

Bluetooth® LEの多様な通信モード

PAwR — レスpons付き定期 アドバタイジング



導入

Bluetoothの世界では、アドバタイジングという用語はさまざまな通信モードの集合を指しますが、そのすべてに特定の共通点があります。アドバタイジングには、コネクションレス通信とパケットの繰り返し送信が伴います。通常、アドバタイジングデバイスはパケットをブロードキャストして、複数の受信デバイスが利用できるようにします。通常、アドバタイジングパケット内のアプリケーションデータは、めったに変化しないか、まったく変化しません。

*extended advertising*は、*Bluetooth Core Specification* のバージョン 5.0 で初めて登場した用語です。これは、*Bluetooth Low Energy (LE)* の最初のバージョンで定義され、現在は*legacy advertising*として知られている元のアドバタイジング機能よりも高度なアドバタイジングの形式について説明します。

*extended advertising*を*legacy advertising*よりも高度なものにする特質の 1 つは、より多くの無線チャネルが使用されるという事実です。より大きなアプリケーションデータ ペイロードもサポートされます。

さまざまな Bluetooth 通信モードは、より正式には論理トランスポートと呼ばれます。通信モードのいくつかには、コネクションレス型のアドバタイジング機能が必要です。このシリーズのこれまでの記事では、従来の形式と拡張形式の両方でのアドバタイジングブロードキャスト論理トランスポート (ADVB) と、定期アドバタイジング (PADVB) 論理トランスポートについて説明しました。

この記事では、最新の Bluetooth LE 論理トランスポートである、略して PAwRとして知られるレスpons付き定期アドバタイジングに注目します。

注意: 本記事をお読みになる前に、本シリーズのこれまでの記事を先にご覧いただくことをお勧めします。

レスpons付き定期アドバタイジングを理解する

このシリーズの前回の記事で説明したように、定期アドバタイジング (つまり、PADVB 論理トランスポート) は、Broadcaster がアドバタイジングパケットを送信する、固定レートの定期的なイベント スケジュールによって特徴付けられます。Observer は、Broadcaster のスケジュールの詳細を取得し、スキャンアクティビティをそれに同期させることができます。

PAwR論理トランスポートは、これらの基本的な特性を共有していますが、満たされていない非常に基本的なニーズを満たすように設計されています。

PADVBまでに。PAwRは、Broadcaster と、潜在的に非常に多くの他のデバイスとの間のアプリケーションデータの双方向交換をサポートしますが、PADVB は、Broadcaster から Observer への一方向でのアプリケーションデータの送信のみをサポートします。

PAwRは、アプリケーションデータの双方向通信をサポートする唯一の論理トランスポートではありません。デバイスは LE-ACL接続を介して双方向のアプリケーションデータ通信を実行することもできますが、デバイスがサポートする同時接続数は 4 つまでであるのが一般的です。対照的に、PAwRは数千のデバイスとの双方向通信をサポートできます。

注意: 定期アドバタイジング(PADVB)は、新しい方式であるレスポンス付き定期アドバタイジング(PAwR: Periodic Advertising *with Responses*)と区別するために、レスポンスなし定期アドバタイジング(Periodic Advertising *without Responses*)と呼ばれることがあります。

PAwR論理トランスポートを開発する主な動機は、電子棚ラベル (ESL) として知られるタイプの製品に標準ベースの Bluetooth トランスポートを提供することでした。しかし、適切に設計された通信スタックなら当然のことですが、PAwR論理トランスポートは決して ESL に結合されておらず、将来的にはさまざまなアプリケーションをサポートする汎用トランスポートです。しかし、PAwRを今日の形にしている多くの要件の源となったのは ESL です。ESL についてはセクション 4 で再度取り上げます。

概要

PAwRは、次の点で PADVB と似ています。

1. Broadcaster のパケット送信は、定期的かつ不変の定期スケジュールによって管理されます。
2. Observerデバイスは、Broadcaster のスケジュールを取得し、自身のアクティビティをそれに同期させることができます。
3. 一般的な通信トポロジは 1 対多として説明できます。
4. 通信方式はコネクションレス型です。PAwRと

PADVB の主な違いは次のとおりです。

1. PAwRは双方向のアプリケーションデータ通信をサポートします
2. PAwRのスケジュール設定スキームは、PADVB アドバタイジングトレインのスケジュール設定スキームより複雑です
3. PAwRBroadcaster は、その Observer の 1 つとの接続を開始できます。PADVB にはこの機能がありません。
4. PAwRは、同期された Observer のサブセットとの通信を可能にします。
5. PAwRの設計は、アプリケーションデータ ペイロードが頻繁に変更されることを前

提としています。次のセクションでは、これらの点についてさらに詳しく説明します。

アドバタイジングモード

PAwRは 1 つのアドバタイジング モードでのみ使用できます。アドバタイジングは常にnon-connectableかつnon-scannableです。AdvMode には、これを示す値 0x00 が設定されます。

Link-Layer Packet	
Header	
PDU Type	ADV_EXT_IND
TxAdd	Random
Payload Length	13 bytes
Adv Mode	Non Connectable / Non Scannable
Extended Header	
Flags	AdvA AdvDataInfo AuxPtr
Advertising Address	38:3F:6B:0A:6F:78 (Non-Resolvable)
Adv Data Info	
Advertising Data ID (DID)	0x846
Advertising Set ID (SID)	0x2
Auxiliary Packet Pointer	
LL Channel	32 (data) (RF 34, 2470 Mhz)
CA (Clock Accuracy)	0 ppm to 50 ppm
Offset Units	30 us
Auxiliary Offset	510 us [@12.425 029 875]
Auxiliary PHY	LE 2M

