## عنوان آزمایش:

تعیین سرعت نور با سیگنال نوری متناوب در فواصل کوتاه.

## اهداف آزمایش:

۱- اندازه‌گیری شیفت فازی $\Delta\varphi$ سیگنال نوری متناوب روی مسیر $\Delta S$؛

۲- تعیین سرعت نور، $C$.

## وسایل موردنیاز آزمایش:

۱- گیرنده و فرستنده نور؛

۲- عدسی f=+۱۵۰ mm؛

۳- اسیلوسکوپ دو کاناله؛

۴- خط‌کش فلزی یک متری (بهتر است از ریل ۱ m استفاده کنید).

## تئوری آزمایش:

یک سیگنال نوری متناوب با شدت وابسته به زمان

$$I = I_0 + \Delta I_0 . \cos\left(2\pi . \upsilon . t\right) \qquad (۱)$$

برای تعیین سرعت نور، C، بسیار مناسب است.

سیگنال نور با یک گیرنده اندازه‌گیری می‌شود که سیگنال را به ولتاژ متناوب با رفتار زمانی رابطه (۲) تبدیل می‌کند.

$$U = a . \cos\left(2\pi . \upsilon . t\right) \qquad (۲)$$

اگر گیرنده در فاصله $\Delta S$ از فرستنده نور باشد، تأخیر زمانی چنین به‌دست می‌آید:

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{C} \qquad (۳)$$

که این تأخیر زمانی در امتداد مسیر $\Delta S$ منجر به شیفت فازی، $\Delta\varphi$، می‌شود:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \upsilon \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T} \qquad (۴)$$

$\upsilon$ = فرکانس مدولاسیون

زمان تناوب=T

مستثنی از تلفات شدت احتمالی، گیرنده سیگنال دارای شیفت فازی[1] را اندازه‌گیری می‌کند.

$$U = a.\cos\left(2\pi.\upsilon.t - \Delta\varphi\right) \qquad (۵)$$

از رابطه (۳) و (۴)، معادله زیر، که سرعت نور را تعیین می‌کند، به‌دست می‌آید:

$$C = \frac{\Delta S}{\Delta\varphi}.2\pi.\upsilon \qquad (۶)$$

اگر فرکانس مدولاسیون خیلی بالا باشد، شیفت‌های فازی قابل‌ملاحظه‌ای، $\Delta\varphi$، در مسیرهای کوتاه، $\Delta S$، به‌دست می‌آید. در آزمایش، $\upsilon$ برابر ۶۰ MHz است، بنابراین طول مسیر $\Delta S$=۵ m متناظر با شیفت فازی با یک تناوب کامل است. هرچند، فرکانس بالا نمایش سیگنال گیرنده به‌وسیله اسیلوسکوپ را بسیار دشوار می‌کند. ازآنجاکه یک اسیلوسکوپ ساده برای تعیین شیفت فازی مورداستفاده قرار خواهد گرفت، سیگنال گیرنده به‌صورت الکترونیکی با یک سیگنال با فرکانس $\upsilon'$ =۵۹/۹ MHz مخلوط (ضرب) می‌شود. از فرمول جمع

$$\cos\alpha.\cos\alpha' = \frac{1}{2}.\left(\cos\left(\alpha+\alpha'\right)+\cos\left(\alpha-\alpha'\right)\right) \qquad (۷)$$

