

EM Wave Propagation Speed, Comments on “Measurement of Time Delay of Alternating Electrical Field in Wires” and “Physical Principles of Measuring the Speed of Alternating Electrical Field”

Yi Zheng, Cheng Xu, Jinjun Mou

Department of Electrical and Computer Engineering, St. Cloud State University, St. Cloud, Minnesota, USA

Email: zheng@stcloudstate.edu

Received: Aug. 30th, 2015; accepted: Sep. 10th, 2015; published: Sep. 17th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The time shift of an electromagnetic wave at a single frequency between a transmitter and a receiver can be used to determine the phase velocity of the wave propagation only if there is no reflection at the receiver or the reflection is very small. The reflection adds additional phase shifts to the composed wave of an incident wave and a reflected wave so that the time difference of the composed wave is shifted between the transmitter and the receiver. This time difference may be either decreased or increased and even negative in a certain condition. Ignoring the phase shift and time shift induced by the reflection, the authors of two articles recently published on “Modern Physics” wrongly claim of “the speed of alternating electric field can be 20 times faster than the speed of light”. The two articles are: “Measurement of Time Delay of Alternating Electrical Field in Wires” (Modern Physics, 2015, 5, 29-34) and “Physical Principles of Measuring the Speed of Alternating Electrical Field” (Modern Physics, 2015, 5, 35-39). In this communication note, theory and experiments are presented to falsify their claim.

Keywords

Electromagnetic Field, Time Delay, Phase Velocity, Superluminal Speed

电磁场的传播速度，评论“导线中交流电场时间延迟的测定”和“交变电场速度测量的物理原理”

郑 翊，徐 骋，牟晋君

圣克劳州立大学电子与计算机工程系，明尼苏达州，圣克劳德，美国

Email: zheng@stcloudstate.edu

收稿日期：2015年8月30日；录用日期：2015年9月10日；发布日期：2015年9月17日

摘 要

只有在没有反射或反射因素极小的情况下，在发射端和接收端电磁场的时间差可以用于计算电磁场从反射端到接收端的传播相速度。由于反射，测量到的合成波的相位是入射波和反射波相位的合成，由反射而引入的相位变化导致发射和接收端之间的同相位电磁波的时间差的移动。这种两点间的合成波的时间差由于反射既能增加也可能减小，在一定的情况下，时间差还可以是负数。由于忽视因反射而引起的相位差或时间差的变化，最近发表在《现代物理》上的两篇文章的作者们用带有反射的合成波的时间差计算电场传播速度，并和光在自由空间里传播相速度比较，进而在两篇文章中错误地宣称：“交变电场的速度超过光速20倍以上。”这两篇在《现代物理》上发表的文章是：“导线中交流电场时间延迟的测定”（现代物理，2015，5，29-34）和“交变电场速度测量的物理原理”（现代物理，2015，5，35-39）。此评论文章用理论和实验数据推翻其文章“超光速20倍”的结论。

关键词

电磁场，相速度，时间延迟，超光速

1. 引言

测量电磁场包括光的传播速度和时间延时，在现实科研和仪器设计中有大量的应用。从用高频的相控阵天线到低频的材料测量仪器，常用的方法包括用单频率的相位差或时间差来反映测量距离、介质材料性质、方向、角度、位置、等等。但是在这些仪器的设计里，工程师们需要保证接收端的阻抗匹配，或者需校正因反射而加入的相位差和时间差的变化，否则会产生十分错误的测量结果。

在没有反射或反射因素很小的情况下，发射端和接收端的电磁场的时间差可以用于计算电磁场从发射端到接收端之间传播的相速度。当接收端有反射时，反射会引起相位移动，这时发射端和接收端之间同相位的时间差即包含由于距离引起的时间差也包含由于反射引起的相位移动。这种相位移动表现成合成波的时间移动，这时测量到的时间差是由入射波和反射波的相位合成加上反射界面的影响而定，是在一个大范围里的任意数值，随反射系数而变化。在此情况下，测量的合成波同相位的时间差不能直接用来计算电磁场传播的相速度，而以此计算的速度与光在真空或空气自由空间里的相速度比较更是非常地不恰当。

