

ツイストペアケーブルからの 不要電磁波放射のメカニズム解明

Clarification of the Mechanism of Unintentional Radiated Emissions from
Unshielded Twisted Pair Cables

五十嵐 俊*
Shun Igarashi

宮脇 大輔
Daisuke Miyawaki

山岸 傑
Suguru Yamagishi

桑山 一郎
Ichiro Kuwayama

五百旗頭 健吾
Kengo Iokibe

豊田 啓孝
Yoshitaka Toyota

近年、本格的な5Gのサービス利用が開始するなど、通信機器で使用する周波数の高周波化が進んでいる。通信の高周波化に伴い、従来問題とならなかった通信ケーブルからの不要電磁波放射がEMC問題に繋がる懸念があるため、筆者らは、車内通信などの配線として一般的に使用されているツイストペアケーブル（UTPケーブル）に着目して評価を行い、特定の周波数帯で不要電磁波放射が発生することを確認した。UTPケーブルからの放射は、漏洩ケーブルとの構造の類似性から、漏洩ケーブルと同一のメカニズムで説明でき、放射帯域は漏洩ケーブルの定式で記述できる。本稿では、UTPケーブルからの放射特性を紹介した後に、放射のメカニズムについて詳細を解説する。また、放射帯域の定式を基に、UTPケーブルを選定する際の指針を提案する。

Communication frequency in telecommunications has been increasing to improve data transmission speed and capacity. However, this increase also raises the possibility of unintentional radiated emissions from communication cables, leading to electromagnetic compatibility (EMC) problems. From the viewpoint of radiation, we examined the transmission and radiation characteristics of unshielded twisted pair (UTP) cable commonly used in local area networks and in-vehicle communication networks. The examination confirmed that the UTP cable emits a portion of the transmitting signal within a certain frequency band. This emission follows the same mechanism as a leaky cable. We verified that the equation derived from the leaky cable mechanism can explain the relationship between the radiation bandwidth and the radiation angle. This paper introduces the radiated emission from UTP cable and explains the radiation mechanism in detail. Additionally, we provide a guideline on how to avoid potential EMC problem related to UTP cable.

キーワード：ツイストペアケーブル、UTPケーブル、EMC、不要電磁波放射

1. 緒言

近年、第5世代移動体システム（5G）の本格的なサービスが開始するなど、無線通信の高周波化が進んでいる⁽¹⁾。また、自動車を取り巻く環境も、自動運転の実現に向けた車内及び車外通信の大容量化・高速化が加速しており、通信機器の使用周波数帯が高周波化している⁽²⁾。このような状況では、従来問題とならなかったケーブルも電磁波ノイズの発生源や流入源となって、EMC^{*1}問題に繋がる懸念があり、電磁波ノイズを放射/受信しにくいケーブルを選定することが重要である。

2本の電線を螺旋状に撚り合わせた構造であるツイストペアケーブル（Unshielded Twisted Pair cable: UTPケーブル）は、電線を流れる電流が磁界を打ち消し合うため電磁波ノイズを放射/受信しにくいとされており⁽³⁾、従来のLANシステムや車内通信の配線として広く使用されている。一方当社では、古くはUTPケーブルと構造の類似する撚り対型の漏洩ケーブルをトンネル内部の通信アンテナ等に応用していた事例もあり⁽⁴⁾、通信機器の高周波化が進む昨今では、UTPケーブルが予期せぬEMC問題の原因になる潜在的な可能性を持つと考えていた。

そこで筆者らは、UTPケーブルをマルチギガ^{*2}以上の信

号伝送に利用することを想定し、高周波信号に対する伝送特性を評価したところ、特定の周波数帯で不要電磁波放射が発生することを確認した^{(5),(6)}。このUTPケーブルからの放射は、漏洩ケーブルとの構造の類似性より、漏洩ケーブルと同一のメカニズムで発生しており、漏洩ケーブルの定式により放射帯域や放射方向を記述できることがわかった。本稿では、UTPケーブルに高周波信号を入力した場合の、伝送・放射特性の評価結果を示し、漏洩ケーブルに基づいた放射のメカニズムについて解説する。また、ノイズの放射/受信の観点から、EMC問題に繋がりにくいUTPケーブルを選定するための指針を提案する。

