

無線でECUを結ぶ 軽量・高信頼な電波ホース

加藤 修三

東北大学 電気通信研究所 教授



(写真 : Getty Images、コラージュ : 山井 淳一)

自動車の低燃費化と車内LANの大容量化を目的として、既存の金属製のワイヤハーネスを金属メッキされた樹脂性のチューブ「電波ホース」に置き換えたワイヤレスハーネス通信システムを提案しているのが東北大学の加藤修三氏らのグループだ。ハーネスの重さを現行方式の1/10以下とし、ハーネス切断時にも耐性があるなど、現行ワイヤハーネスよりも高信頼になるという。実験結果を交えながら提案システムを解説する。 (本誌)

現在、自動車に搭載されるワイヤハーネスは総重量で30kg程度ある¹⁾。現行のワイヤハーネスでは、各ECU (electronic control unit) 間を導体に銅を用いた線路(ワイヤ)で接続している(図1)。このECU数が自動車のハイブリッド化、電気自動車化に伴い、いっそう増加する傾向にあり、自動車用通信システムは、必要な信号線の数に比例して、ハーネスの重量が増加するという問題がある。

また、車内エンターテインメント用途で数Gビット/秒レベルの高速伝送の必要性が近年生じている。これは自動車内前席と後部座席とで同じ映像を共有する、あるいは座席ごとに異なるビデオ信号を受信再生する、いわゆる「車内エンターテインメント」用に必要とされるものである。もちろん、ワイヤハーネスメーカーも軽量化に向けた研究開発を進めているが、物理的に増大する線数を削減するのは難しいのが現状だ。

数Gビット/秒を無線で実現

これらの課題を解決する手法の一つとして、「電波ホースを用いたワイヤレスハーネス通信システム」を提案する^{2)~5)}。提案システムはワイヤハーネスに比べて軽量の導体を塗布(メッキ)した樹脂性チューブ「電波ホース」を用いる。その広帯域性から、1本の電波ホースで制御信号と車内エンターテインメント信号のマルチチャンネル伝送が可能である。さらに、従来のワイヤハーネス通信と比較して、電波ホースがクラックなどで部分的に破損しても通信が途切れず通信可能であり、通常の無線通信と比べても金属メッキされたホースの外壁によって伝送損失を低減する効果や妨害波影響を防ぐ効果があることから、高い信頼性を有する利点がある。

自動車用無線通信としては例えば、米国では現在タイヤ空気圧の監視に無線通信(Bluetooth)が使われているが、これは信号が瞬間的に途絶え

ても問題がないアプリケーション(soft safety)に分類される。一方、エンジンの制御、ブレーキの制御など、瞬間的であっても途絶えてはいけない信号の伝送(hard safety)には有線通信が用いられている。これは、現在の適用可能な技術を考えれば、ごく自然な選択である。しかし、提案の電波ホースは有線通信と無線通信のハイブリッドであり、無線通信の軽量・広帯域通信性を保ちつつ、ホースが切断されても、圧搾されても通信を継続できる(詳細は後述)。

現行ワイヤハーネスは線路が切断されれば、通信は継続できないことを考えると、有線通信よりも信頼性の高い通信路が電波ホースにより実現できることになり、hard safetyにも「使用可能」との期待が持てる。

提案したシステムの使用周波数帯としては、電波が空中に放射されることはないことから、必ずしも電波免許不要帯である必要はないが、安価な送受信機モジュールが利用可能な電波免許不要帯として、60GHz帯および無線LANのモジュールが適用可能な5GHz帯を検討した。送受信モジュールの大きさからは、小型で軽量の送受信機でかつ数Gビット/秒の伝送が可能な60GHz(ミリ波)帯が有望であり、大きな車両では60GHz帯では信号伝送路が長く伝送損失が大きいため、5GHz帯の適用も有望である。

電波ホースの伝搬特性を60GHz帯

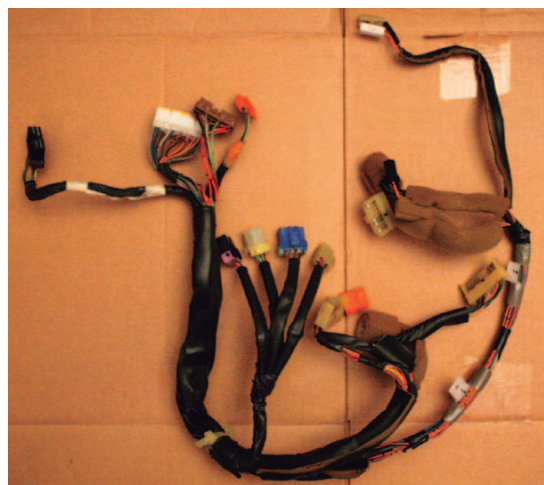


図1 複雑で重い自動車用ワイヤハーネス
さまざまなユニットを相互接続するために多数のケーブルがまとめられ、非常に複雑になっている。(写真: Wikipedia より転載)