最近有两篇在《现代物理》上发表的文章：《导线中交流电场时间延迟的测定》(现代物理, 2015, 5, 29-34) [1]和《交变电场速度测量的物理原理》(现代物理, 2015, 5, 35-39) [2]。由于忽视了由于反射而引起的合成波的相位移动造成的同相位的时间差移动, 这两篇文章的作者用带有反射测量到的时间差计算电场传播速度, 不恰当地和光在自由空间里传播的相速度比较, 进而在文章中错误地宣称: “交变电场的速度超过光速 20 倍以上” [2]。此文章指出这两篇文章关于此宣称的错误所在, 用理论推导和实验数据推翻其“超光速 20 倍”的结论。

2. 电场的相速度

用马克斯韦尔的电磁场矢量公式可导出电磁波传播的相速度。参考任何一本电磁场的教科书[3] [4], 对在任意介质里单频交变电场:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{E} \quad (2)$$

上式中的 $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0\varepsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (3)$$

其中, σ 是导电系数, ε_r 是相对介电常数, 对以一般非磁性介质, $\mu = \mu_0$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$ 。将(2)带入取了 $\nabla \times$ 的(1), 可得:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

对于指向 x 方向, 沿 z 方向传播的均匀平面波的电磁场包括光, (4)变成:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \omega^2 \mu \boldsymbol{\varepsilon} E_x = 0 \quad (5)$$

让 $\mathbf{k} = \omega\sqrt{\mu\boldsymbol{\varepsilon}} = k_R - jk_I$, (5)的解是:

$$\mathbf{E} = \hat{x}E_0 e^{-jkz} = \hat{x}E_0 e^{-k_I z} e^{-jk_R z} \quad (6)$$

因此, 包含时间变量的均匀平面电磁波的电场解是:

$$\mathbf{E}(z, t) = \text{Re}\{Ee^{j\omega t}\} = \hat{x}E_0 e^{-k_I z} \cos(\omega t - k_R z) \quad (7)$$

对固定的相位求时间导数, 可以得到电场传播的相速度:

$$\begin{aligned} \frac{d(\omega t - k_R z)}{dt} &= \omega - k_R \frac{dz}{dt} = 0 \\ v(t) &= \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k_R} \end{aligned} \quad (8)$$

对在真空或空气自由空间里传播的电磁波包括光的相速度:

$$c = \frac{\omega}{k_R} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (9)$$

对以一般非磁性介质, 电磁波的传播相速度是:

$$v(t) = 3 \times 10^8 / \sqrt{\varepsilon_r} \quad (10)$$

对高导电介质包括金属[4]:

$$v(t) = \sqrt{4\pi f / \mu\sigma} \quad (11)$$

在没有反射的情况下, 两点间 $(z_0, z_0 + \Delta z)$ 的同相位时间差:

$$\Delta t = \frac{[(\omega t - k_R(z_0 + \Delta z)) - (\omega t - k_R z_0)]}{\omega} = \frac{k_R \Delta z}{\omega} \quad (12)$$

其中, $k_R \Delta z$ 是相位差。在已知距离 Δz 的情况下, 可得传播速度:

$$v(t) = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (13)$$

进而可得介质介电常数:

$$\varepsilon_r = c/v(t) \quad (14)$$

若已知速度的情况下, 可得传播距离:

$$\Delta z = v(t) \Delta t \quad (15)$$

在相控阵天线应用中, 发射和接收的时间差用于决定距离, 两阵元的时间差可定角度和方向。在测量介质材料的性质时, (12)到(15)常用到。但上述的一切都是基于发射和接收电路有很好的阻抗匹配, 反射极小。在工程实践中, 根据应用的不同(长度、精度、和衰减等问题), 无论频率高到吉赫兹, 或者低到千赫兹, 都需要考虑反射问题。对于测量幅度的影响, 一般大约按长度是否超过波长的 1% 考虑[4]。而对精确测量相位差和波传播时间差, 无论长短需要阻抗匹配, 以降低反射波和反射系数对相位移动的影响。文章[1] [2]用的是几兆赫兹, 属射频范围, 实验用的长度远超过其波长的 1%, 而讨论问题是由相位影响的时间差, 因此需要讨论射频的反射问题。

