

産業用途向けのスマートな ワイヤレス・センサー・ ネットワークに最適な技術

著者：Richard Anslow、シニア・マネージャ

概要

本稿では、ワイヤレス・センサー・ネットワークの構築に適した各種の技術について説明します。取り上げるのは、Bluetooth® Low Energy (BLE)、SmartMesh (IEEE 802.15.4eをベースとする6LoWPAN)、ZigBee/Thread (IEEE 802.15.4をベースとする6LoWPAN)などの技術です。まずは、各技術の概要について説明します。その上で、各技術が産業分野の過酷なRF環境にどのくらい適しているのかという観点から検討を行います。更に、消費電力、信頼性、セキュリティ、総所有コストなどの指標を用いた比較も実施します。

本稿で取り上げる各技術には固有の特徴があります。例えば、SmartMeshでは、時間同期を利用することで消費電力を抑えることができます。また、SmartMeshとBLEではチャンネル・ホッピングを利用することで信頼性を高められます。加えて、SmartMeshについてテストを実施した結果、データ伝送の信頼性が99.999996%に達することが確認されました。本稿では、それぞれBLEとSmartMeshをベースとするアナログ・デバイスズのワイヤレス状態監視センサーも紹介することにします。それらのうち一方は、エッジ向けのAI機能も採用しています。その機能を活用すれば、制約の多いエッジ・ノード（センサー・ノード）のバッテリー寿命を延ばすことが可能になります。

はじめに

モータで駆動するタイプの機器では、スマート・センサーの採用が進んでいます。その種のスマート・センサーの販売額は、2022年から2024年にかけて2倍以上成長し、9億600万米ドル（約1422億円）に達する見込みです¹。その成長の牽引役となるのは、ワイヤレス型のスマート・センサーと可搬型のスマート・センサーだと目されています。産業用機器の監視には、ワイヤレスの環境センサー（温度、振動などを測定）がよく使用されます。それらのセンサーは、監視の対象となる機器が健全な動作から逸脱した際、そのことを検出する役割を果たします。

産業分野でワイヤレス・センサーを使用する場合には、何を重視すればよいのでしょうか。その種のアプリケーションでは、消費電力の削減、信頼性の向上、セキュリティの確保が常に極めて重要な要件になります。ただ、求められる事柄はそれだけではありません。例えば、総所有コストが低いことも重要です。そのためには、ゲートウェイの数やメンテナンスの回数を最小限に抑えなければなりません。また、短距離の通信に最適な技術を選択すべきです。更に、メッシュ構成のネットワークを実現可能なプロトコルも必要になるでしょう。メッシュ構成であれば、信号パスの遮蔽や反射の可能性を低減できます。そのため、金属製の障害物が数多く存在する工場環境にも対応しやすくなります。



表1. 産業分野の主要な要件から見た各ワイヤレス技術の特徴

技術	通信距離	消費電力	信頼性	堅牢性	総所有コスト	メッシュ構成	セキュリティ
Wi-Fi (IEEE 802.11b/g)	100m	大	低	低	高	可	あり (WPA)
BLE	20m~100m	低/中	中/高	低	中	可	あり (AES)
ZigBee/Thread (IEEE 802.15.4ベースの6LoWPAN)	20m~200m	低/中	低	低	中	可	あり (AES)
SmartMesh (IEEE 802.15.4eベースの6LoWPAN)	20m~200m	低	高	高	低	可	あり (AES)
LoRaWAN	500m~3000m	ノードは中/低、ゲートウェイは大	低	低	高	不可 (スター・トポロジ)	あり (AES)