図1 ADV_EXT_INDパケットの内容 (Ellisys アナライザアプリケーション)

デバイスの役割

アドバタイジングデバイスは GAP Broadcasterルールを引き受け、アドバタイジングを受信するデバイスは GAP Observerルールを引き受けます。

状態

Link Layer は、以下の図 2 に示す形式的な状態遷移を定義します。

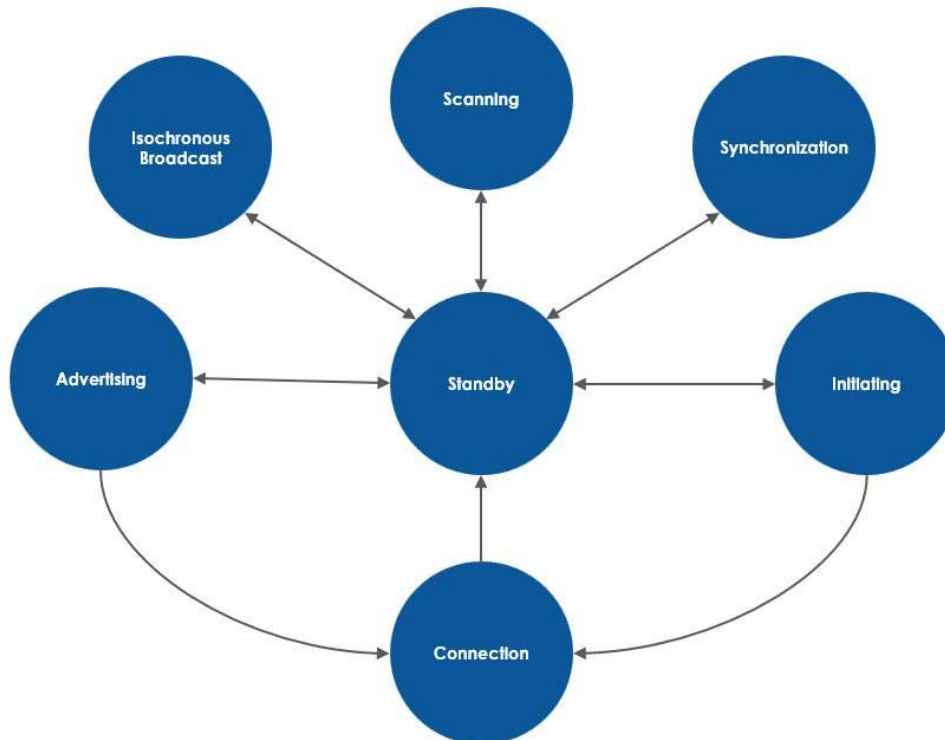


図2 Link Layerの状態遷移

同期状態は PAwRに関連しており、同期中と同期済みの 2 つのサブ状態があります。これらを図 3 に示します。

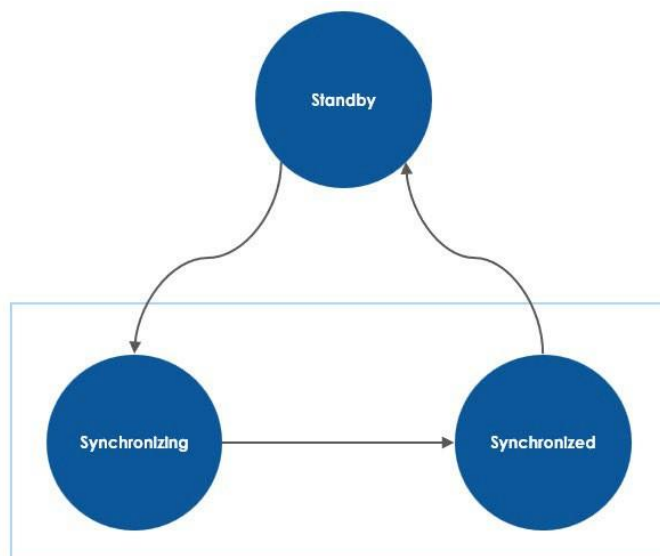


図3 Synchronizationのサブ状態

Observerデバイスは、PAwRアドバタイジングデバイスのスケジュールに関する情報を取得でき、それが完了すると、ホストはコントローラーに同期状態に入るように指示できます。PAwRBroadcasterから PDU を受信すると、コントローラーの状態は同期済みに変わります。

パケット、PDU、および無線チャネル

PDUとその関係

Broadcaster デバイスは通常、AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU を送信します。場合によっては、AUX_CONNECT_REQ PDU を送信して、Observerデバイスの 1 つとの LE-ACL接続の確立を開始することがあります。

Broadcaster の送信スケジュールと PAwRアドバタイジングトレインのその他のパラメータは、同等のパラメータが PADVB アドバタイジングトレインに対して公開されるのと同様方法で、AUX_ADV_IND PDU で公開されます。ただし、PAwRには追加のパラメータがあり、これらの追加パラメータの公開に対応するために、追加のコントローラー アドバタイジング データ (ACAD) フィールドと同期情報フィールドが使用されます。