3. 电场反射和反射引起的相位差变化

电磁波传播从一种介质传播到另一介质时, 由于介质不一样, 两种介质的(Complex wave number)波导系数 \mathbf{k} 不一样, 一定方向上的入射波和反射波的两种介质的波导系数 \mathbf{k} 必须满足相位匹配关系, 因此可导出入射系数 \mathbf{T} 和反射系数 $\mathbf{\Gamma}$ [3]。在入射场这边, 总电场是:

$$\mathbf{E}^i = \mathbf{E}^i + \mathbf{E}^r \quad (16)$$

其中, \mathbf{E}^i 是入射电场, \mathbf{E}^r 是反射电场。关于入射电场和反射电场以及合成电场的讨论细节, 可见[3] [4]。沿用上述平面波的解:

$$\mathbf{E}^i = \hat{x}E_0 e^{-jkz} + \hat{x}\Gamma E_0 e^{jkz} \quad (17)$$

其中的反射系数 $\mathbf{\Gamma}$ 由频率和两种介质的 μ 和 ε 定, 可以是复数, $\mathbf{\Gamma} = |\Gamma| e^{j\theta}$ 。对在介质 1 里垂直偏振波或者水平偏振波入射到介质 2, 反射系数分别为[3]:

$$\Gamma_V = \frac{\mu_2 k_z - \mu_1 k_{tz}}{\mu_2 k_z + \mu_1 k_{tz}} \quad (18)$$

$$\Gamma_H = \frac{\varepsilon_2 k_z - \varepsilon_1 k_{tz}}{\varepsilon_2 k_z + \varepsilon_1 k_{tz}} \quad (19)$$

其中, k_z 和 k_{tz} 分别是 \mathbf{k} 在介质 1 和 2 里 z 方向的分量。对于传输线, 上述公式变成[4]:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (20)$$

其中, Z_L 是负载阻抗, Z_0 是传输线特征阻抗。我们可以考虑三种情况:

1) 在无反射情况下, $\Gamma = 0$, 入射波的相速度可用(13)定, 两点之间的时间差或时间延时可用于计算电场传播速度。这时, 测量传输线上的距离 Δz 的前后两点和测量长线 ($z + \Delta z$) 和短线 (z) 是等效的, 它们的相位差是 $k_R \Delta z$, 时间差是 $k_R \Delta z / \omega = \Delta z / v(t)$, 所以时间差可以用于计算传播速度。

2) 在全反射条件下, $\Gamma = 1$, 驻波产生:

$$\mathbf{E}^t = \hat{x}E_0 e^{-jkz} + \hat{x}E_0 e^{jkz} = \hat{x}2E_0 \cos(kz) \quad (21)$$

包括时间变量和距离变量的驻波是:

$$\mathbf{E}^t(z, t) = \text{Re}\{\mathbf{E}^t e^{j\omega t}\} = \hat{x}2E_0 \cos(kz) \cos(\omega t) \quad (22)$$

这时在两同相位测量点(测量距离是 Δz , 由于三角函数 $\cos(kz)$ 的周期性, 可以同相位), 时间差 (Δt) 等于零。这时, 若按 $v(t) = \Delta z / \Delta t$ 计算速度, 就会得到无穷大的结论。而用此无穷大的速度并不代表电场的传播速度, 而以此速度与光波入射波在自由空间的相速度比较, 这显然不恰当, 并且光波在有界面的路径上也能形成驻波。

3) 当 $0 < |\Gamma| < 1$ 时, 合成波是入射波和反射波的合成加上反射界面的影响:

$$\mathbf{E}^t = \hat{x}E_0 e^{-jkz} + \hat{x}\Gamma E_0 e^{jkz} = \hat{x}E_0 e^{-jkz} - \hat{x}\Gamma E_0 e^{-jkz} + \hat{x}\Gamma E_0 e^{-jkz} + \hat{x}\Gamma E_0 e^{jkz} \quad (23)$$

对无损耗介质或损耗可忽略不计时, 含时间变量的合成波:

$$\mathbf{E}^t(z, t) = \hat{x}E_0 [\cos(\omega t - kz) - |\Gamma| \cos(\omega t - kz + \theta) + 2|\Gamma| \cos(kz) \cos(\omega t + \theta)] \quad (24)$$

