

Détermination de la vitesse de la lumière avec un signal lumineux périodique sur une courte section de mesure

Objectifs expérimentaux

- Mesure du déphasage $\Delta\varphi$ d'un signal lumineux périodique sur une section de mesure Δs .
- Détermination de la vitesse de la lumière c dans l'air.

Notions de base

Un signal lumineux périodique d'intensité subordonnée au temps

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

convient parfaitement pour la mesure de la vitesse de la lumière c . On mesure le signal lumineux avec un récepteur qui le convertit en une tension alternative de la forme

$$U = a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t) \quad (II)$$

Si le récepteur est à une distance Δs de l'émetteur de lumière, le retard

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

pris par le signal lumineux sur la section Δs se traduit par un déphasage

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \nu \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (IV).$$

ν : fréquence de modulation
 T : période

Le récepteur mesure – hormis d'éventuelles pertes d'intensité – le signal déphasé

$$U = a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t - \Delta\varphi) \quad (V).$$

Les équations (III) et (IV) donnent pour la vitesse de la lumière l'équation déterminative

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

Si on choisit une très grande fréquence de modulation, on obtient des déphasages $\Delta\varphi$ nets sur des sections de mesure Δs courtes. Dans l'expérience, on a $\nu = 60$ MHz et donc $\Delta s = 5$ m correspond à un déphasage d'une pleine période.

La fréquence élevée complique néanmoins la représentation du signal de réception sur un oscilloscope. Etant donné que l'oscilloscope à utiliser pour la détermination du déphasage doit être simple, le signal de réception est combiné (multiplié) électroniquement à un signal de fréquence $\nu' = 59,9$ MHz. Le signal combiné

$$U = a \cdot \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t - \Delta\varphi) \cdot \cos(2\pi \cdot \nu' \cdot t) \quad (VII).$$

peut être représenté – ainsi qu'il s'ensuit du théorème d'addition

$$\cos \alpha \cdot \cos \alpha' = \frac{1}{2} \cdot (\cos(\alpha + \alpha') + \cos(\alpha - \alpha'))$$

comme étant la somme d'un signal avec la fréquence somme $\nu + \nu'$ et d'un signal avec la fréquence différentielle $\nu_1 = \nu - \nu'$. La composante haute fréquence est supprimée par un filtre passe-bas. Il reste par conséquent comme signal de réception la composante

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

Ce signal peut être représenté avec un oscilloscope simple étant donné que la fréquence ν_1 ne vaut que 100 kHz. Le déphasage $\Delta\varphi$ n'a pas changé suite au mixage, mais il correspond maintenant à un *temps de propagation apparent* Δt_1 . Sur l'oscilloscope, on relève en supplément la période T_1 du signal combiné et on calcule

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

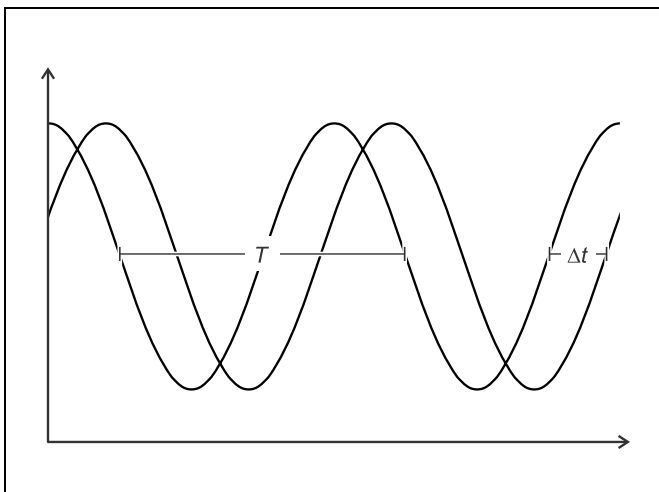


Fig. 1 Déphasage d'un signal lumineux périodique

Matériel

1 émetteur et récepteur de lumière	476 30
1 lentille f = + 150 mm	460 08
2 socles	300 11
1 oscilloscope à deux canaux 1004	575 221
1 règle métallique, 1 m	311 02