2. UTPケーブルの伝送特性

UTPケーブルは機器間で送受信される差動信号^{*3}を伝送する配線として使用される。基本的な伝送特性は入力した差動信号に対する通過特性と反射特性で評価され、機器間の通信を成立させるために、低損失・低反射であることが望ましい。筆者らは、車内通信の配線として一般的に使用される図1の構造寸法のUTPケーブルについて考察を行った^{(5),(6)}。本UTPケーブルは2本の電線が螺旋状に撚り合さ

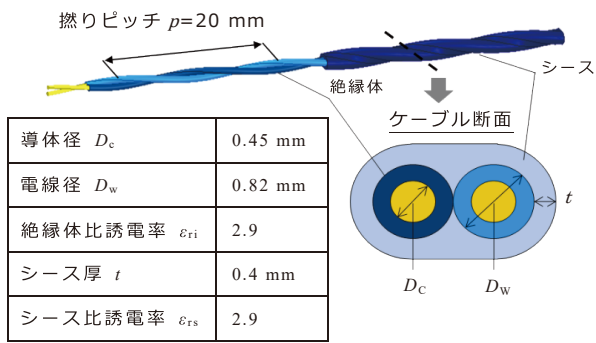


図1 UTPケーブルの構造寸法

れた構造であり、樹脂（シース）によってケーブル全体の撚り形状が保持されている。

このUTPケーブルに、10 GHzまでの高周波差動信号を入力した場合の通過特性及び反射特性について、図2 (a)、図2 (b) に示す測定系で評価を行った。全長420 mmのUTPケーブルはグラウンド上25 mmの高さに配線され、接続治具基板を介して計器であるベクトルネットワークアナライザ⁴に接続される。

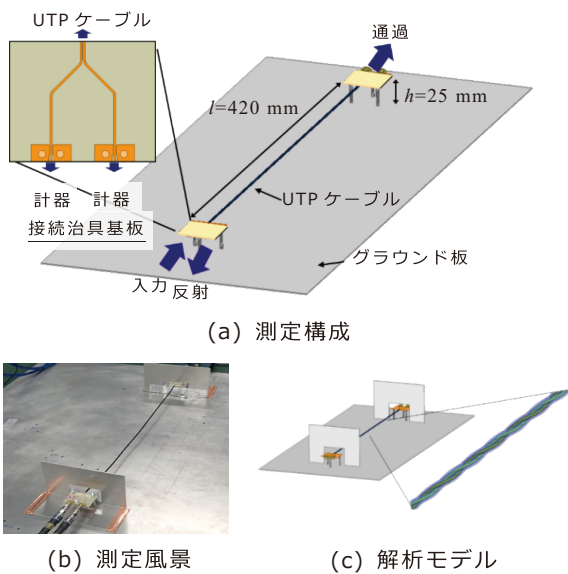


図2 伝送特性の評価系

通過特性と反射特性の評価結果を図3に示す。縦軸は入力した電力に対する通過・反射電力の比を対数で表したものであり、図3 (a) の通過特性では値が小さい程、通過損失が大きいことを意味し、図3 (b) の反射特性では値が大きい程、反射量が多いことを意味する。測定した本UTPケーブルの通過特性 (図3 (a) 実線) は、4 GHzまで周波数に

伴い損失が少しずつ増加する一般的な性質が見られるが、4.7 GHz付近及び5.7 GHz以上の周波数帯で特異的に損失が増加している。

3章以降の考察では電磁界解析による検証も行うため、電磁界解析がこの特異な損失増加を再現していることを確認した。3次元電磁界シミュレータ (ANSYS社: HFSS) で測定系をモデル化し (図2 (c))、UTPケーブルの伝送特性を解析した結果を図3に破線で示す。解析結果でも測定結果と同様に4.5 GHz付近 (4.7 GHz) 及び5.7 GHz以上の周波数帯で特異な損失増加が発生していることを確認できた。