分析(24), 可以得到以下要点:

a) 没有反射时, $\Gamma = 0$, 情况和 1) 相同, 已讨论。

b) 有反射但反射系数相位 θ 是零时, 根据反射系数的大小, (24) 中三项的合成波在距离 Δz 两点之间的相位差是 $k\Delta z - \Delta\phi$, $\Delta\phi$ 是因为反射而引起的相位移动。明显的, 此相位差是在零和 $k\Delta z$ 之间的一个任意值。而合成波在两点之间的时间差也是一个在零和 $\Delta z / v(t)$ 之间的一个任意值, 用此任意数去计算出的“电场传播速度”是一个从无穷大到 $v(t)$ 之间的一个任意数, 随反射系数大小而变化。

c) 用两根长短不一样的传输线比较传播时间时, 如果两根线的特征阻抗或者阻抗匹配不一样, 两个反射系数的相位 θ 不一样, 加上入射波和反射波的合成相位移动, 测量到的时间差可以超出零到 $\Delta z / v(t)$ 的范围, 可以是负数, 也可以高出 $\Delta z / v(t)$ 。用此任意数去估计出的“电场传播速度”也是一个任意数, 随反射系数变化。

d) 由于反射而引起的相位差变化会导致时间差 ($\Delta t = (k\Delta z - \Delta\phi) / \omega$) 变化, 而且其变化随频率降低而相对变得明显。

e) 当传输线的阻抗即不和负载匹配, 也不和信号源阻抗匹配, 而传输线相对于波长足够长时, 将会有多次反射。对固定长度的传输线, 高频时会比较明显。这时合成波的相位移动会变得更复杂, (24) 不反映多次反射的合成波的情况。

反射系数 Γ 根据情况而不同。对于一般介质, 反射系数 Γ 是由两种不同介质的 μ 和 ϵ 的函数, 这适用于所有电磁波, 包括光波。上述分析的关于反射影响的相位差和时间差变化, 对所有频率的电磁场包括光都会有同样问题, 和反射面以及传输线与波长的比例有关。当用电缆线或裸铜线将信号发生器和示波器联接在一起时, 至少在示波器接收端有阻抗(或介质)不匹配而产生反射的问题。这是因为示波器的输入阻抗 (Z_L) 一般在 1 M 欧左右, 而电缆线的阻抗 (Z_0) 一般在 50 欧左右, 裸铜线的等效电抗 ($j\omega L$) 根据粗细和长短而定, 而裸铜线的特征阻抗和裸铜线周围的传播介质和等效电抗有关。从(20)和(24)可知, 反射系数的相位可正可负, 和距离影响一起, 减小或增大反射波的相位, 从而影响测量到的合成波同相位的时

间差。但这种变化的本质不是入射波的传播时间的改变，而是由于反射引起的合成波的相位变化，并且这种变化是在一个大范围内任意的值。

因此，仅仅从理论上分析，我们可以看到；只有在没有反射的情况下，测量到的两点间的同相位的时间差或者长短线之间的同相位时间差可以直接用于计算传播速度，此结论适用于高频和低频电磁波包括光波。两篇文章[1][2]用带有反射造成的一个任意数值和光波在自由空间里的相速度比较是错误的，至少是不恰当的。

4. 实验

按[1][2]的实验参数和相近的参数，我们做了三个方面的实验。其实验装置如图 1 显示。信号发生器(HP33120A)产生的信号经长线和短线分别接到示波器(Tektronix MSO2024)的两个输入通道，匹配电阻按实验情况区分，短线和长线按实验情况用电缆或裸铜线。用电缆时，每根线有接信号的芯线和地线。用裸铜线时，分别用一根长线和一根短线接信号，但示波器和信号发生器的地线用和短线一样的长度相连，如同[1][2]设置。示波器的输入阻抗是 1 兆欧姆($Z_L = 10^6 \Omega$)。

4.1. 用同轴电缆线的实验

对于电缆线而言，低频时，特征阻抗 $Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}$ 是复数，绝对值在 50 到 60 多欧，反射系数是复数。高频时， $Z_0 = \sqrt{L/C} = 50 \Omega$ 。实验用的 RG-58/U 同轴电缆：长线 4 米，短线 1 米，相对介电常数 $\epsilon_r = 2.3$ 。当用 RG58/U 同轴电缆做工程设计时，对其电场信号(2 kHz 到几十 MHz)的传递时间差可用应用工程手册注明的标准[5]：1.54 ns/英尺，此数值和按经典理论计算出的一致(对应 3 米的距离差)：

$$\Delta t = \frac{(4-1)\sqrt{\epsilon_r}}{3 \times 10^8} = 15.2 \text{ ns} \quad (25)$$