Pour le *temps de propagation réel* Δt du signal lumineux sur la section de mesure Δs , on a d'après les formulations (IV) et (IX) l'équation

$$\Delta t = \Delta t_1 \cdot \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{T_1 \cdot v} \quad (X)$$

qui permet d'obtenir pour la vitesse de la lumière l'équation déterminative suivante:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot \frac{T_1}{T} = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot T_1 \cdot v \quad (XI)$$

Pour la détermination exacte du déphasage $\Delta\phi$, on dispose pour l'expérience d'un signal de référence qui oscille en synchronisme avec l'intensité de l'émetteur de lumière. Il est combiné et filtré avec le même signal de 59,9 MHz que le signal de réception (voir fig. 2). Comme les temps de propagation du

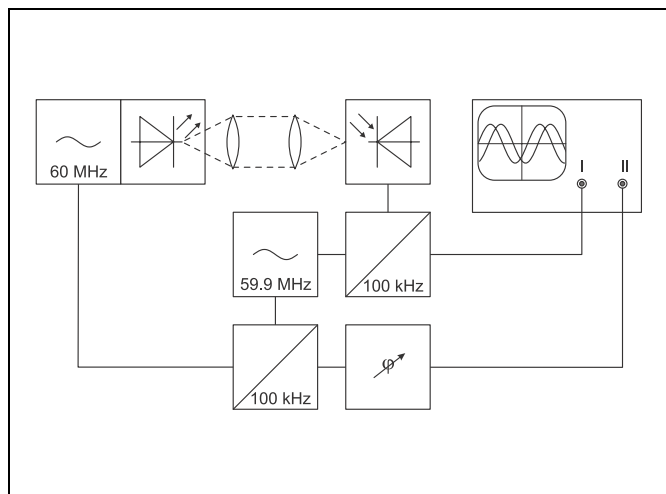


Fig. 2 Schéma fonctionnel pour la mesure de la vitesse de la lumière

signal dans les câbles de connexion et l'alimentation ne peuvent pas être négligés, on commence par placer l'émetteur de lumière à une distance s du récepteur. Avec cette disposition, le signal de référence est amené à coïncider avec le signal de réception par un déphasage électronique. Pour finir, on déplace l'émetteur de lumière par rapport au récepteur de la section de mesure $\Delta s = 1$ m. Le déphasage $\Delta\phi$ observable maintenant entre les signaux est imputable au temps de propagation Δt du signal lumineux.

Montage

Le montage expérimental est représenté sur les fig. 3 et 4.

- Installer dans un premier temps l'émetteur de lumière à env. 1 m du récepteur, le brancher à la sortie (a) du récepteur à l'aide d'un câble coaxial de 6 m de long puis mettre le récepteur en route.
 - Représenter le spot lumineux rouge de l'émetteur de lumière sur la plaque avant du récepteur et régler la pièce (e) par rapport au condenseur (d) de manière à ce que le spot lumineux rouge soit éclairé le plus uniformément possible.
 - Réduire la distance entre l'émetteur et le récepteur de lumière à 50 cm puis disposer une lentille dans la marche des rayons.
 - Orienter l'émetteur de lumière et la lentille de manière à ce que le spot lumineux rouge incide sur l'orifice d'entrée du récepteur; si besoin est, optimiser l'orientation de l'émetteur de lumière avec les vis moletées (f).
 - Brancher la sortie (c) du récepteur au canal II de l'oscilloscope.
- Réglages de l'oscilloscope:
 Couplage canal II: CA
 Déclenchement canal II
 Base de temps: 2 μ s/DIV
- Observer le signal de réception sur l'oscilloscope en continuant d'optimiser l'orientation de l'émetteur de lumière et de la lentille.

Si le signal de réception est déformé par surmodulation:

- Légèrement défocaliser le faisceau lumineux en déplaçant la lentille.
- Marquer sur la table la position de l'émetteur de lumière comme étant la position 1.
- Déplacer l'émetteur de lumière le long de l'axe optique de $\Delta s = 100$ cm, vérifier l'orientation de l'émetteur de lumière et également marquer la deuxième position.

Réalisation

Note:

Une précision satisfaisante du résultat ne peut être obtenue qu'en cas de stabilité thermique de l'émetteur et du récepteur de lumière: ne commencer la procédure expérimentale qu'à condition que l'émetteur et le récepteur de lumière soient enclenchés depuis une demi-heure.

