

Bluetooth® 技術の信頼性

著者: Martin Woolley

バージョン: 1.0.2

改訂日: 2020年12月2日



改訂履歴

バージョン	日付	著者	変更
1.0	2020年10月9日	Martin Woolley	第一版
1.0.1	2020年11月4日	Martin Woolley	参照の章番号を修正しました
1.0.2	2020年12月2日	Martin Woolley	図13内の SN値および NESN値を修正しました

目次

1.0 Bluetooth®技術と信頼性の高い通信	6
1.1 無線の喜び	6
2.0 信頼性の意味.....	7
2.1 シンプルな定義	7
2.2 信頼性についてのより詳細な解説	7
3.0 無線通信システムにおける信頼性の問題	8
3.1 コリジョン	8
3.2 マルチパスと時間分散	9
3.3 送信デバイスと受信デバイスの同期	9
3.4 信号強度と受信感度	10
3.5 変調方式	10
3.6 共存とコロケーション	11
3.7 バッファオーバーフロー	11
3.8 単一障害点	11
3.9. ソフトウェアの欠陥	12
3.10 100%の信頼性という幻想	12
4.0 信頼性が低いとされる無線技術で高い信頼性を実現	13
4.1 全用途向けの機能と対策	13
4.1.1 Bluetooth®の変調方式	14
4.1.2 プリアンブル	16
4.1.3 アクセスアドレス	16
4.1.4 CRC(巡回冗長検査)	17
4.1.5 MIC(メッセージ完全性コード)	17
4.1.6 スペクトラム拡散	18



目次

4.1.7 共存およびコロケーション問題への対応	19
4.1.8 LE Coded PHY	19
4.2 Bluetooth®の接続型通信における信頼性	20
4.2.1 接続	20
4.2.2 適応型の周波数ホッピング	21
4.2.3 リンクレイヤーにおける順序付けと肯定応答	23
4.2.4 フロー制御	24
4.2.5 ATT(属性プロトコル)とEATT(拡張属性プロトコル)	25
4.2.5.1 ATT処理	25
4.2.5.2 書き込みのキュー	26
4.2.6 LE出力制御	26
4.2.7 迅速な肯定応答および障害検知	27
4.3 Bluetoothの接続レス型通信における信頼性	27
4.3.1 接続レス型通信におけるスペクトラム拡散	27
4.3.2 共存とアドバタイジングチャンネル	28
4.3.3 アドバタイジングパケットにおいて繰り返し発生するコリジョン	29
4.3.4 定期的なアドバタイジング	29
4.3.5 アイソクロナスストリームのブロードキャスト	30
4.3.6 「接続型」対「接続レス型」	31
4.4 Bluetooth meshネットワークの信頼性	31
4.4.1 背景	31
4.4.1.1 ベアラ	31
4.4.1.2 アドバタイジングベアラ	31



目次

4.4.1.3 システムを確率で捉える	32
4.4.1.4 RXデューティ比	32
4.4.2 信頼性の高いBluetooth meshネットワークを実現するために	34
4.4.2.1 ネットワークの効率活用	34
4.4.2.2 ネットワーク層の再送信	35
4.4.2.3 パブリケーション、再送信、同期のモデル化	35
4.4.2.4 単一障害点の排除	36
4.4.2.5 肯定応答メッセージと未肯定メッセージ	37
4.4.2.6 Bluetooth meshと信頼性の高い照明システム	40
5.0 Bluetoothから最高の信頼性を引き出す	41
6.0 結論	43



1.0 Bluetooth®技術と信頼性の高い通信

1.1 無線の喜び

無線通信システムは、あるデバイスが別のデバイスから電波でデータを取得するための基礎となる物理的な基盤を指します。Bluetooth自体は電波通信技術です。ここで問題となる点があります。

それは「電波は紛れもなく、明白に、疑いようもなく信頼性が低い」ということです。これは事実なのです。

では、Bluetoothが電波を使っていて、電波は信頼性が無いのであれば、なぜ信頼性の高い技術と言えるのでしょうか？

まずはこの重要な問題について答える前に、問題自体の定義を進めてみましょう。本文書は基本的に、Bluetooth Low Energy (LE)について説明します。

電波は紛れもなく、明白に、疑いようもなく**信頼性が低い**
これは事実なのです。



2.0 信頼性の意味

2.1 シンプルな定義

通信技術における信頼性を簡潔に定義すると、次のようになります。

「送信データと受信データが同一であり、かつそのデータに関する動作が意図された通りに行われれば、通信の信頼性は高い」。

これは直感的に理解していた方も多いのではないのでしょうか？何も難しい話ではないのです。

送信データと受信データが同一であり、かつそのデータに関する動作が意図された通りに行われれば、通信の信頼性は高くなります。

2.2 信頼性についてのより詳細な解説

難しい話ではない一方、製品やソリューションの信頼性については、さらに細かい条件が求められる場合があります。「正確なデータを受信し、期待通りに動作する」という基本的な要求事項の他に、次のような要求事項が加わることもあります。

- **障害への許容**：99.9999%のケースで求められる結果を得られれば、信頼性のあるシステムとみなされる」。信頼性についてこういった条件がつくこともあります。他にも、「24時間あたりで1回以下の障害であれば許容する」といった期間あたりの障害数や、障害の発生間隔が基準となる場合もあります。
- **レイテンシ**：「必ず照明のスイッチが作動してから500 ms以内に照明が点灯する場合に限り、システムは信頼性が高いとみなされる」といった条件です。
- **レジリエンス**：システムや製品、コンポーネントである障害が発生した場合でも、正常な動作が続くことが求められます。指定の障害が発生したときに、目的とするサービスや機能が損なわれた場合、そのシステムには信頼性がないとみなされます。その障害が発生しても、目的とするサービスや機能を提供し続けられる場合は、信頼性が高いシステムとみなされます。

信頼性は目的に合わせて変化するものであり、不変ではありません。安全性と同様に、信頼性もまた要件に合わせた最適なコンセプトを把握することが重要になります。

安全性について言えば、送信デバイスと受信デバイスの間でのデータの変化は、「自然発生する現象としての起きる」場合もあれば、「悪意を持って意図的に引き起こされる」場合もあることに注意する必要があります。

また、送信データのうち受信できないデータの割合については大きな許容範囲が設定される場合もあります。例えば、サイクリング中の心拍数を測るため、胸に心拍数モニターを付けて、スマートフォンで心拍数データを受信する際に、送信データが一定割合で受信できなくてもさほど問題にはならないケースもあるでしょう。それはシステム全体の機能が影響を受けないためであり、受信できないデータが一定割合であることにユーザーも気づきません。そのため、このシステムにおける信頼性は目的に沿って保たれているのです。逆に、障害の許容度が非常に低く、はるかに高い信頼性が求められるケースもあります。同じ心拍数の測定であっても、スポーツや健康ではなく医療目的であれば、はるかに高いレベルの信頼性が求められます。

3.0 無線通信システムにおける信頼性の問題

無線通信システムは、実に様々な問題や状況によって信頼性が損なわれるおそれがあります。

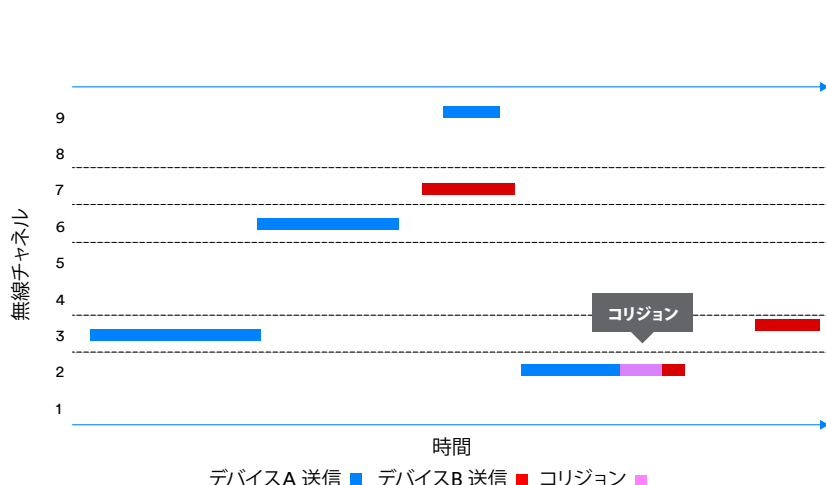
3.1 コリジョン

青と赤のライトのパターンで情報を伝達しているシステムを想像してください。このシステムでは、受信デバイスは青と赤の光だけを認識し、それ以外の色の光への対応は定義されていないものとします。

そして部屋には、青と赤を独立して制御する2つのスイッチが設置されています。部屋の中央には光のセンサーが置かれており、光を感知すると、色が青か赤かに合わせてプログラム通りに反応します。

2つのスイッチは、訓練は受けていない優秀な技術者2人が、ランダムな間隔とタイミングでオンとオフを切り替えます。たまに青と赤のライトが同時に点灯します。するとセンサーは紫の光を受け取ることになります。センサーが認識できない色なため、エラーとして処理されます。2つのライトから送信される情報が破損して失われる状態となります。これを遠距離通信技術では「コリジョン（衝突）」と呼びます。

これと同様に、無線通信においても、2種類の送信データが同じチャネル、同じタイミングで重なると、コリジョンが発生する場合があります。ライトの例と同じように、2つの無線送信データ中の情報が破損して失われてしまうのです。



デバイスは、データ送信時に、データを構成するデジタルビットをアナログシンボルに変換し、選択した無線チャネル上で1つずつ送信します。シンボルの送信速度をシンボルレートと呼びます。これはあるシンボルが別のシンボルに変化する速度を測定したもので、これによって送信するまでに一定の時間が必要となります。このシンボルレートと送信ビット数に応じて送信時間が決まり、送信時間が伸びるとコリジョンの発生率も高まります。

2台のデバイスが、同じチャネル上で、同一の間隔と長さで送信を繰り返せば、コリジョンが繰り返し発生することになります。

図1 チャンネル上で発生するコリジョン

3.2 マルチパスと時間分散

光をはじめとする電波は、表面で反射したり、物体の通過時に屈折したりする特性を有します。これにより、通信システムの受信デバイスには、様々な方向から、複数回に渡って信号が届きます。これがマルチパス、または多重波伝播と呼ばれる現象です。

マルチパスが起きると、異なる経路を通った信号が、わずかに異なるタイミングで受信デバイスに届く場合があります。これを時間分散と呼びます。時間分散が起きると、符号間干渉 (ISI) として知られる干渉が発生します。

3.3 送信デバイスと受信デバイスの同期

Bluetooth®では、半二重無線通信と呼ばれる無線通信方式を使用します。この方式では、2台のデバイスが相互通信できる一方、同時には通信できません。1台目のデバイスが送信すると2台目は受信し、その後、1台目が受信を行うときに2台目が送信するといった形です。この方式において、デバイスは「特定の無線チャンネルで送信中」、「特定のチャンネルで待ち受け中」、「待機中」の3種類の状態のいずれかとなります。

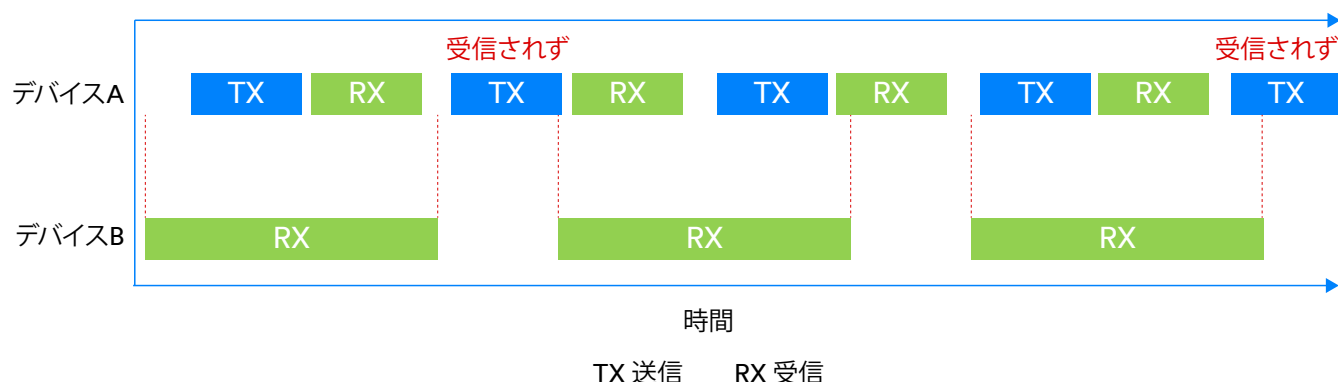


図2 非同期通信におけるパケットロス

範囲内のデバイスがデータを送信していても、受信デバイスが待ち受け中でない場合、または送信デバイスと同一のチャンネルで待ち受けていない場合は、送信データは受信できません。

デバイスの待ち受け時間の割合をRXデューティ比と呼びます。RXデューティ比が高いほど、送信デバイスのデータ送信時に受信デバイスが待ち受け中となっている可能性が高くなります。これは、2台のデバイス間で送受信のタイミングを同期させない場合に特に重要になります。

図2は2台のデバイス間の送受信状態を表します。デバイスAは、データを定期的に送信します。デバイスBは、定期的に送信をスキャン（待ち受け）しますが、そのタイミングはデバイスAからの送信と同期していません。その結果、デバイスBは、デバイスAのパケット送信中ずっとスキャンしている場合は完全に受信できますが、それ以外の場合はデバイスAが送信したパケットは失われます。

デバイスBは、全時間の約4分の3をスキャンしています。そのためRXデューティ比は約75%となります。

3.4 信号強度と受信感度

受信デバイスが測定する信号強度を受信信号強度 (RSSI) と呼びます。信号強度は、信頼性にさまざまな影響を及ぼします。信号強度が強すぎると受信デバイスが飽和し、受信信号のデコード時にエラーが発生する場合があります。

逆に信号が弱くなると、その周囲のノイズ信号と強度が近くなります。ここでのノイズは、自然発生する電磁波や、人為的に発生した電磁波が元になる不要な電波信号を指します。信号強度と周囲のノイズレベルの比率をS/N比と呼びます。ノイズに比べて信号強度が下がりすぎると、送信信号に含まれる情報を誤りなくデコードすることが困難になります。受信したアナログシンボルをデコードし、対応するデジタルビットを生成する試みが失敗する確率を、BER (符号誤り率) と呼びます。BERが高すぎると、通信全体に障害が発生します。

