باسمه تعالی

گزارش پروژه درس امنیت در اینترنت اشیاء

دانشگاه صنعتي شريف

عنوان:

Bluetooth Mesh

انجام دهنده:

پریسا طوماری

99101857

زمستان 1402

درس امنیت در اینترنت اشیاء	Bluetooth Mesh	02/11/26
	پریسا طوماری	99101857

چکیده

BLE یک فناوری فاصله کوتاه و گسترده‌ی استفاده است که به دلیل سادگی، مصرف پایین انرژی، هزینه کم و پایداری، موقعیت مهمی را در توسعهٔ پارادایم اینترنت اشیاء به دست آورده است. بهبودهای جدید در BLE بر روی حمایت از توپولوژی شبکهٔ مش تمرکز کرده‌اند. در مقایسه با دیگر شبکه‌های مش، شبکهٔ مش BLE تنها در نسخهٔ اول خود از یک managed flooding protocol استفاده می‌کند. managed flooding در بسیاری از حالت‌ها به‌طور کلی به ناموفقیت می‌نماید، اما در صورت نیاز فوری به انتقال داده، شبکه‌ای کوچک یا تغییرات پویا در پیکربندی، این گزینه یکی از گزینه‌های بسیار مطلوب است. این گزارش به بررسی تأثیر تنظیم ویژگی‌های مختلف بر قابلیت اطمینان و کارایی شبکهٔ مش می‌پردازد. این ویژگی‌ها در لایه‌های مختلف تنظیم و کنترل می‌شوند: طرح‌های تکرار پیام، تصادفی‌سازی انتقال، انتخاب یک طرح بر اساس انتقال با تأیید یا بدون تأیید و غیره. برای ارزیابی عملکرد واقعی پیاده‌سازی شبکهٔ مش، این مقاله تأثیر تعامل پارامترهای انتخاب شده، تنظیمات مناسب آنها در ارتباط با ویژگی‌های پیاده‌سازی‌های واقعی و هزینه واقعی مرتبط با کل پروتکل استک را ارزیابی می‌کند. این چالش‌های پیکربندی را شناسایی می‌کند، معیارهای تنظیم شبکه را پیشنهاد می‌دهد و بهبودهای استاندارد ممکن را شرح می‌دهد. به این منظور، یک ارزیابی دقیق از پیاده‌سازی و اجرای دستگاه‌های واقعی با محدودیت‌های تراشه آنها انجام شده است.

درس امنیت در اینترنت اشیاء	Bluetooth Mesh	02/11/26
	پریسا طوماری	99101857

فصل 1

مقدمه

در حال حاضر، تکنولوژی‌های ارتباطی بی‌سیم بسیاری وجود دارند که می‌توانند برای پیاده‌سازی برنامه‌های اینترنت اشیاء در صنعتی، شهری و خانگی استفاده شوند. نمونه‌های برجسته شامل ZigBee، Z-Wave، Thread، LoWPAN6، Wi-Fi، Bluetooth Low Energy (BLE) می‌باشند. این تکنولوژی‌ها به لحاظ پروتکل‌ها، عملکرد، قابلیت اعتماد، تأخیر، هزینه و پوشش بسیار متفاوت هستند. بنابراین، انتخاب یک تکنولوژی خاص وابسته به ویژگی‌ها و شرایط مخصوص خدمت موردنظر و حالت کاربردی است. هر یک از این تکنولوژی‌ها ممکن است در برخی از ویژگی‌ها بهینه بوده و در اهداف دیگر ناکارآمد باشند. بنابراین، امکان ندارد که یک تکنولوژی بهتر از دیگری برای تمام شرایط را نتیجه گیری کرد.

در میان این‌ها، BLE یک فناوری فاصله کوتاه و گسترده‌ی استفاده است که به دلیل سادگی، مصرف کم انرژی، هزینه کم و پایداری، موقعیت برجسته‌ای به دست آورده است. در حال حاضر BLE در تقریباً تمامی تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها، رایانه‌ها و الکترونیک مصرفی به طور عمومی وجود دارد. این امر به توسعهٔ یک رده وسیعی از خدمات و برنامه‌های جدید در بخش‌هایی از جمله بهداشت، خانه‌هوشی، امنیت یا ارتباطات خودرو امکان پذیر شده است. BLE به خصوص در پیگیری اشیاء یا افراد در صحنه‌های داخلی/خارجی با نیازهای کم انرژی، قابلیت مقیاس‌پذیری بالا و قابلیت اعتماد موثر است.

با این حال، برخلاف تکنولوژی‌های دیگر مانند WiFi یا ZigBee، تا سال ۲۰۱۷، BLE قابلیت شبکه‌سازی مش را نداشت. شبکه‌های مش اجازه انتقال داده بین جفت نودها را به صورت پویا و غیر سلسله مراتبی می‌دهند. نودها همکاری می‌کنند و اجازهٔ انتقال کارآمد پیام‌ها به/از سایر دستگاه‌ها را می‌دهند. با توجه به اینکه توپولوژی‌های مش یک جایگزین جذاب برای توپولوژی‌های مرکزی یا مبتنی بر درخت است، اضافه کردن قابلیت شبکه‌سازی به بلوتوث گامی ضروری بود. گروه منافع ویژه بلوتوث (SIG) گروه کاری شبکه هوشمند بلوتوث را تشکیل داده است تا بر روی استاندارد سازی این قابلیت‌ها برای BLE کار کند. در واقع، قابلیت‌های مش یک بخش از استاندارد هسته بلوتوث نمی‌باشد.

به مقایسه با سایر شبکه‌ها یا پروتکل‌های مش (شامل ZigBee، Thread، Z-Wave، WiFi) که از تکنیک‌های مسیریابی استفاده می‌کنند، SIG BLE فقط در نسخهٔ اول خود از یک پروتکل غرقاب‌زنی استفاده کرده است. در واقع، غرقاب‌زنی مدیریت شده، به وسیلهٔ میانی میان غرقاب‌زنی اساسی و مسیریابی. با این حال، مشخصات SIG خود شامل همکاری میان‌مدت برای ادغام یک مکانیسم مسیریابی است. عدم وجود یک الگوریتم استاندارد و کارآمد، مشخصه‌های BLE را برای مجموعه‌ای از برنامه‌ها در شبکه‌های فضایی محدود می‌کند. در واقع، موفقیت شبکه مش بلوتوث بستگی به توانایی ارائه ویژگی‌های منحصر به فرد و امکان آدرس دهی به یک دامنه گسترده از برنامه‌ها را دارد، که برابر یا بیشتر آنچه توسط فناوری‌های رقیب ارائه شده است، است. به همین دلیل است که بسیاری از راه حل‌های مالکیتی و دانشگاهی برای ادغام مسیریابی وجود دارد. غرقاب‌زنی تنها تفاوت بین BLE و سایر شبکه‌های مش نیست. مش بر روی BLE ساخته شده است، فقط با استفاده از وضعیت‌های تبلیغاتی/اسکن کردن آن. از پروتکل اینترنت (IP) هم استفاده نمی‌کند.

مقایسه بین BLE و فناوری‌های رقیب برای اینترنت اشیاء یا مقایسه بین غرقاب‌زنی و دیگر گزینه‌های مسیریابی، موضوع این مقاله نیست. ویژگی‌ها، نقاط قوت و ضعف کلی غرقاب‌زنی و مسیریابی به طور گسترده شناخته شده‌اند. مسیریابی مقاوم و انرژی کم مصرف است، اما تأخیر بالا را نیازمند می‌کند و پیدا کردن مسیر بهینه چالش برانگیز است. از طرف دیگر، مزایای غرقاب‌زنی شامل سادگی، اضافه کردن، و عدم نیاز به محاسبه جدول‌های مسیریابی است. هر پیام جدید توسط چندین گره رله فوروارد می‌شود. با این حال، تعداد گره‌های رله و انتقال مجدد باید محدود و به طور دقیق تنظیم شوند تا کنترل ازدحام را به دست آورند که موجب از دست دادن بسته و تأخیر بالا به دلیل دسترسی مبتنی بر رقابت می‌شود. در غیر این صورت، این منجر به مصرف انرژی بالا و ازدحام می‌شود که مشکل اصلی غرقاب‌زنی است. گزینهٔ غرقاب‌زنی مدیریت شده که توسط BLE در نظر گرفته شده است، عملکرد غرقاب‌زنی اساسی را با اضافه کردن برخی بهینه‌سازی‌ها بهبود می‌بخشد. نمونه‌های مهم عبارتند از نشانه‌های زمان زندگی (TTL)، ذخیره‌سازی پیام، پیام‌های ضربان قلب و ویژگی‌های گره دوست. با این حال، غرقاب‌زنی و حتی غرقاب‌زنی مدیریت شده در بسیاری از مواقع به نظر می‌رسد که کارآیی کمی دارد، اما وقتی انتقال داده ضروری است، شبکه کوچک است یا تنظیمات آن به صورت بسیار پویا تغییر می‌کند، این یک گزینهٔ بسیار مطلوب است. به عنوان مثال، در برنامه‌های روشنایی. در حال حاضر، تمرکز اصلی استاندارد مش بر اساس غرقاب‌زنی برنامه‌های روشنایی است، به دلیل این که برای این سیستم‌ها اعمال کردن آن آسان است. با این حال، می‌تواند برای برنامه‌های دیگر هم کار کند. استاندارد همچنین مجموعه‌ای از مدل‌ها را برای عملکرد در حالت‌هایی مانند پیکربندی دستگاه و خواندن حسگرها تعریف می‌کند. در واقع، تبدیل پویا بین دو گزینه (مسیریابی و غرقاب‌زنی) ممکن است در بسیاری از حالت‌های شبکه به منظور سازگاری سیستم با شرایط شبکه موردنظر در نظر گرفته شود.

با در نظر گرفتن اینکه پیکربندی‌های مبتنی بر غرقاب‌زنی (هسته مشخصه کنونی) در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مورد توجه قرار می‌گیرند، هدف اصلی این مقاله شناسایی چالش‌های پیکربندی، ارائه معیارهای تنظیم شبکه و بررسی امکانات استاندارد ارائه می‌دهد. به این منظور، ارزیابی دقیقی از پیاده‌سازی و اجرای دستگاه‌های واقعی با محدودیت‌های تراشه آنها انجام شده است.

