

فصل پنجم

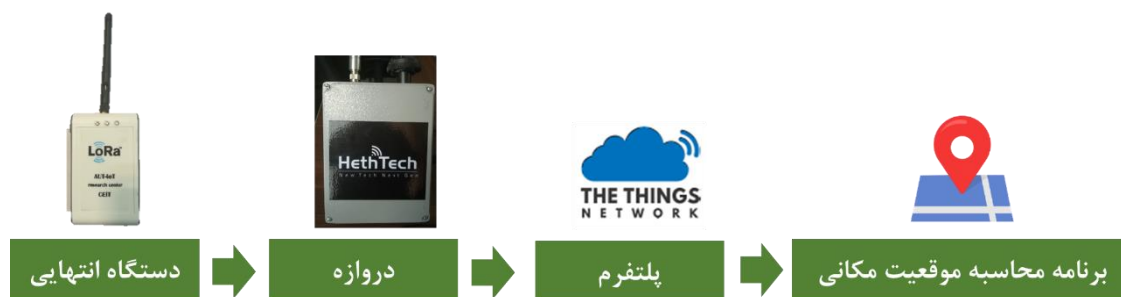
طراحی و پیاده‌سازی دروازه و دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN

۵- طراحی و پیاده‌سازی دروازه و دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN

در این پایان‌نامه دروازه و دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN به عنوان تجهیزات مهم از سامانه ردیابی طراحی و پیاده‌سازی کردیم که در این فصل تشریح خواهد شد. لذا در این فصل ابتدا معماری سامانه ردیابی مبتنی بر شبکه LoRaWAN را شرح خواهیم داد، سپس مبتنی بر این معماری دستگاه انتهایی و دروازه ساخته شده است تشریح خواهد شد. همچنین در این فصل برنامه محاسبه موقعیت مکانی و نحوه محاسبه موقعیت دستگاه انتهایی شرح داده خواهد شد. در پایان این فصل با انجام چند سناریو تست شبکه LoRaWAN را ارزیابی خواهیم کرد.

۵-۱- معماری سامانه ردیابی شبکه LoRaWAN

سامانه ردیابی دستگاه انتهایی مبتنی بر شبکه LoRaWAN از چهار جزء اصلی تشکیل شده است: یک دستگاه انتهایی، چهار دروازه، یک پلتفرم و برنامه محاسبه موقعیت مکانی (شکل ۵-۱). دستگاه انتهایی بسته‌ای را بر بستر شبکه LoRaWAN ارسال می‌کند. چهار دروازه‌ای که دستگاه انتهایی را تحت پوشش دارند بسته را دریافت می‌کنند. سپس دروازه‌ها بسته دریافت شده به همراه اطلاعاتی از سیگنال دریافتی مانند زمان دقیق دریافت بسته و SNR را از طریق پروتکل UDP/IP^{۶۶} به پلتفرم ارسال می‌کنند. پلتفرم پردازش داده‌ها را از دروازه‌های مختلف انجام داده و بسته را به برنامه محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی تحویل می‌دهد. در برنامه محاسبه موقعیت مکانی با استفاده از الگوریتم‌های محاسبه موقعیت مکانی و پارامترهای ورودی موقعیت دستگاه انتهایی محاسبه می‌شود. برنامه محاسبه موقعیت دستگاه انتهایی در بخش ۵-۴ شرح داده خواهد شد.



شکل ۵-۱ اجزای اصلی یک سامانه ردیابی

^{۶۶} User Datagram Protocol

در ادامه بخش ۵-۲ جزئیات ساخت دستگاه انتهایی توضیح داده خواهد شد. در سامانه ردیابی از دروازه ساخته شده در این پایان‌نامه استفاده شده است. دروازه ساخته شده را HetTech نام‌گذاری کرده‌ایم. جزئیات ساخت این دروازه در بخش ۵-۳ شرح داده خواهد شد. پلتفرم‌های مختلفی برای شبکه LoRaWAN وجود دارند. در این سامانه از پلتفرم متن‌باز TTN [۵۲] استفاده خواهیم کرد که جزئیات مرتبط با پلتفرم در بخش ۵-۴ شرح داده شده است.

۵-۲- ساخت دستگاه انتهایی

دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. این دستگاه از ماژول LoRa شرکت HopeRF برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند. ماژول شرکت HopeRF با نام تجاری SX1278 در بازارهای جهانی در دسترس است. این ماژول با پشتیبانی از رابط SPI^{۶۷} می‌تواند به راحتی با انواع ریزپردازنده‌ها و کامپیوترهایی که از پورت SPI پشتیبانی می‌کنند ارتباط برقرار کند. ماژول SX1278 در باند فرکانسی ۹۱۵ مگاهرتز کار می‌کند. جزئیات مربوط به ماژول HopeRF SX1278 در مرجع [۵۳] بیان شده است.

