

Bluetooth® LEの多様な通信モード

PADVB — 定期アドバタイジング



定期アドバタイジングを理解する

前回までの記事では、Advertising Broadcast (ADVB) Link Layer論理トランスポートの派生形である2つの通信モードを取り上げました。1つ目のlegacy advertising (ADVB_L)は、Bluetooth Low Energy (LE)の最初のバージョンでサポートされた、元祖にして唯一のアドバタイジング形態です。2つ目はextended advertisingと呼ばれます。

ただし「extended advertising」という用語は、ADVBだけでなく、Bluetooth LEの複数の論理トランスポートに関連する一連のアドバタイジング機能全体を指します。

注意: ADVB論理トランスポートとともに使用される場合、拡張アドバタイジング (Extended Advertising) は、本記事群ではADVB_Eと表記します。

ADVB_LとADVB_Eに共通しているのは、primary advertising channel上でのパケット送信スケジュールが不規則であり、ランダムな遅延値によって時間的に揺らがされることです。

extended advertisingは、さらに2つの論理トランスポート、periodic advertising broadcast (PADVB)とperiodic advertising with responses (PAWR)でも使われます。これらの論理トランスポートはいずれも規則的な送信スケジュールを持ち、スキャンデバイスがそのスケジュールを発見し、自身のスキャンを同期できる点が特徴です。

本記事では、periodic advertising (PADVB)に焦点を当てます。

注意: 本記事を読む前に、このシリーズの過去の記事である、レガシーアドバタイジング (ADVB_L) および拡張アドバタイジング (ADVB_E) に関する記事を先にお読みいただくことをお勧めします。

概要

extended advertisingは、Bluetooth Core SpecificationのV5.0で初めて導入されました。これは、現在legacy advertisingとして知られている方式に関するいくつかの課題に対応するためです。例えば次のような点です。

1. legacy advertisingでは3つのprimary advertising channelしか使用しないため、世界中でBluetoothデバイスが急増する中、それらのチャンネルが混雑し、ユーザー体験に悪影響を及ぼす懸念がありました。
2. legacy advertisingで運べるアプリケーションデータ量は、非常に小さいPDUやフィールドによって制約されます。
3. アドバタイジングデバイスとスキャナの送受信動作は、互いに独立していて協調されていないため、長所も短所もありますが、アプリケーションデータ転送速度の低下、データ到達信頼性の低下、エネルギー効率の悪化につながることがあります。

これらの課題のうち最初の2つは、すべてのextended advertising形態に共通する次の特性によって解決されます。

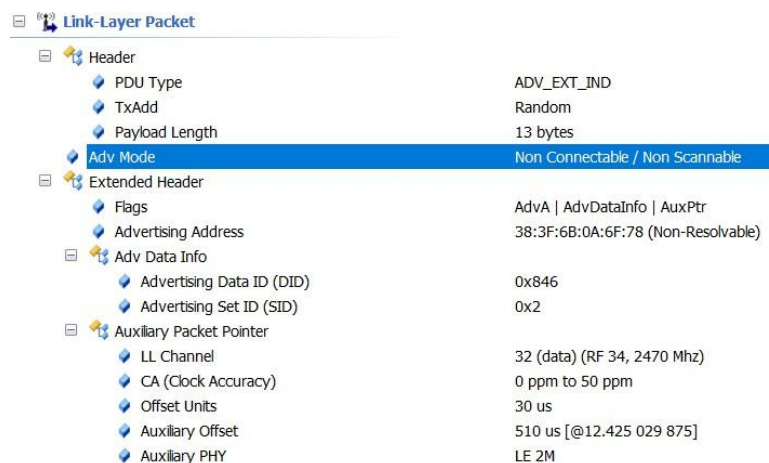
- 40本すべてのBluetooth LE無線チャンネルを利用します。
- アプリケーションデータを運ぶAdvDataフィールドは、legacy advertisingでの最大31バイトではなく最大254バイトを扱えます。さらに、大きなアプリケーションデータペイロードは、PDU chainingと呼ばれる仕組みにより複数の関連PDUへ分割して送信できます。また、アプリケーションデータの送信はすべて、3つのprimary advertising channelではなく37本の汎用チャンネルで行われます。

3つ目の課題は、periodic advertising broadcast (PADVB)とperiodic advertising with responses (PAWR)の両方で対処されています。

PADVBでは、PDUが変動のない一定の規則的スケジュールで送信されます。このスケジュールは、periodic advertising trainに関連付けられたAUX_ADV_IND PDU、またはPeriodic Advertising Sync Transfer (PAST)と呼ばれるLink Layer手順を使って接続経路で、スキャンデバイスが取得できます。定期アドバタイジングのスケジュールを取得すると、Observerデバイスは自身のスキャンスケジュールをこれに同期させ、アドバタイジング packets をより効率的かつ確実に受信できるようになります。

アドバタイジングモード

PADVBでは、他のextended advertising形態と同様に、アドバタイジングモードはAdvModeというフィールドで直接示されます。PADVBで許可されるアドバタイジングモードは、non-connectableかつnon-scannable undirectedのみであり、これはAdvModeフィールドで値0として表されます。



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パケットで強調表示されたAdv Mode (Ellisys アナライザアプリケーション)

デバイスの役割

定期アドバタイジングはnon-connectableかつnon-scannableでなければならないため、アドバタイジングデバイスはGAP *Broadcaster*ルールを担い、スキャンデバイスはGAP *Observer*ルールを担います。

状態

Link Layerは、以下の図2に示す正式な状態遷移を定義しています。

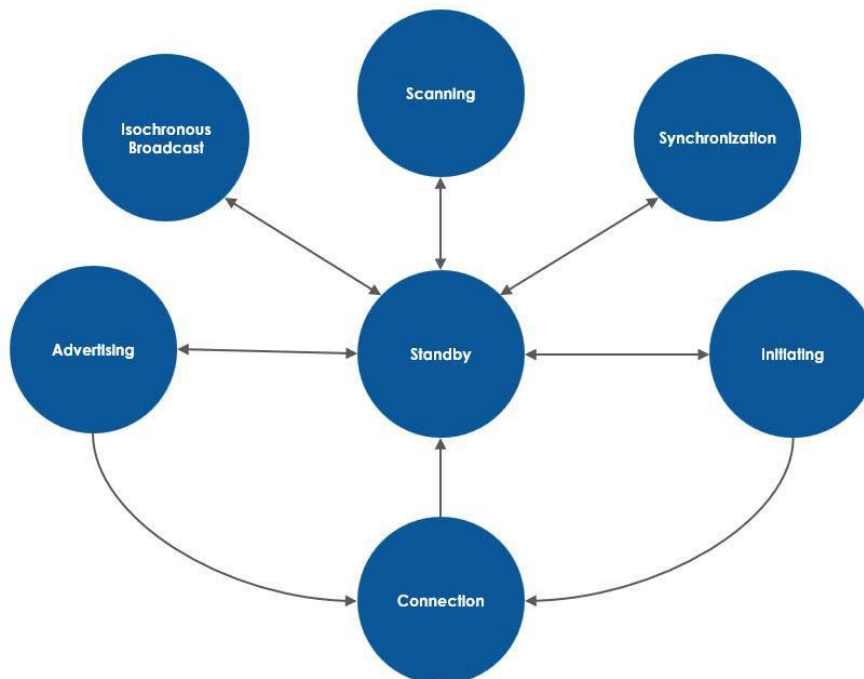


図2 Link Layerの状態遷移

Synchronization状態はPADVBに関係し、SynchronizingとSynchronizedという2つのサブ状態を持ちます。これらを以下の図3に示します。