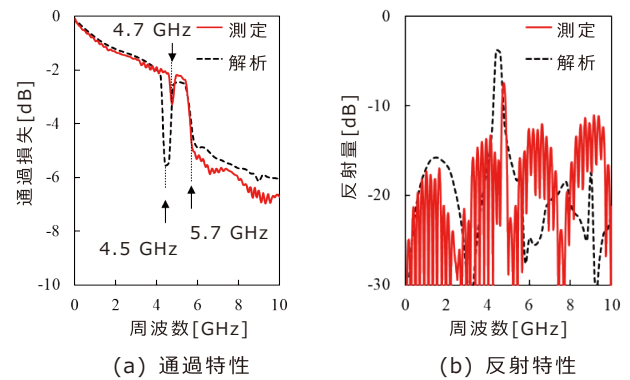


図3 伝送特性の評価結果

まず、4.5 GHz付近の損失増加について考察を行う。4.5 GHzでは反射量が急激に増加しており (図3 (b))、このため、通過損失が増加している。つまり、UTPケーブルに入力した電力の内、反射して入力端側に戻ってしまう電力が増加するため出力端へ到達する電力が減少 (通過損失が増加) している。反射量が増加した要因は、4.5 GHzの伝播波長 (40 mm) が撚りピッチ (20 mm) の2倍に相当していることから、各撚線部からの反射が同相合成して強め合うためと説明できる (図4)。

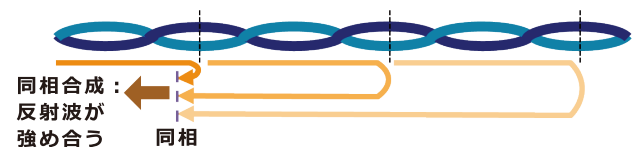


図4 同相反射による反射波の強め合い

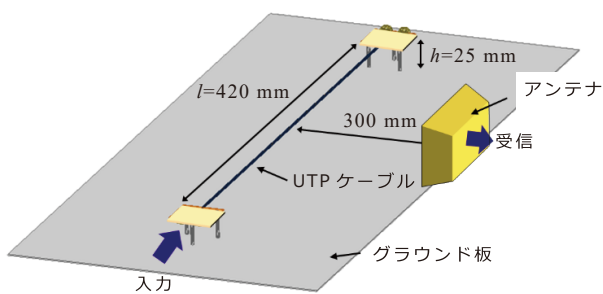
一方、5.7 GHz以上の周波数帯では、通過損失の増加に相当する反射量の増加は発生していない。すなわち、反射して入力端に戻る電力は増加していないにも拘わらず、出

力端に到達する電力は急激に減少している。これは、UTP ケーブルに入力した電力の一部が伝送途中に電磁波として放射しているためと推定できる。

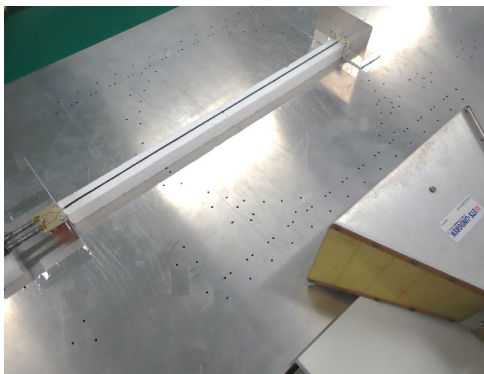
3. UTP ケーブルからの電磁波放射

3-1 実験的検証

前章で示した通過損失の増加が電磁波の放射に起因していることを検証するために、UTP ケーブルからの放射電力をアンテナで受信する測定を行った (図5)^{(5),(6)}。また、放射が UTP ケーブルの構造に起因していることを明らかにするために、比較として平行2線ケーブルについても同様の測定を行った。



(a) 測定構成



(b) 測定風景

図5 ケーブルからの放射評価系

図6はアンテナの受信する電力の測定結果を示しており、値が大きいく、アンテナで受信する電力が大きく、ケーブルから電磁波が放射していることを意味する。UTP ケーブルの測定結果 (図6実線) では、5.7 GHz 以上の周波数帯でアンテナの受信電力が著しく増加しており、この周波数帯で UTP ケーブルから電磁波が放射されていることを直接的に確認できた。なお、この周波数帯は2章で示した通過損失が急激に増加する周波数帯 (図7に再掲) と一致しており、本通過損失の増加が電磁波の放射に起因していることを確認できた。