表2. ZigBee/Thread、SmartMesh、BLE (メッシュ構成) の比較

項目	ZigBee/Thread (IEEE 802.15.4ベースの6LoWPAN)	SmartMesh (IEEE 802.15.4eベースの6LoWPAN)	BLE (メッシュ構成)
無線周波数	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz
データ・レート	250kbps	250kbps	1Mbps、2Mbps
通信距離	20m~200m	20m~200m	20m~150m
アプリケーションのスループット	0.1Mbps未満	0.1Mbps未満	0.2Mbps未満
ネットワークのトポロジ	メッシュ、スター	メッシュ、スター	メッシュ、スター
セキュリティ	AESによる暗号化	AESによる暗号化	AESによる暗号化
消費電力	ルーティング・ノードにはライン電源から給電	ルーティング・ノードに必要な平均電流は50μA	ルーティング・ノードにはライン電源から給電
総所有コスト	中~低	低	中~低
TSCH	非対応	対応	非対応
堅牢性 (チャンネル割り当て)	低 (単一チャンネルによる通信)	高	低
信頼性 (チャンネル・ホッピング)	低 (単一チャンネルによる通信)	高	高
標準規格 (相互運用性)	あり	独自	あり

産業用アプリケーションとワイヤレス技術の関係

まずは図1をご覧ください。これは、各種のワイヤレス技術のデータ・レートと通信距離についてまとめたものです。また、表1では、産業分野の主要な要件に着目して各ワイヤレス技術を比較しています。産業分野での使用を前提とした場合、BLEとSmartMeshは、消費電力、信頼性、セキュリティを最適な組み合わせで提供できる技術だと言えます。一方、ZigBeeとThreadを採用すれば、低消費電力でセキュアなメッシュ構成のネットワークを実現できます。但し、信頼性については高い評価は与えられません。

表2は、ZigBee/Thread、SmartMesh、BLE (メッシュ構成) についてまとめたものです。SmartMeshは、TSCH (Time Synchronized Channel Hopping) のプロトコルを採用しています。そのため、ネットワーク内のすべてのノードの同期をとり、スケジューリングされた形で通信の編成が行われます。時間同期によって消費電力を削減でき、チャンネル・ホッピングによって高い信頼性が得られます。BLEもチャンネル・ホッピング技術を採用しています。但し、SmartMeshとは異なりいくつかの制約があります。例えば、ルーティング・ノードの給電にはライン電源を使用しなければならない (システムのコストと消費電力が増加する)、TSCHをサポートしていないといった具合です。先述したように、ZigBee/Threadは信頼性の面で評価が低くなります。そのため、BLEと比べて大きな優位性があるとは言えません。

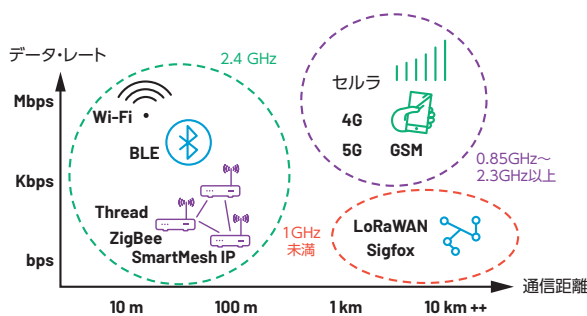


図1. 各種ワイヤレス技術の概要

以下では、産業用の状態監視センサーに最適なワイヤレス技術として、SmartMeshとBLE（メッシュ構成）に注目することになります。

アナログ・デバイセズのワイヤレス状態監視センサー

アナログ・デバイセズは、ワイヤレス対応の振動監視用プラットフォーム「Voyager 3」を提供しています。それに加えて、次世代のワイヤレス状態監視センサーも開発中です。表3にそれぞれの概要を示しました。

Voyager 3は、SmartMeshモジュール「LTP5901-IPC」を採用したプラットフォームです。それに対し、現在開発中のワイヤレス状態監視センサーではAI対応を図っています。以下、このセンサーを次世代AIセンサーと呼ぶことにします。この次世代AIセンサーは、BLEに対応するマイクロコントローラ「MAX32666」を採用しています。どちらのセンサーも、温度センサーとバッテリーのSOH（State of Health）を監視するためのセンサーを搭載しています。また、Voyager 3と次世代AIセンサーは、MEMS（Micro Electro Mechanical System）ベースの加速度センサー「ADXL356」、「ADXL359」を採用しています。それらによって、産業用機器の振動の振幅と周波数を測定します。振動の振幅の増大と周波数は、FFT（Fast Fourier Transform）によるスペクトル解析の結果として把握できます。それらのデータを活用すれば、モータの不均衡、位置ずれ、ベアリングの損傷といった障害を検出できます。

