

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCUREȘTI
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ

LABORATORUL DE OPTICĂ
BN - 121

VITEZA LUMINII

MĂSURAREA VITEZEI LUMINII ÎN AER CU
AJUTORUL UNUI SEMNAL LUMINOS PERIODIC

Viteza luminii

Măsurarea vitezei luminii în aer cu ajutorul unui semnal luminos periodic

Scopul lucrării

- Măsurarea diferenței de fază $\Delta\varphi$ a unui semnal luminos datorată unui drum Δs .
- Determinarea vitezei luminii c .

Principiul experimentului

Un semnal luminos periodic având intensitatea variabilă periodic în timp

$$I = I_0 + \Delta I_0 \cos(2\pi\nu t) \quad (1.1)$$

poate fi utilizat pentru măsurarea vitezei luminii. Semnalul luminos este măsurat folosind un receptor (detector) care îl transformă într-o tensiune alternativă a cărei comportare în timp este descrisă de relația

$$U = U_0 \cos(2\pi\nu t). \quad (1.2)$$

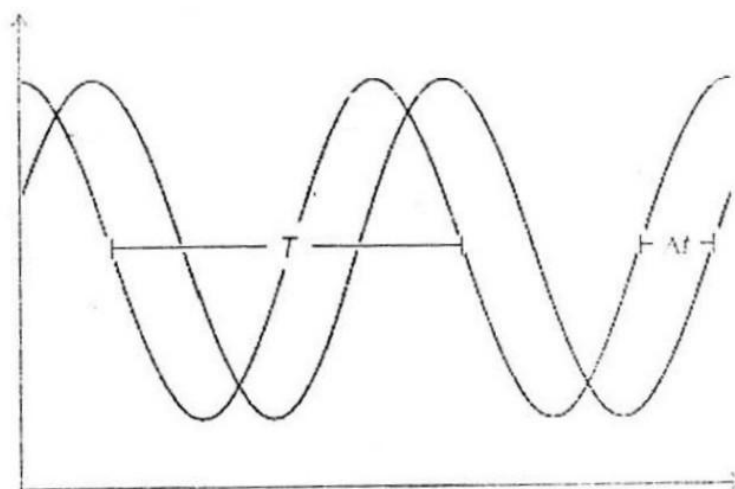


Figura 1 Semnalul de referință (al transmițerului) și semnalul defazat al detectorului

Dacă receptorul este plasat la distanța Δs de emițătorul de lumină (transmițer), atunci se introduce o întârziere Δt

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \quad (1.3)$$

a semnalului pe drumul de lungime Δs și, corespunzător, o diferență de fază $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = 2\pi\nu \cdot \Delta t = 2\pi \frac{\Delta s}{\lambda} \quad (1.4)$$

unde ν este frecvența de modulație a semnalului luminos iar T este perioada corespunzătoare. Cu excepția unor posibile pierderi în intensitate, receptorul măsoară un semnal a cărei fază prezintă o întârziere $\Delta\varphi$.

$$U = U_0 \cos(2\pi\nu t - \Delta\varphi). \quad (1.5)$$

Folosind relațiile (1.3) și (1.4), se determină viteza de propagare a luminii în mediul în care lumina parcurge diferența de drum Δs , și anume

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta\varphi} \cdot 2\pi\nu. \quad (1.6)$$

Dacă frecvența de modulație este foarte înaltă, atunci pe distanțe Δs scurte se pot obține defazaje $\Delta\varphi$ considerabile. În acest experiment, frecvența de modulație ν este de 60 MHz. Ca urmare, o diferență de drum de 5 m introduce un defazăj

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \text{ s} \cdot \frac{5 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2\pi \text{ radiani.}$$

Totuși, frecvența înaltă face ca semnalul recepționat să fie dificil de afișat pe un osciloscop. Deoarece în acest experiment se va utiliza un osciloscop simplu pentru măsurarea defazăjului $\Delta\varphi$, semnalul receptorului va fi mixat (multiplicat) electronic cu un semnal de frecvență $\nu' = 59.9 \text{ MHz}$. Folosind identitatea trigonometrică

$$\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)] \quad (1.7)$$

rezultă că semnalul mixat

$$U = U_0 \cos(2\pi\nu t - \Delta\varphi) \cos(2\pi\nu' t) \quad (1.8)$$

poate fi reprezentat ca suma a două semnale, unul cu frecvența $\nu + \nu'$ iar celălalt cu frecvența $\nu_1 = \nu - \nu'$.