یک نکته کلیدی از مش BLE این است که تعریف شده است تا بر روی مشخصه‌های اصلی BLE کار کند. پیام‌های PDUs مش بین گره‌ها با استفاده از حامل تبلیغاتی حمل می‌شوند، و به طور خاص با استفاده از رویدادهای تبلیغاتی بی‌ارتباط و غیر قابل اسکن و غیر قابل اسکن ارسال می‌شوند. با این حال، ساختار این بسته‌ها و پارامترهای زمانی انتقال باید با نیازهای حمل مش سازگار شوند. به عنوان مثال، تطابق‌ها و تصادف‌سازی‌ها برای فواصل تبلیغاتی و اسکن‌های غیر فعال با یک چرخه وظیفه به حداقل ۱۰۰ درصد ممکن است به منظور جلوگیری از از دست دادن پیام‌ها یا PDUs مش وارد شوند. با این حال، دستگاه‌های BLE عیب‌هایی در عملکرد خود دارند که باید به خوبی مشخص شوند. اغلب، دستگاه‌های BLE زمان‌های کور مرتبط با توابع فرکانس تابش یا تبدیل را ارائه می‌دهند، که از اسکن مداوم واقعی جلوگیری می‌کند و ممکن است باعث افزایش نرخ از دست دادن PDU نسبت به انتظار شود. اعتماد به اعتبار و کارایی شبکه مش به چندین ویژگی مانند طرح‌های تکرار پیام، تصادف‌سازی انتقال، انتخاب یک طرح بر اساس انتقال تأیید شده یا، به طور جایگزین، بر اساس انتقال غیر تأیید شده، که در لایه‌های مختلف از پروتکل استوک پیکربندی و کنترل می‌شوند، وابسته است. به علاوه، برای ارزیابی

درس امنیت در اینترنت اشیاء	Bluetooth Mesh	02/11/26
	پریسا طوماری	99101857

عملکرد واقعی از پیاده‌سازی شبکه مش، لازم است تا تأثیر تعامل مجموعه‌های پارامتر انتخاب شده در چندین لایه مشمول شده در مش مشخصات (پیکربندی باید به طور مشترک در نظر گرفته شود تا بهترین عملکرد را داشته باشد)، تنظیم مناسب آنها در رابطه با ویژگی‌های پیاده‌سازی‌های واقعی (برای مثال، ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و بافرینگ ایده‌آل نیستند، و در واقع، ارزش‌های بسیار محدود بسیار اغلب در تراشه‌های واقعی وجود دارد)، و همچنین بالاترین هزینه وابسته به کل پروتکل استوک را بشناسیم و درباره آن بحث کنیم. پوشش و بحث در مورد همه این نکات مشارکت‌های این کار هستند.

فصل 2

شبکه Bluetooth Mesh

اساس و معماری در این بخش، جنبه‌های کلیدی که شبکه مش بلوتوث را مشخص می‌کنند را معرفی خواهیم کرد. درک شبکه مش BLE ابتدا نیازمند تعریف اصطلاحات موجود در استاندارد است، مرتبط با مفهوم شبکه مش BLE و توپولوژی، و ویژگی‌های مورد نیاز برای پشتیبانی از آنها است. یک نمایش از یک شبکه مش، شامل اصطلاحات و مفاهیم اصلی که در این مقاله استفاده خواهند شد، در شکل ۱. الف نشان داده شده است تا خواندن آن را آسان کند.

دستگاه‌هایی که قسمتی از یک شبکه مش هستند، به طور خاص دستگاه‌هایی که قادر به انتقال و دریافت پیام‌ها در یک شبکه مش هستند، «گره‌ها» یا «دستگاه‌های مجهز» نامیده می‌شوند، و کسانی که نیستند، «دستگاه‌های غیر مجهز» نامیده می‌شوند. «فرآیند اعطای مجوز» مکانیزمی است که دستگاه غیر مجهز را به یک گره تبدیل می‌کند.

به علاوه، یک «عنصر» یک مورد قابل آدرس داخل یک دستگاه/گره است. یک گره باید حداقل یک عنصر (برای مثال، یک لامپ، دوربین امنیتی، دتکتور دود، حسگر دما، و غیره) داشته باشد. اما در واقع، یک دستگاه («گره») ممکن است از چندین عنصر تشکیل شود (برای مثال، یک دستگاه نوری که از چندین لامپ تشکیل شده است که می‌تواند به طور مستقل روشن/خاموش شوند). در مورد تبادل داده بین عناصر، این مراحل به روش انتشار/اشتراک می‌روند، و سه نوع آدرس در نظر گرفته می‌شوند: یکپراکنده، گروه و مجازی. فرستنده (برای مثال، گره A در شکل ۱. الف) یک پیام را به یک آدرس خاص منتشر می‌کند. اگر این آدرس یکپراکنده باشد، مقصد یک عنصر تنها در یک گره (برای مثال، گره F) است و به طور خودکار توسط این عنصر پردازش می‌شود دریافت. اما زمانی که یک آدرس گروه/مجازی استفاده می‌شود، عناصری که علاقه‌مند به دریافت پیام‌ها هستند، به این آدرس گروه/مجازی اشتراک می‌گذارند، و تنها آنها پیام را پردازش خواهند کرد (برای مثال، همه چراغ‌ها در شکل ۱. الف).

ادامه اصطلاحات، گره‌ها دارای تعدادی ویژگی اختیاری هستند که ویژگی‌های خاصی به آنها می‌دهند:

گره رله: یک گره که پیام‌های مش را دریافت و سپس مجدداً از حامل تبلیغاتی برای فعال‌سازی شبکه‌های بزرگتر، با استفاده از فرآیند غرقابزنی مدیریت شده، می‌فرستد. به این ترتیب، یک گره از ویژگی رله پشتیبانی می‌کند پیام‌ها را به تمام گره‌های داخل دامنه خود منتقل می‌کند اما با دو بهینه‌سازی: پیام‌ها دارای یک زمان به زمان زندگی (TTL) است که با هر مجدد می‌کاهد. بنابراین، یک پیام فقط زمانی مجدد می‌شود که TTL آن بیش از یک باشد. و، به علاوه، پیام‌ها ذخیره می‌شوند. بنابراین، یک پیام دریافت شده که در حافظه ذخیره‌سازی قبلاً وجود دارد، به طور خودکار رد می‌شود و مجدداً ارسال نمی‌شود.

نود پایین توان (LPN) و نود دوست: یک نود پایین توان یک نود است که قابلیت عملکرد در چرخه‌های وظیفه دریافت به شدت کاهش یافته را در یک

شبکه مش دارد. به طور کلی، آنها نودهایی هستند که نیاز به حفظ انرژی به حداکثر است. معمولاً آنها نودهایی هستند که اکثر زمان خود را در ارسال داده‌ها صرف می‌کنند، به این معنی که ارسال کننده هستند (به عنوان مثال، یک حسگر دما که به طور دوره‌ای داده‌ها را ارسال می‌کند یا بالای یک آستانه)، با این حال گاهاً می‌توانند پیام‌ها را دریافت کنند. به منظور فعال کردن یک نود LPN برای کاهش چرخه وظیفه دریافت کننده خود و صرفه جویی در انرژی، به یک نود دیگر با نام "نود دوست" نیاز دارد. نود دوست، با پشتیبانی از ویژگی دوست، به یک نود LPN در دریافت پیام‌ها کمک می‌کند، با ذخیره کردن و فوروارد کردن پیام‌های مقصد شده به آن نود. فوروارد کردن توسط نود دوست بر اساس درخواست انجام می‌شود، زمانی که نود LPN برای پیام‌های منتظر تحویل به دوست خود پرسش می‌کند.

نود پروکسی: یک نود که ویژگی پروکسی را پشتیبانی می‌کند، قادر به رله/فوروارد کردن پیام‌ها بین دستگاه‌های بلوتوث غیر مش و یک شبکه مش است.

نود تأمین کننده: یک دستگاه که قابلیت اضافه کردن یک دستگاه به یک شبکه مش را دارد (فرآیند/ویژگی تأمین کردن)، ارائه اطلاعات لازم از جمله کلیدهای امنیتی مورد نیاز. فرآیند تأمین کردن زمانی آغاز می‌شود که یک دستگاه غیر مجهز تبلیغات نشانگر مش را ارسال می‌کند که اعلام می‌کند قابلیت پیکربندی شدن را دارد. وقتی تأمین کننده این دستگاه را شناسایی می‌کند، یک درخواست اطلاعات به این دستگاه غیر مجهز درباره الگوریتم‌های امنیتی پشتیبانی شده، تعداد عناصری که دستگاه پشتیبانی می‌کند، پارامترهای کلید عمومی و غیره ارسال می‌شود. سپس، این فرآیند مبادله کلید عمومی (DevKey)و احراز هویت بین دستگاه و تأمین کننده را از طریق یک اتصال بلوتوث، فناوری دیگر مانند ارتباطات نزدیک به هم شروع می‌کند. بعد از اتمام احراز هویت، آنها اطلاعات تأمینی تعریف شده برای آن شبکه را مبادله می‌کنند: کلیدهای شبکه و برنامه، آدرس یکانی، TTL پیشفرض، شاخص IV و غیره. هنگامی که نیاز به فروش/تغییر/دور از محل انداختن یک نود از یک شبکه مش است، مهم است به یاد داشته باشیم که این کلیدهای امنیتی را دارد و باید به درستی از شبکه مش حذف شود.

سرانجام، هر نود مجموعه‌ای از وضعیت‌های پیکربندی را پشتیبانی می‌کند که مربوط به توانایی‌ها و رفتار نود در داخل مش است. به عنوان مثال، ویژگی‌هایی که توسط نود پشتیبانی می‌شوند (پروکسی، رله و غیره)، آدرس‌هایی که نود به آنها اشتراک می‌گذارد، کلیدهای امنیتی، شرایطی که زیر آنها می‌توان یک عنصر را پیدا کرد و نمایش آنها توسط یک مقدار وضعیت و غیره.

در مش مشخصات BLE، الگوی مدل و، به طور خاص، اصطلاح مدل همه این جنبه‌ها را سازماندهی می‌کند. این مدل داده‌ها را بین نودها برای پشتیبانی از برنامه‌ها در صحنه‌های مختلف و تعریف رفتار نودها مرتبط با عملکرد ارائه می‌دهد. یعنی، مانند پروفایل‌ها در بلوتوث کلاسیک، بلوتوث مش مشخصات خود را برای مدل‌های مجازی دارد. این به طور کامل عملکرد سناریوهای معمول مصرف برای برخی از ویژگی‌های خاص را تعریف می‌کند، به عنوان مثال، نورپردازی یا حسگرها. عناصر ممکن است در وضعیت‌های مختلف باشند که ویژگی‌های مرتبطی دارند. به عنوان مثال، یک نور ممکن است از طریق وضعیت عمومی روشن/خاموش نمایان شود. باید توجه داشت که وضعیت‌های عمومی قابل استفاده مجدد هستند و امکان ایجاد سریع مدل‌های جدید را فراهم می‌کنند. وضعیت‌ها می‌توانند توسط پیام‌هایی که می‌توانند از سه نوع GET و SET برای

درخواست و تغییر مقدار آنها و پیام STATUS باشد، مدیریت شوند. آخری به عنوان یک پاسخ GET، یک اعتراف SET یا مستقل به عنوان یک پیام بدون درخواست ارسال می‌شود. یک نود ممکن است شامل چندین مدل باشد، در حالی که

عناصر ممکن است به عنوان یک سرور، مشتری یا عنصر کنترل شناخته شوند.

