

PRAKICKÁ IMPLEMENTACE GEOLOKACE V SÍTÍCH TYPU LORAWAN

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF GEOLOCATION IN LORAWAN

Jan Pospíšil, Radek Fujdiak.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně,

Technická 12, Brno 616 00

E-mail: {xpospi90, fujdiak}@vutbr.cz

ABSTRAKT

S příchodem zařízení internetu věcí (IoT) přichází na řadu nespočet možností jejich využití v každodenním životě člověka. Jedním ze zajímavých rozšíření lze nalézt v možnosti sledovat polohu těchto zařízení. IoT zařízení jsou mnohdy bateriově napájena, což znemožňuje využití GPS modulů pro geolokaci z důvodu vysoké energetické náročnosti. Z tohoto důvodu jsou hledány v IoT sítích nové možnosti. Tento článek se zabývá zkoumáním možností geolokace v nízkoenergetických bezdrátových sítích (LPWAN), resp. vybranou technologií LoRaWAN. Vzhledem k tomu, že LPWAN zařízení se vyznačují komunikací na velkou vzdálenost (km), je určení pozice těchto zařízení velmi přínosnou informací, např. při sledování pohybu zásilek. Nejprve jsou rozebrány obecné možnosti geolokace v LoRaWAN s výběrem vhodné metody pro tuto technologii. Ze srovnání byla zvolena metoda rozdílu časů příchodu (TDoA), která byla následně prakticky implementována. Dále je popsáno experimentální prostředí, včetně způsobu měření, použitého hardware i software. Článek se zabývá geolokací koncových zařízení pomocí TDoA a následně filtrací dat pro potlačení odlehklých výsledků. S využitím filtrace průměrováním klouzavých mediánů bylo dosaženo chyby určení polohy 467 m.

ABSTRACT

With the advent of internet of things (IoT) devices, there are countless ways of using them in everyday life. One of the interesting extensions can be found right in the ability to track the location of these devices. IoT devices are often battery-powered, which makes it impossible to use GPS modules for geolocation due to high energy consumption. For this reason, new possibilities are being sought in IoT networks. This paper deals with the exploration of geolocation possibilities in low-power wide-area-network (LPWAN), respectively long-range wide-area-network (LoRaWAN). Since LPWAN devices are characterized by long-distance communication (km), positioning of these devices is very useful information, e.g. movement parcel monitoring. This paper deals with the geolocation of end devices in wireless LoRaWAN technology. First, general geolocation methods in LoRaWAN technology are discussed with the selection of a suitable method for this technology. The comparison revealed the time-difference of arrival (TDoA) method as the best solution, which was subsequently implemented. The experimental environment is described, including the method of measurement, used hardware and software. The paper deals with the geolocation of end-devices using TDoA and subsequently data filtering to

suppress outliers. Using the moving median averaging a positioning error of 467 m was achieved.

KLÍČOVÁ SLOVA TDoA, geolokace, LoRaWAN, LPWAN, LoRa

KEYWORDS TDoA, geolocation, LoRaWAN, LPWAN, LoRa

ÚVOD

Se zvyšujícím se zájmem o zařízení internet věcí (IoT), tedy zařízení, která mají za cíl lidem zjednodušit jejich každodenní činnost, vznikají i různorodé požadavky na tato zařízení, podle požadované propustnosti, využití komunikační technologie, způsobu napájení a jiné. Protože pojem IoT ze široka zahrnuje zařízení s maximální rychlostí přenosu dat od jednotek bitů až po desítky megabitů za vteřinu, stejně tak se může lišit komunikační vzdálenost a doba výdrže [1]. Široce používané radiové technologie s krátkým dosahem (např. Wi-Fi, Bluetooth) nejsou uzpůsobeny pro scénáře, které vyžadují přenos na větší vzdálenosti (stovky metrů a více). Řešení založená na celulární komunikaci (mobilní síť – 3G, 4G a další) mohou poskytovat větší pokrytí, avšak jsou energeticky velmi náročné. Požadavky nově vzniklých IoT aplikací vedly ke vzniku nové bezdrátové technologie. LPWAN jsou nízkoenergetické (LP) sítě s rozsáhlým geografickým pokrytím (WAN) vyznačující se převážně nízkou přenosovou rychlostí. Zařízení, která implementují protokoly splňující tyto požadavky, by měla být levná. Zásadní je také dlouhodobá výdrž zařízení poháněného z baterie [2]. LoRaWAN (Long-Range WAN, tedy protokol pro komunikaci na velkou vzdálenost) je otevřený standard vytvořený LoRa aliancí, který definuje komunikační protokol a architekturu sítě. Tento standard je postavený nad fyzickou vrstvou proprietární modulace zvanou LoRa. Tato modulace je využita pro vytvoření bezdrátového komunikačního spojení na vzdálenost desítek km, při datové rychlosti až 11 kb/s a výkonu max. 14 dBm (v Evropě) [3]. LoRaWAN technologie je vhodná pro poskytnutí konektivity i pro bateriově poháněná chytrá zařízení, která naleznou využití nejen v monitoringu, logistice, dopravě a automatizaci. Jednou z možných přidaných hodnot LPWAN technologií, do kterých spadá i LoRaWAN, je poskytnutí služeb určení polohy koncového zařízení. Přestože technologie GPS (globální polohový systém) nabízí přesné lokalizační a navigační služby, tyto služby nelze provádět v podzemí, vnitřních a hustých městských prostředích kvůli propagaci signálu nehledě na vysokou energetickou náročnost. Z toho důvodu je hledáno alternativní řešení určení polohy bez nutnosti koncových zařízení využívat GPS systém [4].

