

省資源・省エネに有用なワイヤレスハーネス技術

Wireless Harness Technology Contributing to Resource- and Energy-Saving

伴 弘司 Hiroshi Ban[†] 北沢祥一 Shoichi Kitazawa[†] 小林 聖 Kiyoshi Kobayashi[†]

Summary

様々な機器を無線で接続して自動化やシステムの効率化を進める機器間通信（Machine-to-Machine, M2M）技術が広がりを見せている。この技術を狭小な機器内空間に適用して機器内の部品間の通信用配線を無線化しようとするのがワイヤレスハーネスである。我々はこれまでに ICT 機器内の通信用ハーネスに着目し、その無線化の要素技術の確立と効果について検証を進めてきた。今年度からは対象を車両に向け、燃費向上や省エネ化を進める車載ハーネスの無線化技術の研究を開始したところである。ワイヤレスハーネスを特徴付けるものは、部品が多く金属に囲まれた狭小な空間内という伝搬環境と、低システム遅延や多元接続性などの通信要求仕様である。ただし、後者については適用シーンによって様々な考え方がある。ワイヤレスハーネスは軽量化をテコとする省資源・省エネに効果があるだけでなく、作業性向上などの様々なメリットがあるが、実用化例はまだ多くない。コストとともに信頼性や厳しいシステム要件がハードルになっているように思われる。そこで、我々のこれまでの研究成果を振り返るとともにワイヤレスハーネスについて内外の動向を紹介し、そのユニークさや有用性、課題などについて論じる。

Key Words

無線通信, ワイヤレスハーネス, 機器内通信, 省資源

1 はじめに

この四半世紀で無線通信は大きく飛躍した。携帯電話の普及は目覚ましく、総務省の報告によれば携帯電話と PHS を合わせた国内の契約数は 2012 年 3 月末で 1 億 3,000 万台を超え、更に増加しつつある状況である。平均で赤ちゃんを含めて一人 1 台以上の割合になる。また身の回りでは、無線 LAN やコードレス電話、ハンズフリーフォンなどが普及し、電車やバスの料金、自動販売機やコンビニエンスストアの支払いも非接触 IC カード、つまり無線デバイスでの決済が浸透してきている。更に、Bluetooth や ZigBee, UWB (Ultra Wide Band) 等の近距離無線通信デバイス (Short-Range Device, SRD) やセルラシステムを用いて機器間の通信を自動化する M2M が様々なシーンで普及しつつある。ワイヤレスマウスや携帯電話間のデータ転送などが身近なところで目にする典型例であるが、そのほか、電力や水道などの自動検針システム、監視システム、ETC 自動料金収受システム、ヘルスケアシステムなどのインフラに近い領域にも拡大している。インターネットを基盤としてありとあらゆるモノを接続して社会の効率化を図っていくとする IoT (Internet of Things) という包括的な考えの下で、ネットワークに接続する機器は 2020 年には 500

億台にも達すると予想されており、様々な末端機器を接続する手段として無線通信に期待される役割は大きい。

この M2M の派生的な領域の一つに、機器内通信がある。本稿で述べる機器内通信は、機械や装置（以降、機器と総称する）の内部の部品間、典型的にはセンサと制御ユニットやコンピュータの通信線（ハーネス）を無線通信に代替しようとするものである。ハーネスの無線化という意味でワイヤレスハーネス (wireless harness) と呼ばれる。イメージを図 1 に示す。また、典型的な適用シーンの特徴を表 1 に掲げる。ただし、論文等では適用対象別に intra-vehicular や intra-spacecraft, intra-satellite などの表現もよく見受けられる。後に述べるように、機器内の無線通信はマルチパスの多い狭小な筐体内という伝搬環境の側面と、低遅延で多元接続性が求められるという通信の 2 面に

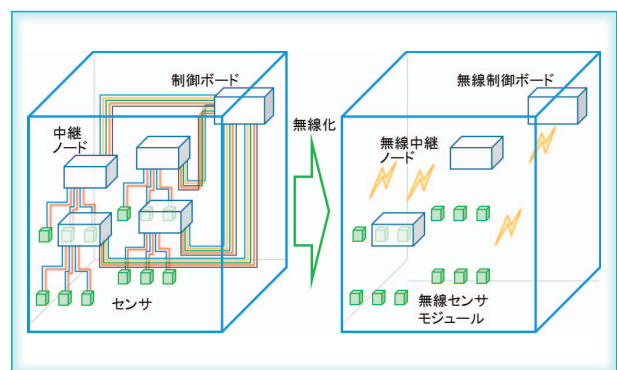


図 1 通信用ハーネス削減のイメージ図。中継ノードは分散処理を行う制御ユニットでもよい

[†] ATR 波動工学研究所, 京都府
ATR Wave Engineering Laboratories, Kyoto, 619-0288
Japan

よって特徴付けられていると考えている。それらは様々な機器への適用において共通的な要件になり得ると考えられたので、包含する意味で機器内通信 (In-machine) という呼び方を考えた。これは我々の造語である。