به این ترتیب، سیگنال مخلوط

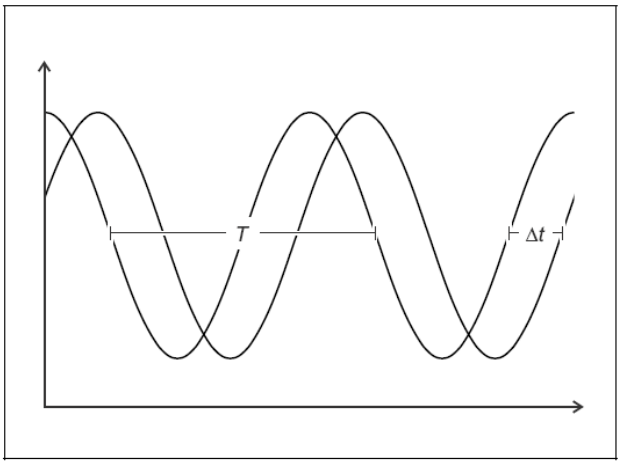
$$U = a.\cos\left(2\pi.\upsilon.t - \Delta\varphi\right).\cos\left(2\pi.\upsilon'.t\right) \qquad (۸)$$

می‌تواند به‌صورت حاصل‌جمع دو سیگنال، یکی با فرکانس $\upsilon+\upsilon'$ و دیگری با فرکانس تفاضل، $\upsilon_1 = \upsilon - \upsilon'$ بیان شود. بخش فرکانس بالا با یک فیلتر پایین‌گذر[2] متوقف می‌شود:

$$U_1 = \frac{1}{2}.a.\cos\left(2\pi.\upsilon_1.t - \Delta\varphi\right) \qquad (۹)$$

به‌عنوان سیگنال گیرنده باقی می‌ماند. این سیگنال از آنجاکه فرکانس فقط ۱۰۰ KHz است، می‌تواند نمایش داده شود. شیفت فازی $\Delta\varphi$ با این اختلاط تغییر نخواهد کرد، ولی حالا متناظر با زمان انتشار آشکار[3]، $\Delta t_1$، است. زمان تناوب $T_1$ سیگنال مخلوط‌شده نیز به‌وسیله اسیلوسکوپ خوانده می‌شود و شیفت فازی می‌تواند محاسبه شود (شکل (۱)):

1- Phase- Shifted signal
2- Low-pass filter
3 - Apparent propagation time




**شکل (۱):شیفت فازی یک سیگنال نوری متناوب.**

برای زمان واقعی انتشار[1]، $\Delta t$، سیگنال نور در امتداد مسیر $\Delta S$

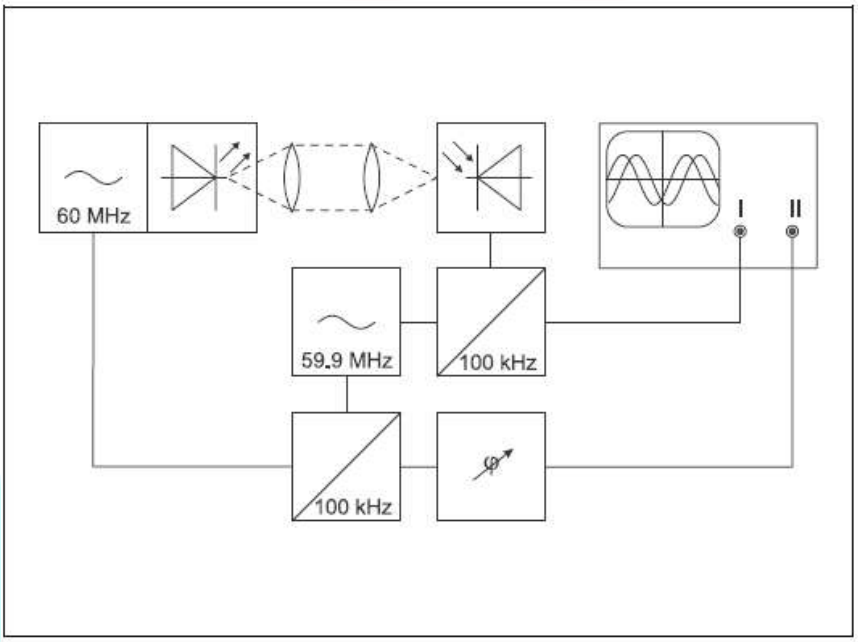
$$\Delta t = \Delta t_1 . \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{T_1 . \upsilon} \qquad (۱۱)$$

