

## 高速デジタル信号の評価

原田 蒼太\*<sup>1</sup>, 佐藤 憲史\*<sup>2</sup>

### Evaluation of high-speed digital signals

Sota Harada\*<sup>1</sup>, Kenji Sato\*<sup>2</sup>

**Abstract:** The transmission quality of high-speed digital signals with Ethernet 100BASE-TX has been evaluated. It is shown that the deterioration of the signal quality is caused by the transmission loss which mainly originates on the resistance due to skin effects. The resistance due to skin effects is proportional to the square root of frequency. The frequency characteristics of the transmission loss are measured, and the approximate expression of the loss is derived. The eye patterns of high-speed digital signals with Ethernet 100BASE-TX are observed. The eye opening deteriorates after transmission through 40-100 m Unshielded Twist Pair cables. We simulate the waveforms after transmission using the approximate expression of the transmission loss. The simulated results are compared with the experiment result, and the waveform degradation is confirmed.

Key Words: high-speed digital signal, Ethernet 100BASE-TX, Unshielded Twist Pair cable, eye pattern

#### 1. はじめに

近年, 10 Gigabit Ethernet や 5 Gbps の転送速度の USB3.0 (Universal Serial Bus 3.0) など通信の高速化が進展している. また, パーソナルコンピュータの周辺機器やデジタルテレビなどの一般機器において, ギガビット級のデータ転送が一般的になりつつあり, 今後もさらなる高速化が検討されている.

高速通信において, 差動伝送方式が主流になっている. 差動伝送方式は, 対をなす 2 本の伝送路に反対極性の信号 (プラス電圧とマイナス電圧) を伝送する方式であり, 受信端でそれぞれの伝送路の差分をとり信号を生成する. シングルエンド伝送方式 (電圧とグラウンド) に比べて信号振幅を小さくすることができるため, 伝送速度を高速にすることができる. 対をなす 2 本の伝送路に同じ雑音が発生した場合, その差分をとることで雑音を相殺することができるため雑音に強い. これらの特性から高速通信で主流になっている.

差動信号では, 対となるケーブルがグラウンドに対して対称である平衡伝送路を用いる. 代表的な平衡伝送路には

UTP (Unshielded Twist Pair) ケーブルがある. これに対し, シングルエンド信号は不平衡伝送路を用いる. 代表的な不平衡伝送路には同軸ケーブルがある.

一般に, 高速化に伴い伝送路の長距離化は困難になる. 周波数が低い信号や短い伝送路では伝送損失は小さいが, 信号の周波数が高くなると伝送損失の影響が距離の増大とともに顕在化してくるためである. 伝送損失は抵抗損と誘電損からなり, ケーブル長や周波数に影響される.

本稿では, 伝送路の長さや周波数に依存する信号品質についてアイパターンを用いて評価する. 伝送損失の主な原因である表皮効果による抵抗の増大について考察し, 信号品質の劣化が伝送損失によることを明らかにする.

#### 2. アイパターン

デジタル信号を評価するために最もよく使われる方法がアイパターン (Eye Pattern) の観測である. アイパターンは信号波形の遷移を多数サンプリングし, 重ねあわせた図形である. 1 ビットごとに目 (Eye) の形になることからアイパターンと呼ばれる. アイパターンの例を図 1 に示す.

アイパターン観測は信号の総合的な品質評価に優れている. アイパターンの目の開き具合を観測することで, どの程度の品質なのかを評価することができる. 目の開き具合はアイ開口といわれ, 大きいほど信号品質が良好であることを意味する.

アイパターンを観測するには, 計測対象に擬似ランダム

\*1 専攻科 機械・電気システム工学専攻

Advanced Engineering Course, Department of Mechanical and Electrical System Engineering

\*2 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronics Engineering

信号を入力し, 出力信号をオシロスコープにより繰り返し

$$\gamma \cong \frac{1}{2} \left( GZ_0 + \frac{R}{Z_0} \right) + j\omega\sqrt{LC} \quad (3)$$

取得する. 何らかの手段でクロックを生成し同期をとって, それらの信号波形の遷移を重ね合わせて生成する.