Tento článek si klade za cíl blíže popsat možnosti určení polohy koncových zařízení v technologii LoRaWAN. V první kapitole jsou rozebrány možné geolokační metody, ze které je jedna vybrána a implementována. Ve druhé kapitole je pak blíže vysvětlen princip algoritmu. Dále následuje popis experimentálního prostředí, tedy jaký hardware a software byl využit. Poslední kapitole jsou rozebrány dosažené výsledky a popsán způsob optimalizace.

VÝBĚR VHODNÉ GEOLOKAČNÍ METODY PRO LORAWAN

Základní metody pro geolokaci bezdrátových koncových zařízení spočívají na principu pozorování určitých parametrů (např.: útlum signálu, doba šíření signálu, úhel) jinými

zařízeními (bránami), u kterých je poloha známá. Každá metoda pro geolokaci je pak závislá na určitém typu pozorování. Ze základních metod geolokace lze jmenovat tyto [5]:

- Rozdíl časů příchodu (TDoA) – kde je základem počítání rozdílných časů příchodu signálu z koncového zařízení mezi bránami. Tato metoda vyžaduje pro implementaci přesnou časovou synchronizaci brán.
- Čas příchodu (ToA) – základem je měření doby propagace signálu mezi bránou a koncovým zařízením. Metoda vyžaduje časovou synchronizaci brán i koncových zařízení.
- Úhel příchodu (AoA) – základem je sledování úhlu přichozícího signálu od koncového zařízení do brány pomocí směrových antén. Tato metoda vyžaduje více směrových antén na každé bráně.
- Síla přijatého signálu (RSSI) – základem je sledování útlumu signálu opět mezi bránou a koncovým zařízením. Tato metoda nevyžaduje žádné speciální rozšíření, avšak umožňuje pouze hrubé zaměření a pro přesnější výsledky musí být použita jiná metoda.

Z výše vyjmenovaných technik je tedy jednoznačné, že ne všechny jsou vhodné pro implementaci v LPWAN, a tedy i LoRaWAN. Pokud je vzata v potaz složitost implementace geolokace a zároveň limity použité komunikační technologie, lze pro LoRaWAN technologii využít hlavně techniky TDoA a RSSI. Obě tyto techniky jsou právě vhodné pro nasazení v LPWAN sítích, neboť řešení není finančně nákladné a není potřeba provést úpravu, ať už hardware nebo software na straně koncových zařízení. Veškeré úpravy jsou prováděny pouze na bránách. Tento článek se zaměřuje na možnosti geolokace pomocí metody TDoA, kde se přesnost této metody pohybuje v rozsahu od desítek metrů do stovek metrů. Nicméně metoda založená na TDoA nachází své nedostatky v podobě vícecestného šíření signálu, které zanáší chybu několika stovek metrů do výpočtu [6]. Vyšší přesnosti je možné dosáhnout ve venkovských oblastech, kde komunikace koncových zařízení s přijímači probíhá na přímou viditelnost a nedochází tak k odrazům signálu. Problémy vícecestného šíření spojené s městskými oblastmi pak snižují přesnost této techniky geolokace. Pokud je pro určení polohy v LoRaWAN síti aplikována metoda TDoA, tedy metoda založená na výpočtu z rozdílů časů příchodu rámců z koncového zařízení mezi jednotlivými přijímači (bránami), je GPS systém stále potřebný. Avšak problémy spojené s příjmem GPS signálu jsou omezeny pouze na LoRaWAN přijímače, neboť ty jej využívají pro časovou synchronizaci [4].