で測定した結果、小径電波ホースの伝送損失は、長さ4mで39.4dBとなり、自由空間のそれと比較して40.6 dBも小さいという結果が得られた。また、遅延スプレッドも約0.2nsと小さいことが分かった。

この結果を基にチャンネルモデルを構築し、制御信号や車内エンターテインメント信号を同時に伝送している場面を想定した誤り率(BER)シミュレーションを行った。理論値と比較しBERの劣化は誤り訂正(FEC)適用時には1dB以下($BER=10^{-6}$)であり、遅延スプレッドを伴う伝搬路で必要とされるOFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) や複雑なイコライザーは不要なことから、シングルキャリア方式と簡易な誤り訂正で高速通信が可能であることが分かった。

さらに、送受信モジュールを含む電波ホース重量(4mの場合)は514gと推定され、現行ワイヤハーネス重量の1/10以下で実現できる見通しを得た。

電波ホースの諸元

ターゲットとするワイヤレスハーネス通信システムの諸元を表1に示す。ワイヤレスハーネス通信システムの適用先としては、センサー、制御装置などからのモニター、制御信号やエンターテインメント信号が電波ホース内を伝搬する図2のような形態を想定する。車体の中心、例えば、カーナ

表1 ターゲットとするワイヤレスハーネス通信システムの諸元

項目	値
電波ホースの最大長	一般車で最大4m(カーナビが中央制御装置と仮定)
電波ホースの外径	電波ホースの特性評価用 - 外径40 mm(大径ホース) 現在用いられているワイヤハーネス(最大外径6.7mm)の置き換え用 - 外径6.5 mm(小径ホース)
使用周波数帯	免許不要帯で広帯域(9GHz)が利用でき、小型・軽量化に適した60GHz帯(5GHz帯での伝送特性も別途検討)
送受信機	装置コスト低減のため、ミリ波無線通信の国際標準規格であるIEEE802.15.3cに準拠した無線機を利用(実験に使用したチャンネルは第1チャンネル(57.24G~59.4GHz))
信号伝送速度	センサーおよび制御信号(数kビット/秒)だけでなく映像、音楽などのエンターテインメント信号(数十~数百Mビット/秒)も合わせて1本の電波ホースでマルチチャンネル伝送

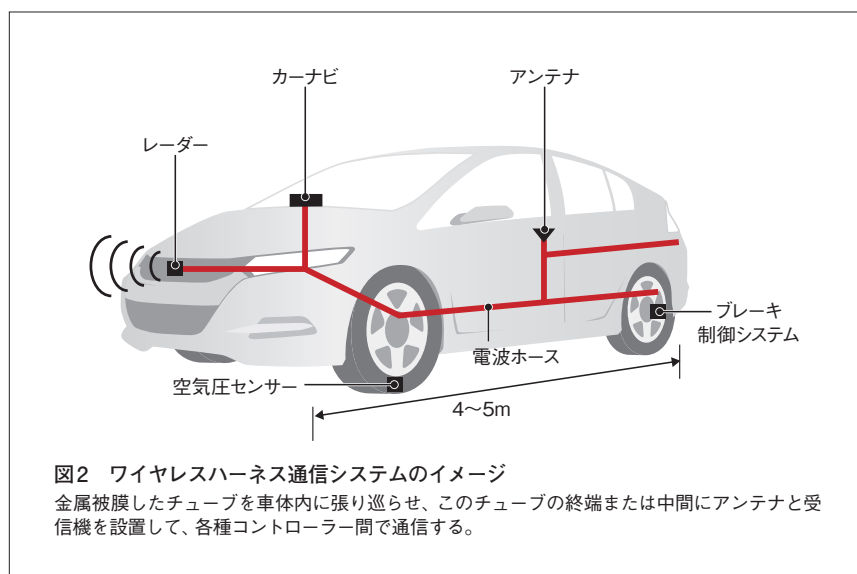


図2 ワイヤレスハーネス通信システムのイメージ
金属被膜したチューブを車体内に張り巡らせ、このチューブの終端または中間にアンテナと受信機を設置して、各種コントローラー間で通信する。

ビを中心に伝送路が車内に張り巡らされる。このような構成の下、多くの車両は最大長4mの電波ホースで通信が可能となる。以降では60GHz帯を用いた電波ホース長4mの通信を中心に検討した。大型車両に向けて、より長い電波ホースのために5GHzでの伝送特性も別途検討した。