機器内の通信という意味では、回路基板間や半導体デバイス間のインタコネクションをミリ波を用いた高速ワイヤレス通信で実現して、パッドやワイヤリングの不要化とパッケージのダウンサイジングを狙う検討も行われている⁽¹⁾が、本稿で述べようとするワイヤレスハーネスとは要件がかなり異なることから、本稿では紹介にとどめる。また、950 nm の光通信を用いたハーネスのワイヤレス化も検討されている。地上実験だけでなく人工衛星に搭載して検証実験まで検討されているが、興味深い取り組みではあるものの、これも紹介にとどめる⁽²⁾。

さて、ハーネスを削減して無線化することには様々なメリットがある。その有用性を表2に整理する。詳細は2章以降で述べるが、最近の機器の中には実に多くのセンサが実装されている。また、それにしただがってハーネスの量もかなり多い。典型的な機器ではセンサは200個以上搭載され、ハーネスの重量は全体重量の10%を超える場合もある。更に、安全性やユーザの利便性向上、サービス性向上のために、センサの搭載は今後増える方向にある。したがって、ハーネスに関わる課題は今後更に顕在化する傾向にあると思われる。ハーネスに関わる問題点やワイヤレス化のニーズは明快であり、システム要件も多くの場合のはっきりしている。しかし、現実的には導入はまだ限定的であるのが実情である。導入が進まないのはコスト等の面もある

表1 ワイヤレスハーネスの適用シーン

項目	シーン／仕様
伝搬環境	機器の内部
伝搬距離	1～2 m程度以内
伝送情報	センサデータ (8～12 bit)
システム遅延	1 ms 以内
接続数 (センサ数)	～200

表2 ワイヤレスハーネスのメリット

省資源、軽量化
耐環境性(耐熱性)向上
組立工程の簡略化
操作性の向上
小型化、設計の自由度向上
保守支援
接続先の再構成

が、それ以上に技術的なハードルが高いのが大きな原因といえそうである。

そのハードルの一つがシステム遅延と思われる。機器内通信はM2Mの派生的な位置付けと記したものの、両者にはシステム遅延に関する要件に大きな相違がある。機器内通信では多くの場合、センサのセンシング周期に起因してセンサ情報を制御系に伝達する際のシステム遅延は1 ms程度以内であることが求められる。しかしM2Mでは、基本的には個々のMachineは独立しているために、機器間の通信に関する遅延への要件はそれほど厳しくない。要件の分析については3章で詳細に述べることにする。

なお、ハーネスには通信線のほかに給電線がある。給電用ハーネスが残るのでは重量削減にしる効果が半減するではないか、と御意見を頂くことがある。給電線のワイヤレス化は無線電力伝送ということになるが、コードレス電話等では商用化され、電気自動車の給電方法としてもホットな分野であり、機器内での電力伝送も可能になれば面白い技術になると期待できる。ただし、現状は航空宇宙利用⁽³⁾や半導体のチップ間電力伝送⁽⁴⁾などで幾つか検討例がある程度であり、機器内の給電線を置換するための多元的な電力伝送の報告例はないようである。少なくとも、機器内の制御系回路に対する電磁妨害 (EMI) をどう処理するのかは大きな課題と想像される。

2 ワイヤレスハーネスの検討例

ワイヤレスハーネスはハーネスを削減するだけでなくハーネスに付随するコネクタ等の周辺部品も削減でき、システム設計次第では電子制御ユニットなどのノードの集約化にも貢献できる可能性がある。また、外部との通信も可能のため、機器のヘルスモニタリングとして保守作業の大幅な軽減が期待できる。そのほかにも様々な視点から多くの機器で検討されている (図2)。以下では



図2 ワイヤレスハーネスの検討分野例

幾つかの有望な適用領域について各論的に説明する。

2.1 ICT機器

内部にメカトロニクス搬送系を含む ICT 機器、例えば ATM や券売機などは、搬送系のモニタリングを主として内部に 200 個程度のセンサを含み、ハーネスの延べ長さは数 km 以上に及ぶ。また機器の内部は部品が非常に密に実装されることから、ハーネスは機器の内部を引き廻す形でレイアウトされることが多く、これが重量増に拍車をかける原因にもなっていた。