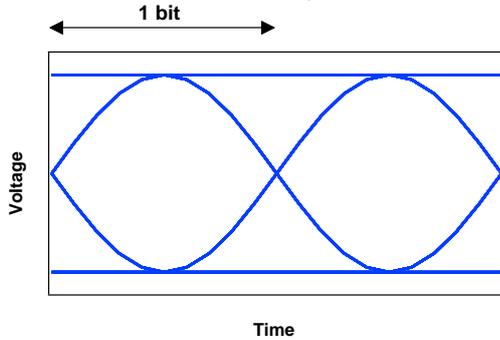


図 1. アイパターン

### 3. 伝送線の損失

高速信号では伝送線の損失が顕著になるので, 伝送損失の影響を明らかにすることが重要となる. 高周波発信源から伝送線を伝達する場合の損失について考える.

伝送線を微小区間  $\Delta x$  に分割すると, 図 2 に示す分布定数線の等価回路で表される. ここで, 単位長さあたりのインダクタンス  $L$  と抵抗  $R$  とキャパシタンス  $C$  と漏れコンダクタンス  $G$  を用いている.

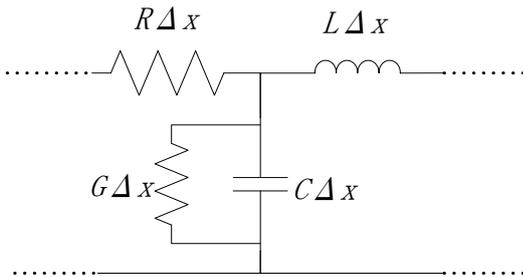


図 2. 分布定数線の等価回路

長さ  $x$  について, この等価回路の解は次式で表される.

$$V = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} \quad (1)$$

ここで  $A, B$  は線路の境界条件によって決まる定数である.

$\gamma$  は伝搬定数と呼ばれ, 角周波数  $\omega$  について次式のように表

される.  $\alpha$  を減衰定数といい, 単位長さ当たりの減衰を示

す.  $\beta$  を位相定数という.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(j\omega L + R)(j\omega C + G)} \quad (2)$$

$R \ll \omega L, G \ll \omega C$  の場合, 次式のように近似できる.

実数部が減衰定数であり, 虚数部が位相定数である.

式 (3)において,  $GZ_0$  は誘電損,  $R/Z_0$  は抵抗損に相当す

る.  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  であり, 無損失線路の特性インピーダンス

を表す. 誘電損は GHz 以上の周波数で問題となることが知られている[1]. 本稿では, 普及している 100 Mbps の Ethernet 100BASE-TX の信号を評価するので, 抵抗損が支配的と考えられる.

#### 3. 1. 表皮効果による抵抗

伝送損失の主な原因として表皮効果による抵抗の増大がある. 導線に電流が流れると磁束を生じ, 中心部の電流ほど多くの磁束と鎖交するので, 中心部ほどインダクタンスが大きくなる. したがって, 周波数が高いと電流は中心部を流れにくくなるので表面に集中する. このため周波数が高いほど電流が流れる断面積が小さくなり, 抵抗が大きくなる.

平行平板の伝送線の表皮効果による抵抗を求める. 十分に高い周波数では, 次式のように近似できる. 表皮効果による抵抗は周波数の平方根に比例して増大する. ここで,

$w$  は平行平板の幅,  $\sigma$  は導電率,  $\mu$  は透磁率である.

$$R \cong \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (4)$$

### 4. Ethernet信号の評価

Ethernet は LAN (Local Area Network) の規格の一つであり, LAN のほとんどが Ethernet で運用されている. 伝送速度や使用するケーブルや伝送距離等によって規格が決まっている. Ethernet は伝送速度で分類され 1 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps の 5 種類があり, さらに高速な Ethernet が検討されている.

