



## فرم تعریف پروژه فارغ التحصیلی دوره کارشناسی



تاریخ: .....

شماره: .....

عنوان پروژه: پیاده سازی و ارزیابی شبکه لورا در چند سناریو مختلف	
امضاء:	استاد راهنمای پروژه: دکتر مهدی راستی
<p>مشخصات دانشجو:</p> <p>نام و نام خانوادگی: امیررضا غفوری شماره دانشجویی: ۹۵۳۱۸۰۵</p> <p>گرایش: مهندسی کامپیوتر (شبکه، هوش مصنوعی) ترم ثبت نام پروژه: پاییز ۹۹</p>	
<p>داوران پروژه:</p> <p>۱- امضاء داور: ۲- امضاء داور:</p>	
<p><b>شرح پروژه</b> (در صورت مشترک بودن بخشی از کار که بعهدہ دانشجو می باشد مشخص شود):</p> <p>در این پروژه هدف ارزیابی کارکرد تکنولوژی ارتباطی LoRaWAN در کلان شهر تهران می باشد. این پروژه به دو قسمت کلی تقسیم می شود. در قسمت اول یک سیستم مبتنی بر LoRaWAN طراحی میشود که شامل یک دستگاه انتهایی، دو دروازه (Gateway) و پلتفرم لورا (TTN) می باشد. در قسمت دوم، سیستم پیاده سازی شده در چند سناریو مختلف که به دو دسته متحرک و ثابت تقسیم میشوند ارزیابی میشود.</p>	
<p><b>وسایل مورد نیاز:</b> برد آردوینو میکرو، مینی کامپیوتر رسپبری پای، ماژول رادیویی لورا (RF95)، ماژول متمرکز کننده iC880a، سنسور رطوبت و دما، آنتن، سیم جامپر، بردبرد</p>	
محل انجام پروژه: مرکز رشد، سطح شهر تهران	تاریخ شروع:

این قسمت توسط دانشکده تکمیل میگردد:

<p>تاریخ تصویب در گروه:</p> <p>تاریخ تصویب در دانشکده:</p> <p>اصلاحات لازم در تعریف پروژه:</p>	<p>اسم و امضاء:</p> <p>اسم و امضاء:</p>
--	---

**توجه:** پروژه حداکثر یکماه و نیم پس از شروع ترمی که در آن در درس پروژه ثبت نام بعمل آمده است باید به تصویب برسد.

## فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱ فناوری SigFox	۱
۲-۱ فناوری NB-IoT	۲
۳-۱ فناوری LoRaWAN	۳
۲- مروری بر کارهای پیشین	۵
۳- بیان مسئله	۷
۴- مراجع	۱۱

اینترنت اشیاء یکی از مفاهیم نوظهور است که بسیار مورد استقبال قرار گرفته و روز به روز اهمیت استفاده از آن بیشتر میشود. کاربردهایی مانند شهر هوشمند، کشاورزی هوشمند و یا حمل و نقل هوشمند کاربرد هایی از اینترنت اشیاء هستند که نیازمندی هایی چون پوشش وسیع<sup>۱</sup>، مصرف انرژی پایین و مقیاس پذیری بالا دارند. برای این منظور شبکه هایی مخصوص به این چنین کاربرد های اینترنت اشیاء با نام شبکه های LPWAN (Low Power Wide Area Network) ابداع شده که از معروف ترین آنها میتوان به SigFox، NB-IoT و LoRaWAN اشاره کرد. هر کدام از این تکنولوژی ها مزایا و معایب خود را دارند و بسته به نوع کاربرد و میزان سرمایه و نیازمندی های شبکه میتوان یکی از آنها را انتخاب نمود.

## ۱-۱ فناوری SigFox

فناوری SigFox یک فناوری اختصاصی است که از پهنای باند بسیار کوچک استفاده می کند (Ultra-narrow band) و محدودیت های زیادی برای ارسال و دریافت داده دارد که از آنها میتوان به حداکثر نرخ ارسال داده ۱۰۰ بیت بر ثانیه برای ارسال uplink و حداکثر داده<sup>۲</sup> اصلی معادل ۱۲ بایت اشاره کرد. از طرفی این فناوری از باند های فرکانسی بدون پروانه<sup>۳</sup> استفاده می کند که استفاده از این فرکانس ها دارای محدودیت هایی روی چرخه وظیفه<sup>۴</sup> میباشد؛ به عنوان مثال، در اروپا هر دستگاه پایانی تنها اجازه دارد ۱۴۰ پیام در روز ارسال کند که این امر نرخ ارسال داده را در این فناوری باز هم محدود تر میکند. همچنین این فناوری یک فناوری متن باز نیست و برای استفاده از آن باید از زیرساخت فراهم شده توسط شرکت SigFox استفاده کرد که این امر باعث کاهش سربار پیاده سازی سیستم می شود، اما از طرفی انعطاف پذیری این فناوری را کاهش می دهد.