このような動機付けから、我々は沖電気工業（株）及び日本電信電話（株）との共同体制で、ICT 機器のグリーン化という目標を立ててワイヤレスハーネス技術の研究開発を行ってきた^{(5), (6)}。この研究開発を通して、機器内という狭小な伝搬環境における電波伝搬の特性について知見を深めるとともに、2.4 GHz の小形無線通信モジュールの開発、専用プロトコルの開発などの一連の要素技術の開発を行った。その結果、ICT 機器の内部の伝搬環境に関しては、マルチパスリッチな環境であること、送受信間の距離が 20 cm 程度以内では見通し内 (Line of Sight, LOS) 伝搬、それを超えると見通し外 (Non-Line of Sight, NLOS) 伝搬になること、伝搬は、比較的近い位置関係では強い主波の存在を示す Nakagami-Rice モデルにフィットし、機器深部との送受信では多くの素波の存在を示す Rayleigh モデルにフィットすること、などを明らかにした^{(7), (8)}。また、システム遅延は 1 ms 以内、多元接続数は最大 200 と仕様設定を行って、周波数時分割多元接続方式に基づく適応チャネル制御、空間選択ダイバーシチを併用した周波数選択プロトコルを開発し、低遅延・多元接続無線通信の基本技術に目途を立たところである^{(6), (9)}。同時に、ハーネスをワイヤレス化する差分に着目してライフサイクル評価を行うことで、CO₂ 排出量を指標とした環境側面の定量的評価を行った⁽¹⁰⁾。ここではライフサイクルとしてハーネスや無線モジュールなどの製造工程から、装置組立工程、使用期間の電力、廃棄の一部を含む工程と定義し、その各工程における材料の原単位やエネルギー使用量から CO₂ 排出量に換算している。工程中に逸散するメタン等の温暖化ガスの寄与分も考慮して最終的に CO₂-eq (等量) に換算すると、ハーネスの削減効果はやはり大きく寄与し、例えば ATM のセンサ用ハーネスを全てワイヤレス化する場合、1 台あたり約 40 kg の CO₂-eq 排出削減が期待できること、また、ICT 機器の内部構造によって適不適はあるものの、ワイヤレスハーネスは環境側面において一定の効果が期待できることを明らかにした^{(5), (10)}。

典型的な ICT 機器であるパーソナルコンピュータ

(PC) については Redfield らの報告がある。UWB の周波数帯を対象として、PC 内部の近接場の伝搬特性や遅延特性の基礎的な解析を行っている⁽¹¹⁾。PC 内のハーネスの量はそれほど多くないため、重量ではなくコネクタや基板のレイアウトの自由度などに着目しているのではないかと想像している。内部のモジュールがコネクタフリーになれば、モジュールを接続せずに置くだけで PC ができるかもしれない。

なお ICT 機器内部で発生するノイズは、我々の検討ではせいぜい 1 GHz 以下で観測されるのみであり、マザーボードや液晶ドライバのクロックに起因すると推測している。おそらくほかの多くの ICT 機器の内部でも同様と思われ、2.4 GHz や UWB を使う限りでは干渉源にはならない。

2.2 自動車

自動車における無線利用には、キーレスエントリー、VICS、ETC 等があり、タイヤ空気圧モニタリングシステム (TPMS (Tire Pressure Monitoring System))、2007 年より米国で装着義務化、2012 年欧州で法制化、2013 年韓国で法制化、日本は検討中)、車車間通信や路車間通信などの DSRC (Dedicated Short Range Communications) も検討が進んでいる。そのようなシーンを含め、自動車で取り扱われる情報の種別や内容を概観整理すると図 3 となる。自動車では安全性が最優先であるため、特に動力系制御や走行制御などの「走る・止まる」に直接関わる情報を無線化することはハードルが高い。しかし、自動車の情報は多様性に富んでいる。既に TPMS や ETC が導入されていることから、便益性が明確であってフェイルセーフが担保されていれば、ハードルがそれほどではない運転支援、ボディ制御、オーディオラジオ TV、アミューズメント等への導入は今後ますます増えるものと想像している。むしろ課題は共存手法にあるかもしれない。

さてハーネスに関していえば、車の情報化を背景に

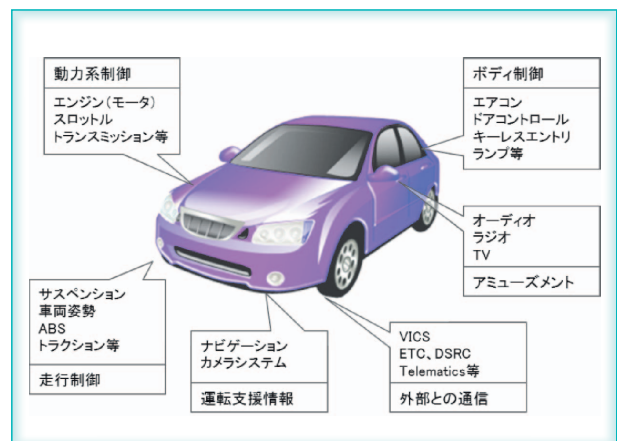


図3 自動車で取り扱われる主な情報

車載ハーネスは増加傾向にある。現在、高級車で 30 ～ 40 kg 程度、軽自動車で 10 kg 程度あるといわれている。特に最近では安全性や利便性を高めるために、様々なセンサやカメラの搭載が普及しつつあることから、データ量も増えている。国土交通省公開の車両重量別燃費の統計データ⁽¹²⁾から推計すると、ガソリン乗用車は 1 kg の軽量化により燃費はおおよそ 10 m/L 改善される。これを基に、かつ車種に応じて 2 ～ 10 kg の範囲で軽量化ができると仮定すると、日本全体では年間 25 万 kL 超のガソリンの節約と 60 万トンを超える CO₂ 排出量の削減が可能と試算ができる。最近ではハイブリッドカーや電気自動車が普及し始めているためにあくまで試算であるものの、輸送機関の軽量化による燃費改善は波及効果が大い。また、自動車のエンジンルーム内においては熱環境対策という視点からもワイヤレス化のニーズがある。