مرور اجمالی پشته لایه‌ای

بلوتوث مش به عنوان یک معماری لایه‌ای با سازگاری با نسخه‌های پیشین BLE 4.x طراحی شده است. بنابراین، تمام دستگاه‌های مدرک شده بلوتوث هوشمند یا آماده بلوتوث می‌توانند با اصلاحات مناسب به نرم‌افزار/فریمور خود با یک شبکه مش بلوتوث ارتباط برقرار کنند. شکل ۱.س) پشته لایه‌ای را نشان می‌دهد. ویژگی اصلی استاندارد این است که بر روی بالای پشته کامل BLE (لایه فیزیکی و لینک) ساخته شده است. داده‌ها به صورت پیاپی در کانال‌های ۳۷، ۳۸ و ۳۹ که برای تمام ارتباطات حالت غیر متصل اختصاص داده شده است (شکل ۱.د) و با استفاده از رویدادهای تبلیغات غیر متصل و غیر قابل اسکن به صورت غیر قابل اتصال و بدون اسکن، با برخی اصلاحات، ارسال می‌شوند. در بالای این پشته مش، یک برنامه پیاده سازی شده است، که یکی از نکات کلیدی مهم بلوتوث مش است که مشخصات رفتار دستگاه‌ها را با مدل معرفی شده بر اساس الگو معماری استانداردی سازی می‌کند. برای پشتیبانی از آن، استاندارد یک معماری لایه‌ای را دنبال می‌کند که تمام لایه‌های OSI از لایه برنامه تا لایه فیزیکی را پوشش می‌دهد، به گونه‌ای که پشته کامل مش BLE در خصوص: ۱) چگونگی تعریف و پیاده‌سازی این مدل‌ها؛ ۲) چگونگی آدرس‌دهی و ارسال داده‌ها در سراسر شبکه مش؛ ۳) چگونگی انتزاع مشخصه BLE Core به لایه‌های بالاتر از طریق مفهوم bearer را پوشش می‌دهد.

ما به صورت مختصر هر لایه از معماری مش را از بالا به پایین مرور خواهیم کرد.

۱) لایه مدل: به پیاده‌سازی مدل‌ها و به عنوان چنین، پیاده‌سازی عملکردهای اساسی نودها (رفتارها، وضعیت‌ها، پیام‌ها و غیره) در صحنه‌های برنامه‌ای خاص و استانداردی مانند روشنایی و حسگر مربوط می‌شود. هر مدل یک بخش از برنامه است و به همراه آن و لایه بنیادین، یک نمایش کامل از دستگاه را تشکیل می‌دهند.

۲) لایه مدل بنیادین: مسئول اجرای آن مدل‌های مرتبط با پیکربندی و مدیریت یک شبکه مش است.

۳) لایه دسترسی: تعریف می‌کند چگونه برنامه‌های لایه بالاتر از لایه‌های فنی‌تر پایین‌تر استفاده می‌کنند (لایه حمل و نقل بالاتر). فرمت داده برنامه‌ای را تعریف می‌کند؛ رمزنگاری و رمزگ

شایی داده‌های برنامه‌ای را کنترل و کنترل می‌کند که آیا داده‌های برنامه‌ای وارد شده در زمینه کلیدهای شبکه و برنامه درست دریافت شده‌اند یا خیر قبل از ارسال آن به لایه بالاتر.

۴) لایه حمل و نقل بالاتر: لایه حمل و نقل بالاتر داده‌های برنامه‌ای را رمزگذاری، رمزگشایی و تأیید می‌کند و برای ارتباط امن پیام‌های دسترسی طراحی شده است.

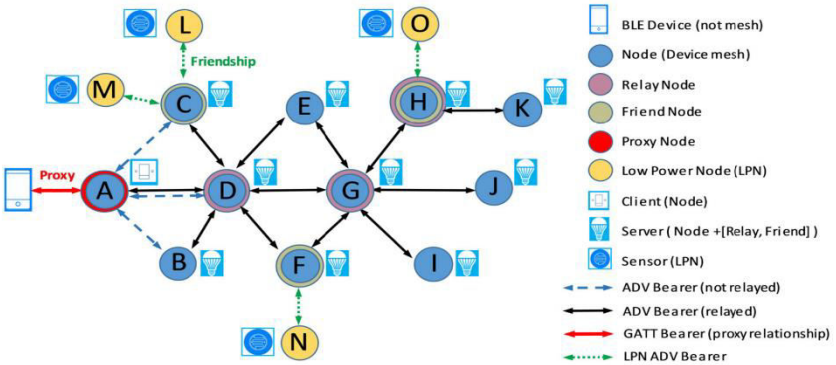
۵) لایه حمل و نقل پایین‌تر: تعریف می‌کند چگونه پیام‌های لایه حمل و نقل بالاتر به واحدهای داده‌ای پایین‌تر تقسیم و مجدداً ترکیب می‌شوند.

۶) لایه شبکه: تعریف می‌کند چگونه پیام‌های لایه حمل و نقل به یک یا چند عنصر آدرس داده می‌شوند. فرمت پیام شبکه را تعریف می‌کند که امکان حمل پیام‌های حمل و نقل را توسط لایه bearer فراهم می‌کند. لایه شبکه تصمیم می‌گیرد که آیا پیام‌ها را انتقال دهد/فرستاده و یا آنها را برای پردازش بیشتر قبول کند یا رد کند. یعنی، ویژگی‌های relay و proxy ممکن است توسط لایه شبکه پیاده‌سازی شود. همچنین، تعریف می‌کند که چگونه یک پیام شبکه رمزگذاری و تأیید می‌شود.

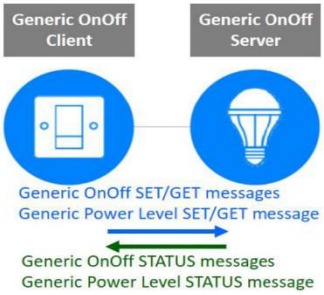
۷) لایه bearer: این آخرین لایه قبل از دسترسی به مرکز BLE است. تعریف می‌کند چگونه پیام‌های شبکه از بین نودها حمل و نقل داده می‌شوند. در حال حاضر دو bearer تعریف شده است، bearer تبلیغات و bearer پروفایل ویژگی‌های عمومی (GATT). bearer تبلیغات ترجیحی برای ارسال پیام‌ها در یک شبکه مش است و تنظیمات تبلیغاتی غیر قابل اتصال و تبلیغات غیر قابل اسکن را تعریف می‌کند. از طرف دیگر، bearer GATT ارائه شده است تا دستگاه‌هایی که قادر به پشتیبانی از bearer تبلیغات نیستند، بتوانند در یک شبکه مش شرکت کنند. bearer GATT از پروتکل Proxy برای انتقال و دریافت واحدهای داده پروکسی بین دو دستگاه از طریق یک اتصال GATT استفاده می‌کند.

توجه داشته باشید که شبکه مش بلوتوث با امنیت به عنوان یکی از اولویت‌های اصلی خود طراحی شده است و اجباری است: تمام پیام‌های مش بلوتوث رمزنگاری و احراز هویت می‌شوند. در واقع، برای

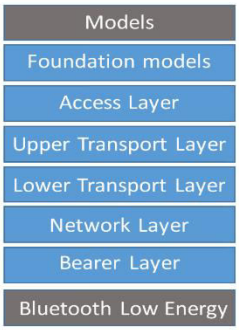
آدرس دهی به صورت مستقل به مسائل مختلف، این کاربردها کلیدهای مختلفی دارد: امنیت شبکه (NetKey)، امنیت برنامه (AppKey) و امنیت دستگاه (DevKey). به عنوان مثال، به دست آوردن NetKey به یک نود اجازه می‌دهد تا پیام‌ها تا لایه شبکه را رمزگشایی و تأیید کند تا، به عنوان مثال، رله‌گیری امکان پذیر باشد. با این حال، این کلید امکان رمزگشایی داده‌ها را نمی‌دهد و در این صورت یک AppKey اضافی لازم است.



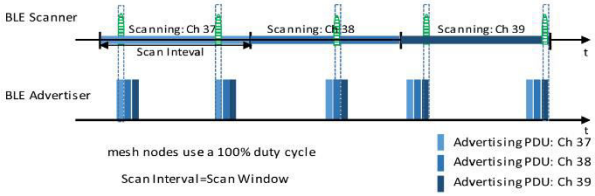
a) **BLE mesh node types and topology.**



b) **Client/Server states**



c) **The BLE mesh layered architecture**



d) **BLE advertising and scanning process**

فصل 4

پایه‌های انتقال BLE MESH PDU

برای تخمین بهینه‌ی توان انتقال، لازم است به هزینه‌های واقعی بسته مرتبط با مشخصات توده کل پروتکل و هزینه‌های زمانی مرتبط با فرآیند تحویل در سراسر شبکه توجه کنیم. از طرف دیگر، اعتبار شبکه بر اساس تکرار پیام‌ها استوار است. اما تکرار ممکن است توسط چندین فرآیند مجدد مجدد که توسط پارامترهای متفاوت اداره می‌شوند، کنترل شود. به علاوه، شبکه BLE MESH انتقال پیام‌های بدون تأیید و با تأیید را پشتیبانی می‌کند.

