

通信工学のための光速測定実験

佐藤 憲史*

Experiments of Light-velocity Measurements for Communication Engineering

Kenji Sato*

Abstract: Experiments of light-velocity measurements have been described for the education of communication engineering. Light velocities in air and via several cables are measured. Accuracy of three digits is realized through a short propagation distance of 1-2 m by utilizing high-frequency technologies.

Key Words: light-velocity measurement, communication engineering, high-frequency technology

1. はじめに

2017年のノーベル物理学賞は、重力波の観測について与えられた^[1]。その実験では重力波そのものを観測しているわけではなく、重力波の進行方向に対する光路の相違によって光速が変化することを観測しており、マイケルソン-モーレーの実験の再来である。マイケルソン-モーレーの実験は、光を伝搬するエーテルの存在を証明するために行われたが失敗に終わった^[2]。アインシュタインはエーテルの存在を否定し、光速不変の原理に基づく相対性理論を構築した。そこで重力波の存在が理論的に導出された。マイケルソン-モーレーの実験が、今度は重力波の存在を証明するために再び登場した。この方法による重力波の検出には21ケタ以上という、極めて高い精度を要求されたが、現代の科学技術がそれを可能としたことは驚嘆に値する。光速不変の原理やそれに基づく相対性理論は、物理学の根幹をなす重要なテーマである。真空中の光速は、 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ と定義されており、長さの基準を与えるなど物理量の基礎になっている。大気中、あるいは宇宙空間での光速を測定する試みは、ガリレオに始まるとされている^[3]。その後、長い歴史を経ていくつかの方法が考案され、現代では真空中での高精度な測定がなされている。

著者は、本校で2年生が履修する「ミニ研究」において、2017年度、「光を測る、わかる」をテーマとして実施した。物理現象を理解する上で光速を体験することが重要であり、相対論への扉を開ききっかけになると考えた。光速測定の歴史や実際に学び、光速測定を体験した。また、レーザー光を応用した距離計を入手し、原理等を調べた。この授業を通して、光速を高精度に測定することは容易ではなく、通信技術や高周波技術が重要であることを再認識した。

電磁波を応用する通信技術では、光速は基礎的で重要なパラメータである。本報告では、実験室で簡便に光速を測定する方法と得られた結果を述べる。それらに新規性はないが、具体的な実験系の構成や手順を記述し、学生実験を実施するための材料を提供する。用いられた実験系は、各種通信の基本的な構成となっており、通信工学の学習にとって有効である。特に、マイクロ波領域を扱う高周波技術の修得に寄与すると考える。

第2章において、大気中の可視光とマイクロ波の伝搬速度測定について述べる。第3章では、各種ケーブルの伝搬速度測定について述べる。

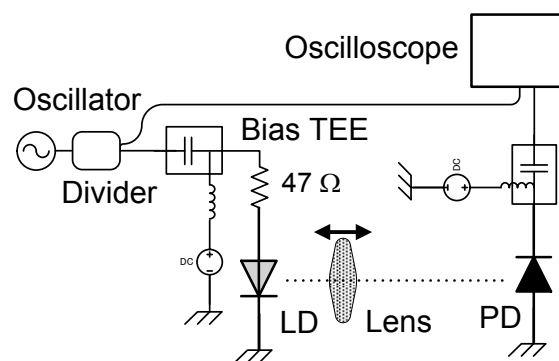


図1. 大気中の可視光の光速を測定する実験系。

2. 大気中の光速測定

2. 1 可視光

図1に、大気中での可視光の光速を測定する実験装置の構成を示す。光源には赤色半導体レーザー(LD; Laser Diode)を用いており、受光器はシリコンフォトダイオード(PD; Photo-diode)で構成される。レーザーの注入電流に高周波信号を重畳して変調し、空間を伝搬後、受光器で受信しオシロスコープで波形を観測する。これは、空間光通信の基本的な実験系である。光速は、LDとPDの距離を変化させ

* 電気電子工学科

た時の遅延を測定することで評価できる。遅延は、LD に重畳する信号源から分岐された電気信号(参照信号)と光受信信号とを比較することで測定される。学生実験で使用する実験台程度の広さで実施できるように、LD と PD の距離を 1 m 程度とするためには、高速な信号が必要になる。本実験では、LD の変調信号を 300 MHz の正弦波とした。300 MHz の周期は 3.3 ns であり、1 周期での光の伝搬距離は 1 m となる。LD を高速で変調するため、バイアスティー(Bias TEE; Anritsu, A3N1001)を用いて直流電流と高周波信号を重畳している。また、LD にはインピーダンス整合用の 47 Ω 抵抗を直列に接続している。安価な CAN 型 LD (SANYO, DL-3247-165)であるが、300 MHz 以上での変調が可能であった。300 MHz の信号源として、シンセサイザー(HP, 8341A)を用いた。受信には、帯域 300 MHz の Si PD (Hamamatsu, S3883)を用いた。PD においてもバイアスティーを用いて逆方向の直流電圧を重畳している。電流モニタ機能がある電源(ADVANTEST, R6240A)を用いてホト電流(直流成分)を測定している。PD の出力は、同軸ケーブルを介して直接オシロスコープ(Agilent, MSO9254A)に接続される。オシロスコープでは入力インピーダンスを 50 Ω に設定する。PD の受光面は直径 1.5 mm と小さく、受信信号を増幅器等用いないで直接観測するためにはレーザ光を集光する機構が不可欠である。本実験では CD に用いられていたレンズを微動台上に設置し、PD に接続した直流電源の電流が最大となるように位置調整している。