<sup>1</sup>Vast coverage

<sup>2</sup>Payload

<sup>3</sup>Unlicensed

<sup>4</sup>Duty cycle

## ۱-۲ فناوری NB-IoT

فناوری دیگر NB-IoT است که از فرکانس های دارایه پروانه<sup>۵</sup> و زیرساخت موجود برای شبکه های سلولی<sup>۶</sup> برای ارسال داده ها استفاده می کند. این فناوری با توجه به اینکه نیازمند زیرساخت مجزایی نیست و از زیرساخت موجود استفاده می کند، هزینه ها را تا حد زیادی کاهش می دهد. از طرفی استفاده از باند های فرکانسی دارای پروانه هزینه بیشتری دارد اما کیفیت سرویس را افزایش داده و محدودیت های چرخه وظیفه به آن اعمال نمی شود، همچنین احتمال از دست رفتن داده ها نیز در این فناوری کاهش میابد. این فناوری برای کاربردهایی که کیفیت بالایی در ارسال و دریافت داده نیاز دارند مناسب می باشد.

---

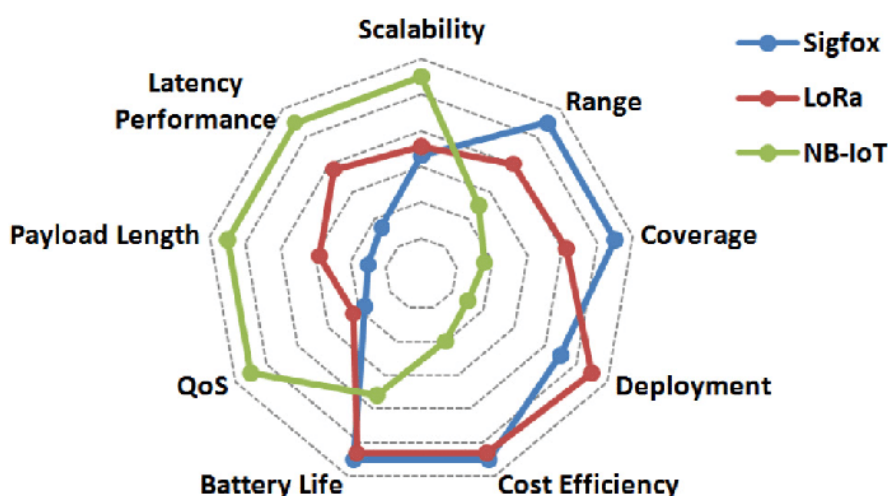
<sup>5</sup>Licensed

<sup>6</sup>Cellular network

### ۳-۱ LoRaWAN فناوری

فناوری سوم که در این پروژه با آن کار خواهیم کرد LoRaWAN می‌باشد. همانطور که از نام این فناوری برمی‌آید، برد بالا از ویژگی‌های مهم آن است. این فناوری توسط LoRa Alliance (IBM, Semtech, and Cisco, among others) معرفی شد و از شهرت خوبی چه در صنعت و چه در فضای آکادمیک برخوردار می‌باشد. حق ساخت لایه فیزیکی ماژول ارتباطی لورا در اختیار شرکت Semtech می‌باشد، اما برخلاف SigFox، این فناوری متن باز<sup>۷</sup> بوده و می‌توان هر تغییری در لایه‌های بالایی آن ایجاد کرد. از این رو پیاده‌سازی و استفاده از آن بر عهده خود فرد می‌باشد که این امر پیچیدگی کار را زیاد تر می‌کند اما انعطاف پذیری بالایی را در اختیارمان قرار می‌دهد. از ویژگی‌های این فناوری می‌توان به برد بسیار بالا (به صورت میانگین بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر) به دلیل استفاده از مدلاسیون<sup>۸</sup> خاص، پشتیبانی از تعداد زیاد دستگاه‌های انتهایی (هزاران دستگاه) به دلیل ساختار معماری خاص آن (Star of stars)، نرخ ارسال داده به مراتب بیشتر از SigFox (۲۷ کیلوبیت بر ثانیه در صورت استفاده از مدلاسیون CSS و ۵۰ کیلوبیت بر ثانیه در صورت استفاده از FSK) و مصرف انرژی پایین آن اشاره کرد. همچنین این فناوری نیز از فرکانس‌های بدون پروانه استفاده می‌کند که محدودیت‌هایی را به دنبال دارد اما برای کاربردهای خاص مطرح شده در ابتدا، با توجه به اینکه حجم و فرکانس ارسال داده پایین می‌باشد، این محدودیت‌ها مشکلی برای سیستم ایجاد نمی‌کند.

