

技術紹介

3

シグナルインテグリティと放射ノイズのケーブルによる違い

Signal Integrity and Electromagnetic Interference for three type of cable such as Micro Coax, UTP and FFC

池田 浩昭

Ikeda Hiroaki

プロダクトマーケティング本部

キーワード: シグナルインテグリティ、放射ノイズ、細線同軸線、ツイストペア線、FFC

Keywords: Signal Integrity, Electromagnetic Interference, Micro Coaxial Cable, Unshielded Twisted pair cable, FFC

要 旨

電子機器の内部のプリント配線板同士を接続するケーブルの代表的なものとして、UTP(Unshielded Twisted Pair)ケーブル、細線同軸(Micro Coaxial)ケーブル、FFC(Flexible Flat Cable)があります。

これらのケーブルはコストや機械的特性、電気的特性を考慮して、適材適所に利用する必要があります。

本稿では、これらのケーブルの電気的特性の一つである、SI(Signal Integrity)と放射ノイズに関して、実験結果をもとに詳しく解説します。

SUMMARY

A UTP (Unshielded Twisted Pair) cable, a small-gage wire coaxial (Micro Coaxial) cable, and FFC (Flexible Flat Cable) are one of typical things of the cable which connects the printed circuit boards inside an electronic device.

In consideration of cost, a mechanical property, and an electrical property, it is necessary to use these cables for the right man in the right place.

In this paper, SI(Signal Integrity) and EMI(Electromagnetic Interference) detail are explained using measurement results.

1. まえがき

様々な電子機器は、複数のプリント配線板(Printed Circuit Board : PCB) から構成されており、それぞれの PCB を接続するためにコネクタやケーブルが利用されています。PCB 同士の接続距離が近い場合は、基板対基板接続用コネクタが利用されます。

(http://jae-connectors.com/jp/slist_jp.cfm?type_code=T0010)

基板同士の距離が遠い場合や、ラップトップコンピュータのヒンジ部のように、稼働部がある場合は、おもにケーブルを利用しなければなりません。

PCB 接続用ケーブルと一口に言っても、図 1 に示すように、STP(Shielded Twisted Pair)ケーブル、UTP(Unshielded Twisted pair)ケーブル、細線同軸ケーブル(Micro Coaxial)、FFC(Flexible Flat Cable)、FPC(Flexible Printed Circuit)があり、機能面以外にも、コストや納期等により使い分ける必要があります。