تعامل بین این فرآیندها و با پارامترهای تنظیم فراهم‌کننده نیاز به ارزیابی دارد. در این بخش، ابتدا تمام روش‌ها و پارامترهای مربوط که بر فرآیند انتقال داده در سراسر شبکه مش تأثیر می‌گذارند، تعریف می‌شوند. تجزیه و تحلیل تأثیر این تعاملات پارامترهای تنظیم شده انتخابی در بخش IV مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱) تخمین هزینه‌های بالای پروتکل توده

داده‌ها به ترتیب با استفاده از حداقل یکی از سه کانال تبلیغاتی ارسال می‌شوند، در حالی که ظرفیت حمل و نقل داده محدود است و با حجم بسته‌های تبلیغاتی و هزینه‌های اضافی معرفی شده توسط کل پروتکل از لایه bearer تا لایه دسترسی محدود می‌شود. گرچه پیام‌ها معمولاً کوتاه هستند و به اندازه کافی کوتاه هستند که بتوانند تنها در یک فریم ADV/PDU حمل و نقل شوند، اما ممکن است نیاز به تقسیم شوند. در هر صورت، خواهیم دید که درصد کمی از PDU ADV حاوی داده‌های مربوط است.

شکل ۲ نمونه‌ای از یک رویداد تبلیغاتی غیر قابل اتصال و غیر قابل اسکن را نشان می‌دهد. طول بار مفید برای این نوع تبلیغات محدود به ۳۷ بایت است. با این حال، ۶ بایت اول این بار مفید برای ارسال آدرس تبلیغاتی استفاده می‌شوند و بقیه (۳۱ بایت) باید ادغامی از یک یا چندین ساختار خاص (ساختارهای (ADVرا دنبال کنند. هر ساختار ADV توسط یک فیلد طول یک بایت و یک فیلد نوع یک بایتی تشکیل شده است. برای مورد خاص پیام‌های مش، نوع باید به عنوان ۰ × A۲ که در [۱۰] تعریف شده است، باشد. خلاصه‌سازی می‌کنیم که این حداکثر ظرفیت حمل و نقل برای لایه‌های بالاتر از ۲۹ بایت از مجموع ۴۷ بایت است.

شکل ۳ ساختار PDU در لایه‌های مختلف تعریف شده در مشخصات پروفایل مش را نشان می‌دهد. لایه شبکه معمولی که پیکربندی و مدیریت شبکه مش را مورد نظر قرار می‌دهد، مکانیزمی را برای مدیریت پارامترهای لایه

شبکه ارائه می‌دهد. در این نقطه، فیلدهای زیر لازم است:

- IVI: کم اهمیت‌ترین بیت شماره‌گذاری متغیر مقدار اولیه.
- NID: شناسایی شبکه.

- CTL: نوع پیام را نشان می‌دهد (دسترسی/کنترل).
- TTL: زمان تا زمان زندگی.
- SEQ: شماره دنباله.
- SRC: آدرس عنصر مبدا.
- DST: آدرس عنصر مقصد.
- PDU حمل و نقل: داده‌های لایه بعدی.
- NetMIC: چک اصالت پیام شبکه (MIC).

هنگام انتقال یک پیام دسترسی (CTL = ۰)، NetMIC ۴ بایت کاهش می‌یابد زیرا یک MIC اضافی در لایه حمل و نقل (TransMIC، چک اصالت پیام برای حمل و نقل) اضافه می‌شود.

لایه حمل و نقل پایین، مکانیزم انتقال قابل اعتمادی برای PDU حمل و نقل بالاتر فراهم می‌کند. برای انتقال PDU حمل و نقل بالاتر از ۱۵ بایت (۱۱ بایت بدون TransMIC)، لایه حمل و نقل پایین آن‌ها را تقسیم و مجدداً آن‌ها را دریافت می‌کند. درباره لایه حمل و نقل بالاتر، این لایه پیام‌های کنترلی لایه حمل و نقل بالاتر (حداکثر اندازه بار مفید PDU ۲۵۶ بایت) یا پیام‌های دسترسی (حداکثر اندازه بار مفید PDU ۳۸۰ بایت) تولید می‌کند. پیام‌های دسترسی شامل یک TransMIC هستند که امکان تأیید و رمزگشایی با استفاده از AppKeys را فراهم می‌کند. توجه داشته باشید که هنگامی که پیام دسترسی بالاتر توسط لایه حمل و نقل پایین تقسیم می‌شود، TransMIC فقط در آخرین قطعه حاضر است. بنابراین، با توجه به اینکه فیلد) SegNشماره قطعه) که تعداد قطعات فعلی را نشان می‌دهد، فقط دارای ۵ بیت است، امکان ارسال تا ۳۱ قطعه از ۱۲ بایت داده و آخرین با حداکثر ۸ بایت داده وجود دارد. در نتیجه، با Bluetooth mesh می‌توان تا ۳۸۰ بایت داده را از لایه حمل و نقل بالاتر انتقال داد. با این حال، در مورد بار مفید بدون تقسیم، حداکثر بار مفید در دسترس تنها ۱۱ بایت از ۴۷ بایت تبلیغات BLE است. به علاوه، هر PDU لایه دسترسی که حاوی داده‌های برنامه است، باید توسط یک کد عمل ((OpCodeبه همراه برخی پارامترها تشکیل شود. کد عمل می‌تواند دارای یک بایت (پیام‌های ویژه)، دو بایت (پیام‌های است

اندارد) یا سه بایت (پیام‌های ویژه تولیدکننده) باشد. بنابراین، حداقل یک بایت باید از این حداکثر ۳۸۰ بایت کم شود.

در زمان نوشتن این، اکثر مدل‌های تعریف شده از GET، SET و STATUS استفاده می‌کنند که کوتاه‌تر از ۱۱ بایت هستند. بنابراین، آن‌ها می‌توانند در یک پیام دسترسی بدون تقسیم ارسال شوند. به عنوان نتیجه، بار مفید کاربر حداکثر تنها ۱۰ بایت از ۴۷ بایت تبلیغات BLE که یک کارایی ٪۲۱ است، در دسترس است. به عنوان مثال، ترکیب پیام‌های SET و STATUS برای مدل On/Off عمومی را در شکل ۳ ارائه می‌دهیم. می‌توان دید که تنها شش و پنج بایت مورد نیاز است.

زمانی که PDU نیاز به تقسیم است، لازم است به محدودیت‌های حامل توجه شود. زمان بین قطعات برابر یا بیشتر از ۲۰ میلی ثانیه است و بنابراین، کارایی انتقال حتی بیشتر کاهش می‌یابد.

۲) تطبیق رویداد تبلیغاتی BLE با مش

Mesh bluetooth از حامل‌های تبلیغاتی استفاده می‌کند، مبتنی بر بسته‌های تبلیغاتی غیر قابل اتصال و غیر قابل اسکن. یک حامل توسط ارسال یک PDU تبلیغاتی به ترتیب (رویداد تبلیغاتی) با استفاده از حداقل یکی از سه کانال تبلیغاتی (کانال ۳۷، ۳۸ و/یا ۳۹) تشکیل می‌شود.

زمان بین شروع دو PDU تبلیغاتی پیاپی در یک رویداد تبلیغاتی باید کمتر یا مساوی با ۱۰ میلی ثانیه باشد. زمان بین شروع دو رویداد تبلیغاتی متوالی (تحت تأثیر محدودیت‌های زمانی اعمال شده در داخل رویداد) توسط پارامتر advInterval (≥ ۲۰ میلی ثانیه) به علاوه یک متغیر تصادفی بین ۰ و ۱۰ میلی ثانیه کنترل می‌شود.

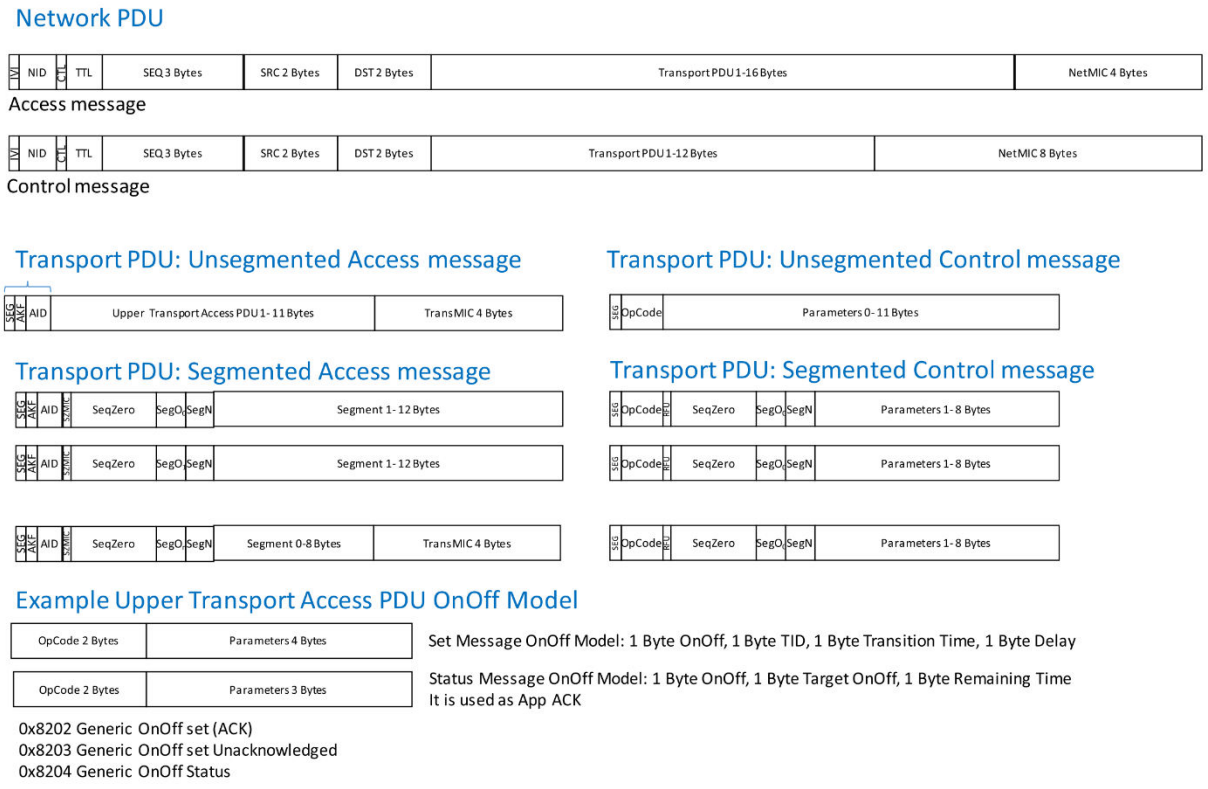
به عبارت دیگر، به موجب مشخصات اصلی BLE، لایه لینک ممکن است به حالت تبلیغاتی وارد شود و ارسال چندین PDU تبلیغاتی در رویدادهای تبلیغاتی پیاپی ممکن باشد. مرتبط با این، توجه داشته باشید که قابلیت اعتماد شبکه‌های مدیریت شده مشکلات به وسیله تکرار PDU شبکه (این مورد شامل استفاده از چندین رویداد تبلیغاتی است) می‌تواند بهبود یابد. با این حال، مشخصات مش نشان می‌دهد که لایه لینک BLE باید از حالت تبلیغاتی خارج شود در دوره تبلیغاتی. به عبارت دیگر، تنها یک رویداد تبلیغاتی می‌تواند تکمیل شود. این به این معناست که تکرار PDU شبکه توسط پیکربندی مدت زمان حالت تبلیغاتی (پیکربندی لایه لینک) پشتیبانی نخواهد شد. به جای اینکه تکرارها توسط تایمرها و پارامترهای تعریف شده در لایه شبکه کنترل شوند، پارامتر advInterval کمترین آستانه برای پارامترهای تعریف شده در این لایه است. توجه داشته باشید که نسخه ۴٫۲ هسته اینترلوکشن رویدادهای تبلیغاتی مربوط به انتقال‌های مختلف PDU شبکه را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، تکرارهای کنترل شده در سطح لایه لین