自動車内のワイヤレス化の検討としては、車内空間や後方部の制御やセンシングを目的とした UWB の検討例が多い。小林は周波数帯域幅と fading depth (フェージングによる受信強度の落ち込み) の関連を評価し、UWB を使うなら車室内環境ではマルチパスフェージングの影響が軽減され一様な伝搬損の分布が得られることを明らかにしている⁽¹³⁾。Niu らはテストベッドを作製して実用性の検討を行っている⁽¹⁴⁾。また、負荷の軽いアプリケーションに近い領域では Bluetooth と CAN (Controller Area Network, 車載ネットワークの一つ) とのマイグレーション⁽¹⁵⁾や ZigBee ライクな通信システムも検討されている⁽¹⁶⁾。

これらの基礎的検討として、車体下部や内部における電波伝搬損の解析も UWB⁽¹⁷⁾や 2.4 GHz⁽¹⁸⁾で行われている。ただ、IEEE802.15.4 に準じると遅延時間は 15.9 ms 以下にすることは困難であり⁽¹⁹⁾、衝突防止プロトコルである CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) を用いると平均的な遅延時間は 45 ms 以上と更に長くなる⁽²⁰⁾ため、選択肢として難しい側面がある。

自動車のハーネスのワイヤレス化には明確なメリットがあるものの、これらが実用化に結びついていないのは求められる信頼性に対するソリューションがないことや、技術要件のミスマッチがあるのではないかと想像している。

2.3 航空機

航空機にもハーネスが多量に実装されており、多くの課題が認識されている。その最たるものは重量であり、例えばブラックホークヘリコプタではコンピュータとセンサを接続するハーネスが約 900 kg 程度もあり、積載量の制約要因の一つになっている⁽²¹⁾。同時に

ハーネスの関わる安全性や故障、ミッションの休止、保守作業の人的稼働の多さ、ハーネスのレイアウトや引き廻しの難度、等の課題が指摘されている。自動車と視点は類似しているものの、ハーネスが関わる故障やメンテナンスの多さから、安全性向上や稼働率向上のためにワイヤレス化に取り組む姿勢がある点は興味深い。また、機体が事故等で損傷を受けてもワイヤレスは“断線しない”という視点もある。基本要件を送受信間は 30 m 以内、遅延分散は 100 ns 程度内、ジャミング対策としてオンボードのセンサ情報の通信に符号分割多元接続 (Code Division Multiplex Access, CDMA) が検討されている。

また、保守支援システムの視点からワイヤレスセンサの有用性が指摘されており、機体のヘルスマonitoring の用途では Bluetooth を有望視する向きが多い⁽²²⁾。

客室内については搭乗者へのサービスや客席のモニタリングの観点からワイヤレス化の検討が行われている。Airbus A319 の客室内で 3 ～ 8 GHz の伝搬特性の測定を行い、オフィス環境における伝搬との類似性と、金属機体内に起因する強い多重反射環境の相違点の指摘がなされており、直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) の適用性ととも UWB の有用性が示唆されている⁽²³⁾。20 m 程度の客室内には送受信機の位置関係で LOS 環境と NLOS 環境が起こり得るが、遅延分散はせいぜい 30 ns であり、伝搬損は 30 ～ 50 dB 程度とされている。

2.4 人工衛星・宇宙船

人工衛星や宇宙船では航空機以上に重量は重要な問題であり、その一方でワイヤリングは信頼性確保のために多重化されるため、重量軽減や省スペース設計等の観点からワイヤレス化のメリットが大い。小形人工衛星の場合、ハーネスはプラットフォームのコストの 10% を占め、乾燥重量の 15% を占めるともいわれており、UWB, Bluetooth, ZigBee, WiFi などの適用性について比較検討がなされている⁽²⁴⁾。また、ワイヤレス化には適応的な回路構成の変更・再構成ができ得る点も指摘されている。しかし、宇宙における利用に際しては様々なシーンに起こり得る電磁波干渉への対策が必須であり、宇宙という環境の要素も考える必要がある⁽²⁵⁾。

伝搬環境の側面から見ると、人工衛星の内部は密に実装された狭小な空間であり、きょう体や部品類は金属製が基本のために無線通信にとって多重反射の厳しい過酷な環境になる。そのため、狭帯域では 30 dB 程度も低下する fading depth が顕著に現れ、また遅延分散に関しても、金属製のシールドボックスを用いたモデル実験から 100 ns 程度以上になり得ることが示されてい

る⁽²⁶⁾。ただし、fading depthは周波数帯域を200 MHz以上確保すればほぼ解消すること、遅延分散は電波吸収体の挿入により20 ns以下に低減し得ることなどが明らかにされており、UWBの有用性が指摘されている。

3 機器内伝搬環境と機器内通信の要件

3.1 伝搬特性及び遅延特性

本章では、ICT機器について行った我々の検討を紹介する。2.1節で述べたように、ICT機器のハーネスのワイヤレス化を検討する際にシステム遅延は1 ms以内、多元接続数は最大200と仕様設定した。また、ビット誤り率(BER)は 10^{-6} 以下を目標とした。このような通信を機器内で達成するための基礎検討として、伝搬損と遅延特性を評価した。ICT機器としてはATM、券売機、自動販売機、中形業務用プリンタの4機器を用いた。