受信デバイスが送信デバイスから離れているほど信号強度は弱まり、S/N比も低くなるため、エラーが発生しやすくなります。送信デバイスからの距離が長くなるにつれて信号強度が低下することを伝搬損失と呼びます。

Bluetoothは、コア仕様で受信デバイスの信号強度が-70 dBm、BERが0.1%以下でなければならないと定めています。これを受信感度と呼びます。

ここにA、Bという2台の送信出力レベルが異なるデバイスがあるとします。この場合、デバイスAにとってデバイスBは十分に範囲内となっており、デバイスBに確実にデータを送るにも関わらず、Bにとっては限界に近く、Aが受信するS/N比が小さいため、エラーが発生するという状況が発生することがあります。このような状況を、無線の非対称リンクと呼びます。

3.5 変調方式

変調方式とは、送信時に無線信号の情報を符号化する方法を指します。変調は、無線の基本特性を1つまたは複数利用して行います。例えば振幅を使用する方式、周波数の方式、位相の方式などがあります。

基本的に変調方式で信頼性が損なわれることはありません。ですがより優れた性能の変調方式もあり、受信デバイスが信号をより正確にデコードし、情報を抽出できる場合もあります。

3.6 共存とコロケーション

別の無線技術が、一部重複する電波スペクトルを利用することがあります。例えばBluetooth®技術とWi-Fi®は、いずれも産業科学医療用 (ISM) の2.4 GHz帯を使用します。

異なる無線技術が、一部の無線スペクトルを共有すると、共存に関する問題が起きることがあります。適切な措置を取らないと、お互いの通信技術に干渉する場合があります。

1台のデバイスで複数の無線通信技術に対応することを、コロケーションと呼びます。コロケーションを行うデバイスで必要な対策を取らないと、干渉が起きるおそれがあります。

3.7 バッファオーバーフロー

バッファは、パソコンやマイクロコントローラのメモリにデータを一時的に記憶することを指します。利用できるメモリには必ず限界があり、各プロトコル層で1つ以上のバッファが必要な場合があります。各バッファには最大容量が決まっています。

デバイス間のデータ送信時に、データは一連のパケットで送信されます。一般的に、デバイスはこのパケットを受信後、バッファ内に一時保存します。パケットはその後、プロトコルスタックの様々な層を通ります。その過程で、他のバッファで一時的に保存されることもあります。

バッファのパケット受信速度が消去速度を上回り続けると、やがてバッファはオーバーフローし、一部のパケットが破棄されます。オーバーフローが発生すると、パケット内のデータが失われ、通信に失敗することがあります。

3.8 単一障害点

通信システムは、当然ながらシステムです。

相互に関係性がある複数のコンポーネントで構成されるのがシステムであり、コンポーネントがシステム全体の信頼性の重要な要素となる場合があります。逆に、重要なコンポーネントが故障すると、システム全体で障害が発生するおそれがあります。このようなコンポーネントを、単一障害点と呼び、

技術やネットワークの設計者は、基本的に単一障害点の無い設計を目指します。

3.9 ソフトウェアの欠陥

システムとしての設計が完璧であっても、実装が不適切であれば問題が発生するし、ソフトウェアには欠陥やバグが含まれる場合があります。アプリや製品のリリース前に、こういった欠陥を見つけて修正するためにテストが行われます。ですが、できる限り厳格なテストを行ったとしても欠陥が検出されず、アプリや製品に信頼性上の問題が生じることがあります。その場合、ユーザーが通信技術自体に欠陥があると誤解してしまうおそれがあります。

3.10 100%の信頼性という幻想

有線、無線に関わらず、現実世界のシステムでは100%の信頼性は達成できません。どのようなシステムでも、データ通信についてもそれ以外の面でも、実に多くの形で障害が発生する可能性があります。ディザスタリカバリに携わる方であれば非常に良くわかるのではないのでしょうか。

信頼性の要求が高く、障害により致命的で受け入れがたい結果が生じる場合は、たとえ障害の発生確率が極めて低かったとしても、障害が発生しても安全を確保できるように、システムにフェイルセーフのメカニズムを導入するのが一般的となっています。

4.0 信頼性が低いとされる無線技術で、高信頼性を実現

Bluetooth®は電波を使います。電波は信頼性が低いものですがBluetooth通信は非常にうまく動作しています。この矛盾はなぜなのでしょう？

これは、電波やプロトコルの使用方法といった、Bluetooth通信システムの設計によるところが大きいのです。

Bluetooth技術はモジュラー形式のシステムで、複数のスタックで構成できるようになっています。

Bluetooth LEコントローラ内蔵のスマートフォンや接続可能な周辺機器には、汎用アクセスプロファイル (GAP) や汎用属性プロファイル (Generic Attribute Profile / GATT)、属性プロトコル (Attribute Protocol / ATT)、セキュリティマネージャプロトコル (Security Manager Protocol / SMP) といったプロトコルに対応したホストコンポーネントが搭載されています。図3aは、この技術スタックを表しています。

Bluetoothメッシュ対応のデバイスにはBluetooth LEコントローラが搭載され、ホスト部分にはBluetoothメッシュネットワーク関連のスタックが搭載されます。図3bは、Bluetoothメッシュの技術スタックを表します。

スタックの構成に関わらず、それぞれのレイヤーは明確に定義された役割と、上下のレイヤーへデータを受け渡す手段を備えています。Bluetooth技術は、このスタックの様々な部分に、信頼性の問題への対策を盛り込んでいます。これはBluetooth技術のあらゆる用途に対応するものもあれば、特定用途にのみ適用されるものもあります。

4.1 全用途向けの機能と対策

まずは、Bluetooth技術のあらゆる用途に対応する信頼性向上のための機能をご紹介します。図4は、Bluetoothのエアインタフェースパケットの一例です。



図3a Bluetooth LEおよびGAP/GATT/ATT対応のスタック構成

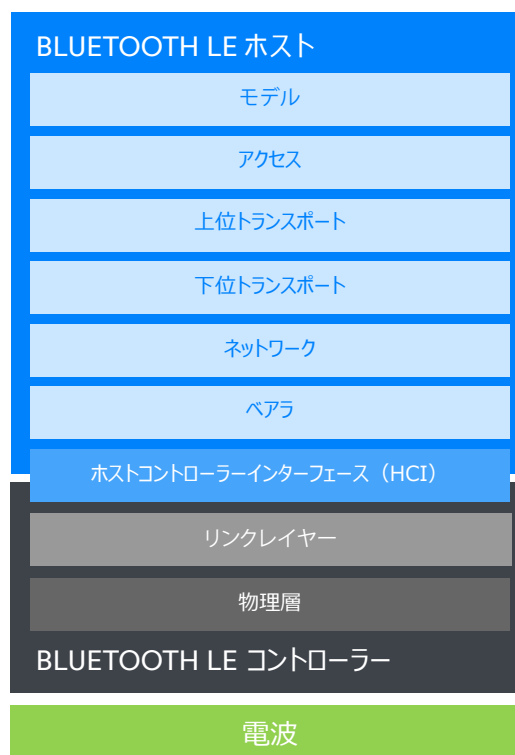
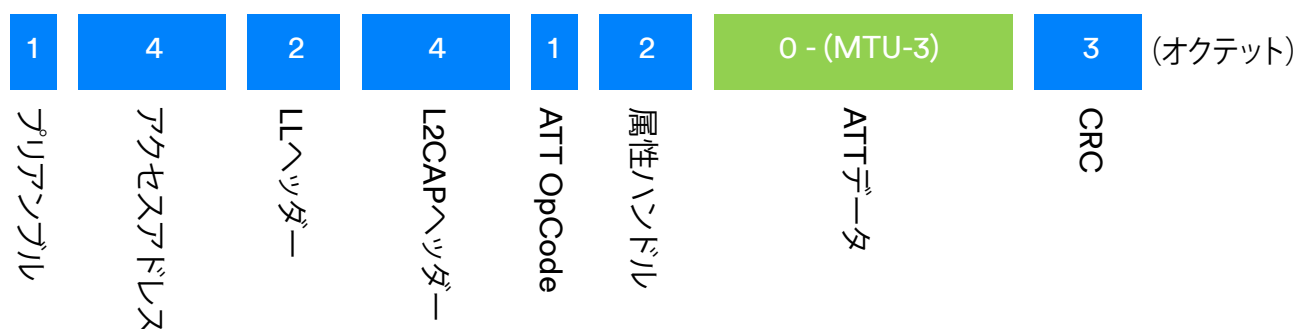


図3b Bluetoothメッシュ対応のスタック構成

エアインターフェースパケット



MTU = 1パケットの最大サイズ (Maximum Transmission Unit)

図4 ATT (属性プロトコル) PDU を含むBluetoothパケットの例

4.1.1 Bluetooth®の変調方式

Bluetooth技術の信頼性の根底にあるのは、デジタルデータをやりとりするために、無線通信をどう使うのかという問題です。Bluetoothは、データの転送に物理層 (PHY) を利用します。

物理層の主要な役割のひとつが、Bluetoothの無線通信を認識し、信号内の符号化されたデータを正確に復号することです。これは信頼性を実現するために必須のプロセスです。

無線通信はアナログで、物理的な現象です。物理学では電波信号を波として表します。電波は電磁エネルギーを持っており、振幅や波長、周波数といった特性を備えています。こういった概念を図5および6で説明しています。

先程説明したように、波の基本的な特性を利用した情報の符号化を、変調方式と呼びます。変調方式には沢山の種類があり、信号の振幅や電波の位相、周波数の変化を利用するものなどがあります。

信頼性が重要な無線通信システムの設計において、特に優れた変調方式が存在します。振幅を利用した変調方式は、ノイズによる干渉の影響をやや受けやすいという特徴があります。一方、この影響を比較的受けないのが周波数ベースの変調方式です。

Bluetooth技術は、GFSK (ガウシアン周波数シフト・キーイング) という特殊なバイナリの周波数シフト・キーイング変調方式を採用しています。これは、各シンボルが0または1の値となる1ビットの情報を有するバイナリの変調方式です。

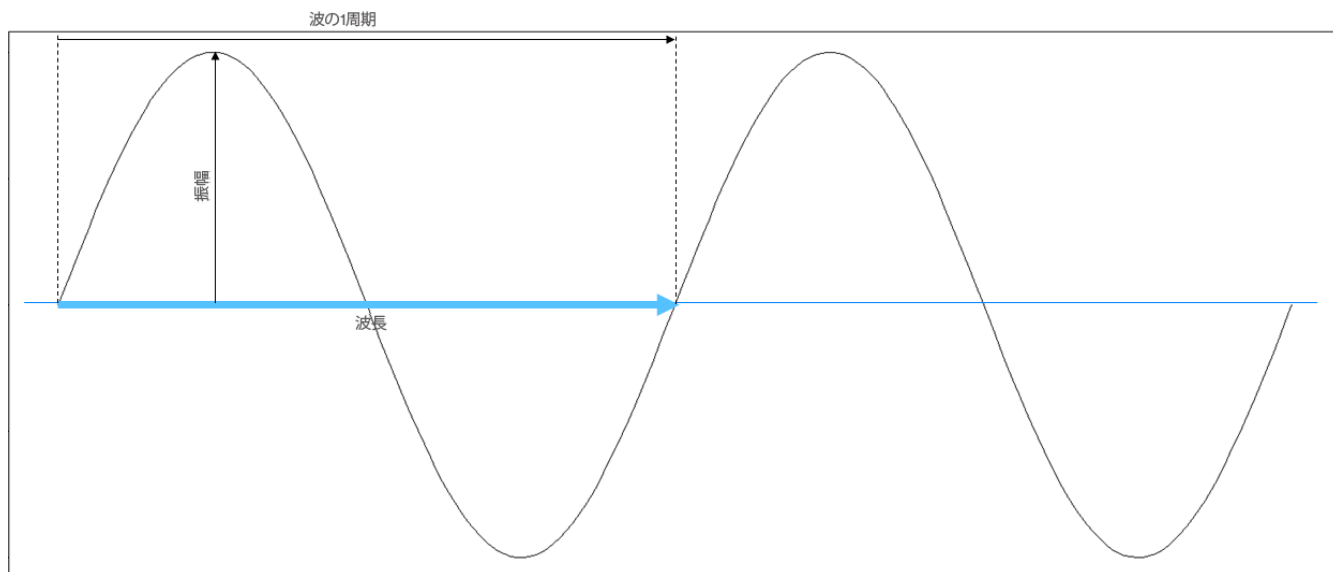


図5 波に関する基本的な特性

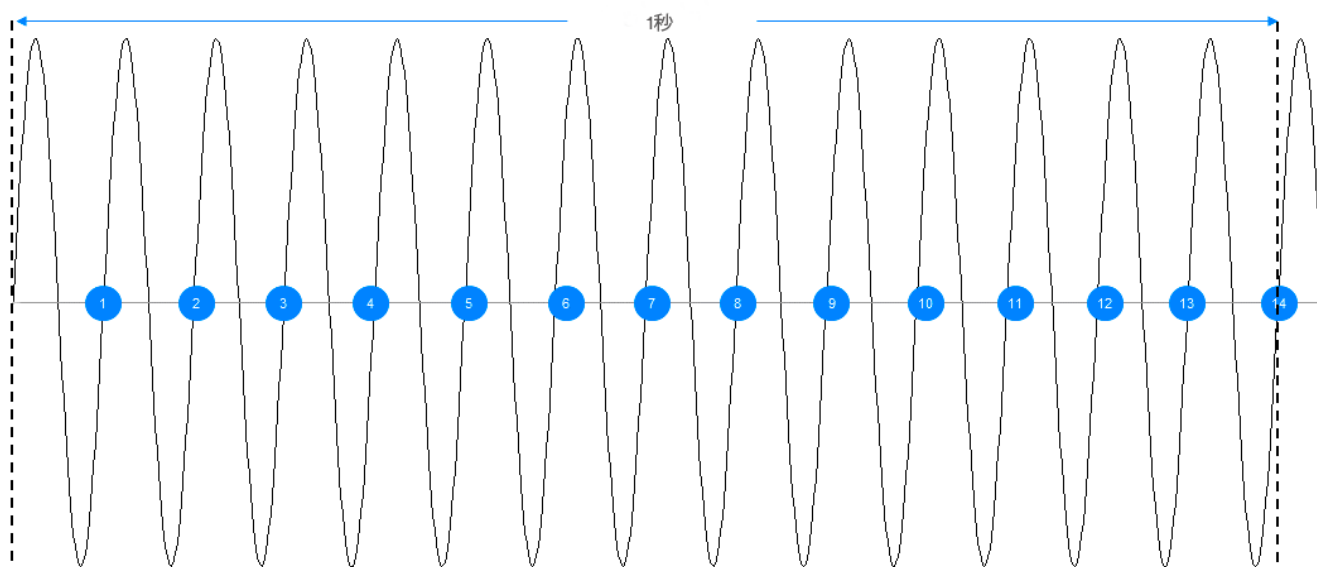


図6 周波数

バイナリ周波数シフト・キーイングは、キャリアと呼ばれる中心周波数を選択し、それを決められた周波数偏差で切り上げて1、または同じ周波数偏差で切り下げて0を表すことでデジタルデータをエンコードします。許可される最小の周波数偏差はBluetooth® コア仕様で規定されており、シンボルレートに依存します。Bluetooth LEの場合は1または2 Msym/sとなります (Msym: メガシンボル)。シンボルレートが1 Msym/sの場合、最小周波数偏差が185 kHz、2 Msym/sでは370 kHzとなります。この設定は、符号化された0、1の値が高い信頼性で認識されるように、慎重に選択します。

