

Bluetooth® LEの多くの通信モード

ACL 接続



Bluetooth LE 接続 (ACL) について

最も一般的な Bluetooth 通信モードの 1 つは、簡単な接続を介したデータ交換です。

しかし、簡単であろうとなかろうと、Bluetooth コア仕様では、接続は正式に定義された技術概念です。この記事では、Bluetooth Low Energy (LE) の接続の主要な技術的側面を検証し、それらが何であるか、どのように機能するか、アプリケーションでどのように使用できるか、そしてそれらの長所と短所について理解を深めていきます。

Bluetooth コア仕様では、接続を利用した通信を、Bluetooth LE Asynchronous Connection-oriented Logical Transport (LE-ACL) という論理トランスポートとして定義しています。その技術的な詳細は、仕様の「リンク層」セクションに記載されています。

デバイスの役割

2つのデバイスが接続されている場合、それぞれが次の2つの役割のいずれかを引き受けます。

- **Central** (セントラル) - これは、接続の確立を開始したデバイスです。接続の動作に関する重要な決定を行い、パケットの交換を最初から主導します。
- **Peripheral** (ペリフェラル) - これは、他のデバイスに対して接続を要求するデバイスです。接続を介してパケットを送信しますが、セントラルデバイスから受信したパケットに応答する場合にのみ送信されます。

図1は、Ellisys Bluetoothアナライザ ソフトウェアのPiconetビューで、いくつかのピコネットがアクティブでデータ転送を行っている状態を示しています。それぞれにセントラルデバイスと単一のペリフェラルデバイスが含まれており、セントラルデバイスには青い境界線があります。アドバタイズメントおよびその他のブロードキャストトラフィックは、このビューからフィルタリングされます。

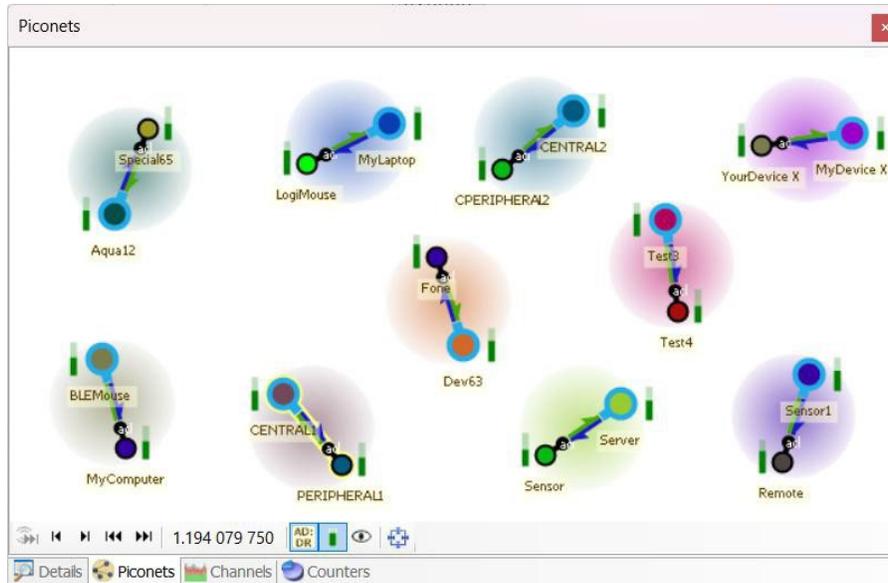


図1 複数の接続状況を示すEllisys BluetoothアナライザソフトウェアのPiconetビュー

接続の確立

デバイスが意図的に接続を確立するまでは、デバイス間の接続は存在しません。

2つのデバイスが接続する前に、一方が他方を検出し、そのデバイスへの接続を確立する必要があります。デバイス検出には、ペリフェラルデバイスのアドバタイズメントが含まれます。これには、アドバタイジングブロードキャスト (ADVB) と呼ばれる別の Bluetooth 論理トランスポートが含まれますが、このシリーズの後の記事で詳しく説明します。ただし、本質的に、ペリフェラルは、ペリフェラルに関する情報を含み、関連するデバイスへの接続要求として機能する小さなパケットをブロードキャストします。

注: 厳密に言えば、セントラルとペリフェラルという用語は、すでに接続されているデバイスにのみ適用されますが、わかりやすくするために、検出および接続確立プロセスの説明でここでの用語を使用します。

接続する適切なペリフェラルデバイスを見つけたいセントラルデバイスは、無線を受信モードに切り替え、アドバタイズメントパケットをスキャン (リッスン) します。適切なデバイスと思われるものを検出すると、セントラルデバイスがユーザーに詳細を提示し、接続先のデバイスをユーザーに選択してもらい、セントラルデバイスが接続要求として機能するプロトコルデータユニット (PDU) を含むパケットを送信するのが一般的です。この時点から、2つのデバイスはリンク層での接続状態にあると言われます。以下の図3、図4、図5は、このプロセスを示しています。

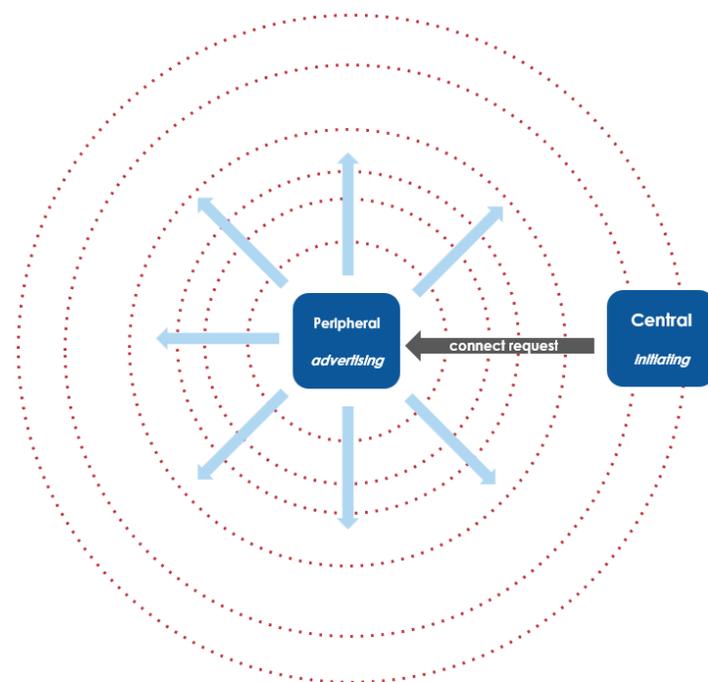
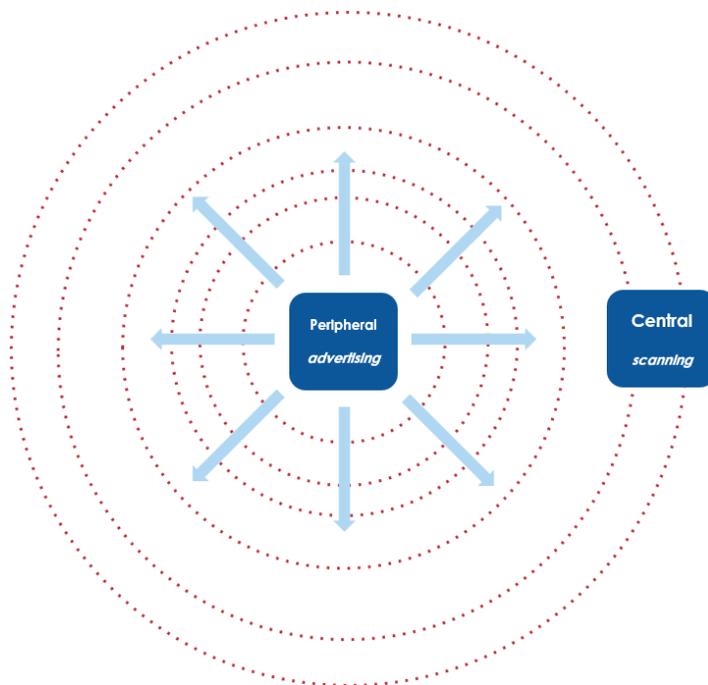