در دستگاه انتهایی از برد Arduino Pro Mini استفاده شده است. این برد دارای میکروکنترلر ATmega328 با ۳۲ کیلوبایت حافظه فلش به همراه ۲ کیلوبایت SRAM است. از این برد به دلیل اندازه کوچک و قیمت مناسب در دستگاه انتهایی استفاده شده است [۵۴].

⁶⁷ Serial Peripheral Interface



شکل ۵-۲ دستگاه انتهایی ساخته شده

برای تأمین توان الکتریکی دستگاه از باتری لیتیوم پلیمر ۳,۷ ولت ۲۵۰۰ میلی‌آمپر ساعت استفاده شده است. همچنین در دستگاه ماژول شارژ مجدد با نام تجاری TP-4056 قرار داده شده است با استفاده از این ماژول می‌توان باتری‌های لیتیومی را شارژ نمود.

همان‌طور که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود سه دیود نورانی بر روی دستگاه انتهایی قرار داده شده است. به ترتیب از سمت چپ، دیود نورانی اول برای وضعیت خاموش یا روشن بودن دستگاه را نشان می‌دهد، دیود دوم به ازای هر بار ارسال روشن و خاموش می‌شود. دیود سوم به ازای هر بار دریافت داده روشن و خاموش می‌شود. برنامه‌ریزی دستگاه انتهایی به نحوی انجام شده است که هر ۵ ثانیه یک‌بار داده‌ای ارسال می‌شود.

۵-۳- ساخت دروازه شبکه LoRaWAN

در یک نگاه کلی می‌توان دروازه‌های شبکه LoRaWAN را به دو دسته دروازه‌های تک کاناله و دروازه‌های چندکاناله تقسیم کرد، در دروازه تک کاناله تنها یک کانال فرکانسی برای ارتباط وجود دارد و در دروازه چندکاناله چندین کانال ارتباطی بین دروازه و دستگاه انتهایی وجود دارد.

در یک سامانه ردیابی، به دروازه چندکاناله با قابلیت ردیابی نیاز است. دروازه چندکاناله با قابلیت ردیابی باید چهار ویژگی زیر را داشته باشد:

- موقعیت مکانی دروازه مشخص باشد.
- با دیگر دروازه‌ها سنکرون باشد.
- زمان دریافت بسته با دقت نانو ثانیه محاسبه شود.
- محاسبه SNR با دقت بالا انجام شود.

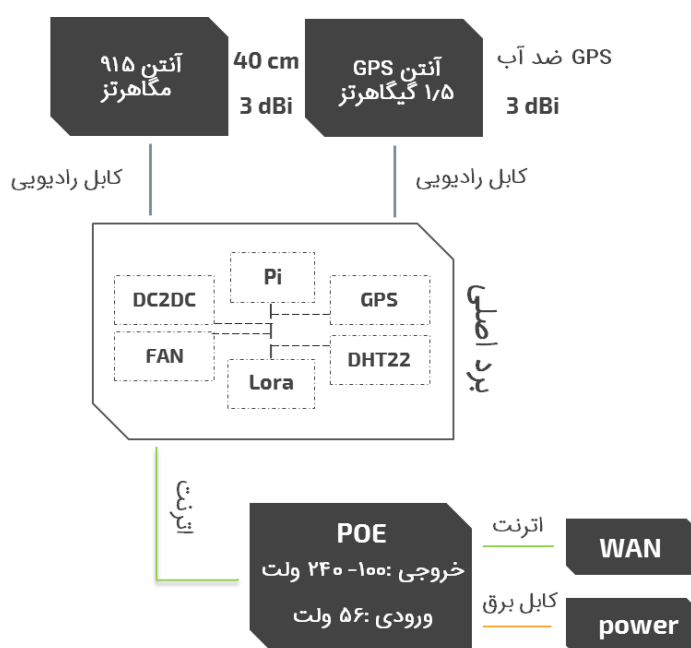
چهار دروازه در سامانه ردیابی بسته ارسال شده در کانال‌های فرکانسی مختلف را دریافت می‌کنند. سپس زمان دقیق دریافت بسته و SNR محاسبه و به فایل فراداده اضافه می‌شود. زمان دقیق دریافت بسته و موقعیت دروازه‌ها برای محاسبه موقعیت مکانی در الگوریتم‌های محاسبه موقعیت مکانی مهم هستند. مقدار SNR نیز برای اجرای الگوریتم ADR در پلتفرم مرکزی مهم است.

در این پایان‌نامه، یک دروازه هشت کاناله با قابلیت ردیابی طراحی شده است که بخش‌های سخت‌افزار و نرم‌افزار این دروازه در ادامه شرح داده خواهد شد.