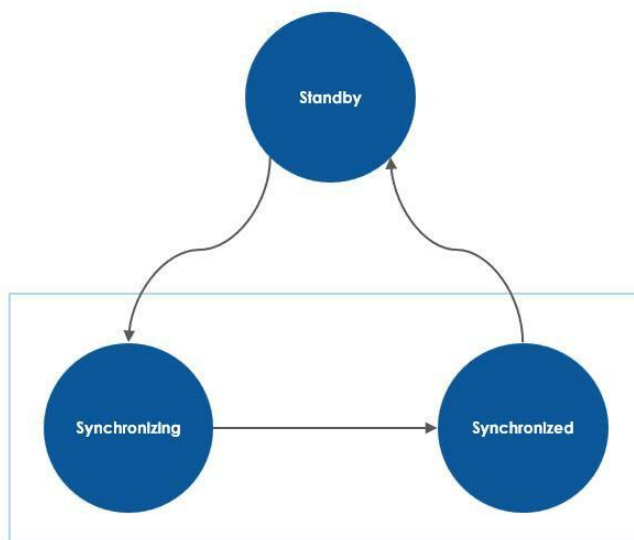


図3 Synchronizationのサブ状態

broadcastのAUX_ADV_INDパケット、または接続経由でアドバタイジングデバイスのスケジュール情報を取得すると、HostはControllerに対してSynchronizing状態へ入るよう指示できます。定期アドバタイジングbroadcastからPDUを1つ受信すると、状態はSynchronizedに変化します。

パケット、PDU、および無線チャネル

PDUとその関係

定期アドバタイジングでは、AUX_SYNC_IND PDUが規則的に送信されます。

AUX_ADV_IND PDUはADV_EXT_IND PDUの補助PDUであり、SyncInfoというフィールドを含めることができます。SyncInfoが存在する場合、関連するperiodic advertising trainのスケジュールを記述するデータが含まれます。

PADV_BはPDU chainingをサポートします。これは大きなペイロードを断片に分割し、AUX_CHAIN_IND型を含む一連の連結PDUで送信する仕組みです。このため、AUX_SYNC_IND PDUは補助のAUX_CHAIN_IND PDUを指し示すことができます。

したがって、PDUタイプ間の関係は図4のようになります。

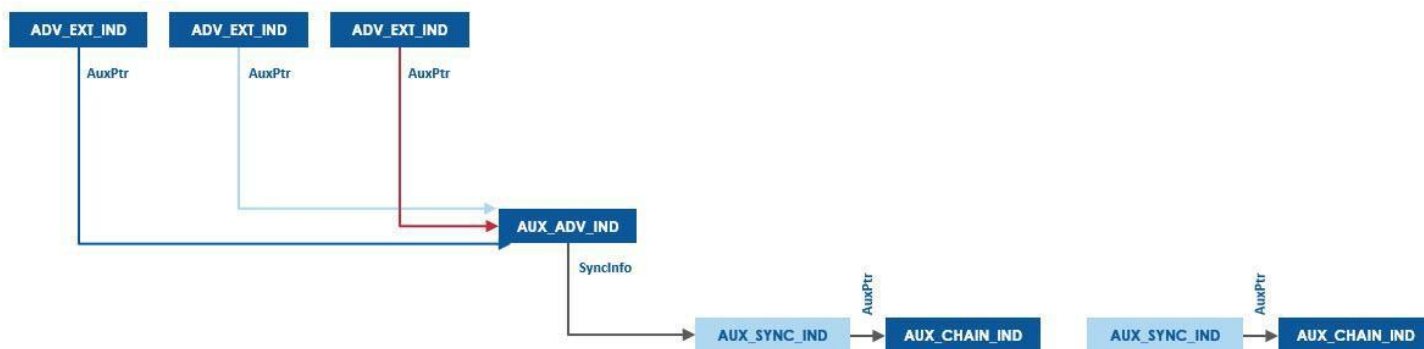


図4 定期アドバタイジングにおけるPDUタイプ間の関係

隣接するAUX_SYNC_IND PDUどうしは、AuxPtrフィールドでリンクされない点に注意してください。スキャンデバイスは一度SyncInfo内のデータを見つければ、その後は各定期アドバタイジングPDUを受信するために、適切な時刻と適切なチャネルでスキャンできます。AuxPtrは、上位のADV_EXT_IND PDUからAUX_ADV_IND PDUを見つけたり、上位のAUX_SYNC_IND PDUからAUX_CHAIN_IND PDUを見つけたりするような、補助パケットの位置特定にのみ使われます。

Link-Layer Packet	
Header	
PDU Type	AUX_ADV_IND
Payload Length	79 bytes
Adv Mode	Non Connectable / Non Scannable
Extended Header	
Flags	AdvDataInfo SyncInfo Adv Data
Adv Data Info	
Advertising Data ID (DID)	0xCC6
Advertising Set ID (SID)	0x0
Sync Info	
Sync Packet Offset	184.56 ms
Offset Units	30 us
Offset Adjust	No
Interval	440 ms
Channel Map	Used: 0-36 / Unused: none
SCA (Clock Accuracy)	31 ppm - 50 ppm
Access Address	0x4CB815BA
CRC Initial Seed	0xB05E4D
Event Counter	6'591

図5 Sync Infoフィールド詳細を含むAUX_ADV_INDパケット(抜粋)

無線チャンネル

AUX_SYNC_IND PDUによる定期アドバタイジング送信は、すべて37本のBluetooth LE汎用チャンネル上で行われます。

ただし図6に示すように、ADVBE extended advertisingは定期アドバタイジング同期情報の搬送に使用され、同じデータはLE-ACL接続経由でも送れますが、そのためには接続形成前にデバイス発見が完了している必要があります。したがって、定期アドバタイジング全体に関わる無線チャンネルを考える際に、これら2つの同期方法のいずれかを含めるなら、答えは40チャンネルすべてが使用される、となります。厳密に定期アドバタイジングtrainを構成するAUX_SYNC_IND PDUの送信だけに注目するなら、使われるのは汎用チャンネルのみです。