本稿では, 普及している Ethernet 100BASE-TX の信号を取り上げる. Ethernet 100BASE-TX はエンハンスドカテゴリ 5 の UTP ケーブルを使用し, 伝送速度 100 Mbps, 最大伝送距離 100 m である. この伝送符号化方式は 4B/5B と MLT-3 (Multi Level Transmit-3) である.

UTP ケーブルは通信ケーブルの一つであり, シールドされていない 8 本の線を 2 本ずつ 1 組により合わせたより

対線ケーブルである。ケーブルの品質によりカテゴリが決まっている。

4B/5B 符号化方式は 4 ビットのデータを 5 ビットに変換することにより、できるだけ同じ符号が連続しないようにしている。MLT-3 は 2 値のデータ (0, 1) を 3 値のデータ (-, 0, +) に変換することにより、高周波成分を低減させて必要な帯域幅を狭くしている[2]。

#### 4. 1. ケーブル長依存性

伝送損失の影響は距離の増大とともに顕在化してくる。ケーブル長による信号品質の劣化を観測する。図 3 に示すように、信号源に UTP ケーブルを接続し、UTP ケーブルの特性インピーダンスと等しい 100 Ω の抵抗器で終端し、信号波形をオシロスコープで観測する。UTP ケーブルはエンハンスドカテゴリ 5 のストレートケーブルを使用し、パーソナルコンピュータから送信される Ethernet 100BASE-TX の信号を用いる。

図 4 に back-to-back のアイパターンを示す。図 5 と図 6 に 40 m と 100 m の UTP ケーブル伝送後のアイパターンを示す。40 m のケーブル長からアイ開口の劣化が顕著になり、100 m のケーブル長ではアイ開口が見えなくなるほど信号が劣化する。距離が長くなるほど信号品質が劣化することを示した。