۵-۳-۱- سخت‌افزار دروازه چندکاناله با قابلیت ردیابی

در شکل ۵-۵ نمودار بلوکی دروازه هشت کاناله با قابلیت ردیابی مشاهده می‌شود. دروازه از یک برد اصلی استفاده می‌کند. بر روی برد اصلی، رزبری پای به‌عنوان کنترل‌کننده مرکزی وجود دارد. رزبری پای با ماژول LoRa با نام تجاری RAK831 در ارتباط است. ماژول RAK831 در واقع ماژول اصلی دروازه است که در هشت کانال فرکانسی با دستگاه انتهایی در ارتباط است. ماژول RAK831 در باند فرکانسی

۹۱۵ مگاهرتز کار می‌کند. جریان الکتریکی و کابل اترنت به ورودی POE^{۶۸} متصل می‌شوند. قطعه POE اینترنت و توان الکتریکی را در قالب کابل اترنت به دستگاهی که در ارتفاع بالا بر روی دکل نصب هست، انتقال می‌دهد. خروجی قطعه POE به ورودی مبدل DC^{۶۹} به DC برای تأمین برق کنترل‌کننده مرکزی (رزبری پای) متصل می‌شود. با تأمین برق رزبری پای، سیستم عامل رزبری پای که رزبین^{۷۰} نام دارد، راه‌اندازی می‌شود و برنامه‌های از قبل تعبیه‌شده به صورت سرویس اجرا می‌شوند. در این دروازه از آنتن با گین^{۷۱} ۳dBi برای دریافت سیگنال LoRa استفاده شده است. طول این آنتن ۴۰ سانتی‌متر و ضد آب است. برای دریافت سیگنال GPS از آنتن با گین ۳dBi استفاده شده است.



شکل ۳-۵ نمودار بلوکی دروازه چند کاناله

قطعات و ماژول‌های مختلف دروازه بر روی برد اصلی بر اساس محل‌های مشخص‌شده در شکل ۳-۴ متصل می‌شوند و از طریق اتصالات که در برد وجود دارد با یکدیگر در ارتباط هستند. قطعاتی که بر روی برد اصلی متصل می‌شوند شامل رزبری پای، ماژول RAK831، فن، GPS و حس‌گر دما هستند.