電波ホースは一般に市販されているプラスチックホースの外皮を金属メッキ(導電塗料を塗布)することで作製した(図3)。本稿で述べる電波

(a) 試作電波ホースの外観



(b) ホースの断面形状

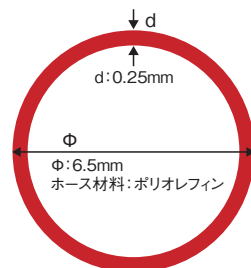


図3 ワイヤレスハーネス用の小径電波ホース

現行のワイヤハーネス設置場所に通せるように外径6.5mmのホースを入手し、金属メッキを行った。

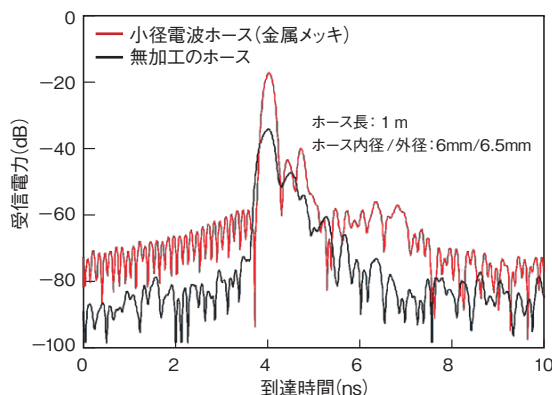


図4 小径電波ホースの伝搬特性

無加工のホースと比べて受信電力が向上した。遅延スプレッドは無加工のものよりも小さくなった。

ホースは小径の電波ホース(外径6.5mm、内径6mmのポリオレフィン製($\epsilon=2.3\sim2.4$))を実使用のターゲットとするが、特性解析のために、大径ホース(外径40mm、内径36mmのポリ塩化ビニール製($\epsilon=2.8\sim8.0$))の伝送特性も測定した。後述のように、大径電波ホースは小径電波ホースよりも幾分伝送損失が大きい。

電波ホースの伝送特性例を図4に示す。これから分かるように金属メ

ッキされた小径電波ホースを伝搬する信号は金属メッキされない一般のホースよりも伝送損失が1m当たり16.5dB小さく、通信に適していることが分かる。また、遅延スプレッドも無加工のホースよりも小さく、高速通信に適している。

実験結果

実験では図5に示すように電波ホー

スの両端にコニカルホーンアンテナを接続し、伝送特性を測定した。測定周波数は、IEEE802.15.3cで定められた第1チャネル(57.24G~59.4GHz)とし、偏波は円偏波、キャリアブレーションは入出力ポート直結時の受信電力を基準とした⁶⁾。

実験では(1)金属メッキおよびその位置による伝送損失低減効果、(2)ホース変形/圧搾に対する耐性評価、(3)マルチチャネル伝送の評価を行った。

(1) 金属メッキの効果

金属メッキによる伝送損失の低減効果を明らかにするために、金属でメッキしていないホース、外側を金属でメッキしたホース、内側を金属でメッキしたホースについて伝搬特性を測定した(ホースの長さはすべて1m)。ホースには内部メッキの容易さから直径40mmの大径ホースを利用した。

▶ 60GHz帯の特性

60GHzの信号を流した場合の伝送損失と遅延スプレッドの測定結果を表2に示す。金属でメッキしたホースの伝送損失はメッキしていないホースと比べて12~14dB小さくなっていることが分かる。また、外壁を金属でメッキしたホースの遅延スプレッドは内壁を金属でメッキしたホースの1/4であり、伝送損失は1.9dB大きくなった。

損失の観点からは内壁を金属でメッキしたホースが望ましいが、より簡易な受信機の構成(シングルキャリア+強力なFEC+簡易な等化器)を可能とするために、遅延スプレッドが約1/4と小さい外壁を金属でメッキしたホースを選択することとした。これ以降において、「電波ホース」とは「外壁を金属でメッキしたホース」とする。

小径電波ホース(ホース外壁メッキ)の伝搬特性は表3に示すように、大径電波ホースの場合よりも「メッキあり」の伝送損失は小さい。また、遅延スプレッドは大径電波ホースのそれよりも小さくなる。小径電波ホースは現行ワイヤハーネスを容易に置き換える構造であると同時に、伝送特性も優れているといえる。

大径電波ホースの長さに対する伝送損失と遅延スプレッドを測定した結果を図6に示す。この結果、長さ4mの伝送損失は47dBとなり、同距離の自由空間の伝送損失より33dB小さいことが分かった。また、長さ1mの伝送損失は16.9dB、長さ2mの伝送損失は27.5dBであることから、減衰定数は10.4dB/m、アンテナ変換損は3.25dBと求められた。遅延スプレッドはホースの長さによらず約0.2nsとなった。従って、電波ホースを用いた60GHz帯のシステムは低損失、低遅延であるといえる。