図4 は、Broadcaster によって送信される PDU を示しています。

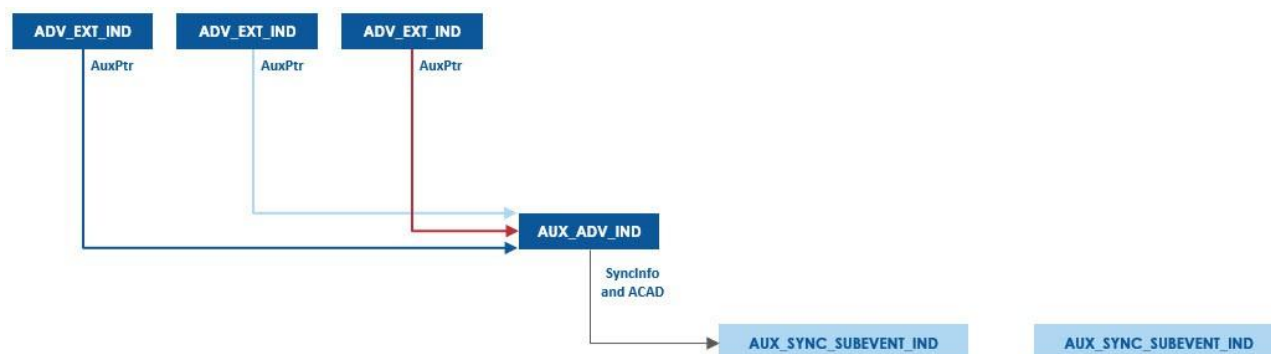


図 4 PAwRの Broadcaster によって送信される主な PDU タイプ

図 5 は、AUX_ADV_IND パケット (Ellisys Bluetooth アナライザアプリケーション) 内の Sync Info フィールドに続く ACAD フィールドを示しています。これらのフィールド (およびそのサブフィールド) については、以下の「スケジューリング」セクションと「スキャナ同期」セクション、および「Ellisys Bluetooth アナライザの活用例」セクションで詳しく説明します。

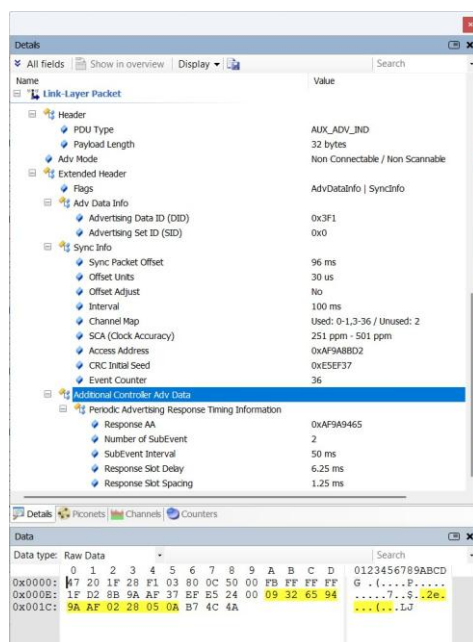


図 5 AUX_ADV_IND の同期情報フィールドと ACAD フィールド (ACAD が強調表示されている)

Observer は、AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU への応答として AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU を送信することができます。これらの応答PDU は、Broadcaster によって受信され、処理されます。

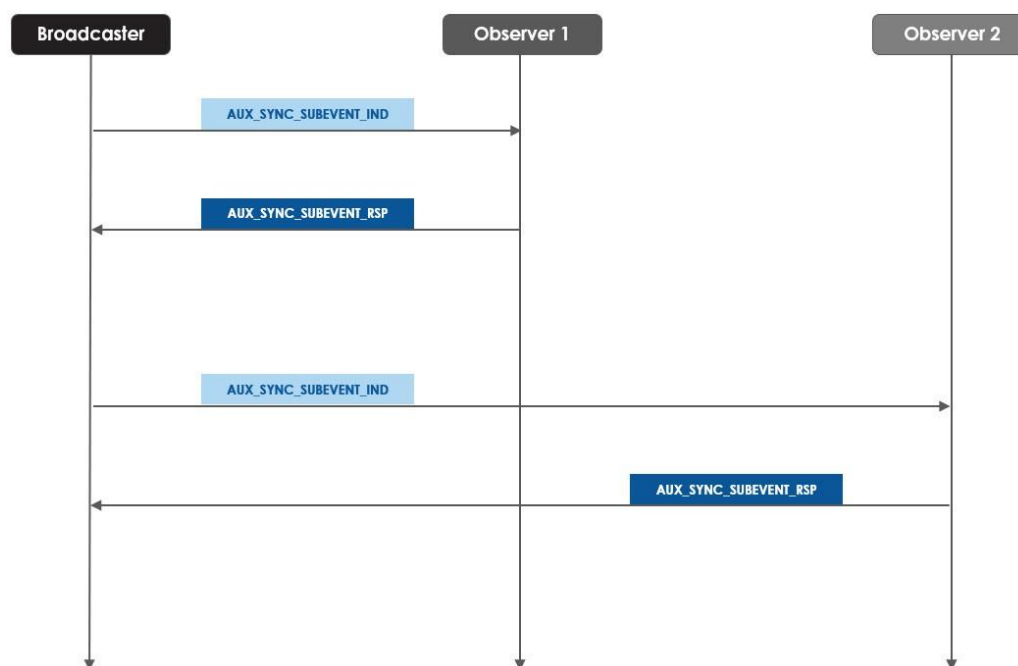


図 6 Observers による応答PDU の送信

無線チャンネル

応答のない定期アドバタイジング (PADVB) と同様に、PAwRは 37 個の汎用チャンネルを使用します。チャンネルはチャンネル選択アルゴリズム #2 (CSA #2) を使用して選択され、応答PDU は、対応する AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU が受信されたのと同じチャンネル上の Observers によって送信されます。