ازمعادلات (۵) و (۱۰) به‌دست می‌آید و این معادله منجر به معادله‌ای می‌شود که سرعت نور به‌وسیله آن تعیین می‌شود.

$$C = \frac{\Delta S}{\Delta t_1} . \frac{T_1}{T} = \frac{\Delta S}{\Delta t_1} . T_1 . \upsilon \qquad (۱۲)$$

برای تعیین دقیق شیفت فازی $\Delta\varphi$، یک سیگنال مرجع در آزمایش وجود دارد. این سیگنال با شدت فرستنده نور همگام می‌شود. این سیگنال با سیگنال ۵۹/۹ MHz یکسان مخلوط می‌شود و به روش مشابه سیگنال گیرنده فیلتر می‌شود (به شکل (۲) مراجعه کنید).

1 - Actual propagation time



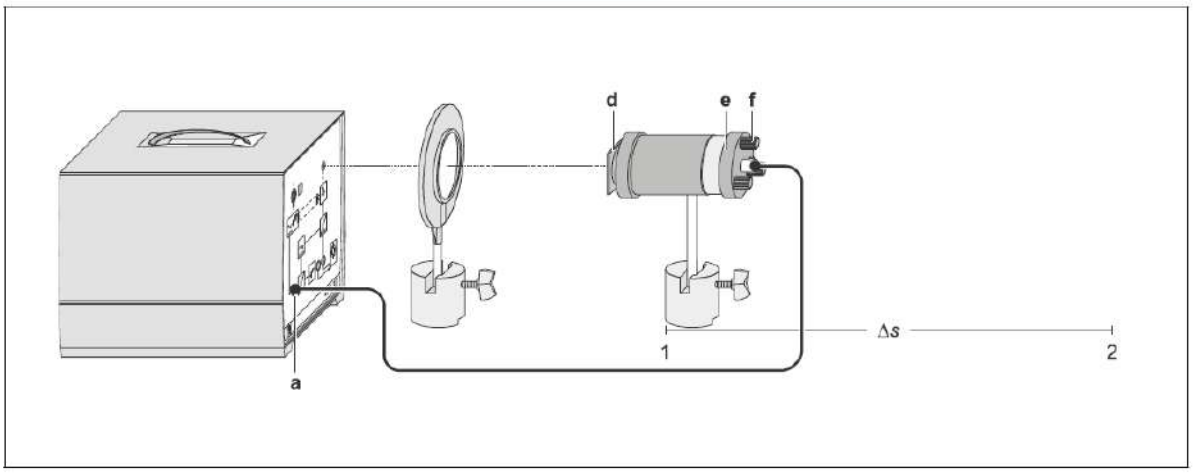

**شکل (۲): بلوک دیاگرام نمایش‌دهنده اندازه‌گیری شدت نور**

ازآنجاکه از زمان‌های انتشار سیگنال‌ها در سیم‌های اتصال و در دستگاه نمی‌تواند اغماض شود، فرستنده نور در ابتدا در فاصله S از گیرنده تنظیم می‌شود. در این تنظیم، سیگنال مرجع به‌وسیله یک شیفت فازی الکترونیکی با سیگنال گیرنده همگام می‌شود. سپس، فرستنده نور به طول مسیر، $\Delta S = ۱\ \mathrm{m}$، از گیرنده دور می‌شود. شیفت فازی $\Delta\varphi$ که حالا مشاهده می‌شود، ناشی از زمان انتشار $\Delta t$ است.