一方、小径電波ホースの伝送特性は、表4に示すような値となった。こ

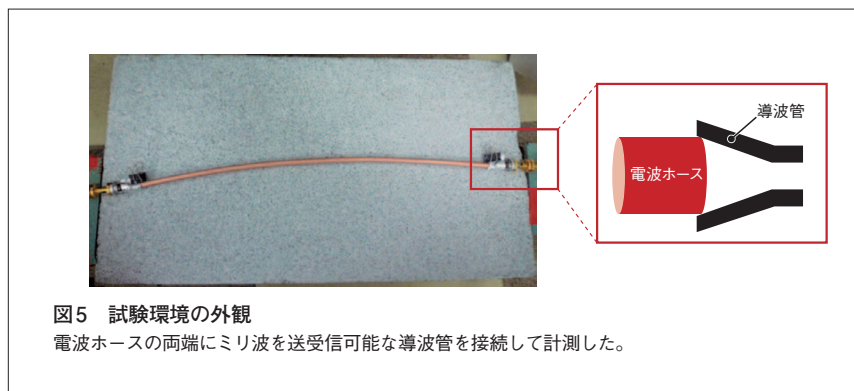
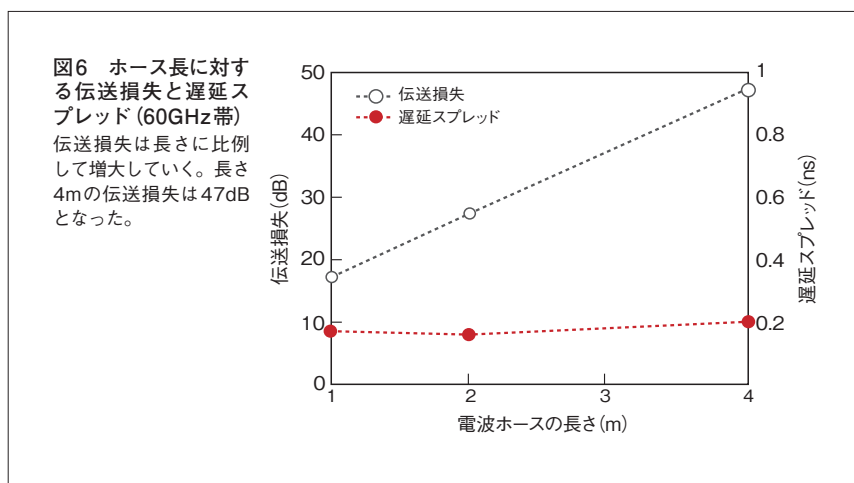


表2 大径ホースの金属メッキ有無による伝送特性 (57.24G~59.4GHz)

	ホース長 (m)	伝送損失 (dB)	遅延スプレッド (ns)
電波ホース (外壁メッキ)	1	16.9	0.18
電波ホース (内壁メッキ)	1	14.8	0.8
無加工のホース	1	29.2	0.068

表3 小径ホースの金属メッキ有無による伝送特性 (57.24G~59.4GHz)

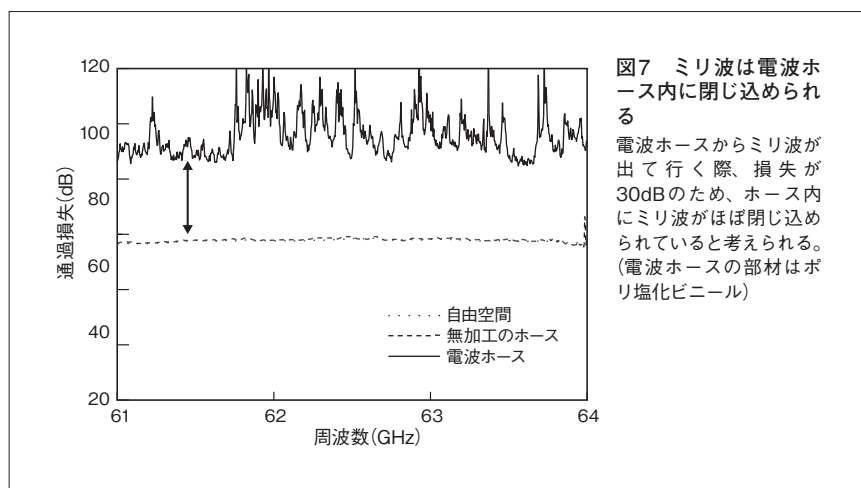
ホースの種類	長さ (m)	伝送損失 (dB)	遅延スプレッド (ns)
小径電波ホース	1	14.8	0.08
無加工のホース	1	31.3	0.16



れから、入出力部の変換損失と電波ホースそのものの伝送損失を求めると、電波ホース減衰定数は8.2dB/m、アンテナ変換損は3.3dB、電波ホース

表4 小径電波ホースの長さに対する伝送損失と遅延スプレッドの変化 (57.24G~59.4GHz)