表3. アナログ・デバイセズのワイヤレス状態監視センサー

パラメータ	Voyager 3	次世代AIセンサー
ワイヤレス技術	SmartMesh	BLE
超低消費電力のエッジ向けAI	なし	あり
温度センサー	あり	あり
MEMS加速度センサー	あり (3軸/1kHz)	あり (3軸/8kHz)
バッテリーのSOHの監視	あり	あり

図2は、Voyager 3と次世代AIセンサーの代表的な動作の概要を示したものです。産業分野で使われる多くのセンサーと同様に、いずれも1%のデューティ・サイクルで動作します。つまり、ほとんどの時間は低電力モードで動作しているということです。両センサーは定期的にウェイクアップし、データを一括して収集します（後述しますが、衝撃によって振幅の大きい振動が発生したときにもデータを収集します）。また、ウェイクアップした際には、ユーザに対して更新されたステータス情報を送信します。通常、ユーザは監視の対象となる機器の健全性が良好であることを表すフラグを受け取ります。また、ユーザには更に多くのデータを収集する機会が与えられます。

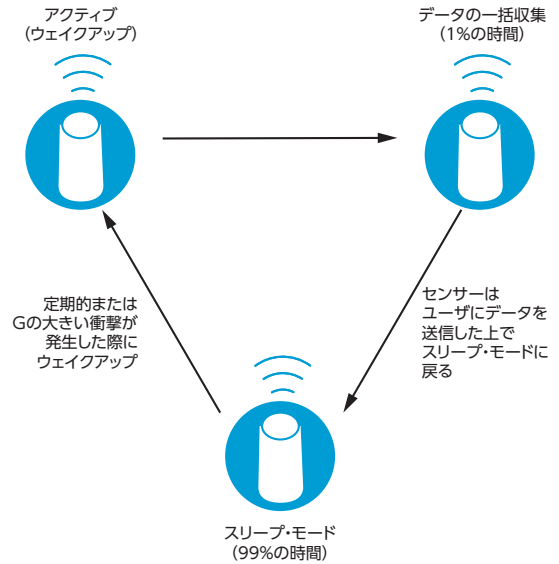


図2. 産業用ワイヤレス・センサーの代表的な動作

セキュリティ

SmartMeshをベースとするネットワーク（SmartMesh IPネットワーク）は、セキュリティを確保するための複数のレイヤから成ります。それぞれのレイヤは、機密性、完全性、真正性を確保するためのものとして分類することができます。SmartMeshにおけるセキュリティの概念を示したものが図3です。機密性は、ネットワーク内に複数のメッシュ・ノードが存在する場合でも、AES-128による暗号化を利用することによってエンドtoエンドで確保されます。また、送信されるデータは、メッセージの認証用コード（MIC：Message Integrity Check）によって保護されます。それにより、改竄されていないことが確認されるということです。そのような形で中間者（MITM：Man in the Middle）攻撃からの保護が実現されます。また、デバイスについては複数の認証レベルを利用できます。認証されていないセンサーがシステムに追加されないようにするための仕組みを設けることも可能です。