一方、平行2線ケーブルの測定結果 (図6破線) では、アンテナ受信電力の著しい増加は見られず、また、図2と同様の構成で測定した通過特性においても、特異的な損失の増加は起きていない (図7破線) ことから、平行2線ケーブルで電磁波の放射は発生していないと判断できる。これらの結果より、UTP ケーブルの5.7 GHz 以上の帯域で見られた電磁波放射は、UTP ケーブルの構造に起因することが確認できた。

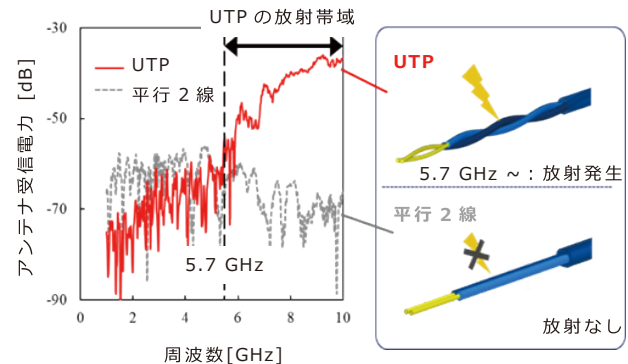


図6 アンテナ受信電力の測定結果

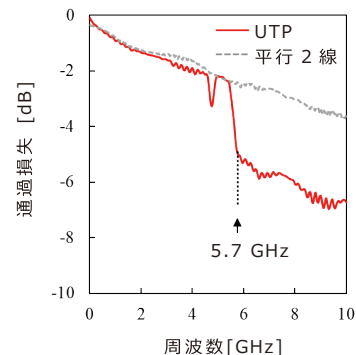


図7 UTP/平行2線ケーブルの通過特性

3-2 放射のメカニズム

漏洩ケーブルとの構造の類似性より、漏洩ケーブルと同じ考え方⁽⁴⁾を適用して UTP ケーブルからの放射のメカニズムについて説明する⁽⁶⁾。

トンネル内や地下街の無線通信アンテナとして広く使われてきた漏洩同軸ケーブルは外導体に周期的なスロット (穴) を有している。漏洩同軸ケーブルに信号を入力すると、スロット部に電界が発生し、この電界が波源となって電磁波が放射される (図8)。一方、UTP ケーブルに差動信号を入力すると、電線間に電圧が発生して電界が形成され、漏洩同軸ケーブルと同様に波源が撚りピッチ毎に並んだ状態となる (図9)。

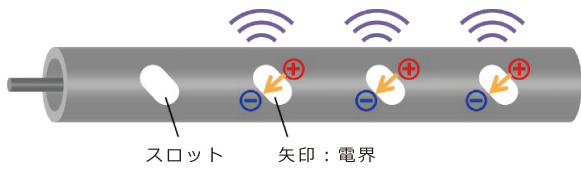


図8 漏洩同軸ケーブルからの放射原理

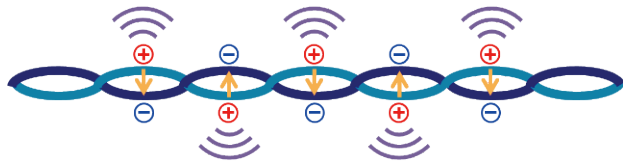


図9 UTPケーブルに形成される電界

上記のように2本の電線間に波源が並ぶ構造では、各波源からの電磁波が同相合成されて強め合う方向に電磁波は放射される。そこで、UTPケーブルにおいて、撚りピッチ毎に並んだ波源から放射される電磁波が同相となる条件について考える。

図10中の点Aから放射する電磁波と点Bから放射する電磁波が点Aと点Cで同相となるのは、経路ABの電気長^{*5} + 経路BCの電気長が波長の整数倍と一致する場合である。これを定式化すると式(1)で表される。

$$p\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} + p \cos\theta = n\lambda_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p は撚りピッチ、 ϵ_{reff} は差動励振に対する実効比誘電率^{*6}、 θ は角ABC(放射角)、 λ_0 は自由空間波長、 n は自然数であり、左辺第一項は経路ABの電気長、第二項は経路BCの電気長を表している。