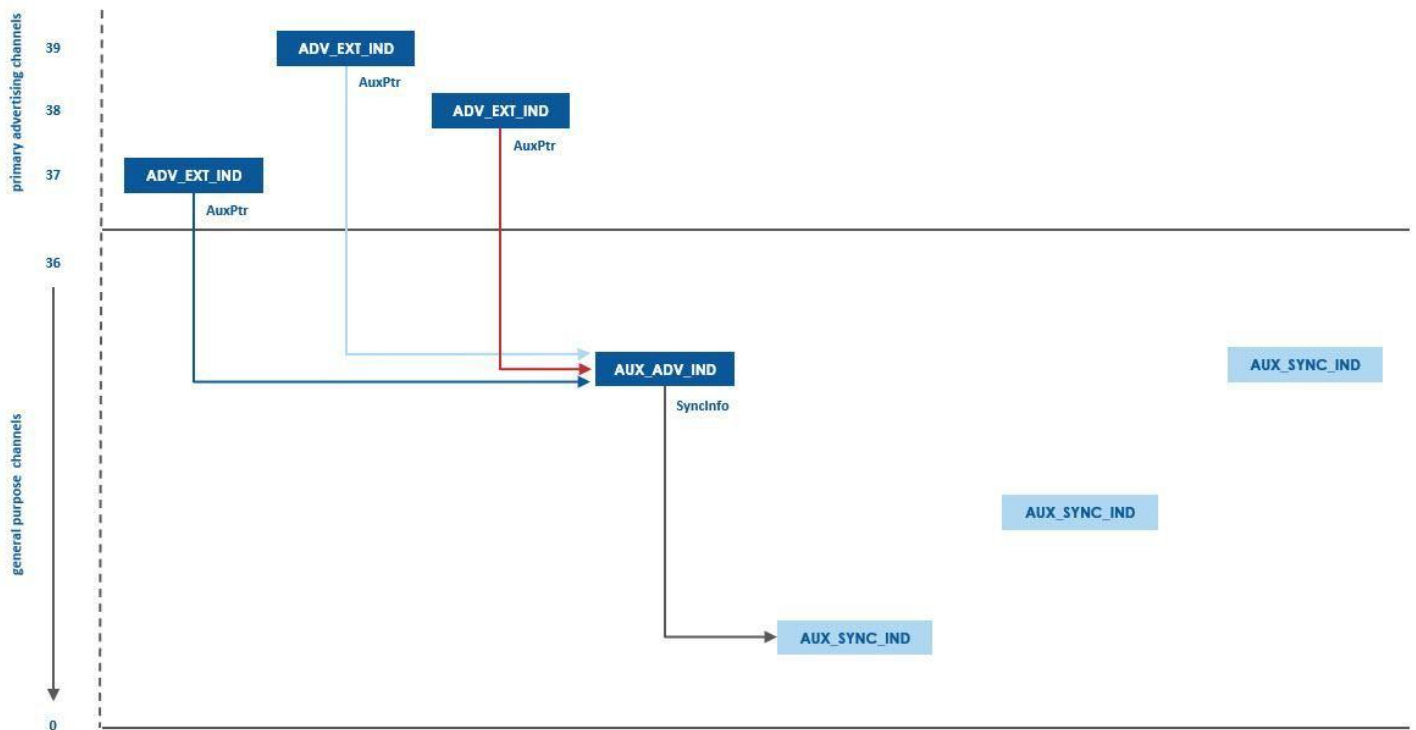


図6 PADV (およびADVBE) における無線チャネル利用

PADVは、AUX_SYNC_IND PDUを送信するチャネルの選択にChannel Selection Algorithm #2 (CSA#2)を使用します。

スケジューリング

PADVでは、periodic advertising interval、すなわちperiodic advertising trainを構成するAUX_SYNC_IND PDUの送信間隔を定義します。定期アドバタイジングイベントは各periodic advertising intervalごとに開始し、1つのAUX_SYNC_IND PDUとその補助AUX_CHAIN_IND PDU群の送信が完了すると終了します。ADVBE extended advertisingとは異なり、イベントのスケジューリングにランダム遅延値は影響しません。

定期アドバタイジングイベントおよびperiodic advertising intervalは、関連するADVBE extended advertisingを支配するadvertising eventおよびadvertising intervalとは独立しています。

図7は、定期アドバタイジングで使用する主なスケジューリングパラメータを示しています。

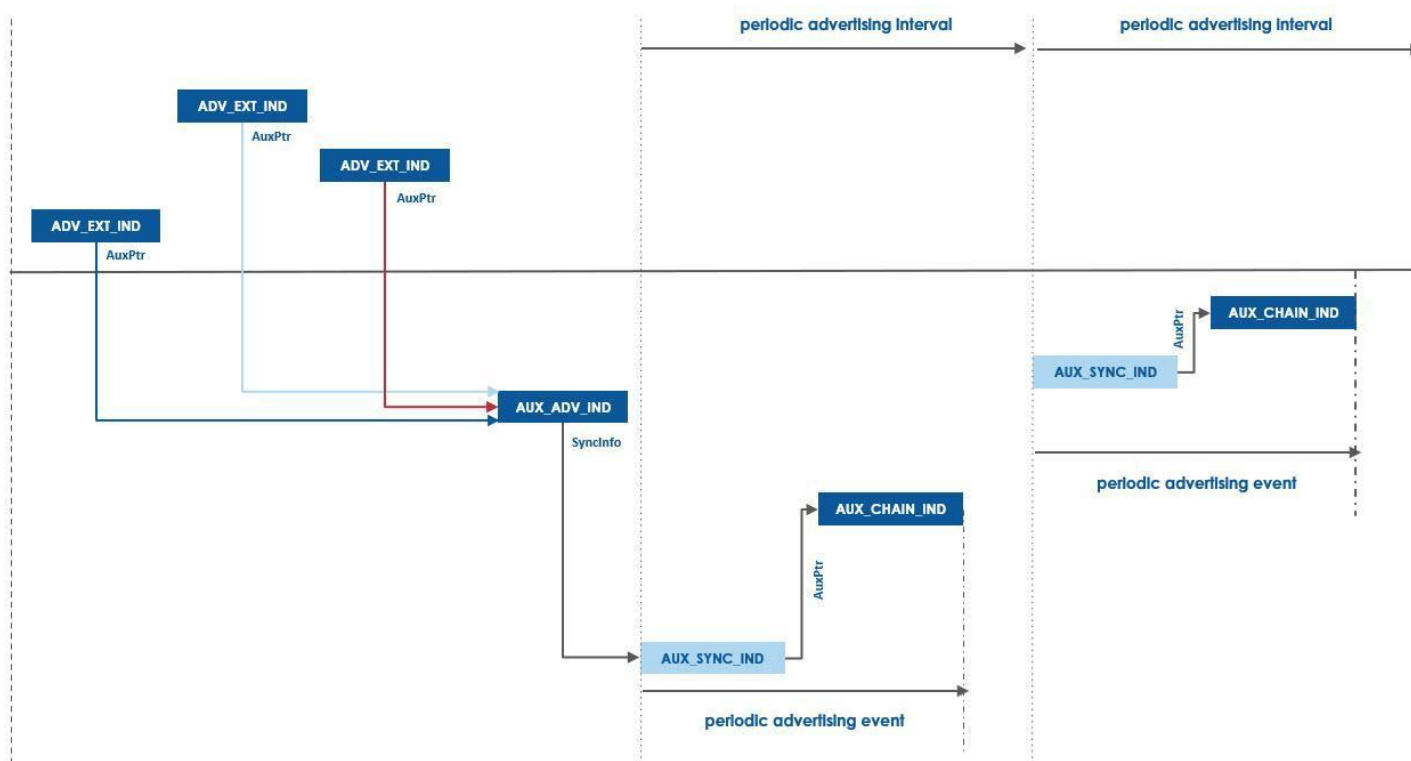


図7 定期アドバタイジング動作のスケジューリング

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	13 (data) (RF 15, 2432 Mhz)
CA (Clock Accuracy)	0 ppm to 50 ppm
Offset Units	30 us
Auxiliary Offset	510 us [@12.685 028 375]
Auxiliary PHY	LE 2M

図8 ADV_EXT_INDパケット — AUX_ADVパケットの位置を示すアナライザのタイムスタンプに注目

スキャナの同期

スキャナは、定期アドバタイザのスケジュールに対して、Broadcast Synchronization InformationまたはPASTのいずれか2つの方法で同期できます。

Broadcast Synchronization Information

すべての種類のextended advertising PDUは、Common Extended Advertising Payload Format (CEAPF)を使用します。これは標準的なペイロードフィールドと、それらを含める／除外するルールを定義しています。

