



ارائه پروتکل (Bluetooth Low Energy (BLE

مسئله‌ی ۱.

۱. کاربرد پروتکل/گذرگاه و چرایی توسعه این پروتکل/گذرگاه را شرح دهید.

بلوتوث کم‌مصرف (Bluetooth Low Energy (BLE یک فناوری شبکه بی‌سیم برای انتقال داده در محدوده کوتاه با مصرف انرژی پایین است. این پروتکل توسط گروه ویژه علاقه‌مندان بلوتوث (Bluetooth SIG) طراحی و معرفی شده است و در کاربردهای نوآورانه مانند صنایع بهداشت و درمان، تناسب اندام، بیکن‌ها، امنیت و سرگرمی‌های خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دلایل توسعه پروتکل

- مصرف انرژی پایین: این پروتکل برای استفاده از باتری‌های کوچک در مدت زمان طولانی (ماه‌ها یا سال‌ها) طراحی شده است.
- هزینه پایین: در مقایسه با بلوتوث کلاسیک، هزینه تولید و پیاده‌سازی BLE به طور قابل توجهی کمتر است.
- سازگاری گسترده: این پروتکل با اکثر گوشی‌های هوشمند، تبلت‌ها و رایانه‌های مدرن سازگار است.
- ارتباط برد کوتاه: BLE معمولاً در فاصله ۱۰ تا ۳۰ متری عمل می‌کند، اما در شرایط بهینه می‌تواند تا ۱۰۰ متر نیز پوشش دهد.
- پشتیبانی از انتقال داده‌های کوچک: BLE برای انتقال داده‌های کوچک و دوره‌ای بهینه شده است.

کاربردها

- پوشیدنی‌ها: مانند ردیاب‌های تناسب اندام و ساعت‌های هوشمند.
- خانه‌های هوشمند: شامل قفل‌های هوشمند، لامپ‌ها و ترموستات‌ها.
- بهداشت و درمان: دستگاه‌های پزشکی مانند مانیتورهای قند خون و اکسیژن‌سنج‌ها.
- اینترنت اشیاء (IoT): اتصال و ارتباط دستگاه‌ها در محیط‌های کم‌مصرف.

مزایا

- افزایش طول عمر باتری.
- مقیاس‌پذیری برای شبکه‌های بزرگ در کاربردهای IoT.
- سازگاری گسترده با دستگاه‌های الکترونیکی مصرفی.

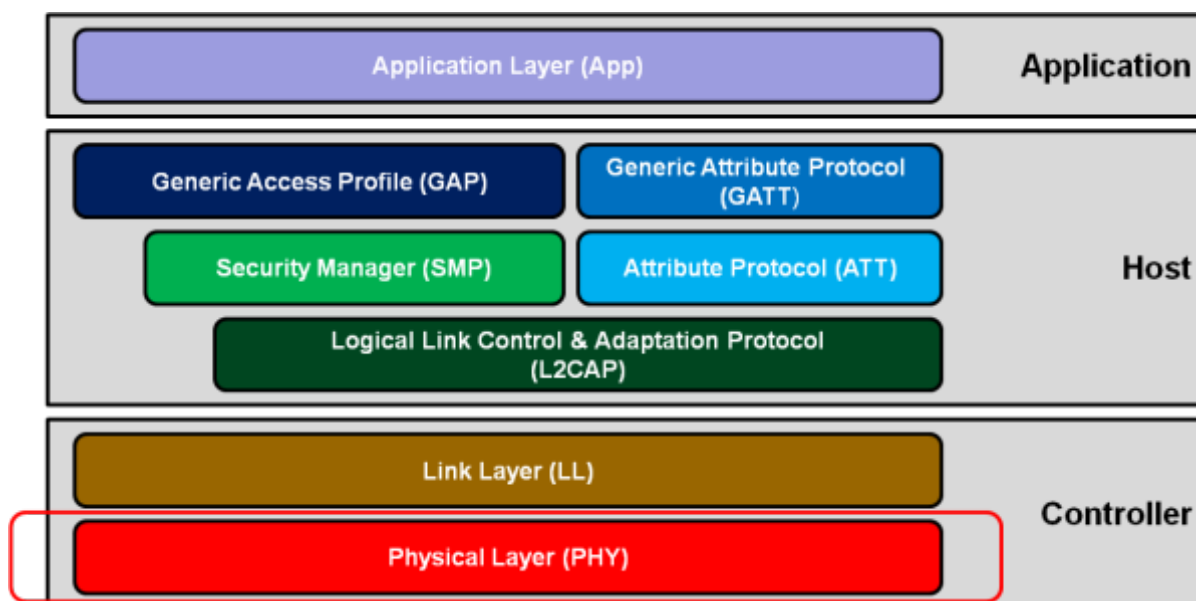
محدودیت‌ها

- نرخ انتقال داده پایین‌تر در مقایسه با Wi-Fi یا بلوتوث کلاسیک.
- برد کوتاه‌تر نسبت به برخی دیگر از فناوری‌های بی‌سیم.
- احتمال تداخل در محیط‌های شلوغ با فرکانس ۴.۲ گیگاهرتز.

بلوتوث کم‌مصرف با ترکیبی از مصرف انرژی پایین، انعطاف‌پذیری و سازگاری گسترده، به یکی از پایه‌های اصلی اکوسیستم‌های متصل مدرن تبدیل شده است، به ویژه در مواردی که بازده انرژی و طراحی فشرده اولویت دارند.

۲. اتصالات و مدارات لایه فیزیکی این پروتکل/گذرگاه با رسم شکل توضیح داده شود. آیا لایه فیزیکی از سیگنالینگ تفاضلی استفاده می‌کند؟

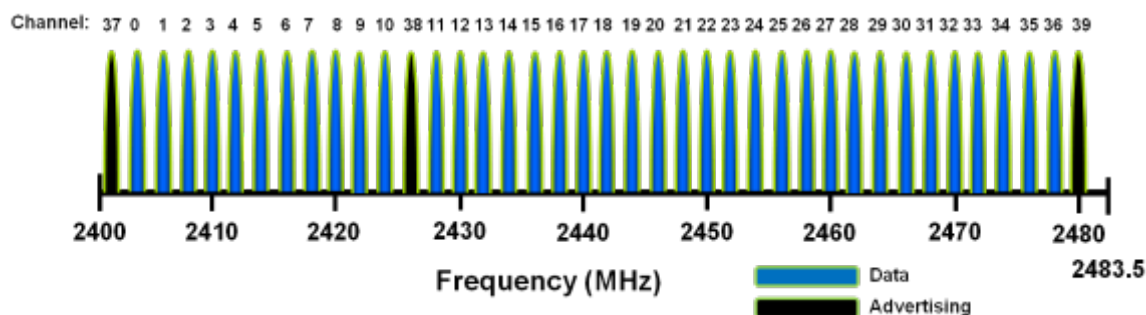
لایه فیزیکی (PHY) در پروتکل بلوتوث کم‌مصرف (BLE) پایین‌ترین لایه از پشته پروتکل است و وظیفه آن انتقال سمبل‌های دیجیتال از طریق امواج رادیویی است. این لایه خدمات خود را به لایه لینک ارائه می‌دهد و شامل مدارهای آنالوگ برای ارتباط بی‌سیم است.



شکل ۱: ساختار و تقسیم‌بندی کانال‌های لایه فیزیکی BLE.

باندهای فرکانسی

رادیو BLE از باند 2.4 گیگاهرتز صنعتی، علمی و پزشکی (ISM) استفاده می‌کند. این باند به ۴۰ کانال با فاصله ۲ مگاهرتز تقسیم شده است که فرکانس آن از 2.4000 گیگاهرتز تا 2.4835 گیگاهرتز متغیر است. کانال‌ها از فرکانس ۲۴۰۲ مگاهرتز شروع می‌شوند.



شکل ۲: کانال‌های پروتکل BLE بر اساس فرکانس‌ها.