ک هنگامی که یک گره در انتقال یا/و بازارسانی چندین PDU شبکه درگیر باشد، ممکن است خیلی انعطاف‌پذیر نباشد. با این حال، از نسخه ۵٫۰ BLE به بعد امکان انعطاف‌پذیری بیشتری در مورد مشخصات آینده مش وجود دارد. به واقع، این ویژگی می‌تواند زمان بین شروع دو PDU تبلیغاتی پیاپی متناظر با مجموعه‌های داده تبلیغاتی را کمتر از ۲۰ میلی ثانیه کاهش دهد.

علاوه بر این، بخاری استاندارد موصوف است که یک تأخیر تصادفی کوچک بین دریافت یک PDU شبکه مش و پیام‌دهی یک PDU شبکه به منظور جلوگیری از برخورد بین چندین رله که در همان زمان PDU شبکه را دریافت کرده‌اند، ارائه شود.

سرانجام، به موجب مشخصات، تمام دستگاه‌ها که فقط از حامل تبلیغاتی پشتیبانی می‌کنند، باید با یک چرخه وظیفه با نزدیکی به ٪۱۰۰ اسکن کنند. با این حال، بسیاری از شکاف‌ها بر روی فرآیند اسکن تأثیر می‌گذارد و باعث غیرفعال شدن دریافت رادیو می‌شود: ۱) زمان برای جابجایی بین کانال‌های اسکن؛ ۲) زمان مورد نیاز برای پردازش پیام (PDU شبکه موجود در ADV). بعد

از دریافت آن، گره دریافت کننده پیام را حداقل تا لایه شبکه (اگر این گره مقصد نباشد، بدون اهمیت است که رله باشد یا نه) یا حداکثر تا لایه برنامه (اگر گره مقصد باشد) منتقل می‌کند، جایی که رویدادهای دیگر ممکن است شروع شوند (به عنوان مثال، ارسال یک پاسخ به گره منبع). علاوه بر این، هنگامی که یک گره به عنوان گره رله عمل می‌کند، اسکن توسط زمان لازم برای ارسال پیام رله روی کانال‌های تبلیغاتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.



پارامترهاي پشتيباني اوليه از فرايند تحريك پراكني

شبكه‌هاي BLE Mesh از تكنيك پراكني مديريت شده استفاده مي‌كنند كه توسط دو ويژگي اصلي پشتيباني مي‌شود. هر پيام شامل يك مقدار TTL است كه تعداد بارهايي كه يك پيام مي‌تواند رله شود را محدود مي‌كند و به منظور جلوگيري از انتقال‌هاي مجدد غير ضروري، گره‌ها يك حافظه از آخرين پيام‌هاي دريافت شده نگه مي‌دارند. مشخصات شبكه BLE مقدار خاصي براي حافظه ارائه نمي‌دهد. فقط از آن استفاده مي‌شود كه به يك مقدار بزرگتر از يك ثابت شود. با اين حال، كارايي پراكني، به علاوه شكافهاي زماني مرتبط با الگوريتم پردازش رله، تحت تأثير ظرفيت‌هاي حافظه انتخاب شده قرار مي‌گيرد. مقدار پايين براي حافظه در يك شبكه چگال باعث ناكارآمد شدن الگوريتم پراكني مي‌شود

زیرا حافظه به سرعت تجدید می‌شود. از سوي دیگر، اگر این مقدار افزایش یابد، تاخیر پردازش و زمان‌هاي کور نیز افزایش می‌یابند.

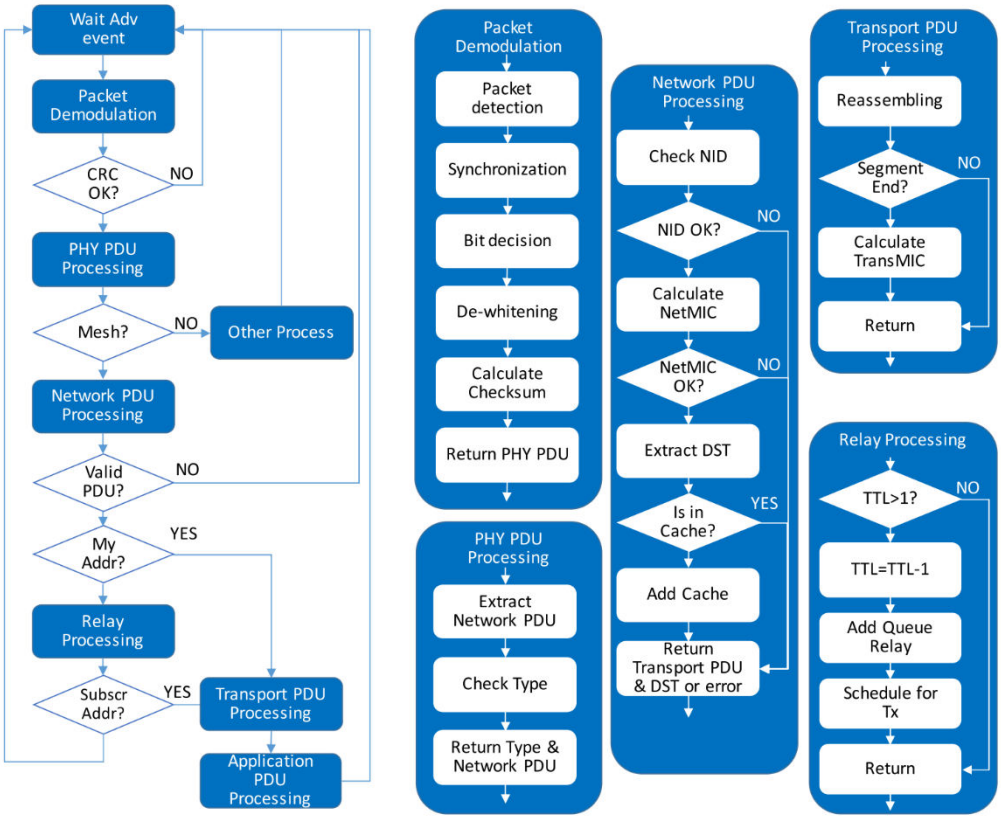
فرآیند پردازش PDU شبکه در شکل ۴ خلاصه شده است. شروع شده از شناسایی ADV، گیرنده هنگام پیشامدگیری همگام می‌شود و تصمیم‌گیری بیت انجام می‌شود. سپس، داده‌ها با یک دنباله که به فرکانس کانال اسکن شده فعلی وابسته است، از تبه‌کاری معاف می‌شوند. بعد، مجموع کنترلی محاسبه می‌شود و اگر مطابقت داشته باشد، نوع داده تبلیغات بررسی می‌شود تا تصمیم گرفته شود که آیا یک پیام مش است یا خیر.

مرحله بعد این است که تعیین شود که آیا پیام به همان شبکه متعلق است یا نه توسط بررسی NID و .NetMICدر این نقطه، یک مرحله حیاتی این است که بررسی شود آیا پیام پیشتر دریافت شده است، به عبارت دیگر، آیا در حافظه موجود است یا نه. اگر نه، پیام باید به حافظه اضافه شود و پردازش آن ادامه یابد. اما اگر در حافظه باشد، به طور خودکار باید رد شود.

سپس، اگر آدرس DST آدرس یونیکست یکی از عناصر در گره باشد، پیام باید رله نشود و مستقیماً به لایه بالاتر ارسال شود.

الگوریتم پردازش رله باید بررسی کند که آیا TTL بیشتر از یک است یا خیر. اگر صحیح باشد، TTL باید کاهش داده شود، پیام به یک صف رله اضافه شود و برای ارسال آینده زمان‌بندی شود.