در شکل زیر مقایسه‌ای از این ۳ تکنولوژی را مشاهده می‌کنید.



<sup>7</sup>Open source

<sup>8</sup>Modulation

---

شکل ۱- مقایسه ۳ فناوری SigFox، NB-IoT و LoRa

به دلایل گفته شده، در این پروژه قصد پیاده سازی و ارزیابی فناوری LoRaWAN را در محیط شهر تهران که یک محیط نویزی است را داریم.

## ۲- مروری بر کارهای پیشین:

اگرچه از ظهور فناوری لورا زمان زیادی نمی‌گذرد، تعدادی مقاله روی تحلیل و ارزیابی این فناوری در سناریوهای مختلف و یا پیشنهاد ارتقاء نمونه‌های موجود در بازار دستگاه‌های لورا کار کرده‌اند [۱۱-۲]. در موارد تئوری کارهای [۲-۴] ظرفیت فناوری LoRaWAN را از نظر مقیاس‌پذیری<sup>۹</sup> و گذردهی<sup>۱۰</sup> گره بررسی کرده‌اند. در تمام این کارهای نتیجه‌گیری شده که برای پشتیبانی از تعداد بالای دستگاه انتهایی باید سیستم LoRaWAN را با دقت پیکربندی کرد و موارد خاصی را انجام داد. به طور دقیق، در [۲]، آثار منفی سلول‌های چگال (دارای جمعیت بالای گره انتهایی) LoRaWAN بررسی شده است. از طرفی در [۳] بیان شده که در شبکه‌هایی که نیازمندی‌هایی چون تاخیر پایین یا اطمینان دریافت داده اهمیت کمتری دارد می‌توان شبکه‌های چگال<sup>۱۱</sup> LoRaWAN را پیاده‌سازی کرد. همچنین در [۱۲] یک نمونه پیاده‌سازی برای تعداد بالای گره انتهایی انجام شده است. در نتیجه برای تضمین مقیاس‌پذیری شبکه و پشتیبانی از تعداد بالای گره انتهایی دو ملاحظه باید در نظر گرفته شود: ۱- کاهش تعداد بسته‌های دریافتی به ازای هر گره در روز. ۲- افزایش تعداد دروازه‌ها. [۴]. همانطور که گفته شده برخی از کارها [۵ و ۶] بهبودهایی را در مورد برخی ویژگی‌های اصلی LoRaWAN پیشنهاد داده‌اند. در [۵]، نویسندگان راه‌حلی برای افزایش امنیت سیستم‌های اینترنت اشیاء مبتنی بر LoRaWAN را ارائه داده است. در این مقاله تعداد گره پروکسی<sup>۱۲</sup> برای انجام عملیات‌های رمزنگاری به کار گرفته شده است تا بار محاسباتی سنگین رمزنگاری را از دوش گره‌های انتهایی که دارای محدودیت‌های محاسباتی و انرژی هستند بردارد. از طرفی، در [۶] به کارگیری IPV6 در LoRaWAN مطرح شده که مانند 6LoWPAN، این راه‌حل می‌تواند منجر به افزایش قابلیت همکاری شبکه اینترنت اشیاء با دنیای بیرون و اینترنت بشود. در عین حال هر دوی این کارها مرحله ارزیابی سیستم جهت بررسی آثار پیشنهادشان در کارکرد شبکه LoRaWAN را انجام نداده‌اند.