چیدمان کانال‌ها

۴۰ کانال موجود در BLE به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- **کانال‌های تبلیغاتی:** شامل کانال‌های ۳۷، ۳۸ و ۳۹. این کانال‌ها برای کشف دستگاه‌ها، برقراری اتصال و ارسال پیام‌های پخش استفاده می‌شوند.
- **کانال‌های داده:** شامل کانال‌های ۰ تا ۳۶. این کانال‌ها برای ارتباطات دوطرفه بین دستگاه‌های متصل استفاده می‌شوند و از پرش فرکانسی تطبیقی (Adaptive Frequency Hopping) برای رویدادهای اتصال بعدی بهره می‌برند.

مدولاسیون و نرخ داده

رادیو BLE داده‌ها را با نرخ ۱ مگابیت بر ثانیه (۱ بیت به ازای هر سمبل) انتقال می‌دهد. از مدولاسیون GFSK (مدولاسیون فرکانسی با فیلتر گوسی) استفاده می‌کند. در این روش، پالس‌های داده پیش از تغییر فرکانس حامل، با یک فیلتر گوسی فیلتر می‌شوند تا انتقال فرکانس‌ها نرم‌تر انجام شود.

همزیستی با Wi-Fi

کانال‌های تبلیغاتی BLE به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با کانال‌های رایج در Wi-Fi (استاندارد 802.11) حداقل تداخل را داشته باشند. این کار باعث کاهش تداخلات رادیویی بین این دو فناوری می‌شود.

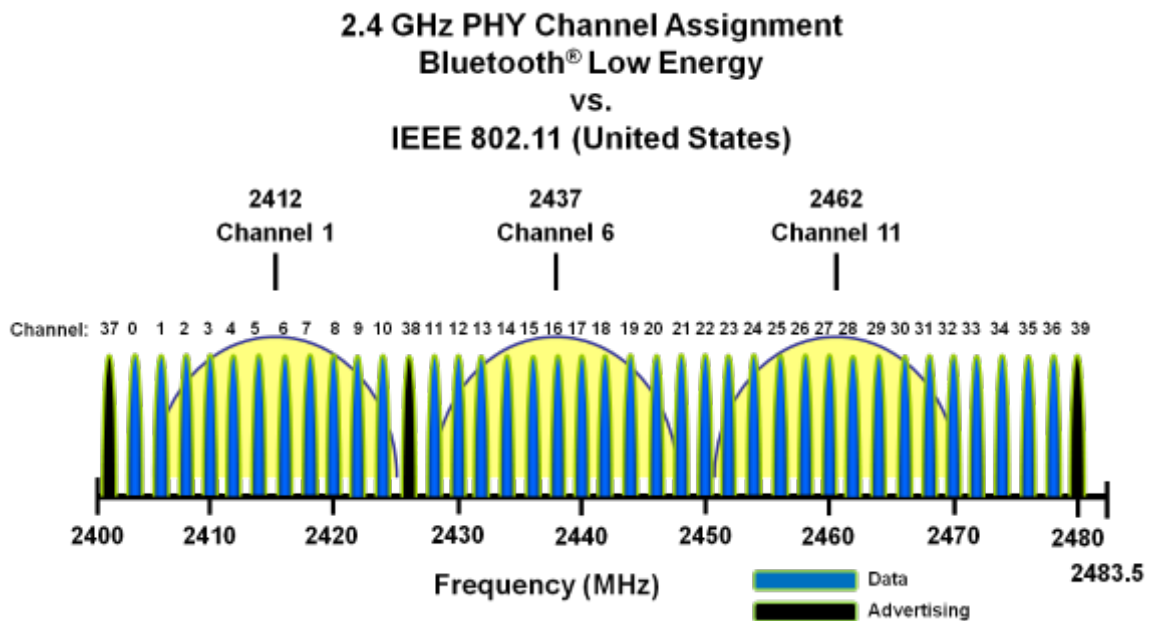
اتصالات ضروری و اختیاری

- **اتصالات ضروری:** شامل آنتن، فرستنده و گیرنده رادیویی برای انتقال و دریافت داده‌ها.

- **اتصالات اختیاری:** می‌تواند شامل تقویت‌کننده‌ها یا فیلترهای اضافی برای بهبود کیفیت سیگنال باشد.

سیگنالینگ تفاضلی

لایه فیزیکی BLE از سیگنالینگ تفاضلی استفاده نمی‌کند. در عوض، از تکنیک GFSK برای مدولاسیون داده‌ها استفاده می‌شود که بر اساس تغییرات فرکانس عمل می‌کند.



شکل ۳: همزیستی با 802.11/Wi-Fi

انواع لایه‌های PHY

- **LE 1M PHY:** این حالت با نرخ سمبل 1 مگاسمبل بر ثانیه، داده‌ها را با نرخ 1 مگابیت بر ثانیه ارسال می‌کند.
- **LE 2M PHY:** این حالت نرخ داده را به 2 مگابیت بر ثانیه افزایش می‌دهد و برای کاربردهایی با سرعت بالا مناسب است.
- **LE Coded PHY:** در این حالت، برد سیگنال تا 4 برابر افزایش می‌یابد، اما نرخ داده کاهش یافته و مصرف انرژی بیشتر می‌شود.

PHY Coded LE

مزایا:

- افزایش برد سیگنال تا 4 برابر.

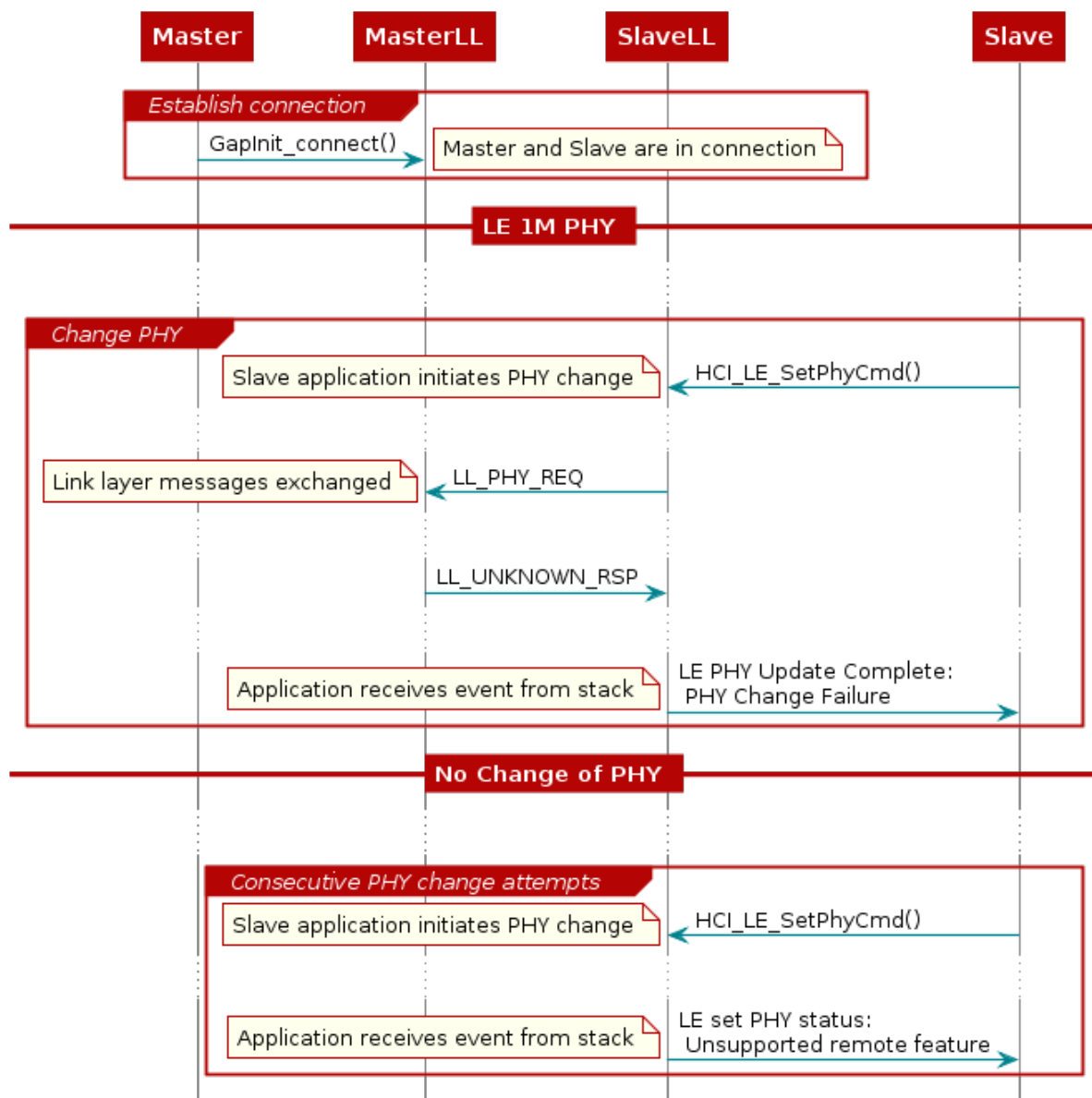
پارامتر	1M LE	2M LE	2 = S Coded LE	8 = S Coded LE
Symbol Rate	1 Msps	2 Msps	1 Msps	1 Msps
Data Rate	1 Mbps	2 Mbps	500 kbps	125 kbps
Error Correction	None	None	FEC	FEC
Range Multiplier	1	0.8	2	4