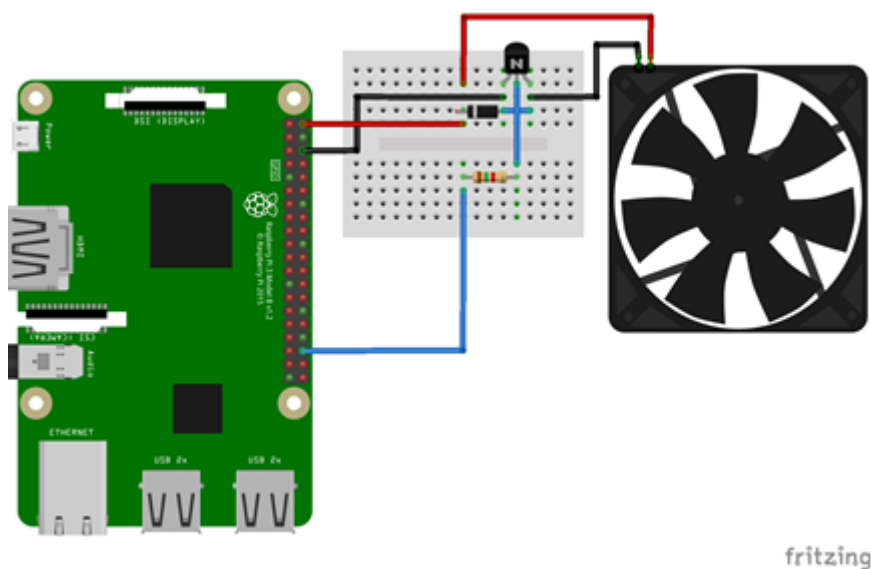
^{۶۸} Power over Ethernet

^{۶۹} Direct Current

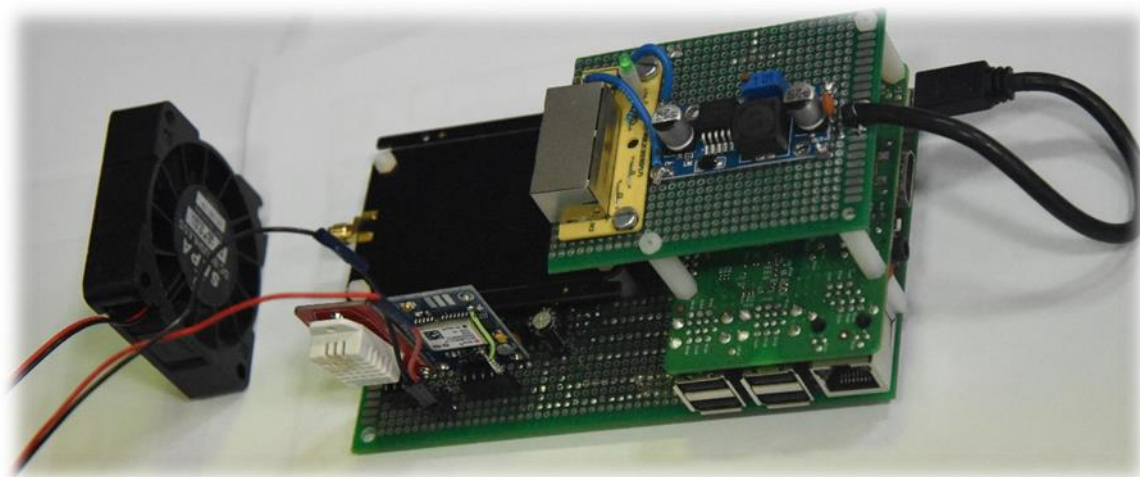
^{۷۰} Raspbian

^{۷۱} Gain

حس گر دما با نام تجاری DHT22 همواره دمای داخل دستگاه را بررسی و در صورت بالا رفتن دما از حد آستانه دستور روشن شدن فن صادر می‌شود و تا کاهش دما و پایین آمدن تا حد آستانه دما، فن روشن می‌ماند. شکل ۴-۵ شماتیک مدار کنترل کننده دما را نشان می‌دهد. قطعه ترانزیستور استفاده شده در مدار کنترل کننده دما با نام تجاری NPN transistor (2N2222) در نقش یک سوئیچ عمل می‌کند و با یک جریان کوچک می‌تواند فن را روشن یا خاموش کند.



شکل ۴-۵ شماتیک مدار کنترل کننده دما



شکل ۵-۵ اتصال قطعات بر روی برد اصلی

شکل ۵-۵ اتصال همه ماژول‌ها را بر روی برد اصلی نشان می‌دهد. در نهایت دستگاه ساخته شده درون یک جعبه فلزی مقاوم در برابر نفوذ هرگونه گردوغبار، رطوبت و آب قرار می‌گیرد. در شکل ۵-۵ دروازه هشت کاناله با قابلیت ردیابی نشان داده شده است. دروازه ساخته شده HetTech نام‌گذاری شده است.



شکل ۵-۶ دروازه چند کاناله طراحی شده با قابلیت ردیابی

۵-۳-۲- نرم‌افزار دروازه چندکاناله با قابلیت ردیابی

نحوه ارتباط بین دروازه و پلتفرم در یک فایل اجرایی با نام packet forwarder برنامه‌نویسی شده است. این فایل اجرایی درون دروازه به صورت یک سرویس اجرا می‌شود. این فایل توسط شرکت Semtech به صورت متن‌باز توسعه داده می‌شود [۵۵]. پروتکل ارتباطی بین دروازه و پلتفرم بر اساس UDP/IP هست به همین جهت هیچ‌گونه تضمینی برای ارائه بسته‌ها به پلتفرم وجود ندارد. بسته‌های مختلفی بین دروازه و پلتفرم ردوبدل می‌شود [۸]. یکی از بسته‌های ردوبدل شده بین دروازه و پلتفرم، "rxpk" نام دارد. فیلدهای این بسته در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. این بسته در قالب استاندارد JSON به پلتفرم ارسال می‌شود. بسته rxpk حاوی داده دریافت شده از دستگاه انتهایی و اطلاعات فراداده است که توسط دروازه محاسبه شده است.

Name	Type	Function
time	string	UTC time of pkt RX, us precision, ISO 8601 'compact' format
tmms	number	GPS time of pkt RX, number of milliseconds since 06.Jan.1980
tmst	number	Internal timestamp of "RX finished" event (32b unsigned)
freq	number	RX central frequency in MHz (unsigned float, Hz precision)
chan	number	Concentrator "IF" channel used for RX (unsigned integer)
rfch	number	Concentrator "RF chain" used for RX (unsigned integer)
stat	number	CRC status: 1 = OK, -1 = fail, 0 = no CRC
modu	string	Modulation identifier "LORA" or "FSK"
datr	string	LoRa datarate identifier (eg. SF12BW500)
datr	number	FSK datarate (unsigned, in bits per second)
codr	string	LoRa ECC coding rate identifier
rsi	number	RSSI in dBm (signed integer, 1 dB precision)
lsnr	number	Lora SNR ratio in dB (signed float, 0.1 dB precision)
size	number	RF packet payload size in bytes (unsigned integer)
data	string	Base64 encoded RF packet payload, padded