ICT機器内の環境は、周囲がきょう体で囲まれ、多数の部品モジュールが密に存在する、狭小な閉空間である。隙間はせいぜい、無線の波長(例えば2.4 GHzでは波長12.5 cm)の数分の1程度しかない。そのような機器内部におおの40～70か所の測定点を設け、薄型のチップアンテナを設置して伝搬損の周波数特性を測定した。アクセスポイント(RX)を機器の制御部近傍に設置し、送信アンテナ(TX)を機器内部の様々なか所とした(図1)。機器内で発生するノイズが300～800 MHzで観測されたため、1～8 GHzで評価を行った。伝搬損特性の典型例を図4に示す。伝搬損特性は多数の急峻なfading depthを示し、機器内が多重伝搬環境であることを示している。累積確率密度分布による伝搬モデル解析の詳細は文献(7)を参照頂きたい。この伝搬損特性を周波数減衰を示す次式

$$P = A \log f + B,$$

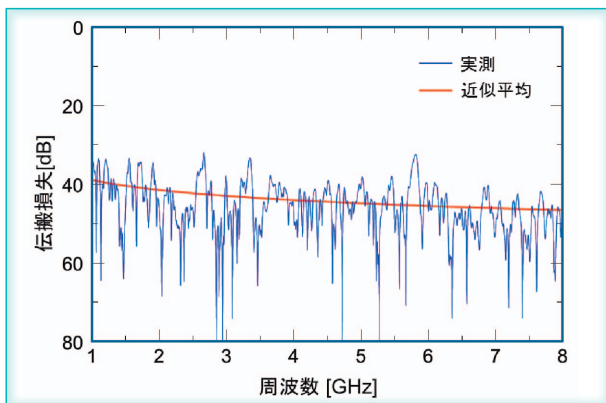


図4 ICT機器内における伝搬損特性の典型例。送信点は機器の中央でNLOSの位置

でフィッティングを行い、伝搬損の平均カーブを求めた(図4の赤線)。ここで、 P ；伝搬損 [dB]、 f ；周波数 [GHz]、 A 、 B ；係数である。

各機器の40～70点の各測定データについてこのような処理を行い、周波数3 GHzにおける平均伝搬損を求め、送受信間直線距離(TX-RX間距離)に対してプロットを行って依存性を評価した。結果を図5に示す。なお、機器きょう体の大きさは外寸でせいぜい全高が2 m弱であり、今回は内部の機構やハーネスの位置などからTX-RX間距離を1 m以内として評価している。マクロに見れば20 cm程度以内のLOS環境では4機器とも似たような位置にプロットがきた。それ以上の距離では機器の内部構造や材質の違いなどが現れ、特に、内部がほかよりも密に実装されているATMではTX-RX間直線距離が30 cm以上のNLOS環境で50～70 dBと、ほかよりも伝搬損が大きくなった。この位置は機器の深部との通信になり、累積確率密度分布の解析からRayleigh散乱が支配的であることが分かっている⁽⁷⁾。そのような条件下では、TX-RX間距離への依存性は見られなかった。強い主波がなく、機器内の様々な所で多重反射した素波が伝搬を担うため、TX-RX間の直線距離は意味を持たなくなると考えられる。

同様に各機器内の40～70か所について、周波数特性の逆フーリエ変換から遅延特性も評価を行っている。表3に結果を整理する。これらの機器はきょう体や内部の部材に金属が多用されていても、底部や放熱用スリットなどの開放部、表示用等の液晶パネルや樹脂部などがある。このような、電波が散逸しやすい構造があるために、比較的短い遅延時間に留まり、遅延プロファイルの標準偏差を表す遅延スプレッドも小さい値に留まったと考えている。比較のために40 cm角の金属模擬きょう体を作って完全密閉した環境にすると、内部での遅延は200 ns以上になった。また、開放部の少ないPCの内部では、きょう体は小さいものの遅延スプレッドは23～26 ns程度⁽¹¹⁾になる。それに比較して、我々

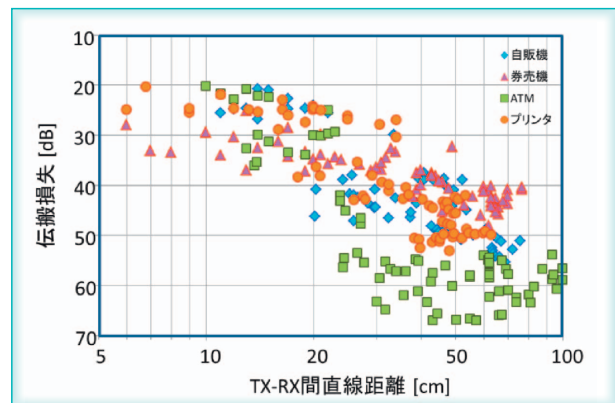


図5 機器内における平均伝搬損の送受信間直線距離依存性。平均伝搬損は周波数3 GHzで評価

表 3 ICT 機器内における遅延特性

機器	平均遅延時間 [ns]	遅延スプレッド [ns]
ATM	50~20	3~11
券売機	5~13	3~7
自動販売機	5~17	3~11
プリンタ	3~11	1~7