جدول ۱: مقایسه لایه‌های فیزیکی بلوتوث کم‌مصرف

- استفاده از تکنیک Forward Error Correction (FEC) برای تصحیح خطا و افزایش حساسیت گیرنده.

حالت‌های LE Coded PHY:

- S2: هر بیت با 2 سمبل نمایش داده می‌شود (نرخ داده 500 کیلوبیت بر ثانیه).
- S8: هر بیت با 8 سمبل نمایش داده می‌شود (نرخ داده 125 کیلوبیت بر ثانیه).

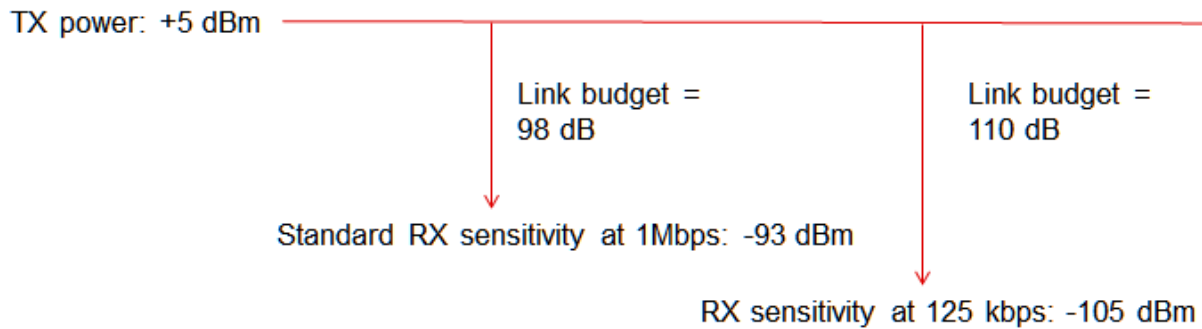


شکل ۴: دیاگرام نحوه تغییر لایه PHY توسط Master و Slave (تغییر موفق و ناموفق).

بودجه لینک

بودجه لینک (Link Budget) تفاوت بین توان ارسال و حساسیت گیرنده را نشان می‌دهد. بهبود بودجه لینک از دو روش امکان‌پذیر است:

- افزایش توان خروجی (که باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود).
- بهبود حساسیت گیرنده (راهکار استفاده شده در Bluetooth 5).



شکل ۵: شکل مربوط به بودجه لینک و تأثیر آن بر برد سیگنال.

۳. ارتباط در این پروتکل/گذرگاه سریال است یا موازی؟ نوع انکودینگ این پروتکل/گذرگاه چیست؟ و نحوه تولید سیگنال را با رسم شکل توضیح دهید. روش انتقال آن همزمان است یا ناهمزمان؟

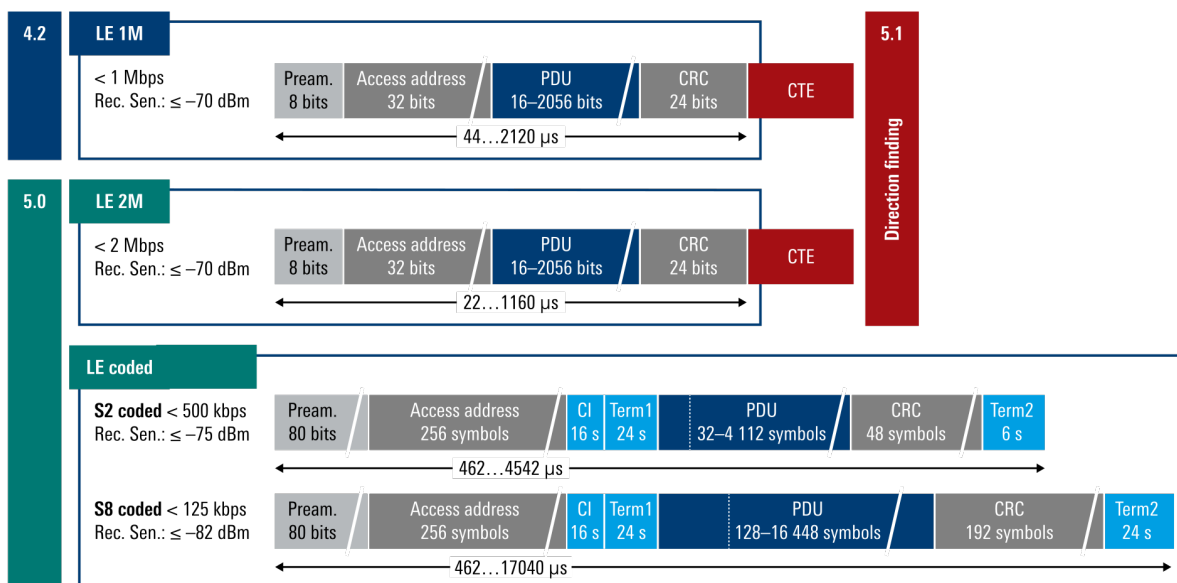
نوع ارتباط

بلوتوث کم مصرف (BLE) یک رابط ارتباط سریال است. این پروتکل مشابه سایر فناوری‌های ارتباطی مانند USB، SPI، I2C، RS232 به صورت سریال عمل می‌کند. در BLE، ارتباط از طریق بی سیم و با کمک پل‌های ارتباطی بین دستگاه‌ها برقرار می‌شود.

نوع انکودینگ

BLE از رمزنگاری AES-CCM با طول کلید 128 بیتی برای رمزنگاری داده‌ها و تضمین یکپارچگی آن‌ها در ارتباط بی سیم استفاده می‌کند. این روش توسط استاندارد FIPS 140-2 تأیید شده و در کاربردهای دیگری مانند WPA2 و TLS 1.3 و WiFi نیز به کار می‌رود.

کلید رمزنگاری از طریق روش Diffie-Hellman با استفاده از رمزنگاری منحنی بیضوی (ECC) تولید می‌شود. هر دستگاه کلید AES-CCM را با استفاده از کلید عمومی ECC دریافتی از دستگاه مقابل و کلید خصوصی ECC خود تولید می‌کند.



شکل ۶: مقایسه 4.2 و 5.

نحوه تولید سیگنال

در BLE، ارتباطات به صورت بی سیم و غیرهمزمان انجام می شود. دستگاه های پوشیدنی، سنسورهای محیطی و دستگاه های هوشمند که معمولاً با باتری کار می کنند، داده های خود را به صورت دوره ای و غیرهمزمان به یک مرکز (نود اصلی) ارسال می کنند. این ارتباطات تحت عنوان Asynchronous Connection Less Link (ACL) انجام می شود.

روش انتقال

روش انتقال در BLE به صورت ناهمزمان است، به این معنا که داده ها بدون نیاز به همزمان سازی مداوم بین دستگاه ها ارسال می شوند. این ویژگی باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره وری دستگاه های باتری دار می شود.