Componenta de frecvență înaltă $\nu + \nu'$ este suprimată folosind un filtru “trece jos”. În felul acesta semnalul receptorului va fi simplu, de forma

$$U_1 = \frac{1}{2} U_0 \cos(2\pi\nu_1 t - \Delta\varphi). \quad (1.9)$$

Acesta poate fi afișat cu un osciloscop simplu, deoarece frecvența sa, ν_1 , este de numai 100 kHz. **Operațiunea de mixaj electronic nu a afectat defazăjul $\Delta\varphi$, dar acum acesta corespunde unui timp de propagare aparent Δt_1 .** De asemenea, perioada T_1 a semnalului mixat se citește pe osciloscop, iar deplasarea de fază poate fi calculată cu relația

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (1.10)$$

Timpul real de propagare a semnalului luminos pe distanța Δs se calculează din egalitatea $\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t_1}{T_1}$, ca fiind

$$\Delta t = \Delta t_1 \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{\nu T_1} = \underbrace{\Delta t_1}_{\text{citit între markere}} \cdot \frac{\nu_1}{\nu} = \frac{\Delta t_1}{600} \quad (1.11)$$

($\nu = 60 \text{ MHz}$; $\nu_1 = 100 \text{ kHz}$) $\Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta t_1(\text{osciloscop})}{600}$.

Folosind relația (1.11), obținem formula finală de calcul a vitezei luminii în mediul de propagare (în cazul de față, aer):

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot \frac{T_1}{T} = \frac{\Delta S}{\Delta t_1} \cdot T_1 \cdot v = 600 \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (1.12)$$

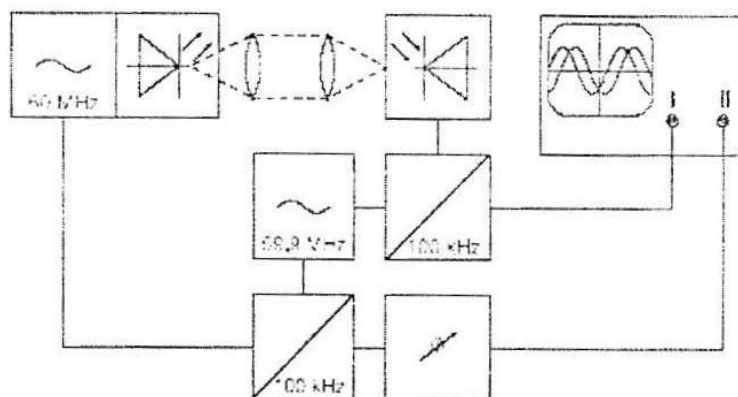


Figura 2 Diagrama bloc care ilustrează măsurarea vitezei luminii

Pentru determinarea exactă a diferenței de fază $\Delta\varphi$, în acest experiment aveți la dispoziție un semnal de referință. Acesta este sincronizat cu semnalul emițătorului (transmiterului). Semnalul de referință este mixat cu același semnal de 59.9 MHz și filtrat în același mod ca semnalul receptorului. Deoarece timpii de propagare ai semnalelor în conductoarele de legătură și în dispozitivul experimental nu pot fi neglijați, transmiterul de lumină este plasat mai întâi la distanța s față de receptor. În acest aranjament, semnalul de referință este sincronizat electronic cu semnalul receptorului. Apoi transmiterul este plasat la distanța $\Delta s = s + (1 \text{ m})$ față de receptor. Defazajul care poate fi observat în această situație corespunde timpului de propagare Δt .

Dispozitivul experimental

Dispozitivul experimental este alcătuit din următoarele elemente:

- Emițător (transmiter) și receptor de lumină
- Lentilă convergentă ($f = 15 \text{ cm}$)
- Suporturi pentru transmiter și lentilă
- Osciloscop cu două canale
- Riglă gradată cu lungimea de 1 m

Dispozitivul experimental este prezentat în figurile 3 și 4.

Modul de lucru

Experimentul se desfășoară în trei etape: **a)** asamblarea și alinierea dispozitivului experimental. **b)** sincronizarea semnalelor și **c)** măsurarea timpului de propagare aparent (implicit, defazajul).