شکل ۵-۷ فیلد های بسته rxpk

به‌طور پیش‌فرض در فایل packet forwarder زمان دریافت بسته با دقت میکروثانیه محاسبه می‌شود. این به معنی محاسبه فاصله حدود ۳۰۰ متر، از دستگاه انتهایی تا دروازه، است. دروازه ساخته شده با اضافه کردن ماژول GPS زمان دریافت بسته را به صورت نانو ثانیه محاسبه می‌کند. این عملیات نیازمند تغییرات در فایل packet forwarder است. شکل ۵-۸ تغییرات انجام شده بر روی فایل packet forwarder را نشان می‌دهد.

```

if (gps_active) {
    /* convert packet timestamp to UTC absolute time */
    j = lgw_cnt2utc(local_ref, p->count_us, &pkt_utc_time);
    if (j == LGW_GPS_SUCCESS) {
        char c[1000];
        FILE *fptr;
        fptr = fopen("/sys/class/pps/pps0/assert", "r");
        fscanf(fptr, "%i\n", c);
        fclose(fptr);
        char timeL[10];
        char timeN[10];
        substring1(c, timeL, 0, 10);
        substring1(c, timeN, 11, 9);
        struct tm *now;
        time_t secs;
        char buffer [80];
        secs = (time_t)atol(timeL);
        now = gmtime(&secs);
        j = snprintf((char *) (buff_up + buff_index), TX_BUFFER_SIZE-buff_index,
            "\time\":"%04i-%02i-%02iT%02i:%02i:%02i.%06liZ\n",
            (now->tm_year)+1900, (now->tm_mon)+1,
            now->tm_mday, now->tm_hour, now->tm_min, now->tm_sec, (ToUInt(timeN))); /* ISO 8601 format */
        if (j > 0) {
            buff_index += j;
        } else {
            MSG("ERROR: [up] snprintf failed line %u\n", (__LINE__ - 4));
            exit(EXIT_FAILURE);
        }
    }
}

```

شکل ۵-۸ کد محاسبه دریافت زمان با دقت نانو ثانیه

شکل ۵-۸ کد محاسبه دریافت زمان با دقت نانو ثانیه با استفاده از GPS را در فایل packet forwarder را نشان می‌دهد (قسمتی از کد که مربوط به محاسبه زمان دریافت بسته است، با نقطه چین قرمز نشان داده شده است). هنگامی که بسته‌ای توسط دروازه دریافت می‌شود بخش نشان داده شده در شکل ۵-۸ برای محاسبه زمان دریافت بسته اجرا می‌شود و زمان با استفاده از GPS دریافت می‌شود. زمان دریافت شده از GPS در متغیر timeN قرار داده می‌شود. تابع ToUInt با ورودی متغیر timeN فرمت زمان خوانده شده از GPS را متناسب با فرمت زمان بسته rxpk تبدیل می‌کند و در نهایت به عنوان مقدار فیلد زمان در بسته rxpk قرار می‌دهد. برای اجرای تغییرات اعمال شده نیاز است برنامه packet forwarder یکبار دیگر با کدهای اضافه شده کامپایل^{۷۲} شود.

شکل ۵-۹ اجرای فایل packet forwarder بعد از اعمال کردن تغییرات را نشان می‌دهد. (خط چین قرمز در شکل ۵-۹) دروازه زمان دریافت بسته را با دقت نانو ثانیه محاسبه کرده است.

```

pi@LoRa-Gateway: /opt/ttn-gateway/bin
INFO: [up] Thread activated for all servers.
INFO: GPS thread activated.
INFO: Validation thread activated.
WARNING: [gps] GPS out of sync, keeping previous time reference
INFO: [down] Thread activated for all server router.eu.thethings.network
WARNING: [gps] GPS out of sync, keeping previous time reference
INFO: [down] for server router.eu.thethings.network PULL_ACK received in 102 ms
INFO: [down] for server router.eu.thethings.network PULL_ACK received in 101 ms
-----
1556366066.048862212#776272
-----
INFO: [down] for server router.eu.thethings.network PULL_ACK received in 100 ms
INFO: [down] for server router.eu.thethings.network PULL_ACK received in 101 ms
INFO: [down] for server router.eu.thethings.network PULL_ACK received in 100 ms

```

شکل ۵-۹ اجرای فایل packet forwarder بعد از تغییرات اعمال شده

دروازه ساخته شده در این پایان‌نامه محاسبه زمان دریافت بسته را با دقت نانو ثانیه انجام می‌دهد. اما همچنان تأخیر پردازش در محاسبه زمان دریافت بسته وجود دارد. تأخیر پردازش ناشی از عملیات محاسبه زمان دریافت بسته از GPS و تبدیل زمان دریافت شده از GPS به فرمت فایل rxpk است. شرکت‌های

⁷² Compile

سازنده دروازه LoRaWAN نسخه جدیدی از دروازه ارائه کردند که محاسبه زمان دریافت بسته را با دقت بالا بدون تأخیر پردازش انجام می‌دهد.

۵-۴- پلتفرم شبکه LoRaWAN

پلتفرم مسئول رمزگشایی بسته‌های دریافت شده از چهار دروازه و انتقال آن به برنامه محاسبه موقعیت مکانی است. نکته حائز اهمیت این است که بسته‌های دریافت شده از چهار دروازه در پلتفرم دارای داده‌های یکسان هستند اما فراداده‌های غیر یکسان دارند. در واقع دروازه‌ها در زمان‌های متفاوت بسته را دریافت کرده‌اند. این تفاوت زمان دریافت بسته‌ها اساس الگوریتم‌هایی است که بر اساس تفاوت انتشار سیگنال کار می‌کنند.