	LE1M	LE coded (S = 2)	LE coded (S = 8)	LE2M
Spectrum	2402 MHz to 2480 MHz			
Channel spacing	2 MHz			
# of RF channels	37 general purpose (data or secondary advertising) and 3 primary advertising			
Modulation	GFSK (BT = 0.5; MI = 0.45...0.55, $\Delta f > 185$ kHz)			GFSK (BT = 0.5; MI = 0.45...0.55, $\Delta f > 370$ kHz)
Symbol rate	1 Msym/s			2 Msym/s
Data rate	1 Mbit/s	500 kbit/s	125 kbit/s	2 Mbit/s
Device discovery	Via primary advertising channels			
Frequency hopping	Adaptive frequency hopping over 37 channels			

شکل ۷: شکل مربوط به مقایسه LE1 و LE2.

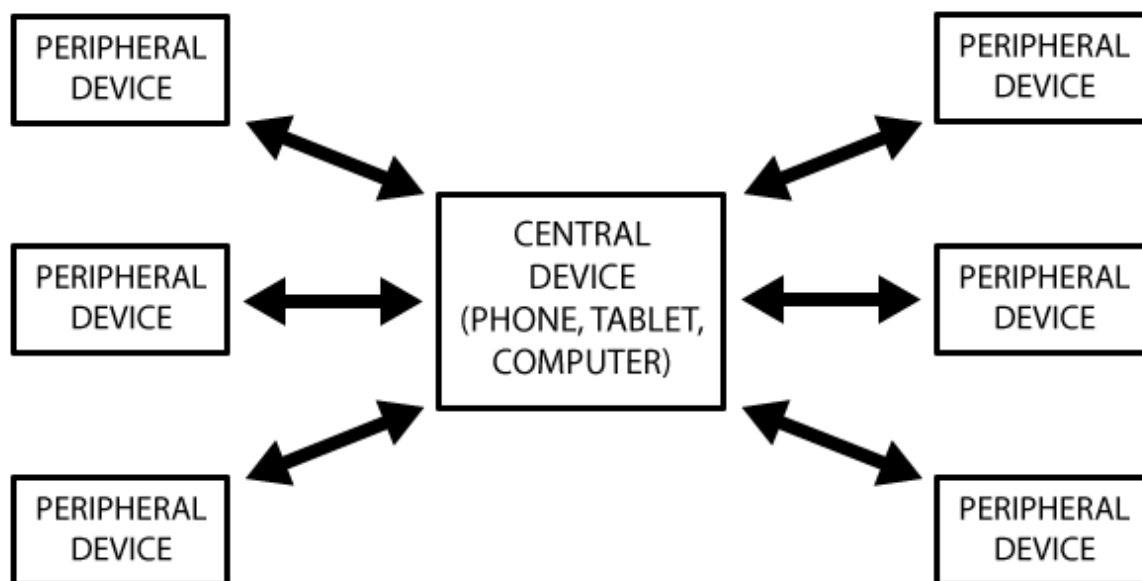
۴. آیا این پروتکل/گذرگاه را می‌توان جهت اتصال چندین دستگاه/ماژول سخت‌افزاری استفاده کرد؟

قابلیت اتصال چند دستگاه در BLE

پروتکل BLE (Bluetooth Low Energy) از معماری مرکزی و محیطی (Central and Peripheral) استفاده می‌کند. در این معماری:

- یک دستگاه مرکزی (مانند تلفن هوشمند) می‌تواند به حداکثر 20 دستگاه محیطی متصل شود.
- هر دستگاه محیطی تنها می‌تواند به یک دستگاه مرکزی متصل باشد.

در نسخه‌های جدید BLE (مانند Bluetooth 5.0 و بالاتر)، ویژگی‌هایی مانند Extensions Advertising و Connected Isochronous Streams برای بهبود اتصال چندگانه معرفی شده‌اند. دستگاه مرکزی از زمان‌بندی دقیق برای مدیریت چندین اتصال همزمان استفاده می‌کند.



شکل ۸: نحوه اتصال چندین سخت افزار به هم با استفاده از پروتکل BLE.

چالش های مدیریت برخورد در BLE

یکی از چالش های اصلی در اتصال چند دستگاه، مدیریت برخورد (Collision) است. برخورد زمانی رخ می دهد که سیگنال های چند دستگاه محیطی با یکدیگر تداخل پیدا کنند. BLE از مکانیزم های زیر برای کاهش برخورد بهره می گیرد:

- **پرش فرکانسی تطبیقی: BLE (AFH)** از 40 کانال در باند فرکانسی 2.4 GHz استفاده می کند و با استفاده از الگوریتم Adaptive Frequency Hopping کانال ها را به صورت شبه تصادفی تغییر می دهد تا از تداخل جلوگیری کند.
- **زمان بندی اسلات ها:** دستگاه مرکزی از اسلات های زمانی اختصاصی برای ارسال و دریافت داده ها استفاده می کند تا تداخل سیگنال ها کاهش یابد.
- **Dynamic Congestion Control (DCC):** در شبکه های پیچیده تر مانند Scatternet، روش هایی مانند ایجاد رله پشتیبان می تواند به کاهش تراکم و تداخل کمک کند. در این روش، رله اضافی برای تقسیم بار ترافیکی ایجاد می شود گفته شده در مقاله Dynamic Congestion Control through backup relay in Bluetooth scatternet.

ساختار Piconet و Scatternet در BLE

- **Piconet:** شامل یک دستگاه مرکزی و چند دستگاه محیطی است.
- **Scatternet:** چندین Piconet می توانند از طریق دستگاه های رله به هم متصل شوند تا یک Scatternet ایجاد شود.

در Scatternet، چالش‌هایی مانند تراکم ترافیکی و برخورد بین Piconet‌ها وجود دارد. برای حل این مشکلات:

- **بازسازی Piconet:** با بازسازی ساختار Piconet، مسیر ارتباط کوتاه‌تر شده، تأخیر کاهش یافته و عملکرد کلی شبکه بهبود می‌یابد.
- **تحلیل جریان داده:** الگوهای ترافیکی مورد تحلیل قرار گرفته و رله‌های اضافی برای مدیریت بار سنگین فعال می‌شوند گفته شده در مقاله Congestion control of bluetooth radio system by piconet restructuring.

دلایل محدودیت اتصال تنها به دو دستگاه در برخی موارد

در برخی کاربردها، BLE به گونه‌ای طراحی شده است که تنها یک دستگاه محیطی به یک دستگاه مرکزی متصل شود. دلایل این محدودیت شامل موارد زیر است:

- کاهش مصرف انرژی برای دستگاه‌های باتری‌محور.
- ساده‌سازی طراحی دستگاه‌ها.
- نیاز نداشتن به اتصال چندگانه در کاربردهای خاص مانند سنسورهای اینترنت اشیا (IoT).

پروتکل BLE قابلیت اتصال به چندین دستگاه را دارد و از تکنیک‌هایی مانند AFH، زمان‌بندی و بازسازی Piconet برای مدیریت برخورد استفاده می‌کند. در موارد خاص، محدودیت‌های اتصال به دلیل طراحی کم‌مصرف و ساده‌سازی اعمال شده‌اند.

۵. آدرس‌دهی و مسیریابی در این پروتکل را با رسم شکل توضیح دهید.

آدرس‌دهی در BLE

در BLE (Bluetooth Low Energy)، آدرس‌دهی بسیار ساده است و از **آدرس بلوتوث** برای شناسایی دستگاه‌ها استفاده می‌شود. آدرس بلوتوث شامل موارد زیر است:

- **آدرس عمومی (Public):** یک آدرس ثابت که توسط سازنده دستگاه اختصاص داده می‌شود.
- **آدرس تصادفی (Random):** یک آدرس موقتی که برای حفظ حریم خصوصی تولید می‌شود.

ساختار آدرس بلوتوث

آدرس بلوتوث یک شناسه 48 بیتی است که شامل دو بخش اصلی است:

- **OUI (Organizationally Unique Identifier):** شناسایی سازنده دستگاه.
- **NIC (Network Interface Controller):** شناسایی دستگاه خاص.

عملکرد: دستگاه‌ها در هنگام فرآیند Advertising آدرس خود را به اشتراک می‌گذارند و دستگاه مرکزی (Central) از این آدرس برای شناسایی و برقراری ارتباط با دستگاه محیطی (Peripheral) استفاده می‌کند.