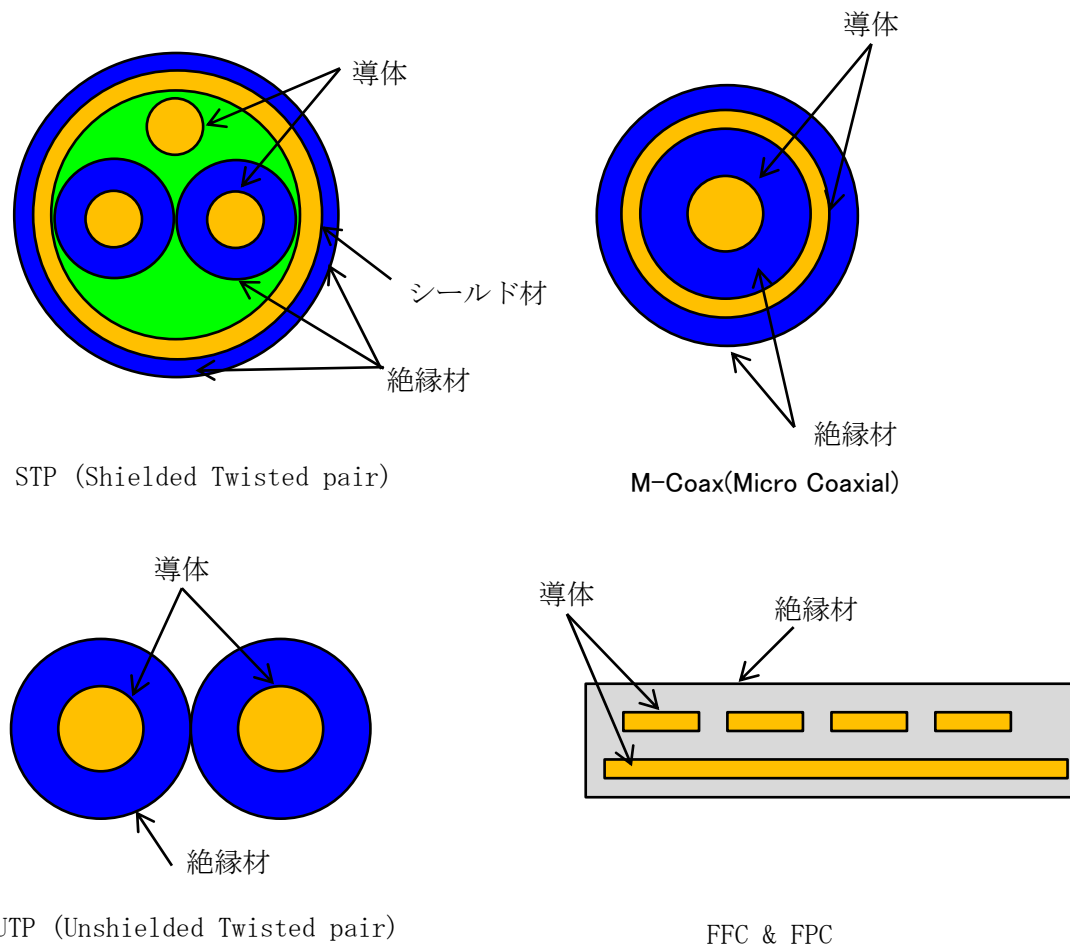


図 1. 各種ケーブル

表 1 に、各ケーブルハーネスの一般的な特色を掲げます。STP、UTP、M-Coax ケーブルハーネスは、製造するにあたり、特別な初期投資(インシヤルコスト)が不要であり、長さや信号結線の変更が容易で自由度は高くなります。

しかし、FPC は、PCB と同様に配線の形成をエッチングで行いますので、エッチングに必要なマ

スク費用、絶縁及び回路保護のためのカバーフィルムやFPC全体を加工するための金型費用が必ず発生し、長さの変更には、金型を変更しなければなりません。

したがって、設計変更には、金型費用及びマスクや納期が余計に必要となる欠点があります。

利点は、STPやUTPと比較して、非常に薄く、PCBのように部品を半田付けで実装できること、数量がまとまれば、比較的安価に大量に生産できる点です。

FPCと似た構造を持つFFCは、圧延された導体を絶縁材でラミネートしてケーブルにしたものであるため、結線を途中でクロスするような配線は困難です。また、ラミネート材の耐熱性から部品が半田付けできないことが、欠点ですが、金型費やエッチング用のマスク等のインシヤル費用が不要であり、FPCと比較して、単価も安い事が、利点です。さらに、ケーブル長も、比較的容易に変更できます。

量産単価では、FFC、UTPが一番安く、次いでSTP、M-Coax、FPCの順に価格が高くなる傾向があります。

一方、電気的特性に注目しますと、ケーブル単体では、高価なM-Coaxケーブルがもっとも良く、次いで、STP、FPC、FFC、UTPの順とされています。

本稿では、実際の電子機器で利用することを前提にケーブル単体ではなく、コネクタを含めたケーブルハーネスとして、電気信号を伝達する性能(シグナルインテグリティ)と、他の電子機器の動作を妨害する原因となる、不要電磁波の放射特性(放射ノイズ)を検証しました。

今回は、UTP、M-Coax、FFCに対応可能なコネクタとして、レセプタクルにFI-REシリーズ、ケーブル側のプラグコネクタとしてJF04/JF08シリーズを用いて検証しました。

表 1. ケーブルの特徴

	STP	UTP	M-Coax	FFC	FPC
単価	やや高価	安価	高価	安価	高価
インシヤルコスト	不要	不要	不要	不要	要
試作納期	短	短	短	中	長
信号の自由度	大	大	大	無	大
形状の自由度	大	大	大	無	大
設計変更の自由度	容易	容易	容易	やや容易	費用発生
SI	良	やや悪い	良	やや悪い	良
EMC	良	悪い	大変良	やや悪い	良

2. 供試サンプル

図 2 に、今回の実験で使用した試験サンプル、図 3 にレセプタクルコネクタと測定機と同軸ケーブルを接続するための SMA(Sub Miniature Type A)コネクタが実装された治具基板を示します。FFC は、0.5 mm ピッチで導体幅 0.2 mm、導体厚 35 μm で、信号面とグランド面を持つ、2 層構造となっており、低クロストークと一定の特性インピーダンスを得易くなっています。

信号層の配線と裏面のグランド層は FPC のようにスルーホールビアで接続できる構造ではなく、それぞれと独立しており、プラグ及び、レセプタクルコネクタの金属シェルを通して PCB のグランドに接地させています。

また、プラグコネクタには、独立したコンタクトがなく、FFC の配線がそのまま、レセプタクル側のコンタクトに接触する構造になっています。

M-Coax は AWG36(American Wire Gage)を使用しており、M-Coax の外部導体は棒状の導体で一括して、導通させて、プラグの金属シェル及び、レセプタクル側の金属シェルを介して、PCB のグランドに接地させています。