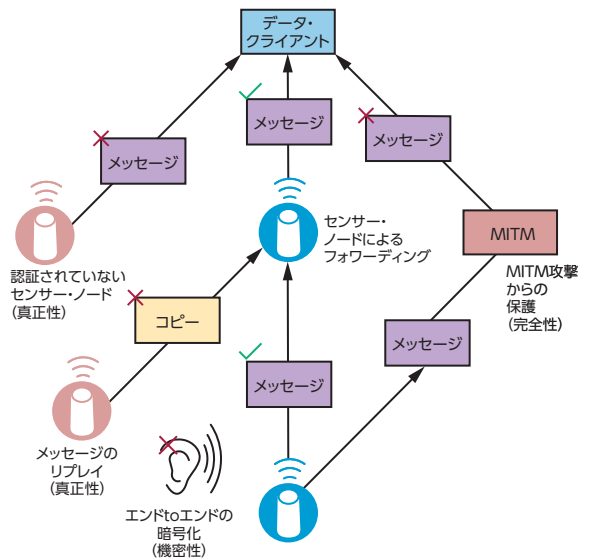


図3. BLE/SmartMesh対応のネットワークに適用されるセキュリティ機構

BLE規格のバージョン4.0、同4.1を採用したデバイスは、セキュリティに関しては脆弱だと言えます。それに対し、BLEのバージョン4.2以降ではセキュリティが強化されています(図3)。アナログ・デバイゼスのMAX32666は、BLE規格のバージョン5.0に準拠しています。このバージョンでは、ペアリング向けのプロトコルとしてP-256に対応する楕円曲線ディフィー・ヘルマン鍵交換を採用しています。このプロトコルでは、2つのデバイスの公開鍵を使用することにより、それらのデバイス向けの共有秘密鍵を確立します。この秘密鍵は長期鍵(LTK: Long-term Key)と呼ばれており、認証のために使われます。また、すべての通信を暗号化するための鍵の生成にも使用されます。このような手法により、MITM攻撃からの保護が実現されます。

低消費電力

表3に示した両センサーは、1%のデューティ・サイクルで動作します。Voyager 3の最大ペイロードは90バイト、次世代AIセンサーの最大ペイロードは510バイトです。ここで図4をご覧ください。送信データが500バイト~1000バイトである場合、BLEではZigBeeやWi-Fiと比べてエネルギー消費量を少なく抑えられます。このことから、AIを使用するユース・ケースにはBLEが適していることがわかります。SmartMeshについては、特にペイロードが90バイト以下である場合(Voyager 3が該当)に消費電力を極めて少なく抑えられます。SmartMeshのエネルギー消費量は、オンライン・ツール「[SmartMesh Power and Performance Estimator](#)」を使用することで見積もれます。このツールの精度は、センサーがルーティング・ノードかリーフ・ノードかに応じて87%~99%になることが実験的に確認されています。

ワイヤレスによるデータ送信に伴う消費電力に加えて、システム全体の電力バジェットと総所有コストも考慮しなければなりません。表2に示したように、BLEとZigBeeでは単一のゲートウェイを使用します。ここで注意すべきなのは、どちらの技術でもルーティング・ノードにはライン電源が必要になるということです。それにより、電力バジェットとシステムの総所有コストが増加します。一方、SmartMeshのルーティング・ノードは平均50 μ Aの電流しか必要としません。しかも、単一のゲートウェイをベースとしてネットワーク全体を動作させることができます。SmartMeshの方がエネルギー効率が低いことは明らかです。

表4. 産業分野のワイヤレス・ネットワークが直面する課題。

BLE/SmartMeshを採用した場合、それらがどのように解消されるのかをまとめてあります。

課題	問題	SmartMesh	BLE(メッシュ構造)
高密度のネットワークにおける堅牢な通信の実現	各ノードが互いに干渉し、ネットワークの速度が低下する	効率的なチャンネル割り当てによりコリジョンを解消	ネットワークの速度を低下させるコリジョンに依存する
遮蔽された場所にセンサーを設置する場合のバッテリー寿命の延伸	バッテリー寿命の仕様を満たすために、電力効率の高いエッジ・ノードの接続方法が必要になる	バッテリー駆動のルーティング・ノードにより、エッジ・ノードに対する近距離の接続を確立	ライン給電のルーティング・ノードにより、エッジ・ノードに対する近距離の接続を確立
動的な産業環境における信頼性の高い接続の実現	機器の移動やドアの開閉によってマルチパス/反射が発生	チャンネル・ホッピングにより、受信ノルを回避	チャンネル・ホッピングにより、受信ノルを回避
混み合った無線周波数帯における通信の信頼性の向上	干渉によって、ネットワーク上のデータ・トラフィックの帯域幅が低下	チャンネル・ホッピングによる干渉の回避、効率的な帯域幅の割り当てによるトラフィックの維持	小規模ネットワーク向けに設計されており、ネットワーク・フラディングの問題が生じる