پلتفرم‌های مختلفی برای شبکه LoRaWAN وجود دارد. پلتفرم شرکت LoRIOT [۵۶] و پلتفرم متن‌باز chirpstack [۲۷] از جمله این پلتفرم‌ها هستند. اما در این پایان‌نامه از پلتفرم TTN^{۷۳} [۵۲] استفاده شده است. پلتفرم TTN متن‌باز است و اجازه می‌دهد تا طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی به هم متصل شوند. علاوه بر این، تعداد بیشتری از شرکت‌ها و افراد از این پلتفرم در حال استفاده هستند و فروم‌های مختلفی برای پرسش و پاسخ دارد.

۵-۵- برنامه محاسبه موقعیت مکانی

برنامه محاسبه موقعیت مکانی با استفاده از الگوریتم‌های محاسبه موقعیت مکانی و پارامترهای ورودی، موقعیت دستگاه انتهایی را محاسبه می‌کند. در فصل دوم الگوریتم‌های محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی را مورد بحث قرار دادیم. بخش عمده‌ای از سامانه ردیابی مبتنی بر شبکه دوربرد با توان پایین با الگوریتم TDoA به عنوان یک روش محاسبه موقعیت مکانی پیاده‌سازی شده است. در روش TDoA چون تفاوت زمانی انتشار سیگنال اندازه‌گیری می‌شود، نیاز به پروتکل‌هایی نظیر اکو یا هم‌زمان‌سازی بین دروازه و دستگاه انتهایی نیست.

⁷³ The Things Network

برای انجام محاسبات مربوط به موقعیت دستگاه انتهایی از فرایند ارائه شده در شکل ۵-۱۰ استفاده می‌کنیم. این فرایند دارای دو بخش محاسبه TDOA و محاسبه موقعیت مکانی است.



شکل ۵-۱۰ فرایند محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی

ابتدا، اختلاف زمان انتشار برای بسته‌های دریافت شده از چهار دروازه محاسبه می‌شود. سپس الگوریتم تخمین موقعیت، موقعیت دستگاه انتهایی را محاسبه می‌کند. جزئیات بیشتر در مورد هر بلوک در بخش‌های زیر توضیح داده می‌شود.

۵-۵-۱- محاسبه TDoA

گام اول برای محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی، محاسبه اختلاف زمانی بسته دریافت شده بین جفت دروازه‌ها است. بنابراین هنگامی که یک بسته از دستگاه انتهایی دریافت می‌شود، چهار زمان مختلف (به ازای هر دروازه) به پایگاه داده وارد می‌شود. سپس TDoA به صورت زیر محاسبه شد:

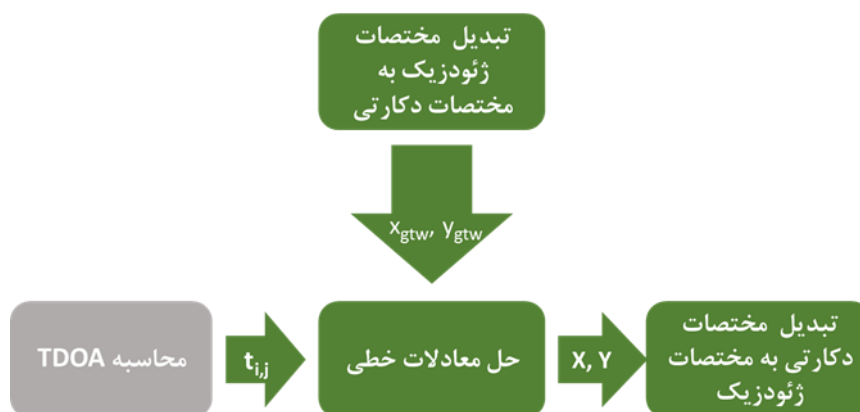
$$t_{i,j} = t_i - t_j \quad \forall i, j = 1:4 \quad j \neq i \quad (5-1)$$

در رابطه (۵-۱) زمان دریافت بسته در دروازه i ام و t_j زمان دریافت بسته در دروازه j ام است. $t_{i,j}$ اختلاف زمان رسیدن بسته بین دروازه i ام و دروازه j ام است. بنابراین، دوازده اختلاف زمان رسیدن بسته بین چهار دروازه محاسبه شده است. اما تنها شش مورد از آن‌ها مفید هستند زیرا شش مورد دیگر دارای قدرمطلق مساوی (یعنی $t_{i,j} = -t_{j,i}$) هستند.

۵-۵-۲- محاسبه تخمین موقعیت دستگاه انتهایی

برای محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی ورودی‌های اختلاف زمان انتشار سیگنال در جفت دروازه‌ها و مکان‌های چهار دروازه مورد نیاز است. موقعیت بر روی کره زمین می‌تواند در مختصات دکارتی (x, y, z) یا در مختصات Geodesics (عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی) بیان شود. مختصات دکارتی برای محاسبات ریاضی استفاده می‌شود، اما برای ارائه اطلاعات بر روی نقشه دشوار است. مختصات Geodesics

اطلاعات قابل فهم را ارائه می‌دهد، اما برای محاسبات ریاضی مناسب نیست. بنابراین، نیاز است مختصات Geodesics که از چهار دروازه داریم، برای استفاده در الگوریتم به مختصات دکارتی تبدیل شود و سپس برای نمایش در نقشه عملیات تبدیل از مختصات Geodesics به مختصات دکارتی تبدیل شود. این فرایند در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است.