مسیریابی در BLE

مسیریابی در BLE در سناریوهای معمول (مانند معماری Central-Peripheral ضروری نیست، زیرا ارتباط مستقیم بین دستگاه مرکزی و محیطی برقرار می‌شود. با این حال، در شبکه‌های مش (Mesh) (Network)، مسیریابی ساده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- **Flooding:** پیام‌ها به تمام گره‌های شبکه ارسال می‌شوند و گره‌ها بر اساس قوانین مشخص پیام را پردازش یا عبور می‌دهند.

- **Nodes: Relay** برخی گره‌ها به عنوان واسطه عمل کرده و پیام‌ها را به مقصد نهایی منتقل می‌کنند.

دلایل عدم نیاز به مسیریابی پیچیده در BLE

BLE نیازی به مسیریابی پیچیده ندارد، زیرا:

- طراحی این پروتکل برای ارتباطات کوتاه‌برد و ساده است.
- مسیریابی پیچیده باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود که با هدف کاهش مصرف انرژی BLE سازگار نیست.
- ارتباط معمولاً بین دستگاه‌های نزدیک (کمتر از 100 متر) انجام می‌شود.

فرآیند ارتباط در BLE

ارتباط در BLE با رویدادهای تبلیغاتی (Events Advertising) و اتصال (Events Connection) مدیریت می‌شود:

- در رویداد تبلیغاتی، دستگاه محیطی پیام‌های تبلیغاتی ارسال کرده و منتظر درخواست اتصال می‌ماند.
- در صورت دریافت درخواست اتصال، ارتباط مستقیم بین دستگاه مرکزی و محیطی برقرار می‌شود.
- پس از اتمام انتقال داده، دستگاه‌ها به حالت کم‌مصرف می‌روند.

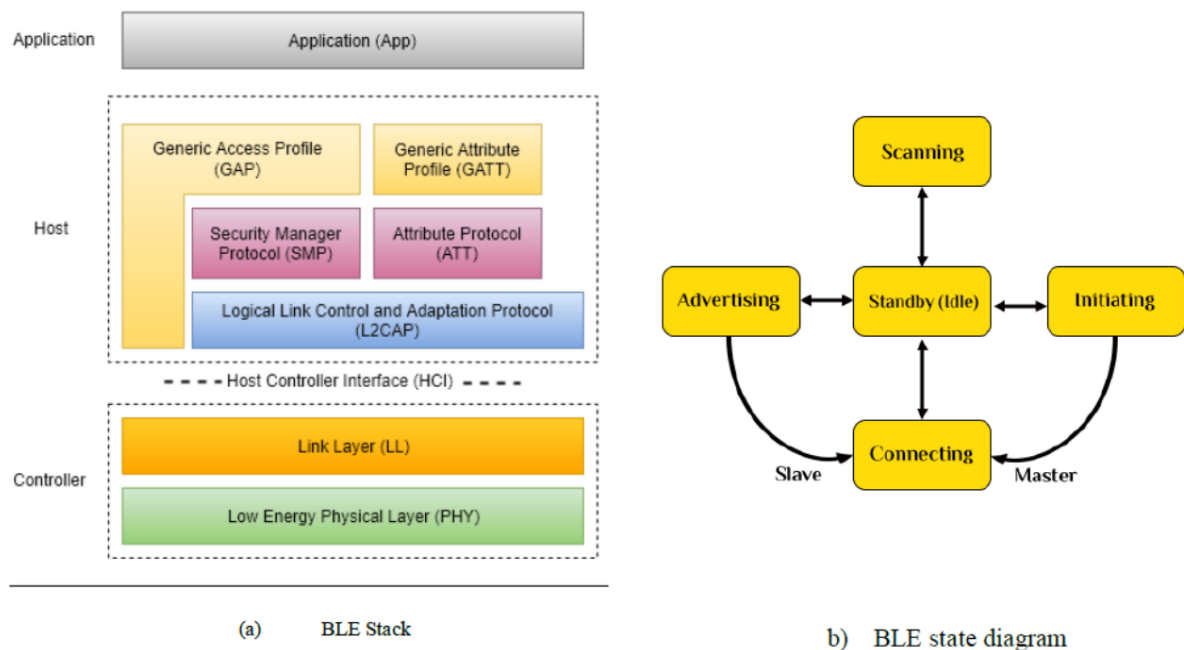


Figure 1. BLE Technology Fundamentals

شکل ۹: شکلی از مقاله Implementing Associated Routing Protocol for Bluetooth Low Energy Devices.

۶. قابلیت مدیریت جریان داده را توضیح دهید.

۱. مفهوم مدیریت جریان داده در BLE

مدیریت جریان داده در BLE (Bluetooth Low Energy) یک قابلیت کلیدی است که برای اطمینان از انتقال کارآمد داده‌ها و جلوگیری از پر شدن بافر (Buffer Overflow) طراحی شده است. این مکانیزم به دستگاه‌ها اجازه می‌دهد تا ارسال و دریافت داده‌ها را به صورت هماهنگ کنترل کنند.

کنترل جریان (Flow Control):

- پیام‌های کنترلی: دستگاه‌ها از پیام‌های ACK (Acknowledgment) و NAK (Negative Acknowledgment) برای تأیید یا درخواست ارسال مجدد داده‌ها استفاده می‌کنند.
- بافرها و زمان‌بندی: هر دستگاه دارای بافرهایی برای ذخیره موقت داده‌ها است که انتقال و پردازش آن‌ها بر اساس زمان‌بندی انجام می‌شود.

۲. نحوه پیاده‌سازی مدیریت جریان داده در BLE

a) ساختار مدیریت جریان:

- کانال‌های منطقی (Logical Channels): BLE Channels از کانال‌های منطقی برای انتقال انواع مختلف داده (مانند داده‌های کنترلی یا اپلیکیشن) استفاده می‌کند.

- واحدهای داده (PDU): داده‌ها به بسته‌هایی به نام Protocol Data Unit (PDU) تقسیم می‌شوند و در بافرها ذخیره شده و انتقال می‌یابند.

b) پیام‌های کنترلی:

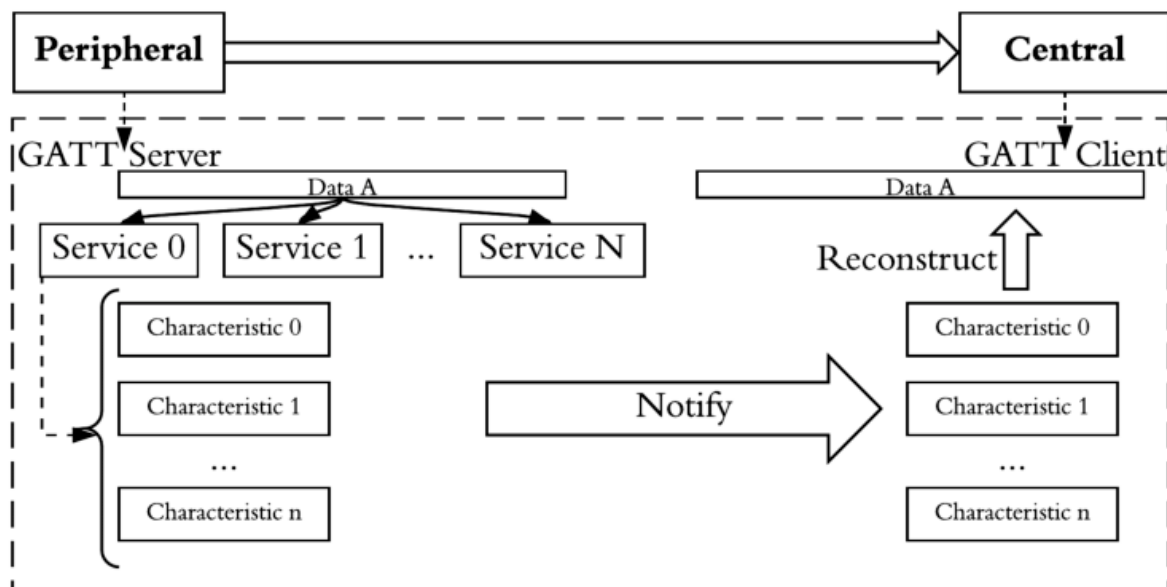
- پیام ACK: تأیید دریافت موفقیت‌آمیز داده‌ها.
- پیام NAK: درخواست ارسال مجدد داده‌ها به دلیل خطا.