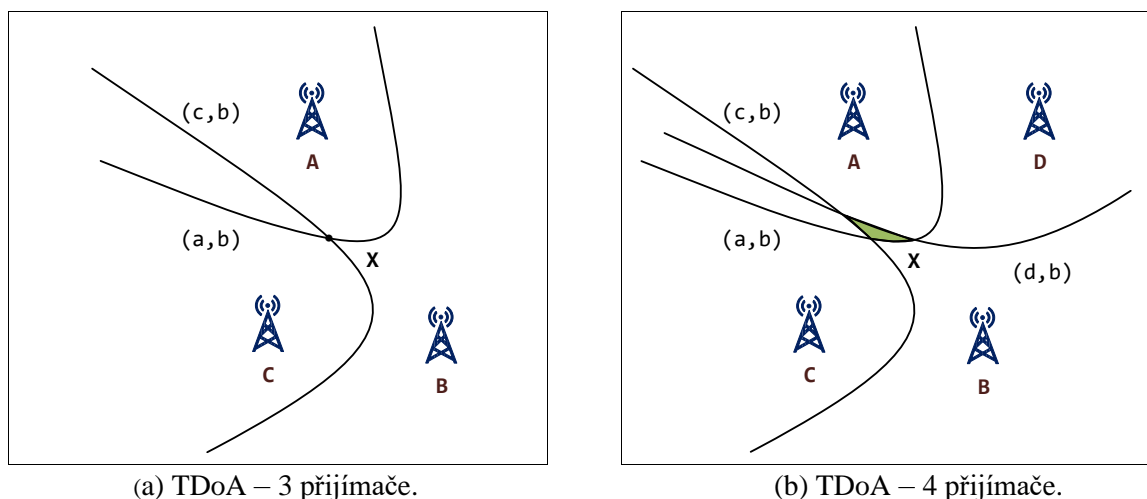
LORAWAN BRÁNY

Společnost Semtech aktuálně vlastní patent na LoRa modulaci a obstarává i výrobu integrovaných obvodů. O první patent požádala společnost Cycleo SAS v roce 2008, tato společnost však byla v roce 2012 odkoupena společností Semtech [7][8]. LoRaWAN brány však vyrábí řada výrobců různých značek. Obecně lze brány rozdělit do dvou kategorií. Do první kategorie spadají brány navržené podle referenčního designu verze 1 (V1), doporučeného společností Semtech. Tyto brány poskytují rozlišení časových značek přijímaných LoRaWAN rámců s přesností 1 μ s. Je však nutné podotknout, že pouze některé brány obsahují zabudovaný GPS přijímač pro časovou synchronizaci, nezbytnou pro umožnění geolokace [9]. Aktuálně (2019), ceny brán i se zabudovaným GPS přijímačem začínají od 400 \$ (Kerlink, Gemtech, Link Labs).

Do druhé kategorie spadají brány navržené podle referenčního designu verze 2 (V2). Tato verze oficiálně umožňuje lokalizovat koncová zařízení. Odlišnost oproti první verzi spočívá v rozšíření stávajícího hardware o integrovaný programovatelný logický obvod (FPGA), který umožňuje značkovat příchozí rámce s přesností jednotek nanosekund. Ceny těchto bran se však pohybují okolo 1400 \$ (Kerlink iBTS a Cisco IXM-LPWA-800-16-K9) [10]. Brány, které spadají do první kategorie, umožňují lokalizaci také, avšak je nutné počítat s jistými omezeními, které plynou z nižšího rozlišení časových razítek, neboť chyba o velikosti $1 \mu s \approx 300 \text{ m}$.

TEORIE GEOLOKACE

Metoda TDoA pracuje na principu rozdílu časů příchozího rámce vždy mezi dvěma bránami, který je vymezen trajektorií hyperboly. V průsečíku hyperbol se poté nalézá hledaný bod, tedy místo, ze kterého hledané koncové zařízení vysílalo. V případě tří přijímačů vzniknou dvě hyperboly (viz obr. 1a) a je tedy umožněna geolokace ve 2D prostoru. V případě více přijímačů, vzniká více hyperbol, hledané místo pak není jednoznačně určené a je nutné využít aproximačních technik (viz obr. 1b). Ve druhém případě lze nalézt střed oblasti s pomocí metody nejmenších čtverců.



Obrázek 1: Ukázka lokalizační metoda TDoA, kde A, B, C, D jsou brány, (a,b), (c, b), (d, b) jsou hyperboly mezi dvěma bránami a X je výsledný bod.

Pro samotný výpočet však nelze použít geodetické (zeměpisné) souřadnice uvedené ve stupních. Je tedy nutné převést vstupní souřadnice do systému, který využívá os X a Y a vzdálenost udávanou v metrech. Jednou z možností je univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic (UTM). Podle tohoto systému je zemský povrch rozdělen na 60 poledníkových zón. Střed každé zóny je tvořen průsečíkem rovníku se středovým poledníkem [11].

FANGŮV ALGORITMUS

Fangův algoritmus využívá systém souřadnic, kde je referenční brána (GW_1) umístěna do počátku souřadnic $[0,0]$. Druhá brána (GW_2) je umístěna na pozici $[X_2, 0]$ a třetí brána (GW_3) je umístěna v prostoru (neleží na žádné z os) na pozici $[X_3, Y_3]$. Algoritmus byl