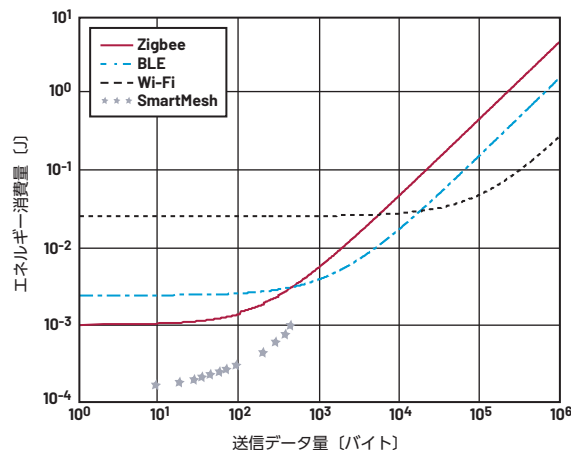


図4. 送信データ(無線トランシーバーのPHY)とエネルギー消費量の関係(稿末に参考資料3として示したShahzad氏とOelmann氏の論文より)

信頼性と堅牢性

先述したとおり、SmartMeshではTSCHを使用します。このことから次のような特徴が得られます。

- ▶ ネットワーク内の全ノードは同期がとれた状態で動作する
- ▶ 通信の編成はスケジューリングに基づいて行われる
- ▶ 時間同期によって消費電力を抑えられる
- ▶ チャンネル・ホッピングによって信頼性が向上する
- ▶ 通信がスケジューリングされているので、高いレベルのデータミニズムが得られる

同期の精度は、ネットワーク全体で15マイクロ秒未満です。このような極めて高いレベルの同期が実現されるため、消費電力を極めて少なく抑えられるのです。上述したとおり、平均50 μ Aの電流が流れますが、99%以上の時間は1.4 μ Aの電流しか流れません。

産業用のアプリケーションで使用されるワイヤレス・ネットワークは様々な課題に直面します。表4は、SmartMeshまたはBLE(メッシュ構造)を採用した場合、それらの課題がどのように解消されるのかをまとめたものです。

SmartMeshは、数多くのノードを使用する高密度のネットワークで優れた性能を発揮します。また、BLEとSmartMeshは、動的な産業環境においても良好な性能が得られる技術だと言えます。

SmartMeshの信頼性については、アナログ・デバイスのIC製造施設におけるテストで確認されています⁵。その施設は、金属とコンクリートが密集した過酷なRF環境だと言えます。そのテストは、32個のワイヤレス・センサー・ノードをメッシュ構成のネットワークとした分散配備した環境で行われました。そして、最も離れたセンサー・ノードとゲートウェイの間で4回のホッピングを実施しました。各センサー・ノードからは30秒ごとに4つのデータ・パケットを送信します。83日間にわたるテストにおいて、センサーからは2613万7382のパケットが送信されました。受信されたのは、2613万7381のパケットです。つまり、99.999996%の信頼性が確保されていることとなります。

エッジにAIを適用する

次世代AIセンサーでは、AI用のハードウェア・アクセラレータを備えるマイクロコントローラ「MAX78000」を採用しています。このアクセラレータにより、データの移動量が最小限に抑えられます。また並列処理を活用することで、エネルギーを最適な形で使用しつつ、高いスループットを得ることができます。

産業用の一般的なワイヤレス・センサーは、非常に低いデュティ・サイクルで動作します。センサーのスリープ期間はユーザが設定することになります。その期間が過ぎたら、センサーはウェイクアップして温度と振動の測定を行います。また、得られたデータをユーザのデータ・アグリゲータに無線で送信します。通常、市販のセンサーのバッテリー寿命は5年程度だとうたわれています。この年数は、24時間に1回、または4時間に1回、データを取得するという前提で設定されています。次世代AIセンサーも、一般的なワイヤレス・センサーと同様の動作を前提としています。ただ、エッジのAIによって異常が検知されたら、その情報を活用して無線の使用を制限するということが行われます。センサーはウェイクアップするたびにデータを取得しますが、異常な振動が検出された場合だけユーザに対するデータ送信が行われるといった具合です。このようにすれば、バッテリーの寿命を少なくとも20%延ばすことができます。