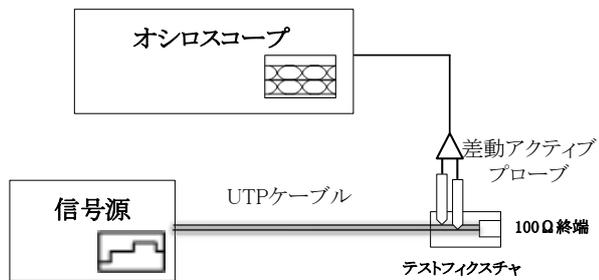


図 3. 伝送路の波形を評価する実験の構成図

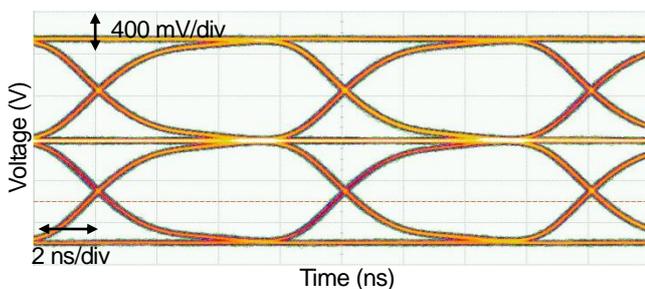


図 4. back-to-back のアイパターン

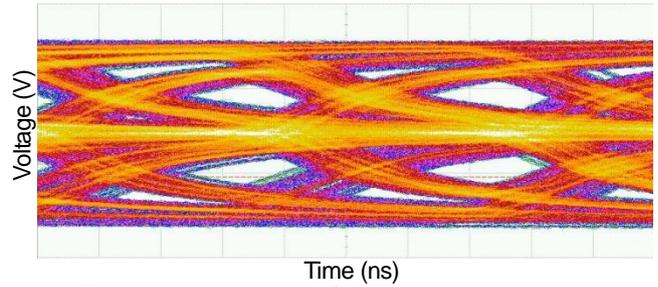


図 5. 40 m の UTP ケーブル伝送後のアイパターン

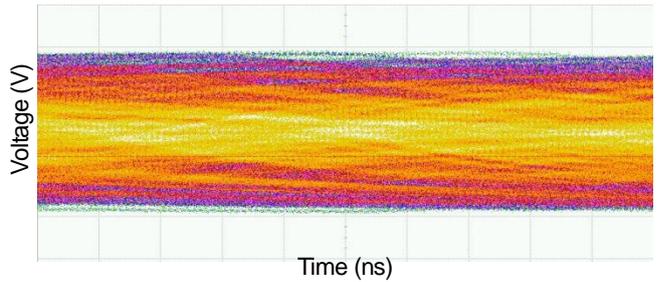


図 6. 100 m の UTP ケーブル伝送後のアイパターン

#### 5. 伝送損失の評価

信号品質の劣化の主な原因は伝送損失と考えられるため、伝送損失の周波数依存性を明らかにする。図 7 に示すような構成で伝送信号の振幅を測定する。ファンクションジェネレータはシングルエンド信号を生成するため、バランを用いて差動信号に変換する。バランはシングルエンド信号と差動信号を変換するための素子である。

back-to-back と 100 m の UTP ケーブルの伝送信号の振幅の比から損失を求める。信号の周波数を 100 kHz から 200 MHz まで変化させ、損失の周波数特性を評価する。

測定結果を図 8 に示す。UTP ケーブルは低周波を通過させ高周波を遮断するローパスフィルタと同様の周波数特性がある。周波数帯域は約 3 MHz であり、数 MHz を超えると急激に劣化する。

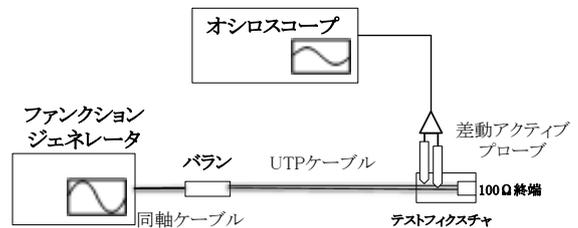


図 7. ケーブル損失を測定する実験の構成図

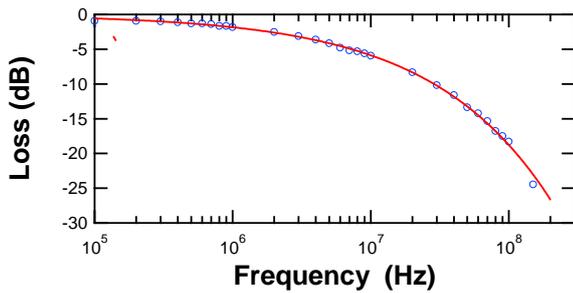


図 8. 100 m の UTP ケーブルの損失の周波数特性

### 5. 1. 近似式の算出

信号品質の劣化をシミュレーションするため、伝送損失の近似式を求める。Ethernet 100BASE-TX の信号を伝送させる場合を考える。伝送速度は 100 Mbps であり、表皮効果による抵抗損が支配的になるため、誘電損による損失は考慮しない。

UTP ケーブルは平行 2 線路の分布定数線路と考えることができる。電圧  $V$  は進行方向  $x$  に伝搬する。損失は出力電圧  $V$  と入力電圧  $V_0$  の比であり、次式で表される。

$$\frac{V}{V_0} = e^{-\gamma x} \quad (5)$$

式(4)より、伝搬定数  $\gamma$  の減衰定数を与える抵抗は、表皮効果により周波数の平方根に比例し、長さに比例する。周波数  $f$  と距離  $l$  を除いた要素を定数  $C$  とすると、損失は次式のように表される。

$$\frac{|V|}{|V_0|} = e^{-Cl\sqrt{f}} \quad (6)$$

図 9 の実験結果を式(6)で回帰分析し、定数  $C$  を求める。

得られた定数  $C$  は  $2.15 \times 10^{-6} \text{ [s}^{1/2}/\text{m]}$  であり、UTP ケーブルの表皮効果による損失の近似式が得られた。図 8 において実線は式(6)による理論曲線である。この信号の伝送損失は表皮効果による損失の近似式で表されることが明らかになった。