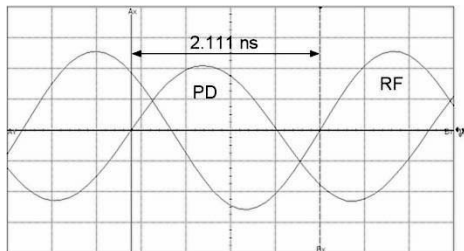


図 2. 高周波信号(RF)と受信信号(PD)波形。

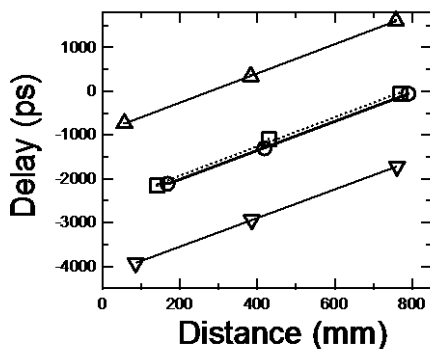


図 3. LD-PD 間距離に対する遅延時間。

図 2 に、オシロスコープで観測された波形の 1 例を示す。図中 RF は 300 MHz 正弦波の電気信号(参照信号)であり、PD は受信した信号波形である。2.111 ns の遅延が観測されている。この遅延は相対的な値であり、LD と PD 間の距離を増減することで変化する。LD やレンズの構成等を変えて 4 回行った測定結果を、図 3 に示す。各測定で LD と PD 間距離を 3 点取っており、図中の直線は回帰直線である。この直線の傾きから光速を評価する。遅延時間の測定では、オシロスコープの時間分解能 1 ps で精度が決まる。LD と PD 間の距離をメジャーにより 1 mm の分解能で測定している。結果として、測定された光速の有効数字は 3 ケタである。表 1 に、得られた結果を示す。4 回の測定では、平均 3.02×10^8 m/s の値が得られた。No. 2 の測定値を除けば、平均は 3.00×10^8 m/s となり、有効数字内で定義値に一致する。測定値にややばらつきがみられた。テーブル上で PD の位置を変えてレンズを調整し実験したが、光学ベンチを用いれば 1 軸上での位置変化となり、精度や再現性を向上できる。

表 1. 大気中の光速測定結果。

No	光速 (x10 ⁸ m/s)
1	2.99
2	3.06
3	2.99
4	3.02
平均	3.02

2. 2 マイクロ波

光が電磁波であることはマクスウェルが明らかにしたことであるが、電磁波の伝搬速度を測定することで光速と一致することを確認する。測定原理はレーザ光の場合と同様であるが、変調なしでより簡便な構成となる。実験の構成を図 4 に示す。図 1 と同じ高周波信号源を用いて、波長を短くするため、周波数を 2 GHz とした。直接アンテナ (Antenna 1) にマイクロ波を供給し、別のアンテナ (Antenna 2) で受信した後、オシロスコープで波形を観測している。図 1 の光速実験では群速度の測定であるが、図 4 では位相速度の測定となる。アンテナには卒業研究で作製した、ブラウンアンテナとパッチアンテナ⁴⁾を用いた。

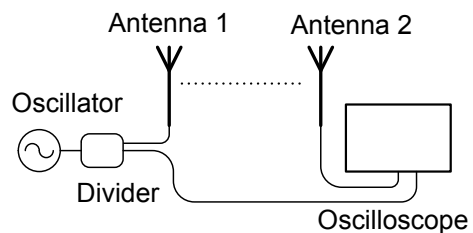


図 4. マイクロ波の位相速度を測定する実験系。

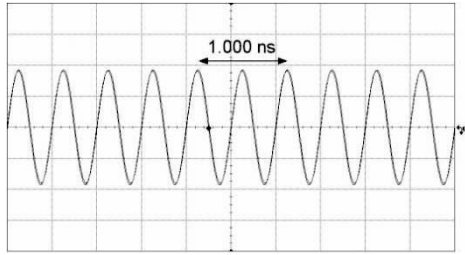


図5. 2 GHz のマイクロ波の観測波形.