در کارهای [۷-۱۱] نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عملی در سناریوها و راه‌حل‌های مختلف ارائه شده است. تمرکز این کارهای روی ارزیابی کارکرد شبکه LoRaWAN تحت شرایط مختلف انتشار و محیطی می‌باشد. برای مثال در [۷]، پیاده‌سازی واقعی LoRaWAN انجام شده و نتیجه‌گیری شده که محل و ارتفاع آنتن دروازه نقش بسیار مهمی در

<sup>۹</sup>Scalability<sup>۱۰</sup>Node throughput<sup>۱۱</sup>Dense networks<sup>۱۲</sup>Proxy node

عملکرد شبکه دارد. ارزیابی ها با به کار گیری ۳ دروازه مختلف انجام شده. در [۸] نیز یک مطالعه عملی مشابه انجام شده است. در این مورد، نویسنده روی تنظیم و تغییر مشخضه های لایه فیزیکی LoRa، پارامتر های پیکربندی تمرکز کرده که در نتیجه آن فاکتور پخش (Spreading Factor) (که در پروژه با جزییات توضیح داده می شود) و نرخ ارسال داده به عنوان فاکتور های کلیدی که روی پوشش شبکه تاثیر دارند، شناسایی شده اند. یک کار دیگر که روی پوشش LoRa تمرکز کرده است [۹] می باشد که در سناریو های داخلی (Indoor) بررسی شده است. نتایج این کار مقاومت LoRa در محیط های صنعتی نامطلوب (برای سیگنال های بیسیم) حتی با نرخ ارسال بالا را نشان می دهد. از طرفی در [۱۰] پوشش شبکه LoRaWAN را در محیط های مختلف و با قرار دادن گره انتهایی روی یک ماشین و یک قایق (سناریو های متحرک) بررسی کرده است.

در این سناریو ها پوشش بالای ۱۰ کیلومتر بدون از دست رفتن تعداد زیادی داده تجربه شده است. در [۱۱] یک کار جزئی تر انجام شده است که در آن نویسنده های مقاله ذکر شده قبلی، اندازه گیری ها و ارزیابی های بیشتری روی کارکرد شبکه در سناریو های متحرک را انجام داده اند. از دیدگاه شبیه سازی، کار [۱] روی سناریو های متحرک تمرکز کرده است و کارکرد شبکه LoRaWAN را در شبکه های متحرک بررسی کرده است که نتایج بهتری نسبت به فناوری WiFi به دست آورده است.

همانطور که در کارهای انجام شده ذکر شد، پوشش و برد و کارکرد پیکربندی های مختلف LoRaWAN مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. هرچند در مطالعات انجام شده نامطلوب بودن نقاط آزمایش (برای انتقالات بیسیم) مورد توجه قرار نگرفته است.

در این پروژه هدف ارزیابی LoRaWAN در چند سناریو مختلف در سطح شهر تهران که با جزییات در پروژه تعریف می شوند می باشد. که این سناریو ها شامل سناریو های ثابت و متحرک است.



## ۳- بیان مسئله:

کارهای انجام شده در این زمینه در بخش قبل مرور شد. انجام پیاده‌سازی و ارزیابی شبکه لورا در سطح شهر تهران در سناریوهای مختلف متحرک و ثابت از مواردی است که نمونه قبلی‌ای ندارد و ارزیابی دقیقی در این زمینه انجام نشده است. لذا در این پروژه قصد داریم شبکه لورا را از ابتدا پیاده‌سازی کرده و آن را در سطح شهر تهران آزمایش و ارزیابی کنیم.

به طور کلی این پروژه به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود. قسمت اول پیاده‌سازی شبکه LoRaWAN و قسمت دوم ارزیابی آن می‌باشد. ارزیابی‌ها و نتایج به دست آمده در پایان نامه شرح داده خواهند شد و در این بخش، وسایل مورد نیاز برای پیاده‌سازی و توضیحاتی راجع به آنها ذکر می‌شود.