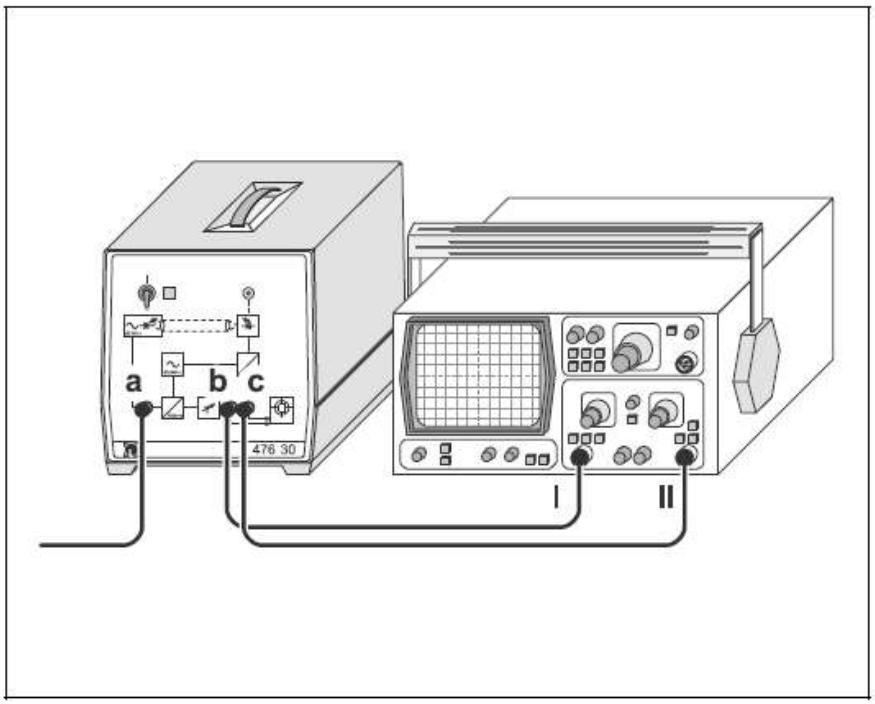
## روش انجام آزمایش

## چیدمان آزمایش

چیدمان آزمایش در شکل (۳) و (۴) نمایش داده شده‌است.




**شکل (۳): چیدمان اپتیکی تعیین سرعت نور با سیگنال نور متناوب.**




**شکل (۴): اتصال اسیلوسکوپ برای اندازه‌گیری شیفت فازی سیگنال نوری متناوب.**

۱- فرستنده نور را در فاصله حدود ۱٫۰ متر از گیرنده قرار دهید. فرستنده را به‌وسیله یک کابل کواکسیال بلند، ۶ m، به خروجی (a) گیرنده متصل کرده و گیرنده را روشن کنید.

۲- لکه نور قرمز فرستنده نور را روی صفحه جلویی گیرنده تصویر کرده و بخش الحاقی (e) را نسبت به متمرکزکننده (d) به‌گونه‌ای جابه‌جا کنید که در لکه نور قرمز تا حد امکان به‌صورت یکنواخت روشن شود.

۳- فاصله بین فرستنده و گیرنده نور را به ۵۰ cm کاهش دهید، عدسی را در مسیر پرتو قرار دهید.

۴- فرستنده نور و عدسی را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که لکه نور قرمز روی دهانه ورودی گیرنده تنظیم شود. اگر ضرورت دارد، تنظیمات فرستنده نور را با پیچ‌های خمیده تنظیم پشت (f) بهینه کنید.

۵- خروجی (c) گیرنده را به کانال (۲) اسیلوسکوپ متصل کنید.

**تنظیمات اسیلوسکوپ**

جفت‌شدگی کانال[1] (۲): AC

تریگر[2]: کانال ۲

مبنای زمانی[3]: ۲ $\mu s/DIV$

۶- سیگنال گیرنده روی اسیلوسکوپ را مشاهده کرده و تنظیمات فرستنده نور و عدسی را یکبار دیگر بهینه کنید.

**اگر سیگنال گیرنده به‌دلیل بار اضافی دچار اعوجاج‌شده باشد.**

1 - Coupling Channel
2 - Trigger
3 - Base time

۷- اندکی دسته پرتو پرتو را جابه‌جا کردن عدسی از حالت فوکوس (تمرکز) خارج کنید.

۸- موقعیت فرستنده نور را روی میز به‌عنوان موقعیت (۱) علامت بزنید.