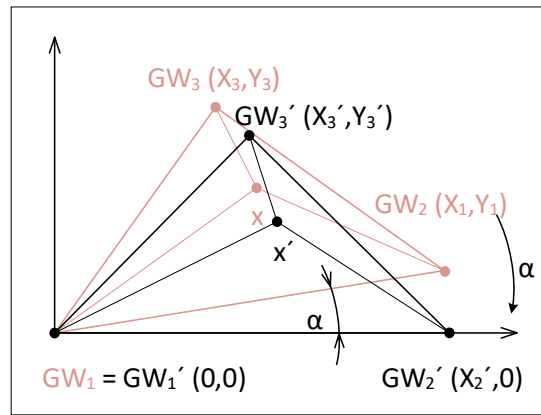
přebrán z [12]. Brána GW_1 má již předem definovanou pozici, ale souřadnice brán GW_2 a GW_3 jsou dopočítány podle následujících rovnic

$$X_{i,1} = X_i - X_1 = X_i, \quad (1)$$

$$Y_{i,1} = Y_i - Y_1 = Y_i, \quad (2)$$

$$R_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}. \quad (3)$$

Před samotným výpočtem polohy je však nutné provést ještě jeden krok, souřadnice brán musí být přeorganizovány z libovolného rozložení na výše definovanou formu. Tedy, že GW_1 a GW_2 musí ležet na ose X. Toho může být docíleno pomocí rotace celého objektu. Jak lze pozorovat na obr. 2.



Obrázek 2: Ukázka rotace souřadnic pro Fangův algoritmus.

Pro úkon rotace jsou použity následující vzorce

$$X' = \cos(\alpha) * X - \sin(\alpha) * Y, \quad (4)$$

$$Y' = \sin(\alpha) * X + \cos(\alpha) * Y. \quad (5)$$

kde X a Y jsou původní souřadnice, α udává velikost úhlu a X' a Y' jsou souřadnice nové. Nalezená pozice koncového zařízení x' , pak musí být přepočtena pomocí reverzní rotace na výslednou pozici x . Vzdálenost mezi hledaným bodem a i . bránou je vyjádřena následovně

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + 2Y_i y + x^2 + y^2}. \quad (6)$$

Úpravou při $i = 1$ vznikne následující rovnice

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y + x^2 + y^2. \quad (7)$$

S využitím rovnic (1-3) rovnice (7) může být přepsána do tvaru

$$2R_{2,1}R_1 = R_{2,1}^2 - X_2^2 - 2X_2x, \quad (8)$$

$$2R_{3,1}R_1 = R_{3,1}^2 - (X_3^2 + Y_3^2) + 2X_{3,1}x + 2Y_{3,1}y. \quad (9)$$

Po vyrovnaní (8) a (9) a zjednodušení výsledků

$$y = g * x + h, \quad (10)$$

kde

$$g = \{R_{3,1} - (X_2/R_{2,1}) - X_3/Y_3\}, \quad (11)$$

$$h = \{X_3^2 + Y_3^2 - R_{3,1}^2 + R_{3,1} * R_{2,1}(1 - (X_2/R_{2,1})^2)\}. \quad (12)$$

Dosazením (10) do (8) vznikne

$$d * x^2 + e * x + f = 0, \quad (13)$$

kde

$$d = -\{(1 - (X_2/R_{2,1})^2) + g\}, \quad (14)$$

$$e = X_2 * \{(1 - (X_2/R_{2,1})^2)\} - 2g * h, \quad (15)$$

$$f = -(R_{2,1}^2/4) * \{(1 - (X_2/R_{2,1})^2)\}^2 - h^2. \quad (16)$$

Nalezením kořenů kvadratické rovnice je nalezena výsledná souřadnice X hledaného bodu. Správný kořen je vybrán podle hodnoty $R_{2,1}$. Pokud $R_{2,1} < 0$, je použit kořen (17) v opačném případě je použit kořen (18)

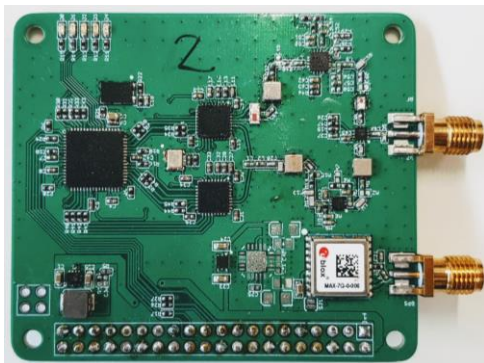
$$x_1 = \frac{-e + \sqrt{e^2 - 4df}}{2d}, \quad (17)$$

$$x_2 = \frac{-e - \sqrt{e^2 - 4df}}{2d}. \quad (18)$$

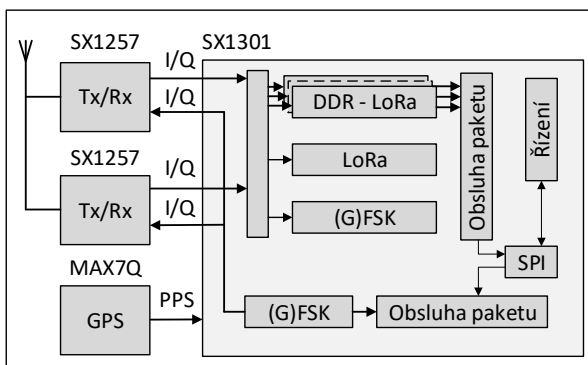
Vložení správného kořene X do rovnice (10) vede k nalezení chybějící souřadnice Y. Fang poskytuje přesné řešení pro 2-D hyperbolický systém s přesně 3 bránami. V případě více bran je možné vytvořit podmnožiny všech kombinací velikosti 3 a poté dopočítat polohu z každé podmnožiny. Výsledky lze porovnat a vybrat nejvhodnější na základě zadaných parametrů. Ve většině případů jsou vypočtené souřadnice koncového zařízení brány jako vstupní data pro komplexnější postupy, kde lze pomocí základních i pokročilejších algoritmů výsledky dále upravovat např. s využitím filtrů a statistických metod.

POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO PROSTŘEDÍ

Vzhledem k tomu, že referenční design V2 není veřejně dostupný a brány navržené podle tohoto designu jsou velmi nákladné na pořízení. Bylo přistoupeno k možnosti využít brány navržené podle referenčního designu V1. Jak již bylo popsáno sekci současného stavu geolokace, tyto brány neposkytují tak vysoké rozlišení časových rázitek příchozích LoRaWAN rámců, avšak stále je možnost využití těchto bran pro lokalizaci. Podmínkou pro umožnění geolokace je přesná časová synchronizace, které je dosaženo pomocí GPS signálu. Aktuálně dostupná zařízení na trhu (např. IMST iC880A-SPI a RAK833) však GPS synchronizací nedisponují.



Obrázek 3: Osazení vlastní brány.



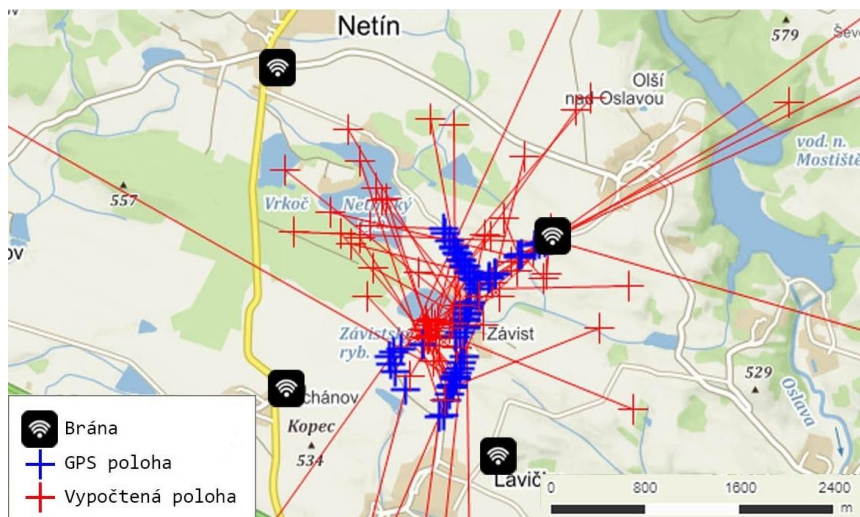
Obrázek 4: Blokové schéma koncentrátoru [9].

V rámci prohloubení znalosti z problematiky LPWAN, byly potřebné koncentrátoři (hardware brány obstarávající radiovou část) vlastnoručně zkonstruovány. Byly využity integrované obvody Semtech SX1301 operující v základním pásmu a dva obvody SX1257 zajišťující LoRa/FSK modulaci. Samotný koncentrátor dále komunikuje skrze sběrnici SPI s řídicím prvkem (např. Raspberry Pi). Náhled vytvořeného koncentrátoru viz obr. 3, základní blokové schéma pak obr. 4. Operační systém byl zvolen Raspbian, vzhledem k tomu, že je oficiálně podporován pro počítače Raspberry Pi. Nad ním běží open-source program *lora_pkt_fwd*, který zpracovává data z koncentrátoru a komunikuje se serverem. Dále bylo zkonstruováno koncové zařízení, nastavené tak, aby komunikovalo s bránou jednou za 30 vteřin (pro získání co nejvíce dat) a faktor rozprostření (spreading factor) na hodnotu 12. Pro možnost stanovení přesnosti odhadu bylo koncové zařízení osazeno GPS modulem a informace o poloze odesílalo v payloadu LoRaWAN rámcu.

Takto bylo následně možné porovnat polohu vypočtenou pomocí metody TDOA s polohou získanou pomocí GPS. Implementace výpočetního algoritmu byla provedena ve vývojovém prostředí Visual Studio v jazyce C#. Program byl doplněn o grafické prostředí, kde mohou být vizualizována zpracovaná data na mapovém podkladu s pomocí třídy *GMap.NET*.