CEAPFのフィールドの1つにSyncInfoがあります。これはAUX_ADV_IND PDU内のオプションフィールドで、存在する場合、スキャンデバイスがperiodic advertising trainを見つけて同期するために必要な情報を提供します。含まれる主要フィールドは次のとおりです。

- Offset Base、Offset Units、Offset Adjust。これらのフィールドにより、スキャナは現在のパケットの最初のビットを受信した時刻を基準としてオフセット時間を計算できます。これにより、periodic advertising trainの次のAUX_SYNC_IND PDUがいつ送信されるかが分かります。
- Interval。これは、periodic advertising train内の連続するAUX_SYNC_IND PDUの各ペアの開始時刻間の経過時間です。Intervalフィールドの最小値は7.5 msです。
- ChM。これはperiodic advertising trainで使われるチャンネルマップです。ビット位置に対応するインデックスのチャンネルが使用中か未使用かを示すビットマップ形式になっています。
- PeriodicEventCounter。これは16ビットのカウントフィールドで、各periodic advertising intervalごとにインクリメントされ、0xFFFFに達すると0に戻ります。CSA#2アルゴリズムで使われており、現在値をスキャンデバイスと共有することで、広告送信デバイスが選択したチャンネルインデックスと同じ選択をスキャンデバイス側で同期できるようになります。

図9は、SyncInfoのサブフィールドから計算されるオフセット時間と、periodic advertising intervalとしてのIntervalパラメータの使われ方を示しています。

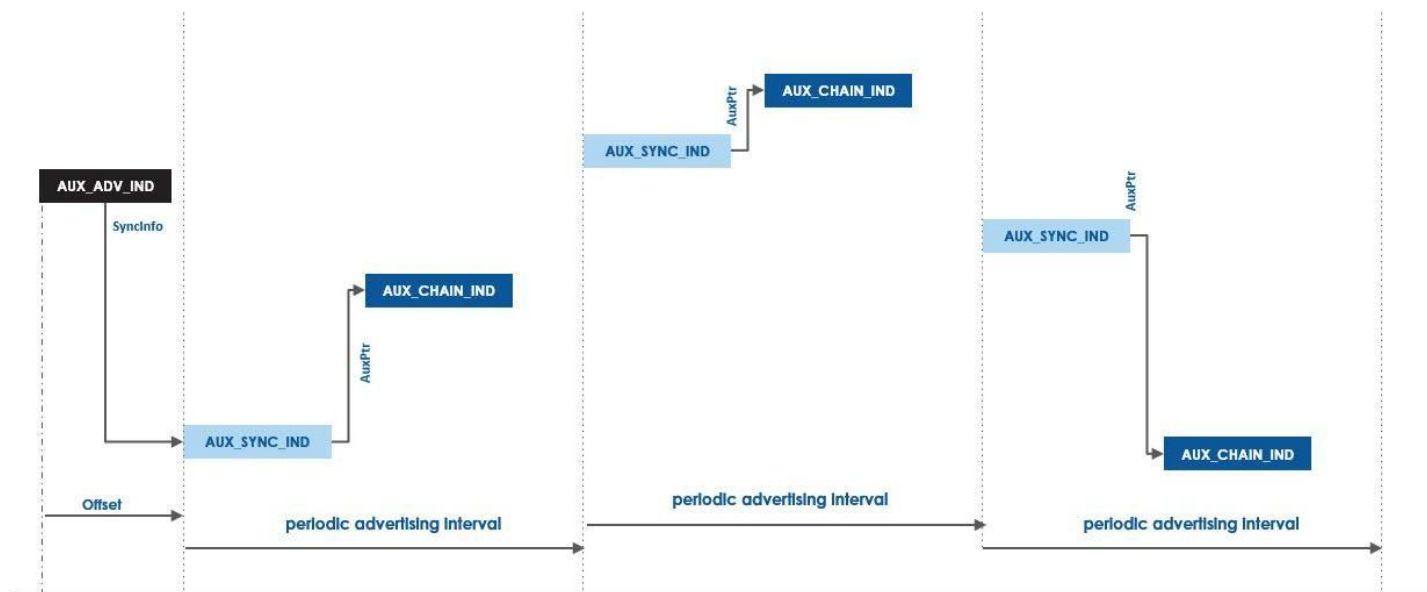


図9 Broadcast SyncInfoを用いた同期

PAST

Periodic Advertising Sync Transfer (PAST) 手順は、定期アドバタイジングの同期情報を、LE-ACL接続を介してあるデバイスから別のデバイスへ提供できるLink Layer制御手順です。

Link Layer仕様では、デバイス間で同期情報を渡すために使われるLL_PERIODIC_SYNC_IND PDUが定義されています。このPDUにはSyncInfoフィールドが含まれており、その定義はAUX_ADV_IND PDU内で使われる場合と同じです。

PASTの一般的な用途は、すでに同期情報を取得しているデバイスが、同じperiodic advertising trainへ同期したい別のデバイスにその情報を共有することです。これにより、SyncInfoフィールドを含むAUX_ADV_IND PDUをスキャンして探すという、比較的高コストの処理（消費電力の面で）を省けます。たとえばスマートフォンのような電力に余裕のあるデバイスがbroadcast AUX_ADV_IND PDUからSyncInfoを取得し、それをイヤホンのような制約の大きいデバイスへ渡すことができます。この流れを以下の図10に示します。