FSK (周波数シフト・キーイング) は、シンボルの値が変化するたびに周波数が変化する変調方式です。ですが瞬間的に急激な周波数の変化が起きますとノイズが発生し、干渉の原因となります。さらに、実際の回路では、信号が他の周波数に意図せず漏れる「スペクトル漏れ」が起きる場合もあり、これが発生すると受信機での復号がさらに困難になります。

そのため、Bluetooth® 技術では優秀なFSK変調方式である GFSKを採用、干渉を低減しています。GFSKはガウス関数を活用し、周波数の遷移をなめらかにしています。これによりノイズが低減する他、スペクトルの幅を狭くして他の周波数との干渉をできる限り減らすフィルタも活用しており、一般的なFSKよりも優れた特性を有します。

4.1.2 プリアンブル - Preamble

Bluetooth LEパケットの最初のフィールドは、「Preamble、プリアンブル」と呼ばれます。プリアンブルは8ビットで、1と0のバイナリパターンで表されます。プリアンブルの機能は、それ以降のバイナリ情報のエンコードに使う周波数を発見し、受信デバイスに提供することにあります。また、無線の信号強度を最適化するゲインの自動制御にも使われます。

パケット受信の信頼性を高めるには、まず信号の周波数を正確に設定し、無線機のパラメーターを最適な状態に定義することが重要です。

4.1.3 アクセスアドレス

Bluetoothコントローラがチャンネルデータのスキャンを行っているときは、チャンネルが定義する周波数の範囲内のあらゆる無線信号を受信します。そのため次の信号を受信する可能性があります。

- そのデバイスに送信されたBluetoothパケット
- そのデバイスへの送信を目的としないBluetoothパケット
- 現在スキャン中のBluetooth無線チャンネルの周波数を使用し、同一のISMバンドで動作する、他の無線通信技術のパケット
- 周囲のノイズ

Bluetoothコントローラは、上記の信号を区別し、デバイスに送信されたエンコードされたBluetoothパケットを正確に拾い出し、それ以外を無視する必要があります。

そのため、Bluetoothパケットには必ず32ビットのアクセスアドレスが含まれています。このアクセスアドレスにより、ほぼ確実に対象の信号を迅速に拾い出し、それ以外の信号をすぐに破棄します。

アクセスアドレスには2つの種類があります。

アドバタイジングのアクセスアドレスは、大半のアドバタイジングパケットが使用しており、相関性に優れる「0x8E89BED6」で固定されています。相関は、特定の信号パターンの認識に使用する数学的なプロセスを指します。

2台の接続されたデバイスが通信中に交換するパケットにはアクセスアドレスが含まれており、接続に関連する全パケットを一意に識別するリンク層によって割り当てられた値を持っています。生成されたアクセスアドレスの大半はランダムな値ですが、アクセスアドレスについて正確かつ信頼性の高い認識を行うために設計されたルールが設けられています。

特定の定期的なアドバタイジングチェーン、特定のBIS(ブロードキャスト非同期ストリーム)関連のパケットには、それぞれ固有のアクセスアドレスが含まれています。

このアクセスアドレスにより、受信デバイスに関連する信号を選択できるようになります。アクセスアドレスの確認は、Bluetooth®スタックのリンクレイヤーが行います。

アクセスアドレスは32ビットなため、周囲の電磁ノイズをBluetooth信号として拾う可能性は極めて低くなっています。さらに、可能性は低いですが、もし周囲のノイズが受信デバイスのアクセスアドレスと一致した場合であっても、ビットストリームがBluetoothパケットではないことをすぐに判断します。

Bluetooth受信デバイスの通信信頼性を高めるには、該当する信号だけを素早く判断し、それ以外の信号を無視することも重要になります。

4.1.4 CRC (巡回冗長検査、Cyclic Redundancy Check)

Bluetoothパケットには、必ずパケットの最後付近にCRC (巡回冗長検査、Cyclic Redundancy Check) というフィールドが含まれています。CRCは、コリジョン等が原因で送信データが意図せず変更された場合に検出するシステムで、広く使われています。

リンクレイヤーが新たなパケットを出すと、CRCアルゴリズムを用いてパケット内の他のビットに関するCRC値を算出し、それにより得られた24ビットの値がパケットに追加されます。

受信デバイスがパケットを受信すると、リンクレイヤーがCRCを再計算し、計算値を受信パケットに含まれるCRC値と比較します。2つの値が異なる場合、送信パケットで変更されたビットがあると判断し、そのパケットを破棄します。

ただし、CRCはセキュリティのためのメカニズムではないことに注意してください。パケットは意図的に変更される場合もある他、CRCの再計算も簡単に行うことができます。

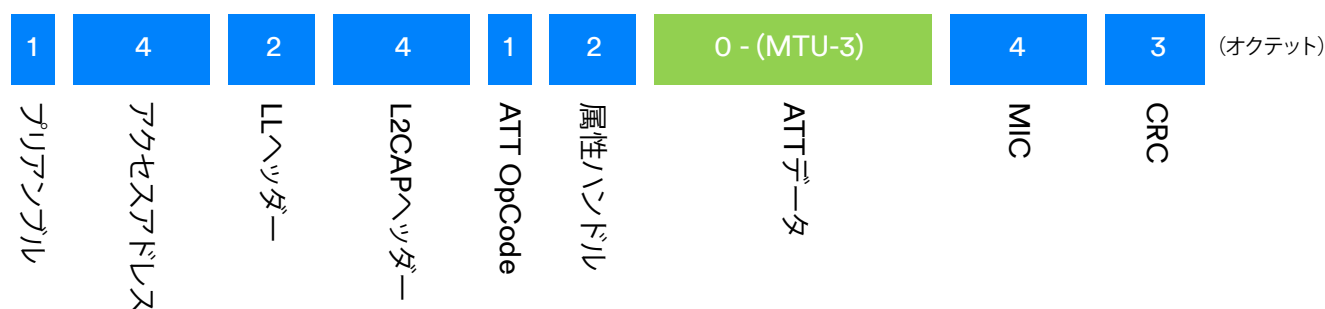
4.1.5 MIC (メッセージ完全性コード、Message Integrity Code)

Bluetooth LEのパケットは暗号化されている場合があります。暗号化されたパケットには、必ずMIC (メッセージ完全性コード、Message Integrity Code) というフィールドが含まれています。MICはMAC (メッセージ認証コード) と同じものです。ですが通信分野では他にもMACという略語があるため、Bluetooth仕様では、MICを使用しています。

MIC自体は信頼性に関する機能ではありません。MICはセキュリティ機能で、パケットの内容を意図的に改ざんしようとする試みの検知を目的としています。ですが、Bluetoothは信頼性について「送信データが受信データと同一であること」と定めています。そのため、意図的かどうかを問わず、変更への対応策としてMICも信頼性関連の機能に含んでいます。

安全ではない通信は、信頼できる通信とは呼べないはずです。

エアインターフェースパケット



MTU = 1/パケットの最大サイズ (Maximum Transmission Unit)

図7 MICフィールドを含む暗号化されたBluetooth LEパケットの例

4.1.6 スペクトラム拡散

Bluetooth® 技術は、2.4 GHz ISMの無線周波数帯を使用します。2.4 GHz ISMは、「2.4 GHzという単一の周波数」ではなく、「2400 MHzから2483.5 MHzの周波数帯」を指します。Bluetooth LEでは、この周波数の範囲を2 MHz幅の40チャンネルに分割して利用しています。Bluetooth BR/EDRでは、1 MHz幅の80チャンネルに分割しています。

これらのチャンネルには、0から始まる番号が付けられています。チャンネル0の中心周波数は2402 MHzで、ISM 2.4 GHzバンドの開始部分から1 MHzの余裕をもたせて最小周波数が設定されています。チャンネル39の中心周波数は2480 MHzで、ISM 2.4 GHzバンドの終わり部分まで2.5 MHzの余裕をもたせています。

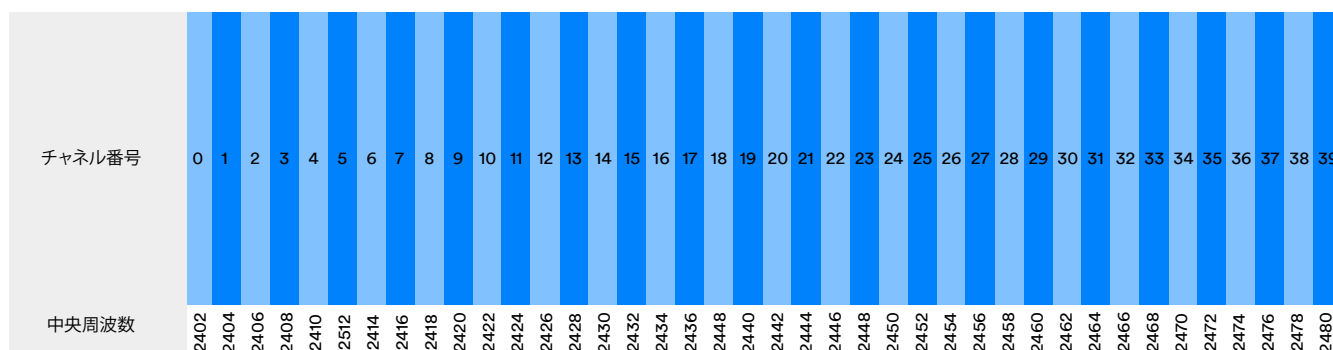


図8 2.4 GHz ISMバンド上のBluetooth LEチャンネル

図8は、ISMバンドにおけるBluetooth LEの分割された無線チャンネルを表しています。チャンネル番号は0～39まで連続で設定されています。一方、第4.2.2章で述べるチャンネルインデックスは、ISMのチャンネルに関して異なる方法で割り当てています。

Bluetooth® 技術を使ったデータ通信では、複数の無線チャネルを使用します。これにより、コリジョンや干渉が発生しやすい混雑した無線環境でも信頼性の高い通信が可能となります。

このように複数の周波数を使用することをスペクトラム拡散と呼びます。Bluetoothは、スペクトラム拡散の無線通信技術でもあるのです。様々な用途におけるスペクトラム拡散の使用方法については、第4.2、4.3、4.4章で詳述します。

4.1.7 共存およびコロケーション問題への対応

様々な無線技術が同時に同じ無線周波数帯を使用すると、様々な問題が起きる可能性があります。特にコリジョン（第3.1章を参照）等により、他の通信技術の通信を妨害すること考えられます。こういった問題をまとめて共存問題と呼びます。Bluetooth以外にも、Wi-Fi、コードレスのDECT方式の電話、電子レンジ等はいずれも2.4 GHz ISMバンドで動作し、こうした技術やデバイスとの間で共存問題が発生する可能性があります。

Bluetoothでは、主にスペクトラム拡散技術で共存の問題に対処しています。2台のデバイスを接続する場合において、このスペクトラム拡散を使った特殊技術を使用することで、Bluetoothは大きな信頼性を実現しています。これについては第4.2章でご説明します。

「コロケーション」は、同じデバイス内に異なる通信技術をサポートする複数の無線技術が搭載されていることを表す用語です。同じデバイス内でも、異なる無線技術間で干渉が起こる場合があります。4Gの携帯電話システムに使われるように、LTEは2.4 GHz ISMに隣接する周波数帯域で動作するため、一方が送信中にもう一方を受信できないといった問題が起きる場合があります。コロケーション問題の大半はBluetoothコア仕様の対象外ですが、実装者へのアドバイスとして対策が記載されており、無線間の干渉を低減するフィルタや、無線のタイムスロットのスケジューリング等の実装が推奨されています。

無線タイムスロットのスケジューリングは複雑な対策で、無線技術の使用・不使用を設定します。スケジューリングについては、Bluetoothコア仕様の対象となっています。一方、他の無線技術とのコロケーション問題や、OS関連等の考慮事項や制約については対象外です。一方、SAM（スロットアベイラビリティマスク）という機能も定義されています。これにより、2台のBluetoothデバイスがお互いに使用可能なタイムスロット情報をやり取りし、それに基づいて各デバイスのスケジューリングを最適化、コロケーションによる干渉が発生しやすいタイムスロットの使用を避けられるようになっています。

4.1.8 LE Coded PHY

Bluetooth LEの無線の使用方法は3種類あります。これはPHYという略語で呼ばれる物理層に関連しています。この3種類のPHYは以下の通りです。

- LE 1M：シンボルレート 1 Msym/s
- LE 2M：シンボルレート 2 Msym/s
- LE Coded：シンボルレート 1 Msym/s + FEC (前方誤り訂正)

LE Coded PHYは、LE 1M PHYの場合より受信デバイスが送信デバイスから離れるまでBER 0.1%とならないように、受信デバイスの感度を増幅します。

LE Codedは、Sというパラメーターを2または8に設定して使います。Sが2の場合、LE Codedの通信信頼性が確保できる範囲がおよそ2倍になります。Sが8の場合、この範囲はおよそ4倍になります。