ホース長 (m)	伝送損失 (dB)	遅延スプレッド (ns)
1	14.8	0.08
0.5	10.7	0.1
0.25	9.4	0.2



の最大伝送損失 (4m伝送時) は39.4 dBとなった。

つまり、小径電波ホースの伝送損失は大径電波ホースよりも7.6dB (4m伝送時) 小さく、送信電力10dBm (60GHz電波免許不要帯での最大送信出力) を入力した場合の4m伝送後の受信電力は-29.4dBmとなり、3Gビット/秒の伝送時の受信感度に対し、約30dBの-marginのあることが分かる。

▶ 高い不要電波遮断特性

電波ホースの不要電波遮蔽特性を明らかにするため、電波ホースの通過損失を測定した。電波ホースの部材はポリ塩化ビニールとした。二つのアンテナを1m離して対向させ、その間を電波ホースでつないだ。比較

のため、金属メッキしていないホースでつないだ場合と遮蔽物を置かず自由空間とした場合も測定した。測定した通過損失を図7に示す。自由空間と金属メッキしていないホースの通過損失は同じであるが、電波ホースではそれらより約30dB損失が大きいことが分かった。車内雑音はVHF帯に大きな成分があるが、マイクロ波およびミリ波帯では小さいこと、かつ電波ホースは外部からの干渉波や雑音を約30dB遮蔽できることから、提案する電波ホースを用いたシステムは雑音に強く、高信頼の通信を実現できる。

▶ 5GHz帯の特性

以上に述べた60GHz帯の伝送特性として、3Gビット/秒という超高速

伝送をする場合にでも約30dBという大きな-marginのあることが分かった。とはいえ、電波ホースの切断、圧搾というような厳しい環境を考慮すると、marginは大きい程良く、特に対象とする車体が一般的な車体 (車体のほぼ中央に中央処理装置があると仮定し、最長4m) よりも大きい場合には、伝送損失が増大し通信システムのmarginが十分には取れなくなる。

これに対応するため、伝送損失のより小さい、低い周波数帯の活用が考えられる。そこで、電波免許不要帯である5GHz帯での伝送特性を調べてみた。測定系は60GHz帯と同様とし、電波ホースの両端にはモノポールアンテナ (利得4.4dBi、帯域幅3G~10GHz) を接続した。

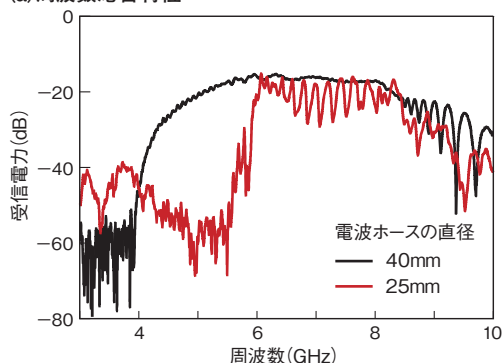
外側を金属メッキした長さ1mの電波ホースの周波数応答を測定した。測定周波数は3G~10GHz、ホースの直径は25mm、40mmの2種とした。図8 (a) はそれぞれの電波ホースの周波数応答である。この図からホース径40mmの場合、5G~8GHzが使用可能な周波数帯域であることが分かる。この理由としては、低周波領域ではカットオフ周波数の存在、高周波領域では高次モードの発生による効率低下が原因と考えられる。また、直径25mmのホースのカットオフ周波数は直径40mmのホースより2GHz高いということが分かる。

金属でメッキしていないホースと電

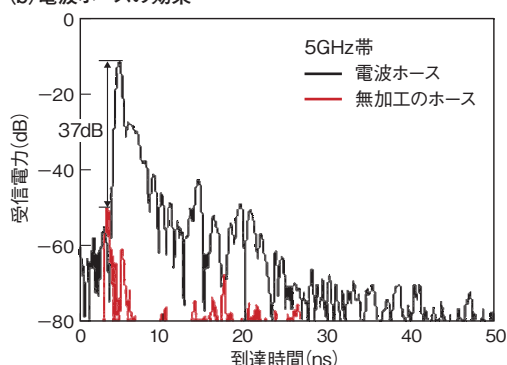
図8 マイクロ波における電波ホースの特性

5GHzの通信には、直径40mmの電波ホースが適する(a)。また、40mmの電波ホースは5GHz帯で十分な性能を有することが確認できた(b)。

(a) 周波数応答特性



(b) 電波ホースの効果



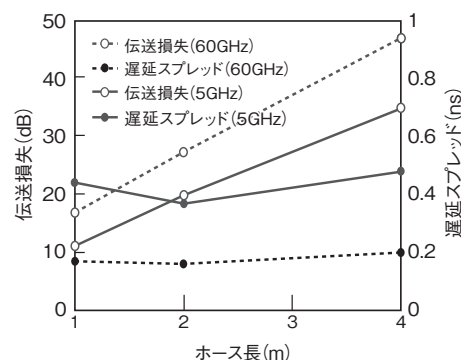
波ホースの伝搬特性の測定結果を図8(b)に示す。測定周波数は5G～8GHzである。電波ホースの伝送損失は金属でメッキしてないホースより37dB小さく、5GHz帯でもホースを金属でメッキすることにより、60GHz帯と同様に伝送損失を小さくできることが分かった。