図3 ペリフェラルデバイスのアドバタイズとセントラルデバイスのスキャン

図4 セントラルデバイスが接続要求PDUをペリフェラルデバイスに送信

図5 デバイスが接続した状態



注: 接続を開始するために送信されたPDUや使用される無線チャンネルなどの詳細は、ペリフェラルがレガシーアドバタイズ (ADVBL)と拡張アドバタイズ (ADVBE) のどちらを使用しているかによって異なります。

図6は、Ellisys Bluetoothプロトコル解析ソフトウェアが、ペリフェラル (アドバタイザー) から送信されたアドバタイズパケットから、セントラル (イニシエーター) が送信する接続要求までの遷移を示しています。接続要求は青色で強調表示されています。

Time	Item	PDU Type	Transmitter
25.879 823 500	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
25.978 316 625	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
25.979 068 500	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
25.979 821 625	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
26.080 815 375	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
26.081 566 875	Connectable Undirected Adv Packet (3C:2D:B7:84:06:67, Flags)	ADV_IND	Advertiser: "Keyfob" 3C:2D:B7:84:06:67
26.082 091 750	Connection Indication Packet (29:CD:00:99:FF:56 > 3C:2D:B7:84:06:67, AA 0x6397C3AA)	CONNECT_IND	Initiator: "Dongle" 29:CD:00:99:FF:56

図6 アドバタイズパケットとそれに続く接続要求

スケジューリング

デバイスには無線機が1つしかなくても、その無線機を同時に複数の異なる目的に使用する必要がある場合があります。たとえば、図7に示すように、デバイスには複数の異なるデバイスへの複数のアクティブな接続がある場合や、いくつかのLE-ACL接続を行うと同時にアドバタイズを傍受している場合があります。無線機は一度に1つのことしかできません。アイドル状態、パケット送信、受信モードの待機状態のどれかになります。そのため、デバイスの単一の無線機を複数の同時使用間で共有する必要があり、各Bluetooth通信モードの仕様には無線タイムシェアリング方式の定義が含まれています。

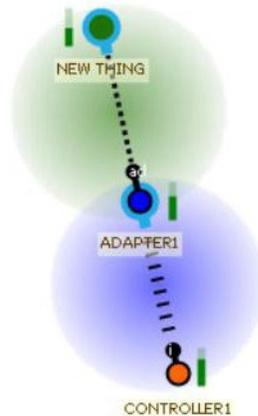


図7 ペリフェラルとして接続が確立され (点線)、同時にアドバタイズしている (破線) 1つのデバイス (ADAPTER1)

セントラルデバイスが送信する接続要求 (CONNECT_IND PDU) には、接続後に2つのデバイスが使用する無線アクティビティのタイミングとパターンの複数のパラメータが含まれています (図8参照)。接続時に無線を使用する機会をいつ与えるかを決定することをスケジューリングと呼びます。スケジューリングの一部はBluetoothコア仕様で定義され、様々な標準パラメータによって制御されます。その他の制御項目は実装者に委ねられています。

LE-ACL接続のタイムシェアリングは、以下のように動作します。接続は、一定間隔で正確に無線を使用する機会を得ます。この間隔は、接続間隔と呼ばれる設定パラメータによって設定されます。この間隔が経過するたびに、接続イベントが開始され、セントラルとペリフェラルが交代で無線を使用してパケットを送信します。接続

間隔は、7.5ミリ秒から4秒までです。図8は、CONNECT_IND PDUの接続間隔は20ミリ秒に設定されています。

Header	
PDU Type	CONNECT_IND
Channel Selection Algorithm	#1 (Legacy)
TxAdd	Public
RxAdd	Public
Payload Length	34 bytes
Initiator Address	29:CD:00:99:FF:56
Advertiser Address	3C:2D:B7:84:06:67
Connection Access Address	0x6397C3AA
CRC Initial Seed	0x332211
Transmit Window Size	6.25 ms
Transmit Window Offset	0 s
Connection Event Interval	20 ms
Connection Peripheral Latency	0
Connection Supervision Timeout	3 s
Channel Map	Used: 0-36 / Unused: none
Hop Increment	5
SCA (Clock Accuracy)	151 ppm - 250 ppm

図8 Ellisys Bluetooth アナライザ ソフトウェアの Detail ビューに表示される CONNECT_IND PDU

接続イベントの開始時に、セントラルはリンク層データパケットを送信する必要があります。同じタイミングパラメータセットで動作するペリフェラルはパケットを受信し、フレーム間空間(T_IFS)と呼ばれる短い遅延期間(デフォルトは150µs)の後、独自のリンク層データパケットをセントラルに送信します。2つのデータパケットの内容をいかなる形でも関連付ける必要はないことに注意してください。しかし、交互に送信することで、各デバイスは一方から他方にデータを転送する手段を持っています。

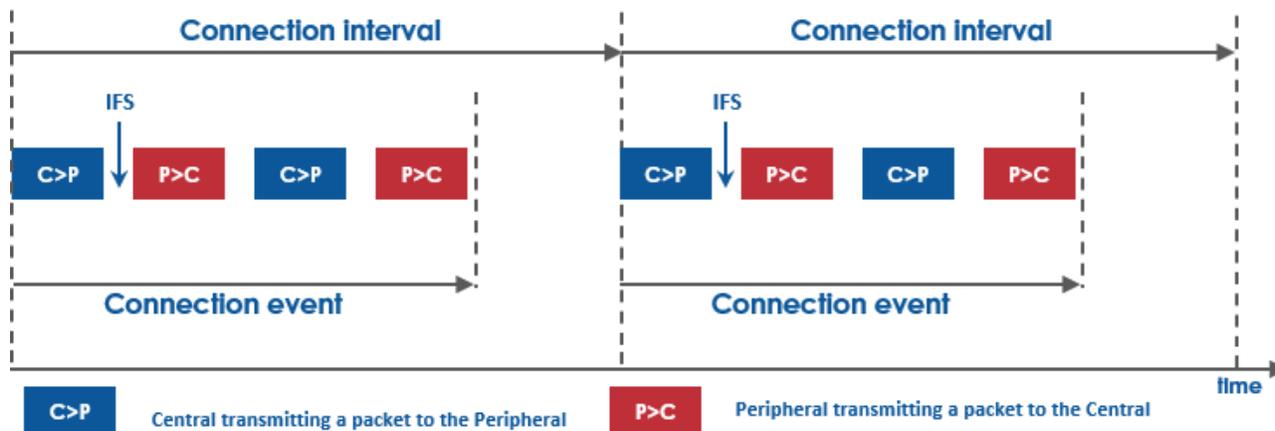


図9 LE-ACL の接続間隔と接続イベント

図9に示されている重要な点があります。パケットは、接続が確立されてから切断されるまで、途切れることなく継続的に送受信されるわけではありません。パケットは、接続間隔ミリ秒ごとに開始される接続イベント中でのみ交換されます。しかし、接続イベントが接続間隔全体と同じ長さになることはめったにないため、接続がパケットをアクティブに交換していない期間が残ります。これらのギャップにより、無線機を他の接続やアドバタイズメントなどの他の目的で使用するようにスケジュールすることができます。