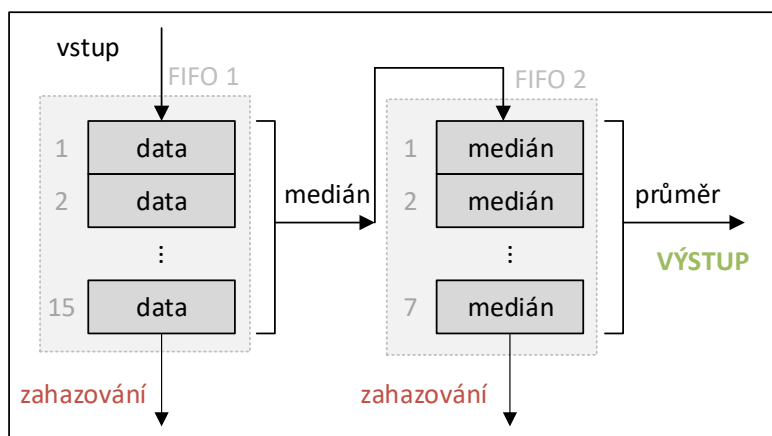
VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření proběhlo na venkově v mimo městské oblasti v kraji Vysočina, okrese Žďár nad Sázavou. Bylo využito čtyř bran. Jelikož se kolem obce Závist nachází čtyři další obce, byla v každé okolní obci umístěna jedna brána. Cílem bylo rozmístit brány tak, aby ležely na pomyslném kruhu a geolokace probíhala uvnitř toho kruhu. Jak lze pozorovat na obr. 5, červené body značí polohu vypočítanou, modré body pak polohu určenou pomocí GPS.



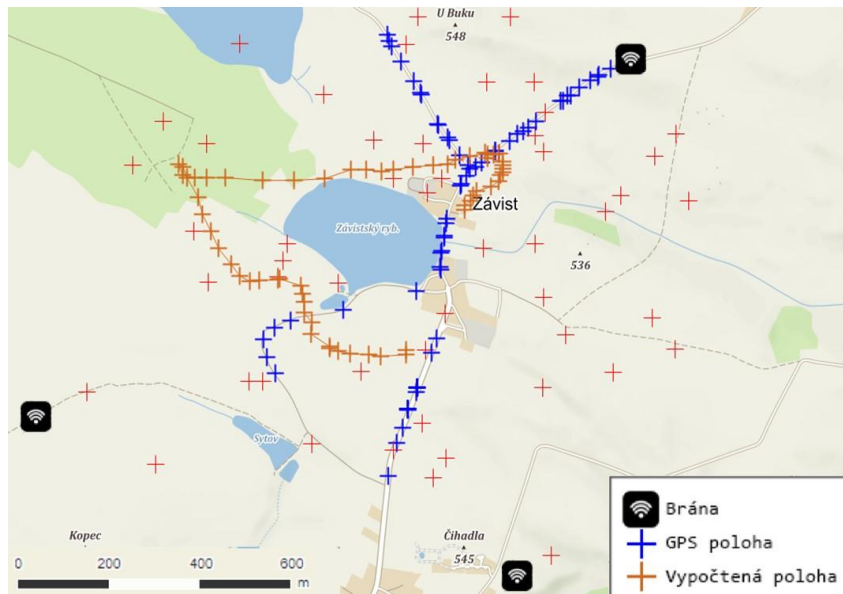
Obrázek 5: První výsledky TDOA výpočtu.

Výsledky výpočtu jsou velmi kolísavé, přičemž některé jsou i dosti odlehlé. Průměrná chyba odhadu tedy činí $\approx 10,5$ km. Průměrná chyba odhadu je však velmi ovlivněna zlomkem odlehlých výsledků, u kterých chyba přesahuje i více než 100 km. Vzhledem k naměřeným výsledkům byl aplikován filtr klouzavých průměrů mediánů, díky kterému dochází k vyhlazení ostrých přechodů a zároveň potlačení extrémů. Byly tedy vytvořené 2 FIFO (první dovnitř, první ven) fronty s fixní velikostí. Do první fronty o velikosti 15 hodnot jsou postupně vkládány výsledky výpočtu. Z této fronty je vybrána mediánová hodnota, která je přesunuta do druhé fronty o velikosti 7, která slouží pro průměrování (schéma viz obr. 6).



Obrázek 6: Filtr klouzavých průměrů mediánů.

Jelikož souřadnice sestávají ze dvou hodnot (zeměpisná šířka a zeměpisná výška), byly vytvořené dva nezávislé systémy FIFO front, jak pro zeměpisnou šířku, tak i pro zeměpisnou výšku. Na obr. 7 lze pak pozorovat, původní trasu určenou pomocí GPS (modrá) a vypočtenou trasu po filtraci (hnědá).



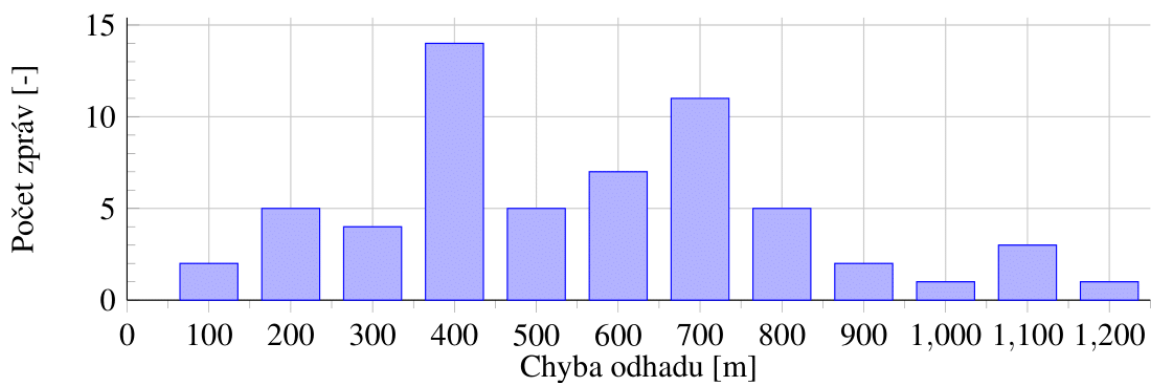
Obrázek 7: Výsledný odhad polohy po filtraci.