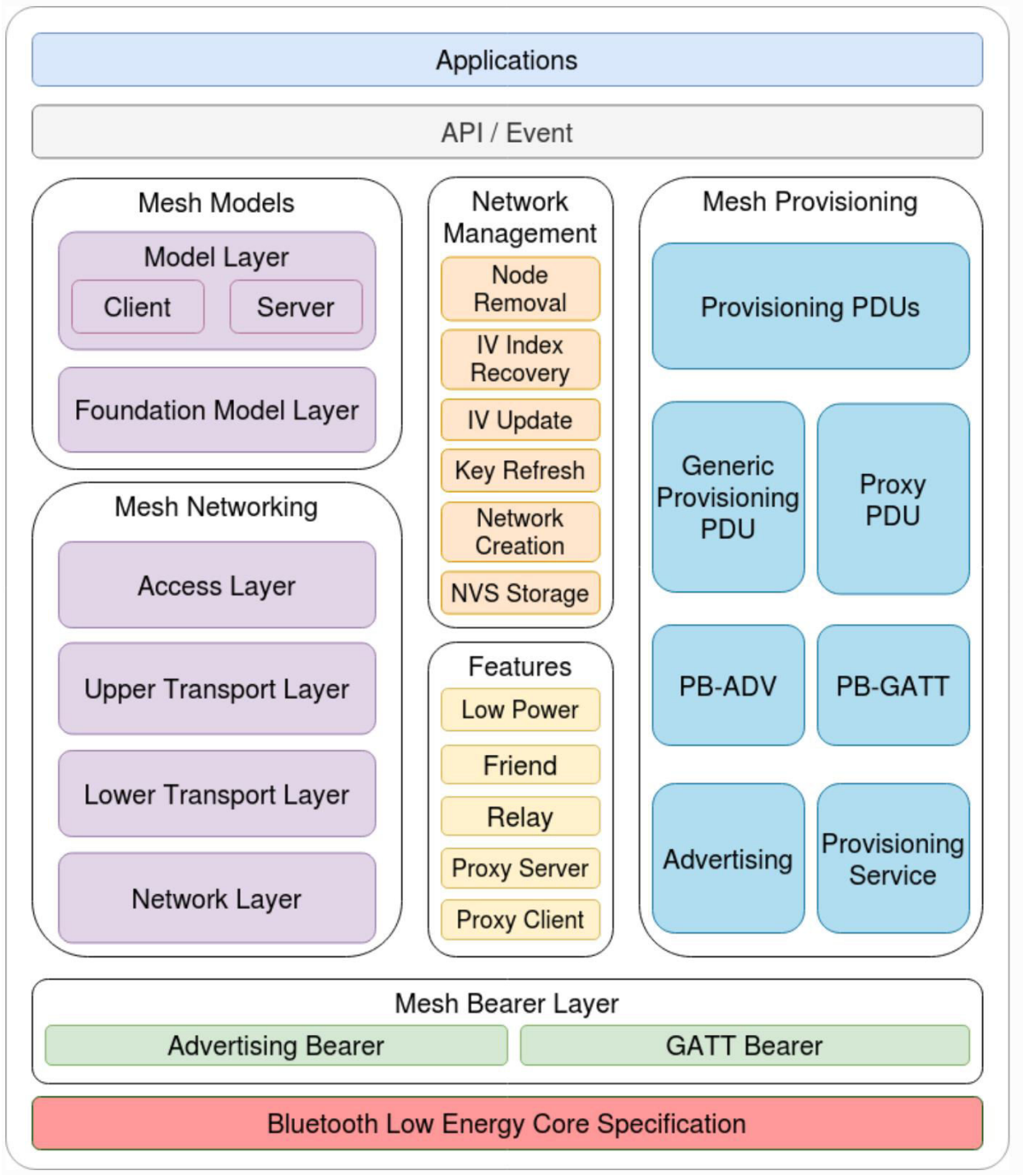
سرانجام، دوباره آدرس DST بررسی می‌شود، تا ببینیم آیا با یکی از آدرس‌های مشترک شده آن گره مطابقت دارد یا نه. اگر نه، فرآیند پایان می‌یابد و گره باید منتظر دریافت رویداد ADV بعدی باشد. در غیر این صورت، پیام به لایه بعدی تحویل داده می‌شود، اگر لازم باشد مجدداً تجمیع شود و TransMIC محاسبه و بررسی می‌شود قبل از اینکه به لایه برنامه تحویل داده شود.


Wait Adv event
Packet Demodulation
CRC OK?
NO
PHY PDU Processing
Mesh?
NO
Other Process
Network PDU Processing
Valid PDU?
NO
My Addr?
YES
Relay Processing
Subscr Addr?
YES
Transport PDU Processing
Application PDU Processing
Packet Demodulation
Packet detection
Synchronization
Bit decision
De-whitening
Calculate Checksum
Return PHY PDU
PHY PDU Processing
Extract Network PDU
Check Type
Return Type & Network PDU
Network PDU Processing
Check NID
NID OK?
NO
Calculate NetMIC
NetMIC OK?
NO
Extract DST
Is in Cache?
YES
Add Cache
Return Transport PDU & DST or error
Transport PDU Processing
Reassembling
Segment End?
NO
Calculate TransMIC
Return
Relay Processing
TTL>1?
NO
TTL=TTL-1
Add Queue Relay
Schedule for Tx
Return

آزمایش عملی

مرور معماری ESP-BLE-MESH

در حال حاضر، ESP-BLE-MESH بیشتر عملکردها و مدل‌های مشخصه شبکه را پیاده‌سازی کرده است و تمام مدل‌های مشتری تعریف شده در مشخصات مدل شبکه را دارا می‌باشد. عملکردها/مدل‌هایی که اکنون وجود ندارند در حال توسعه هستند و به زودی ارائه خواهند شد. معماری ESP-BLE-MESH با دریافت گواهینامه رسمی بلوتوث تأیید شده است.



معماری ESP-BLE-MESH شامل پنج قسمت کلیدی است:

پشته پروتکل شبکه مش

شبکه مش مسئول پردازش پیام‌های گره‌های ESP-BLE-MESH است.

ارائه شبکه مش

ارائه شبکه مش مسئول جریان ارائه دستگاه‌های ESP-BLE-MESH است.

مدل‌های شبکه مش

مسئولیت پیاده‌سازی مدل‌های تعریف شده توسط SIG را دارد.

مدیریت شبکه

شامل انجام چندین روند مدیریت شبکه، از جمله روند حذف گره، روند بازیابی شاخص IV و غیره.

ویژگی‌ها

شامل چندین ویژگی ESP-BLE-MESH مانند ویژگی کم مصرفی، ویژگی دوست، ویژگی رله و غیره.

6لایه حامل شبکه مش

شامل حامل‌های تبلیغاتی و GATT است. این لایه حامل برای پشته پروتکل ESP-BLE-MESH حیاتی است که بر پایه فناوری بلوتوث انرژی پایین ساخته شده است، زیرا پشته پروتکل باید از لایه حامل استفاده کند تا اطلاعات را از طریق کانال تبلیغاتی BLE و کانال اتصال ارسال کند.

کاربردها

براساس پشته پروتکل ESP-BLE-MESH و مدل‌های شبکه مش.

با فراخوانی API و رسیدگی به رویدادها، برنامه‌ها با شبکه مش و ارائه شبکه مش در پشته پروتکل ESP-BLE-MESH، و همچنین یک سری از مدل‌های ارائه شده توسط مدل‌های شبکه مش، تعامل می‌کنند.

`Mesh Networking` in the protocol stack architecture implements the following functions:

- The communication between nodes in the Mesh network.
- Encryption and decryption of messages in the Mesh network.
- Management of Mesh network resources (Network Key, IV Index, etc.).
- Segmentation and reassembly of Mesh network messages.
- Model mapping of messages between different models.

Layer	Function
Access Layer	Access Layer not only defines the format of application data, but also defines and controls the encryption and decryption of the data packets conducted by Upper Transport Layer.
Upper Transport Layer	Upper Transport Layer encrypts, decrypts, and authenticates application data to and from the access layer; it also handles special messages called "transport control messages", including messages related to "friendship" and heartbeat messages.
Lower Transport Layer	Lower Transport Layer handles segmentation and reassembly of PDU.
Network Layer	Network Layer defines the address type and format of the network messages, and implements the relay function of the device.

`Mesh Provisioning` in the protocol stack architecture implements the following functions:

- Provisioning of unprovisioned devices.
- Allocation of Mesh network resources (unicast address, IV Index, NetKey, etc.).
- Four authentication methods support during provisioning.

Layer	Function
Provisioning PDUs	Provisioning PDUs from different layers are handled using provisioning protocol.
Generic Provisioning PDU/Proxy PDU	The Provisioning PDUs are transmitted to an unprovisioned device using a Generic Provisioning layer or Proxy protocol layer.
PB-ADV/PB-GATT	These layers define how the Provisioning PDUs are transmitted as transactions that can be segmented and reassembled.
Advertising/Provisioning Service	The provisioning bearers define how sessions are established such that the transactions from the generic provisioning layer can be delivered to a single device.

`Mesh Models` in the protocol stack architecture implements the following functions:

- Configuration Client/Server Models
- Health Client/Server Models
- Generic Client/Server Models
- Sensor Client/Server Models
- Time and Scenes Client/Server Models
- Lighting Client/Server Models

Layer	Function
Model Layer	Model Layer implements models used to standardize the operation of typical user scenarios, including Generic Client/Server Models, Sensor Client/Server Models, Time and Scenes Client/Server Models, Lighting Client/Server Models and several vendor models.
Foundation Model Layer	Foundation Model Layer implements models related to ESP-BLE-MESH configuration, management, self diagnosis, etc.

`Network Management` implements the following functions:

- Node removal procedure is used to remove a node from the network.
- IV Index recovery procedure is used to recover a node's IV Index.
- IV update procedure is used to update the nodes' IV Index.
- Key refresh procedure is used to update the nodes' NetKey, AppKey, etc.
- Network creation procedure is used to create a mesh network.
- NVS storage is used to store node's networking information.

`Bearers` in the protocol stack architecture are responsible for passing of data between ESP-BLE-MESH protocol stack and Bluetooth Low Energy Core.

`Bearers` can be taken as a carrier layer based on Bluetooth Low Energy Core, which implements the function of receiving and transmitting data for the ESP-BLE-MESH protocol stack.

Layer	Function
GATT Bearer	The GATT Bearer uses the Proxy protocol to transmit and receive `Proxy PDUs` between two devices over a GATT connection.
Advertising Bearer	When using the Advertising Bearer, a mesh packet shall be sent in the Advertising Data of a `Bluetooth Low Energy advertising PDU` using the Mesh Message AD Type.

ما قصد داریم فرآیند تنظیم و عملکرد یک شبکه کوچک ESP-BLE-MESH را با سه گره نشان دهیم. این فرآیند شامل پروویژنینگ دستگاه و پیکربندی گره‌ها و سپس ارسال دستورات روشن/خاموش به مدل‌های سروری ژنریک OnOff در گره‌های خاص خواهد بود.

آنچه نیاز داریم

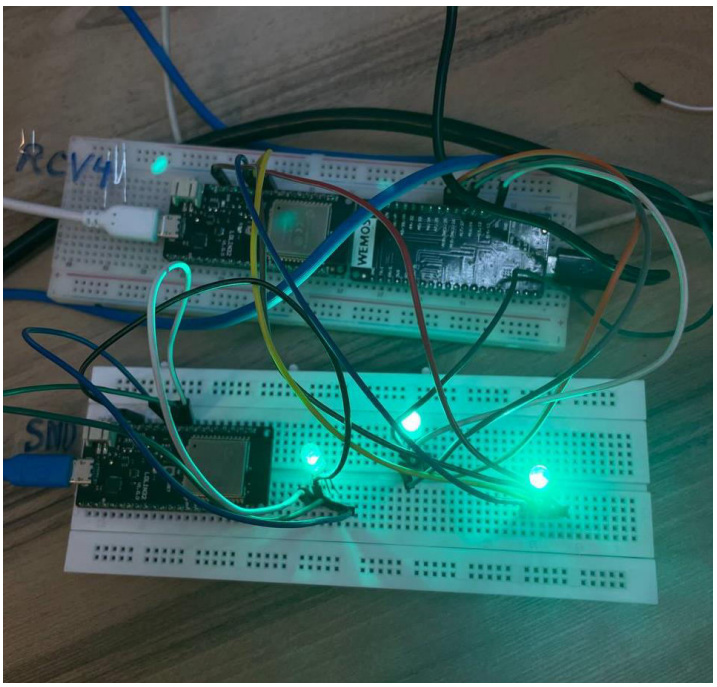
سخت‌افزار:

- سه برد ESP32، گزینه‌ها را ببینید.
- کابل‌های USB برای اتصال بردها.
- کامپیوتری که با ESP-IDF پیکربندی شده باشد.
- تلفن همراه یا تبلت اجرا کننده سیستم عامل android یا ios.