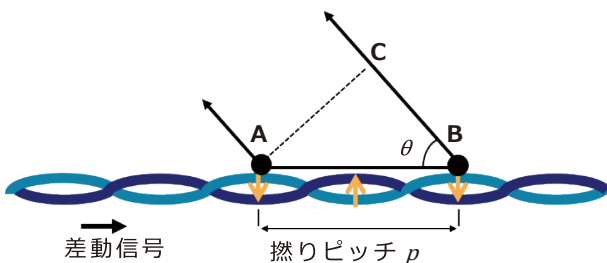


図10 UTPケーブル波源からの電磁波の同相条件

周波数 f と光速 c 、自由空間波長 λ_0 の関係($f = c/\lambda_0$)より式(1)は

$$f = \frac{c}{p} \frac{n}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}} + \cos\theta}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と変形でき、放射角の物理的に取り得る値は 0° から 180° であることから、放射の起こる周波数帯域は

$$\frac{c}{p\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}+1}} < f < \frac{c}{p\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}-1}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。

3-1節で測定した放射帯域(図6)と比較するために、本UTPケーブルのパラメータを式(3)に当てはめて計算してみる。なお、測定結果では5.7 GHzが放射の発生する下限周波数であったことから、式(3)では最も低い周波数帯($n=1$)に注目して計算する。撚りピッチ p は図1に示すように20 mmであり、実効比誘電率は2次元電磁界解析ソフト(ANSYS社: 2D Extractor)による断面解析で算出した値($\epsilon_{\text{reff}}=2.7$)を採用した。これらの値を式(3)に代入すると、放射帯域は5.7 GHz $< f <$ 23 GHzとなり、式(3)から求まる放射帯域の下限周波数が、3-1節で実験的に観測した放射の始まる周波数(5.7 GHz)と一致することが確認できた。

また、式(2)を変形することで、放射角は

$$\cos\theta = \frac{c}{pf} - \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

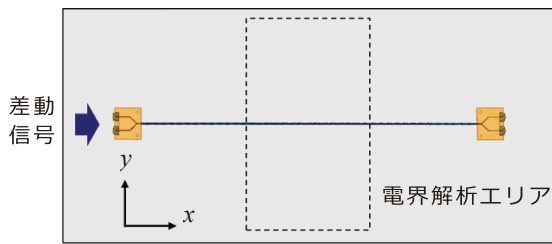
と表される。すなわち、放射角は周波数依存性を有しており、周波数が高くなるに従って放射角 θ が大きくなっていくことを表している。例えば、今回評価したUTPケーブルでの6 GHzにおける放射角は 31° 、8 GHzにおける放射角は 76° という計算結果になる。

3-3 シミュレーションによる放射電界解析

実際に放射角の周波数依存性があることを確認するために、図2のシミュレーションモデルに異なる周波数の差動信号を入力した時の、それぞれの電界分布を解析した。

図11(a)は解析モデル上面図であり、図11(b)~(d)は各周波数におけるUTPケーブルを含むx-y面の電界分布の解析結果である。なお、差動信号は図中の左方向から入力されており、電界のカラースケールは共通である。式(3)の放射帯域外である3 GHzでは、UTPケーブル付近に電界が集中しており、放射は発生していない(図11(b))。通過損失が局所的に増加している4.5 GHz付近においても放射は発生していないことが確認されている⁽⁵⁾。

一方、周波数を高くしていくと、式(3)の放射帯域の下限周波数である5.7 GHzから放射が発生しており(電界分布は参考文献(5)、(6)を参照)、放射帯域内の6 GHzと8 GHzでは明らかに異なる方向へ放射が発生している(図11(c)、(d))。この電界分布から求まる放射角は、5.7 GHzで約 7° (参考文献(5)、(6)参照)、6 GHzで 31° 、8 GHzで 76° であり、3-2節の式(4)から求めた値とよく一致している。