ADV extended advertising通信モードは、同期情報を含む PAwRパラメータを公開するために使用され、これは 40 の Bluetooth LE チャンネルすべてを使用します。

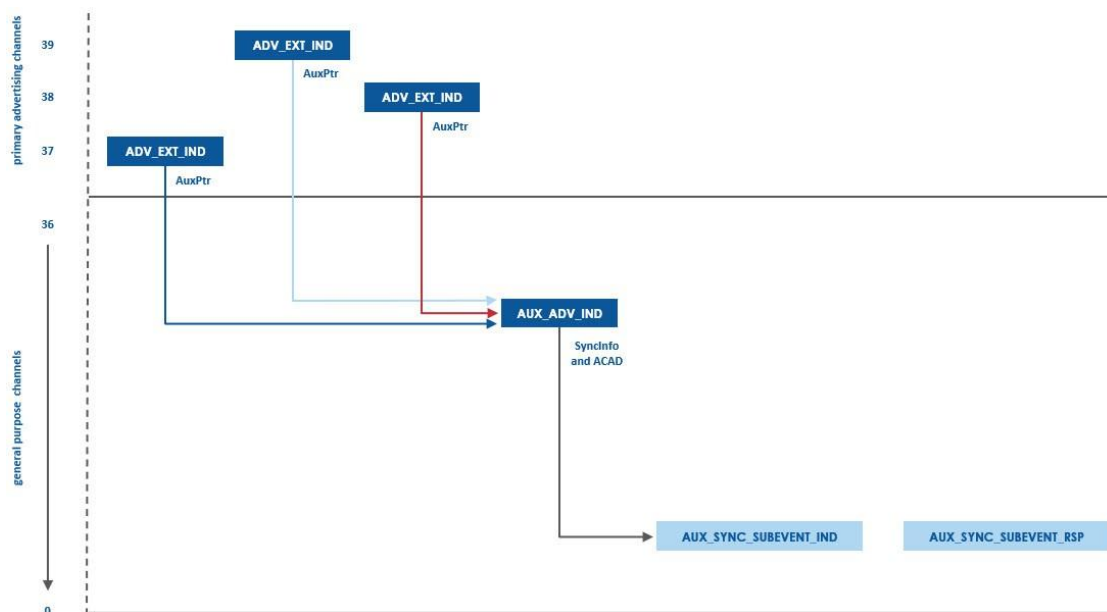


図 7 - PAwR(および ADVBE) 無線チャンネルの使用

スケジュール設定

スケジュールの目的で、PAwRは時間を一連のイベント、サブイベント、および応答スロットに分割します。PAwRイベントは、定期アドバタイジング間隔ミリ秒ごとに開始されます。

イベントはいくつかのサブイベントに分割され、これは最大値 128 の num subevents と呼ばれるパラメータで指定されます。

サブイベントはイベントと同時に開始され、その後サブイベント間隔ミリ秒ごとに開始されます。CSA #2 を使用したチャンネル選択は、各サブイベントの前に行われます。

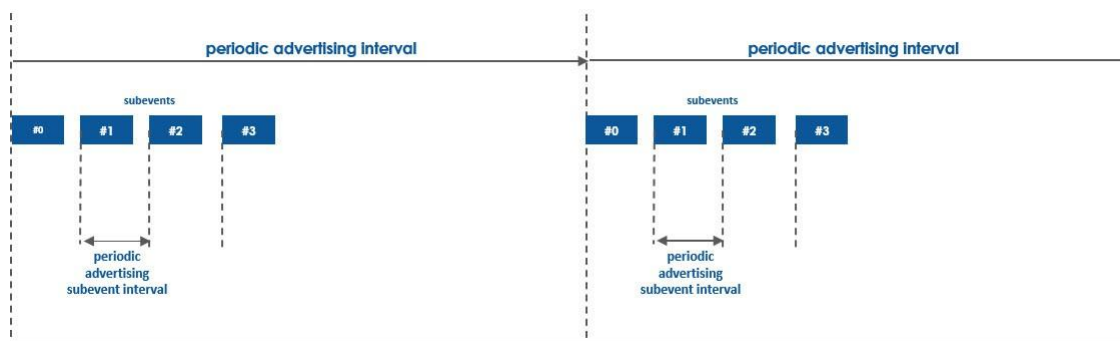


図 8 サブイベント数 = 4 の PAwRイベント内の PAwRサブイベントのスケジュール

各サブイベントは、Broadcaster によってパケットを送信できるタイムスロット、その後に応答スロット遅延と呼ばれる遅延、そして Observer が応答PDU の送信に使用できる多数のタイムスロットで構成されます。応答スロットは、応答スロット間隔と呼ばれるパラメータによってタイムラインに沿って配置されます。図 9 は、PAwRサブイベントの構造を示しています。

Observer は、応答PDU を含むパケットで特定のアクセス アドレスを使用する必要があります。使用される値は、RspAA という同期パラメータで指定されます。

