

Bluetooth® LE の多様な通信モード イントロダクション



背景

Bluetooth テクノロジーが初めて世界に登場したのは 2000 年に遡ります。より新しく、よりエネルギー効率の高い Bluetooth Low Energy (LE) は、約 10 年後にリリースされ、膨大な数の製品に採用されています。

Bluetooth LE は、スマートフォンとアクティビティトラッカーを接続し、一日中繰り返しデータを同期できる無線通信技術として広く知られています。どちらのデバイスのバッテリー残量にも目立った影響を与えません。エネルギー消費を抑えた効率的な通信は、Bluetooth LE の設計において追求された主要な目標の一つであり、Bluetooth LE はその目標を十分に達成していると言っていいでしょう。

このような製品のエンドユーザーとして、私たちは Bluetooth LE が使用する接続、データ交換、切断のシーケンスに慣れており、デバイスの接続について（または、問題が発生して接続されないことについて）何気なく話しています。

しかし、接続とは特定の技術的な状態であり、接続指向通信は Bluetooth LE が使用できるいくつかの通信モードのうちの 1 つにすぎないことをご存知ですか？

この文書では、各通信モードを紹介し、その後でそれぞれについて詳しく見ていきます。

用語

Bluetooth コア仕様では、さまざまな通信モードが厳密な専門用語で定義されていますが、**通信モード**という用語は使用されていません。代わりに、ほとんどの場合に使用される正式な用語は**論理トランスポート**です。しかし、場合によっては、論理トランスポートには重要なバリエーションがあり、それぞれがそれ自体でトピックとして扱うのが最善です。たとえば、Bluetooth LE の最新機能の 1 つであるチャンネルサウンディングは、非常に明確な方法で動作しますが、Bluetooth LE アーキテクチャ全体では論理的なトランスポートとは見なされません。したがって、このシリーズの記事では、非公式ではあるが便利な用語「通信モード」を使用して、Bluetooth LE が製品やアプリケーションで動作、使用されるさまざまな方法を説明します。

7つの通信モード

では、Bluetooth LEにはどのような通信モードがあるのでしょうか？ このシリーズで使用する通信モードは次の7通りです。

1. **LE-ACL** - 非同期接続指向論理トランスポート
2. **ADVBL** - アドバタイズメントブロードキャスト(レガシーアドバタイズメント)
3. **ADVBE** - アドバタイズメントブロードキャスト(拡張アドバタイズメント)
4. **PADV** - 定期アドバタイズメント
5. **PAWR** - 応答付き定期アドバタイズメント
6. **ISO** - アイソクロナス通信
7. **CS** - チャンネルサウンディング

技術的には、レガシーアドバタイズメントと拡張アドバタイズメントはどちらも、同じ論理トランスポートであるアドバタイズメントブロードキャスト(ADV)に属します。ただし、この2つには大きな違いがあるため、それらを異なる通信モードとして扱い、それぞれについて個別に説明します。

通信モードの比較(プロパティ)

あるBluetoothの通信モードが別の通信モードと異なる要因は何でしょうか？

Bluetooth LE 通信モードを比較するために使用できるプロパティがいくつかあります。各モードはもともと特定のクラスのアプリケーションを念頭に置いて設計されており、各モードが持つプロパティは、意図したアプリケーションの要件に由来します。