UTP は AWG30 を使い、単体ケーブルを振り合わせて、一定の特性インピーダンスとなるようにしました。

コネクタのプラグ及びレセプタクルは、差動信号伝送を基本として、グランド(G)-信号(S)-信号(S)-グランド(G)-信号(S)-信号(S)-グランド(G)として、差動信号ペア間は結合が強く、それぞれの差動信号ペア同士はクロストークが低減される配置になっています。

各ケーブルは長さ 500 mm、1000 mm の 2 種類、合計 6 本のケーブルの伝送特性と放射ノイズ特性を測定しました。



図 2. 試験サンプル



図 3. 測定治具基板

3.シグナルインテグリティ

TDR オシロスコープ(Time Domain Reflectometry)¹⁾を使って測定したインピーダンスプロファイルを図 4 に示します。

実際の TDR オシロスコープでの測定は、特性インピーダンスを直接計測しているわけではなく、非常に高速なステップパルス信号(振幅 200 mV、立ち上がり時間 30 ps)を印加して、その反射波形を観測し、式(1)で、特性インピーダンスに置き換えています。

$$Z_{DUT} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} Z_o \quad (1)$$

ただし、 $\Gamma = \frac{\text{反射電圧}}{\text{入力電圧}}$ 、 $Z_o = \text{計測の基準インピーダンス}$

図 4 は横軸が時間[sec]で縦軸が反射波形から計算されたインピーダンスです。今回のケーブルは差動信号を伝達する目的で製作されていますので、それぞれの信号線に正、負、逆相のステップパルス信号(差動信号)を印加して観測しました。

それぞれのケーブルの TDR 測定結果を見ますと、FFC、M-Coax は非常に良好な特性で、差動インピーダンスの設計ターゲットが 100 Ω に対して、 $\pm 10 \Omega$ 以内になっています。特に、FFC はコネクタ部のみが 90 Ω に落ち込む以外に大きな反射はありません。

これは、プラグコネクタ側に独立したコンタクトがなく、FFC の配線が直接、レセプタクルのコンタクトに接触しているためです。

一方、M-Coax ではプラグコネクタのコンタクトとケーブルの結線部に不連続部分があるため、105 Ω まで、特性インピーダンスが上昇しているのが分かります。

UTP はプラグコネクタのコンタクトとの結線部で、135 Ω までインピーダンスが上昇しており、ケーブル部もインピーダンスがやや高めで、一定となっていません。この原因は、プラグコネクタ側コンタクトに UTP ケーブルを接続するために、ツイストを解く必要があり、その結果、ケーブル間隔が開き、特性インピーダンスが上昇したためです。

また、UTP ケーブル部のインピーダンスが一定でないのは、シールドが無いので、隣接ケーブルの影響を受ける部分があること、ケーブルの振りが均一でない部分があることが原因です。

次に、VNA(Vector Network Analyzer)²⁾を利用して計測した、各ケーブルの S パラメータをそれぞれ、図 5～図 8 に示します。

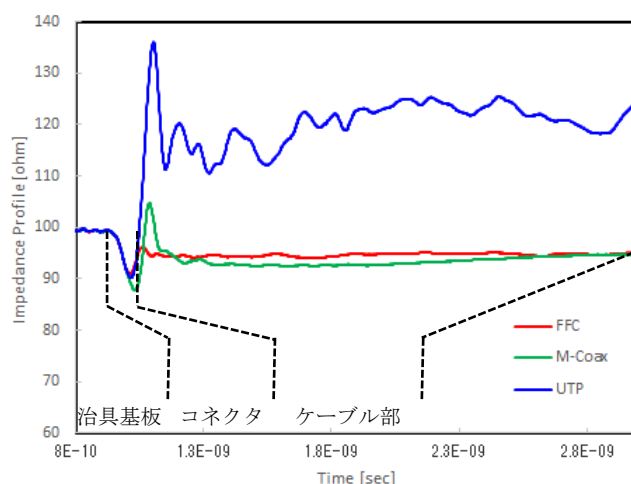


図 4. インピーダンスプロファイル

Sパラメータ³⁾とは、線形な、受動及び能動素子の反射、通過特性を周波数領域で表したもので、この特性を見れば、ある帯域の信号を伝送できるかどうか、およその目安がわかります。

また、USB3.0 や PCI-Express、HDMI、DisplayPort 等の各種の高速伝送規格では、利用できるコネクタやケーブルを、この S パラメータで規定しています。

図 5 は差動での反射損失(Return Loss)を示し、図 4 の TDR 測定結果と同様に、FFC が一番反射が少なく、次いで M-Coax、UTP の順になっています。

図 6 は挿入損失(Insertion Loss)の測定結果で、3 GHz までは、UTP が最も損失が少なく、M-Coax、FFC の順に悪くなっています。これは、ケーブルの導体径が UTP では AWG30 と最も太く、M-Coax が AWG36、FFC が AWG40 相当ためです。3 GHz 以上で UTP ケーブルの損失が一部 M-Coax や FFC より悪くなっている原因は、反射損失がその帯域で悪くなったためで、この反射損失を改善できれば、全体帯域に渡って挿入損失を改善できます。