が評価した ICT 機器の遅延スプレッドは半分以下であった。

機器内とみなせるようなほかの機器のシーンについては、例えば自動車のエンジンルームの中、具体的にはエンジンの上下間においては、伝搬損失は 51 ~ 55 dB 程度となり、累積確率密度分布解析から強い主波が存在するマルチパスリッチな伝搬環境であることが報告されている⁽¹⁸⁾。我々もエンジンルーム内での伝搬評価を行い始めたところである。測定結果の一例を図 6 に示す。複数箇所を測定しており、今後は追って解析を進める予定である。エンジンルーム内は金属が多用される環境であるものの、目視で判断する限りでは部品間の空間は ICT 機器よりも広い。そのため、懸念するほど伝搬環境は厳しくない可能性がある。

自動車については、車内空間におけるワイヤレス利用の検討の報告例が圧倒的に多いが、車内空間はドアや車体に囲まれた機器内ともみなせるし、電波を透過するガラス窓があり、比較的広い LOS 環境を持つ半開放系の空間ともみなせる。伝搬特性から見ればマルチパスリッチな環境であり、3.1 ~ 10.6 GHz の UWB の領域では 40 dB 程度の伝搬損失、遅延スプレッドは 12 ns 程度との報告がある⁽¹³⁾。なお、搭乗者による伝搬損失は 3.1 ~ 10.6 GHz の帯域幅において 5 dB 程度と見積もられている。

遅延スプレッドは、最大の通信速度を見計る上で重要である。シンボルレートの 1/10 以下程度であれば等化器や OFDM などの耐マルチパス技術を用いなくとも通信は可能であるという一つの一般的な指標から判断すると、10 ns で 10 Msps まで可能という指針を得ることができる。実際、図 5 に示す伝搬損失の環境の中で我々は 2.4 GHz ISM 帯を使用し、シングルキャリアの GFSK (Gaussian filtered Frequency Shift Keying) を用いた 1 Mbps の通信モジュールを用いて、BER (Bit Error Rate) は 10^{-6} を達成している。また、信号発生器を用いた基礎検討では 5 Mbps も問題なく通ることを確認している。

3.2 機器内通信の要件

機器内通信は機器の改善手段という明確な目的を

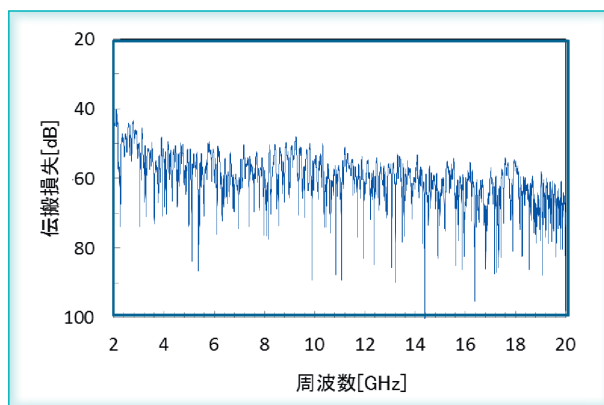


図 6 自動車のエンジンルーム内で測定した伝搬損失。送受信間距離は約 40 cm

もって検討されるために、要件は明確な場合は多い。逆に機器それぞれによって要件は異なるため、一般化には難がある。そこで、ここでは多数のセンサ情報の収集という観点から考察を行うことにする。そうすると基本的な要件は、多数の端末から情報をリアルタイムで受信するという低遅延多元接続性になる。それぞれのセンサ情報は 8 bit かせいぜい 12 bit 程度である。多元接続数は機器内のセンサの数量と見ると、ICT 機器で 200 個程度、自動車で 150 個程度であることから、一つの指標として 200 個程度が妥当な数字と思われる。また、通常のセンサが常時モニタリングの形態で動作する場合はセンシング周期が 1 kHz であることが多いために、システム遅延は 1 ms 以内となる。システムが間欠的にセンシングする場合はこの条件でカバーされると考えることにする。センサ情報をパケット送信すると、1 パケットあたりヘッダ等を含めて数 10 ~ 100 bit 程度必要になる。したがって、全体で約 20 Mbps の通信量となる。

なお、ここではセンシングは常時モニタリングの形態を考える。センシングの形態としてはイベントドリブン型もある。情報の重要性が低く、システム遅延の要件が緩く、情報が伝達しなかった場合に再送することで差し支えないようなケースなら、イベントドリブン型でも差し支えない。しかし、ワイヤレス通信の課題である干渉やバーストノイズ等による通信断とセンサの情報がないことの区別を付けにくいと、システム遅延の要件が厳しい場合には、状態の通知を連続的に行うモニタリング型である必要がある。

これらの低遅延・多元接続性の二つの切り口で SRD の UWB, Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi を俯瞰すると、表 4 に示すように、少なくとも接続ノード数の点で UWB と Bluetooth は難があるのがすぐに分かる。マルチホップを用いたツリー型のネットワーク構成はホップ間の遅延時間のために、低システム遅延を満足することは難しい。ZigBee は低速すぎるし、Wi-Fi は衝突