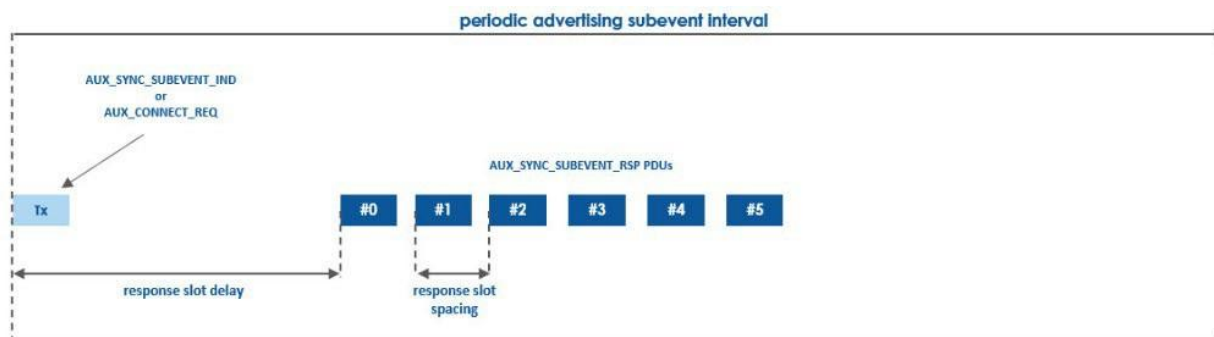


図 9 PAwRサブイベントの構造。

スキャナの同期

ブロードキャスト同期情報

応答付きの定期アドバタイジングメントは、応答なしの定期アドバタイジングメントと同じ方法でスキャナ同期のほとんどの側面に対処します¹。

AUX_ADV_IND PDU の SyncInfo フィールドには、パケットの最初のビットを基準としたオフセット時間の計算を可能にするサブフィールドが含まれており、これは次の PAwRイベントがいつ開始されるかを示します。

定期アドバタイジング間隔、チャネル マップ、および定期的なイベント カウンタも SyncInfo フィールドにあります。PAwRが必要とするその他のパラメータは、Common Extended Advertising Payload Format (CEAPF) によって定義される別のフィールドである ACAD フィールドで公開されます。

以下の表 1 は、パラメータと、それらが同期中に存在する場所をまとめたものです。

¹ この情報を確認するには、定期アドバタイジングに関する記事 (PADVB) を参照してください。

パラメータ	含まれる場所	説明
Offset Base、Offset Units、Offset Adjust	SyncInfo	これらのフィールドを使用すると、スキャナは現在のパケットの最初のビットが受信された時間を基準としたオフセット時間を計算できます。これは、次の PAwR イベントがいつ開始されるかを示します。
定期アドバタイジング間隔	SyncInfo	PAwR イベントが開始される頻度を定義します。
ChM	SyncInfo	これは、PAwR で使用されるチャンネル マップです。これは、ビット位置に対応するインデックスを持つチャンネルが使用されているか未使用かを示すビット値を持つビットマップの形式をとります。
periodic event counter	SyncInfo	これは 16 ビットのカウンター フィールドで、定期アドバタイジング間隔ごとに増分され、0xFFFF に達するとゼロに戻ります。これは CSA#2 アルゴリズムで使用され、現在の値をスキャンデバイスと共有することで、スキャンデバイスがチャンネル インデックスの選択をアドバタイジングデバイスによって選択されたものと同期できるようになります。
サブイベント数	ACAD	イベントごとの PAwR サブイベントの数を定義します。
サブイベント間隔	ACAD	PAwR サブイベントの開始間の経過時間を示します。
応答スロット遅延	ACAD	サブイベントの開始から最初の応答スロットの開始までの経過時間を指定します。
応答スロットの間隔	ACAD	隣接する応答スロットの開始間の経過時間を示します。
RspAA	ACAD	応答 PDU を含むパケットで使用する必要があるアクセス アドレス。

表 1 PAwR 同期パラメータ

ACAD フィールドには、AD Types² にパッケージ化されたデータが含まれます。PAwR パラメータの場合、定期アドバタイジング応答タイミング情報 AD タイプが定義されます。

PAST

Periodic Advertising Sync Transfer (PAST) Link Layer プロシーダを使用すると、LE-ACL 接続を介して PAwR 同期を Observer デバイスに渡すことができます。

応答のない定期アドバタイジングでは、LL_PERIODIC_SYNC_IND PDU を使用して、接続経由で同期パラメータを送信します。ただし、PAwR は LL_PERIODIC_SYNC_WR_IND PDU を使用します。LL_PERIODIC_SYNC_WR_IND PDU には、LL_PERIODIC_SYNC_IND PDU とすべて同じフィールドに加えて、定期アドバタイジング応答タイミング情報 AD タイプによって定義されたフィールドを含めることができます。

アプリケーション層と同期

SyncInfo および ACAD フィールドのデータブロードキャスト、または PAST プロシーダを使用して共有されたデータは、PAwR Observer デバイスに必要なすべての同期情報を提供するわけではなく、未解決の疑問が残ります。たとえば、デバイスはすべてのサブイベント、一部のサブイベント、または 1 つの特定のサブイベントのみをスキャンできますが、これらのオプションのどちらが適用されるかは、2 つの同期方法のいずれを使用しても示されません。これにどのように対処するかについては、以下の「アプリケーションの問題」セクションで説明します。

ApplicationConcernsApplicationConcerns

²AD Types は legacy advertising 記事で紹介されています。

時計の精度

AuxPtr フィールドと SyncInfo フィールドは両方とも、Observer が関連するパケットをスキャンするタイミングを示すオフセット時間値を提供します。すべてのデバイスには、そのようなイベントにタイマーを使用できる内部クロックがあります。ただし、すべてのクロックにはある程度の不正確性があるため、考えられる誤差の範囲を百万分率 (ppm) 単位で表した Broadcaster のクロックの精度の指標が両方のフィールドに含まれます。