Srovnání průměrů výsledných chyb odhadu polohy v různých fázích zpracování dat (viz tab. 1), kde lze pozorovat, že největší vliv na chybu odhadu polohy má potlačení odlehlých výsledků. Následné průměrování již nemá takový vliv na samotnou přesnost, ale slouží pro vyhlazení přechodů mezi výsledky. Četnost chyb odhadu, viz obr. 8, kde lze pozorovat, že se odhadnutá poloha od té původní nejčastější liší o 400 m. Dále lze pozorovat, že největší chyba odhadu je 1200 m.

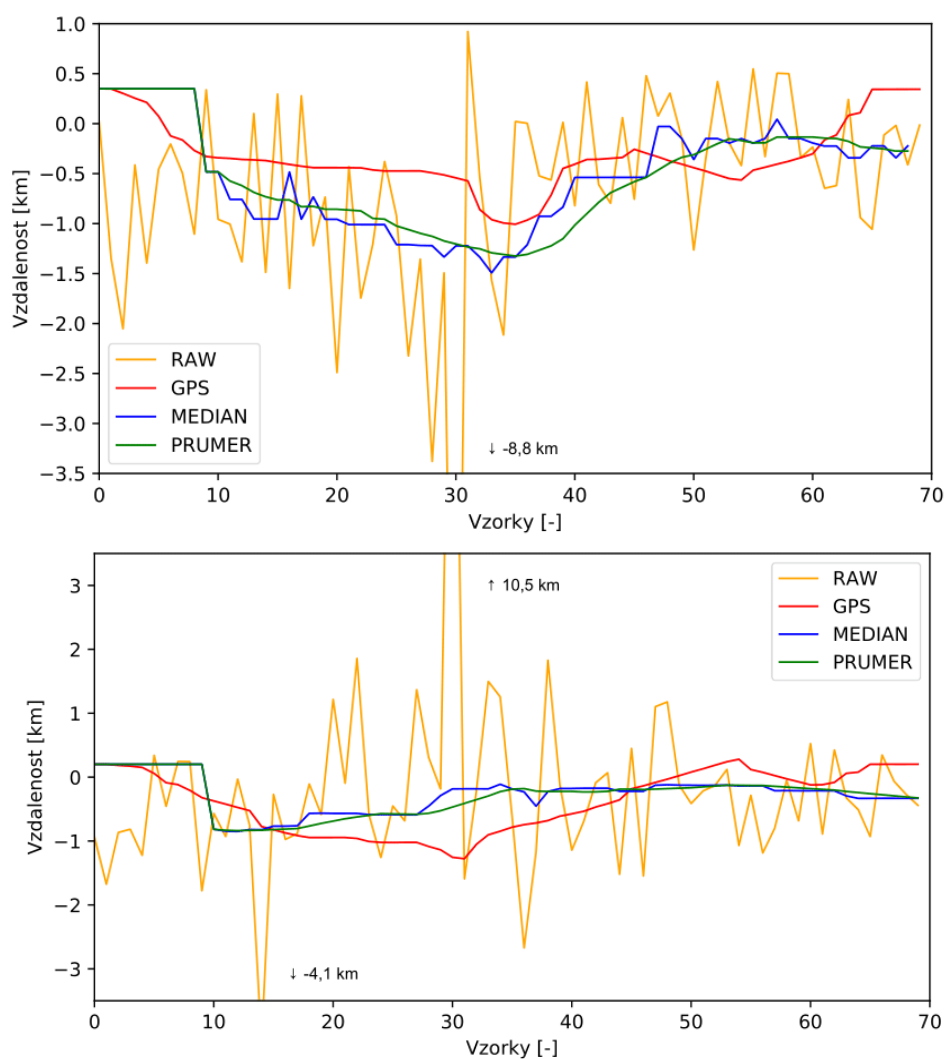
Tabulka 1: Srovnání průměrných výpočtů polohy

Data	Přesnost [m]
Surová data	10535,57
Klouzavý medián	506,03
Klouzavý průměr mediánů	467,97