信号发生器产生 5 伏(峰峰值 = 10 伏)的 2 MHz 到 8 MHz 的信号，经长短电缆线传到示波器的两个输入端。和文章[1][2]一样，同相位的时间差在示波器的通道 1 和通道 2 测量，将示波器设置调到最能分辨两波形过零的相对相位，将幅值和时间分辨率档设到最高，用示波器的平均运算可得到较稳定测量值。表中第一行的按经典理论或工程手册里列出的 RG58/U 的时间延时列在表 1 的第一行(蓝色)，没有用任何终端阻抗的测量值列在第二行，终端用了 50 欧负载电阻(值精确度是 5%)的测量值列在第三行(红色)。注意第二行基本反映了要点(c)讨论的情况，第三行基本反映了(a)讨论的情况。

此实验显示：用同轴电缆时，若阻抗不匹配，测量到的合成波在两点间的时间差，也会出现时间差减小的现象，不是只有裸铜线才会出现，而且对低频率更明显，和理论分析一致。请注意，8 MHz 时，时间差是 2.82 ns，若用[1][2]的思路，8 MHz 时也比光速快 5 倍多。其实，这种现象用更短的传输线，在更高的频率也会出现，而不是[1][2]宣称的“低频”现象。但我们知道，这是由于反射引入的相位移动而致。但阻抗匹配时，测量到的时间差和同轴电缆的标准时间差一致。

4.2. 用裸铜线按文献[1][2]实验设置的实验

如图 1 所示，6.4 米的裸铜线作为长线，0.4 米的裸铜线作短线，另外一根 0.4 米的裸铜线作地线。按经典理论，几兆赫信号属高频射频范畴，电磁波基本在金属导线表面上传播，传播介质是空气，6.4 米和 0.4 米铜线的时间差应该是：

$$\Delta t = \frac{6.4 - 0.4}{3 \times 10^8} = 20.0 \text{ ns} \quad (26)$$

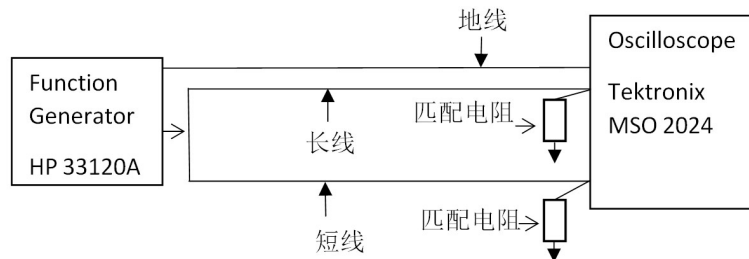


Figure 1. Experiment set up for measuring time difference between two wires having different length
图 1. 测量电信号经长短不同的传播线的时间差实验装置

Table 1. Experiment results with RG58/U cable
表 1. 用 RG58/U 电缆线的实验测量值

时间差, ns	2 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz	6 MHz	7 MHz	8 MHz
理论计算值	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
没有阻抗匹配测量值	1.00	1.38	1.50	1.52	1.83	2.02	2.82
用 50 欧阻抗匹配测量值	18.4	17.7	17.0	16.6	16.1	15.8	15.7

此铜线和示波器相连时，反射系数和裸铜线的传播电磁波的特征阻抗有关。这时，裸铜线的特征阻抗不是它的等效阻抗。关于铜线的等效阻抗，可以用理论计算估算[6]。6.4 米裸铜线(1.34 毫米直径)的电感大约是 11.3 μH ，对应 2 MHz 到 8 MHz 的频率，其电抗在 143 欧姆到 571 欧姆之间。同样的，0.4 米的电感大约是 487 nH，对应 2 MHz 到 8 MHz 的频率，其电抗在 6.15 欧姆到 24.5 欧姆之间。这些电抗区间大致符合用 Agilent 8753ES 网络分析仪的测量值。