c) محدودیت نرخ داده‌ها:

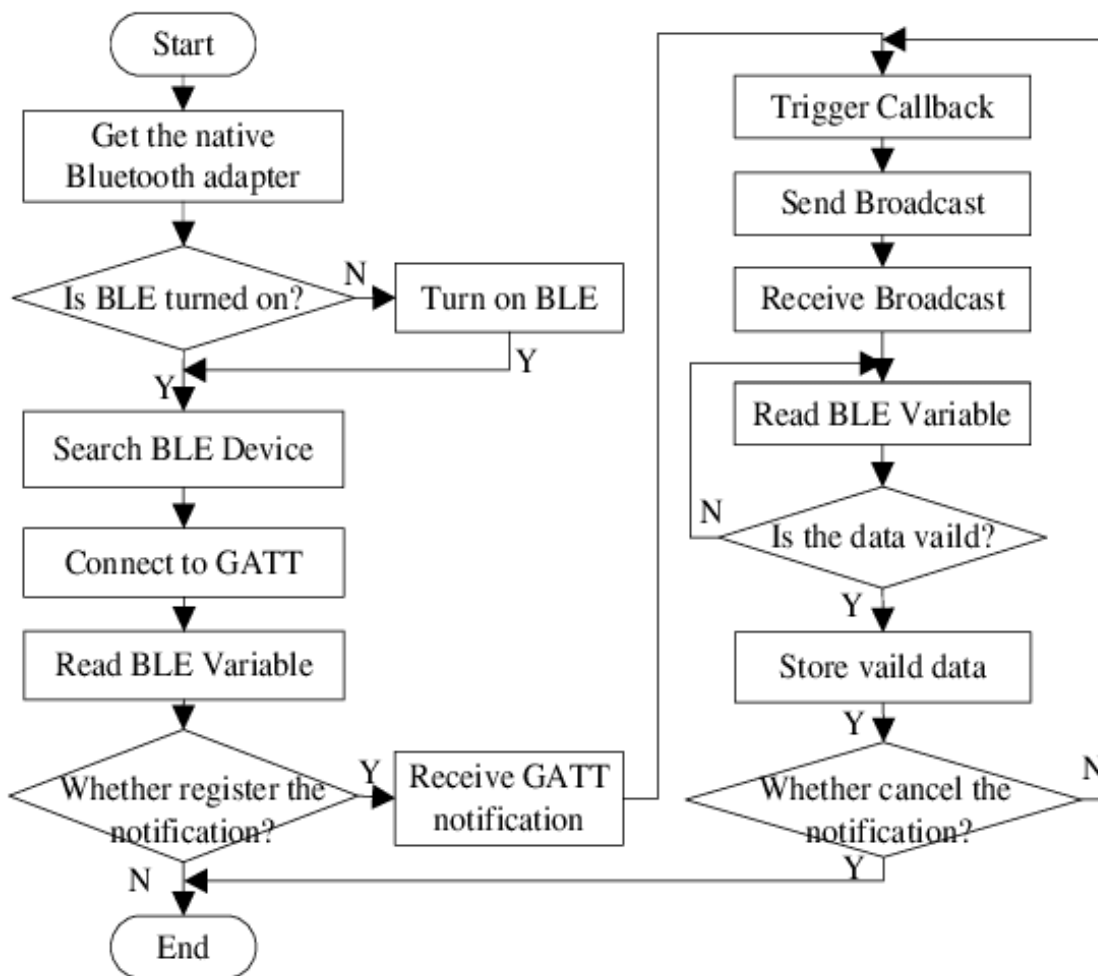
- زمان‌بندی اسلات‌ها (Time Slots): BLE از زمان‌بندی دقیق برای ارسال داده‌ها بدون تداخل استفاده می‌کند.
- MTU (Maximum Transmission Unit): اندازه حداکثر بسته داده که در هر انتقال ارسال می‌شود.

۳. مزایای مدیریت جریان داده در BLE

- کاهش تلفات داده: استفاده از پیام‌های ACK و NAK تضمین می‌کند که داده‌ها بدون خطا ارسال شوند.
- صرفه‌جویی در انرژی: مکانیزم زمان‌بندی و کنترل داده‌ها از مصرف اضافی انرژی جلوگیری می‌کند.
- کارایی بالا: تقسیم داده‌ها به بسته‌های کوچک و استفاده از بافرها باعث افزایش کارایی انتقال می‌شود.



شکل ۱۰: مدیریت جریان داده بر اساس GATT profile.



شکل ۱۱: فلوچارت BLE.

۷. نحوه تشخیص خطا، در لایه‌های متفاوت را با رسم شکل توضیح دهید.

در این بخش، به بررسی نحوه تشخیص و تصحیح خطا در لایه‌های مختلف بلوتوث کم‌مصرف (BLE) پرداخته و از یافته‌های مقاله «Fix It! Bin Don't It, Low Bluetooth in Correction Error CRC - Energy» استفاده می‌کنیم.

لایه‌های مختلف BLE و تشخیص خطا

تشخیص خطا در BLE در لایه‌های مختلف انجام می‌شود که هر کدام روش‌های متفاوتی برای مدیریت و تصحیح خطاها ارائه می‌دهند.

لایه فیزیکی (Physical Layer)

در این لایه، تشخیص خطا از طریق روش‌هایی مانند:

- بررسی قدرت سیگنال دریافت شده (RSSI)

- استفاده از کدگذاری‌های خاص مانند کد همینگ

برای مقابله با نویز و تداخل انجام می‌شود.

لایه پیوند داده (Data Link Layer)

این لایه اصلی‌ترین بخش برای تشخیص خطا است و از کدهای (Cyclic CRC Redundancy Check) برای شناسایی بسته‌های خطا دار استفاده می‌کند. بازفرستادن بسته‌های خراب و ارسال تأییدیه (ACK) برای کاهش خطاها استفاده می‌شود.

لایه‌های بالاتر

در لایه‌های شبکه و کاربرد، روش‌هایی نظیر بررسی صحت مسیر و داده‌ها به کار گرفته می‌شود. این لایه‌ها اغلب خطاها را از طریق نرم‌افزار مدیریت می‌کنند.

تصحیح خطا با استفاده از CRC در BLE

بر اساس مقاله مذکور، روش‌های تصحیح خطا با استفاده از کدهای CRC بدون تغییر در فرستنده BLE امکان‌پذیر است. در این روش‌ها، پردازش سیگنال اضافی در سمت گیرنده انجام می‌شود و از تکنیک‌های پیشرفته برای تصحیح خطا استفاده می‌گردد.

بهبود حساسیت گیرنده

با استفاده از روش‌های نوین تصحیح خطا، می‌توان حساسیت گیرنده BLE را تا ۳ دسی‌بل بهبود داد. این امر با کاهش تعداد بسته‌های خراب و کاهش نرخ بازفرستادن (Retransmission) انجام می‌شود.

روش‌های تصحیح خطا

دو روش مهم در تصحیح خطای CRC مطرح شده‌اند:

۱. روش **(Belief BP) Propagation**: در این روش از الگوریتم‌هایی مانند Sum-Product Algorithm استفاده می‌شود. این الگوریتم احتمال وقوع خطا را با استفاده از نسبت احتمالات لاگاریتمی (LLRs) محاسبه می‌کند.

۲. روش **(Alternating ADMM) Multipliers of Method Direction**: در این روش، ماتریس کنترل توازن (Check Parity) Matrix برای تصحیح خطا به کار گرفته می‌شود. این روش با پارامترهایی مانند ضریب جریمه و بیشینه تعداد تکرار بهینه‌سازی می‌شود.

مزایای استفاده از تصحیح خطا

- کاهش ۶۰ درصدی نرخ خطای بسته‌ها (PER)
- صرفه‌جویی در مصرف انرژی فرستنده معادل انرژی موردنیاز برای ارسال یک بسته
- بهبود محدوده یا طول عمر باتری دستگاه BLE

روش‌های نوین تصحیح خطا مانند استفاده از CRC در BLE می‌توانند بدون تغییر در ساختار فرستنده، عملکرد دستگاه را بهبود بخشند. این روش‌ها باعث کاهش نرخ خطا، افزایش حساسیت گیرنده و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌شوند. تحقیقات آینده شامل تحلیل پیچیدگی روش‌ها و تعمیم آن‌ها به طول‌های مختلف بسته است.