LE Coded PHYでは、より長距離での信頼性を確保するにあたって、各パケット内の余分なデータを付加し、前方誤り訂正と呼ばれる計算方法でエラーを検出し、訂正を行っています。これにより送信出力が増えることはありません。ですが範囲を拡大するとデータレートは低下し、Sが2の場合は500 Kb/s、Sが8の場合は125 Kb/sとなります。

LE Coded PHYの主な目的は範囲を広げることですが、より長距離での通信信頼性を確保するため、信号強度を下げてビットエラーの発生率を下げています。

4.2 Bluetooth®の接続型通信における信頼性

ここからは、Bluetoothデバイス2台の接続時の信頼性についてご説明します。

4.2.1 接続

複数台のデバイスに同時接続することも可能です。その場合はタイムシェアリング機能により、複数台の間で無線使用の分割を行います。Bluetooth LEデバイス2台を接続すると、以降の通信方法を規定するいくつかのパラメーターを共有します。その中でも重要なのが、デバイスによる無線の使用頻度を制御する接続間隔のパラメーターです。

Bluetoothでは接続間隔の開始により、「接続イベント」が発生すると定義しています。これにより1台目のデバイス(中心デバイス)がパケットを送信します。この接続間隔で動作する、接続されている2台目のデバイス(周辺デバイス)は、パケット受信の準備を整えます。150マイクロ秒の遅延後に中央デバイスがスキャン状態に切り替わり、その後に周辺デバイスが送信を行います。この正確なタイミングでのパケット交換は、接続イベント中に何度も繰り返される場合があります。この実装についてはBluetoothコア仕様の範囲外となります。

これにより正確な時間間隔で各接続が行われ、接続デバイスがお互いに完全に同期して、正確なタイミングでパケットを送受信できるようになります。パケットが送信されると、対象デバイスは必要に応じてスキャンを行い、パケット受信の準備を整えます。

図9は、4台のデバイス間での無線接続の共有例を簡略化して示しています。いずれの接続も接続間隔は同一で、接続イベントで同じ数のパケットを交換していますが、実際の接続では必ずしもそうとは限らないことにご注意ください。

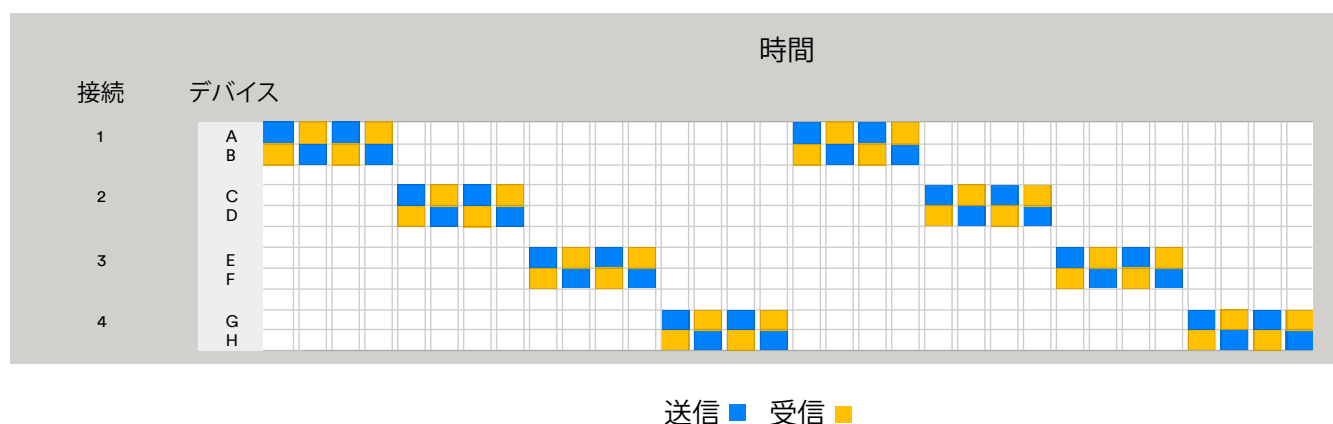


図9 接続の利用および無線の共有について簡略化した図

4.2.2 適応型の周波数ホッピング - Adaptive Frequency Hopping

コリジョンは無線通信における大きな課題の1つで、特に混雑している無線環境では大きな問題となる場合があります。第3.1章で解説した通り、コリジョンは2台以上のデバイスが同じ無線チャンネル上で重複した時間帯にデータを送信する場合に発生します。Bluetooth® やWi-Fiといった異なる無線技術が同一の無線スペクトルを使用する場合に互いに干渉する可能性があります。

Bluetooth技術はこの対策として、スペクトラム拡散を用いています。また、2台のデバイスの接続においては、適応型周波数ホッピングという技術が使われています。

第4.2.1章に記載の通り、各接続イベントにおいて、2台の接続デバイスは、正確な時間間隔で無線通信とパケットの交換を行います。さらに、各接続イベントの開始時には周波数ホッピングが発生します。これにより、チャンネル選択アルゴリズムに基づいて利用可能なチャンネル内から無線チャンネルが選択されます。その後、選択したチャンネルに接続中の各デバイスが切り替わり、一連の接続イベントを実施します。2.4 GHzバンドに分散したチャンネルを頻繁に変更しながら通信を実施するため、コリジョンの発生率が大幅に低下します。

接続デバイスは、Bluetooth LEの通信用に定義された40チャンネル中、37のチャンネル（汎用チャンネルと呼ばれる）を使用できます。

接続デバイス間の通信信頼性に大きく貢献する周波数ホッピングですが、Bluetoothはさらに一歩進んだ取り組みを行っています。

環境によっては、干渉等が理由でBluetooth® 無線チャンネルの一部がうまく機能しない一方で、他のチャンネルが信頼を確保しながら機能している場合があります。また、範囲内の他の無線通信デバイスが変化することで、この信頼できるチャンネルと信頼できないチャンネルは変化することがあります。

そこで接続の主デバイスは、チャンネルマップにより、動作しているチャンネルを使用、それ以外を不使用中に分類します。チャンネルマップは、リンクレイヤーを通じて各デバイスと共有されます。これにより使用するチャンネルと回避するチャンネルについて接続デバイス間で同じ情報を共有します。

各デバイスは、各チャンネルの動作状況を、実装側の技術で監視します。それまで動作していたチャンネルがうまく動作しなくなったとデバイスが判断すると、チャンネルマップを更新します。逆に、それまでうまく動作していなかったチャンネルが、正常に動作していると判断した場合も、チャンネルマップを更新します。チャンネルマップの更新は2台目のデバイスと共有されます。このように、Bluetoothは動作状況が良いと分かっているチャンネルのみを使用し、問題のあるチャンネルを回避する機能を有します。このチャンネルマップは常に最新の状態に保たれており、最適なチャンネルがサブセットとして利用されます。Bluetoothの適応型周波数ホッピングが、「適応型」と呼ばれているのはこのためです。

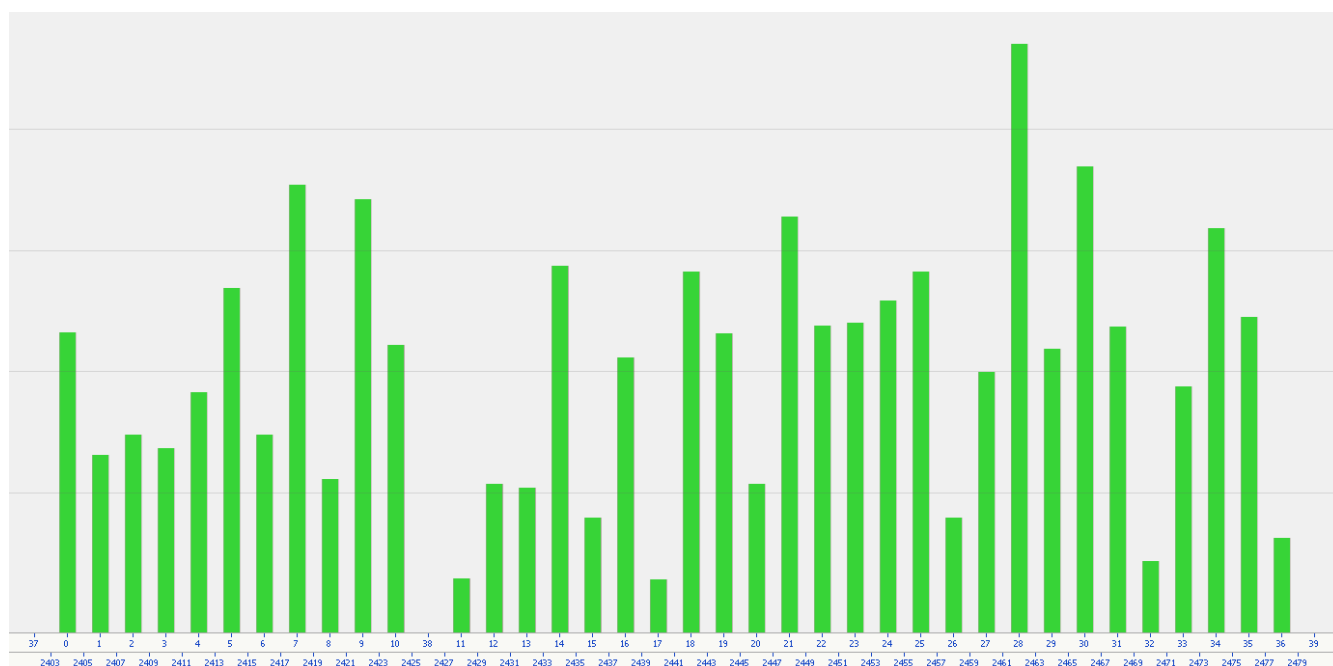


図10 適応型周波数ホッピングを使った通信のチャンネル分布

図10は、2台の接続デバイスによるBluetoothチャンネルの使用テストの様子です。ISM 2.4 GHzバンドで非常に効果的に無線通信が行われていることが分かります。チャート下部には、チャンネルインデックスと周波数 (MHz単位) が表示されています。チャンネルインデックスについては第4.3章で改めてご説明しますが、無線チャンネルを間接的に参照するための手段になります。

4.2.3 リンクレイヤーにおける順序付けと肯定応答

Bluetooth® LEのリンクレイヤーでは、接続デバイス間である種の通信を行うことで、データが正しい順序で処理されているか、パケットの受信が肯定されたか、次のパケットに移るか、前のパケットを再送信するかを確認します。

リンクレイヤーのデータパケットには、通信信頼性を確保するための重要なフィールドが必ず3つ含まれています。それがSN（シーケンス番号）、NESN（予想される次のシーケンス番号）、そしてMore Data（モアデータ）フィールドです。この3フィールドはいずれも1 bitデータで、これを使用して受信パケットの正しい順序の通知と肯定応答を行います。

通信開始時には、主デバイス（デバイスA）からリンクレイヤーでSNおよびNESNがゼロに設定されたデータパケットが送信されます。これ以降、問題がない限り、デバイスAはSNフィールドの値を0と1の間で順番に変化させたパケットを設定して送信します。そのため、2台目のデバイス（デバイスB）は次に受信するパケットで予期されるSN値を把握できます。

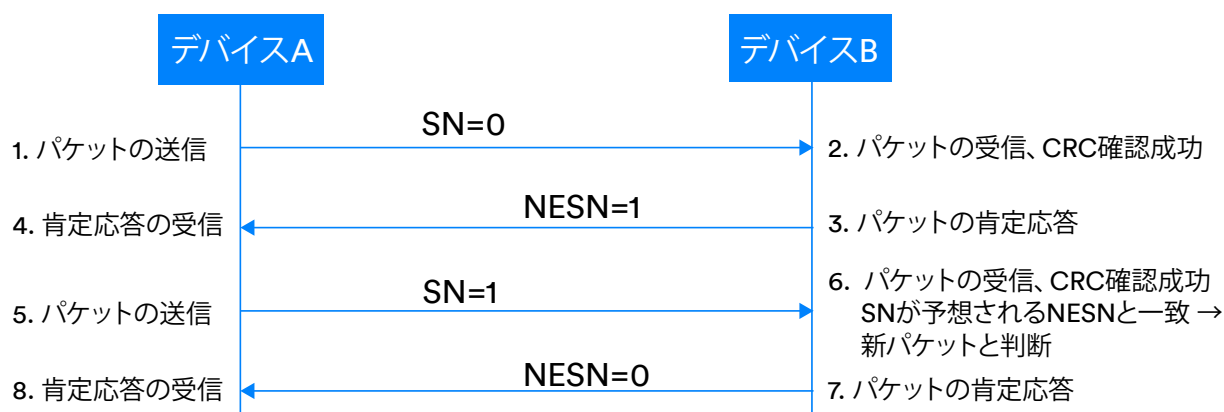
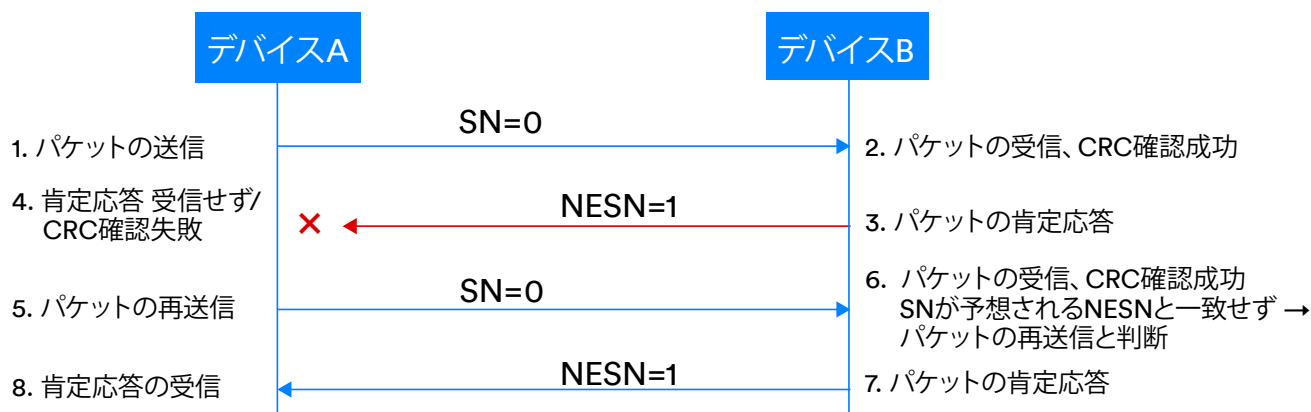