(a) 解析モデル

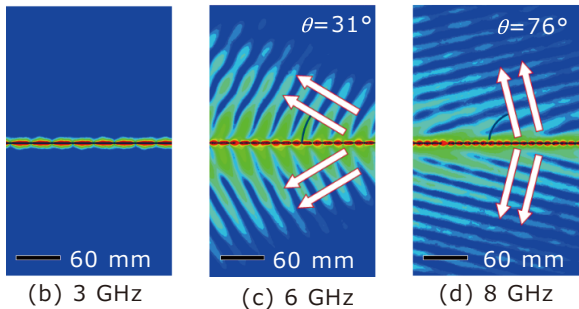


図11 UTPケーブル周囲の電界分布解析結果

3章を通した定式と実測／解析結果の比較結果より、UTPケーブルからの放射帯域及び放射角は、式(3)及び(4)によって記述できることを確認した。式(3)、(4)は漏洩ケーブルの放射メカニズムを基にした定式であり、UTPケーブルからの放射も漏洩ケーブルと同一のメカニズムで説明することができた。

4. 潜在的EMC問題の対策

前章まで、図1のUTPケーブルに5.7 GHz以上の差動信号を入力すると不要電磁波放射が発生することを示した。従って、本UTPケーブルで伝送する信号を5.7 GHz未満とすることで、不要放射によるEMC問題は回避できる。しかし、放射特性と受信特性には等価性があるため、本UTPケーブルは放射帯域である5.7 GHz以上の電磁波ノイズを受信しやすいという性質がある。

本格的なサービス利用が開始され車載通信機器にも応用が広がっている5GではSub6帯(3.7 GHz~6.0 GHz)を無線通信に使用しており、車内通信の配線に利用されるUTPケーブルはSub6帯の電波に晒される場合がある。すなわち、5G機器から放射されるSub6帯の電波をUTPケーブルはノイズとして受信してしまい、UTPケーブルで接続された機器間の通信が阻害される可能性がある。この潜在的なEMC問題は、使用するUTPケーブルの放射帯域をSub6帯よりも高い周波数にシフトすることで回避できる。

放射帯域をシフトする方法は式(3)より次の2通りが考えられる：①差動励振に対する実効比誘電率を小さくする・②撚りピッチを短くする。①の方法は被膜材料を変更する必要があり、現実的には採用が困難である。一方、②の方

法はツイスト加工の条件変更で実現でき、比較的实施しやすい。

対策の一例として、図11に示すUTPケーブルの撚りピッチを20 mmから15 mmに変更することを考える。撚りピッチを15 mmにすると、式(3)から求まる放射帯域は $7.6 \text{ GHz} < f < 31 \text{ GHz}$ となり、Sub6帯と重複しない。

実際に6 GHzで放射が発生していないことを、電磁界解析によって確認した。図12は撚りピッチ20 mmと15 mmのUTPケーブルに6 GHzの差動信号を入力した時の電界分布である。撚りピッチ20 mmでは、3-3節でも示したように、放射が発生している(図12(a))。一方、撚りピッチ15 mmでは、3-3節の放射が発生していない場合(図11(b))と同様に、ケーブル周囲に電界が集中していることが確認できる(図12(b))。従って、撚りピッチを15 mmに変更することでSub6帯の電磁波ノイズの受信を防ぐことができ、ケーブルからノイズが流入することによるEMC問題を回避することが可能となる。

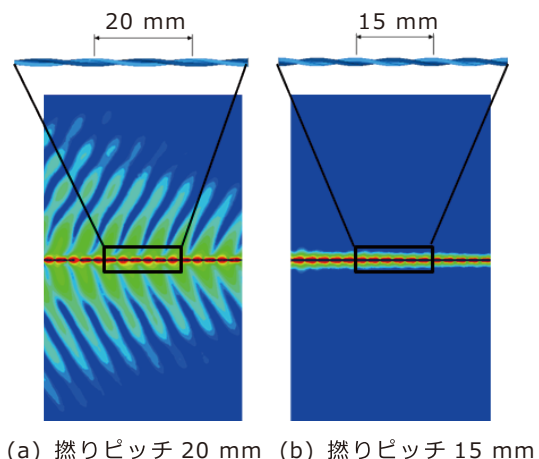


図12 撚りピッチ違いによる電界分布の差 (@6 GHz)