図5に、観測された波形を示す。アンテナを介して空間を伝搬した波形とケーブルを介して接続された参照信号がほぼ重なった状態となるように調整している。その後、アンテナ間の距離を変えると空間伝搬後の信号が遅延により移動する。5周期と10周期ずれた位置を測定した結果を、図6に示す。図中の直線は回帰直線である。この結果から、位相速度を評価すると、 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ の値が得られ、光速と一致することが確認された。アンテナの大きさが波長の1/4程度であり、それに比べて十分大きな距離が必要となる。2 GHzにおける波長は15 cmであり、2 m程度の距離変化で光速を測定することが可能となった。

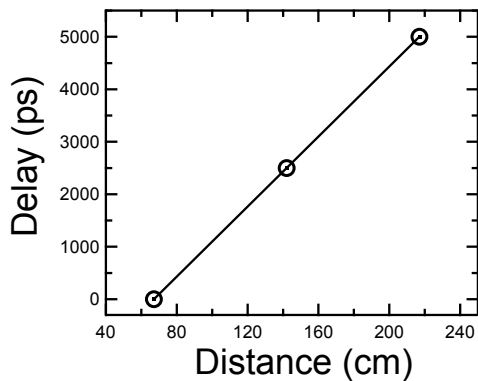


図6. アンテナ間距離に対する遅延時間.

3. ケーブル中の光速測定

3. 1 光ファイバケーブル

通信で用いる各種ケーブル内の信号伝搬速度を測定する。最初に、光ファイバケーブルについて、測定系を図7に示す。光源には、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯分布帰還型半導体レーザー (DFB LD)モジュール(NEL, NLK5C5E2LK)を用いた。レーザー光は、パルス発生器(Agilent, 33500B)の矩形波信号(パルス幅 100 ns, 立ち上がり時間 8 ns)で変調される。出射光を 3 dB カプラにより 2つに分岐し、片方の経路に長尺ファイバを結合する。2つの経路の光は 3 dB カプラにより再び結合され、InGaAs PIN PD モジュール(NEC, NDL547PIC)により検出される。PD には電池とキャパシタによるバイアス回路を接続している。ファイバは、石英

系 $1.55 \mu\text{m}$ 帯カットオフシフトファイバであり、ボビンに巻かれている。

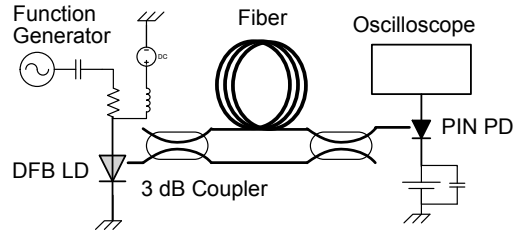


図7. 光ファイバ中の光速を測定する実験系.

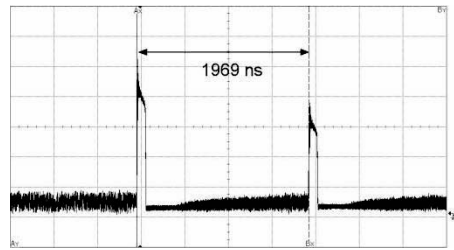


図8. 400 m の光ファイバ伝搬後の観測波形.

400 m の光ファイバについて観測された波形を図8に示す。2つのパルス波は、短い経路を通ったパルスと400 m の光ファイバを通過したパルスである。2つのパルスの振幅の違いは光コネクタやファイバの損失による。それらの時間差より光速を評価する。100 m の光ファイバについても同様の測定を行い、2つの測定から伝搬速度として、 $2.03 \times 10^8 \text{ m/s}$ が得られた。

3. 2 同軸ケーブル

同軸ケーブルでは、時間領域反射率計 (TDR: Time-domain Reflectometry)の原理を用いる。図9に示すように、パルス発生器より発生された矩形波信号(パルス幅 50 ns, 立ち上がり時間 8 ns)を T 分岐を介して同軸ケーブルに伝搬する。ケーブルの終端はオープンとする。終端での反射波を T 分岐を介してオシロスコープで観測する。

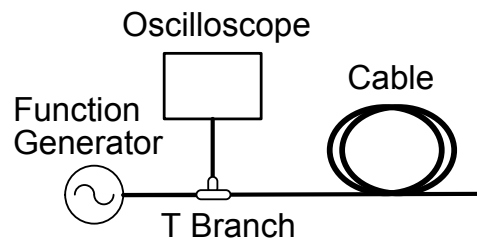


図9. 同軸ケーブル中の伝搬速度を測定する実験系.