図11 リンクレイヤーにおけるパケット交換の成功例

デバイスBがデバイスAから予期されるSN値のパケットを受信すると、NESNが論理値NOT (SN) に設定されたリンクレイヤーのパケットで応答します。そのため、例えば受信したSN値が1の場合は応答するNESNは0になります。

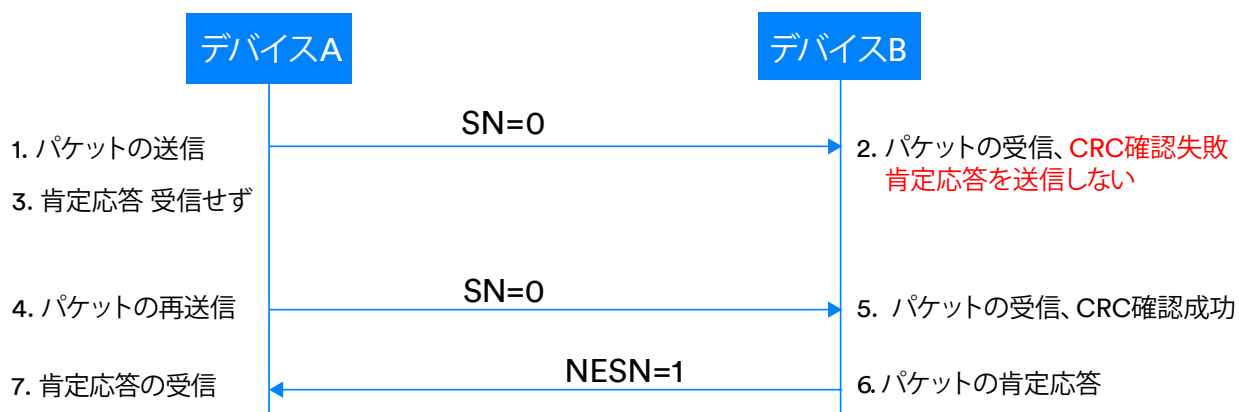
そしてデバイスAが、NESNが「次のパケットでSNに使われると予期される値」に設定された応答をデバイスBから受信すると、デバイスAはこれをデバイスBからの肯定応答とみなします。これにより最後に送信したパケットが正しく受信されたことが確認されます。

一方、デバイスBが誤ったSN値のパケットを受信すると、デバイスBはそのパケットを前に受信したパケットの再送と仮定します。肯定応答は行いますが、このパケットが、以降の処理のためにスタックに送られることはありません。



デバイスAが、デバイスBからの応答で予想しないNESN値を受信した場合や、応答自体を受信できなかった場合、デバイスAは元々と同じSN値の packets を再送信します。通信が失敗したとみなすまでに再送信する回数については、コントローラごとにアルゴリズムを実装して設定できます。

第4.1章で説明したように、全ての packets にはCRCフィールドが含まれており、暗号化された packets にはMICフィールドも含まれています。 packets を受信すると、リンクレイヤーはCRCを確認し、CRCがあればMICを確認します。この確認に失敗すると、 packets の肯定応答は行われません。その場合は、基本的に packets の発信デバイスが再送信を行います。



4.2.4 フロー制御

Bluetoothの技術スタックが対処している信頼性の課題は、データのやりとりに無線を使用することで起きるものが多く含まれています。ですが、有線通信でも問題となるような信頼性における課題も存在します。

あるデバイスが他のデバイスにデータを送信する場合、データは一連の packets で送信されます。受信デバイスの packets 処理が十分に速くなく、バッファの最大容量に達すると、 packets および含まれるデータを廃棄せざるを得なくなる場合があります。この問題については第3.7章でご説明しています。

フロー制御は、データ通信が受信デバイスやコンポーネントで収容可能な速度で行われたことを保証するためのプロセスです。

Bluetooth LEでは、リンクレイヤーでシンプルな形式のフロー制御が利用可能です。2台目のデバイスが応答時にNESNを更新しないと(第4.2.3章を参照)、1台目のデバイスは後からパケットの再送信を行います。ですが元のパケットは既に受信処理されているため、再送信されたパケットは破棄されます。これにより、処理待ちの新しいパケットの受信が遅れます。

L2CAP (論理リンク制御および適応プロトコル、Logical Link Control and Adaptation Protocol) では、第4.2.5章に記載のEATT (拡張属性プロトコル、Enhanced Attribute Protocol) で使用する「Enhanced Credit Based Flow Control (拡張クレジットベースのフロー制御モード)」といったより高度な複数のフロー制御モードに対応しています。特にクレジットベースのフロー制御はこの課題に対処するためのアプローチで、次のように動作します。

- 送信デバイスは、(バッファオーバーフロー等で) データを損失せずに受信デバイスが処理できるPDU数を把握します。
- 送信デバイスは、受信デバイスのこの容量制限の値でカウント設定を行います。送信デバイスからPDUが送信されるたびに、このカウント数が減少していきます。カウント数がゼロになると、送信デバイスは受信デバイスの容量が一杯になったと判断し、受信デバイスがバックログを処理する間、一時的にPDUの送信を停止します。
- 受信デバイスがバッファからPDUを読み込んで処理すると、処理数を送信デバイスに送り返します。この値の分、カウント数が増加します。カウント数が0でなければ、送信デバイスはPDUの送信を続けることが可能です。

4.2.5 ATT (属性プロトコル) とEATT (拡張属性プロトコル)

4.2.5.1 ATT処理

Bluetoothデバイスは、サービスや特性、記述子といった特殊なデータエンティティを含むことができます。こういったデータエンティティを「属性」と呼びます。属性は、全て属性テーブルというグループ内で整理されています。ATTクライアントは、遠隔で接続されたデバイス (ATTサーバー) の属性テーブル情報を参照するためにATT (属性プロトコル) を使用します。クライアントとサーバーは、属性プロトコルを介して様々な方法で互いに通信可能です。

ATTは、やり取りのコンセプトを定義します。クライアントが要求するPDUには、サーバーが返信する応答PDUが必要です。サーバーからの送信指示に対し、クライアントは確認用のPDUを返信する必要があります。要求・応答または指示・確認の組み合わせをトランザクションと呼びます。トランザクションは、要求・指示が正常に受信され、スタックのATTレイヤーで処理されたかを示す、信頼性に関する仕組みです。

ATTのPDUの大半はトランザクション指向ですが、ATTには指示と通知というトランザクションに関連しないPDUも含まれています。リンクレイヤーは、肯定応答によって、遠隔デバイスによるATT PDUの受信確認を行います。また、受信できない場合は、送信デバイスが確実に障害を検出します。一方、トランザクションではないATT PDUは、PDUを受信してリンクレイヤーで確認しても、Bluetooth®スタックの上部で、バッファオーバーフロー等が原因で破棄されてしまう可能性があります。そのため、こういったATT PDUは信頼性が低いとみなされます。

EATT (拡張属性プロトコル) はATTを改良したプロトコルで、L2CAPの「Enhanced Credit Based Flow Control (拡張クレジットベースのフロー制御)」モードを用います。EATTにフロー制御を使用することで、EATTのトランザクションでない部分についても信頼性が高いとみなすことができます。

4.2.5.2 書き込みのキュー

デバイス特性にデータを書き込むにあたり、複数の手順を踏む必要がある場合があります。例えば書き込みデータ量が対応する最大送信単位 (MTU、Maximum Transmit Unit) サイズを超える場合などです。こういった場合は、一連の書き込みについて、それぞれ成功した場合にのみ有効となるのが一般的です。そのうちの1つでも書き込みに失敗すると、一連の書き込み動作前の状態に特性データの値をリセットする必要があります。トランザクションとデータ変更に関するこの「全体を処理するか、何も処理しないか」というアプローチを、原子性と呼びます。

複数手順の書き込みにおいて、データの完全性と、動作全体での原子性を確保するため、ATTは書き込みのキューを可能にするPDUを提供しています。ATTクライアントは、ATTサーバーにATT_PREPARE_WRITE_REQ PDUを送信します。このとき各PDUには送信全体の値の一部が含まれており、サーバーはATT_PREPARE_WRITE_RSP PDUで応答します。応答PDUには、送信側が値を確認できる形で書き込まれたデータのコピーが含まれます。

要求された書き込みを全て実行し、各要求の処理に成功したことを示す応答を得た場合、ATTクライアントはATT_EXECUTE_WRITE_REQ PDUで処理を完了し、サーバーはATT_EXECUTE_WRITE_RSP PDUを生成してクライアントに送信します。サーバーがATT_EXECUTE_WRITE_REQを受信すると、それ以前のATT_PREPARE_WRITE_REQ で受信した新しい値が収納されます。

4.2.6 LE出力制御 - LE Power Control

Bluetooth LEは、製品の省電力化を設計目標としています。消費電力に影響を与える要素の1つとして、製品設計者はデバイスの送信出力レベルを考慮する必要があります。送信出力レベルは、スマートフォン等の通信対象のデバイスや、製品の一般的な動作範囲等に基づいて決まります。

この出力と消費電力のバランスを取る中で、設計者が選択した送信出力レベルにおける通信範囲の限界付近でユーザーが製品を使用するといった状況が発生します。この中で、伝搬損失およびS/N比 (第3.4章を参照) の低下によるエラーが発生しやすくなります。CRCの障害とそれに伴う再送信によって通信速度が遅くなる場合や、ひどくなると接続が切断されることもあります。

Bluetooth LEは、デバイス側で送信出力レベルを動的に最適化し、出力管理を行うダイナミックパワーコントロール機能を備えています。RSSIを監視する受信デバイスは、いずれの方向についても相手側の送信出力レベルの変更を要求できます。例えば、RSSIが低くなった場合に相手側のデバイスに送信出力を上げるよう要求したり、RSSIが高くなり飽和しそうな場合は、相手側に送信出力を下げるように要求したりすることも可能です。送信デバイスは、送信出力を自律的に変更し、変更時は新たな送信出力レベルを含む様々なパラメーター値を相手側のデバイスに通知します。

LEの出力制御機能は、送信出力レベルが必要以上に大きくならないようにし、デバイスの消費電力を最小限に抑える手段として導入されました。ですが、信頼性の面でもメリットがあります。RSSIを受信デバイスの性能を最大限に確保できる範囲内に保つことで、接続デバイス間の距離が変化しても信号の品質を高く保ち、ビットエラー率を低く抑えることが可能です。

4.2.7 迅速な肯定応答および障害検知

リンクレイヤーの肯定応答は、Bluetooth®スタックの最下層に近い部分で生成されるため、処理が非常に迅速に行われます。一方、例えばTCP/IP等の技術では、肯定応答はスタックの上位層で処理されます。

同一パケットで2つのCRC障害が連続して発生すると、接続イベントはリンクレイヤーによって閉じられ、次のパケットは別の無線チャネルを使用するようになります。リンクレイヤーは、このようなプロセスで問題を検出し、非常に迅速に解決のための対処を実施できます。

肯定応答と障害検出を高速で実行できるため、システムは問題認識と対応を迅速に行えます。

4.3 Bluetoothのコネクションレス型通信における信頼性

本章では、Bluetooth技術を用いたコネクションレス型通信における信頼性について解説します。コネクションレス型の通信では、デバイスが1回の送信で1台以上の受信デバイスにデータを送信できます。コネクションレス型通信は、受信デバイスから送信デバイスへ一切通信を行わない、完全に受動的なプロセスで実施することも可能です。通信デバイスの数に制限がなく、非常にスケーラブルなソリューションとなっています。

4.3.1 コネクションレス型通信におけるスペクトラム拡散

Bluetooth技術では、コネクションレス型通信のプロセスをアドバタイジングと呼びます。アドバタイジングは、従来型アドバタイジングと拡張型アドバタイジングの2種類に分類され、さまざまな方法で実行できます。

コネクションレス型通信は、従来型アドバタイジングか拡張型アドバタイジングかに応じて、1つまたは2つのスペクトラム拡散技術を用います。

従来型アドバタイジングでは各アドバタイジングパケットのコピーを送信します。このとき、チャネルインデックス37、38、39の最大3つのチャネルを1つずつ使用可能です。図14に示すように、アドバタイジングチャネルの選択は、ランダムな順序で行うアルゴリズムとなっています。チャネルインデックスについては第4.3.2章の説明をご参照ください。

チャンネル37、38、39を、「プライマリーアドバタイジングチャンネル」と呼びます。

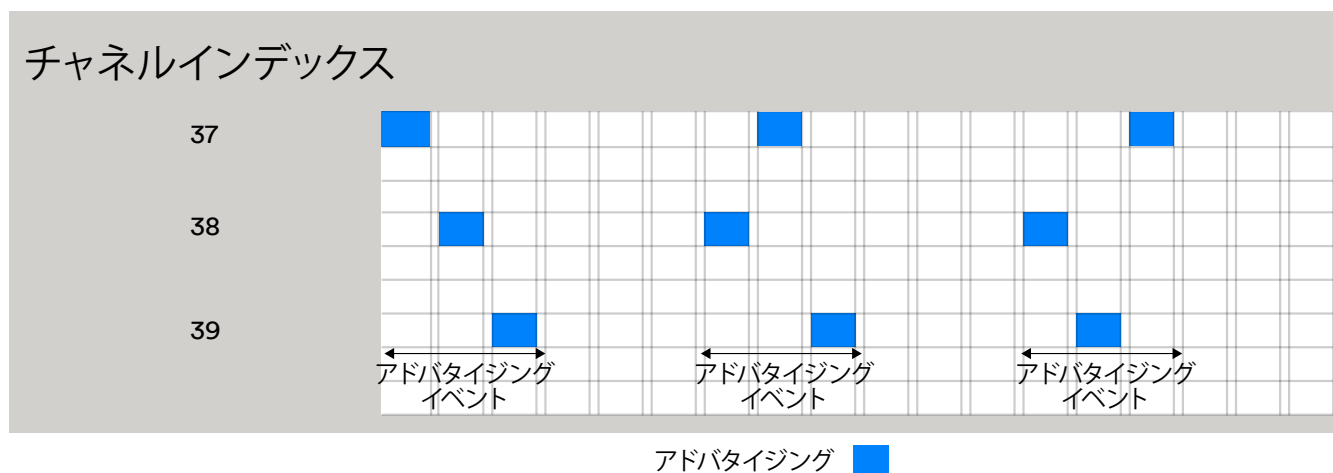


図14 3つのアドバタイジングチャンネルを用いた従来型のアドバタイジング

拡張型アドバタイジングでは、40のチャンネル全てを使用可能です。このとき、プライマリーアドバタイジングチャンネルで送信するパケットのうち1つには、37の汎用チャンネルの1つを介し、別のパケットで送信するペイロードに関するポインター情報を含む必要があります。拡張型アドバタイジングで使用するチャンネルインデックスの選択アルゴリズムは実装側で決定します。ただし、Bluetooth®コア仕様では、コリジョンを避けるため、チャンネルを十分に分散させるよう推奨しています。