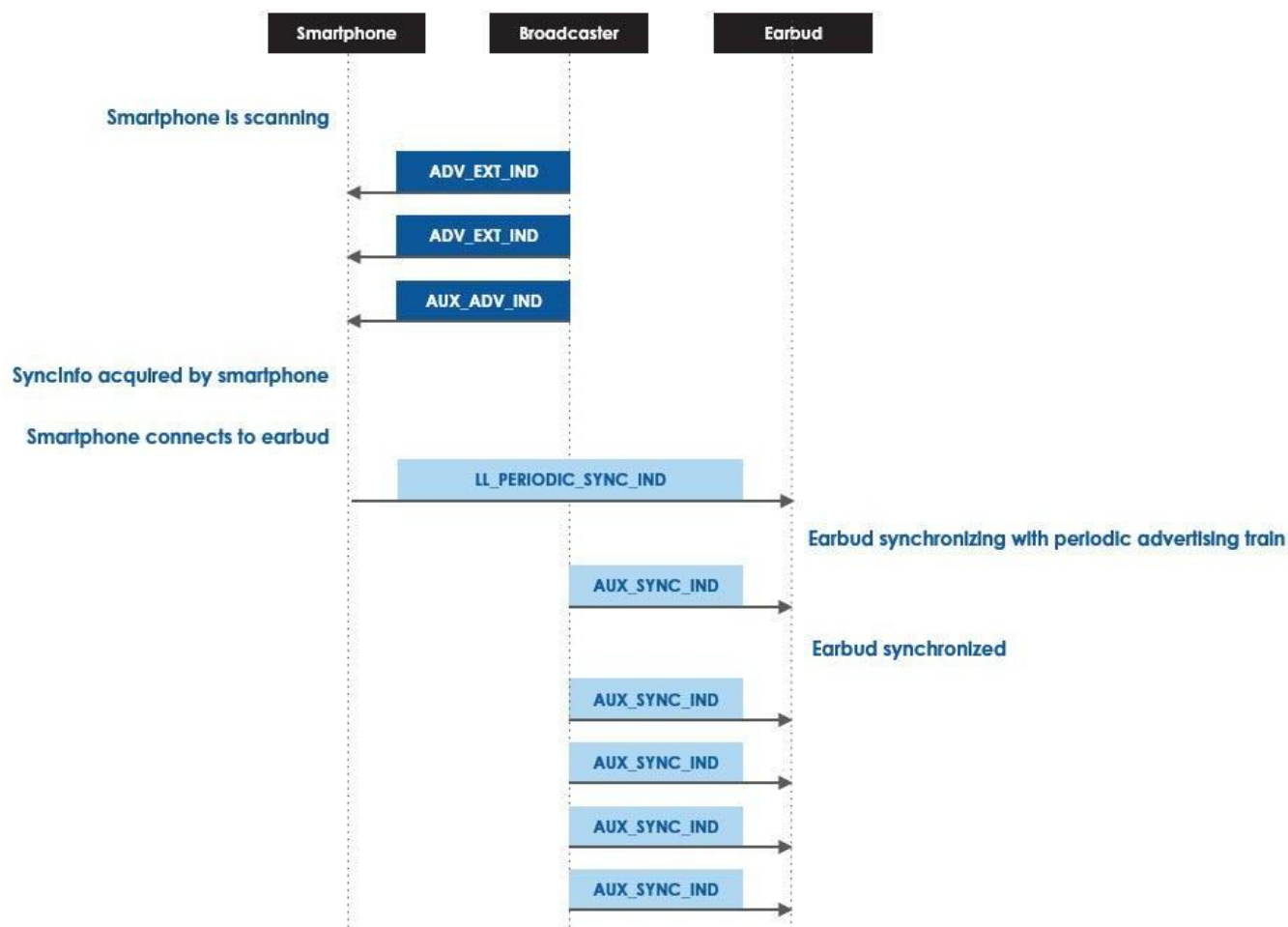


図10 スマートフォンがPASTを使ってイヤホンにSyncInfoデータを提供する様子

クロック精度

AuxPtrフィールドとSyncInfoフィールドはどちらも、Observerが関連パケットをスキャンすべき時刻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のためにタイマを使える内部クロックがあります。しかし、どのクロックにも一定の誤差があるため、Broadcasterのクロック精度を、想定される誤差範囲を表すppm (parts per million) で示した値が、これら両方のフィールドに含まれています。

物理レイヤ (Physical Layer)

定期アドバタイジングのAUX_SYNC_IND PDUを含め、汎用チャネル上で送信されるextended advertising PDUは、LE 1M、LE 2M、またはLE Coded PHYを使用できます。

AUX_SYNC_IND PDUは、SyncInfoフィールドによってそれを指し示すAUX_ADV_IND PDUと同じPHYを使用しなければなりません。

アプリケーション上の考慮事項

設定

アプリケーションは通常、APIを使って定期アドバタイジングを設定し有効化します。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) に依存しています。

対象プラットフォームに適した詳細を把握するために、APIドキュメントを確認すべきです。

Broadcaster

定期アドバタイジングの設定と有効化には、いくつかの設定手順が関わります。それぞれの手順では1つ以上のHCIコマンドを使用します。

- Step 1 – extended advertisingを設定する

LE Set Extended Advertising Parameters HCIコマンドにより、Hostアプリケーションは最小および最大の許容 advertising interval値やPHYの優先設定などのパラメータを設定できます。Advertising_Handleパラメータは、これらの設定がどのadvertising setに関するものかを識別し、後続のHCIコマンドでも同じsetを識別するために使われます。

- Step 2 – periodic advertisingを設定する

LE Set Periodic Advertising Parameters HCIコマンドでは、許容されるperiodic advertising interval値の範囲など、重要なパラメータを指定できます。Advertising_Handleパラメータは、これらの設定を、step 1でassociated extended advertising parametersを設定したのと同じadvertising setに関連付けるために使われます。

- Step 3 – periodic advertising dataを提供する

Hostアプリケーションは、LE Set Periodic Advertising Data HCIコマンドを1回以上呼び出して、advertising PDUに含めるデータを供給します。データは断片化して供給できます。

- Step 4 – periodic advertisingを有効にする

定期アドバタイジングを開始するには、Hostアプリケーションがそれを有効にする必要があります。これはHCI LE Set Periodic Advertising Enableコマンドで行います。コマンドパラメータで識別されたadvertising setに対してextended advertisingがまだ有効になっていない場合、定期アドバタイジングはそれが有効化されるまで待機します。

- Step 5 – extended advertisingを有効にする

LE Set Extended Advertising Enable HCIコマンドを使用して、指定されたsetに対してextended advertisingを有効にします。同じsetに対してperiodic advertisingが事前に有効化されていれば、この時点で開始されます。

Observer

*broadcast SyncInfo*を使う場合

Observerアプリケーションは、定期アドバタイジングデータを受信するためにいくつかの設定手順を踏む必要があります。

- Step 1 – extended advertisingのスキャンを設定して有効化する

periodic advertising trainと同期できるようになる前提として、extended advertisingのスキャンを設定し有効化する必要があります。これは、必要なSyncInfoデータがAUX_ADV_IND PDUで送信されるためです。

設定にはHCI LE Set Extended Scan Parametersコマンドを使用し、スキャンはLE Extended Scan Enableで有効化します。

- Step 2 – periodic advertising trainと同期する

periodic advertising trainと同期するには、アプリケーションはLE Periodic Advertising Create Syncコマンドを呼び出す必要があります。このコマンドには各種パラメータがあり、HCIレポートで広告データの配信を直ちに有効にするかどうか、重複をフィルタするかどうかも指定できます。

Controllerが最初のAUX_SYNC_IND PDUを受信して同期が確立されると、HCI *LE Periodic Advertising Sync Established* イベントがHostへ送信されます。

*PAST*を使う場合

PAST手順を使う場合、スキャンの設定と有効化は不要です。その代わりに、同期データを供給できるデバイスとのLE-ACL接続を確立する必要があります。その後、LE Periodic Advertising Sync Transfer HCIコマンドを使ってPASTを開始できます。このコマンドには、使用するLE ACL接続を識別するconnection handleパラメータが含まれます。

- Step 3 – periodic advertising reportの受信を有効化する(任意)

アプリケーションは、periodic advertising trainと同期した直後ではなく、後から必要になった時点で、HCI LE Set Periodic Advertising Receive Enableコマンドを用いてperiodic advertisingの受信を有効にすることもできます。

アプリケーションデータ

Broadcaster

前述のとおり、アプリケーション層はLE Set Periodic Advertising Data HCIコマンドを使って、periodic advertisingのAUX_SYNC_IND PDUに含めるデータをControllerへ供給します。

データは、すべてのadvertisingと同様に、適切な一連のAD Typeでカプセル化する必要があります。データは断片化でき、LE Set Periodic Advertising Dataコマンドを複数回呼び出してControllerへ送れます。このコマンドにはOperationというパラメータがあり、断片が系列の最初、中間、最後のいずれかを示すために使われます。

データがControllerへ供給された時点でperiodic advertisingがまだ有効でない場合、そのデータは保持されます。periodic advertisingが有効化されると、そのデータがAUX_SYNC_IND PDUで使用され、必要に応じて補助AUX_CHAIN_IND PDUでも使われます。

periodic advertisingがすでに有効である場合、新たに供給されたデータが、すでに使われているデータ(あれば)を置き換えます。このようにして、アプリケーションは必要に応じて広告中のデータを変更できます。