50 m の同軸ケーブルを接続したとき観測された波形を図10に示す。反射波のパルス形状が異なるが、ケーブルの損失による。2つのパルスの時間差は同軸ケーブルを往復した時間であることから伝搬速度を評価する。20 m の同軸ケーブルについても同様の測定を行い、2つの測定か

ら、伝搬速度, 1.96×10^8 m/s が得られた.

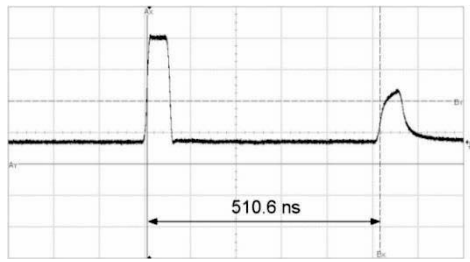


図 10. 50 m の同軸ケーブルで観測された波形.

3. 3 LAN ケーブル

LAN ケーブルについても同軸ケーブルと同様の測定を行う. カテゴリー5e の LAN ケーブルを用いた. 被測定ケーブル以外の測定系は同軸ケーブルで構成されているため, LAN ケーブルとの接続にはバランスが必要となる. 本実験では Ethernet Test Fixture (Agilent, N5392-66404) を用いた. また, 信号源としてオシロスコープのテスト信号 (方形波, 立ち上がり時間 0.4 ns) を用いた. 10 m の LAN ケーブルで観測された波形を図 11 に示す. 測定された時間差から, 伝搬速度 2.18×10^8 m/s が得られた.

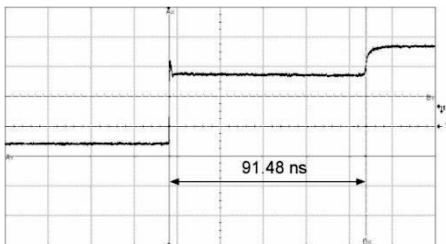


図 11. 10 m の LAN ケーブルで観測された波形.

4. 考察

異なる信号源と構成を用いて, 大気中とケーブル中の光速を測定した結果を表 2 にまとめる. 有効数字は 3 ケタである. 距離の測定精度を高めることで 4 ケタ以上の精度が可能である.

2. 2 節で述べた大気中のマイクロ波の実験では, 位相速度が測定されたが, 他の測定で得られた値は群速度である. 光ファイバでは波長分散により位相速度と群速度は, $1.55 \mu\text{m}$ 帯で 1% 以上異なる. また, 群速度分散が長距離伝送において問題となっている.

表 2. 測定された光速の比較.

伝送路	光速 ($\times 10^8$ m/s)
空間 (大気)	3.00
光ファイバ	2.03
同軸ケーブル	1.96
LAN ケーブル	2.18

大気中に比べケーブル中での光速は約 $2/3$ となっている. ケーブル中での光速 v_p は, モード分散を無視し平面波とみなせば次式で与えられる.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1)$$

ただし, ϵ は誘電率, μ は透磁率である. 光速は誘電率の平方根に反比例する. 比誘電率の平方根が屈折率であり, 光速が屈折率に反比例することを意味している. 特性インピーダンス Z_0 が既知の同軸ケーブルや LAN ケーブルでは, 単位長さ当たりの静電容量 C を,

$$C = \frac{1}{v_p Z_0} \quad (2)$$

から見積もることができる. 同軸ケーブルの特性インピーダンスが 50Ω であることから, $C = 102 \text{ pF/m}$ が得られる. これは, 市販されている同軸ケーブルの仕様値 100 pF/m にはほぼ等しい. LAN ケーブルでは, $Z_0 = 100 \Omega$ から, $C = 45.8 \text{ pF/m}$ が得られた.

5. おわりに

通信技術に基づいた光速測定実験について, 構成や測定法の詳細と得られた結果について述べた. 空間を伝搬する可視光とマイクロ波, 及び各種ケーブルを伝搬する信号速度を評価した. 空間伝搬では, 学生実験室内で実施することを想定し, 高周波技術を用いて 1-2 m 程度の距離で光速測定が可能であることを示した. 得られた光速の有効数字は 3 ケタであった. これらの内容は, 通信工学の学習, 特に高周波技術の修得に役立つものと考えられる.

謝辞

2017 年度, 本校 2 年の共通科目「ミニ研究」に取り組んだ小野寺歩輝君, 貝嶋志斗君, 香川颯太君に感謝します.

参考文献

- [1] The Royal Swedish Academy of Science, "The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves," *Kungl. Vetenskaps Akademien*, Oct. 2017.
- [2] 例えば以下の文献参照; 霜田光一, "歴史を変えた物理実験," 丸善(株), Jun. 1996.
- [3] 内山直哉, "環境電波の電力変換技術に関する研究," 平成 24 年度沼津工業高等専門学校電気電子工学科卒業論文, Mar. 2013.