データのブロードキャスト時における複数チャンネルの使用は、スペクトラム拡散技術として、無線混雑時のコリジョンリスクを軽減し、コネクションレス型通信の信頼性を高めます。

4.3.2 共存とアドバタイジングチャンネル

Bluetooth LEの無線チャンネルには、2.4GHz ISMバンドの無線周波数の0～39の番号が割り当てられ、昇順で割り振られます。一方、Bluetoothのリンクレイヤーは、チャンネルをチャンネル番号ではなくチャンネルインデックスで選択します。そして周波数とチャンネルインデックスの数字は線形な関係ではありません。

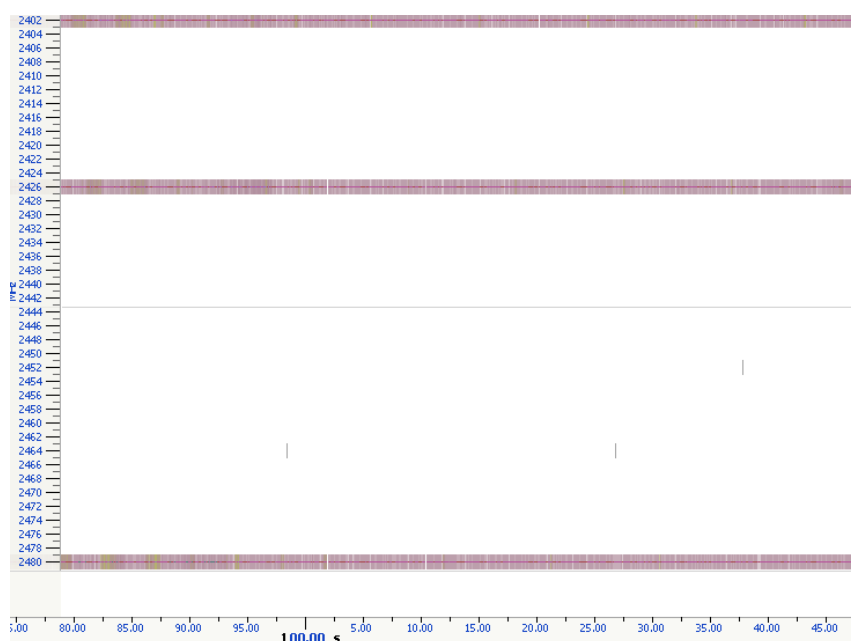


図15 アドバタイジングチャンネルの活動

ISMバンドにおける周波数とチャンネルインデックスの相関関係については、図10をご参照ください。チャンネルインデックスは直線的に上昇するパターンも多く見られますが、それ以外のケースが3つあります。これがプライマリーアドバタイジングチャンネルです。Bluetooth® LEでは、チャンネル37は2402 MHzを中心としたバンドの最下部に設定されています。そしてチャンネル38は2426 MHz、チャンネル39はISMバンドの上部、2480 MHzに設定されています。アドバタイジングチャンネルがこのように不思議な分布となっているのには2つの理由があります。

まず、3つのチャンネルが大きく分離しているのは、ISMバンドの広範囲に渡って強力な干渉を受けた場合でも、継続したアドバタイジングを可能にするためです。アドバタイジングチャンネル3つがもし近くに設定されていれば、この「ディープフェード」と呼ばれる現象が起きた場合に、アドバタイジング全体がブロックされることになります。

そして、Wi-Fiによってチャンネルが利用されるのを防ぐ狙いもあります。

ISMバンド上にこのようにアドバタイジングチャンネルを分散させることで、アドバタイジングの信頼性を高めることに成功しています。図15は、様々なアドバタイジングデバイスで使われる3つのアドバタイジングチャンネルの様子を表しています。

4.3.3 アドバタイジングパケットにおいて繰り返し発生するコリジョンの回避

3つのアドバタイジングチャンネルを抑え、順次に使用することに起因するリスクが存在します。それが、範囲内にある別のアドバタイジングデバイスが、同じチャンネルを繰り返し選択し、ほぼ同時にブロードキャストすることで、各パケットで頻繁かつ繰り返しコリジョンが発生するというリスクです。このリスクは2種類の方法で対処することができます。

1. アドバタイジングのスケジューリングは、タイミングパラメーターであるアドバタイジング間隔と、0～10msのランダムな遅延で制御されます。この間隔の開始と共にアドバタイジングイベントが始まり、リンクレイヤーは、適切なアドバタイジングパケットを一度に1個ずつ、1～3個のアドバタイジングチャンネル(実装側の設定による)上で、なんらかの順序でブロードキャストします。また、全アドバタイジングイベントのスケジューリングにはランダムな遅延がもうけられ、アドバタイジングデバイス間で繰り返しコリジョンが発生しないようになっています。
2. アドバタイジングイベントごとに、使用するアドバタイジングチャンネルを任意の順序で選択できます。各アドバタイジングイベントで使用するアドバタイジングチャンネルの順序を適切にランダム化することで、コリジョンの発生をさらに抑えることができます。

4.3.4 定期的なアドバタイジング - Periodic Advertising

コネクションレス型通信では、受信デバイスと送信デバイスが完全に独立して動作するのが一般的です。そのため、コネクション型通信に比べて信頼性が低下しやすくなります。受信側のデバイスが待ち受けしていないときにデータが送信されることがあり、その場合は、各デバイスから見るとデータが受信できず、失われることになります。その様子を描いたのが図2です。

開発側で、受信デバイスのRXデューティ比を非常に高く設定することで、この問題に対処し、信頼性を向上させることが可能です。これはRXデューティ比を高めることで、送信データの待ち受け時間の割合を大きく高められるためです。ですが、これによりブロードキャストデータを逃す可能性を劇的に減らせる一方で、消費電力も大幅に増加します。

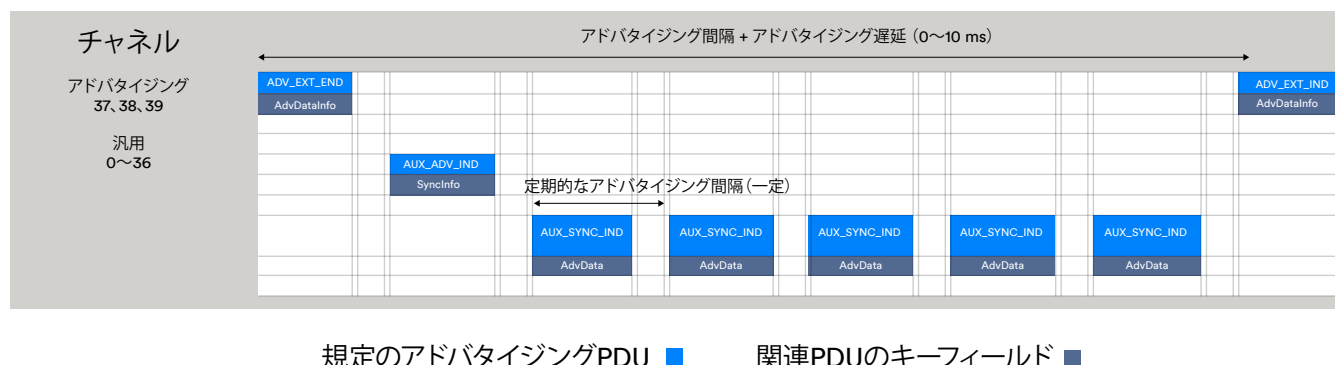


図16 定期的なアドバタイジング

そこで、一部デバイスに向けた別のアプローチも用意されています。Bluetooth® 技術では、定期的なアドバタイジングというオプション機能を提供しています。定期的なアドバタイジングを使用すると、ランダムなタイミングではなく、適応型の周波数ホッピングを活用し、37チャンネル上で一定間隔でアドバタイジングを実施します。受信デバイスも、アドバタイジングデバイスから定期的なアドバタイジングのスケジュール情報を受け取り、待ち受けを正確に同期させられます。これにより、消費電力を抑えつつ信頼性を向上させることが可能です。

定期的なアドバタイジングは、Bluetooth LEが提供する「拡張型アドバタイジング」機能セットの1つで、複数のPDUで動作します(図16を参照)。

4.3.5 ブロードキャスト・アイソクロナス・ストリーム - Broadcast Isochronous Streams

Bluetooth LEで追加された最新機能の1つに、アイソクロナスチャネル (Isochronous Channel) があります。アイソクロナスチャネルでは、複数デバイスが同時にデータを処理できるように、複数デバイス間で時間制約付きのデータ通信を行います。

もともとアイソクロナス通信は、オーディオ分野の製品やシステムのために設計されました。ソースデバイスから複数のシンクデバイスに送られたオーディオデータを同時にレンダリングし、適切に同期した上で再生するための技術でした。ソースで生成されたオーディオデータには、一定の有効時間が設定されます。この時間が経過すると、シンクデバイスで音声を聴く上で影響が発生しないように、オーディオデータは破棄されます。

アイソクロナス通信は、コネクションレス型でも可能です。その場合、Broadcast Isochronous Stream (BIS、ブロードキャスト・アイソクロナス・ストリーム) を介し、データを非常に多くの受信デバイスに届けることができます。

アイソクロナス通信のブロードキャストでは、受信デバイスにパケットの受信肯定手段はありません。そのかわりに、前もって無条件で同一パケットを繰り返し送信することで、BISの信頼性を高めることができます。再送信は異なるチャンネルで送信されます。選択されたチャンネルは、最後に送信したチャンネルから少なくとも6 MHz以上離れている必要があります。この方法であれば、周波数および時間の両方ではらつきが生まれるため、同一または近いチャンネルへの干渉によるパケット損失が起きづらくなります。

4.3.6 「コネクション型」対「コネクションレス型」

一般的に、コネクションレス型通信では、コネクション型の通信よりも信頼性が低くなりがちです。ですが、Bluetooth®では定期的なアドバタイジングやBISの再送信といった機能により、最大限の信頼性を確保しています。また、開発側で使用するパラメーターを調整することで、コネクションレス型通信の信頼性をさらに向上させられます。これについては第5章でさらに詳しく解説します。

4.4 Bluetooth mesh ネットワークの信頼性

Bluetooth meshのプロトコルスタックは、Bluetoothシステムアーキテクチャのホスト部分に置かれています。Bluetooth meshは、Bluetooth LEコントローラおよび標準的なBluetooth LEエアインターフェースのパケット構造を使用しています(図3、4を参照)。こういった設計により、Bluetooth meshの信頼性は向上しています(第4.1章を参照)。

本章では、Bluetooth meshネットワーク内の通信信頼性を高めるための設計についてご紹介します(これまで紹介してきた、Bluetooth LEコントローラ等の基本機能については再度の説明は行いません)。

Bluetooth meshにおける信頼性が、これまで説明してきた分野と異なる要素が1つあります。それが、メッシュネットワークは、ネットワークであるという点です。ネットワークには特有の課題があり、ネットワークにおける信頼性を達成するには、異なる種類のアプローチが必要です。

4.4.1 背景

4.4.1.1 ベアラ - Bearer

Bluetooth meshは、Bluetooth LEコントローラを使用してメッシュPDUを送る複数の方法をサポートしています。これらの方法をベアラと呼びます。ベアラはコネクションレス型とコネクション型の両方に対応しており、それぞれ「アドバタイジングベアラ」と「GATTベアラ」と呼ばれます。一般的に、はるかに多く使われるのがアドバタイジングベアラです。GATTベアラは、特殊なメッシュノード機能である[Proxy機能](#)を使って、スマートフォン等のデバイスをメッシュネットワークの一部として使用する場合にのみ使われます。

4.4.1.2 アドバタイジングベアラ - Advertising Bearer

Bluetooth meshのPDUは、メッシュのアドバタイジングベアラを使うことで、ADV_NONCONN_INDというBluetooth LEアドバタイジングパケット内でカプセル化できます。こういったリンクレイヤーPDUの名称ルールについては、Bluetoothコア仕様、第1部パートEの第3.2.1章に記載されています。これを参照すると、これが標準的なアドバタイジングチャンネル(37～39)で送信する、応答PDUが定義されていない非接続型のアドバタイジングパケットであることがわかります。

要約すると、アドバタイジングデータ内にメッシュPDUを含むADV_NONCONN_INDのアドバタイジングパケットをブロードキャストすれば、メッシュメッセージが送信・公開されます。メッシュノードは、同一タイプのアドバタイジングパケットをスキャンしてメッシュPDUを受信し、以降の処理のためにBluetooth® meshスタックに渡します。

メッシュのアドバタイジングベアラによるADV_NONCONN_IND PDU使用時の信頼性については、いくつか考慮すべき点があります。使用可能なアドバタイジングチャンネルは3つのみで、ここでは基本的なスペクトラム拡散の技術が使われている一方、より高度で信頼性の高い適応型の周波数ホッピングには対応していません。これは、第4.3章で信頼性上の課題について解説したコネクションレス型通信です。

ここで重要なことは、定期的なアドバタイジングは、メッシュPDUのベアラとしては使われないという点です。そのため、メッシュメッセージの発行時にメッシュノードが実行するアドバタイジングのタイミングと、メッシュメッセージの受信を望むノードによるスキャンのタイミングは同期されません。

4.4.1.3 システムを確率で捉える

Bluetooth meshネットワークの通信には、ランダムで予測不可能な要因が多数あります。例えば以下のような点が考えられます。

- ノードのメッセージ発行時に、宛先のノード全てが、受信に適切なタイミングで、適切なアドバタイジングチャンネルで待ち受けをしているか？
- メッセージリレー（中継）に必要なネットワーク経路が、その時点で利用できるか？
- メッセージリレー（中継）を行うネットワークで、大量のメッシュメッセージがコリジョンを引き起こすリスクはないか？