AIモデルのトレーニングでは、センサーによって健全な機器のデータを収集します。それらは無線でユーザに送信され、AIモデルの開発に役立てられます。MAX78000に対応するツールを使用すると、AIモデルをC言語のコードとして合成することができます。それらのコードは、ワイヤレス・センサーに送り返されてメモリ上に配置されます。そのようにしてコードを配備したら、ワイヤレス・センサーは、あらかじめ定義された間隔またはGに高い衝撃が発生した際にウェイクアップします。収集したデータには、FFTによる処理が適用されます。MAX78000は、FFTによって得られたデータに基づいて推論を実施します。異常が検出されなかった場合、センサーはスリープ・モードに戻ります。一方、異常が検出された場合にはユーザに対する通知が行われます。ユーザは、異常に対応するFFTデータまたは時間領域の未処理のデータを入手することができます。それらデータは、障害の分類に活用することが可能です。

まとめ

本稿では、様々なワイヤレス技術について説明しました。その上で、BLE、SmartMesh、ZigBee/Threadが産業分野の過酷なRF環境にどのくらい適しているのかという観点から検討を行いました。SmartMeshをベースとするネットワークは、BLEやZigBee/Threadを使用する場合と比べて少ない消費電力で動作します。しかも、高い信頼性が得られます。一方、500バイト～1000バイトのデータ伝送が必要なネットワークにはBLEが適しています。そうすれば、ZigBee/Threadを使用する場合と比べて消費電力を抑えつつ、信頼性を高めることができます。更に、AI用のハードウェア・アクセラレータを備えるマイクロコントローラを活用すれば、意思決定の方法を改善したり、ワイヤレス・センサー・ノードのバッテリー寿命を延ばしたりすることが可能になります。

参考資料

¹ 「Predictive Maintenance in Motor Driven Systems - 2020 (モータで駆動するシステムの予知保全 - 2020年)」 Interact Analysis Market Study, 2020年4月

² Kris Pister, Jonathan Simon 「Secure Wireless Sensor Networks Against Attacks(攻撃を防ぐことが可能なセキュア・ワイヤレス・センサー・ネットワーク)」 Electronic Design, 2014年4月

³ Khurram Shahzad, Bengt Oelmann 「A Comparative Study of In-sensor Processing vs. Raw Data Transmission Using ZigBee, BLE and Wi-Fi for Data Intensive Monitoring Applications (データ集約型の監視アプリケーションの構築方法、センサーによる処理とZigBee/BLE/Wi-Fiによる未処理データの伝送を比較する)」 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), 2014年8月

⁴ Thomas Watteyne, Joy Weiss, Lance Doherty, Jonathan Simon 「Industrial IEEE 802.15.4e Networks: Performance and Trade-offs (IEEE 802.15.4eをベースとする産業用ネットワーク、その性能と必要なトレードオフ)」 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015年6月

⁵ Ross Yu 「Verifying SmartMesh IP > 99.999% Data Reliability for Industrial Internet of Things Applications (SmartMesh IPの検証、IIoTアプリケーションのデータ伝送で99.999%を超える信頼性を実現)」 Analog Devices, 2016年1月



著者について

Richard Anslowは、アナログ・デバイセズのシニア・マネージャです。産業用オートメーション・ビジネス・ユニットでソフトウェア・システム設計エンジニアリングの分野を担当。専門は状態基準保全、モータ制御、産業用通信を対象とする設計技術です。アイルランドのリムリック大学で工学分野の学士号と修士号を取得。パデュー大学でAIと機械学習を対象とした大学院の課程も修了しています。



アナログ・デバイセズ株式会社

VISIT [ANALOG.COM/JP](https://analog.com/jp)

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、analog.com/jp/contact をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧ができます。

©2024 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。
Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。

AD5806-0-6/24