図 1 0 は、各方向の単純なパケット交換 ($T_{IFS} = 150 \text{ us}$) と一般的な接続間隔 (この場合は 7.5 ms) を示しています。



図 1 0 Ellisys アナライザソフトウェアのTimingビュー
セントラル (青の下線) とペリフェラル (緑の下線) 間のパケットの間隔
 $T_{IFS} = 150 \text{ us}$ を確認

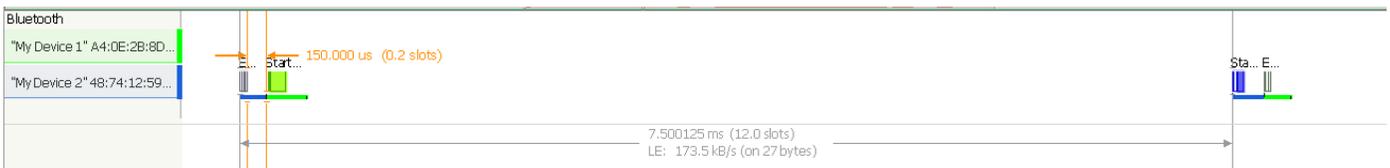


図 1 1 Timingビューのズームアウトで接続間隔 7.5 ms を確認

アドレッシング

パケットが LE-ACL 接続を介して送信される場合、図 1 2 に示すように、パケットには常にリンク アクセスアドレスが含まれます。これにより、範囲内の他のデバイスは、これらのパケットが自分を対象としていないことを認識できます。これはセキュリティに関するものではないことを理解することが重要です。無線が関連するチャンネルに同調されているデバイスは、任意の Bluetooth パケットを受信できます。このアドレスを含めることは、LE-ACL 接続のしくみの一部にすぎません。セキュリティは他の方法で処理されます。

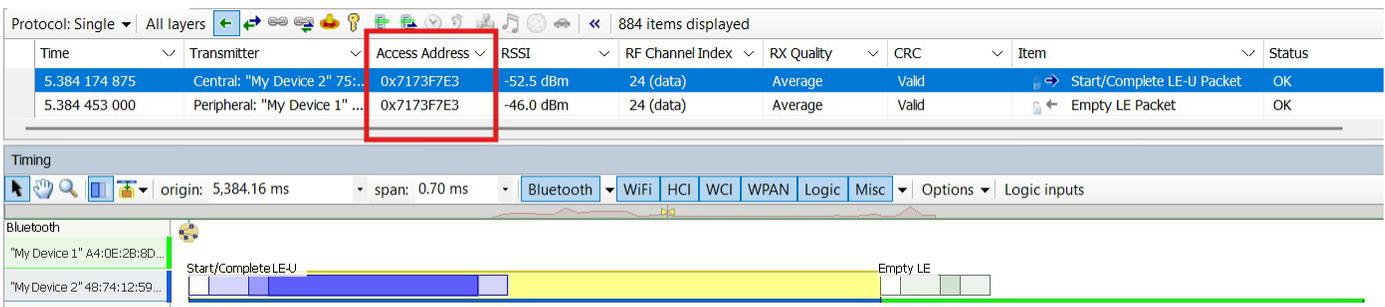


図 1 2 接続された 2 つのデバイスが使用するリンクアクセスアドレスの表示

無線チャンネル

図 13 に示すように、Bluetooth LEは、ほぼすべての通信モードで、2.4GHz帯域を40チャンネルに分割し、それぞれ2MHz幅です。そのうちの3つはアダプタイズメントに使用され、残りの37はLE-ACLなどのデータ通信に使用されます。これらの37チャンネルは、汎用チャンネルと呼ばれます。

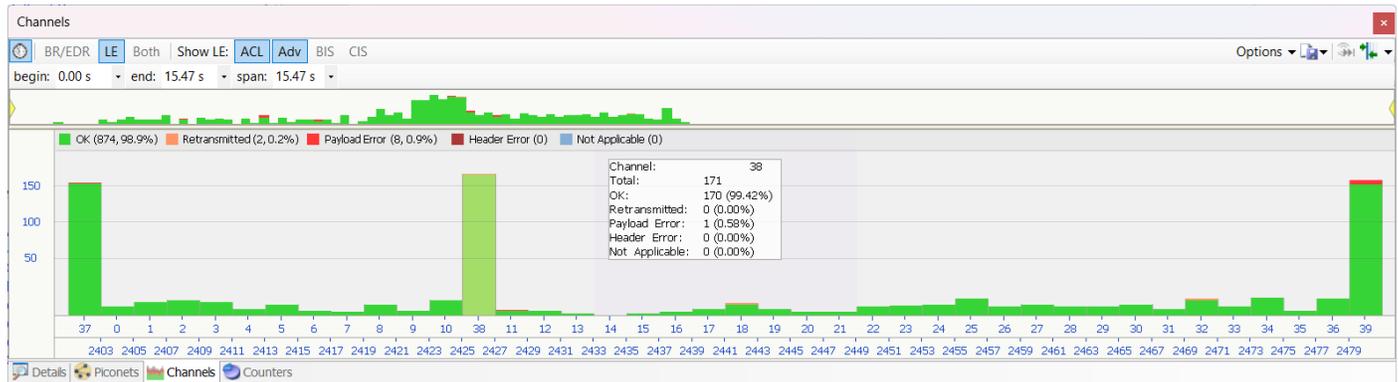


図13 汎用チャンネル (LE-ACL、番号 0-36の37チャンネル) とプライマリアダプタイズングチャンネル (3チャンネル、番号37-39の3チャンネル) を、チャンネル番号と周波数で表示

チャンネル選択アルゴリズムを使用して、各接続イベントで使用するチャンネルが選択されます。Bluetooth コア仕様ではいくつかのチャンネル選択アルゴリズムが定義されています。最も古いデバイスを除くすべてのデバイスで、LE-ACL 接続はチャンネル選択アルゴリズム # 2 (CSA2) が使用されます。

CSA2 では、両方のデバイスでシード値を用いた疑似乱数生成シーケンスが使用されるため、アルゴリズムが呼び出されるたびに、両方のデバイスで同じチャンネル番号が選択されます。トータルで見た CSA2 のメリットは、十分な数の接続イベントにわたって、どのチャンネルも他のチャンネルよりも著しく多く使用されることはないということです。