図 7 は近端クロストーク(Near End Cross Talk)の測定結果で、ケーブルによる大きな差はありません。近端クロストークはその名前のとおり、クロストークを及ぼす端子(Aggressor)と、クロストークを受ける端子(Victim)が同じ側面であるため、ケーブルの影響より、コネクタ本体の影響が大きいからです。(図 9 参照)

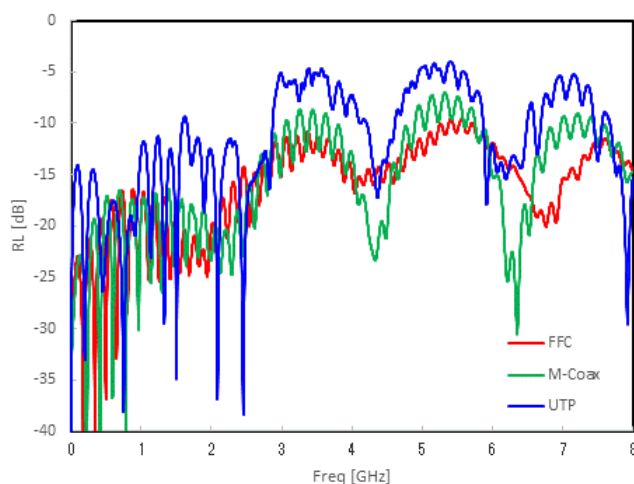


図 5. 反射損失

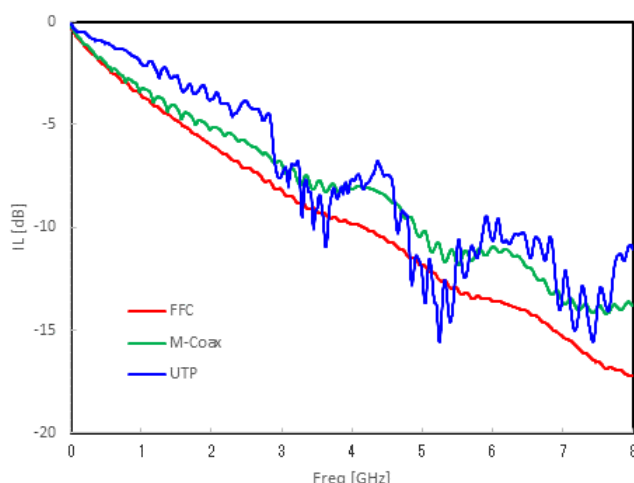


図 6. 挿入損失

遠端クロストーク(Far End Cross Talk)は図 10 に示すように、Victim 側に対して、Aggressor 側が遠端にあるため、ケーブルの影響を受けるので、図 8 が示すように、シールドされておらず、隣接ケーブルと結合し易い UTP ケーブルが最も悪く、FFC、M-Coax の順に良くなっています。