۹- فرستنده نور را در امتداد محور اپتیکی به میزان $\Delta S = ۱۰۰$ cm جابه‌جا کنید، تنظیمات فرستنده نور را تنظیم کنید و موقعیت دوم را نیز علامت بزنید.

**انجام آزمایش**

**نکته:** درستی راضی‌کننده نتایج فقط زمانی حاصل می‌شود که گیرنده و فرستنده نوری پایداری گرمایی داشته باشند. آزمایش را فقط نیم ساعت پس از روشن کردن گیرنده و فرستنده نور شروع کنید.

**الف- همگام‌سازی (همزمان‌سازی) فاز سیگنال‌های مرجع و گیرنده:**

۱- خروجی (b) گیرنده را به کانال (۱) اسیلوسکوپ متصل کرده و به کانال (۱) (سیگنال مرجع) و کانال (۲) (سیگنال گیرنده) به‌صورت همزمان نگاه کنید (دقت کنید).

**تنظیمات اسیلوسکوپ**

جفت‌شدگی کانال (۱) و (۲): AC

تریگر: کانال ۱

مبنای زمانی: ۲ $\mu s/DIV$

۲- موقعیت‌های عمودی کانال‌های (۱) و (۲) را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که نسبت به خط مرکزی افقی صفحه نمایش تا حد امکان متقارن باشد.

۳- موقعیت‌های عمودی کانال‌های (۱) و (۲) را با کنترل تنظیمات ظریف[1] به‌گونه‌ای تنظیم کنید که بیشینه‌های هر دو سیگنال به خط افقی یکسانی برسد.

۴- دو سیگنال را به‌وسیله شیفت‌دهنده فاز $\varphi$ به‌گونه‌ای تنظیم کنید که تا حد امکان دقیقاً هم‌فاز باشند.

۵- موقعیت افقی مناسب سیگنال‌ها را انتخاب کرده و تناوب $T_1$ را تعیین کنید.

**ب- تعیین شیفت فازی، $\Delta\varphi$.**

۱- فرستنده نور را به موقعیت (۱) بازگردانید و دو سیگنال را مشاهده کنید.

۲- مبنای زمانی را روی $\mu s/DIV$ تنظیم کنید، صفر سیگنال مرجع را دقیقاً روی خط مرکزی عمودی شیفت دهید و زمان انتشار آشکار، $\Delta t_1$، را تعیین کنید. مقدار $\Delta t_1$ را در جدول (۱) ثبت کنید.

۳- فرستنده نور را چندین بار به سمت عقب و جلو جابه‌جا کنید و مقدار میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده $\Delta t_1$ را تعیین کنید. مقادیر را در جدول (۱) ثبت کنید.

۴- آزمایش را برای مقادیر $\Delta S = ۵۰$ cm و $\Delta S = ۷۵$ cm تکرار کنید و جدول (۱) تکمیل کنید.

۵- خطای نسبی و خطای دیفرانسیلی محاسبه C را حساب کنید.