どのような環境でも、汎用チャンネルの一部がうまく機能せず、他のデバイスからの干渉を受ける可能性が常にあります。Bluetooth LE デバイスは、実装固有の手法を使用して、各チャンネルのパフォーマンスを測定し、必要に応じて、パフォーマンスの低いチャンネルにフラグを立て、CSA2 アルゴリズムでそのチャンネルが使用されないようにすることができます。このプロセスは、非公式には適応型周波数ホッピング (AFH) と呼ばれています。

デバイスは、チャンネルマップと呼ばれるデータ構造を用いて各汎用チャンネルの状態を追跡します。マップ内のチャンネルには、使用可能か、使用不可かを示すマークが付けられます。チャンネルマップの内容は、環境条件の変化に応じて時間の経過とともに変化します。パフォーマンスが低下し始めたチャンネルはチャンネルマップでunusedとしてマークされ、干渉の影響を受けなくなったチャンネルは、チャンネルマップでusedとしてマークされ、再び選択できるようになります。Bluetoothコア仕様では、最低2つのチャンネルが利用可能でなければならないと定義されています。

図 1 4は、Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアのChannelsビューで、LE-ACL接続によるチャンネル使用状況が表示されています。解析対象期間（28.69秒）では、主に3つの重複しない 2.4GHz Wi-Fiチャンネル (1, 6, 11) 付近で顕著なチャンネル回避（マゼンタ部）が見られます。AFH方式の有効性は、高品質の通信リンクとキャプチャが実現していることで理解できます：アナライザは、パケットの98.9%がOKと判断して（デバッグ作業が容易になり）、さらに重要なこととして、再送率がわずか0.1%であり、デバイス間が使用したチャンネルはクリーンでほぼエラーのない状況であったことを示しています。



図 1 4 Wi-Fi チャンネル 1、6、11 の周囲で干渉を回避する AFH

AFHには大きなメリットがあります。チャンネルパフォーマンスに関する情報を動的に維持・活用することで、デバイスは問題のあるBluetoothチャンネルを回避し、2.4GHz無線帯域の一部で干渉が発生し始めても、効率的に通信を継続できます。これにより、Bluetooth LEコネクション指向通信の信頼性が大幅に向上します。チャンネル性能に関する情報の動的な維持と使用により、デバイスは問題のあるBluetoothチャンネルを回避し、2.4GHz無線帯域の一部で干渉が発生し始めても効果的に通信を継続できます。これにより、Bluetooth LEの接続型通信の信頼性が大幅に向上します。

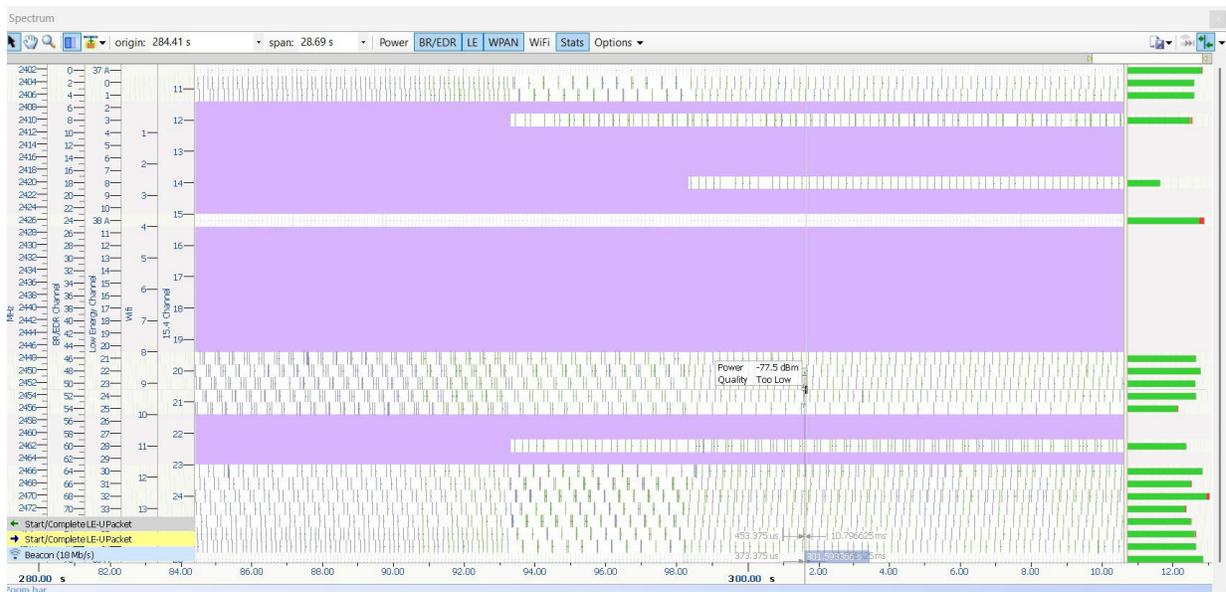


図 1 5 干渉回避のためのAFHの動的アプローチ状況 (Spectrum ビュー)

AFHの使用には、留意すべき規制上の問題がいくつか存在します。

- 規制当局は、Bluetooth LEで使用される適応型周波数ホッピングの定義とは異なる、独自の適応性の定義を持っている場合があります。
- チャンネル分類は、使用可能な汎用チャンネルの数を減らす傾向があります。これにより、残りの「使用済み」チャンネルのチャンネル占有率が増加します。規制当局は通常、チャンネル占有率に関する要件を定めています。

物理層

LE-ACLは、Bluetooth LE スタックおよびコア仕様のリンク層の機能です。

リンク層のすぐ下には物理層があり、とりわけ、PHYと呼ばれる一連の構成を定義します。各種PHYの主な違いの一つは、動作時のシンボルレートです。シンボルレートは、アナログ無線の世界における情報伝送速度の尺度であり、Bluetooth LEの場合はデジタル世界のビットレートと直接比較できることに留意してください。

LE-ACL 接続では、次の表にまとめられている3つのPHYのいずれかを使用できます。

PHY 名	シンボルレート	エラー訂正?
LE 1M	1 M/s、毎秒100万個のシンボルを送信	いいえ
LE 2M	2 M/s、毎秒200万個のシンボルを送信	いいえ
LE Coded	1 M/s、毎秒100万個のシンボルを送信	はい

表 1 LE-ACL PHY オプション

パケット、PDU、ペイロード

リンク層 (LL) は、無線で送信するためのいくつかのパケット形式を定義します。このような各パケットの内部にはPDU (プロトコルデータユニット) があり、LE-ACL論理トランスポートの場合はLL Control PDUまたはLL Data PDUのいずれかになります。

LL Control PDUには50種類以上あり、その名前が示すように、その目的は、2つの接続されたデバイスによってさまざまな方法でリンクを制御できるようにすることです。