V návaznosti na poměrně vysokou chybovost odhadu, byl proveden test, kde bylo cílem zjistit samotnou nepřesnost přidělovaných časových razítek. Celkem 4 brány byly venku rozmístěné do kruhu s průměrem 50 m, ve středu kruhu bylo umístěno koncové zařízení. Vzhledem k tomu, že by bylo technicky náročné zaznamenávat přesný čas vysílání a porovnávat ho s časovými razítky přijímacích bran, byly porovnány alespoň rozdíly zaznamenaných časů mezi bránami. Celkem bylo odesláno 1000 zpráv, nedošlo k žádné ztrátě. Časová razítka příchozích zpráv mezi bránami by měla být stejná, vzhledem ke stejným vzdálenostem mezi každou bránou a koncovým zařízením. Výsledek testu však ukázal, že čas mezi bránami se rozcházela průměrně o 5 μ s. Vzhledem k testovanému prostředí však nelze vliv vícecestného šíření signálu na celkové zpoždění popřít. Lze tedy vzhledem k povaze geolokace v LoRaWAN síti považovat filtr klouzavý průměr mediánů, za dostatečný. Na obr. 9 lze dále pozorovat kolísavost surových dat a následný vliv filtrace těchto dat v porovnání s opravdovými hodnotami (z GPS), grafy pro osu X a Y zvlášť. V případě, že je koncové zařízení staticky umístěno, lze efektivně filtrovat časovou nepřesnost bran. Vzhledem k použití klouzavého okna je geolokace zařízení v pohybu ovlivněna setrvačností, avšak vzhledem k limitům samotné technologie nikterak závažnou.



Obrázek 8: Histogram chyb určení polohy po filtraci.



Obrázek 9: Vliv filtrace na naměřená data (vrchní obr. osa X, spodní obr. osa Y).

ZÁVĚR

Tento článek se zabýval implementací geolokace koncových zařízení do technologie LoRaWAN. Kde jsou nejprve rozebrány obecné lokalizační techniky, dále je vybrána

vhodná metoda pro technologii LoRaWAN a ta je dále implementována. Vzhledem k tomu, že brány navržené podle referenčního designu V2 jsou velmi nákladné na pořízení, bylo přistoupeno k možnosti vyzkoušet lokalizaci na bránách navržených podle referenčního designu V1. Tyto brány se však potýkají s problémem nižšího rozlišení časových razítek přijímaných LoRaWAN rámců. Obecně je nutné, aby brány pro lokalizační metodu využívající TDOA techniku byly časově synchronizovány, toho bylo docíleno pomocí GPS modulu poskytujícího časovou referenci. Výsledky reálného testování ukázaly poměrně vysokou kolísavost a často odlehlé výsledky, kde se průměrná chyba pohybovala $\approx 10,5$ km. Následně byl proveden další test, který srovnával rozdíly časových razítek mezi čtyřmi bránami, které přijímaly příchozí LoRaWAN rámce ve stejný čas (brány ve stejné vzdálenosti). Výsledek prokázal rozdíly mezi časy průměrně 5 μ s. S využitím jednoduchého filtrování však bylo docíleno eliminace odlehlých výsledků a průměrná chyba se pohybovala ≈ 467 m. Vzhledem k tomu, že tato technika nevyžaduje žádná rozšíření na straně koncových zařízení, je i hrubé určení polohy velmi přínosnou a nenákladnou možností rozšíření služeb. Neboť v případě např. sledování pohybu zásilky kamionu, není přesnost až tak důležitým parametrem.

LITERATURA

- [1] KRANZ, Maciej. *Building the internet of things: Implement new business models, disrupt competitors, transform your industry*. John Wiley & Sons, 2016.
- [2] KNYAZEV, Nikolay S., Victor A. CHECHETKIN a Denis A. LETAVIN.: *Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network*, 2017 [online]. 2017, s. 1-4 [cit. 2018-10-11].
- [3] *LoRaWAN What is it?: A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. In: Semtech Corporation. 2015, s. 20 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z URL: <<https://bit.ly/2sgNOjs>>.
- [4] *LoRa Alliance Geolocation Whitepaper: LoRa Allianc Strategy Committee* [online]. In: LoRa Alliance, leden 2018, s. 15 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <<https://bit.ly/2P4W0zp>>.
- [5] DARDARI, D., A. CONTI, U. FERNER, A. GIORGETTI a M.Z. WIN. *Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments*. [cit. 2018-10-30]. ISSN 0018-9219.
- [6] FOKIN, Grigoriy. TDOA Measurement Processing for Positioning in Non-Line-of-Sight Conditions. In: *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*. IEEE, 2018. s. 1-5.
- [7] RAY, BRIAN. *What Is LoRa?: A Technical Breakdown* [online]. 2018 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <<https://bit.ly/2WUFYdy>>.
- [8] *LoRa™ Modulation Basics: AN1200.22* [online]. Semtech Corporation, květen 2015, 26 [cit. 2018-10-12]. Dostupné z: <<https://bit.ly/2THBqHa>>.
- [9] *WIRELESS & SENSING PRODUCTS: SX1301 Datasheet*. Semtech Corporation, 2017, červen 2017, s. 40 [cit. 2020-03-11].

- [10]HARWOOD, Trevor. *IoT Gateways: A comparison directory of Internet of Things* [online]. 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <<https://bit.ly/2WLu5X2>>.
- [11]B. LANGLEY, Richard. The UTM grid system. *GPS WORLD* [online]. únor 1998, s. 46 - 50 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <<https://bit.ly/3aRLWSb>>.
- [12]FANG, Bertrand T., et al. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 1990, 26.5: s. 748-753.