

第 2 章 物理層

岡崎 雅大

okazaki@nile.cse.kyutech.ac.jp

2019 年 5 月 7 日

目次

1	はじめに	1
2	物理層	1
2.1	データ通信の理論的基礎	1
2.1.1	フーリエ解析	1
2.1.2	帯域制限信号	2
2.1.3	通信路の最高データ転送速度	3
2.2	有線伝送媒体	3
2.2.1	磁気媒体	3
2.2.2	より対線 (twisted pair)	4
2.2.3	同軸ケーブル (coaxial cable)	4
2.2.4	電力線	4
2.2.5	光ファイバ	4

1 はじめに

2 物理層

2.1 データ通信の理論的基礎

電圧や電流のような何らかの物理量を変化させることで、電線上に情報を伝送することができる。この電圧や電流の値を、時刻の一価関数 $f(t)$ で表すことにより、信号の振る舞いをモデル化し、数学的に分析できる。

2.1.1 フーリエ解析

19 世紀のはじめ、フランスの数学者フーリエ (Jean-Baptiste Fourier) は適度な振る舞いをする周期 T のどんな周期関数 $g(t)$ も、正弦と余弦の和で表せることを証明した。

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft) \quad (1)$$

- $f = \frac{1}{T}$: 基本周波数
- a_n, b_n : n 番目の調和項 (harmonic term) の正弦と余弦振幅
- c : 定数
- このような分解をフーリエ級数 (Fourier series) と呼ぶ

- 周期 T が既知で、振幅が与えられれば式 (1) の和を実行することで時間関数を再合成できる

有限の継続時間を持つデータ信号は、一定のパターンを繰り返すとみなすことで同様に扱うことができる。

与えられた $g(t)$ に対する振幅 a_n は、式 (1) の両辺に $\sin(2\pi kft)$ をかけて 0 から T まで積分することで計算できる。

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} k \neq n \text{ のとき } 0 \\ k = n \text{ のとき } \frac{T}{2} \end{cases} \quad (2)$$

より、 a_n の 1 項だけが残る。 b_n の項の和は消える。 b_n を得るには同様に式 (1) に $\cos(2\pi kft)$ をかけて積分をする。また、式の両辺を積分することで c が得られる。これらの操作の結果は以下ようになる。

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad (4)$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt \quad (5)$$

2.1.2 帯域制限信号

データ通信において、実際のチャネルは異なる周波数の信号に対して異なる影響を与える。

- ASCII 文字 "b" を 8 ビットに符号化した場合
 - 送信するビットパターン: "01100010"
 - 図 2-1(a)(p103) の左側は、送信コンピュータによる電圧出力
 - フーリエ解析により次の係数を得る

$$a_n = \frac{1}{\pi n} \left[\cos\left(\frac{\pi n}{4}\right) - \cos\left(\frac{3\pi n}{4}\right) + \cos\left(\frac{6\pi n}{4}\right) - \cos\left(\frac{7\pi n}{4}\right) \right] \quad (6)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} \left[\sin\left(\frac{3\pi n}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi n}{4}\right) + \sin\left(\frac{7\pi n}{4}\right) - \sin\left(\frac{6\pi n}{4}\right) \right] \quad (7)$$

$$c = \frac{3}{4} \quad (8)$$

- 図 2-1(a)(p103) の右側は、いくつかの項の根 2 乗平均振幅 $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ である
 - * 2 乗した値が対応した周波数で送信されるエネルギーに比例する
- いかなる伝送設備においても途中で一切電力を失うことなく信号の伝送はできない
 - フーリエ級数のすべての成分が同じように減衰すれば信号の振幅は減少しても歪むことはない
 - すべての伝送設備は異なるフーリエ級数を異なる値だけ減衰するので歪みが生じる
 - 導線では、0 からある周波数 f_c まではおおよそ減衰なしに伝送されこのカットオフ周波数より上の周波数は減衰する
- 大きく減衰することなく伝送される周波数の幅を**帯域幅 (bandwidth)**と呼ぶ
 - 伝送媒体の物理的性質であり、導線や光ファイバの構造、厚み、長さなどに依存する
 - 伝送することのできる情報は幅にのみ依存し、始まりや終わりの周波数には依存しない
 - 0 から最大周波数まで広がる信号: **ベースバンド (baseband) 信号**
 - 高い周波数信号を占めるようずらした信号: **通過帯域 (passband) 信号**
- 転送速度が b ビット/秒であるとき、8 ビットを 1 ビットずつ送るのに必要な時間は $8/b$ 秒であり、この信号の最初の調和項の周波数は 8 Hz である
 - **音声品質回線 (voice-grade line)** と呼ばれる電話回線は、3000 Hz のすぐ上に人工的なカットオフ周波数が導入されている