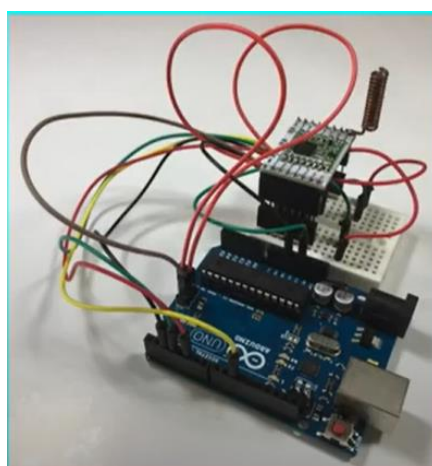
در این پروژه برای پیاده‌سازی سیستم اینترنت اشیاء مبتنی بر LoRaWAN به سه جزء اصلی احتیاج داریم:

- ۱- دستگاه انتهایی مبتنی بر Arduino و مجهز به ماژول ارتباطی LoRa
- ۲- دروازه تک کانال<sup>۱۳</sup> و دروازه چند کانال<sup>۱۴</sup> مبتنی بر برد توسعه Raspberry pi و مجهز به ماژول LoRa
- ۳- سرور شبکه<sup>۱۵</sup>

در ادامه هر کدام از این اجزاء با جزئیات بیشتر توضیح داده می‌شوند:

## ۱- دستگاه انتهایی:

مانند هر سیستم اینترنت اشیاء دیگر، سیستم ما دارای یک دستگاه انتهایی یا گره انتهایی می‌باشد که نقش آن جمع‌آوری داده از محیط و ارسال آن به سرور اصلی توسط فناوری LoRa است. جمع‌آوری داده‌ها توسط سنسورهای تعبیه شده روی سخت‌افزار طراحی شده (مبتنی بر Arduino mini) انجام می‌شود. همچنین گره انتهایی مجهز به ماژول ارتباطی LoRa RF95 می‌باشد که یک ارتباط مبتنی بر LoRa تک کاناله را میسر می‌سازد. در شکل زیر می‌توانید ساختار و اجزاء این دستگاه انتهایی را مشاهده کنید.



شکل ۲- گره انتهایی شبکه لورا

<sup>13</sup>Single channel gateway

<sup>14</sup>Multi channel gateway

<sup>15</sup>Network server

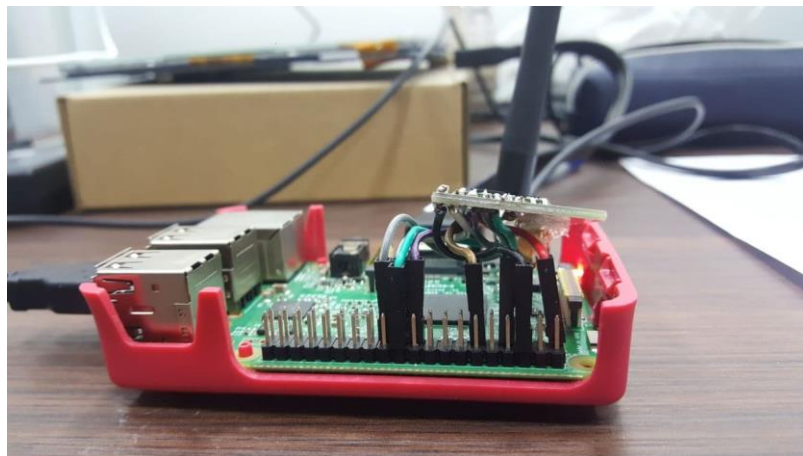
## ۲- دروازه تک کاناله و ۸ کاناله

در معماری شبکه LoRaWAN یکی از اجزاء دروازه می باشد که نقش آن دریافت داده های ارسال شده از گره های انتهایی و انتقال آن به سرور شبکه می باشد. در این پروژه ۲ مدل دروازه پیاده سازی شده اند:

۱- دروازه تک کاناله: که فقط در یک باند فرکانسی خاص داده ها را دریافت می کند. ۲- دروازه ۸ کاناله: که در ۸ باند فرکانسی مختلف می تواند به طور همزمان داده دریافت کند. هر دو این دروازه ها مبتنی بر برد توسعه Raspberry pi می باشند.

## ۲-۱- دروازه تک کاناله

این دروازه شامل یک مینی کامپیوتر Raspberry pi، یک آنتن و یک ماژول ارتباطی LoRa RF95 می باشد که در فرکانس 915MHz کار می کند (فرکانس بدون پروانه برای ایران). برای پیاده سازی LoRaWAN توسط این دستگاه باید کتاب خانه ها و برنامه هایی در آن اجرا شود و این دستگاه را در پلتفرم TTN (The Things Network) ثبت کنیم. پس از آن امکان دریافت داده روی باند فرکانسی تنظیم شده در دروازه وجود دارد و داده دریافتی توسط یک شبکه مقاوم مانند WiFi یا Ethernet به اینترنت ارسال شده و به پلتفرم ذکر شده می رسد. در شکل زیر یک نمونه دروازه تک کاناله قابل مشاهده می باشد.