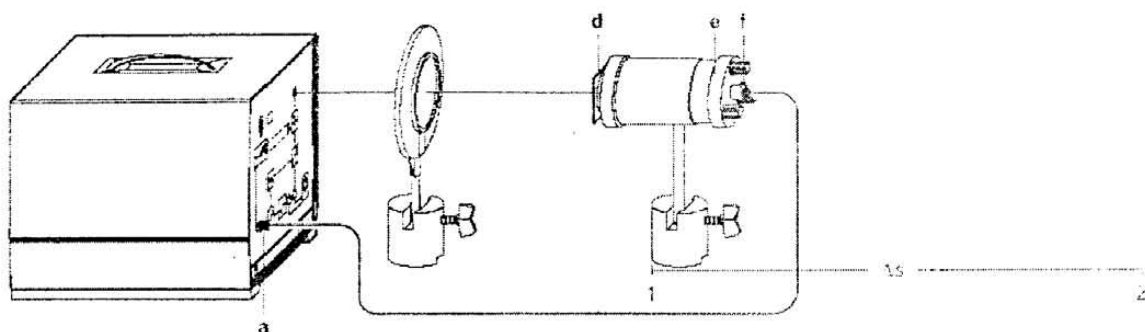


Figura 3 Dispozitivul optic pentru determinarea vitezei luminii cu ajutorul unui semnal luminos periodic

a) Asamblarea și alinierea dispozitivului experimental

- Plasați transmițerul la distanța de aproximativ 1m față de receptor. conectați-l la borna de ieșire (a) a receptorului folosind un cablu coaxial de 6m lungime și porniți receptorul.
- Lumina roșie de la transmițer, necolimată, este îndreptată către fanta de intrare a receptorului. Deplasați insertul (e) față de condensorul (d), astfel încât pata de lumină roșie de pe receptor să prezinte o distribuție cât mai uniformă a intensității luminoase.

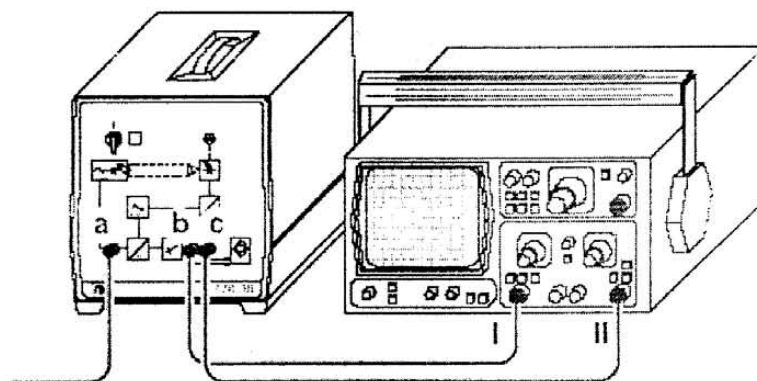


Figura 4 Conectarea osciloscopului pentru măsurarea defazajului

- Reduceți distanța dintre transmițer și receptor la 50 cm și plasați lentila în calea razelor de lumină.
- Aliniați transmițerul și lentila astfel încât lumina de la sursă să cada pe fanta de intrare a receptorului. Dacă este necesar, optimizați alinierea folosind șuruburile (f) – vezi figura 4.
- Conectați borna de ieșire (c) a receptorului la canalul II al osciloscopului. Setările osciloscopului:

Coupling of channel II (cuplaj al canalului II): AC (curent alternativ)

Trigger (triger): channel II (canalul II)

Time base (baza de timp): $2\mu\text{s}/\text{DIV}$

- Observați semnalul receptorului pe osciloscop și optimizați încă o dată alinierea transmițerului cu lentila. Dacă semnalul este distorsionat datorită unei intensități incidente prea mari, realizați o ușoară defocalizare a fascicului luminos prin deplasarea lentilei.
- Marcați pe masa de lucru poziția transmițerului, obținută în urma procedurii de aliniere descrisă mai sus, drept poziția 1.
- Deplasați transmițerul de-a lungul axei optice a dispozitivului experimental pe o distanță $\Delta s = 1\text{m}$. verificați alinierea și marcați această poziție drept poziția 2.