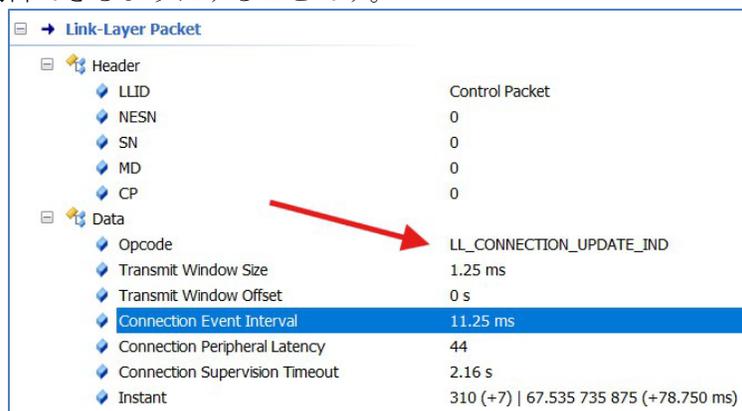


図 1 6 Control PDU を使用したリンク層パケット(接続の更新)

LL Data PDU は、リンク層のすぐ上のスタック層から PDU をペイロードとして伝送します。これは、Logical Link Control and Adaptation (L2CAP) 層です。L2CAPの役割の一つはプロトコル多重化であるため、LL Data PDUに含まれる L2CAP PDU自体が、プロトコルスタック内でさらに上位で定義された他のプロトコルのPDUのコンテナとなる場合があります。LL Data PDがL2CAP PDU内で伝送するデータの一般的な例としては、属性プロトコル (ATT) PDUやセキュリティマネージャプロトコル (SMP) PDUが挙げられます

が L2CAP PDU 内で転送する可能性のあるものの一般的な例として、Attribute Protocol (ATT) PDU またはSecurity Manager Protocol (SMP) PDU があります。つまり、LE-ACL PDUにはPDUが含まれており、さらにそのPDUには上位層のPDUが含まれており、最終的にはアプリケーション層のデータが含まれる可能性があります。

71.231 332 750	ATT Find Information Request Packet (0x0006 - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)	L2CAP Frame	Length	5 bytes
71.231 332 750	L2CAP SDU (Basic, Service=ATT)	5 bytes	0x0004 (ATT)			
71.231 332 750	L2CAP B-Frame (Service=ATT)	5 bytes	0x0004 (ATT)	Payload	5 bytes	
71.251 563 000	ATT Find Information Response Packet (Characteristic Declaration > Perip...	22 bytes	0x0004 (ATT)	L2CAP SDU		
71.291 332 500	ATT Find Information Request Packet (0x000B - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)	Information		
71.311 565 125	ATT Find Information Response Packet (Peripheral Preferred Connection ...	22 bytes	0x0004 (ATT)	Type	Basic Mode	
71.351 333 250	ATT Find Information Request Packet (0x0010 - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)	Length	5 bytes	
71.371 562 375	ATT Find Information Response Packet (Characteristic Declaration > ICCE ...	22 bytes	0x0004 (ATT)	ATT Payload		
71.411 333 125	ATT Find Information Request Packet (0x0015 - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)	Opcode	Find Information Request	
71.431 563 625	ATT Find Information Response Packet (Characteristic User Description > ...	22 bytes	0x0004 (ATT)	Starting Handle	0x0006	
71.471 329 375	ATT Find Information Request Packet (0x001A - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)	Ending Handle	Max Handle	
71.491 564 000	ATT Find Information Response Packet (FiRa Consortium > Client Charact...	22 bytes	0x0004 (ATT)			
71.531 334 750	ATT Find Information Request Packet (0x001F - Max Handle)	5 bytes	0x0004 (ATT)			

図 1 7 ATT コマンドを含む L2CAP PDU(Find Information Request)

接続の終了

通常、接続は最終的に終了しますが、これには次のようにさまざまな可能性があります。

- 接続が不要になったとアプリケーションが判断した場合。このことをローカルリンク層に通知し、接続が切断されたことを示すControl PDU (LL_TERMINATE_IND) をリモートデバイスに送信します。
- 最初の接続時にセントラルがペリフェラルに送信する設定パラメータの1つに、監視タイムアウトがあります。これは、LL Data PDUを受信せずに経過できる最大時間を示します。その時間を超えると、接続は切断されます。

アプリケーションの懸念事項

Bluetooth LE スタックを利用する製品は、アプリケーションと呼ばれます。

ここでのアプリケーションは、さまざまなものがあります。家電製品の場合もあるし、iOSやAndroidで動作するスマートフォンアプリの場合もあります。いずれの場合も、Bluetooth LEスタック自体を構成する部分、スタックを利用する部分、グラフィカルユーザーインターフェイスなどの通信とはまったく関係のない部分を明確に区別する必要があります。

アプリケーションにはそれぞれ独自の要件があり、その中にはBluetooth LEを使用した無線通信に関連するものもあれば、そうでないものもあります。このセクションでは、Bluetooth LE-ACL接続に関連するアプリケーションの問題をいくつか取り上げ、その使用方法と、その固有の機能がどのように役立つかについて考察します。

構成

LE-ACL 接続の動作に影響を与える設定パラメータはいくつかあり、その中には接続間隔や監視タイムアウトなどがあります。

Link-Layer Packet	
Header	
PDU Type	CONNECT_IND
Channel Selection Algorithm	#1 (Legacy)
TxAdd	Public
RxAdd	Public
Payload Length	34 bytes
Initiator Address	29:CD:00:99:FF:56
Advertiser Address	3C:2D:B7:84:06:67
Connection Access Address	0x6397C3AA
CRC Initial Seed	0x332211
Transmit Window Size	6.25 ms
Transmit Window Offset	0 s
Connection Event Interval	20 ms
Connection Peripheral Latency	0
Connection Supervision Timeout	3 s
Channel Map	Used: 0-36 / Unused: no
Hop Increment	5
SCA (Clock Accuracy)	151 ppm - 250 ppm

図 1 8 CONNECT_IND PDU の接続時に指定された接続パラメータ (接続監視タイムアウトと接続間隔など)

Bluetooth LE スタックには、アーキテクチャ全体の中で Host と Controller と呼ばれる 2 つの主要な部分にグループ化された一連の層があります。ホストは通常オペレーティングシステムであり、コントローラーは通常チップですが、必ずそうする必要はありません。Host と Controller には、厳密な実装ルールはなく、スタックの上位層と下位層を物理的に分離できる論理構造です。

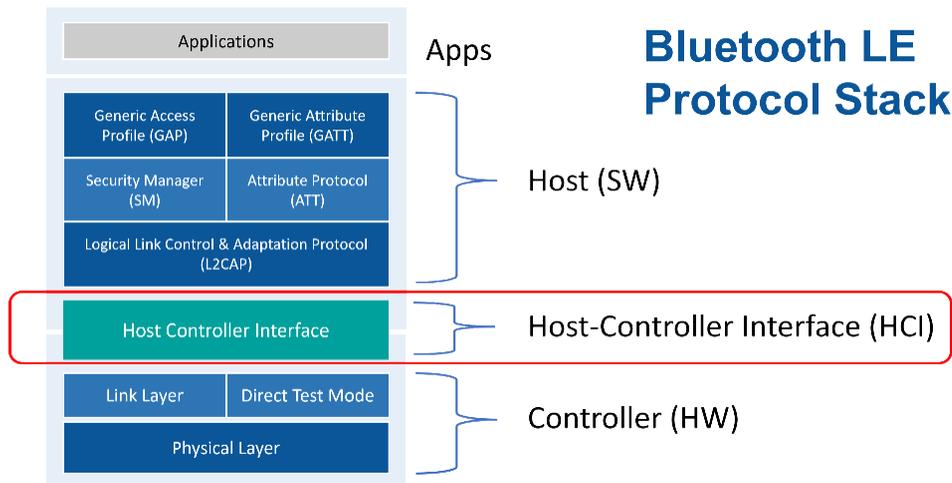


図 1 9 Bluetooth LE スタック

Host と Controller の間には、ホスト コントローラー インターフェイス (HCI) と呼ばれる層があります。その目的は、Host が Controller にコマンドを送信できるようにし、Controller がイベントと呼ばれるデータ構造をホストに送信できるようにすることです。イベントには、コマンドへの応答が含まれる場合もあれば、Controller が Host と独自に通信するために必要なデータが含まれている場合もあります。