Observer

定期アドバタイジングデータは、LE Periodic Advertising Reportと呼ばれるHCIイベントタイプでObserverデバイスへ渡されます。

必要に応じて、Controllerは受信データを断片化し、複数のadvertising reportとしてHostへ転送できます。イベント内のData Statusフィールドは、その後続レポートにさらにデータが続くかどうかをHostへ示します。

信頼性

PADVBはconnectionless communicationに分類されますが、スキャナとアドバタイザのスケジュールが同期している点でADVBとは異なります。これにより、スキャナがBroadcasterと同期していないためにbroadcastパケットを取り逃すリスクが低減し、より信頼性の高い通信が実現します。

PADVBには確認応答の仕組みはありませんが、broadcastデータが頻繁に変化しないのであれば、同期したスキャナには特定のbroadcastデータ集合を受信する機会が複数回あるため、通常は問題になりません。

37本の汎用チャンネルとランダム化されたチャンネル選択アルゴリズムを使用することで、PADVBは干渉に対して堅牢になります。

セキュリティ

本シリーズの過去記事で説明したEncrypted Advertisingは、定期アドバタイジングでも使用できます。

定期アドバタイジングは匿名であり、AUX_SYNC_IND PDUにはadvertiserのアドレスもtarget device addressも含まれないため、アドレスを用いたデバイス追跡に関するプライバシー問題は発生しません。ただし、デバイス追跡の脅威に完全に対処するには、アプリケーションデータペイロードが固定パターンになって追跡に使われないよう、変化を持たせる方法をアプリケーションで検討すべきです。

Ellisys Bluetooth アナライザ活用例

Bluetooth extended advertisingは少し複雑です。そして定期アドバタイジングはさらに複雑です。しかし、実機とEllisys Bluetooth アナライザシステムを用いることで、Bluetooth Core Specificationで定義される理論上の動作が明確になり、理解が深まります。

以下では、定期アドバタイジング同期情報の通信に関わるパケットとPDU、ならびに関連するPADVB advertising train自体を追跡する一連のスクリーンショットを示します。図示されているパケットを生成しているデバイスは、ZephyrオープンソースOSに含まれるサンプルのperiodic advertisingアプリケーションを実行しているNordic nRF54L15 developer boardです。

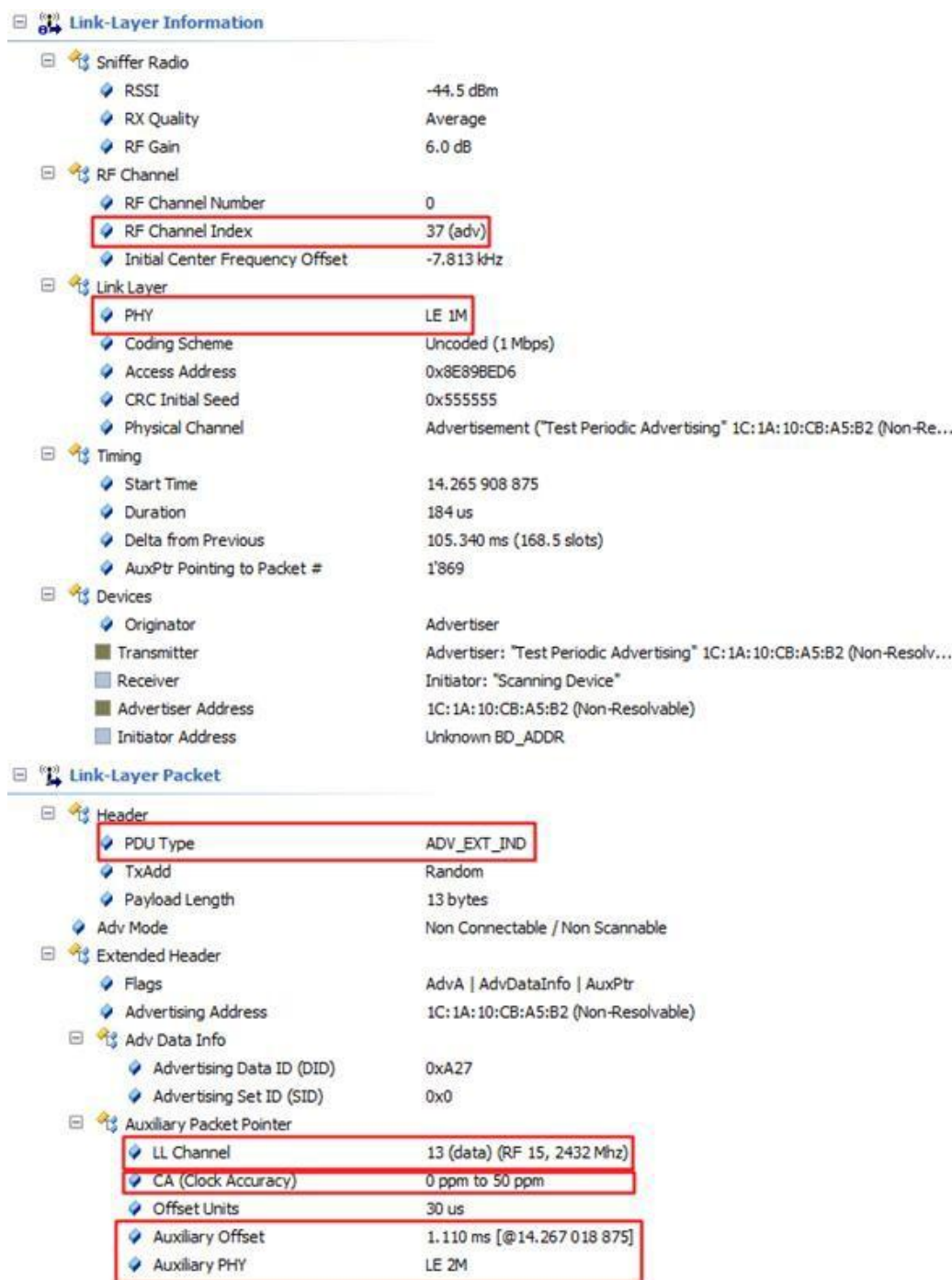
図11は、一連のextended advertisingパケットの後に、periodic advertising chainの最初のAUX_SYNC_IND PDUが続く様子を示しています。ひと目で、3つのADV_EXT_IND (各primary advertising channelに1つずつ)、1つの補助advertising packet、そして関連するperiodic advertising trainに属するAUX_SYNC_IND PDUがあることが分かります。

Packet # ▾	Item	↑ ▾
1'866	ADV_EXT_IND Packet (1C:1A:10:CB:A5:B2 (Non-Resolvable), AdvA AdvDataInfo AuxPtr[13 (...)	
1'867	ADV_EXT_IND Packet (1C:1A:10:CB:A5:B2 (Non-Resolvable), AdvA AdvDataInfo AuxPtr[13 (...)	
1'868	ADV_EXT_IND Packet (1C:1A:10:CB:A5:B2 (Non-Resolvable), AdvA AdvDataInfo AuxPtr[13 (...)	
1'869	AUX_ADV_IND Packet (AdvDataInfo SyncInfo Adv Data, #1'868->, Local Name, Name="Test ...	
1'870	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	

図11 Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアにおけるextended advertisingと最初の定期アドバタイジングパケット

図12は、図11に示したADV_EXT_IND PDUの1つを詳細に分解したものです(図11のいずれかの行を選択して取得)。このPDUがprimary advertising channel #37上でLE 1M PHYを用いて送信されたことが分かります。