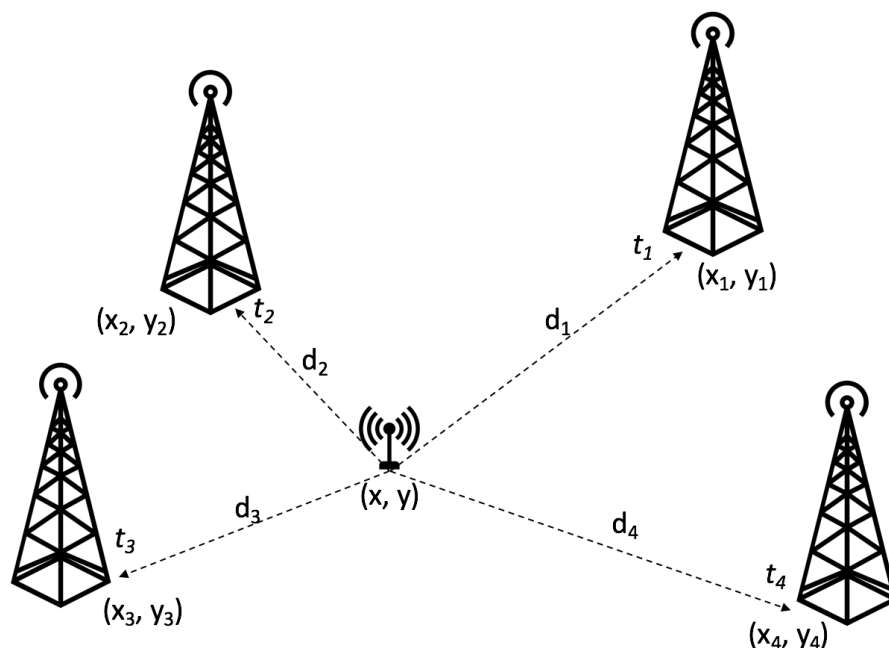


شکل ۱۱-۵ فرایند تبدیل مختصات

اگر چنانچه دو مجموعه داده در یک سیستم مختصات یکسان نباشند، به یک ترانفورماسیون^{۷۴} جغرافیایی نیاز دارد. این خود یک روش ریاضی برای تبدیل مختصات بین دو سیستم مختصات جغرافیایی است. تبدیل مختصات دکارتی به Geodesics و تبدیل Geodesics به دکارتی در مرجع [۵۷] شرح داده شده است.

هنگامی که مختصات Geodesics دروازه‌ها به دکارتی تبدیل شد، می‌توان موقعیت مکانی دستگاه انتهایی را محاسبه کنیم. در سناریویی که در شکل ۱۲-۵ نشان داده شده است مختصات دروازه‌ها مشخص و به صورت (X_i, Y_i) نشان داده شده است. همچنین مختصات دستگاه انتهایی به صورت (x, y) نشان داده شده است.

⁷⁴ Transformation



شکل ۵-۱۲ سناریو موقعیت دستگاه انتهایی [۴]

فاصله از هر دروازه تا گره انتهایی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2} \quad \forall i = 1:4$$

برای ایجاد سیستم معادلات، زمان یک دروازه به عنوان مرجع انتخاب می‌شود. سپس، فاصله‌های افتراقی بین دروازه مرجع و سایر دروازه‌ها به صورت زیر است:

$$D_{i,1} = d_i - d_1 = c_0 * t_{i,1} \quad \forall i = 2:4$$

$D_{i,1}$ فاصله بین دروازه مرجع و سایر دروازه است. c_0 سرعت نور است که مقدار آن برابر با ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ متر بر ثانیه است.

در نهایت، با استفاده از برخی تکنیک‌های ریاضی به سیستم معادلات خطی زیر می‌رسیم. چنانچه از سه دروازه استفاده شده بود، معادلات غیرخطی می‌شدند.

$$\begin{pmatrix} -2 * (X_2 - X_1) & -2 * (Y_2 - Y_1) & -2 * D_{2,1} \\ -2 * (X_3 - X_1) & -2 * (Y_3 - Y_1) & -2 * D_{3,1} \\ -2 * (X_4 - X_1) & -2 * (Y_4 - Y_1) & -2 * D_{4,1} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_2^2 - Y_2^2 + D_{2,1}^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ -X_3^2 - Y_3^2 + D_{3,1}^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ -X_4^2 - Y_4^2 + D_{4,1}^2 + X_1^2 + Y_1^2 \end{pmatrix}$$

در معادله بالا مقدار x, y و d_1 مشخص نیستند. با حل معادله خطی بالا مقدار d_1 به دست می‌آید. معادله بالا برای چهار دروازه محاسبه می‌شود و چهار مختصات دکارتی به دست می‌آید. در نهایت مختصات دکارتی دستگاه انتهایی به مختصات Geodesics تبدیل می‌شود.