Ajustement de phase entre le signal de référence et le signal de réception:

- Brancher la sortie (b) du récepteur au canal I de l'oscilloscope puis observer simultanément les canaux I (signal de référence) et II (signal de réception).

Réglages de l'oscilloscope:

Couplage canal I et canal II: CA
 Déclenchement: canal I
 Base de temps: 2 μ s/DIV

- Régler les positions verticales des canaux I et II de manière à ce que les deux signaux soient aussi symétriques que possible de part et d'autre de la ligne horizontale médiane de l'écran.

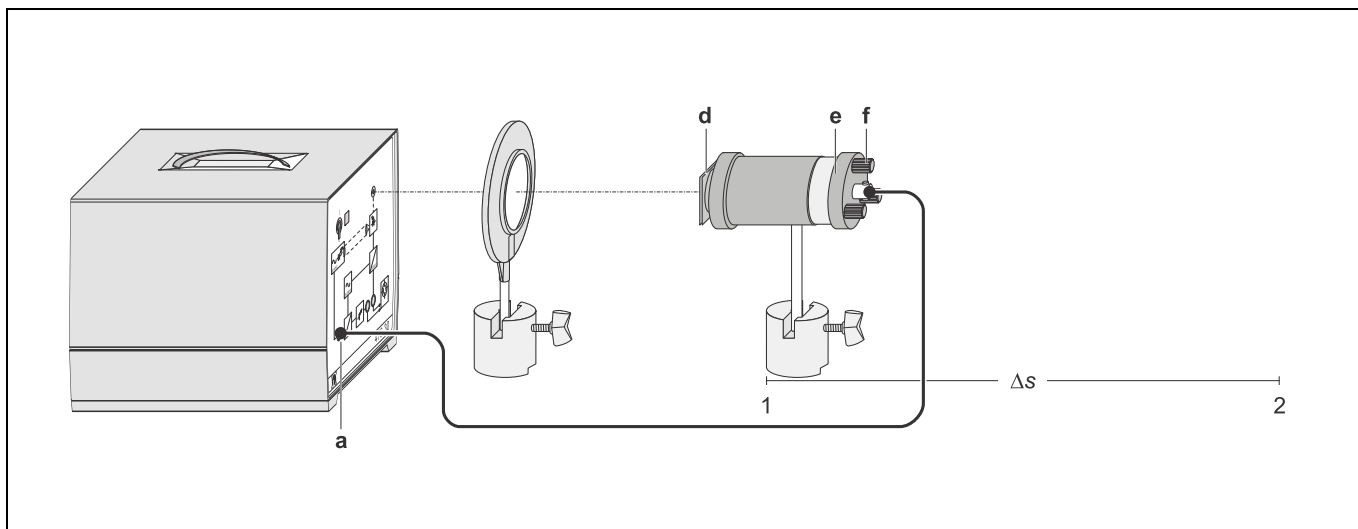


Fig. 3 Montage optique pour la détermination de la vitesse de la lumière avec un signal lumineux périodique.

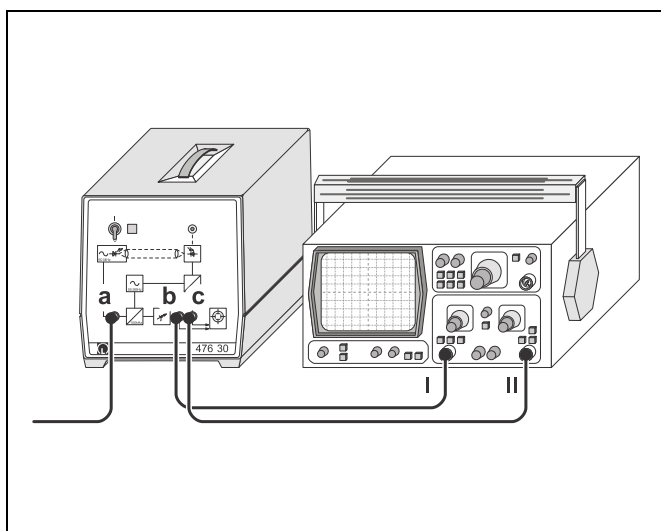


Fig. 4 Branchement de l'oscilloscope pour la mesure du déphasage du signal lumineux périodique.