AuxPtrフィールドは、補助パケットがチャネルインデックス13上でLE 2M PHYを使用して送信され、その送信はこのパケットの最初のビットを受信した時刻から1.110 ms後に起こることを示しています。親切なことに、この時刻は14.267018875秒という値のタイムスタンプとして表示されています。さらに、0~50 ppmのクロック精度も示されています。



Link-Layer Information

- Sniffer Radio
 - RSSI: -44.5 dBm
 - RX Quality: Average
 - RF Gain: 6.0 dB
- RF Channel
 - RF Channel Number: 0
 - RF Channel Index: 37 (adv)
 - Initial Center Frequency Offset: -7.813 kHz
- Link Layer
 - PHY: LE 1M
 - Coding Scheme: Uncoded (1 Mbps)
 - Access Address: 0x8E89BED6
 - CRC Initial Seed: 0x555555
 - Physical Channel: Advertisement ("Test Periodic Advertising" 1C: 1A: 10:CB:A5:B2 (Non-Resol...))
- Timing
 - Start Time: 14.265 908 875
 - Duration: 184 us
 - Delta from Previous: 105.340 ms (168.5 slots)
 - AuxPtr Pointing to Packet #: 1'869
- Devices
 - Originator: Advertiser
 - Transmitter: Advertiser: "Test Periodic Advertising" 1C: 1A: 10:CB:A5:B2 (Non-Resolv...)
 - Receiver: Initiator: "Scanning Device"
 - Advertiser Address: 1C: 1A: 10:CB:A5:B2 (Non-Resolvable)
 - Initiator Address: Unknown BD_ADDR

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: 1C: 1A: 10:CB:A5:B2 (Non-Resolvable)
- Adv Data Info
 - Advertising Data ID (DID): 0xA27
 - Advertising Set ID (SID): 0x0
- Auxiliary Packet Pointer
 - LL Channel: 13 (data) (RF 15, 2432 Mhz)
 - CA (Clock Accuracy): 0 ppm to 50 ppm
 - Offset Units: 30 us
 - Auxiliary Offset: 1.110 ms [@14.267 018 875]
 - Auxiliary PHY: LE 2M

図12 Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアにおいて補助PDUを指し示すADV_EXT_IND PDU

図13は補助パケットの詳細を示しています。そこにはAUX_ADV_IND PDUが含まれており、予想どおり、チャンネルインデックス13上でLE 2M PHYを用いて送信されました。

このパケットの開始を受信した時刻には、アナライザツールにより14.267046375秒というタイムスタンプが割り当てられています。上位のADV_EXT_IND PDUで示されていた予測送信時刻は14.267018875でした。両者を差し引くと、-0.0000275、すなわち27.5 ppmとなり、示された0～50 ppmの精度範囲内に収まっています。

Link-Layer Information	
Sniffer Radio	
RSSI	-46.5 dBm
RX Quality	Average
RF Gain	6.0 dB
RF Channel	
RF Channel Number	15
RF Channel Index	13 (data)
Initial Center Frequency Offset	-31.25 kHz
Link Layer	
PHY	LE 2M
Coding Scheme	Uncoded (2 Mbps)
Access Address	0x8E89BED6
CRC Initial Seed	0x555555
Physical Channel	Advertisement ("Test Periodic Advertising" 1C: 1A: 10: CB: A5: B2 (Non-Resol...
Timing	
Start Time	14.267 046 375
Duration	240 us
Delta from Previous	514.13 us (0.8 slots)
Pointed from AuxPtr Offset	510 us [@14.267 042 250]
Delta with pointed from AuxPtr Offset	4.125 us
Pointed from AuxPtr Packet #	1'868
T_MAFS	330.125 us
Devices	
Originator	Advertiser
Transmitter	Advertiser: "Test Periodic Advertising" 1C: 1A: 10: CB: A5: B2 (Non-Resolv...
Receiver	Initiator: "Scanning Device"
Advertiser Address	1C: 1A: 10: CB: A5: B2 (Non-Resolvable)
Initiator Address	Unknown BD_ADDR
Link-Layer Packet	
Header	
PDU Type	AUX_ADV_IND
Payload Length	49 bytes
Adv Mode	Non Connectable / Non Scannable
Extended Header	
Flags	AdvDataInfo SyncInfo Adv Data
Adv Data Info	
Advertising Data ID (DID)	0xA27
Advertising Set ID (SID)	0x0
Sync Info	
Sync Packet Offset	16.14 ms
Offset Units	30 us
Offset Adjust	No
Interval	1.2 s
Channel Map	Used: 0-36 / Unused: none
SCA (Clock Accuracy)	31 ppm - 50 ppm
Access Address	0x3448AA79
CRC Initial Seed	0x9E5FBD
Event Counter	11

図13 Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアにおけるAUX_ADV_IND

図13のAUX_ADV_IND PDUにはSyncInfoフィールドが含まれています。計算されたSync Packet Offset値は、関連するperiodic advertising trainの次のAUX_SYNC_IND PDUが16.14 ms後に送信されることを示しています。また、このperiodic advertising trainで使用されているperiodic advertising intervalが1.2秒であり、37本すべての汎用チャンネルが現在使用中としてマークされていることも示しています。

図14は、図13のAUX_ADV_IND PDUの後に送信された最初のAUX_SYNC_IND PDUを示しています。これはチャンネルインデックス1上でLE 2M PHYを用いて送信されました。AdvDataフィールドには1つのAD Typeしか含まれていません。これはManufacturer Dataフィールドで、2つのサブフィールドを持ちます。このケースで使用されているcompany IDは予約値であり、アナライザツールの別の場所で0xFFFFであることが分かります(テスト専用)。Manufacturer Specific Dataフィールドには0x01という値が入っています。