۵-۵- تست شبکه LoRaWAN

در این بخش قصد داریم شبکه LoRaWAN را در قالب چند سناریو indoor تست کنیم. در این سناریوها دستگاه انتهایی در فواصل مختلف از دروازه قرار داده شده است و بسته ارسال شده از دستگاه انتهایی توسط دروازه دریافت می‌شود. پس از دریافت بسته، مقدار SNR و RSSI اندازه‌گیری می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۵-۱۳ مشاهده می‌شود دروازه شبکه LoRaWAN در آزمایشگاه اینترنت اشیا دانشکده کامپیوتر در طبقه اول مرکز رشد دانشگاه امیرکبیر قرار داده شده است. ساختمان مرکز رشد دارای چهار طبقه است.



شکل ۵-۱۳ دروازه مستقر در مرکز رشد آزمایشگاه اینترنت اشیا

جدول ۵-۱ پیکربندی‌های پارامترهای انتقال در دستگاه انتهایی را نشان می‌دهد. این پیکربندی‌ها به صورت ثابت در دستگاه انتهایی تنظیم شده‌اند. پیکربندی‌های جدول ۵-۱ برای تمامی سناریوها ثابت هستند.

جدول ۱-۵ پیکربندی پارامترهای انتقال در دستگاه انتهایی

فاکتور گسترش	توان ارسالی	پهنای باند	محدوده فرکانسی	نرخ کدگذاری	دستگاه انتهایی
۷	۲dBm	۱۲۵kHz	۹۰۴,۱Hz	۴/۵	

سناریوهای در نظر گرفته شده به شرح زیر هستند:

سناریو اول: دستگاه انتهایی در طبقه اول و در فاصله تقریبی ۲۰ متر از دروازه قرار دارد.

سناریو دوم: دستگاه انتهایی در طبقه دوم و در فاصله تقریبی ۳۰ متر از دروازه قرار دارد.

سناریو سوم: دستگاه انتهایی در طبقه سوم و در فاصله تقریبی ۴۰ متری دروازه قرار دارد.

سناریو چهارم: دستگاه انتهایی در طبقه چهارم و در فاصله تقریبی ۵۰ متر از دروازه قرار دارد.

دستگاه انتهایی در هر طبقه یک بسته با پیکربندی‌های جدول ۱-۵ ارسال می‌کند. مقادیر SNR و RSSI به دست آمده از هر سناریو در جدول ۲-۵ نشان داده شده است.

جدول ۲-۵ نتایج اجرای سناریوها

شماره سناریو	فاصله دستگاه تا دروازه (به صورت تقریبی)	SNR	RSSI
سناریو اول	۲۰ متر	۸,۸dB	-۵۷dBm
سناریو دوم	۳۰ متر	۵,۲dB	-۱۰۱dBm
سناریو سوم	۴۰ متر	۲,۵dB	-۱۰۳dBm
سناریو چهارم	۵۰ متر	-۱dB	-۱۰۷dBm

همان‌طور که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است در سناریو اول به دلیل نزدیک‌تر بودن دستگاه انتهایی به دروازه مقدار SNR و RSSI نسبت به بقیه سناریوها بزرگ‌تر است. در سناریو چهارم که دستگاه انتهایی در دورترین حالت قرار دارد SNR برابر با -1dB و RSSI برابر با -107dBm محاسبه شده است.

جمع‌بندی

معماری سامانه ردیابی مبتنی بر شبکه LoRaWAN از چهار جزء دستگاه انتهایی، چهار دروازه و پلتفرم مرکزی و برنامه محاسبه موقعیت مکانی تشکیل شده است. دستگاه انتهایی از ماژول LoRa شرکت HopeRF، برد Arduino Pro Mini و باتری لیتیوم پلیمر ساخته شده است. این دستگاه هر ۵ ثانیه یک‌بار بسته‌ای ارسال می‌کند. در این فصل یک دروازه هشت کاناله با قابلیت ردیابی ساخته شده است. دروازه ساخته شده از رزبری پای به عنوان کنترل‌کننده مرکزی استفاده می‌کند. رزبری پای با استفاده از ماژول LoRa RAK831 بسته‌ای ارسالی را دریافت می‌کند. با استفاده از ماژول GPS تعبیه شده در دروازه، زمان دریافت بسته به صورت نانو ثانیه محاسبه می‌شود. برنامه محاسبه موقعیت مکانی از الگوریتم TDoA برای محاسبه موقعیت مکانی دستگاه انتهایی استفاده می‌کند، که اساس کار این الگوریتم اختلاف زمان رسیدن بسته دستگاه انتهایی در جفت دروازه‌ها است. در این فصل ضمن طراحی یک سامانه ردیابی و تشریح جزئیات ساخت دستگاه انتهایی و دروازه شبکه LoRaWAN، شبکه LoRaWAN را در محیط indoor تست کردیم.