表 4 接続可能なノード数

近距離無線通信デバイス	最大接続ノード数
UWB	8
Bluetooth	8
ZigBee	65,535
Wi-Fi	2,007

防止の CSMA/CA が実装されているので、そのままではシステム遅延を保証することは難しい。結局、このような点だけでも汎用の SRD をそのままの形で適用することに難があることが分かる。

加えて、干渉対策も大きな課題である。もし 2.4 GHz 等の ISM 帯を使うとすると、異種システムの共存が前提となってしまう。一方、専用の周波数帯を使うことが可能であれば異種システムの共存については回避できるが、非同期の同種システムが共存する可能性は残る。機器が並列に設置されたり、自動車がすれ違うときなど、被干渉と与干渉を解決する必要がある。一つの解は CDMA と思われるが、同時にきょう体のアイソレーションを高める、送信出力を下げる、距離減衰の大きな高周波を用いる等、複合的な対策が必要と考えられる。

なお、バス配線のワイヤレス化も興味深い適用先であるが、上述のセンサの議論とは異なり、接続ノード数は低くても、高速性と低システム遅延がより厳しく求められるはずである。また、光ファイバ通信と競合の可能性もあり、環境が高温である等の特別な理由がない限り、バス配線のワイヤレス化のニーズは限定的と思われる。

4 まとめ

ワイヤレスハーネスは、様々な機器の軽量化や省スペース化を促進する大きな可能性を持っている。それが輸送機関においては燃費の改善や積載量の増大化などにつながり、省エネを促進するグリーン化技術としての面白さや有用性を持っている。また、ヘルスマニタリングやメンテナンス支援は機器の保守作業を大幅に効率化し、自動化を進めることができるため、今後、実用化の面では一番早いのかもしれない。配線が削減されることによるシステムデザインの自由度の向上、航空機における安全性や断線対策としての位置付けなども興味深い切り口であり、自動車における議論と比較すると面白い。

課題は、全てを満足するような適当な技術が現状まだないことである。求められる要件の一部は、フォールトトレラントなシステム設計により回避できる点も

あるが、実利用可能な機器内通信を実現するためには更なる技術検討が必要と感じている。

謝 辞

本検討は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 受託研究「装置内ハーネスの無線化を実現する低遅延多元接続通信技術の研究開発」の一環として行いました。また、多くの伝搬測定を行ってくれた阿野進研究技術員に感謝します。

文献

- (1) K. Kawasaki, Y. Akiyama, K. Komori, M. Uno, H. Takeuchi, T. Itagaki, Y. Hino, Y. Kawasaki, K. Ito, and A. Hajimiri, "A millimeter-wave intra-connect solution," Dig. 2010 IEEE Int'l Solid-State Circuits Conf., pp.414-415, Feb. 2010.
- (2) I. Arruego, H. Guerrero, S. Rodriguez, J. Martinez-Oter, J. J. Jimenez, A. Dominguez, A. Martin-Ortega, J. R. de Mingo, J. Rivas, V. Apestigue, J. Sanchez, J. Iglesias, M. T. Alvarez, P. Gallego, J. Azcue, C. Ruiz de Galarreta, B. Martin, A. Alvarez-Herrero, M. Daiz-Michelena, I. Martin, F. R. Tamayo, M. Reina, M. J. Gutierrez, L. Sabau, and J. Torres, "OWLS: a ten-year history in optical wireless links for intra-satellite communications," IEEE J. Selected Areas in Commun., vol.27, no.9, pp.1599-1611, Dec. 2009.
- (3) Y. Kobayashi, M. Hori, H. Noji, G. Fukuda, and S. Kawasaki, "The S-band GaN-Based high power amplifier and rectenna for space energy transfer applications," IMWS-IWPT 2012, FRI-J-5, Kyoto, Japan, May 2012.
- (4) C. Cho, J. Cho, M. Kim, J. Kim, and J. S. Pak, "Design and implementation of on-chip embedded current probe using magnetic field coupling in chip to chip wireless power transfer system," IMWS-IWPT 2012, FRI-I-3, Kyoto, Japan, May 2012.
- (5) 伴 弘司, 北沢祥一, 小林 聖, 清水 聡, 菊池典恭, 畑本浩伸, 原美永子, "ICT 機器内ハーネスのワイヤレス化の研究開発," 戦略的情報通信研究開発推進制度第 8 回成果発表会, C2-2, 2012. http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/scope/event/h24program.html
- (6) H. Ban, N. Nakamoto, T. Oka, S. Kitazawa, K. Kobayashi, N. Kikuchi, H. Hatamoto, S. Shimizu, and M. Hara, "Wireless harness inside ict equipments," 14th Int'l Conf. Adv. Communi. Tech., Phoenix Park, Korea, pp.98-102, Feb. 2012.
- (7) M. Ohira, T. Umaba, S. Kitazawa, H. Ban, and M. Ueba, "Experimental characterization of microwave radio propagation in ICT equipment for wireless harness communications," IEEE Trans. Antenna Propagat., vol.59, no.12, pp.4757-4765, Dec. 2011.
- (8) 伴 弘司, 中本成洋, 岡 智広, 上羽正純, "狭小な ICT 機器内空間における電波伝搬," MWE2011, WS13-3, Nov.-Dec. 2011.
- (9) 清水 聡, 菊池典恭, 畑本浩伸, "ICT 機器内配線のワイヤレス化," 電学誌, vol.131, no.8, pp.530-