Bluetooth meshネットワークは、性質上ランダム性があり、それに起因する予測不可能な要素を内包する確率的なシステムとして捉えるべきです。これらの要因への対処ができないと、信頼性は非常に低くなってしまいます。そこでBluetooth meshは、目的に合わせたメッセージ指向の信頼性の高い通信をネットワーク内のノード間で実現するため、複数のメカニズムを用意しています。

先程も述べたようにBluetooth meshネットワークは確率的な性質を有しており、その信頼性を理解するには、「原因および結果」という決定論的なアプローチではなく、確率論的なアプローチがより適切になります。

4.4.1.4 RXデューティ比- RX Duty Cycle

コネクションレス型通信を行う場合に、送信パケットの受信率に影響する重要なパラメーターとして、RXデューティ比（第3.3章を参照）が挙げられます。そのため、Bluetooth meshのプロファイル仕様では、「アドバタイジングベアラのみをサポートするデバイスの場合は、メッシュの受信メッセージやプロビジョニングPDUを見逃さないように、可能な限り100%に近いデューティ比でパッシブスキャンを実行する」ことを推奨しています。

Bluetoothのアドバタイジングでは、アドバタイジングベアラは必ず最大で3つのアドバタイジングチャンネルを使用できます。アドバタイジングベアラは、使用中の各アドバタイジングチャンネルで、それぞれメッシュネットワークPDUのコピーを送信します。コリジョンの発生率を減らすため、基本的に3チャンネル全て使用することを推奨します。

一方、受信デバイスにとっては、チャンネルの使用数が増えると、チャンネルあたりのデューティ比が実質削減されます。アドバタイジングチャンネル3つ全てを使用する場合は、各チャンネルの利用可能な時間のうち、スキャンするのは3分の1未満となります。なぜ3分の1未満なのでしょう？それは無線ハードウェアのチャンネル切り替えには時間がかかるため、切り替え時には無線が実質オフになるためです。

補足: 特殊なケースとして、3チャンネル全てにおいてできる限り100%に近い、非常に高いRXデューティ比が要求される場合は、1つの製品に複数の無線デバイスを搭載し、それぞれに1つのチャンネルを担当させることも技術的には可能です。

また、Bluetooth仕様ではアドバタイジングチャンネルの切り替えのタイミングや使用時間を正確に規定していません。そのため、Bluetooth® meshでアドバタイジングベアラを使用する場合は、デバイスおよび使用環境にとって最適な方法で3つのアドバタイジングチャンネルを使用できるような、柔軟な形での実装が可能となっています。

図17をご参照ください。

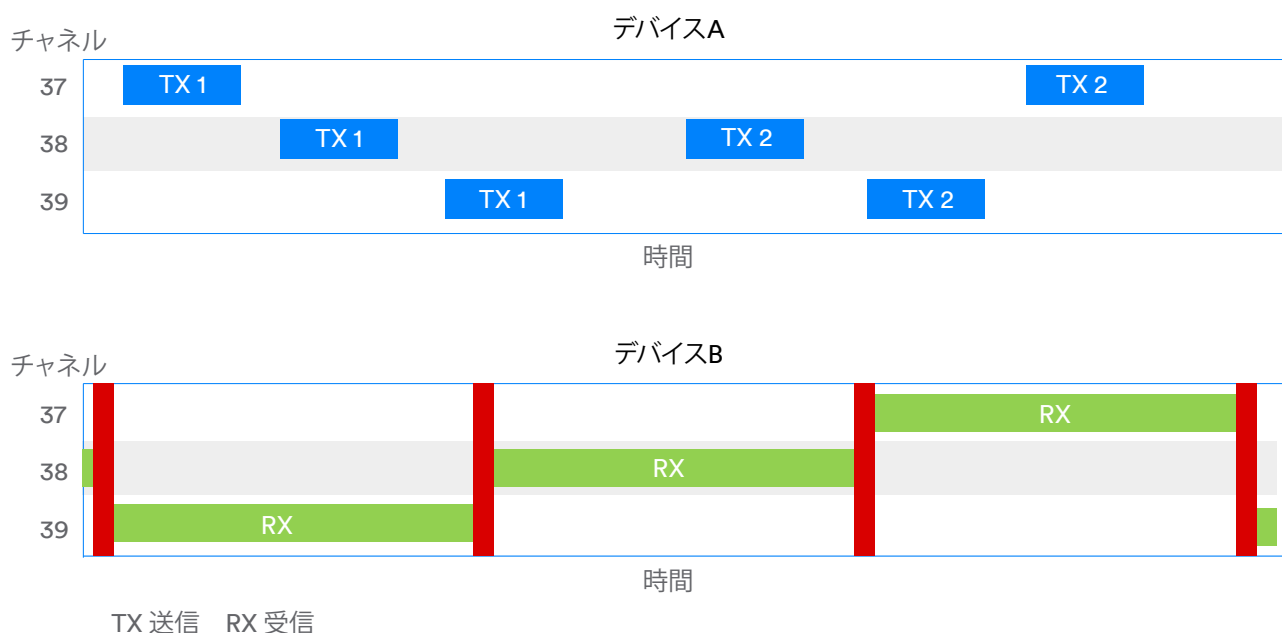


図17 非同期のアドバタイジングとスキャン

図17は、アドバタイジングベアラの使用時に、2台のBluetooth meshデバイスでどのようなことが起きるかの一例です。

デバイスAは、デバイスBに向けてPDUを2つ送信します。2つのPDUのコピーが、それぞれほぼ間をおかず、連続して、一度に1つずつ、3つのアドバタイジングチャンネルに向けてブロードキャストされます。

待ち受け中のデバイスBは、3チャンネルで、それぞれ順番に、間隔をあけて、所定の時間だけスキャンを行います。図の赤色部分は、チャンネルの切り替え中を表します。この短時間中はデータの受信はできません。

最初にブロードキャストされた、3つの「TX1」と書かれたパケットのメッシュPDUは受信されません。ブロードキャスト中、デバイスBは、デバイスAがブロードキャストしているチャンネルをスキャンしません。「TX2」と書かれたパケットは、チャンネル38で受信します。

これが、Bluetooth® mesh ネットワークにおける一般的に予想されうる動作です。チャンネルあたりのRXデューティ比はおおよそ33%以下に収まるため、常に一定の確率でブロードキャストしたパケットが宛先ノードで受信されない現象が発生します。

次の章では、Bluetooth meshにおいてメッセージを届ける確率を高めるための方法をご説明します。

4.4.2 信頼性の高いBluetooth meshネットワークを実現するために

4.4.2.1 ネットワークの効率活用

繰り返しコリジョンと、それによるネットワークの動作障害が発生する確率は、発行メッセージによる論理的な動作を無線スペクトルでどうサポートするかによって変わります。

Bluetooth meshは、共有した無線スペクトルを効率的に利用することで、コリジョンのリスクを軽減するように設計されています。例えば、

- PDUの長さは最大でも29オクテットです。一般的に、デバイスのオンオフ切り替えに使用するメッセージの長さは22オクテットしかありません。メッシュPDUを含むBluetooth LEパケットには、いくつかのデータが加わる場合がありますが、追加される長さは18オクテット程度に過ぎません。
- Bluetooth LEは、省電力無線通信の中で通信速度が最も速く、Bluetooth meshにおけるシンボルレートは1 Msym/sです。
- スペクトルの使用がネットワーク関連部分に限定されるように、TTLフィールドでメッセージのリレー回数を制御します。
- Bluetooth meshは、照明制御用に分散型アーキテクチャを採用しています。制御ロジックには物理的に独立した専用制御ユニットを使わず、照明ノード内のソフトウェアという形で実装されています。このアーキテクチャはネットワークの利用に大きな影響を与え、中央集中型のアーキテクチャと比べると、トラフィックが1%未満になる場合もあります。

小さなパケットを高速の無線通信で送るため、各動作における無線スペクトルの使用時間が非常に短くなり、コリジョンの発生率が極めて小さくなります。

Bluetooth SIGのウェブサイトで公開されているBluetooth meshおよびスケーラビリティに関する記事で、これに関する詳細な説明をご覧ください。[bluetooth.com/mesh-scalability](https://www.bluetooth.com/mesh-scalability)をご参照ください。

4.4.2.2 ネットワーク層の再送信

図3bは、Bluetooth® meshのスタックの層を表します。ベアラの層の上にはネットワーク層があります。ネットワーク層では、PDUのコピーを複数回、特定の間隔で自動的に再送信するように構成できます。

ネットワークの再送信により、メッシュのメッセージが宛先ノードで受信される確率を高めることが可能です。例えば、3つのチャネルで送信したメッシュネットワークPDUがそれぞれ10%の確率で受信されないとします。PDUのコピー2つが、ほぼ間をおかずに連続して送信された場合、どちらも受信されない確率は1%になります。さらに3回送信した場合はメッセージが届かない確率は0.1%になり、逆に言えば99.9%の確率で受信されることになります。このように、時間を置かずに再送信すると、メッセージが届かない確率は劇的に低下し、届く確率を大きく上げることが可能です。

ネットワーク層における再送信のパラメーターは、全ノードの主要要素で必須かつ構成可能な状態で設定されます。2つの複合状態が定義されています。1つ目が、ノードがメッセージの発信を行う時のネットワーク再送信パラメーター、「Network Transmit (ネットワーク送信)」です。そして2つ目が、ノードがメッセージをリレーする場合のネットワーク再送信動作を定義するパラメーター「Relay Retransmit (リレー再送信)」です。

一般的に、Network Transmitは、ノードがメッセージの発信を行う場合の方が、リレーを行う場合よりも再送信を多く実行するように構成されています。

ネットワークの設計者は、無線スペクトルの過剰な使用を避けつつ、求められる信頼性を達成するため、ネットワークとリレーの再送信設定パラメーターに割り当てる値を検討する必要があります。

4.4.2.3 パブリケーション、再送信、同期のモデル化

メッシュモデルは、ユーザーがボタンを押す等の外部イベントへの応答または設定された間隔で自動的にメッセージを発行することができます。メッセージのモデルパブリケーション用に、信頼性を高めるための再送信を設定できます。また、第5.4.5章で説明したように、再送信はネットワーク層ではなくアプリケーション層で実行されます。

ノードがサポートする各モデルは、Model Publication (モデルパブリケーション) という複合状態をとります。この複合状態には、再送信回数の発行 (Publish Retransmission Count) や再送信間隔ステップの発行 (Publish Retransmit Interval Steps) といった状態が含まれます。これらの状態を利用して、各モデルが発行するメッセージごとに再送信に関する異なる動作を設定できます。

例えば照明システムでは、人間から見て、同じスイッチやセンサーで制御する照明グループが同時にメッセージに反応したように見える状態にしたいと考えるのが一般的です。Bluetooth meshはこれを実現できるソリューションで、照明グループ全体でポップコーン効果としても知られる照明のゆらぎも抑えることが可能です。

Bluetooth meshメッセージの大半には遅延フィールドが設定されています。このフィールドではメッセージを受信したノードが、そのメッセージに対応する前に待機する時間 (ミリ秒単位) が指定されます。これをモデル再送信と組み合わせることで、メッセージの対象ノードのグループ間で必要な同期動作を実施できます。

図18は、6つの照明ノードを制御する照明スイッチを表しています。スイッチは一般的なオンオフのクライアントモデルを、照明ノードは一般的なオンオフのサーバーモデルを使用しています。クライアントモデルは、一般的なオンオフセットの未肯定メッセージのコピー3つを50 ms間隔で送信するように設定されています。このとき、まず最初のメッセージの遅延フィールドを100 msに設定し、そこから2回の再送信でそれぞれ値を50 msずつ減らすように設定します。これにより、各照明が最初のメッセージ3つのうちどれを受信したかに関わらず、照明スイッチを押したときに同期した反応が得られます。

図18では、6台の照明のうち4台が最初の送信を正常に受信し、設定された100 msの遅延を待ってから動作する様子を説明しています。メッセージの最初のコピーを送信してから50 ms後に2番目のコピーが送信されますが、そのとき遅延フィールドには50 msの値だけが含まれます。照明ノード#5はこのメッセージを受信し、指定された50 msの間待機します。そして最初の送信から100 ms後に3回目の送信が行われます。このときは遅延フィールドの値が0の状態を送信されます。照明ノード#2は、このメッセージを受信してすぐに応答します。これはメッセージ#2への応答前に50 ms待機していたノード#5や、メッセージ#1の受信から100 ms待っていた他のノードと全く同じタイミングで行われます。これにより遅延が人には感知できないほど小さくなり、照明スイッチを押したユーザーにとって6台の照明が同時に点灯したと感じる動作となります。

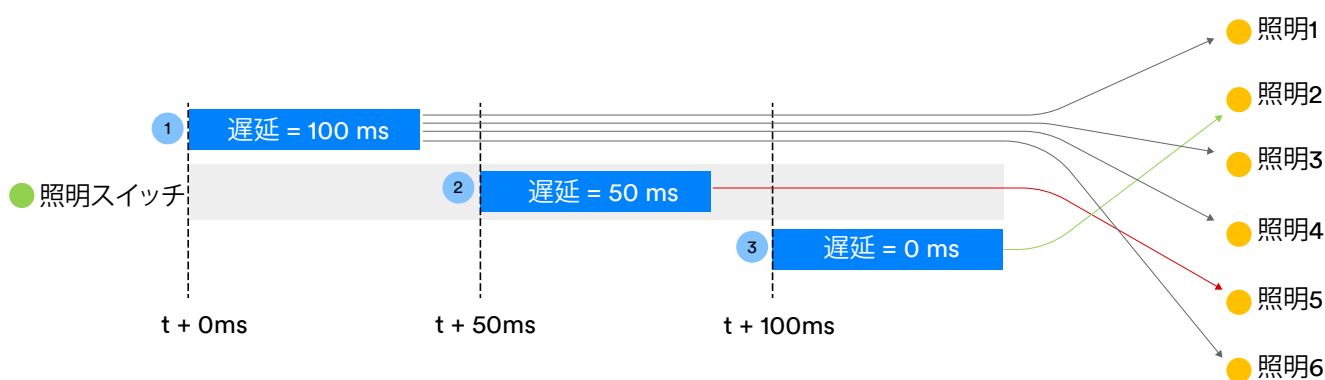


図18 遅延実行によるノードメッセージの応答の同期

4.4.2.4 単一障害点の排除

Bluetooth® meshでは、ノードが発行したメッセージを、ネットワークを介してデバイス1台の無線有効範囲を大幅に超えて目的のデバイスまで届けることが可能です。これは、リレーと呼ばれるプロセスによるものです。