如何计算裸铜线的传输电磁场的特征阻抗比较复杂。几兆赫兹的射频信号在铜线表面和空气传播，(对完全在空气里的传播，空气的特征阻抗大约是 377 欧姆)。但按[1] [2]文章实验的设置，地线和信号线长短不同，走向也不一致，线的几何分布复杂而不确定，准确计算此实验的裸铜线特征阻抗复杂，但应该在几十到几百欧姆范围，而且随频率和几何分布变化。无论如何，裸铜线的传输电磁场的特征阻抗和 1 兆欧姆的示波器输入阻抗相比，有严重的不匹配和反射，而且由于特征阻抗的不一样，长短线的反射系数不一样。在高频时，裸铜线还会和信号源阻抗不匹配，会有多次反射。

由于长线的在空间里的布线会影响到长线的特征阻抗和反射系数，进而影响到测量结果。我们将长线按三种不同的几何走向测量：

- 1) 圆形：长线从信号源到示波器的走向和布线近似于一个圆。
- 2) 矩形：长线从信号源到示波器的走向和布线近似于平行的矩形，相距大约 1 米。
- 3) 任意一：长线从信号源到示波器的走向和布线任意但不相交，最小距离大于 0.5 米。
- 4) 任意二：长线从信号源到示波器的走向和布线任意但不相交，最小距离大于 0.5 米。

电磁波在长短线上传播的时间差的理论值列在表 2 的第一行(蓝色)。按[1] [2]实验设置相似的测试值列在表 2 的第二、第四、第六、和第七行，结果和[1] [2]的实验结果相似，但不完全一致。圆形和矩形测量值相似不奇怪，因为两种布线只有微小的不同，非常相似。两种任意布线和其它两种的测量值相当不同，除测量误差外，在长度有限的裸铜线里传播几兆射频信号时，特征阻抗因空间布线不一样而造成不同的反射系数，从而引起不同的相位移动，而造成同相位的时间差不一样。可以看到，由于复杂的反射环境包括多次反射，对于不同的频率，时间差或低于或高于理论值，甚至是负值。而同样的设置，仅仅空间布线不一样，时间差可以是几倍的不同。足可见，用这样的任意变化的值去和光在自由空间里的传

播比是多么的错误。

我们将一个 390 欧姆的电阻当作负载阻抗接在和长线的示波器端口，圆形和矩形布线的时间差基本高于但接近理论值(第三行，第五行，红色)。

对任意形布线二，我们将一个 150 电阻接在长线到示波器的端口，将一个 20 欧的电阻接在短线接示波器的端口，其测量值列在第八行(红色)，其测量值和理论值基本一致。

实验用的电波峰峰值是 10 伏。无阻抗匹配时，对应 2 兆赫兹到 6 兆赫兹，长线上的峰峰值从十几伏到 20 伏左右(用 1 千赫兹时，峰峰值基本是 10 伏)。无阻抗匹配时，对应 7 兆赫兹到 8 兆赫兹，长线上的峰峰值基本都超过 30 伏。这说明：当传输线的长度和波长的比例高达一定时，由于发射端和接受端都有阻抗不匹配问题，反射和多次反射存在。如 4.1 的实验显示，当传输线缩短时，出现在 4.2 实验的 2 兆赫兹到 6 兆赫兹的现象也会出现在 8 兆赫兹；反之，对 2 兆赫兹到 6 兆赫兹，在加倍加长的传输线上，也会出现多次反射情况。

4.3. 用裸铜线和电缆线做长短线的实验

为了显示用合成波的时间差受反射系数的严重影响，我们设计了第三个实验：0.4 米的短线用电缆线，7.6 米的长线用裸线，若没有阻抗匹配，长短线阻抗的反射系数严重不一样，故这种严重的反射系数不一致，会严重影响测量的时间差，按理论分析，其结果会在很大的一个范围内变化。若阻抗匹配，按理论计算的时间差是：

$$\Delta t = \frac{7.6}{3 \times 10^8} - \frac{1\sqrt{2.3}}{3 \times 10^8} = 20.3 \text{ ns} \quad (27)$$

理论值列在表 3 的第一行。第二行是没有匹配的测量值，由于反射和非常不同的反射系数，测量值变化成负值。但在长短线的终端分别用了两个 50 欧的电阻后，测量的值高于理论值，但在 8 兆赫兹时，