- Pour la vérification, régler (utiliser le dispositif de réglage précis) les déviations verticales de manière à ce que les maxima des deux signaux soient le plus possible sur une ligne horizontale (et ce, sur la même ligne horizontale).
- Utiliser le déphaseur φ du récepteur pour faire coïncider les deux signaux le mieux possible.
- Sélectionner une position horizontale appropriée des signaux et déterminer la période T_1 .

Détermination du déphasage $\Delta\varphi$:

- Ramener l'émetteur de lumière à la position 1 et observer les deux signaux.
- Régler une base de temps $0,5 \mu\text{s}/\text{DIV}$, amener le passage à zéro du signal de référence le plus possible sur la ligne verticale médiane et déterminer le *temps de propagation apparent* Δt_1 .
- Eventuellement déplacer l'émetteur de lumière en lui faisant faire plusieurs va-et-vient puis déterminer la moyenne des valeurs Δt_1 mesurées à chaque fois.

Exemple de mesure

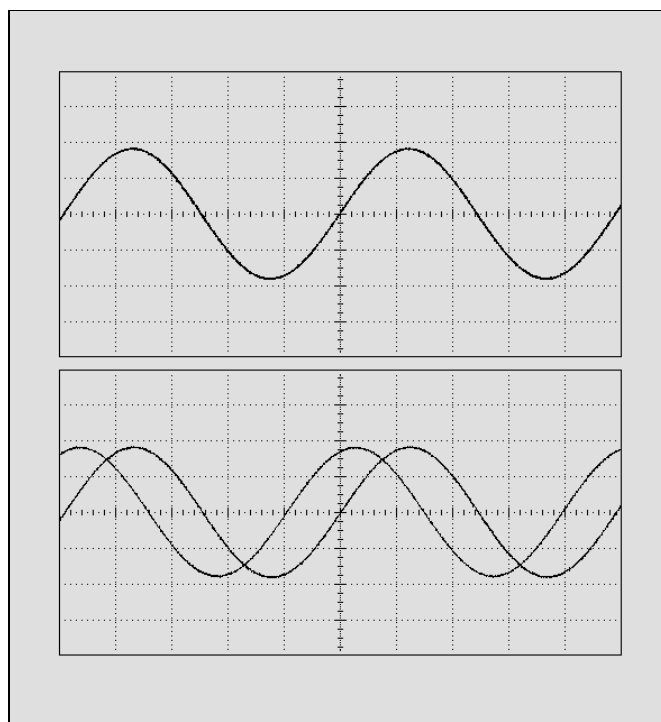


Fig. 5 Signal de référence et signal de réception pour la position 1 de l'émetteur de lumière (en haut) et sa position 2 (en bas), $\Delta s = 100 \text{ cm}$, déviation horizontale $2 \mu\text{s}/\text{DIV}$.

$$\Delta s = (100 \pm 1) \text{ cm}$$

$$\Delta t_1 = (3,9 \pm 0,1) \text{ DIV} \cdot 0,5 \mu\text{s}/\text{DIV} = (1,95 \pm 0,05) \mu\text{s}$$

$$T_1 = (4,90 \pm 0,05) \text{ DIV} \cdot 2 \mu\text{s}/\text{DIV} = (9,8 \pm 0,1) \mu\text{s}$$

Comme la fréquence de modulation $\nu = 60 \text{ MHz}$ est cadencée par un quartz, sa mesure n'est pas nécessaire.

Exploitation

On utilise la formulation (X) pour calculer le temps de propagation du signal lumineux sur la section $\Delta s = 1$ m:

$$\Delta t = (3,32 \pm 0,09) \text{ ns}$$

D'après (XI), on obtient pour la vitesse de la lumière

$$c = (3,02 \pm 0,09) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valeurs littéraires:

Vitesse de la lumière dans le vide:

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Vitesse de la lumière dans l'air:

$$c = \frac{c_0}{n} = 2,997 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(Indice de réfraction $n = 1,003$ dans des conditions normales de référence)

Résultat

Pour un signal lumineux périodique, le temps de propagation fini de la lumière sur une section de mesure se traduit par un déphasage. Il est possible de déterminer la vitesse de la lumière d'après le déphasage et la section de mesure, la période et la fréquence du signal lumineux étant connues.