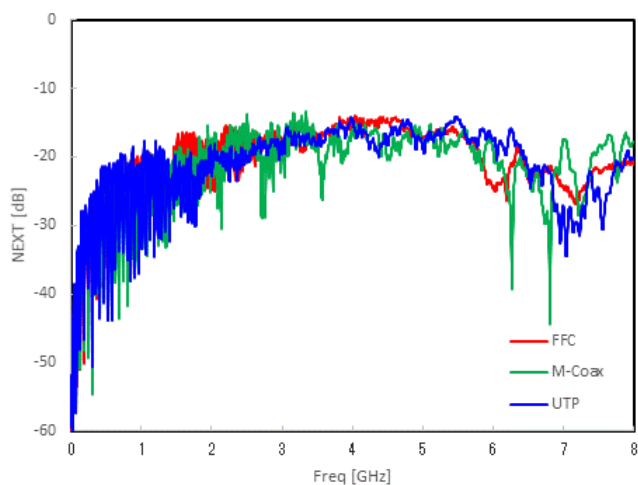


図 7. 近端クロストーク

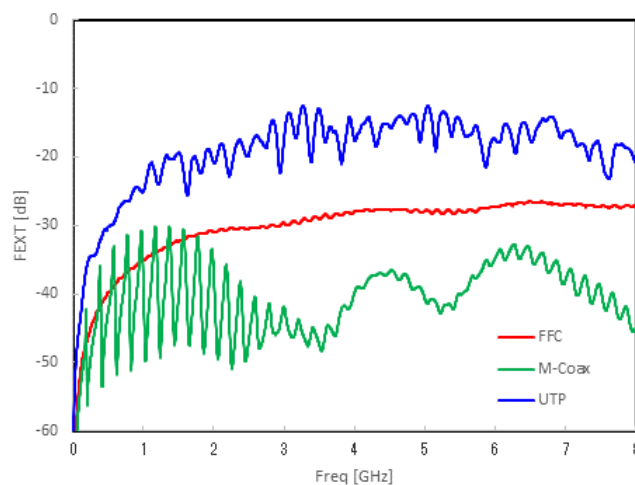


図 8. 遠端クロストーク

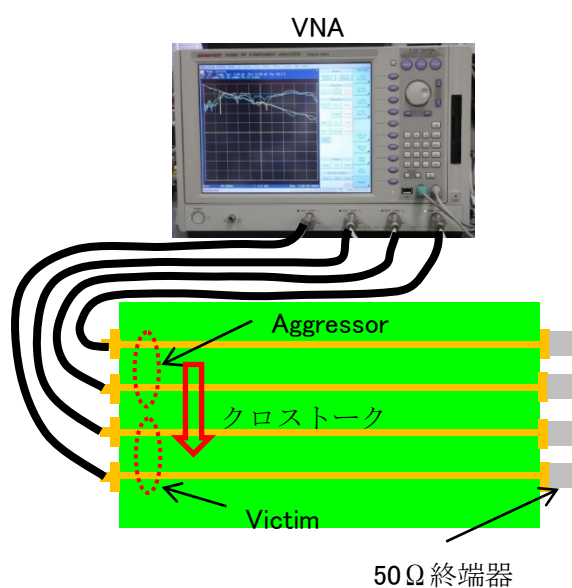


図 9. 近端クロストーク

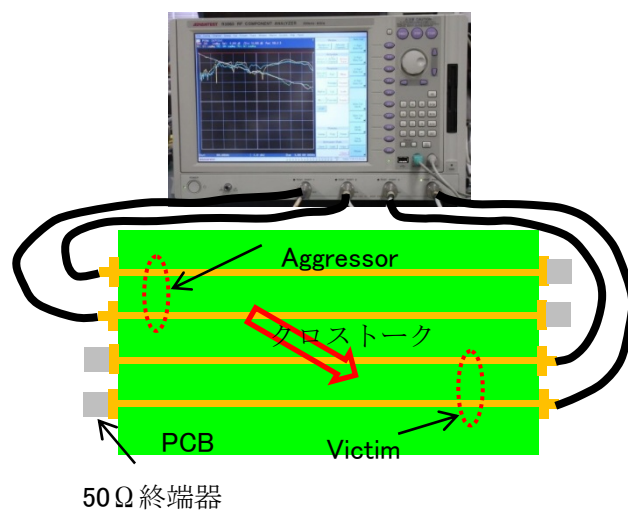


図 10. 遠端クロストーク

S パラメータだけでは、実際にデジタル信号を伝送した時、波形がどのような形状になるか不明ですので、実際にデジタル波形を伝送して、その波形をオシロスコープで観測した結果を図 12～図 14 に示します。