۸. آیا در این پروتکل/گذرگاه رویکردی برای تصحیح خطا هم داریم؟ اگر پاسخ مثبت است، آن را شرح دهید.

بلوتوث کم‌مصرف (BLE) به طور پیش‌فرض از کد Cyclic Redundancy Check (CRC) برای تشخیص خطا استفاده می‌کند. با این حال، رویکردهایی برای تصحیح خطا نیز در این پروتکل وجود دارد که می‌تواند بدون تغییر در ساختار فرستنده، عملکرد گیرنده را بهبود بخشد.

رویکردهای تصحیح خطا در BLE

اگرچه BLE به طور پیش‌فرض بر تصحیح خطا تمرکز ندارد، مقاله «Fix Error CRC – It! Bin Don't It» Low Bluetooth in Correction Energy نشان می‌دهد که می‌توان از روش‌های تصحیح خطا بر پایه CRC در سمت گیرنده استفاده کرد. این رویکردها شامل تکنیک‌های پردازش سیگنال پیشرفته است که داده‌های خراب را بازیابی می‌کنند.

روش‌های پیشنهادی برای تصحیح خطا

در ادامه به دو روش کلیدی تصحیح خطا اشاره می‌کنیم:

۱. روش **(Belief BP Propagation)**: این روش از الگوریتم Sum-Product Algorithm استفاده می‌کند و بر اساس نسبت احتمالات لاگاریتمی (LLRs) خطاهای موجود در بسته‌ها را تصحیح می‌کند. این روش در محیط‌های واقعی با تخمین احتمال خطای بیت (BER) اجرا می‌شود.

۲. روش **(Multipliers) of Method Direction (Alternating ADMM)**: این روش بر مبنای استفاده از ماتریس کنترل توازن (Parity Check Matrix) کار می‌کند و بسته‌های خراب را با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی تصحیح می‌کند. این روش در شرایط سیگنال ضعیف عملکرد بهتری دارد و می‌تواند بسته‌های بیشتری را بازیابی کند.

مزایای تصحیح خطا در BLE

- کاهش نرخ خطای بسته (PER): تا ۶۰٪ از بسته‌های خراب قابل بازیابی هستند.
- بهبود حساسیت گیرنده: تا ۳ دسی‌بل حساسیت بیشتر در دریافت سیگنال‌های ضعیف.
- صرفه‌جویی در انرژی: کاهش نیاز به بازفرستادن بسته‌ها باعث صرفه‌جویی در انرژی فرستنده می‌شود.
- افزایش محدوده یا طول عمر باتری: به دلیل کاهش بازفرستادن، باتری دستگاه BLE ماندگاری بیشتری خواهد داشت.

اگرچه BLE به صورت پیش‌فرض برای تشخیص خطا از CRC استفاده می‌کند، استفاده از تکنیک‌های تصحیح خطا می‌تواند بهبود چشم‌گیری در عملکرد آن ایجاد کند. این رویکردها به‌خصوص در شرایطی که قدرت سیگنال کم است یا بسته‌ها مستعد خطا هستند، عملکرد گیرنده را بهبود می‌بخشند. این سوال و سوال قبلی با مطالعه مقاله‌ای به نام Fix It, Don't Bin It! - CRC Error Correction in Bluetooth Low Energy پاسخ داده‌ام.

۹. انواع پیام در این پروتکل/گذرگاه را نام ببرید و سپس فرمت هر نوع پیام را با رسم شکل توضیح دهید.

در پروتکل بلوتوث کم‌مصرف، (BLE) پیام‌ها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که هر کدام وظیفه خاصی در ارتباطات بین دستگاه‌ها دارند. در ادامه به انواع پیام‌ها و فرمت آن‌ها می‌پردازیم.

انواع پیام‌ها در BLE

پیام‌های BLE به صورت کلی شامل موارد زیر هستند:

۱. پیام‌های تبلیغاتی (Advertisements): این پیام‌ها برای معرفی دستگاه به محیط و دیگر دستگاه‌ها ارسال می‌شوند. شامل دو نوع اصلی هستند:

- تبلیغات قابل اتصال و قابل اسکن (Advertisement Undirected Scannable Connectable)
- تبلیغات غیرقابل اتصال و قابل اسکن (Adver- Undirected Scannable Nonconnectable tisement)

۲. پیام درخواست اتصال (Connection Requests): پیام‌هایی که برای ایجاد ارتباط بین دستگاه‌های مرکزی (Central) و محیطی (Peripheral) ارسال می‌شوند.

۳. پیام‌های پس از اتصال (Post-Connection Operations): این پیام‌ها شامل تبادل اطلاعات پس از برقراری ارتباط هستند:

- تبادل نسخه (Exchange Version)
- تبادل ویژگی‌ها (Exchange Feature)
- تبادل (Unit Transfer Maximum MTU)
- کشف صفات (Discovery Attribute)

فرمت پیام‌ها در BLE

در ادامه به فرمت پیام‌های مهم BLE و اجزای آن‌ها می‌پردازیم.

۱. فرمت پیام تبلیغاتی

پیام‌های تبلیغاتی شامل دو بخش اصلی هستند:

- **هدر (Header):** اطلاعات پایه‌ای مانند نوع پیام (PDU) و Type و طول پیام.
- **بار (Payload):** شامل آدرس بلوتوث و داده‌های تبلیغاتی.

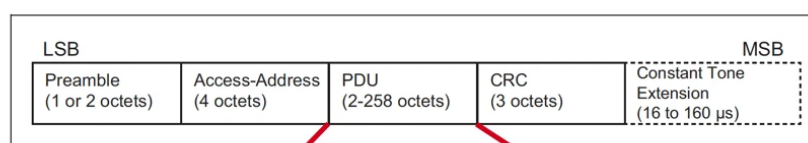


Figure 2.1: Link Layer packet format for the LE Uncoded PHYs

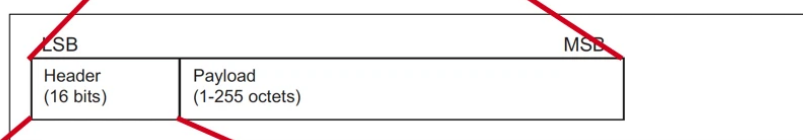


Figure 2.4: Advertising physical channel PDU

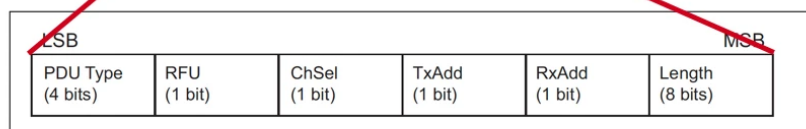
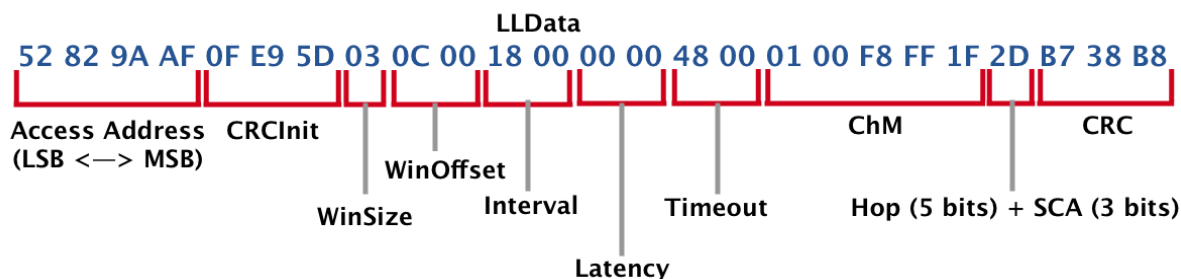


Figure 2.5: Advertising physical channel PDU header

شکل ۱۲: مشخصات اصلی بلوتوث نسخه ۲.۵



شکل ۱۳: فیلدهای LLData در بسته‌های BLE

بار پیام تبلیغاتی: داده‌های تبلیغاتی در قالب LTV (طول-نوع-مقدار) سازمان‌دهی می‌شوند. به عنوان مثال:

- **پرچم‌ها (Flags):** مشخص می‌کنند که دستگاه در چه حالتی قرار دارد (مثلاً قابل کشف عمومی یا خصوصی).