ホース長に対する伝搬損失と遅延スプレッドの測定結果を図9に示す。測定周波数は5G～8GHzである。長さ4mの伝送損失は35dBとなり、60GHz帯のそれより12dB小さいことが分かった。測定データから、60GHz帯の場合と同様に電波ホースの減衰定数とアンテナ変換損を求めた。長さ1mの伝送損失は11.1dB、長さ2mの伝送損失は19.8dBであることから、減衰定数は8.7dB/m、アンテナ変換損は1.2dBと求められた。5GHz帯の減衰定数は、60GHz帯と比較して1.7dB/m小さいという結果となった。

一方、遅延スプレッドはホースの

図9 電波ホース長に対するミリ波の伝送特性

直径40mmの電波ホースの場合の値。60GHzよりも4mのときに12dBも小さかった。



長さによらず0.5nsとなり、60GHz帯のそれより0.3ns大きくなった。この現象は低損失であるため、電波ホース内に強い反射波が存在できることが原因と考えられる。

(2) ホース変形/圧搾耐性

電波ホースを実車に搭載する場合、設置においてホースを曲げる必要があるし、異物の挟み込みや車体の変形によるホースの圧搾、あるいは切断といった事態を想定した信頼性が求められる。そこで、こうした問題が

どの程度通信に影響を与えるか調べた。実験はすべて60GHzの無線通信システムと小径の電波ホースを用いて実施した。

まず、ホースの曲げである。図10のように徐々にホースを曲げ角度を大きくしていき、受信信号を計測した。結果として30度以下の曲げではほとんど変化なく、90度曲げた時に約4dBの損失があった。車体に電波ホースを設置する場合、多くとも90度曲げは2回と考えられる。2回90度曲げても、その損失は8dBであること

から、マージン以内に十分に収まる。遅延スプレッドについては、ホースの曲げ角度によらず約0.1nsで安定していた。

次にホースが切断された場合の耐性を評価した。1mの電波ホースを真ん中で切断し、ホースの切断面を0～5cmの範囲で広げながら損失を計測した。結果は図11のように、損失は3.3dB/cmの傾きでほぼ線形的に増大していくことが分かった。なお、遅延スプレッドは距離に関係なく約0.1nsだった。

4mの電波ホースで送信電力10dBm、5cmの間隔があった場合、計算上、受信電力は-46.1dBmである。これはIEEE802.15.3c規格に対応した無線機で、3Gビット/秒の通信が十分に継続可能なレベルである。

電波ホースの圧搾に対しては万力でホースを挟み込み、万力の間を狭めながら、損失を計測した(図12)。電波ホースの太さが6.5mm、肉厚が0.25mmであることから、電波ホースの直径にぴったりと合った状態から、6mm圧搾したところで完全に穴がつぶれた状態になる。

結果は完全に圧搾した場合に18.8dBの損失増加となった。これは10dBm、4mの場合、受信電力は-48.2dBmとなると計算でき、3Gビット/秒の通信が継続可能なレベルである。なお、遅延スプレッドは圧搾とともに増大していくが、完全に圧搾した状態でも0.3nsであり、十分許容できるレベルだった。