以下は、Bluetooth LE 通信モードを比較する際に考慮すべき重要なプロパティの一部です。

トポロジー

通信システムのトポロジーは、送信機と受信機の間を記述し、1対1 (1:1)、1対多 (1:m)、多対多 (m:m) の3つのいずれかになります。

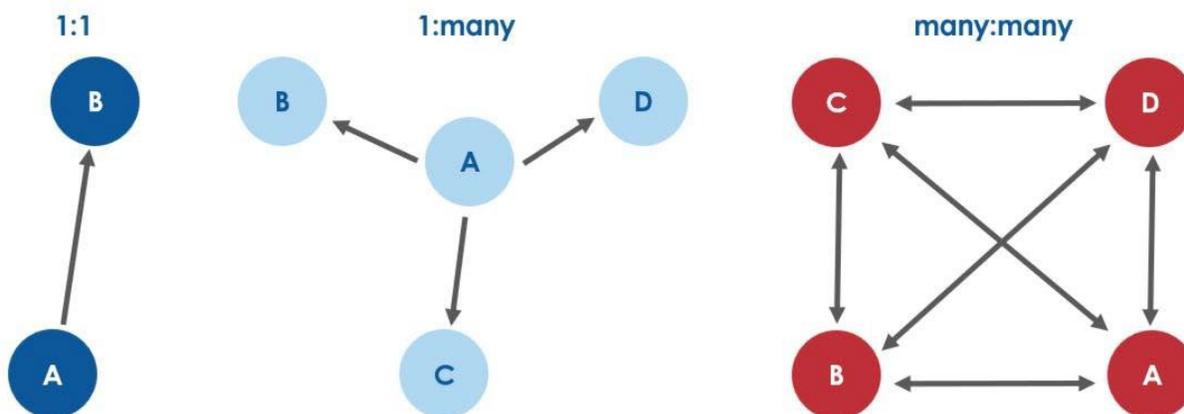


図1 通信トポロジー (簡略化)

送信機と受信機

通信システム内のデバイスは、送信のみ、受信のみ、または両方の役割を果たすことができます。そのため、特定の Bluetooth 通信モードを使用する 2つのデバイスの観点から見ると、1つのデバイスから別のデバイスへのパケットの送信は、一方向のみまたは双方向の場合があります。

アプリケーションデータの送信方向

アプリケーションデータは、Bluetooth LE通信モードの1つを使用して伝送されるペイロードです。一部のモードでは、デバイス間の一方向にのみ送信にアプリケーションデータを含めることができますが、他のモードでは、双方向へのアプリケーションデータの送信をサポートします。

接続型（コネクテッド）か、非接続型（コネクションレス）か？

各Bluetooth通信モードは、接続通信と非接続通信のいずれかに分類されます。接続通信は、デバイス同士が最初に特定のパラメータについて合意し、それによってその後のパケット交換の詳細が決まります。一方、非接続通信では事前の合意はなく、デバイスは互いにほぼ独立して送受信を行います。それぞれのアプローチには長所と短所があります。

データと時間

Bluetoothは、データと時間の関係を3つに分類します。仕様では、様々な通信モードに関連する部分で定義されています。

- **非同期**（アシンクロナス）通信 - データには時間的制限がなく、その送信スケジュールは他の考慮事項のみに基づいています。
- **同期**（シンクロナス）通信 - データ転送では、通常のタイムスロットと固定パケットサイズを使用するので、データレートは一定です。
- **等時**（アイソクロナス）通信 - 同期通信に似ていますが、データレートを一定にする必要はありません。Bluetooth アイソクロナス通信には、異なるデバイスによって異なる時間に受信したデータを同時に処理できるようにするさらなる機能が含まれています。

レシーバの同時実行

トポロジーは送信デバイスと受信デバイスの関係を幾何学的に定義しますが、受信側の同時実行性は、同じ送信パケットを正確に同時に受信できるデバイスの数を示します。たとえば、1対多のトポロジーでは、多くの受信デバイスのすべてが1つの送信デバイスからまったく同時にデータを受信できる場合や、送信デバイスが同じデータを含む一連のパケットを各受信デバイスに1つずつ順番の送信する場合があります。

次の3つのケースが考えられます。

- 一度に1つのデバイスが送信データを受信
- デバイスのサブセットが送信されたデータを同時に受信
- すべてのデバイスが送信されたデータを同時受信

無線チャネル

Bluetooth LE は、2.4 GHz帯の無線で動作します。各通信モードは、Bluetooth LEの無線帯域を複数のチャネルに分割し、それぞれが特定の幅を持ちます。そして、通信に使用するチャネルの選択方法や、それらを変更するタイミング決定には決まったアルゴリズムを使用します。全てではありませんが、ほとんどの通信モードでは、2 MHz幅のチャネル40個を用います。どのチャネルが、どのような目的で、どのように選択されるかは、モードによって異なります。