Table 2. Experiment results with pure copper wire

表 2. 用裸铜线的实验测量值

时间差, ns	2 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz	6 MHz	7 MHz	8 MHz
理论计算值	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
圆形, 没有阻抗匹配的测量值	0.12	1.18	1.44	2.60	1.57	7.45	39.5
圆形, 长线用 390 欧姆阻抗匹配的测量值	23.6	24.52	26.22	28.0	29.2	31.3	34.4
矩形, 没有阻抗匹配的测量值	-0.61	1.15	1.51	2.20	1.39	6.63	42.1
矩形, 长线用 390 欧姆阻抗匹配的测量值	19.5	23.3	24.8	27.1	29.1	30.72	33.9
任意形 1, 没有阻抗匹配的测量值	-0.73	-0.22	2.04	5.60	5.92	19.8	45.2
任意形 2, 没有阻抗匹配的测量值	≅ 0.0	1.00	3.30	9.40	7.50	25.0	39.0
任意形 2, 长线用 150 欧姆, 短线用 20 欧姆阻抗匹配的测量值	21.4	23.7	21.7	22.4	21.4	20.0	20.0

Table 3. Experiment results by using pure copper wire long path and RG58/U as short path

表 3. 用裸铜线做长线和用电缆线做短线的实验测量值

时间差, ns	2 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz	6 MHz	7 MHz	8 MHz
理论计算值	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
没有阻抗匹配的测量值	-6.00	-4.70	-4.40	-2.40	-0.70	2.47	29.7
有阻抗匹配的测量值	74.8	55.5	43.3	36.8	29.2	27.5	25.2

测量值接近理论值。这时，用电缆线的短线阻抗基本匹配，长线负载阻抗小于传输线阻抗而阻抗不匹配但接近。用小电阻的目的是显示，低频的时间差可以比理论值高。另外，如表 3 第三行显示，高频时，时间差接近理论值，如前分析，这种影响对相对低的频率明显。

5. 讨论

计算电磁场传播的相速度可以用没有反射的电磁场在两点之间的时间差。所谓的光速(3×10^8 米/秒)就是指这样在自由空间的相速度。而通常和光速比较的电场传播速度也是指这样的相速度。在有反射的情况下，测量到的时间差是入射波和反射波合成的时间差，是一个随反射系数在一个范围内变化的任意值，并不代表入射电磁场传播的速度，和光速比较十分不恰当。

在全反射的情况下，对于传播距离上的两点，驻波同相位的时间差等于零，这时用时间差计算的“电场速度”是无穷大，是没有意义的。在非全反射情况下，其两点的相位差和时间差受驻波分量和入射波分量的影响，其比例由反射系数大小而定。在此文讨论的实验条件下，当负载阻抗远高于或低于传输线特征阻抗时，反射系数会变化，而反射系数的相位会减小或增加，而测量到的合成波在两点间或长短线之间的时间差会增加或减小，不但可以比理论值低，还可以是负值或者超过理论值。需要强调的是，这些现象在一定条件下，对所有频率的电磁场波都适合，包括光波和低频电场(当距离和波长之比达到一定数值时，比如 1% [4])。

我们用实验数据证明在反射大大减小的情况下，测量到的时间差符合经典的电磁场理论。我们的大量实验数据也证明：在有反射情况下，时间差可以减小也可以增大，这也符合经典电磁场理论。而这种时间差的减小并不是只有用裸铜线或低于 6 兆赫兹时才有。这是因为反射引入相位移动，而相位移动而造成合成波形移位，从而造成同相位时间差的移动，但本质是反射引入的相位移动的结果，不反映入射波的传播速度。用一个随反射系数而变化的随机值去计算传播速度至少是不合适的。

我们的实验证明了这种时间差的减小对裸铜线和同轴电缆的效应是同样的。而且在用裸铜线和同轴电缆做长短线的实验中，我们明确地显示了由于两种不同的反射系数对时间差的影响不同，使得时间差既可以是负值，也可以高于理论值。

裸铜线的空间布线也影响结果，因此用无阻抗匹配的裸铜线的测量结果在一定的范围内是随机的。对某种实验设置，使用不同的负载阻抗，我们可以控制时间差低于或高于理论时间差。明显的，用那些阻抗没有匹配下测量的一个在很大范围里的随机时间差去计算电场传播速度，会得到文章[1] [2]的经不起推敲的超光速的错误结论。

在用长短线的实验中，不一样的反射系数对时间差的影响不一样。这种由于反射系数而引起的一个固定的相位差，换算成的时间差随频率下降而变化增加。这是为什么反射引起的时间差的对低频更明显的原因之一。