Physical Layer

AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU を含む、汎用チャネルで送信される extended advertising PDUs は、LE 1M、LE 2M、または LE Coded PHY を使用できます。

AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU は、SyncInfo フィールドを介してそれらを指す AUX_ADV_IND PDU と同じ PHY を使用する必要があります。

アプリケーションに関する懸念事項

構成

通常、アプリケーションは API を使用して定期アドバタイジングを構成し、有効にします。このような API は、定期アドバタイジング、同期、スキャンに関連する一連のコマンドとイベントを提供する Host Controller Interface (HCI) に依存します。

API ドキュメントを確認して、関連するプラットフォームの適切な詳細を確立する必要があります。

Broadcaster

PAwR用の Broadcaster の構成には、PADVB の構成に使用した手順と同様の手順が含まれます。ただし、アプリケーションデータは初期構成中には提供されません。追加のパラメータも必要です。

重要なのは、LE Set Periodic Advertising Parameters コマンドの Num_Subevents パラメータが 0 より大きい場合、PADVB ではなく PAwRが使用され、この場合、コマンドでは Subevent_Interval、Response_Slot_Delay、Response_Slot_Spacing、および Num_Response_Slots パラメータにも値を指定する必要があります。

Observer

PAwRObserver の構成には、同期する PAwRサブイベントまたはサブイベントをコントローラーに示すことが含まれている必要があります。これは、1 つ以上のサブイベント番号の配列を指定できる LE Set Periodic Sync Subevent HCI コマンドを使用して実行されます。ただし、どのサブイベントと同期するかを決定する基準は、アプリケーション層に関係します。

アプリケーションデータ

Broadcaster

PAwRは、アプリケーションデータがサブイベントごとに変更されることを想定して設計されています。これは必ずしもそうである必要はなく、アプリケーションごとに異なります。ただし、このアイデアに対応するために、コントローラーは LE 定期アドバタイジングサブイベント データ要求 HCI イベントを送信することで、将来の一連のサブイベントのアプリケーションデータをホストに定期的に要求します。Bluetooth Core Specification では、コントローラーが使用可能なメモリがある限り多くのデータを要求することを推奨しています。これにより、コントローラーは常に大量のアプリケーションデータのキャッシュを準備でき、HCI の交換が削減されます。

ホストは、LE Set Periodic Advertising Subevent Data コマンドを使用して、AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU で使用するデータをコントローラーに送信します。

Observer

Observer は、応答スロットで使用するアプリケーションデータをコントローラーに提供する必要があります。これは、LE Set Periodic Advertising Response Data HCI コマンドを使用して行われます。

信頼性

PAwRは、信頼性に関して応答のない定期アドバタイジングと同じ特性を共有します。コネクションレス型で、チャンネル選択アルゴリズム #2 で 37 個の汎用チャンネルをすべて使用し、トランスポート層の確認応答システムはありません。

ただし、アプリケーション層は応答PDU に基づいた単純な確認応答システムを実装することができるため、この点で PAwRは PADVB よりも信頼性の高い 1 対多のトランスポートを提供します。

エネルギー効率

PAwRは、エネルギー効率が高く、それを使用するタイプの製品が文字通り何年もコイン型電池で動作できるように設計されています。

PAwRのエネルギー効率の鍵となるのは次の 2 つの要素です。

1. Observer は短いサブイベント中にスキャンしますが、アプリケーション層のロジックによっては 1 つのサブイベント中にのみスキャンされることがよくあります。スキャンに費やす時間を最小限に抑えることで、使用する必要のあるエネルギーが大幅に削減されます。
2. スキャンするサブイベントを選択するための基礎は、アプリケーション層ロジックに基づいています。その結果、Observer が受信したデータがそれに関連する可能性が高くなります。

安全

暗号化されたアドバタイジングは、アプリケーションデータの機密性を保護するために PAwRとともに使用できます。PAwRは匿名であり、PDUにはアドバタイジング主のアドレスが含まれていないため、PAwRに参与している Broadcaster デバイスの追跡は、デバイスの Bluetooth アドレスを使用して行うことはできません。

送信中のデータの静的で明確なパターンは、デバイスを追跡するための基礎となる可能性があります。PAwRは頻繁に変更されるアプリケーションデータ ペイロードを転送する可能性が高いため、この可能性を自動的に回避できます。

レイテンシ

PAwRは、各サブイベントの新しいアプリケーションデータに対応する機能を備えており、メッセージング トランスポートのすべての外観を備えています。ただし、間隔、イベント、サブイベントを含むスケジューリング システムは、アプリケーション層でのユースケースの開始から、結果として生じるすべてのデータの送信までにかかる時間を意味する可能性がある Bluetooth® LE の多様な通信モード | | 第 6 章 : PAwR レスpons付き定期アドバタイジング

ことに注意することが重要です。

AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU とすべての応答の受信には、構成値によっては数十秒かかる場合があります。PAwRは、リアルタイムまたはほぼリアルタイムのメッセージング アプリケーションを目的としたものではありません。

電子棚札

概要

電子棚ラベル (ESL) は大規模な小売店で使用され、その名前が示すように、通常は棚に並べられる、販売中の商品のラベルとして機能します。通常、テキストだけでなく画像も表示できるディスプレイがあり、通常は 1 つ以上の色の LED があり、場合によってはセンサーが付いています。