شکل ۳- دروازه تک کاناله

## ۲-۲- دروازه ۸ کاناله

این دروازه ساختاری مشابه دروازه تک کاناله دارد، با این تفاوت که بجای استفاده از ماژول ارتباطی RF95 از یک برد متمرکز کننده مدل iC880a استفاده می کند که قابلیت دریافت همزمان داده در ۸ باند فرکانسی مختلف را دارا می باشد. همچنین در این دروازه یک سنسور GPS نیز تعبیه شده که به وسیله آن دروازه قابلیت ردیابی خواهد داشت. رنج فرکانسی این دروازه نیز 915MHz می باشد.

همچنین طول آنتن استفاده شده در این دروازه به نسبت دروازه تک کاناله به مراتب بزرگتر است (برای دریافت بهتر داده ها). در شکل زیر نمونه پیاده سازی شده این دروازه را مشاهده می کنید.



شکل ۴- دروازه ۸ کاناله

### ۳- سرور شبکه

یکی از اجزاء یک سیستم اینترنت اشیاء پلتفورم آن است که نقش آن جمع آوری و مصور سازی و تحلیل داده های ارسالی توسط گره های انتهایی می باشد. معروف ترین پلتفورم لورا که نقش سرور شبکه را در معماری لورا ایفا می کند پلتفورم The thing network یا به اختصار TTN می باشد. برای راه اندازی یک سیستم مبتنی بر لورا باید ابتدا دروازه خود را در این پلتفورم ثبت کنیم و پس از آن داده های دریافت شده توسط دروازه در آن نمایش داده می شوند.



## مراجع

1. Herrera-Tapia, J.; Hernandez-Orallo, E.; Tomas, A.; Calafate, C.; Cano, J.-C.; Zennaro, M.; Manzoni, P. Evaluating the use of sub-gigahertz wireless technologies to improve message delivery in opportunistic networks. In Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, (ICNSC 2017), Calabria, Italy, 16–18 May 2017.
2. Georgiou, O.; Raza, U. Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale? *IEEE Wirel. Commun. Lett.* **2017**, *6*, 162–165. [[CrossRef](#)]
3. Mikhaylov, K.; Petäjäjärvi, J.; Hänninen, T. Analysis of the capacity and scalability of the LoRa wide area network technology. In Proceedings of the 22th European Wireless Conference, Oulu, Finland, 18–20 May 2016; pp. 1–6.
4. Bankov, D.; Khorov, E.; Lyakhov, A. On the limits of LoRa WAN channel access. In Proceedings of the International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Moscow, Russia, 29–30 November 2016; pp. 10–14.
5. Naoui, S.; Elhdhili, M.E.; Saidane, L.A. Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture. In Proceedings of the International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN), Paris, France, 22–25 November 2016; pp. 1–7.
6. Weber, P.; Jackle, D.; Rahusen, D.; Sikora, A. IPv6 over LoRaWAN. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), Offenburg, Germany, 26–27 September 2016; pp. 75–79.
7. Petric, T.; Goessens, M.; Nuaymi, L.; Toutain, L.; Pelov, A. Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN. In Proceedings of the IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, Spain, 4–8 September 2016; pp. 1–7.
8. Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W.M. A study of LoRa: Long Range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors* **2016**, *16*, 1466.
9. Haxhibeqiri, J.; Karaagac, A.; Van den Abeele, F.; Joseph, W.; Moerman, I.; Hoebeke, J. LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study. In Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol, Cyprus, 12–15 September 2017; pp. 1–8.
10. Petäjäjärvi, J.; Mikhaylov, K.; Roivainen, A.; Hanninen, T.; Pettissalo, M. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, Denmark, 2–4 December 2015; pp. 55–59.
11. Petäjäjärvi, J.; Mikhaylov, K.; Pettissalo, M.; Janhunen, J.; Iinatti, J. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2017**, *13*, 1–16. [[CrossRef](#)]
12. Gilson, R.; Grudky, M. LoRaWAN capacity trial in dense urban environment