- よって、通過する最も高い調和項の番号は、約 $3000/(b/8)$ すなわち $24000/b$ となる
- データ転送速度と調和項の関係を図 2-2(p104) に示す
- 音声品質回線を 9600 ビット/秒で送信する場合、調和項が 2 つしか送信することができないので、もとの 2 進ビット・ストリームを正確に受信することは困難である
- 38400 ビット/秒で送信する場合は伝送路上に雑音が全く無い場合でも 2 進信号を送信することはできない
- しかし、複数の電圧レベルを活用するより洗練された符号化方式は存在し、より高いデータ転送速度を実現できる

2.1.3 通信路の最高データ転送速度

- 1924 年、AT&T の技師であったヘンリー・ナイキスト (Henry Nyquist) は雑音のない有限帯域通信路に対する最大データ転送速を表す式を導いた
- 1948 年、クロード・シャノン (Claude Shannon) がランダム (熱力学的) 雑音を持った通信路の場合に拡張した
- ナイキストは、任意の信号が帯域 B の低域通過フィルタを通過した場合、通過した信号は、毎秒 $2B$ 回だけ標本化することにより完全に再合成できることを証明した
 - 信号が V 個の異なる信号レベルで構成されているとき、ナイキストの定理より最大データ転送速度は以下の通りである

$$\text{最大データ転送速度} = 2B \log_2 V \text{ ビット/秒} \quad (9)$$

- 例えば、雑音のない 3 kHz の通信路は、6000 ビット/秒を超える 2 進信号を伝送できない
- 実際の通信路上にはシステム上の分子の運動に起因するランダム (熱) 雑音が常に存在し、これによって状況は急激に悪化する
 - 存在する熱雑音の量は、**SNR(Signal-to-Noise Ratio) : 信号対雑音比**と呼ばれる信号電力と雑音電力の比で測られる
 - 信号電力を S 、雑音電力を N とすると、信号対雑音比は S/N である
 - 比は常に大きな範囲で変化するため、対数目盛上で $10 \log_{10} S/N$ の値で表され、単位は**デシベル (decibal)(dB)**である
- シャノンは、帯域 B Hz、信号対雑音比 S/N の雑音がある通信路の最大データ転送速度または**容量 (capacity)**が以下の式で与えられることを示した

$$\text{最大データ転送速度} = B \log_2(1 + S/N) \text{ ビット/秒} \quad (10)$$

2.2 有線伝送媒体

物理層の目的は、マシン間において生のビット・ストリームを伝送することである。実際の伝送の際には様々な物理媒体を用いることができ、それぞれに、帯域、遅延、価格、設置、保守の容易さなどの点において固有の適所がある。媒体は、銅線や光ファイバなどの線路と、地上無線、衛星や空中のレーザーのような自由空間媒体とに大別される。

2.2.1 磁気媒体

コンピュータ間でデータを転送するためによく用いられる方法として、データを磁気テープや取り外し可能媒体に書き込んで、テープやディスクを物理的に宛先マシンに伝送し再度読み出す方法がある