図 10 典型的な電子棚ラベル

ESL はワイヤレス通信をサポートします。歴史的には、独自の 2.4 GHz プロトコルが使用される傾向がありましたが、2023 年に Bluetooth Core Specification v5.4 がリリースされるのと同時に、電子棚ラベル プロファイル仕様もリリースされ、ESL 製品の標準化への道が開かれました。

ESL プロファイルは、ハブ/スポークを中心に設計されており、中心にアクセスポイント (AP) と呼ばれる単一のデバイスを備えた 1 対多のトポロジで、数千の数に達する可能性がある ESL デバイスと通信します。AP は、表示される画像の変更、LED の有効化または無効化、センサー値の要求などのコマンドを ESL に送信できます。

PAwRは、ほとんどの AP および ESL 通信の論理トランスポートとして使用されます。AP は、AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU のペイロードで ESL コマンドを送信します。ESL は ESL 応答メッセージを AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU で送信します。

場合によっては、AP は AUX_CONNECT_REQ PDU を送信して ESL に接続し、イメージファイルのアップロードなど、LE-ACL接続に依存する定義された操作を実行します。

ESL と PAwR

ESLアドレス

初期セットアップ中に、各 ESL には、AP の ESL ネットワーク内で一意のアドレスが割り当てられます。アドレスは 2 つの部分で構成されます。

- 8ビットのESL識別子
- 7ビットのグループID

このことから、単一の AP によって制御される ESL のネットワークは最大 128 のグループで構成され、各グループには最大 255 の ESL を含めることができると結論付けることができます。したがって、合計 32,640 の ESL が、単一の AP を中心とする ESL ネットワークのメンバーになることができます。

ESL と PAwR サブイベント

ESL グループ ID には重要な役割があります。これは、どの PAwR サブイベントをリッスンするかを ESL に示すグループ ID です。

そのため、同じグループ内のすべての ESL は同じ PAwR サブイベント中にリッスンするため、AP によってブロードキャストされた同じ AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU をすべて受信します。

ESL によって受信された AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU には、1 つ以上の ESL コマンドの配列が含まれています。各コマンドには ESL アドレスが含まれており、そのグループ ID 部分は PDU 内のすべてのコマンドで同じです。PDU を受信して ESL コマンドを抽出すると、ESL は各コマンドの ESL ID を自身の ID と照合してチェックし、ID が一致する場合にのみコマンドを実行します。

PAwR 応答スロットの割り当て

ESL コマンド配列内のコマンドのインデックス位置は、コマンドがアドレス指定される ESL によって使用される応答スロットの番号を示します。たとえば、ESL がコマンドのアドレスでその ID を見つけ、そのコマンドがコマンド配列の 2 番目にある（つまり、インデックス値が 1 である）場合、ESL は AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP 送信に PAwR 応答スロット #1 を使用します。

ESL と PAwR の同期

要約すると、ESL プロファイルは PAwR 同期を完了する方法を定義します。PAwR スケジューリング パラメータは、broadcast AUX_ADV_IND PDU から、または通常どおり PAST プロシージャを使用して取得されますが、各 ESL には、割り当てられたグループ ID によってリッスンするサブイベントが割り当てられ、応答スロットは ESL メッセージのコマンド配列内のコマンドの位置から動的に割り当てられます。

Ellisys Bluetooth アナライザの活用例

実際のデバイスで Ellisys Bluetooth アナライザシステムを使用すると、デバイス間で交換される PAwR PDUs をリアルタイムで確認できます。

一連のスクリーンショットは、定期アドバタイジング同期情報の通信に関与するパケットと PDUs、および関連する PAwR アドバタイジングトレイン自体の通信を追跡して追跡します。

Bluetooth 交換の生成には、2 つの Nordic Semiconductor nRF54L15 開発者ボードが使用されました。それぞれがサンプル Zephyr アプリケーションを実行しており、1 つは Broadcaster として機能し、もう 1 つは Observer として機能していました。Observer には、リッスンするサブイベント #0 が割り当てられ、そのサブイベント内では、AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU 送信に使用する応答スロット #0 が割り当てられます。サブイベントと応答スロットの割り当ては、LE-ACL 接続上の属性プロトコルを使用して、2 つのパラメータを 2 つの単一バイト値として GATT 特性に書き込むことによって行われます。これは、図 11 に示す Ellisys Bluetooth アナライザのスクリーンショットで確認できます。

Central: "test_ext_adv" D1:00:2D:79:94:DD (Static) <-> Peripheral: "PAwR sync sample" D9:5A:9B:E8:08:C4 (Static)		
ATT Write Transaction (12345678-1234-5678-1234-56789ABCDEF1: 00 00)	OK	2 bytes (00 00)
ATT Write Request Packet (12345678-1234-5678-1234-56789ABCDEF1: 00 00)	OK	2 bytes (00 00)
ATT Write Response Packet	OK	

