom alebo pravidelná záloha dát úplne autonómne – bez potreby pripojenia k PC.

Literatúra

[1] Blepixel Technologies: Mobilná aplikácia BLE Scanner. [online], 2016, Dostupné z: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.macdom.ble.blescanner.

[2] Bosch Sensortec: BMP280 Digital Pressure Sensor [datasheet]. 2015, Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmp280/BST-BMP280-DS001-12.pdf.

[3] Commons Wikimedia: Strain gauge (obrázok). Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strain_gauge.svg.

[4] Davis Instruments: Rodina staníc Davis Vantage Pro2. [online], 2016, Dostupné z: http://www.davisnet.com/weather/products/vantage-pro-professional-weather-stations.asp.

[5] DEMENTYEV, Artem, HODGES, Steve, Stuart TAYLOR a Joshua SMITH: Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario. In *Proceedings of IEEE International Wireless Symposium*, Beijing, China, 14-18.4.2013.

[6] FARAHANI, Hamid, Rahman WAGIRAN a Mohd N. HAMIDON: Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors – Open Access Journal [online]*, ročník 2014, č. 14: s. 7881–7939, ISSN 1424-8220.

[7] FERRO, Errina a Francesco POTORTI: Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison. *IEEE - Wireless Communications*, ročník 2005, č. 12: s. 12–26, ISSN 1536-1284.

[8] GOMEZ, Carles, Joaquim OLLER a Josep PARADELLS: Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology. *Sensors – Open Access Journal [online]*, ročník 2012, č. 12: s. 11734–11753, ISSN 1424-8220.

[9] HOLTON, James R. a Gregory J. HAKIM: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Londýn: Elsevier Academic Press, 2004, 407-413 s., ISBN 0-12-354015-1.

[10] HUSÁK, Miroslav: *Senzory v elektronice a informatice (prednáška)*. Praha: ČVUT FEL, 2008, Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/prednasky/07a%20Piezoodporove%20%20tlakov%82%20senzory.pdf.

[11] InvenSense: MPU-9250 Product Specification [datasheet]. 2014, Dostupné z: https://moderndevice.com/wp-content/uploads/2014/09/PS-MPU-9250A-01.pdf.

[12] LEE, Jin-Shyan, Yu-Wei SU a Chung-Chou SHEN: A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Taipei, Taiwan, 5-8.11.2007, ISBN 1-4244-0783-4, s. 46–51.

[13] Maxim Integrated: Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors. [online], 17.7.2002, Dostupné z: https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/871.

[14] Mikropik: Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 [datasheet]. Dostupné z: http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf.

[15] National Weather Service: Standardized Temperature Profile. [online], 21.11.2015, Dostupné z: http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/atmprofile.htm.

[16] Netatmo: Netatmo Weather Station. [online], 2012, Dostupné z: https://www.netatmo.com/en-US/product/weather-station.

[17] Newsteo: Produkty rady TRE. [online], 2016, Dostupné z: http://www.newsteo.com/en/data-logger/features/16g-shock-temperature-datalogger.php#features.

[18] Omnergy: Specification for Lithium battery Model CR2032. [online], Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1496885.pdf.

[19] Standex-Meder Eletronics: MK24 Reed Sensors [datasheet]. 2015, Dostupné z: https://standexelectronics.com/wp-content/uploads/datasheet_reed_sensor_MK24.pdf.

[20] TANIAR, David: *Encyclopedia of Mobile Computing and Commerce*. Londýn: Idea Group Inc., 2007, 273-276 s., ISBN 1599040034.

[21] TechTarget: Wireless protocols learning guide. [online], Sep 2007, Dostupné z: http://searchnetworking.techtarget.com/tutorial/Wireless-protocols-learning-guide.

[22] Texas Instruments: OPT3001 Ambient Light Sensor [datasheet]. 2014, Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf.

[23] Texas Instruments: CC2650 SimpleLink^{TM} Multistandard Wireless MCU [datasheet]. 2015, Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650.pdf.

[24] Texas Instruments: HDC1000 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor [datasheet]. 2015, Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1000.pdf.

[25] Texas Instruments: TMP007 Infrared Thermopile Sensor with Integrated Math Engine [datasheet]. 2015, Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/sbos685c/sbos685c.pdf.