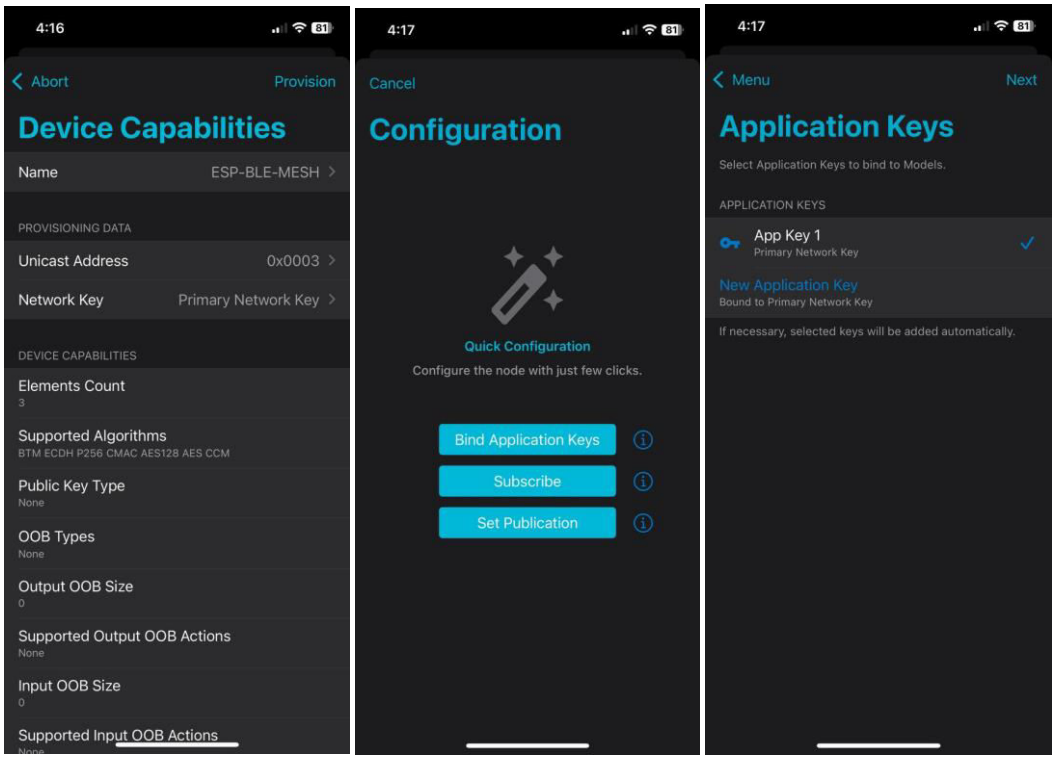
نرم افزار:

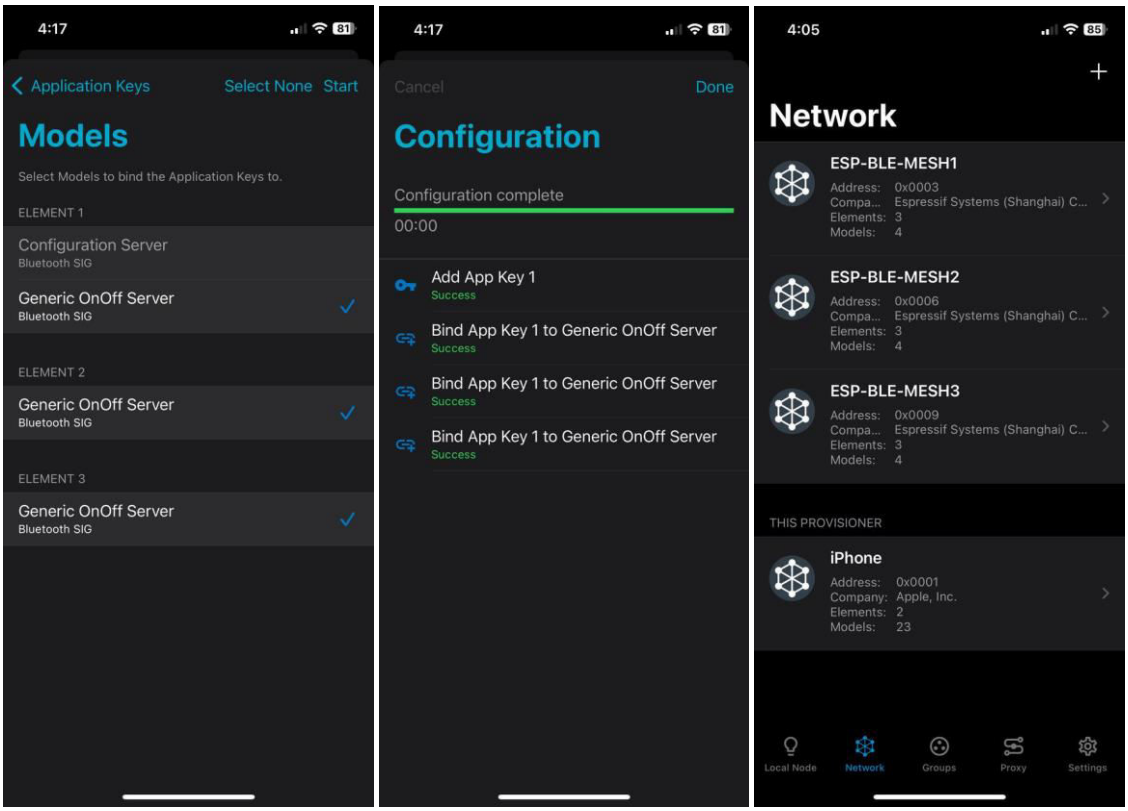
- برنامهٔ نمونه کد بلوتوث/esp_ble_mesh/onoff_models/onoff_server برای بارگذاری بر روی بردهای ESP32.
- برنامهٔ تلفن همراه: nRF Mesh برای android یا ios. اختیاری می‌توانید از برنامه‌های دیگری استفاده کنید:
  - EspBleMesh برای android
  - برنامهٔ Silicon Labs برای android یا ios

بعد از اینکه کد مربوطه را روی میکروکنترلرهای esp32 فلش کردیم, مشاهده می‌کنیم که rgb led هر 3 به رنگ سبز روشن شده‌اند.

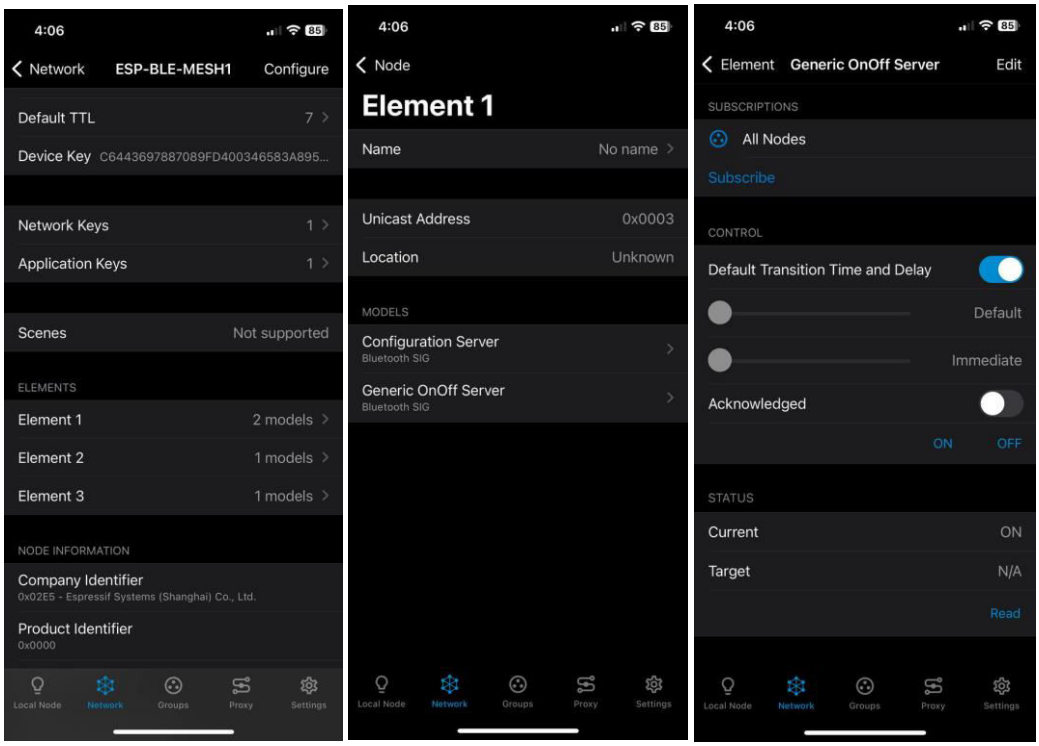


سپس با استفاده از اپلیکیشن nrf mesh به هر 3 esp32 متصل می‌شویم و آن‌ها را configure می‌کنیم .