下の画像は、Ellisys Bluetooth アナライザ ソフトウェアのチャネルビューです。ここでは、Bluetooth LEチャネルの2MHz間隔と、アダプティブ周波数ホッピング(AFH)機能により通信が存在しない、または数が制限されている帯域が紫色のバーで確認できます。このケースでは、これらの紫色のエリアは重複しない3つのWi-Fiチャネル(1、6、および11)に相当します。Wi-Fiは、Bluetoothが動作するのと同じ2.4GHz帯域で動作します。分析対象のエリアの所要時間は約26秒で、記録の開始から約79秒後、アダプティブ交換が蔓延している接続シーケンスのかなり後に開始されることに注意してください（3つのアダプティブメントチャンネルにカウントされるパケットがないことに注意してください）。また、3つの重複しないWi-Fiチャネルが動作する帯域に対する3つのアダプティブメントチャンネルの帯域にも注意してください。

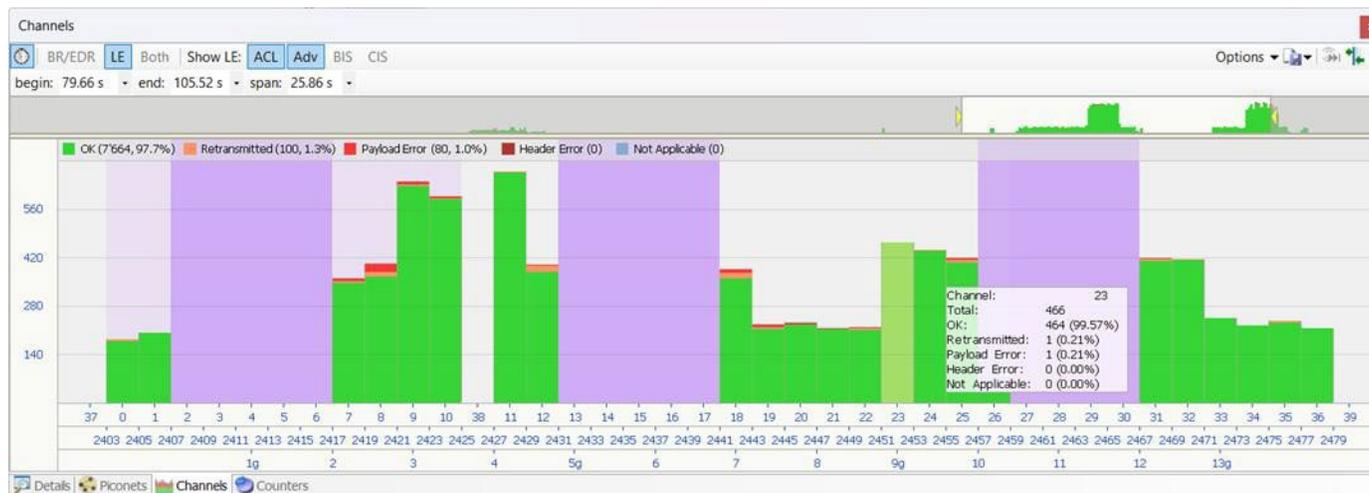


図2 Ellisys Bluetooth解析ソフトウェアのチャネルビュー

スケーラビリティ

スケーラビリティとは、パフォーマンスの特定の側面を最大化することであり、さまざまな方法で実現します。主な懸念事項として、送信されたデータを同時に受信できるデバイスの最大数である場合もあれば、アプリケーションデータのスループット レートがより重要である場合もあります。

Bluetooth PHYの選択

PHYは、Bluetooth コア仕様に記載されている用語です。これは、スタックの物理層を構成および使用する特定の手法の省略形です（厳密に言えば、あるケースでは、リンク層の処理に関連することもあります）。ここでは触れません）。