在没有阻抗匹配的实验中，对几兆赫兹信号，测量到幅值大大超过信号源输出电压幅值，非常明显的不能否定的反射现象。

所有的没有阻抗匹配的实验结果，基本上可以在各种不同的频率复制，只要传输线长度和波长的比例保持加上反射系数的保持。即和频率无关也和裸铜线无关。

此文所阐述的观点和我们多年用几十 kHz 到几个 GHz 电磁波用于各种应用测量相位的经验一致(相控阵天线，减低反射和干扰的电路设计，超声激励定量剪切波弹黏性测量，精确测距仪，材料特性测试仪，光纤骆驼干涉仪，软组织测量医疗仪器设计，等等)。否则，在有反射情况下，错误地用时间差进行运算，会导致很多常用仪器产生严重的测量偏差。另外，按文章[1] [2]测量的超光速 20 倍的电场速度，几兆赫频率范围的脉冲数字电路的方波会因为几兆赫频率(2 MHz 到 8 MHz)相速度的几十倍的不同而造成

不可想象的频率发散, 这和常识及实践事实严重不符合。

关于电磁场传播速度包括光速和超光速有关的探讨, 我们抱以开放态度。此文第一作者和其他科研者合作, 多年来致力于探讨光速在运动物体上的规律, 所发现的光速在包括有直线匀速运动的载体回路上的变化规律在《物理快报》等期刊上报道过[7] [8]。虽然我们否定文章[1] [2]的结论, 我们对这两篇文章的作者们敢于探讨的精神致以尊重和敬意。但因为是科学问题, 特别重大的科学结论应该建立在坚实的理论和各种实验验证的基础之上, 应该经得起任何可靠实验结果的反复验证和推敲。很不幸, [1] [2]文章的结论无法符合实验结果以及理论的推敲和验证。在和两文章的作者们多次沟通和交流之后, 我们应[1] [2]文章的第一作者的要求而写出此文章来仔细阐明我们的观点。

6. 结论

理论和实验证明: 1) 当阻抗匹配时, 从 2 MHz 到 8 MHz, 电场通过裸铜线和同轴电缆的传播速度和经典电磁场理论值计算符合。2) 当阻抗不匹配时, 由于反射波和发射系数引起的相位移动, 测量到时间差可以比理论值高或低甚至是负数, 是在很大范围里一个任意值或随机值(按实验设置)。这即不代表入射波的在两点之间传播的时间差, 也不代表波在两条不同长短传输线里传播的时间差, 不能用于计算电场传播相速度, 更不能用来和没有考虑反射的光在自由空间里传播的相速度比较。3) 《导线中交流电场时间延迟的测定》和《交变电场速度测量的物理原理》两文章中关于几兆赫兹的电场速度超光相速度 20 倍的结论是错误的。

致 谢

感谢张操先生鼓励我们撰写和发表此文章。

参考文献 (References)

- [1] 张操, 廖康佳, 樊京 (2015) 导线中交流电场时间延迟的测定. *现代物理*, **5**, 29-34.
- [2] 张操, 廖康佳 (2015) 交变电场速度测量的物理原理. *现代物理*, **5**, 35-39.
- [3] Shen, L.C. and Kong, J.A. (1995) *Applied electromagnetism*. 3rd Edition, PWS Publishing Company, Boston.
- [4] Ulaby, F.T., Michielssen, E. and Ravaioli, U. (2010) *Fundamentals of applied electromagnetics*, 6/E. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [5] Calculating the propagation delay of coaxial cable. <http://www.gpssource.com/files/Cable-Delay-FAQ.pdf>
- [6] Round wire inductance calculator. <http://chemandy.com/calculators/round-wire-inductance-calculator.htm>
- [7] Wang, R., Zheng, Y. and Yao, Y. (2004) Generalized Sagnac effect. *Physical Review Letters*, **93**, Article ID: 143901. <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.93.143901>
- [8] Wang, R.Y., Zheng, Y., Yao, A.P. and Langley, D. (2003) Modified Sagnac experiment for measuring travel-time difference between counter-propagating light beams in a uniformly moving fiber. *Physics Letters A*, **312**, 7-10. [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601\(03\)00575-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601(03)00575-9)