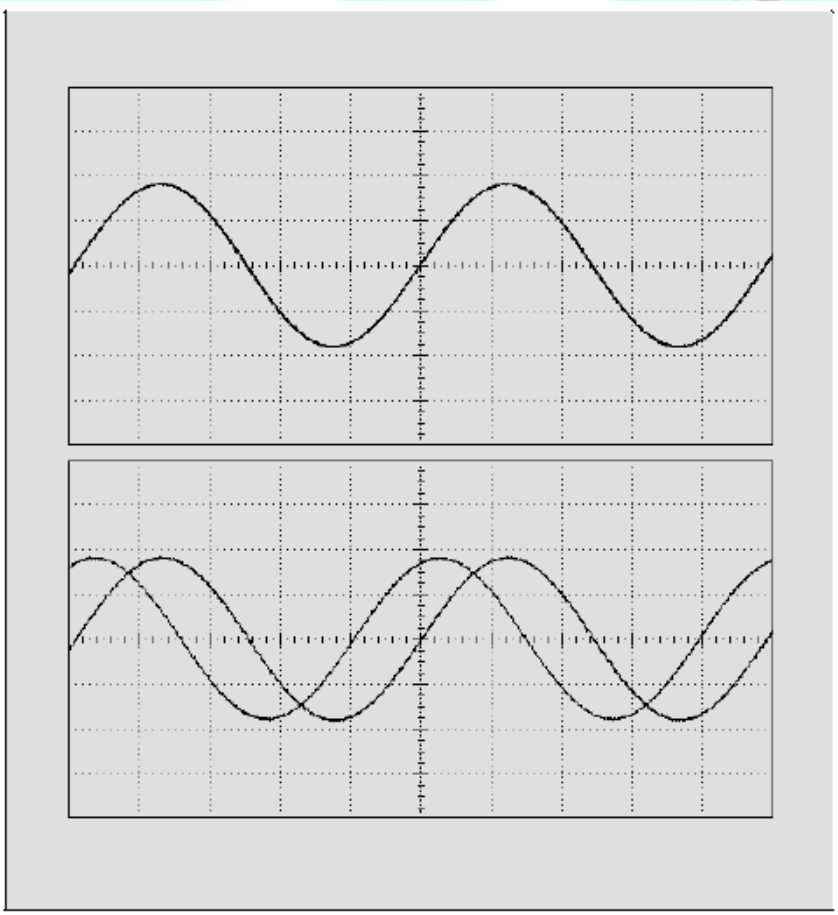
1- Fine

۶- با توجه به اینکه سرعت نور در خلاء، $C_0$، برابر $m/s$ ۱۰^۸ × ۲/۹۹۸ است، با استفاده از مقدار میانگین C و رابطه $n=\frac{C}{C_0}$، ضریب‌شکست هوا را به‌دست آورید.

۷- دما و فشار آزمایشگاه خود را ثبت کنید. سرعت نور در هوا در شرایط استاندارد، n=۱/۰۰۳، است، آیا مقدار حاصل با مقدار فوق تطابق دارد؟

**مرور:**

زمان انتشار متناهی نور در یک مسیر معین خود را در تغییر فاز یک سیگنال نوری متناوب نشان می‌دهد (شکل (۵)). از شیفت فازی و طول مسیر، سرعت نور می‌تواند تعیین شود (اگر دوره تناوب یا فرکانس، به ترتیب، سیگنال نور معین باشد).



**شکل (۵): سیگنال مرجع و سیگنال گیرنده برای موقعیت (۱) فرستنده نور (بالا) و موقعیت (۲) فرستنده نور (پایین)، $\Delta S$ = ۱۰۰ cm، مبنای زمانی $\mu s/DIV$ ۲.**

**جدول (۱): مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه‌شده آزمایش سرعت نور.**

| | n | $\Delta t_1$ | $\overline{\Delta t_1}$ | $T_1$ | $\overline{T_1}$ | $C_1$ | $\overline{C_1}$ | $n_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta S$ =۵۰ cm | ۱ | | | | | | | |
| | ۲ | | | | | | | |
| | ۳ | | | | | | | |
| | ۴ | | | | | | | |
| | ۵ | | | | | | | |
| | ۶ | | | | | | | |
| | ۷ | | | | | | | |
| | ۸ | | | | | | | |
| | ۹ | | | | | | | |
| | ۱۰ | | | | | | | |
| $\Delta S$ =۷۵ cm | ۱ | | | | | | | |
| | ۲ | | | | | | | |
| | ۳ | | | | | | | |
| | ۴ | | | | | | | |
| | ۵ | | | | | | | |
| | ۶ | | | | | | | |
| | ۷ | | | | | | | |
| | ۸ | | | | | | | |
| | ۹ | | | | | | | |
| | ۱۰ | | | | | | | |
| $\Delta S$ =۱۰۰ cm | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

دکتر فاطمه دباغ کاشانی
دانشگاه علم و صنعت ایران