リレーは、受信したメッシュネットワークのPDUを再送信するリレー機能が有効となっているノード、「Relayノード」を介して行われます。これにより、宛先ノードに到達するまで、メッセージがリレーノードからリレーノードへとネットワーク上を移動していくことが可能となります。メッセージが必要以上に移動しないように、TTL (Time To Live, 有効生存時間) というメッセージパラメータでメッセージの移動数を制限することもできます。

リレーは、ノードがネットワーク内のどこにあっても、どれだけ距離が離れていても通信できるだけでなく、複数の経路を取れることも特徴となっています。図19をご参照ください。

緑の円はBluetooth® meshの照明スイッチ、黄色の円はスイッチが制御する照明ノードを表しています。赤いノードはリレーとして動作するノードを表します。

照明スイッチを押すとメッセージがブロードキャストされます。無線の直接範囲内にあるRelayノードは再送信を行い、メッセージが照明に到達するまで同様の処理を繰り返します。図19のネットワークの場合、どのノードをRelayノードとして使用するかを考えて、照明スイッチから制御対象の照明までのメッセージの移動経路が3つあることがわかります。スイッチを押すと、メッセージのコピーが各経路に沿って同時に移動します。コピーを届けるにあたって、経路の長さやノードごとの処理時間が異なるために遅延が発生することがあります。照明に最初に到着したコピーを処理し、その後に到着したコピーは同じものと認識して破棄されます。

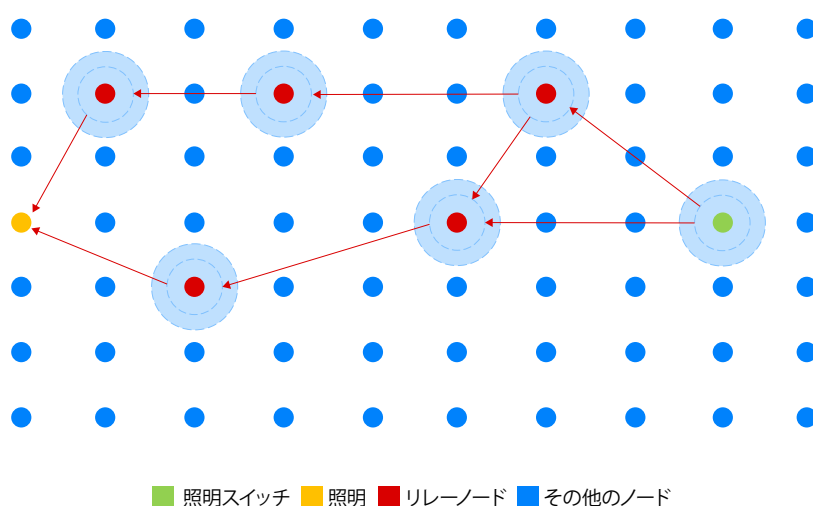


図19 リレーを使ったマルチパスの送信

このようにリレーを使い、メッセージを届ける経路を複数作成し、ネットワークに冗長性を導入することで、単一障害点の無い設計となります。例えば経路上のリレーがチャンネルを切り替えた等の原因で、一時的に利用できない経路が発生した場合も、他の経路を通して届く可能性は高くなります。さらに忘れてはいけないのは、照明スイッチからネットワーク上で再送信を行うため、同一メッセージが連続して複数回送信され、各コピーが異なる経路に沿ってリレーされるという点です。

Bluetooth meshは、ネットワーク内の再送信とマルチパスの配信の組み合わせにより、ネットワーク内における優れた信頼性を実現しています。

4.4.2.5 肯定応答メッセージと未肯定メッセージ

Bluetooth meshは、標準メッセージのシステムを用いてネットワーク内のノード状態の取得や変更を行います。全てのメッセージには、送信元 (SRC) と送信先 (DST) のアドレスが設定されています。

全ノードの全ての独立した部分、または「要素」には16 bitの一意的ユニキャストアドレスが設定されています。また、1つのメッセージで全デバイスに対応する2種類のアドレスも設定できます。これは、グループアドレスや仮想アドレスと呼ばれています。大半のメッセージはこのいずれかのアドレスタイプに送信されます。これは、1つの送信メッセージを論理的に複数の宛先要素向けに指定するため、「マルチキャスト・メッセージング」と呼ばれます。このように、Bluetooth meshは非常に少ないバイト数の単一メッセージで数千の対象デバイスも参照でき、利用可能な無線スペクトルを非常に効率的に利用できる機能を有しています。そのため、スマートビルディング等の一般的なメッシュネットワーク用途における1対多通信に対応可能な、非常にスケーラブルなソリューションとなっています。

Bluetooth® meshは、グループアドレスと仮想アドレスのリストや、論理的グループを構成するノードをネットワーク内にとどめておくためのリストを含む分散型データベースを必要としません。かわりに使われるのが、「パブリッシュ」と「サブスクライブ」システムです。最初の設定時に、ノード構成においてノードが反応すべき宛先アドレスをノードに示す必要があります。これを「サブスクライブ」と呼びます。ノードが無線通信でメッセージをスタックの最下部で受信した際に、サブスクライブしていないDSTアドレスのメッセージは無視します。

宛先デバイスの状態を変化させるメッセージをセットメッセージと呼びます。セットメッセージには肯定応答済みと未肯定の2種類があります。

世の中には要求と応答のペアのPDUを使用するプロトコルシステムが非常に多く存在します。ですが、このシステムでは要求は要求の結果を示す応答を返す必要があり、「タイムアウト」になるまでの時間内に応答する必要があります。HPPTもまた、この設計のプロトコルの一例です。

Bluetooth meshにおける肯定応答済みのセットメッセージは、他のプロトコルにおける要求・応答PDUに相当します。肯定応答済みのセットメッセージを受信および処理した各宛先ノードは、肯定応答として振る舞うステータスメッセージを返信します。

未肯定のセットメッセージの場合、対象ノードは応答しません。

一般的なBluetooth meshネットワークでは、未肯定メッセージが肯定応答メッセージよりもはるかに高頻繁に使用されます。肯定応答メッセージは、単一ノードを直接構成する場合などの特殊な状況でのみ使われます。これは感覚的には納得しづらいかもしれませんが、その理由をご説明しましょう。

例として、50台の机がある、間仕切りのないオフィスを想像してください。このオフィスには200台のLED照明器具が取り付けられており、1台1台がBluetooth meshのノードとして機能しています。フロアの入り口にある照明スイッチで、この200台の照明全てを点灯できます。照明スイッチを押したとき、肯定応答済みのメッセージが使われていると、次のようなことが起こるかもしれません。

1. スイッチが、オフィス内の全照明が含まれるグループアドレスに向けて、オンオフメッセージを送信します。直接範囲内の全ノードがメッセージを受信し、メッセージに基づいて動作します。リレーとして動作するノードはメッセージの再送信を行います。
2. 最初のリレーノードの範囲内にあるノードは、メッセージを受信して応答します。リレーとして動作するノードはメッセージの再送信を行います。
3. (1)および(2)を繰り返し実行し、全ての宛先ノードに到達するまで、元のメッセージのコピーがネットワーク上を移動します。

この段階では、Bluetooth® meshのシステムは、完全に説明通りに動作します。通常であれば、スイッチから送られてきた元のメッセージは未肯定のメッセージで、照明が点灯して終わりとなります。一方、肯定応答済みのメッセージが送られてきた場合は次のようなことが起こります。

スイッチのグループアドレスにサブスクライブしていた200台のノードは、それぞれがメッセージを受信して動作した後、直ちに肯定応答のステータスメッセージで応答します。すると、非常に短い時間内に各照明ノードから200個のメッセージがブロードキャストされるため、ネットワークの利用率が大幅に上昇します。これらのメッセージは、各リレーが受信と応答を繰り返し、必ずしも全部のリレーではないにせよ、複数ノードに広まった後、照明スイッチに戻ります。それだけではありません。デバイスグループからの肯定応答済みメッセージの処理は、すぐさま非常に複雑になる場合があるためです。

それは、Bluetooth meshが、肯定応答済みメッセージについて、グループアドレスに送信したメッセージの結果の追跡のための使い方を定義していないためです。そのため、振る舞いをカスタマイズして実装する必要があります（この目的だけのために実装することは推奨しません）。そのための方法の1つが、送信ノードに、グループアドレスをサブスクライブしている全宛先ノードの全ユニキャストアドレスリストを入れることです。その場合、送信ノードのユニキャストアドレスをSRCアドレスとして肯定応答を受信すると、このリストを使って肯定応答済みのノードと肯定応答を行っていないノードを判断できるようになります。ですが、このリストを維持する必要性があること自体が問題となります。それは、メッセージをグループアドレスに送信する全ノードでリストを維持する必要があるためです。問題はそれだけではありません。

その後、スイッチが一定時間、待機を行います。そして肯定応答の追跡表を調べ、肯定応答を受信していないノードの数を把握します。ですが、これはオリジナルのセットメッセージが対象の照明に届かなかったことを示すわけではありません。その照明から「肯定応答が送られなかった」か、「肯定応答を送ったが受信できなかった」かの2通りが考えられますが、この2パターンのうちどちらかは知りようがありません。結果として、スイッチはそのメッセージをグループアドレスに再送信するか、肯定応答を受信できなかったノードのユニキャストアドレスに、個別に複数のメッセージを送信する必要があります。そしてこのプロセスは繰り返し実行されます。オンオフメッセージの再送信と肯定応答の受信を追跡しながら、全ノードが応答するか、システム全体のタイムアウトまたは再試行制限に達するまで何度も繰り返し試行し続けることになります。

これはBluetooth meshの動作方法ではありません。もしこの動作方法だったら、うまくいかないことはわかりでしょう。ネットワークトラフィックが急上昇し、通信が混雑することで、ネットワーク内で進行中の他の運用にも影響を及ぼすことが考えられます。この方法では、肯定応答を追跡するために必要なネットワークと個々のノードの複雑さが必要以上に大きくなってしまいます。

ワイヤレス通信システムにおけるマルチキャスト・メッセージングは、スケーラブルにし、信頼性を高めるのが難しいことで知られています。そこでBluetooth® meshは異なるアプローチとして、未肯定のメッセージと、ネットワーク層の再送信、冗長性のある複数経路を組み合わせています。これにより非常にうまく機能するシステムが出来ており、グループアドレスと肯定応答メッセージの場合に起きる複雑性、キャパシティ、信頼性関連の問題とは無縁のシステムとなっています。

4.4.2.6 Bluetooth meshと信頼性の高い照明システム

Bluetooth SIGは、「[Bluetooth meshをベースとしたセンサー主導の照明制御システムの構築](#) (Building a Sensor-Driven Lighting Control System Based on Bluetooth Mesh)」と題した資料を公開しており、より効果的で信頼性の高いBluetooth meshネットワークを構築するための推奨事項を記載しています。

5.0 Bluetooth® から最高の信頼性を引き出す

Bluetooth技術には、信頼性の高い通信を実現するための様々な設計が盛り込まれています。この信頼性のための機能はスタックの最下層から始まってスタック全体に散りばめられており、無線通信のスマートかつ効果的な動作に貢献しています。また、意図的に選択した変調方式、スペクトラム拡散技術、エラー検出および修正機能も有しています。Bluetoothの信頼性に関する技術は、自動で提供されるものが多くなっています。ですが、製品やアプリケーションの設計者や開発者の側でも、Bluetooth技術の信頼性を最大限に高められる活用方法があります。

そのうち特に重要な点について、表1にまとめました。

推奨事項	用途	補足と説明
物理的な環境とデバイスの配置を考慮する	全て	環境の問題は、通信の信頼性に影響を及ぼします。可能であれば、デバイスの配置密度や物理的な障害物による影響といった問題を考慮してください。
可能であればコネクション型の通信を採用する	コネクション	コネクションレス型の通信は、その性質上、コネクション型の通信よりも信頼性に関する課題を抱えやすく、追加で対策が必要となります。
ATTトランザクションを採用する	コネクション	非常に高い信頼性が必要で、ATT(属性プロトコル)を使用する場合は、最も信頼性が高くなるのは要求/応答および指示/確認のトランザクションです。
EATTを採用する	コネクション	可能であればATTではなくEATT(拡張属性プロトコル)を使用して、フロー制御を使うことで信頼性が向上します。

推奨事項	用途	補足と説明
メッセージ認証確認を使う	コネクション、メッシュ	暗号化することで、全パケットにメッセージの認証確認 (MIC) を追加し、パケットに対し、検知できない悪意のある意図的な変更が行われるのを防ぎます。
オーバーフローによるパケットロスが発生しないように、ビジーな環境でも対応できる十分なサイズのバッファが設定されていることを確認する	コネクション、コネクションレス、メッシュ	
ブロードキャストデータを確実に受信できるように、RXデューティ比を高く保つ	コネクションレス、メッシュ	消費電力が増えるため、消費電力の目標や制約とのバランスも考慮してください。
可能であれば定期的なアドバタイジングを使用し、アドバタイジングとスキャンを同期する	コネクションレス	
よく考えてリレーを配置することで、ネットワーク内に冗長性のある経路を作成する	メッシュ	
信頼性の要件とネットワーク利用状況に関する目標のバランスをとりつつ、各ノードでネットワークの再送信を設定する	メッシュ	
無線チャネルの切り替え時間が短いハードウェアを使用する	メッシュ	切り替え時間を短くすることで、無線通信を受信できない時間を短縮します。

表1 信頼性を最適化するためのアドバイス

6.0 結論

Bluetooth® は、極めて困難な状況下でも非常に信頼性の高い通信を実現する技術です。適応型周波数ホッピングやフロー制御、拡張属性プロトコルによるトランザクション等、信頼性を重視した設計や機能がシステムのあらゆる部分に散りばめられています。さらに設計者や開発者の側でも、さまざまな方法でBluetooth製品やアプリケーションの信頼性を最適化できるようになっています。

Bluetooth技術における信頼性は、各構成要素の信頼性を足し合わせただけではありません。

Bluetooth技術は、設計段階から高い信頼性を誇る技術です。■