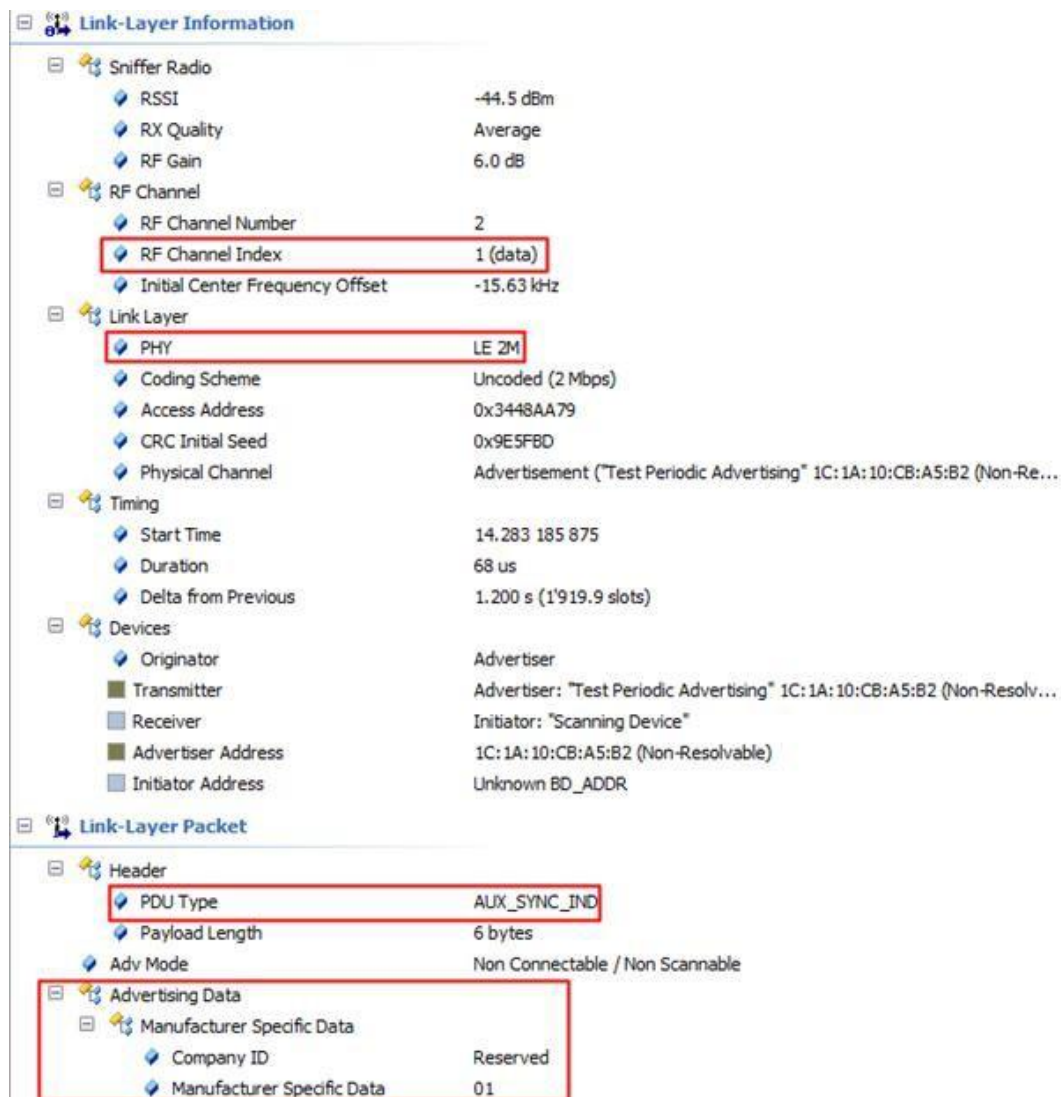


図14 Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアにおけるAUX_SYNC_IND

定期アドバタイジング開始後、ZephyrのサンプルコードはAdvDataフィールド内のmanufacturer data AD Typeの内容を0x01、0x02、0x03という整数値で順に循環させ、現在の広告値を10秒ごとに変更している点に注意してください。以下の図15を参照してください。

```

for (int i = 0; i < 3; i++) {
    k_sleep(K_SECONDS(10));

    mfg_data[2]++;

    printk("Set Periodic Advertising Data...");
    err = bt_le_per_adv_set_data(adv, per_adv_ad, ARRAY_SIZE(per_adv_ad));
    if (err) {
        printk("Failed (err %d)\n", err);
        return 0;
    }
    printk("done.\n");
}

```

図15 広告データを10秒ごとに変更するコードループ

Item= “*AUX_SYNC_IND*” というフィルタパターンを使うと、Ellisys Bluetooth アナライザの「Packets」ビュー内のすべてのAUX_SYNC_IND PDUを簡単に抽出できます。これを以下の図16に示します。

Payload列では、Manufacturer Specific Dataフィールド(最後の1バイト)が予想どおり変化していることが分かります。また、Time列を見ると、1.2秒のperiodic advertising intervalが機能している証拠も確認できます。

Packet #	Item	Status	Payload	Time
1596	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	13.083 231.000
1870	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	14.283 185.875
2030	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	15.483 140.750
2194	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	16.683 095.750
2364	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	17.883 050.750
2536	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	19.083 005.750
2693	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	20.282 960.750
2857	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 01)	21.482 915.625
3013	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	22.682 870.500
3177	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	23.882 825.500
3337	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	25.082 780.500
3514	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	26.282 735.500
3666	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	27.482 690.250
3834	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	28.682 645.250
4005	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	29.882 600.250
4169	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 02)	31.082 555.250
4332	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	32.282 510.125
4500	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	33.482 465.000
4647	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	34.682 420.000
4811	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	35.882 375.000
4964	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	37.082 329.875
5122	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	38.282 284.875
5281	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	39.482 239.750
5444	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	40.682 194.875
5591	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	41.882 149.875
5721	AUX_SYNC_IND Packet (Adv Data, Manufacturer Specific Data, Manuf=1 byte)	OK	5 bytes (04 FF FF FF 03)	43.082 104.875

図16 Ellisys Bluetooth アナライザソフトウェアにおけるAUX_SYNC_IND PDU一覧

通信モードの特性

本シリーズ「The Many Communication Modes of Bluetooth LE」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のに役立つ一連の特性を紹介しました。以下は定期アドバタイジングに関する特性表です。

特性	説明
トポロジー	無指向:1対多(1:m)。
送信側と受信側	アドバタイジングデバイスは送信のみ。スキャナは受信のみ。
アプリケーションデータの方向	一方向。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しか送信できません。
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。
無線チャンネル	PADVBでは37本のBluetooth LE汎用チャンネルが使用されます。 同期情報の取得には3つのprimary advertising channelが関与します。
スケーラビリティ	定期アドバタイジングは常に無指向であり、理論上無制限の数のデバイスに到達できるため、この点でPADVBは高いスケーラビリティを持ちます。 PADVBはextended advertisingの一形態であり、そのためADVBLよりも1回のadvertising eventあたりに送信できるアプリケーションデータ量が大幅に多くなります。
PHYの選択	AUX_SYNC_IND PDUの送信にはLE 1M、LE 2M、またはLE Codedを使用しますが、選択したPHYは関連するAUX_ADV_IND PDUのPHYと一致していなければなりません。

表1 PADVBの特性

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興味深く有用な補足ポイントをいくつか紹介して締めくくります。



Periodic Advertising with Responses (PAwR)という新しい論理トランスポートが、Bluetooth Core Specificationのバージョン5.4で導入されたことをご存じですか。

PADVBではBroadcasterデバイスによるアプリケーションデータ送信しかできません。PAwRではperiodic advertisingを使用しつつ、Observerデバイスが自身のアプリケーションデータをBroadcasterへ送り返すこともできます。PAwRは本シリーズの次回記事のテーマです。



core specificationでは、**periodic advertising train**を指し示す**advertising**は匿名であってはならないと定められていることをご存じですか。

これは、SyncInfoフィールドを含むAUX_ADV_IND PDUには、AdvA advertiser addressフィールド内に必ずデバイスアドレスが存在しなければならないことを意味します。図13にその例があります。



periodic advertising train内のパケットには**Constant Tone Extension**を含められることをご存じですか。

Constant Tone Extension (CTE)はBluetoothのdirection finding systemで使用されるため、一部のアプリケーションではこのフィールドを含めることが有用です。ただしHostは、CTEフィールドを持つ定期アドバタイジングtrainと持たないtrainのどちらを関連ありと見なすかをControllerに指示できます。



現在、AndroidもiOSも**periodic advertising train**との同期用APIを提供していないことをご存じですか。

ただし、これは今後変わる可能性が高いでしょう。新しいBluetooth LEオーディオ技術であるAuracastではperiodic advertisingが使われ、Android 16がAuracastをサポートすると発表されています。AppleとAuracastに関しては、現時点で公式発表はまだありません。もちろん、Auracast対応によってアプリからperiodic advertisingへ直接同期できるAPIが提供されるかどうかは、まだ分かりません。

シリーズ次回予告

本記事では、Bluetooth LEのperiodic advertising (PADVB) 通信モードを見てきました。

次回の記事では、periodic advertising with responses (PAwR) 通信モードを取り上げます。