HCI は、アプリケーションが LE-ACL 接続の主要なパラメータを構成できるメカニズムを提供します。HCI は、最小および最大接続間隔パラメータと監視タイムアウトパラメータを含む HCI_LE_Create_Connection コマンドを定義します。

ただし、アプリケーションは通常、HCI コマンドとイベントを直接使用することはできません。例えば、Android アプリケーションでは、HCI コマンドを策定して、実行しているスマートフォンの Bluetooth LE コントローラーに直接送信することはできません。代わりに、アプリケーション開発者は、コードで API (Application Programming Interface) と呼ばれる関数の集合を使用します。API は、開発者が使用しているプラットフォームやソフトウェア開発キット (SDK) によって提供され、通常、アプリケーション開発者は HCI 機能の一部のみを利用できるようになります。また、利用可能な HCI 機能のうち、API は多くの場合独自のルールを課し、それによってアプリケーション開発者を何らかの形で制約を受けます。

たとえば、すでに述べたように、LE-ACL 接続の接続間隔パラメータには、7.5 ミリ秒から 4 秒の範囲が定義されています。しかし、Android 開発者は接続開始時に接続間隔を指定できず、このパラメータがスタックに割り当てられる値はオペレーティングシステムによって決定されます。監視タイムアウトパラメータについても同じことが言えます。

一方、Android API を使用すると、アプリケーション開発者は、接続にサポートされている 3 つの PHY タイプのいずれかを使用するように要求できます。

ここでの教訓は、アプリケーション開発者は、Bluetooth コア仕様の HCI セクションで定義されているすべての機能が使用できると想定すべきではないということです。API が機能を完全に公開する場合もあれば、API が特定のコマンドへのアクセスを提供するがパラメータ値に制限が設けられている場合もあれば、プラットフォームの API が提供する HCI 機能にアクセスできない場合もあります。特定のターゲットプラットフォーム用に開発されているアプリケーションの機能と制約を確認するに API ドキュメントを参照する必要があります。

また、接続開始時にセントラルが要求する設定は、必ずしも接続期間中に保持されるとは限らないことにも注意してください。セントラルとペリフェラルの両方が、Connection Parameters Request と呼ばれるリンク層の手順を使用してパラメータの変更を後から要求することができます。

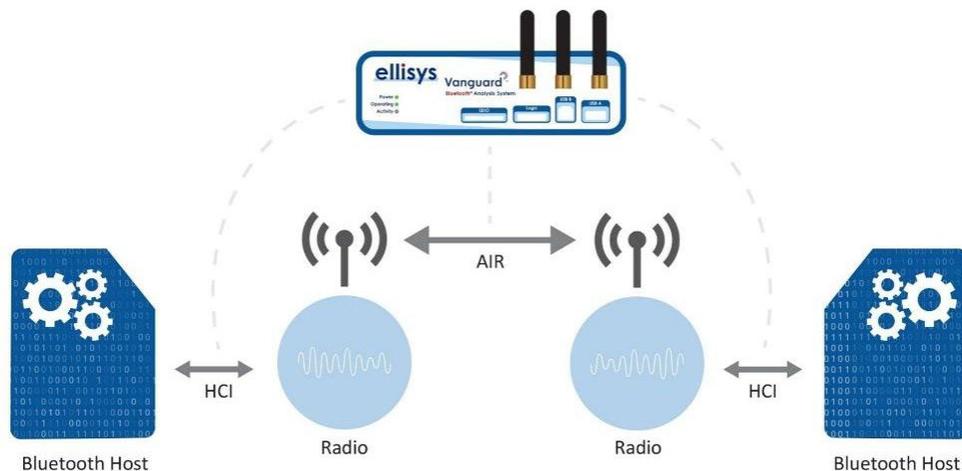


図 2 0 Ellisys Bluetooth Vanguard アナライザは接続の両側で無線トラフィックと HCI トラフィックを記録可能

エネルギー効率

エネルギーを無駄にしたり、バッテリー寿命を縮めたりすることは決して良いことではありません。特に小型のペリフェラルデバイスでは、エネルギー効率が最も重要になる場合があります。デバイスがコイン型電池で何年も動作できなければならないという要件に遭遇することは珍しくありません。

LE-ACL接続では、エネルギーをより節約して使用できるいくつかの方法が提供されます。

- **Peripheral Latency** - この接続パラメータにより、ペリフェラルは連続する複数の接続イベントでセントラルからのパケットを傍受しなくなります。これにより、セントラルが送信するすべてのタイムスロットで無線を受信モードにならず、応答パケットを送信する必要もなくなるため、ペリフェラルの消費電力を抑えることができます。セントラルは `HCI_LE_Create_Connection` コマンドでペリフェラルの最大遅延値を指定できますが、ペリフェラルは `Connection Parameters Request` で別の値を要求できます。このようにして、ペリフェラルは接続に関するパラメータの設定で、要件をより適切に満たすことができます。
- **Subrating** - サブレーティング接続とは、接続イベントのサブセットがセントラルまたはペリフェラルデバイスの無線アクティビティに使用される接続です。ある意味、サブレーティングは、ペリフェラルデバイスの遅延がペリフェラルデバイスに提供するものと同様の省エネメカニズムをセントラルデバイスに提供します。しかし、サブレーティングはエネルギー効率ではありません。これにより、接続を2つの状態のいずれかにすることができます。1つ目は、接続が確立され、それを維持するために必要なエネルギーはほとんどないが、データ転送速度が遅く、遅延時間が長いスタンバイモードに例えることができます。2番目の状態は、低遅延と高パフォーマンスを提供します。何よりも、サブレーティングが優れているのは、デバイスが2つの状態を即座に切り替えることができることです。これは、通信要件が迅速かつ予測不能に変化するアプリケーションに適しています。
- **LE Power Control** - この機能により、デバイスは送信電力レベルを動的に制御できます。アプリケーションはHCIコマンドを介してパラメータを設定でき、ローカルデバイスとリモートデバイスは通信を行い、パス・ロスなどのローカル測定値を報告したり、送信電力レベルの変更をリモートデバイスに要求したりできます。状況に合わせて送信電力レベルを最適化することで、エネルギー効率が向上する場合があります。
- **Connection Interval** - 接続間隔の値を大きくすると、エネルギー使用量が削減される可能性があります。常にそうとは限りません。無線の使用こそがエネルギー消費の主要な要因なので、接続間隔内の接続イベントの長さ、つまり送受信されるパケットの数でエネルギー消費量は大きく左右されます。