5. 結 言

UTPケーブルには構造に起因する電磁波の不要放射が発生することを実験・解析的に確認した。この放射のメカニズムは漏洩ケーブルと同一の考え方で説明でき、放射帯域や放射角を定式化できることを示した。また定式には、実効比誘電率と撚りピッチがパラメータとして含まれており、これらによって放射帯域や放射角を制御することができる。

本稿で評価したUTPケーブルは車内通信機器間の配線として一般的に使用される構造寸法であるが、放射帯域が5GのSub6帯と一部重複するためにEMC問題に繋がる可能性が有る。このEMC問題はUTPケーブルの放射帯域をSub6帯よりも高い周波数にシフトすることで回避でき、撚りピッチを短縮することによる対策の一例を示した。

今後、自動運転の実現に向けて、車載される5G機器の普及が予想されており、Sub6帯でEMC問題が発生しないUTPケーブルを選択して使用する必要がある。本稿の検討がUTPケーブル選定の指針となれば幸いである。

用語集

※1 EMC

Electromagnetic Compatibilityの略。電子機器が発する電磁波ノイズが周囲の機器に影響を与えず、また、他の機器からの電磁波ノイズの影響も受けずに動作する性能のこと。

※2 マルチギガ

1秒間に伝送するビット数が数ギガ（10の9乗）以上の伝送速度を有する伝送様式・規格。

※3 差動信号

2本の信号線に互いに逆相の電流を流し、信号線間の電位差で伝送する差動伝送方式で送られる信号。

※4 ベクトルネットワークアナライザ

高周波回路網の通過・反射電力の周波数特性を測定する機器。

※5 電気長

伝播する電磁波の波長を基準にした長さ。真空中の電気長は物理長（定規で測定した長さ）と等しい。一般的な媒質中の波長は真空中の波長より短くなり、媒質中の電気長は物理長より長くなる。

※6 実効比誘電率

実際の信号線の電気特性を保ったまま、信号線周囲を均一な媒質で充填すると仮定した場合の、媒質の比誘電率。一般的に被膜樹脂の比誘電率と真空の比誘電率（ $\epsilon_{r0}=1$ ）の間の値となる。

・HFSS, 2D ExtractorはANSYS Inc.またはその子会社の米国およびその他の国の商標、または登録商標です。

参考文献

- (1) M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 6, pp.1201-1221 (Jun. 2017)
- (2) C. R. Storck and F. Duarte-Figueiredo, "A survey of 5G technology evolution, standards, and infrastructure associated with vehicle-to-everything communications by internet of vehicles," IEEE Access, vol. 8, pp. 117 593-117 614 (2020)
- (3) 岡野大祐、山下繁彦、「現場でわかるノイズ対策の本」、pp.128-129、(株)オーム社（2010年）
- (4) 多湖紀之、一宮寛、天野嘉一、佐谷宏、石川真人、宮本善勇、「撚り対型漏洩ケーブル（R.P.C.）の開発」、住友電気、第123号、pp.106-112（1983年）
- (5) 五十嵐俊、宮脇大輔、山岸傑、桑山一郎、五百旗頭健吾、豊田啓孝、「ツイストペアケーブルからの不要放射評価」、信学総大、B-4-3（2021年3月）
- (6) S. Igarashi, D. Miyawaki, S. Yamagishi, I. Kuwayama, K. Iokibe, and Y. Toyota, "Unintentional radiated emissions from unshielded twisted pair cable attributed to twist structure," IEICE Communications Express, Vol. 11, No. 11, pp.691-696 (2022)

執筆者

五十嵐 俊*：(株)オートネットワーク技術研究所



宮脇 大輔：(株)オートネットワーク技術研究所
グループ長



山岸 傑：(株)オートネットワーク技術研究所
部長



桑山 一郎：(株)オートネットワーク技術研究所
主幹



五百旗頭健吾：岡山大学 准教授
博士（学術）



豊田 啓孝：岡山大学 教授
博士（工学）



*主執筆者