- 利点：価格効率が良い

- － 手法として洗練されているわけではないが、高い帯域や伝送されるビットあたりの価格が重要であるときに適している
- 欠点：遅延特性が貧弱である
 - － 伝送時間は ms(ミリ秒) ではなく分や時間で測る必要がある
- 例：テープを物理的にトラックで運ぶことでデータを転送する
 - － 帯域面
 - * Ultrium テープの容量は 800GB
 - * $60 \times 60 \times 60$ cm の箱に 1000 本のテープを格納でき、全容量は 800TB、すなわち 6400T ビットとなる
 - * 箱は運送業者によって米国全土へ 24 時間以内に届けることができる
 - * 伝送の実行帯域幅は 70G ビット/秒強、もし宛先まで道路で 1 時間程度の場合は 1700G ビット/秒以上となる
 - － 価格面
 - * Ultrium テープの価格は 1 本あたり 40 ドル程度である
 - * 10 回は再利用可能であるため、コストは使用 1 回で箱あたり 4000 ドル程度である
 - * 運送費は 1000 ドル程度
 - * 800T バイトを伝送するためにかかるコストは 5000 ドル、1G バイトあたり 0.5 セント程度となる
 - － あらゆるネットワークも年々伝送速度は早くなっているが、同様にテープの密度も増加している。帯域面、価格面ともに他のネットワークでは及ばないといえる
 - － 教訓：テープを満載し、道路を疾走する貨物自動車の帯域を決して過小評価するべからず

2.2.2 より対線 (twisted pair)

- 最も古く、現在でも最もよく用いられている伝送媒体の一つである
- 1mm 程度の太さの 2 本の絶縁された銅線をらせん状により合わせたもの
 - － より合わされているため、異なるよりからの波は打ち消し合い、線からの放射効率が下がる
- 信号は、対を構成する 2 本の導線の電圧の差として運ばれる
 - － 外部からの雑音は両方の導線に同じ影響を与えることが多く、差は変わらないため、外部雑音に対して良い耐性を与える
- 増幅無しで数 km まで届くが、それ以上の距離に対しては減衰が大きいため中継機が必要となる
- アナログ、デジタルのいずれを伝送するのにも用いることができ、多くの場合、数 M ビット/秒を数 km 伝送できる

2.2.3 同軸ケーブル (coaxial cable)

- 非シールドより対線と比べて遮蔽がよく帯域幅が大きいため、高速でより長距離まで伝送することが可能
- 硬い銅線の芯とそれを取りまく絶縁物質から構成されている
 - － 絶縁体は円筒形の導体の中に入れられており、多くの場合この胴体は細かく編んだ講師である
 - － 外部導体は保護プラスチックのさやで覆われている
- この構造と遮蔽は、広い帯域と優れた対雑音性を達成しており、数 GHz までの帯域幅を有している

2.2.4 電力線

- 電力線：家庭に電力を届けるための配線

- 電力配線：家庭内のコンセントに電力を配るための配線
- 電力線 (電力配線) を用いてデータ通信を行う手法
- 利点：電力の供給とデータ通信のための配線を同時に行うことができる
- 欠点：電力配線はデータ信号を分配するためには設計されていないため、使用に適していない

2.2.5 光ファイバ

- 通信回線の進歩
 - IBM PC の登場から約 28 年の間に、広域の通信回線は 45M ビット/秒から 100G ビット/秒に進歩した
 - 誤り率もビット当たり 10^{-5} からほとんど 0 に近づいた
 - 現在の光ファイバ技術で達成可能な帯域は 5 万 G ビット/秒 (50T ビット/秒) である
 - 100G ビット/秒という限界は、電気信号と光信号の変換に起因するものである
- 光ファイバの用途
 - ネットワークのバックボーンの長距離伝送
 - 高速 LAN
 - FTTH(Fiber to the Home) のような高速インターネット・アクセス
- 光通信システムは、光源、伝送媒体、検出器の三つの主要な構成要素からなる
 - 光のパルスで 1 のビット、光がないことで 0 のビットを表す
 - 伝送媒体は極めて細いガラス繊維である
 - 検出器は光が入ると電気パルスを発生する
 - 光ファイバの一方の端に光源、他方の端に検出器を取り付け、電気信号を受け付けて光のパルスに変換して伝送し、受信側で電気信号に再変換する。
- 全反射
 - 光線がある媒体から別の媒体、例えば融解シリカから空気へと進むとき、図 2-6(a)(p111) に示すようにシリカと空気の境界で屈折する
 - 屈折の量は二種類の媒体の性質 (特に屈折率) に依存する
 - ある臨界値よりも大きな入射角に対して、光はシリカの中へ屈折して戻り、空気中に逃げることはない
 - 臨界角の入射光は図 2-6(b)(p111) が示すように、ファイバ中に捕捉されて何 km も減衰なしに伝搬する
- マルチモードファイバ (multimode fiber)：それぞれの光が異なるモードを有している
 - 境界に臨界角よりも大きく入射する光はすべて内部で反射するので、多くの光が異なる角度で反射を繰り返している
- シングルモードファイバ (single-mode fiber)：光がファイバ内を直線上に伝搬する
 - ファイバの直径を光の波長の数倍にまで小さくして実現する
 - より高価であるが、より長い距離において広く用いられている