図 11 LE-ACL を使用してサブイベント #0 と応答スロット #0 を割り当てるアプリケーション層

PAwR同期パラメータは、図 12 の AUX_ADV_IND PDU に示されています。

Link-Layer Packet	
Header	
PDU Type	AUX_ADV_IND
Payload Length	32 bytes
Adv Mode	Non Connectable / Non Scannable
Extended Header	
Flags	AdvDataInfo SyncInfo
Adv Data Info	
Advertising Data ID (DID)	0x600
Advertising Set ID (SID)	0x0
Sync Info	
Sync Packet Offset	0
Offset Units	30 us
Offset Adjust	No
Interval	5 s
Channel Map	Used: 0-36 / Unused: none
SCA (Clock Accuracy)	31 ppm - 50 ppm
Access Address	0x139AF0C7
CRC Initial Seed	0xF2D535
Event Counter	2
Additional Controller Adv Data	
Periodic Advertising Response Timing Information	
Response AA	0x2C4C1046
Number of SubEvent	5
SubEvent Interval	60 ms
Response Slot Delay	6.25 ms
Response Slot Spacing	10 ms

図 12 SyncInfo および ACAD を含む AUX_ADV_IND PA 応答タイミング情報

ここでは、定期アドバタイジング間隔が 5 秒に設定されていることがわかります。各周期イベントは 5 つのサブイベントで構成され、それぞれが 60 ミリ秒の間隔で配置されます。したがって、5 秒ごとに 5 つのサブイベント送信が連続してバーストされる必要があります。

このことは、図 13 に示すようにEllisys Bluetoothアナライザによって確認することができます。

AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	22.867 501 000
AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	22.873 750 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	22.927 499 000
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	22.987 496 750
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	23.047 494 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	23.107 492 500
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	27.867 323 125
AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	27.873 572 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	27.927 320 875
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	27.987 318 750
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	28.047 316 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	28.107 314 500
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	32.867 145 125
AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	32.873 394 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	32.927 143 000
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	32.987 140 750
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	33.047 138 625
AUX_SYNC_SUBEVENT_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	5 bytes (04 FF 59 00 01)	33.107 136 625

図 13 一連のサブイベントのブロードキャストと応答

図13 は、5 秒ごとに送信される 5 つの AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU のグループを示しています。これは、5 つのサブイベントが 5 秒ごと（定期アドバタイジング間隔）に発生していることの証拠です。

テスト シナリオは 1 つの Observer のみで構成され、サブイベント #0 と応答スロット #0 が割り当てられています。したがって、5 つの各グループの最初の AUX_SYNC_SUBEVENT_IND PDU の後に、最初の応答スロットで Observer によって送信される AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU が続きます。

Broadcaster が AdvData ペイロード フィールドで メーカー固有のデータ AD タイプを使用していることもわかります。これには、Nordic Semiconductor の 16 ビット企業 ID がリトル エンディアン形式 (0x5900) で含まれており、その後にハードコードされた値 0x01 が続きます。AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU は、同じ製造元固有のデータ AD タイプとその値を単純にエコー バックします。

通信モードのプロパティ

Bluetooth LE の多くの通信モードに関するこのシリーズの最初の記事では、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。以下は、レスポンス付きの定期アドバタイジングのプロパティの表です。

特性	説明
トポロジー	1対多 (1:m)
送信機と受信機	参加するすべてのデバイスが送信と受信の両方を行えます。
アプリケーションデータの送信方向	双方向。アプリケーションデータは、アドバタイジングデバイスからスキャンデバイスへ、またその逆方向にも送信できます。
接続型か、コネクションレスか？	コネクションレスだが協調的。
データと時間	非同期。
受信側の同時性	理論上、無制限の数のスキャンデバイスが同時に定期アドバタイジングパケットを受信できます。通常、デバイスはサブセットに分けられ、各サブセット内のすべてのデバイスが同時にパケットを受信します。
無線チャネル	37 の Bluetooth LE 汎用チャネルは PAwRによって使用されます。
スケーラビリティ	PAwRを使用すると、Broadcaster は理論上無制限の数のデバイスにデータを送信できるため、この点で PAwRは拡張性が高くなります。各サブイベントで Broadcaster に応答を送信できるのは 255 個を超える Observerデバイスだけです。 AUX_CHAIN_IND PDUs を使用した PDU チェーンは、PAwRでは許可されないため、イベントごとに送信できるアプリケーションデータの最大量は、応答のない定期アドバタイジングメントよりも小さくなります。
PHY の選択	AUX_SYNC_SUBEVENT_IND および AUX_SYNC_SUBEVENT_RSP PDU の送信では、LE 1M、LE 2M、または LE Coded のいずれかを使用しますが、選択された PHY は、関連付けられた AUX_ADV_IND PDU のものと一致する必要があります。

表 2 PAwRプロパティ

ご存じでしたか？

この記事の終わりに近づいたところで、定期アドバタイジングに関する一連の興味深く役立つ追加ポイントを、いくつかご紹介します。



PAwRを使用して、1 つの Observer、Observer の特定のサブセット、またはすべてにメッセージを送信できることをご存知ですか？

イベントレベルで同じ PAwRアドバタイジングトレインに同期される Observer がどのように特定のサブイベントに割り当てられ、同期されるかは、完全にアプリケーション層の問題です。これにより、多数のメッセージ指向の通信シナリオのトランスポートとして機能できる、非常に柔軟なシステムが実現します。アプリケーションに適切なプロファイル仕様が存在する場合は、それを使用することが常に最善であることに注意してください。



PAwRアドバタイジングトレイン内のパケットには、Constant Tone Extensionが含まれる場合があることをご存知ですか？

Constant Tone Extension (CTE) は Bluetooth direction finding systemで使用されるため、一部の PAwRアプリケーションでこのフィールドを含めると便利です。

シリーズ次回予告

この記事では、Bluetooth LE のレスポンス付き定期アドバタイジング (PAwR) 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、アイソクロナス通信について説明します。