Observație: Rezultatele se obțin cu o precizie mulțumitoare dacă transmițerul și receptorul sunt termic stabile. Începeți experimentul numai după o jumătate de oră de la pornirea celor două dispozitive.

b) Sincronizarea fazelor pentru semnalul de referință și semnalul receptorului (se face cu transmițerul în poziția 2)

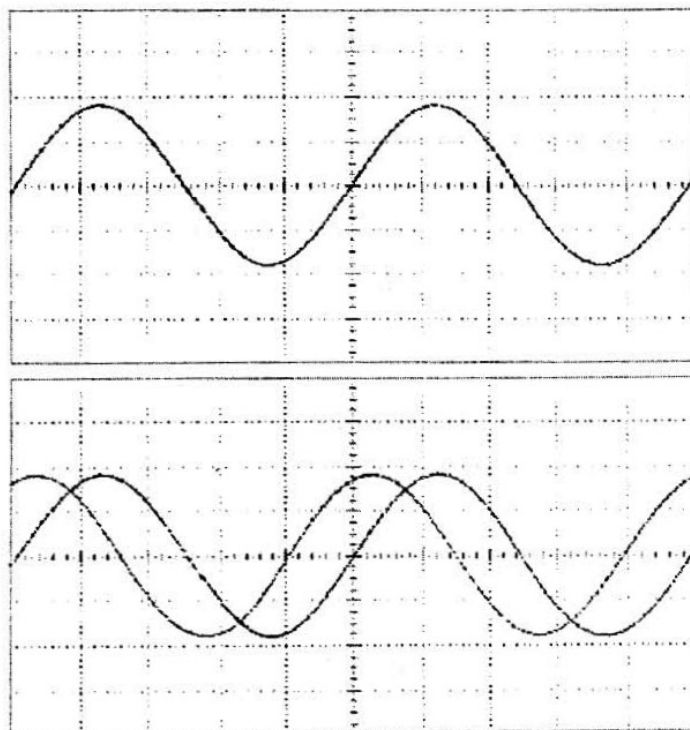


Figura 5 Semnalul de referință și semnalul receptorului pentru pozițiile 1 (desupra) și 2 (dedesupt) pentru $\Delta s = 100\text{cm}$, baza de timp $2\mu\text{s}/\text{DIV}$.

- Conectați borna de ieșire (b) a receptorului la canalul I al osciloscopului și observați *simultan* canalul I (semnalul de referință) și canalul II (semnalul receptorului). Setările osciloscopului:
Coupling of channel I and II AC
(cuplaj al canalelor I și II): (curent alternativ)
Trigger (triger): channel I (canalul I)
Time base (baza de timp): 2μs/DIV
- Reglați pozițiile verticale ale reprezentărilor canalelor I și II, astfel încât acestea să fie cât mai simetrice cu putință față de linia orizontală de centru a ecranului.
- Folosind controlul de reglare fină a poziției verticale, faceți ca maximele ambelor semnale să atingă aceeași linie orizontală (vezi figura 5).
- Folosind defazorul ϕ reglați cele două semnale să fie cât mai în fază cu putință.
- Alegând poziția orizontală convenabilă a semnalelor, măsurați perioada T_1 .

c) Măsurarea fazei prin intermediul timpului de propagare aparent

- Deplasați transmițerul înapoi la poziția I și observați cele două semnale.
- Setati baza de timp la 0.5μs/DIV, deplasați zeroul semnalului de referință exact până la axa centrală verticală și determinați timpul de propagare aparent Δt_1 .
- Deplasați transmițerul înainte și înapoi de 5 – 10 ori pentru a putea face calculul erorilor

Observație: Deoarece frecvența de modulație $\nu = 60\text{MHz}$ este fixată printr-un dispozitiv cu cuarț, ea nu mai este necesar să fie măsurată.

Prelucrarea datelor experimentale

Viteza de propagare a luminii în aer se calculează introducând valorile măsurate pentru Δs , T_1 și Δt_1 în relația (1.12). Se dă rezultatul sub forma

$$c = \bar{c} \pm \sigma_{\bar{c}} \quad (1.13)$$

unde

$$\bar{c} = \frac{\Delta \bar{s}}{\Delta \bar{t}_1} \cdot \bar{T}_1 \cdot \nu \quad (1.14)$$

($\Delta \bar{s} = 1\text{m}$, simbolurile cu bară deasupra reprezintă valorile medii ale rezultatelor experimentale). Eroarea $\sigma_{\bar{c}}$ se calculează cu formula de propagare a erorilor.