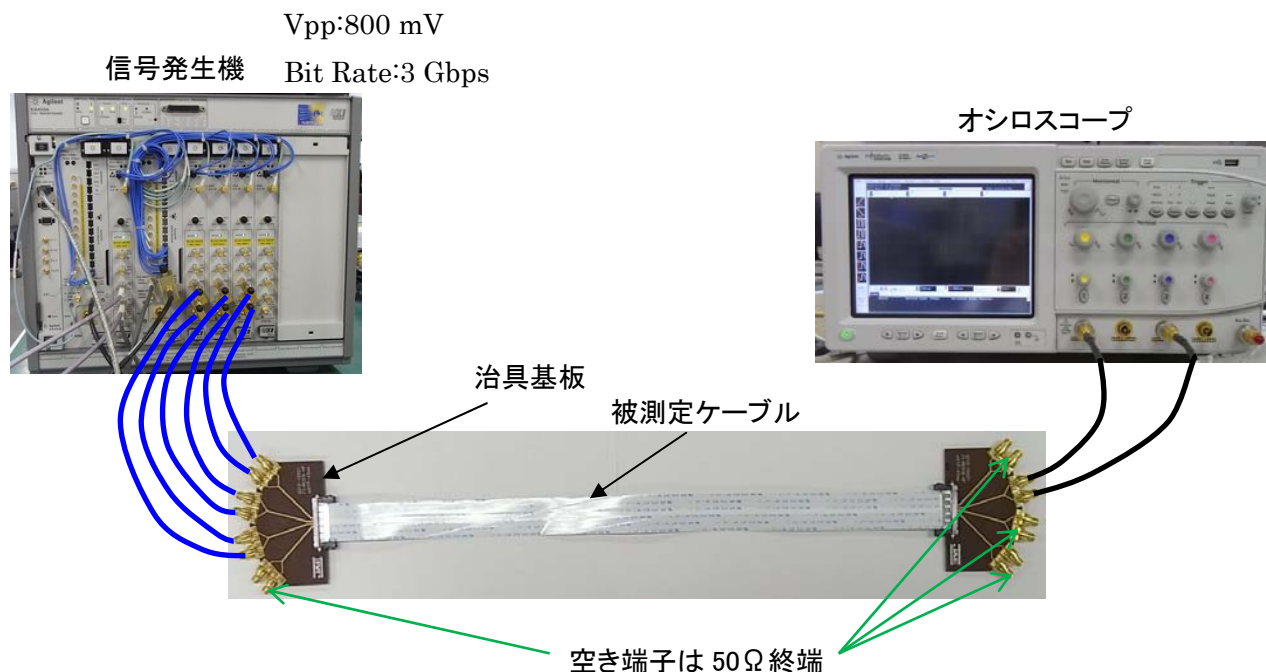


図 11. アイダイグラム測定

伝送波形の測定系は図 11 に示しますように、ビットレート 3 Gbps、振幅電圧 800 mV の差動信号 3 ペア分を被測定ケーブルに印加し、クロストークの影響も含めて、オシロスコープで測定しました。治具基板の空き端子は 50 Ω の終端器で終端しました。

観測結果は波形を重ね書きして、アイダイグラム⁴⁾で波形の歪具合を測定しました。各ケーブルを比較し、波形の開き具合を見ますと、図 14 の UTP が一番広く、M-Coax、FFC の順になっていることが分かります。これは、図 6 の挿入損失の測定結果によく一致します。また、図 14 の UTP は遠端クロストークがケーブルの中で最も大きかったため、クロストークの影響で波形が盛り上がっている部分があることが分かります。

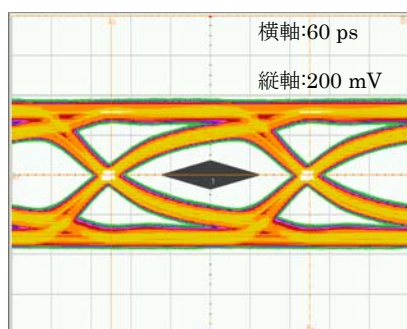


図 12. アイダイグラム FFC

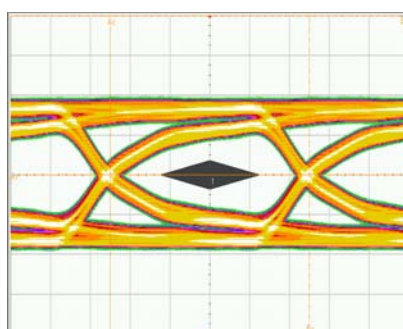


図 13. アイダイグラム M-Coax

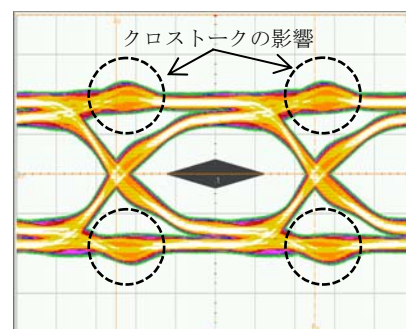


図 14. アイダイグラム UTP

これらの結果から、実際の伝送波形に与える影響は、挿入損失が大きく、次いで、クロストーク、反射損失であると言えます。

しかし、反射損失が -10 dB 以上になると、挿入損失も急激に劣化しますので、ある程度、考慮する必要がありますが、反射損失が -20 dB 以下である場合は、いくら反射損失を改善したところで、挿入損失に与える影響は殆どありません。

挿入損失の主な要因はケーブルの表皮効果による導体損や絶縁材の誘電体損失ですので、これらの損失を低減できる材料を選定する必要があります。

4.放射ノイズ

FFC、M-Coax、UTP にデジタル信号を伝送させた時の 10 m 遠方における放射ノイズを図 15 に示す電波暗室で測定しました。信号源は、シグナルインテグリティの計測で利用した信号発生機を電波暗室の地下ピットに設置して、被測定ケーブル以外の放射ノイズを極力取り除くようにしました。測定条件はビットレートを 1 Gbps と 4 Gbps の2通り測定しました。

信号パターンは 127 ビットの擬似ランダム信号 (Pseudo - Random Binary Sequences: PRBS7)⁵⁾で 振幅電圧 800 mV の差動信号を印加しました。

差動信号 2 組(合計 4 本)としたのは、被測定ケーブルがおかれるターンテーブルが回転するため、信号発生機と被測物をつなぐケーブルを、 2 組を超えて設置するのが困難だったためです。

1 Gbps の伝送信号印加時は、バイログアンテナと被測定物の距離は 10 m、アンテナ高さは、 1 、 2 、 3 、 4 m に変化させながら、ターンテーブルを 360° 回転させ、 30 MHz ～ 1 GHz までの最大電界強度をスペクトラムアナライザで測定しました。