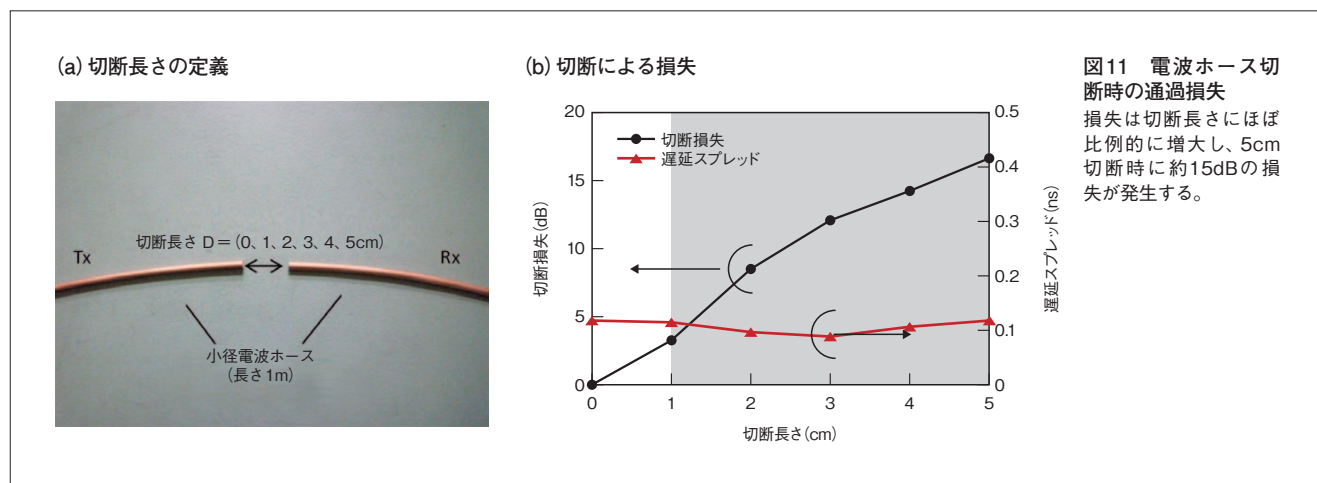
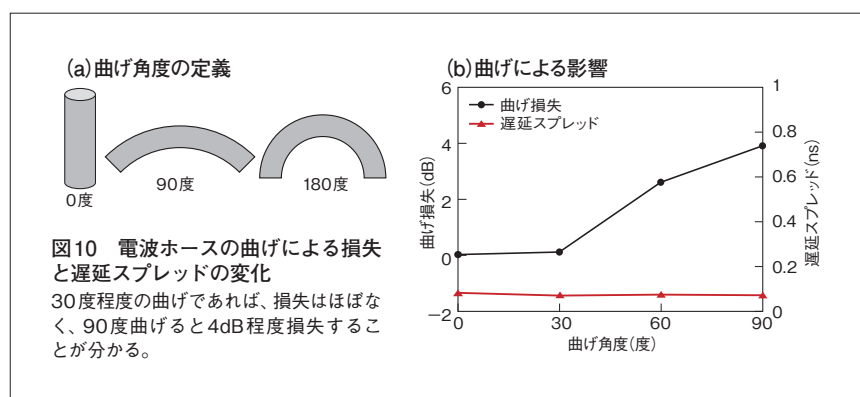
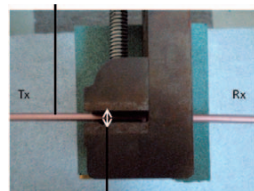


図12 電波ホース圧搾時の通過損失

大きく押しつぶすほど、損失が増大するが、完全に穴をつぶすほど大きく押しつぶしても、20 dB程度の損失にとどまる。

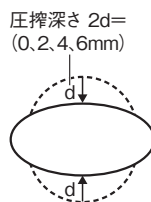
(a) 圧搾長の定義

小径電波ホース
長さ: 1m
外径: 6.5mm
内径: 6mm



圧搾長さ2d

断面図



(b) 圧搾深さの定義

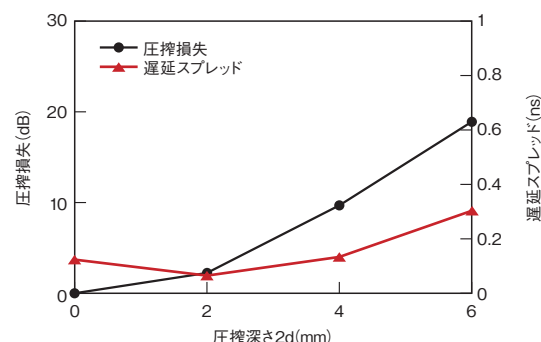
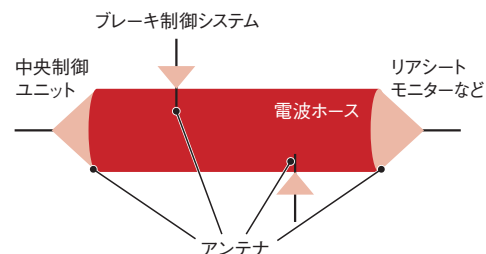


図13 電波ホースによるマルチチャネル伝送

電波ホースの両端にアンテナを用意する以外に、画鋸のようなアンテナを電波ホースの途中に設置することが考えられる。両端のアンテナと、途中のアンテナのそれぞれで異なるチャネルの通信をすれば、マルチチャネルのシステムが実現できる。



(3) マルチチャネル通信評価

ワイヤレスハーネス通信システムでは、端部の無線機に加えて電波ホースの途中に設けたアンテナを加えた構成も考えられる。具体的には、電波ホース途中に画鋸のようなアンテナを挿入し、ホース両端部に加えて、この途中アンテナが通信に参加する多地点通信、電波ホース内で異なるチャネルを使って通信する多チャネル通信が実現できる(図13)。これが実現可能であることを確認するための実験も行った。