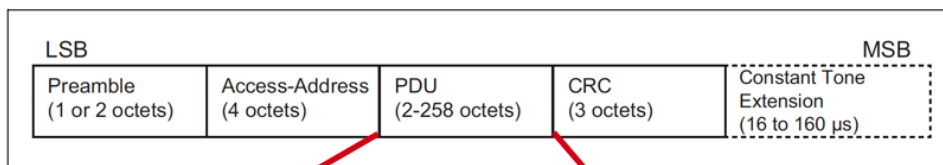


Figure 2.1: Link Layer packet format for the LE Uncoded PHYs

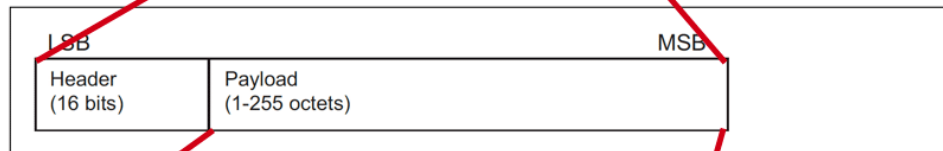


Figure 2.4: Advertising physical channel PDU

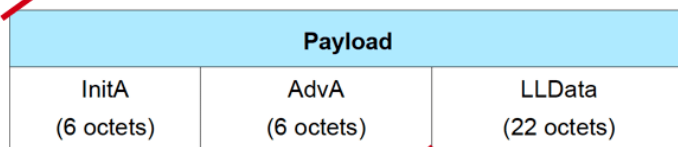


Figure 2.12: CONNECT_IND and AUX_CONNECT_REQ PDU Payload

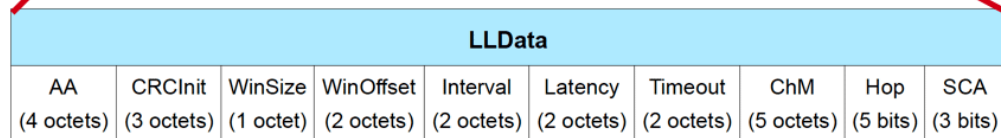


Figure 2.13: LLData field structure in CONNECT_IND and AUX_CONNECT_REQ PDU's Payload

شکل ۱۴: پیام‌های درخواست اتصال در پروتکل BLE

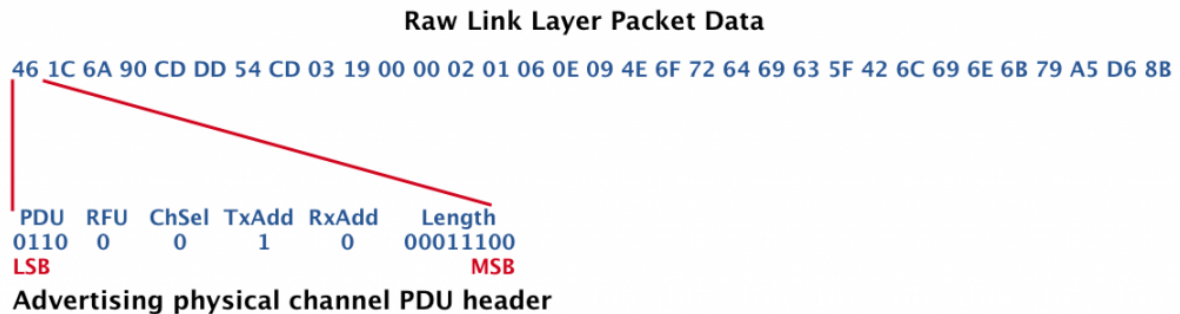
- نام دستگاه (Device Name): برای نمایش نام دستگاه به دیگر دستگاه‌ها.

۲. فرمت پیام درخواست اتصال

پیام درخواست اتصال شامل اطلاعاتی است که دستگاه مرکزی برای برقراری ارتباط با دستگاه محیطی به آن نیاز دارد. اجزای اصلی عبارت‌اند از:

- آدرس دسترسی (Access Address): شناسه پیام.
- CRCInit: مقدار اولیه برای محاسبه CRC.
- WinSize و WinOffset: برای تنظیم زمان اولین ارتباط.
- Interval: تعیین فاصله زمانی بین انتقال داده‌ها.

- نقشه کانال‌ها (Channel Map): کانال‌های مورد استفاده برای انتقال داده.
- SCA: دقت ساعت دستگاه مرکزی.



شکل ۱۵: هدر PDU کانال فیزیکی تبلیغاتی در BLE

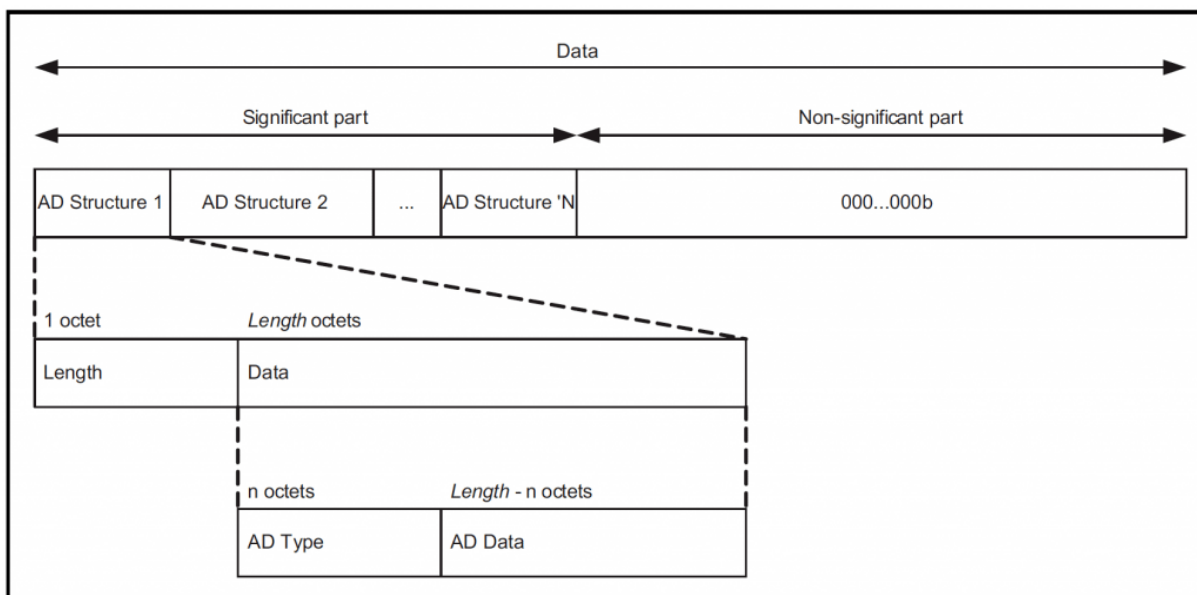


Figure 11.1: Advertising and Scan Response data format

شکل ۱۶: داده‌های تبلیغاتی در بسته‌های BLE

۳. پیام‌های پس از اتصال

این پیام‌ها شامل مراحل زیر هستند:

- تبادل نسخه (Version Exchange): شامل نسخه بلوتوث و شناسه تولیدکننده.
- تبادل ویژگی‌ها (Feature Exchange): مشخص می‌کند چه ویژگی‌هایی توسط دستگاه پشتیبانی می‌شود.
- تبادل MTU: تعیین مقدار حداکثر داده قابل انتقال.
- کشف صفات (Attribute Discovery): شامل خدمات، مشخصه‌ها و توصیف‌کننده‌ها.

در پروتکل BLE، پیام‌ها برای اهداف مختلفی از تبلیغات و اتصال تا تبادل اطلاعات پس از اتصال طراحی شده‌اند. فرمت این پیام‌ها به گونه‌ای سازمان‌دهی شده است که بتوانند نیازهای ارتباطی دستگاه‌های کم‌مصرف را برآورده کنند.