伝送信号が 4 Gbps のときは、電波吸収体を床面に敷き、ホーンアンテナ距離を 3 m として、 1 Gbps の時と同様にアンテナ高さを変えながら、ターンテーブルを回転させ、 1 GHz ～ 6 GHz の最大電界強度を測定しました。

これらの測定方法は CISPR22(Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques)に規定されています、“情報技術装置からの妨害波の許容値と測定方法”⁶⁾に準じています。

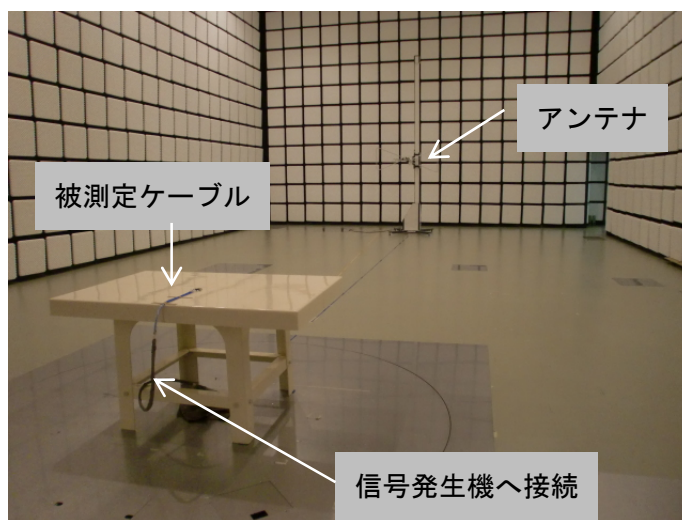


図 15. 10 m 電波暗室

図 16～図 18 に 1 Gbps の場合の水平電界強度の測定結果を示します。赤線は、一般家庭で電子機器を利用する事を前提にした、放射ノイズの限度値を示し、FFC、M-Coax はこの限度値に対して十分なマージンを持っており、放射ノイズの抑制効果が高いといえます。