- 533, Aug. 2011.
- (10) M. Hara, K. I. Takahashi, M. Nakamura, T. Kunioka, J. Nakamura, S. Shimizu, and M. Ueba, "A case study analysis of the CO₂ emission reduction potentiality of the wireless harness within ICT equipment," Proc. EcoDesign 2011 Int'l Symp., Kyoto, Japan, pp.736-737, Nov.-Dec. 2011.
 - (11) S. Redfield, S. Woracheewan, H. Liu, P. Chiang, J. Nejedlo, and R. Khanna, "Understanding the ultrawideband channel characteristics within a computer chassis," IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett., pp.191-194, Feb. 2011.
 - (12) 国土交通省公開資料, <http://www.mlit.go.jp/common/000037099.pdf>
 - (13) T. Kobayashi, "Measurements and characterization of ultra wideband propagation channels in a passenger-car compartment," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.11, pp.3089-3094, Aug. 2006.
 - (14) W. Niu, J. Li, S. Liu, and T. Talty, "Intra-vehicle ultra-wideband communication testbed," IEEE Military Communications Conf., pp.1-6, Oct. 2007.
 - (15) K. Akingbehin, "Hybrid wireless harness for low mass vehicular applications," Int'l Conf. Computer Communications and Networks, pp.1-5, July-Aug. 2012.
 - (16) J. R. Lin, T. Talty and O. K. Tonguz, "Feasibility of safety applications based on intra-car wireless sensor networks: a case study," IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall), pp.1-5, Sept. 2011.
 - (17) C. U. Bas and S. C. Ergen, "Ultra-wideband channel model for intra-vehicular wireless sensor networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conf., pp.42-47, April 2012.
 - (18) A. R. Moghimi, H. M. Tsai, and C. U. Saraydar, "Characterizing intra-car wireless channels," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol.58, no.9, pp.5299-5365, May 2009.
 - (19) T. Elbatt, C. Saraydar, M. Ames, and T. Talty, "Potential for intra-vehicle wireless automotive sensor networks," IEEE Sarnoff Symposium, pp.1-4, March 2006.
 - (20) M. Ahmed, C. U. Saraydar, T. ElBatt, J. Yin, T. Talty, and M. Ames, "Intra-vehicular wireless network," Globecom Workshops, pp.1-9, Nov. 2007.
 - (21) J. Liu, I. Demirkiran, T. Yang, and A. Helfrick, "Communication schemes for aerospace wireless sensors," IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, pp.5.D.4-1-5.D.4-9, Oct. 2008.
 - (22) R. M. Harman, "Wireless solutions for aircraft condition based maintenance system," IEEE Aerospace Conference Proceedings, vol.6, pp.6-2877-6-2886, March 2002.
 - (23) I. Schmidt, J. Jemai, R. Piesiewicz, R. Geise, M. Schwark, T. Kurner, M. Schirmacher, and P. Thielker, "UWB propagation channels within an aircraft and an office building environment," Int'l. Symp. Antennas and Propagat., pp.1-4, July 2008.
 - (24) V. Lappas, G. Prassinis, A. Baker, and R.

Magnuss, "Wireless sensor motes for small satellite applications," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.48, pp.175-179, Oct. 2006.

- (25) W. H. Zheng and J. T. Armstrong, "Wireless intra-spacecraft communication: the benefits and the challenges," 2010 NASA/ESA Conf. Adaptive Hardware and Systems, pp.75-78, June 2010.
- (26) A. Matsubara, T. Ichikawa, A. Tomiki, T. Toda, and T. Kobayashi, "Measurement and characterization of ultra wideband propagation within spacecrafts," 2009 Loughborough Antennas & Propagation Conf., pp.565-568, Nov. 2009.

(平成 24 年 12 月 12 日受付, 平成 25 年 2 月 4 日再受付)

伴 弘司 (正員)

1982 東工大・工・高分子工学卒。
1984 同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現株式会社)入社。環境 ICT 技術の研究に従事。現在(株)国際電気通信基礎技術研究所 波動工学研究所環境通信研究室長。博士(工学)。IEEE, 応用物理学会会員。



北沢 祥一 (正員)

1993 近畿大大院工学研究科電子工学専攻博士前期課程了。同年松下日本電器(株)(現パナソニックデバイス日東(株))入社。2005 年 10 月(株)国際電気通信基礎技術研究所 波動工学研究所に入社。2007 年大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻博士課程了。入社以来マイクロ波・ミリ波デバイスの研究開発、通信方式の研究開発に従事、現在 IEEE802.15 IG SRU Chair。



小林 聖 (正員:シニア会員)

1987 東京理科大・工・電気卒。
1989 同大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。無線通信における変復調、同期制御等の信号処理アルゴリズム及び実装技術の研究に従事。現在、(株)国際電気通信基礎技術研究所・波動工学研究所長。次世代の無線通信技術及び電波利用アプリケーションの研究を推進。2007 ~ 2012 筑波大大院客員教授。2012 より室蘭工大客員教授。博士(工学)。IEEE, AIAA 会員。