実験システムではホース両端部にコニカルホーンアンテナ(半値角45

度、ゲイン13dBi)を用い(それぞれRx1、Tx1と呼ぶ)、ホース途中に「中途入力・中途出力」(SLC: short length communications)用のアンテナ(Rx2と呼ぶ)を挿入する。Rx2にはモノポールアンテナ(最大利得1.6 dBi)を用いた。モノポールアンテナは、セミリジット型の同軸ケーブルの芯線部分をホースから1.25mm突出させることでモノポールアンテナとした。偏波はTx1とRx1においては円偏波を、Rx2においては直線偏波を用いた。

結果はTx1とRx2の間を0.75m離れた場合、30dBの伝送損失が出るこ

表5 電波ホースの「中途入力・中途出力」(SLC) システム伝送特性 (1mの小径電波ホース、60GHz帯)

伝送距離 d (m)	伝送損失 (dB)	遅延スプレッド (ns)
0.25	22.6	0.32
0.5	25.4	0.27
0.75	30	0.28

表6 電波ホースの「中途入力・中途出力」(SLC) システム伝送時の「電波ホース端・端」通信システムの伝送特性 (1mの小径電波ホース、60GHz帯)

SLCアンテナの位置 d (m)	伝送損失 (dB)	遅延スプレッド (ns)
アンテナ未挿入	13.8	0.14
0.25	14.2	0.14
0.5	14	0.14
0.75	14.1	0.13

表7 電波ホースのハーネスとしての優位性

項目	小径電波ホース	大径電波ホース	光ファイバー	無線通信システム
自動車搭載の容易さ(ケーブルの直径)	○ 容易 (6mm)	× 難しい (40mm)	○ 容易 (1mm以下)	○ 容易 (0mm)
伝送損失	○ 小さい (8.2dB/m@60GHz)	△ 中程度 (10.4dB/m@60GHz)	◎ 極めて小さい (0.002dB/m@194THz)	× 大きい (68dB/m@60GHz)
信頼性	○ 高い (破損しても通信可)	○ 高い (破損しても通信可)	△ 中程度 (破損すると通信不可)	× 低い (外部雑音に弱い)
マルチチャネル伝送の実現性	○ 高い	○ 高い (多重化装置が不要)	△ 高い (多重化装置が必要)	○ 高い (多重化装置が不要)

とが分かった(表5)。送信電力が10dBmと仮定するとRx2における受信電力は-44.5dBm(4m時)と推定され、SLCにおいても3Gビット/秒の伝送が実現可能である。なお、遅延スプレッドは距離によらず約0.3ns程度だった。

Rx2の挿入が、Rx1、Tx1の通信に与える影響についても評価した。Rx1とTx1の両端を1m離れた状態でRx2の位置を変化させたところ、場所による変化は生じず、Rx2の有無で0.2～0.4dB損失が増える程度だった

(表6)。遅延スプレッドの変化はなく、0.13n～0.14nsとなった。

他システムとの比較

最後に、今回実験で利用したシステムの重量およびワイヤハーネス代

替として提案されている他の通信システムとワイヤレスハーネス通信システムとの比較をしたい。

小径ワイヤレスハーネスの重さは4mで「約520g」で達成可能という見通しを得た。細かくみると、電波ホースが13g/m×4m=52g、ホーンアンテナが11g×2=22g、60GHz信号送受信モジュールが20g/個×2=40g (IEEE802.15.3c標準に準拠したASICを利用) である。電波ホース1本当たりにSLCモジュールを10個付けると想定すると40g×10=400g。つまり合計で514gとなる。これが4系統あるとすると、514g×4=2056gとなり、30kgといわれるワイヤハーネスの10分の1以下の重さで済むことが分かる。

表7には他方式との得失を示した。電波ホースは軽量かつ高信頼、超高速な自動車内通信システムに適している。提案システムの伝送損失は一般的な60GHz帯無線通信システムと比較してはるかに小さく、かつマルチチャネル伝送が容易であり、ホースが破損しても通信可能である。こうした点を考慮すると、提案のシステムは現行有線方式よりも高信頼といえる。

参考文献
1)大庭,「次世代自動車用ワイヤハーネス」,フジクラ技報, pp.78-82, Vol. 2 2012.
2) Fujita, K. et al.,“Millimeter Wave Intra Car Communications System Using Radio Hose,” RCS研究会, Aug.28, 2010.
3) Fujita, K. et al., “Intra-car Communications System Using Radio Hose,” APMC2010, WE1C-5, Dec. 2010.
4) Sawada, H. et al., “A Sixty GHz Intra-car

Multi-media Communications System,” Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference, Paper ID: 51-59082, Apr. 2009.
5) Sawada, H. et al., “A Sixty GHz Vehicle Area Network for Multimedia Communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 27, No. 8, Oct. 2009.
6) IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4), <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>