物理層の主な関心事の1つは、無線信号の特定の物理的特性をどのように利用して、情報を符号化伝送するかを定義することです。ただし、送信に情報がまったく含まれていない特殊なケースもあり、その場合はトーンと呼ばれます。

Bluetooth コア仕様では、**LE 1M**、**LE 2M**、**LE Coded**、**LE 2M 2BT** という名前のいくつかの PHY タイプが定義されています。主な違いには、シンボルの送信速度とエラー訂正に関するものです。シンボルは、デジタル世界におけるビットに相当するアナログ信号であることに注意してください。

- LE 1MとLE Coded はどちらも1メガシンボル/秒の速度で送信します。
- LE 2MとLE 2M 2BT はどちらも2メガシンボル/秒の速度で送信します。
- LE Coded のシンボル レートは1メガシンボル/秒ですが、パケットに特別なエラー訂正アルゴリズムを適用することで伝送範囲を拡大できます。
- LE 2M 2BT は、チャンネルサウンディング用に特別に設計されています。

通信モードの比較 (例)

Bluetooth 通信の様々な通信モードを紹介する入門記事も終盤ですので、最も一般的に使用される2つのモード、非同期接続型の論理トランスポート (LE-ACL) とアダプタイジングブロードキャスト (レガシー アダプタイジング) (ADVBL) を簡単に比較します。

LE-ACL - 非同期接続型の論理トランスポート

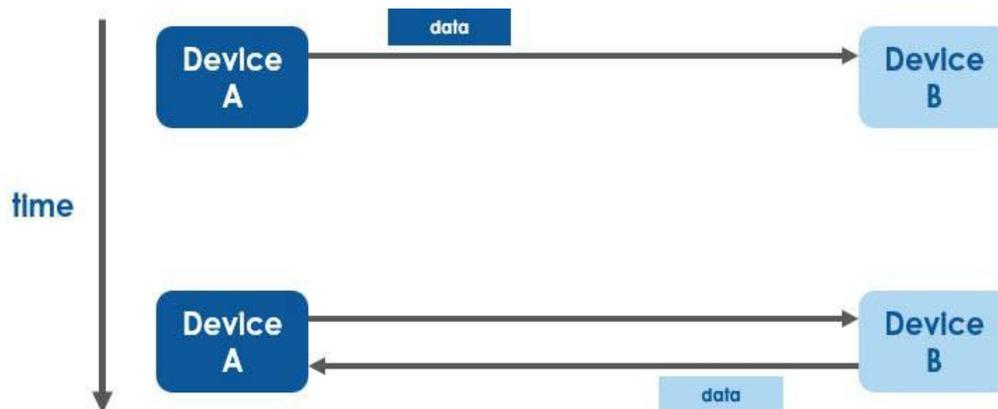


図3 LE-ACL 通信

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2MHz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1 LE-ACL のプロパティ

ADVBL - アドバタイズメントブロードキャスト(レガシーアドバタイズメント)