### 5. 2. シミュレーション

Ethernet 100BASE-TX の信号劣化をシミュレーションする。信号をフーリエ変換し、式(3)の伝送損失の近似式でフィルタリングし、逆フーリエ変換する。図 9 に信号源の信号と 100 m の UTP ケーブルを伝送させたときのシミュ

レーションによる信号を示す。

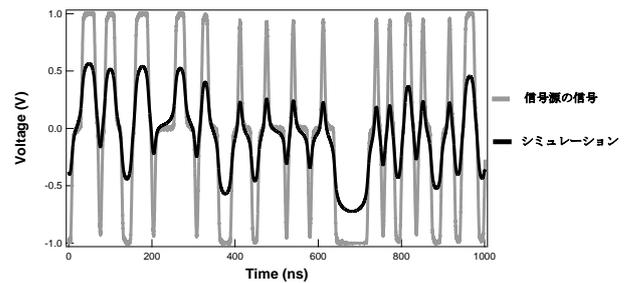


図 9. 信号源の信号とシミュレーションによる信号波形

図 10 と図 11 に 40 m と 100 m のケーブル伝送後のアイパターンのシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは図 9 に示す波形を 1 ビットずつずらして重ね合わせている。ケーブルが長くなるほどアイ開口が劣化して、振幅が低くなる。実験結果と同様の特性が得られた。

100BASE-TX では伝送路の距離が 100 m 程度の長さになると信号品質が極端に劣化することが知られている[3]。本報告では、信号品質の劣化は表皮効果による損失の近似式に基づいたシミュレーションとほぼ一致することを明らかにした。

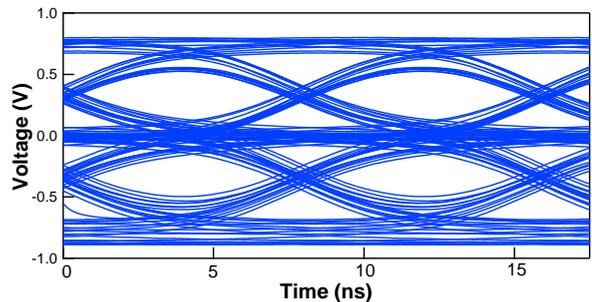


図 10. 40 m の UTP ケーブル伝送後のアイパターン

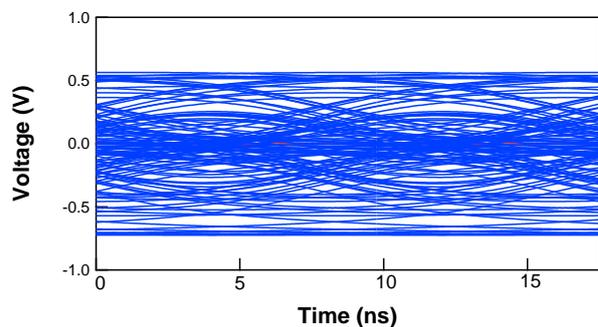


図 11. 100 m の UTP ケーブル伝送後のアイパターン

### 6. おわりに

実験によりケーブルの損失の周波数特性を評価した。周波数特性は表皮効果による損失の近似式で表されることが示した。減衰定数は表皮効果によって増大する抵抗が支

配的となり, 長さに比例し, 周波数の平方根に比例する.

ケーブルが長くなるほど信号品質が劣化することを, 実験と表皮効果による損失の近似式に基づいたシミュレーションにより示した. 実験とシミュレーションにより, 信号品質の劣化の主な原因が表皮効果による抵抗の増大であることを明らかにした.

#### 参考文献

- [1] 碓井 有三, “アイパターン,” エレクトロニクス実装学会誌 8(4), 2005
- [2] 石田修/ 瀬戸康一郎 監修, “10 ギガビット Ethernet 教科書,” IDG ジャパン, 2002.
- [3] インターフェース編集部 編集, “Ethernet のしくみとハードウェア設計技法,” CQ 出版社, 2006.