■ファイバを通じた光の伝送

- ガラス中を進む光の減衰は光の波長に依存する
 - 光の減衰は入力と出力の信号電力の比として定義されている
 - 図 2-7(p112) はファイバに用いられるガラスの減衰を、ファイバの km 当たりの db(デシベル) を単位として示したものである
 - このうち、破線で区切られている区間がよく用い合ええる波長帯である。

- 色分散 (chromatic dispersion)
 - ファイバ中に送り出された光パルスは伝搬するにつれて長さが広がる
 - この広がりを色分散といい、その量は波長に依存する
 - パルスを特別な形状にすることで、分散効果がほとんど打ち消し合い、何千 km もの間、パルスの形を歪ませることなく遅れることが発見された
 - このようなパルスはソリトン (soliton) と呼ばれる

■ファイバ・ケーブル

- 光ファイバ・ケーブルは編みひもがないことを除いて同軸ケーブルと似ている
 - 中心に光が伝搬するガラス・コアがある
 - マルチモードファイバのコアの直径は 50 μm
 - シングルモードファイバのコアの直径は 8 ~ 10 μm
 - 光をコアの中に保つために、コアはコアより小さな屈折率のガラスのクラッド (cladding) に覆われている
 - その外側にクラッドを保護するための薄いプラスチックの覆いがある
 - 多くの場合、ファイバは束にまとめられて外ざやで保護されている
- ファイバの接続手法
 1. コネクタを取り付けてファイバ・ソケットにはめる
 - コネクタはおよそ 10~20% の光を失うが、システムの再構成が用意となる
 2. 機械的につなぎ合わせる
 - 切断した端を特殊な管の中に並べてはめ込むだけであり、損失は 10% である
 3. 二本のファイバを癒着し、接合を作る
 - 1 本のファイバにかなり近いが、少量の減衰が起こる
- 信号生成には LED (Light Emitting Diode: 発光ダイオード) と半導体レーザーの 2 種類の光源が用いられる
 - 図 2-9(p114) にそれぞれの光源の性質を示す
 - 光源とファイバの間にファブリ・ペロー干渉計 (Fabry-Perot interferometer) またはマッハ・ゼンダ干渉計 (Mach-Zehnder interferometer) を挿入することで波長を調整する
- 光ファイバの受信端は、光が当たったときに電気パルスを出すフォト・ダイオードで構成される
 - フォト・ダイオードの応答時間がデータ転送速度のボトルネックとなっている

■光ファイバと銅線の比較

- 光ファイバの利点
 - 高い帯域を扱うことができる
 - 減衰が低いため、長距離回線では中継機はおよそ 50 km ごとで済み、大きな費用軽減となる
 - 電力サージ、電磁気干渉、電源故障の影響を受けない
 - 空中の腐食性の化学物質の影響も受けないため、過酷な工場の環境では重要である
 - 細くて軽いため、保守費用が削減できる上に、設置費用も抑えることができる
 - 分岐が難しいため、盗聴者に対するセキュリティが高い
- 光ファイバの欠点
 - 扱う技術者に高い技術力を要求する
 - 曲げすぎると容易に損傷を受ける
 - 本質的に単方向通信となるため、双方向通信のためには 2 本のファイバか 1 本のファイバに二つの

周波数帯が必要である

- － ファイバ・インタフェースは電氣的インタフェースより費用がかかる