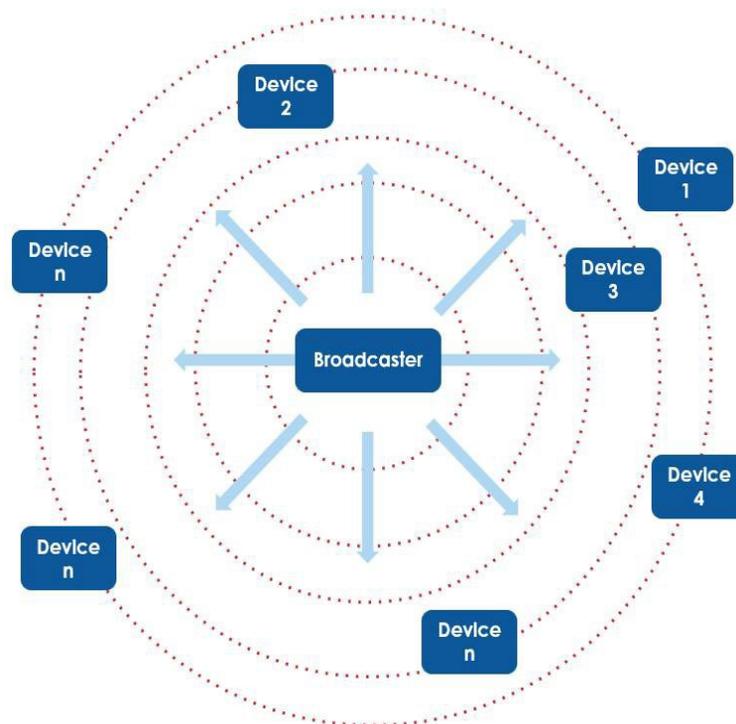


図4 ADVBL 通信の例

プロパティ	コメント
トポロジー	1 対多 (1:m)
トポロジー	<p>レガシー アドバタイズメントは、さまざまな方法で動作します。1つのデバイスがアドバタイズメントパケットのメインの送信機は、このシリーズの後の記事では、ブロードキャスターまたはセントラルデバイスと記載されません。ブロードキャスター/セントラルデバイスはアドバタイズメントパケットのみを送信し、範囲内の他のデバイスはこれらのパケットを受信しても送信しないことがあります。</p> <p>また、ブロードキャスター/セントラルデバイスがパケットを送信し、それを受信したデバイスがブロードキャスター/セントラルデバイスを受信できる応答として独自のパケットを送信することもあります。</p>
送信と受信	アプリケーションデータは、他のデバイスを受信するブロードキャスター/セントラルデバイスでのみ送信できます。これらのデバイスは、アプリケーションデータを含まないタイプのパケットを送信できる場合がありますが、アプリケーション層データを反対方向に送り返すことはできません。
アプリケーションデータの方向	非接続型
接続型/非接続型	非同期
データと時間	このBluetooth通信モードの仕組みに関して、ブロードキャスター/セントラルデバイスから送信されるアプリケーションデータを含むパケットを受信できるデバイスの数に制限はありません。しかし、送信デバイスの範囲内にある物理空間に別のデバイスを詰め込むことがある時点で不可能になるため、最終的には限界に達します。
レシーバの同時受信	2.4 GHz 無線帯域の 40 の 2 MHz チャンネルのうち、3 つがプライマリアドバタイズチャンネルに指定されています。これらのチャンネルはインデックス番号37、38、39 で参照されます。アドバタイズメントデバイスは、これらの特別なチャンネルの1つ、2つ、または3つすべてを使用できます。
無線チャンネル	Receiver Concurrency プロパティに従って、レガシーアドバタイズメントを使用してデータを送信できるデバイスの数に制限はありません。アプリケーションデータのスループットは、特定のパラメータを設定することで向上できますが、ADVBL パケットのサイズが小さいため、常にある程度の制限があります。
スケーラビリティ	レガシーアドバタイズメントでは、シンボルレートが毎秒1メガシンボルのLE 1M PHY のみを使用できます。

表2 ADVBL のプロパティ

キャプチャ、分析、解決、学習

Bluetoothは、さまざまな通信モードを持っているので、驚くほど広い用途に使用できます。しかし、Bluetooth Core Specification v6.0 は 3,800 ページ以上あり、少し複雑であると言えます。

Ellisys の Bluetooth プロトコルアナライザを使用すると、無線の packets を可視化できます。スタックのさまざまなレイヤーから自動的にデコードされたプロトコルを明確に表示することで、デバイスの通信状況を迅速に理解することができます。問題解決の目的において、代替品はありません。Ellisys システムは、Bluetooth コア仕様のドラフト段階からチェックします。



Ellisysプロトコルアナライザは、Bluetoothエンジニアにとって必須のツールです。

次回シリーズ

このシリーズの次の記事では、LE-ACL 通信モードについて詳しく見ていきます。