信頼性

無線通信は本質的に信頼できるものではありません。しかし、適切に設計されたプロトコルと手順によって、信頼性を高めることができます。

LE-ACL接続には、より高い信頼性の通信が必要な場合に適した設定の選択肢があります。

- **干渉への対処**：ほとんどの環境では、他の無線送信源からの干渉のリスクがあります。しかし、LE-ACL接続は、他の多数の送信デバイスの範囲内にある場合でも、継続して正常に機能します。これは、適応型周波数ホッピングが最大37の異なる無線チャンネルに伝送をランダムに分散し、他のデバイスからの伝送と衝突する確率が大幅に減少するためです。また、干渉が発生していることが判明したチャンネルは、チャンネルマップから削除して、問題のあるチャンネルを回避することができます。

- **受信と順序**：接続を介して送信されるパケットの最も基本的な要件は、パケットを受信することです。パケットは意図した順序で受信する必要があります。LE-ACLは、シーケンス番号（SN）、次の予想シーケンス番号（NESN）、追加データ（MD）フィールド（パケットのヘッダーに配置）と呼ばれる3つのシングルビットフィールドを使用して、受信したパケットの順序が正しいかどうかを判断し、送信デバイスに受信確認を行うシステムを実装しています。
- **エラー検出**：干渉の影響は受信デバイスによって検出できます。すべてのパケットには巡回冗長検査（CRC）フィールドが含まれており、その値は送信デバイスによって他のフィールドの値から計算されます。受信デバイスは、同じ方法で予想されるCRC値を計算し、受信パケットの値がローカルで計算された値と一致しない場合は、干渉によるデータ破損が発生している可能性があります。CRCチェックに失敗したパケットに対して応答確認をしないことで、受信側は送信側に対してパケットを再送するよう伝えます。

セキュリティ

セキュリティには様々な側面があります。アプリケーションに求められる最も基本的な要件には、次のようなものがあります。

- **機密保持**：データは送信中も機密性が保たれなければならない、第三者がデータのやり取りを盗聴したり、その内容から意味のある情報を抜き出したりすることが不可能でなければなりません。
- **認証**：第三者が信頼できるデバイスになりすますことができないようにする必要があります。
- **改ざん検出**：意図した受信者に検出されずに、第三者が送信中のデータを変更できないようにする必要があります。

LE-ACL接続は、リンク層の暗号化によって保護できます。この機能を有効にすると、データPDUが暗号化され、受動的な盗聴から保護されます。

暗号化されたPDUには、メッセージ整合性チェック（MIC）フィールドと呼ばれる追加フィールドが含まれています。MICを使用すると、受信デバイスは受信したパケットを認証し、パケットを偽造しようとする他の悪意のあるデバイスではなく、接続されている信頼できるデバイスからのパケットであることを確認できます。また、信頼できる発信元以外のデバイスによってパケットに加えられた変更を検出することもできます。

リンク層暗号化とPDU認証を使用できるようにするには、接続されている2つのデバイスがペアリングされている必要があります。ペアリングは、リンク層セキュリティシステムで使用されるさまざまなセキュリティキーを作成するために使用できるキーマテリアルを生成し配布します。

データスループットレートの最大化

一部のアプリケーションでは、デバイス間でアプリケーションデータをできるだけ迅速に転送することが重要な要件です。送信されるデータの一部はアプリケーションデータではなくプロトコルデータであるため、アプリケーションデータの転送速度は常に選択したPHYのシンボルレートよりも低くなり、アプリケーション全体で利用可能な帯域幅の一部になります。しかし、幸いなことに、アプリケーションが設定または影響を与えることができる変数はいくつかあり、アプリケーションデータの転送速度を向上させることができます。

- 最大伝送単位 (MTU) :** このパラメータは、LE-ACL接続でよく使用されるAttribute プロトコルなどの上位層プロトコルのPDUに含めることができるアプリケーションデータの最大バイト数を設定します。そのため、MTU は、パケットで無線送信される各 LL データ PDU のアプリケーションデータ量の上限でもあります。MTU 値が大きいくほど、アプリケーションデータに使用される使用可能な帯域幅の割合が大きくなり、アプリケーションデータ伝送速度が向上します。適切な API が利用可能な場合、アプリケーションはより高い MTU サイズを要求できます。

Time	Client RX MTU	Server RX MTU	Item	Payload	Destinatio...
5.450 694 500			ATT Notification Packet (0x001D: 5F)	4 bytes	0x0004 (ATT)
5.457 884 125	527		ATT Exchange MTU Request Packet	3 bytes	0x0004 (ATT)
5.465 614 375			ATT Notification Packet (0x002C: FF 04 00 01 01 01 00 00 00 00 00 ...)	22 bytes	0x0004 (ATT)
5.473 170 125		23	ATT Exchange MTU Response Packet	3 bytes	0x0004 (ATT)
5.480 613 500			ATT Notification Packet (0x002C: FF 09 00 5F 08 00 00 00 00 00 00 ...)	22 bytes	0x0004 (ATT)

図 2 1 MTU 値の属性プロトコルを介した一般的なクライアント/サーバ交換

- LE データ パケット長拡張 :** このリンク層機能により、より大きなリンク層パケットを使用できるため、各パケットには、プロトコルデータ全体によるオーバーヘッドが少なく、より多くのアプリケーションデータを含めることができます。両方のデバイスがこの機能をサポートしている場合、その使用は自動的にネゴシエートされ、アプリケーションは特別な操作を行うことなく、そのメリットを享受できます。
- 接続間隔 :** 接続間隔が短いほど、アプリケーションが使用する接続でデータを送信する機会が多くなります。これにより、アプリケーション全体のデータ伝送量が増加する可能性があります。必ずしも増加するとは限りません。重要なのは、各接続イベントで送信されるパケット数です（他のすべての変数が同じ場合）。しかし、スケジューリングは複雑なトピックであり、Bluetooth コア仕様では部分的にしか扱われておらず、大部分は実装（Android オペレーティングシステムなど）に委ねられています。したがって、接続間隔を短くしてもアプリケーションデータが増加するという保証はありません。それでも、試してみる価値はあります。
- PHY とシンボル レート :** LE 2M PHY のシンボルレートは LE 1M PHY の 2 倍です。LE 2M は、LE 1M よりもはるかに高速なアプリケーションデータ転送速度を提供すると期待するのは当然です。しかし、繰り返しますが、これは必ずしも真実ではありません。LE 2M と LE 1M と比較した場合の影響を別の観点から見ることもできるからです。LE 2M は時間を節約します。たとえば、オペレーティングシステムで Bluetooth スケジューリングの実装者から見ると、LE 2M の最大の利点は、同じ量のデータを半分の時間で送信できることです。これにより、貴重な未使用時間が生まれ、スケジューリングアルゴリズムが他の接続などに使用できます。しかし、繰り返しになりますが、LE 2M を試して、LE 1M との結果を比較する価値はあります。

図 2 2 では、2つのデバイスが接続され、さまざまなリンク層情報を交換し、ATTプロトコルを介してPHYの設定と機能情報を交換しています。少し後に、アナライザソフトウェアによって計算され、LLCP PHY アップデートに関連付けられたタイムスタンプ (青色のハイライト) で示される LE 2M に接続が進みます。