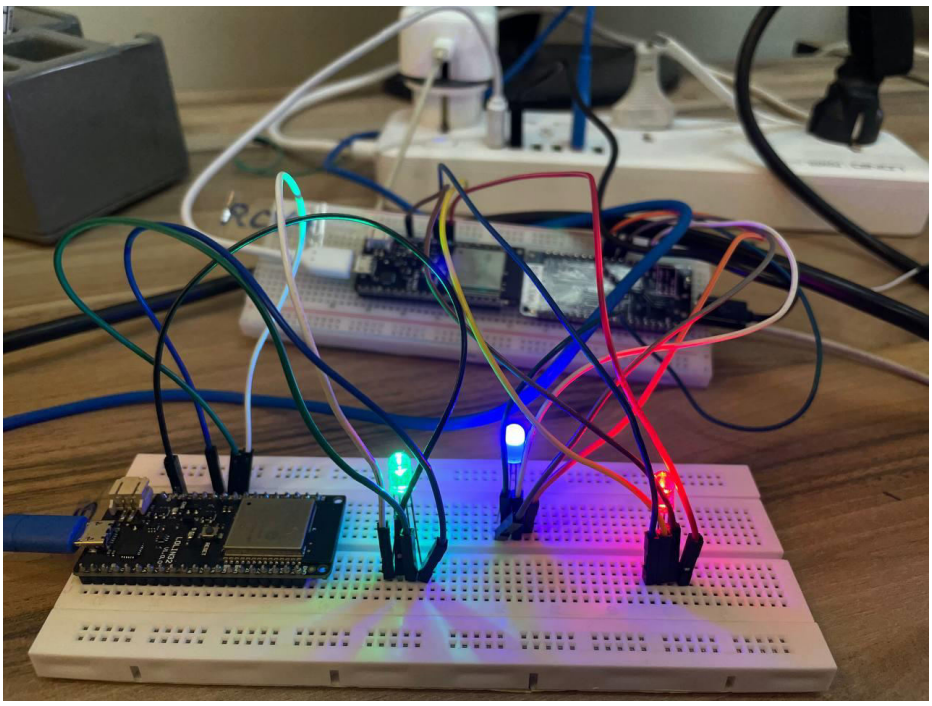




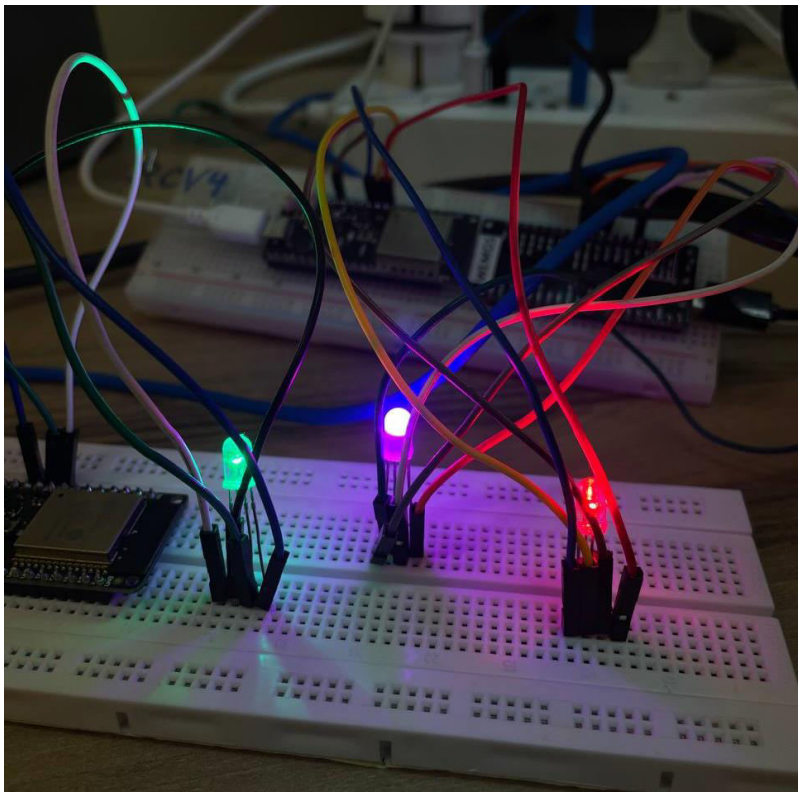
سپس می‌توان رنگ نور هر led متصل به esp32 را مشخص کرد.

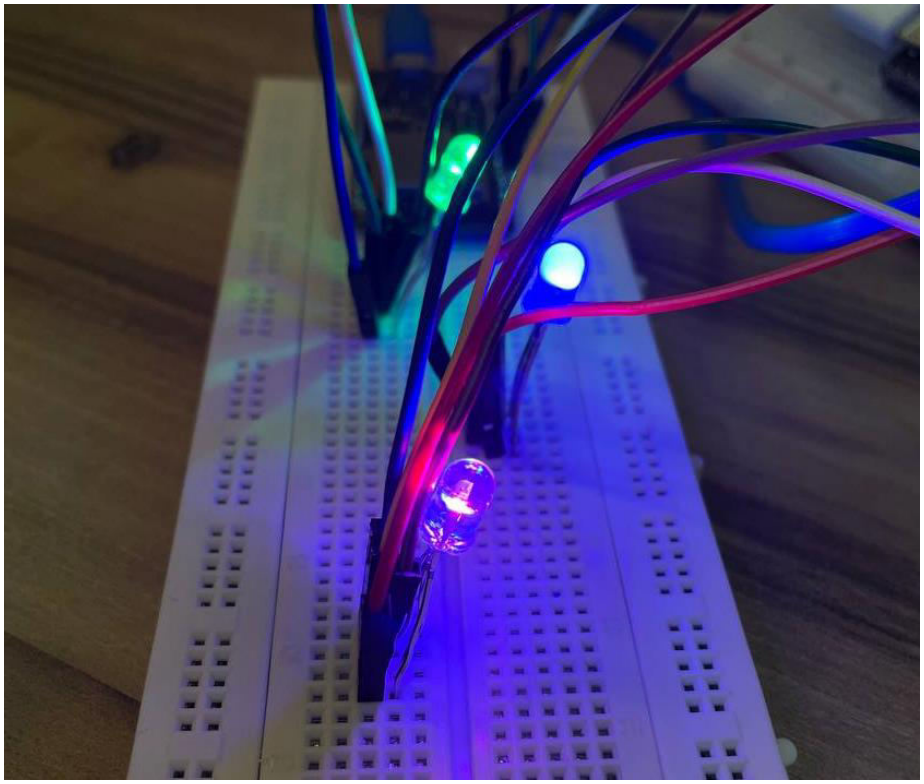


هر element مشخصه‌ای از rgb می‌باشد و می‌توان با خاموش یا روشن کردن آن، رنگ مورد نظر را به دست آورد.



با ترکیب مناسب برای led به رنگ صورتی و ترکیب مناسب برای led راستی به بنفش رنگ را تغییر دادیم.





فصل 5

جمع‌بندی

مش مشخصات امکان ایجاد انواع مختلفی از برنامه‌های جدید را فراهم می‌کند که این امر به BLE اجازه می‌دهد تا حتی بیشتر وارد دنیای اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT)، شبکه‌های حسگر بزرگ، ساختمان‌های هوشمند و شهرهای هوشمند و غیره شود.

با این حال، پارامترهایی که برای پیکربندی شبکه لازم است، بسیار گسترده است و بهینه‌سازی آن‌ها می‌تواند به چالش برانگیز تبدیل شود. حتی برخی از آن‌ها به طور کامل در استاندارد مشخص نشده‌اند.

در طول مقاله‌های مطالعه شده، بیشتر این پارامترها را بررسی شده، ارتباطات و تعامل بین آن‌ها را نشان داده شده و مشکلاتی که زمانی به وجود می‌آیند که به درستی پیکربندی نشده‌اند، بررسی شده‌اند. این کار تا حدی انجام شده است که همه لایه‌های پشته پروتکل، از حامل تا مدل، را پوشش دهد. ما حتی محدودیت‌های واقعی دستگاه‌های آزمایشگاهی مانند زمان‌های کور یا مشکلات بفرمایید را در نظر گرفته و ارزیابی کرده‌ایم.

سرانجام، چندین چالش تحقیقاتی را که ممکن است به بهبود شبکه‌های مش BLE منجر شود، مورد توجه قرار داده‌ایم: شبکه‌های خودبهینه‌سازی شده، ترکیب نرم، استفاده از حامل‌های مختلف، استفاده از زاویه ورود و زاویه خروج و غیره. و آخرین اما به هیچ وجه کمتر، ما توجه خود را به مصرف انرژی قرار داده‌ایم، زیرا با مش، BLE برخی از اهداف انرژی کم خود را از دست می‌دهد.

فصل 6

مراجع

–Silicon Labs. AN1142: Mesh Network Performance Comparison. Accessed: Mar. 3, 2020.

–A. Cilfone, L. Davoli, L. Belli, and G. Ferrari, ‘‘Wireless mesh networking: An IoT-oriented perspective survey on relevant technologies,’’ Future Internet, vol. 11, no. 4, p. 99, 2019.

-J. Yin, Z. Yang, H. Cao, T. Liu, Z. Zhou, and C. Wu, ‘‘A survey on Bluetooth 5.0 and mesh: New milestones of IoT,’’ ACM Trans. Sen. Netw., vol. 15, May 2019, Art. no. 28.

-Mesh Profile Bluetooth Specification V1.0.1, Bluetooth SIG, Kirkland, WA, USA, 2019.

-Bluetooth SIG. (2019). Bluetooth Core Specification 5.1. Accessed: Oct. 17, 2019.

-S. Darroudi and C. Gomez, ‘‘Bluetooth low energy mesh networks: A survey,’’ Sensors, vol. 17, no. 7, p. 1467, May 2017.

-S. Sirur, P. Juturu, H. P. Gupta, P. R. Serikar, Y. K. Reddy, S. Barak, and B. Kim, ‘‘A mesh network for mobile devices using Bluetooth low energy,’’ in Proc. IEEE SENSORS, Nov. 2015, pp. 1–4.

-Y. Murillo, B. Reynders, A. Chiumento, S. Malik, P. Crombez, and S. Pollin, ‘‘Bluetooth now or low energy: Should BLE mesh become a flooding or connection oriented network?’’ in Proc. IEEE 28th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC), Oct. 2017, pp. 1–6.

-Mesh Model Bluetooth Specification V1.0.1, Bluetooth SIG, Kirkland, WA, USA, 2019.

-Bluetooth SIG. Bluetooth SIG Assigned Numbers: Generic Access Profile. Accessed: Mar. 3, 2020.

-Á. Hernández-Solana, D. Perez-Diaz-de-Cerio, A. Valdovinos, and J. L. Valenzuela, ‘‘Proposal and evaluation of BLE discovery process based on new features of Bluetooth 5.0,’’ Sensors, vol. 17, no. 9, p. 1988, Aug. 2017.

-D. P.-D. de Cerio, Á. Hernández, J. Valenzuela, and A. Valdovinos, ‘‘Analytical and experimental performance evaluation of BLE neighbor discovery process including non-idealities of real chipsets,’’ Sensors, vol. 17, no. 3, p. 499, 2017.

-Nordic Semiconductor. nRF52840 Product Specification V1.1. Accessed: Jan. 16, 2020.

-Nordic Semiconductor. nRF52832 Product Specification V1.4. Accessed: Jan. 17, 2020.

-Aragón Institute of Engineering Research (I3A), University of Zaragoza, 50018 Zaragoza, Spain, “Bluetooth mesh analysis, issues, and challenges”, March 26, 2020.