[26] Texas Instruments: SimpleLink SensorTag: TearDown [online]. 2015-12-29 [cit. 2015-12-29], Dostupné z: http://go-dsp.com/sensorTag/tearDown.html.

[27] World Meteorological Organization: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Ženeva: World Meteorological Organization, 8 vydání, 2008, ISBN 978-92-63-10008-5.

Príloha A

Obsah CD

Priložený disk obsahuje zdrojové kódy jednotlivých častí aplikácie. Nižšie uvedená tabuľka popisuje obsah jednotlivých adresárov. Na disku sa nachádza súbor `navod.pdf`, ktorý obsahuje popis požiadaviek na systém a postup inštalácie.

Adresár	Popis
`Desktop App`	Obsahuje zdrojové kódy desktopovej aplikácie
`SensorTag - PackageSafety`	Obsahuje zdrojové kódy firmwaru pre kapitolu 6
`SensorTag - WeatherStation`	Obsahuje zdrojové kódy firmwaru hlavnej aplikácie
`Technicka_Zprava_pdf`	Obsahuje túto technickú správu vo formáte PDF.
`Technicka_Zprava_latex`	Obsahuje zdrojové kódy tejto technickej správy pre LaTeX

Príloha B

Návod na inštaláciu a použitie

Priložený disk obsahuje zdrojové kódy všetkých častí aplikácie. Firmware pre vývojový kit je umiestnený v adresári `SensorTag - Weather Station/`. Pre preloženie a naprogramovanie sú potrebné nasledovné prerekvizity:

- vývojové prostredie **Code Composer Studio** alebo online služba **CCS Cloud**
- debugovacia sonda **XDS1100**
- vývojový kit **SensorTag v2.0** (s MCU CC2650)

Pri preklade je vhodné využiť nasledovný postup:

1. Do vývojového prostredia importovať projekt referenčného dizajnu (SensorTag App)
2. Do adresárovej štruktúry nakopírovať priložené zdrojové súbory z tohto disku
3. Preložiť aplikáciu a naflashovať mikrokontrolér podľa postupov v konkrétnom vývojovom prostredí

Pri kopírovaní zdrojových súborov stačí nakopírovať nasledovné súbory z adresára `/SensorTag/Application/`: `SensorTag.c/.h`, `SensorTag_Bar.c/.h`, `SensorTag_Hum.c/.h`, `SensorTag_Tmp.c/.h`. Ostatné súbory neboli modifikované a nie je potrebné ich prepisovať.

Zdrojové kódy desktopovej aplikácie sú umiestnené v adresári `Desktop App/` v podobe solution pre MS Visual Studio 2015. Okrem samotného Visual Studia je pre preloženie a používanie aplikácie potrebné:

- do projektov `WeatherBLE.Services` a `WeatherBLE.Desktop` nainštalovať balík **Entity Framework**
- do projektu `WeatherBLE.Desktop` je potrebné nainštalovať balík **OxyPlot**
- mať nainštalovanú a bežiacu inštanciu **MS SQL Server** pre pripojenie k LocalDB
- na použitom zariadení mať k dispozícii technológiu **Bluetooth LE**

Samotné použitie aplikácie je veľmi jednoduché. Kit SensorTag začne merať veličiny hneď po vložení batérie – žiadne ďalšie nastavenia nie sú potrebné. Desktopová aplikácia sa po spustení pripojí k SQL Serveru, zhromaždí potrebné dáta a vykreslí UI (posledný stav, grafy). Pre prenos dát z kitu je potrebné stlačiť pravé tlačidlo na kite – na 1 minútu sa

zapne propagácia BLE indikovaná blikaním zelenej LED. Potom môžeme v aplikácií kliknúť na ikonu refresh. Aplikácia sa pripojí ku kitu a stiahne namerané dáta – pripojenie je indikované pulzovaním loga Bluetooth. Dáta sa uložia do DB a UI sa prekreslí automaticky hneď po ukončení prenosu.

V adresári `SensorTag - PackageSafety/` je umiestnený firware rozšírenia práce. V tomto prípade stačí do referenčného dizajnu nakopírovať iba súbory `SensorTag.c/.h` a `SensorTag_Hum.c/.h`. Ďalšie súbory nie sú pre funkcionalitu popísanú v práci potrebné.