Time	PHY	Item
5.330 304 750	LE 1M	Connectable Directed ("LogiMouse" DD:8A:CC:22:B1:F5 (Static), Initiator [ChSel #2] "chuck2/MyLaptop" D4:F3:2D:D2:2A:57, 51.9 ms)
5.390 385 125	LE 1M	LLCP Feature Exchange (Encr, ParReq, ExtRej, FeatEx, Ping, CIS, PowCtr, Subrate > Encr, ExtRej)
5.405 384 875	LE 1M	LLCP Encryption Start (EDIV=0x0000, SKDm=0x8EEFBAFB38CB4049, IVm=0x44FF1099 > SKDs=0x8E2ECEB74CEFAF54, IVs=0xEEA2A22F)
5.450 384 375	LE 1M	LLCP Version Exchange (5.3, Id=Intel Corp., Rev=13'944 > 5.1, Id=Nordic Semiconductor ASA, Rev=294)
5.450 694 500	LE 1M	ATT Notification Packet (0x001D: 5F)
5.457 884 125	LE 1M	ATT Exchange MTU Transaction
5.457 884 125	LE 1M	ATT Exchange MTU Request Packet
5.473 170 125	LE 1M	ATT Exchange MTU Response Packet
5.465 614 375	LE 1M	ATT Notification Packet (0x002C: FF 04 00 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00)
5.472 883 875	LE 1M	LLCP PHY Symbol Rate Change (TXs=Any, RXs=Any > TXs=Any, RXs=Any > C->P=LE 2M, P->C=LE 2M, Inst=109 (+95) 6.207 883 875 (+712.500 ms))
5.472 883 875	LE 1M	LLCP PHY Request (TXs=Any, RXs=Any)
5.488 114 000	LE 1M	LLCP PHY Response (TXs=Any, RXs=Any)
5.495 383 875	LE 1M	LLCP PHY Update (C->P=LE 2M, P->C=LE 2M, Inst=109 (+95) 6.207 883 875 (+712.500 ms))
5.480 613 500	LE 1M	ATT Notification Packet (0x002C: FF 09 00 5F 08 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00)

図 2 2 接続デバイスによるPHYの機能と設定情報の交換

通信モードのプロパティ

このシリーズの最初の記事「Bluetooth LE の多様な通信モード」では、ある通信モードを別の通信モードと比較する際に役立つ一連のプロパティを紹介しました。ここでLE-ACL 接続のプロパティ表を再掲します。

プロパティ	コメント
トポロジー	1 対 1 (1:1)
送信と受信	デバイスは交互に送信と受信を行います。
アプリケーションデータの方向	アプリケーションデータは双方向に送信できます。
接続型/非接続型	接続型
データと時間	非同期
レシーバの同時受信	データパケットは、一度に1つの受信デバイスに送信されます。
無線チャンネル	40 の 2 MHz 幅のチャンネルのうち 37 個を使用します。チャンネル選択には、適応周波数ホッピングとして知られるプロセスが含まれます。
スケーラビリティ	一部のデバイスは、一度に複数のデバイスとの接続の確立できます。Bluetooth コア仕様には数の制限は定義されていませんが、実装上の問題で、比較的低い数に制限されます。LE-ACL 接続を用いたアプリケーションデータのスループットは、特定の設定パラメータを使用することで大幅に向上できますが、基礎となる PHY シンボル レートよりも常に低くなります。
PHYの選択	1M、2M、LE Coded

表 2 LE-ACL のプロパティ

知っていますか？

この記事の終わりとして、LE-ACL 接続に関する興味深く役立つ追加ポイントをいくつか紹介します。



接続イベントで交換されるパケット数は、Bluetooth コア仕様で定義されていないことをご存知ですか？

リンク層のデータパケット送信は短時間で完了します。最大のパケットでも、約2000 μ sしかかかりません。接続間隔は 7.5 ミリ秒から 4 秒の範囲で設定できます。通常、理論上は、セントラルデバイスがペリフェラルと複数のパケットを交換するのに十分な時間があります。実際には、スケジューリングプロセスでは見た目以上にも多くの処理が行われている可能性があり、その結果、接続イベントとパケット交換に使用される接続間隔が短くなる可能性があります。



通常、セントラルは接続イベントの開始時にパケットを送信しますが、必ずしもそうする必要がないことをご存知ですか？

通常、セントラルは各接続イベントの開始時にパケットを送信しますが、これは必須ではありません。たとえば、スケジュールの競合により、セントラルがそのタイムスロットで送信できない場合があります。ただし、セントラルデバイスは、接続に定義された監視期間内に LL Data PDU を含むパケットを少なくとも 1 つ送信する必要があります。送信しない場合、接続は切断されます。



LE-ACLはシンプルなフロー制御メカニズムを提供することをご存知ですか？

フロー制御は、通信システム内の各分間でデータが転送される速度を管理するために使用される手法です。フロー制御の主な目的は、データの送信側が受信側で処理できる限界速度を超えないようにすることです。超過すると、バッファオーバーフローなどによりデータ損失が発生する可能性があります。LE-ACL には、リモートデバイスが後で同じパケットを再送信し、接続速度を遅くしないよう、Next Expected Sequence Number フィールドを意図的に更新しないという簡単なフロー制御メカニズムがあります。より高度なフロー制御メカニズムは、L2CAP 層で使用できます。



接続で使用されるフレーム間時空間パラメータ (inter-frame space time parameter) を変更できることをご存知ですか？

Bluetooth コア仕様バージョン 6.0 がリリースされるまで、パケットの送信間の待機時間等を定義するフレーム間空間時間パラメータは 150 μ s に固定されていました。バージョン 6.0 ではこれが変更され、デバイスは、セントラルからの送信と、それに続くペリフェラルが使用できるタイムスロットを区別するために、異なるフレームスペース値を使用できるようになりました。また、その逆も可能です。フレーム間スペースタイムのデフォルト値は 150 μ s のままですが、デバイスは 0 ~ 10,000 μ s の範囲で新しい値をネゴシエートできます。



LE-ACLでは、両方のデバイスに、アクティビティの時間を計るために十分な制度を持ったクロックが必要であることをご存知ですか？

Bluetooth コア仕様は、デバイスおよび特定の通信モードのクロック精度要件を定義しています。



CSA2 では、十分な数の接続イベントにわたってチャンネル使用が均等に分散されることをご存知ですか？

平均して、各チャンネルは 2.7% の時間使用されます (37 チャンネルすべてが使用可能であると仮定)。



一部の地域では、適応型と非適応型のチャンネル選択動作に関する独自の規制要件が定義されていることをご存知ですか？

これらの定義を確認し、製品による Bluetooth LE の使用とどのように関連しているかを理解することが重要です。Bluetooth SIG は、この規制に関する質問やその他の規制に関する質問に役立つ Regulatory Aspects Document (RAD) と呼ばれるドキュメントを提供しています。

次回シリーズ

この記事では、Bluetooth LE の LE-ACL 通信モードについて説明しました。

このシリーズの次の記事では、レガシアドバタイズメント (ADV_B) 通信モードについて詳しく見ていきます。