しかし、UTP では、380 MHz 及び、800 MHz 付近で限度値を超えており、電子機器に UTP ケー

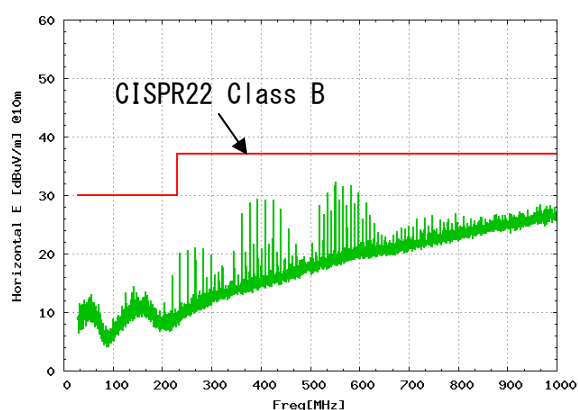


図 16. 放射ノイズ 1 Gbps FFC

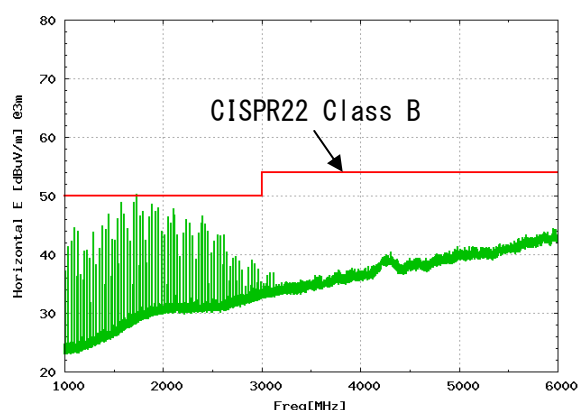


図 19. 放射ノイズ 4 Gbps FFC

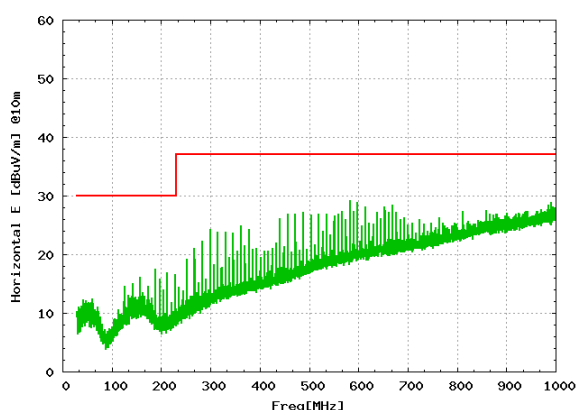


図 17. 放射ノイズ 1 Gbps M-Coax

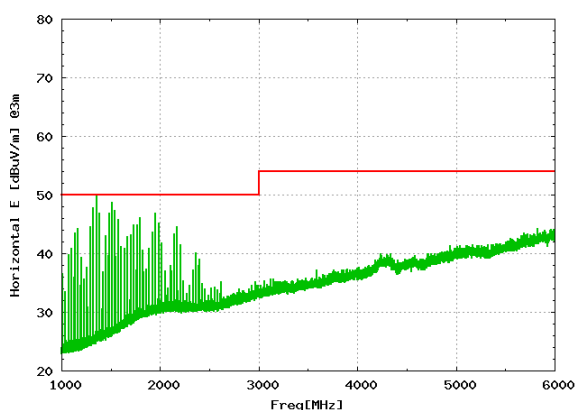


図 20. 放射ノイズ 4 Gbps M-Coax

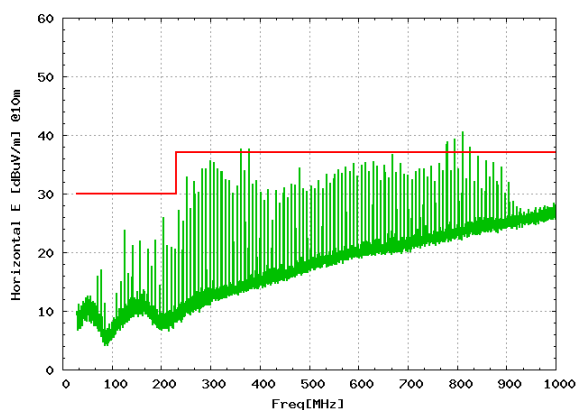


図 18. 放射ノイズ 1 Gbps UTP

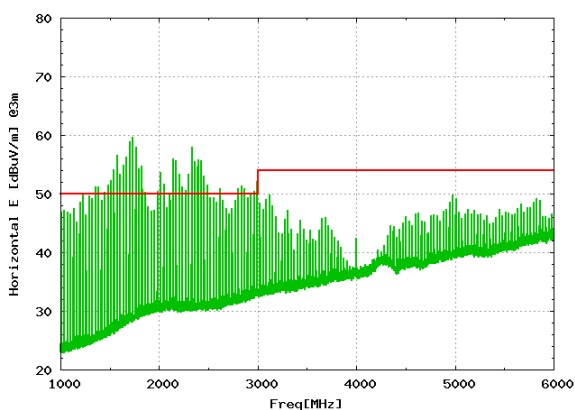


図 21. 放射ノイズ 4 Gbps UTP

ブルを利用する場合は、何かしらのノイズ対策が必要となります。

図 19～図 21 は 4 Gbps の信号を伝送した時の水平電界強度で、FFC、M-Coax はぎりぎり限度値内ですが、UTP は 1.5 GHz から 2.5 GHz の帯域で大きく、限度値を超えています。

UTP が限度値を大きく超えた原因は、シールドがないことや、隣接ケーブルの影響を受け、ケーブル特性が一定でないためと考えられます。

一方、M-Coax はケーブルが外部導体でシールドされているのに対して、FFC はマイクロストリップライン構造ですので、信号面側が空間に対して開いており、M-Coax と比較するとシールド性が劣り、M-Coax の方が圧倒的に放射ノイズの抑制効果が高いと考えられますが、実際のところは、大きな差がない事は興味深い結果です。

5. まとめ

FFC、M-Coax、UTP コネクタの SI と放射ノイズを測定した結果、当初、SI 性能が悪いと考えられていた UTP でも 3 Gbps の信号を十分に伝送できることが分かりました。

しかし、UTP は放射ノイズが大きく、電子機器内で利用する場合は、何かしらの対策が必要です。

FFC の SI と耐放射ノイズ特性は、M-Coax と同等な性能を保持していることが分かり、信号の接続が制限される(クロス配線ができない)ことや、ラップトップコンピュータのヒンジ部分でなければ、非常に有効に利用できるといえます。

さらに M-coax より安価ですので、上手く利用すれば、電子機器全体のコストを削減できます。

[参考文献]

- 1) E. Bogatin, *Signal Integrity Simplified*, (PRENTICE HALL, 2004), p.35
- 2) 岩崎俊、*マイクロ波・光回路計測の基礎*、(コロナ社, 1993), p.110～p.126
- 3) P. A. Rizz, *Microwave Engineering Passive Circuits*, (PRENTICE HALL, 1988), p.168～p.170
- 4) B. Young, *Digital Signal Integrity*, (PRENTICE HALL, 2001), p.114
- 5) D. Derickson and M. Muller, *Digital Communications Test and Measurement*, (PRENTICE HALL, 2007), p.819～p.832
- 6) 山田和謙,他, *EMC 入門講座*, (電波新聞社, 2008), p.66～p.70