

# Caracterización interferométrica de elementos de fase mediante o algoritmo de catro saltos

Gabriel María Carral López

Área de Óptica

Departamento de Física Aplicada  
Facultade de Óptica e Optometría  
Facultade de Física

unidadesdidácticas  
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



Esta obra atópase baixo unha licenza internacional Creative Commons BY-NC-ND 4.0. Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-ND 4.0 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.gl>

© Universidade de Santiago de Compostela, 2021

**Deseño e maquetación**  
J. M. Gairí

**Edita**  
Edicións USC  
[usc.es/publicacions](http://usc.es/publicacions)

DOI  
<https://dx.doi.org/10.15304/9788419155146>

**MATERIA:** Métodos Experimentais Avanzados

**TITULACIÓN:** Grao en Física

PROGRAMA XERAL DO CURSO

Localización da presente unidade didáctica

**MÓDULO I. FÍSICA APLICADA**

**MÓDULO II. ELECTROMAGNETISMO**

**MÓDULO III. ÓPTICA**

**Unidade 1. Interferómetro de Michelson: dobretes atómicos e espectrometría de Fourier**

**Unidade 2. Caracterización interferométrica de elementos de fase mediante o algoritmo de catro saltos**

**Unidade 3. Caracterización de un vórtice de luz e introdución á microscopia STED**

**Unidade 4. Medida de espectros mediante monocromador**

## ÍNDICE

---

### PRESENTACIÓN

#### OBXECTIVOS

1. Obxectivos xerais da materia
2. Obxectivos específicos desta unidade didáctica

#### METODOLOXÍA

#### CONTIDOS

1. Teoría básica
2. O algoritmo de catro saltos
3. Adquisición das imaxes
4. Procesado das imaxes

#### AVALIACIÓN

#### BIBLIOGRAFÍA

- Libros, papers e apuntes
- Recursos na rede

## PRESENTACIÓN

---

A presente Unidade Didáctica correspóndese a unha das prácticas impartidas no Módulo de Óptica da materia Técnicas Experimentais Avanzadas do Grao en Física da Universidade de Santiago de Compostela. Esta materia é eminentemente experimental, e consiste, previa presentación teórica, na realización de distintas experiencias de laboratorio, organizadas en tres módulos ou partes ben diferenciadas, correspondentes a diferentes ámbitos da Física. Un deles é o da Óptica. Esta UD aborda unha desas prácticas dentro deste módulo, especificamente, a *caracterización interferométrica de elementos de fase mediante o algoritmo de catro saltos*.

A Óptica ocupa un lugar central na Física actual. É un campo amplo e variado, no que conflúen avances teóricos a nivel fundamental co desenvolvemento tecnolóxico máis punteiro. Por tanto, faise necesario que os alumnos amplíen e fixen coñecementos aprendidos nas outras materias de Óptica do Grao en Física, estas de carácter máis teórico, a través da súa posta en práctica, onde se decatarán das dificultades que aparecen á hora de querer trasladar os conceptos ópticos ao laboratorio, así como tamén se familiarizarán con aplicacións actuais e diversas deses coñecementos e conectarán con avances actuais da Óptica.

A caracterización interferométrica de elementos de fase mediante o algoritmo de catro saltos constitúe un exemplo de técnica óptica experimental de uso actual. É, de feito, empregada nos propios laboratorios da Universidade de Santiago de Compostela por algúns docentes desta mesma materia. Se ben *a priori* sinxela, tanto na súa montaxe coma no seu tratamento matemático ou coñecementos teóricos previos, por non requirir de grandes recursos e por ser accesible ao alumnado, presenta unha serie de complicacións e refinamentos que os estudantes deberán abordar. Así mesmo, trátase dunha técnica moi completa, no sentido de que involucra múltiples coñecementos, desde a mesma habilidade experimental, para axustar sistemas moi sensibles, ata o procesado de imaxes mediante ordenador.

## OBXECTIVOS

---

### 1. Obxectivos xerais da materia

- Analizar fenómenos físicos nun contorno non ideal como é o laboratorio.
- Fixar contidos teóricos adquiridos noutras materias do Grao.
- Introducir métodos experimentais de uso actual.

### 2. Obxectivos específicos desta unidade didáctica

- Entender e interpretar fenómenos ópticos nun contorno realista.
- Adquirir destreza manual á hora de manexar instrumentos ópticos de alta sensibilidade.
- Superar dificultades experimentais que non aparecen na teoría nun ámbito tan sensible como a Óptica.

- Tomar e analizar imaxes. Isto implica o manexo de cámaras fotográficas e os seus parámetros, así como coñecementos de programación para procesado de imaxes por ordenador.
- Identificar fontes de incerteza experimental no eido da Óptica.
- Traballar con autonomía nun contorno experimental.

## **METODOLOXÍA**

---

A metodoloxía de ensinanza desta unidade didáctica consiste nunha introdución teórica previa á materia, para despois pasar, noutra sesión, ao laboratorio, onde se realizará a práctica. Na contextualización teórica, explicaranse os conceptos teóricos relevantes que o alumnado debe coñecer ou ter presentes no laboratorio. Indicarase a bibliografía relevante e os recursos dispoñibles na rede para unha mellor comprensión dos fenómenos físicos que se van analizar despois. Indicarase tamén a relevancia da técnica. De sobrar tempo e ser grande o interese do alumnado, poderase programar incluso unha visita aos laboratorios de investigación onde se aplica esa técnica, para que o alumnado poida ver o equipamento co que se traballa, ou algún investigador lle explique que se está a facer alí.

Nas sesións de laboratorio, farase ao principio un repaso teórico das clases previas, e explicaranse *in situ* como funciona e en que consiste a montaxe experimental. A presente UD está pensada para que a práctica poida ser realizada tanto por un só alumno de forma autónoma coma en equipo (2-3 persoas). Serán as circunstancias externas (número de alumnos, situación sanitaria) as que determinen se as experiencias se farán en solitario ou por grupos (en xeral, non só a correspondente a esta UD).

En termos de planificación temporal, bastaría dedicar 30-40 minutos das dúas horas de clases expositivas dispoñibles para o módulo. Para a parte experimental, correspóndelle a esta UD unha duración de 2-3 horas de laboratorio, dependendo do tempo dispoñible en relación ás outras unidades deste módulo e a habilidade e rapidez do alumno.

Unha vez rematadas as prácticas, seralle asignada cadansúa práctica aos alumnos, das que realizarán unha memoria, de forma individual.

## **CONTIDOS**

---

A interferometría ten especial importancia en Óptica. Mediante ela facemos patente as diferenzas de fase entre as ondas electromagnéticas que chamamos luz, a través da medida e análise de patróns interferenciais.

**1. Teoría básica**

O campo eléctrico está constituído por unha amplitude vectorial real e unha fase  $E = \mathcal{E}e^{i\Phi}$ . O módulo ao cadrado do campo dános a súa intensidade. A fase dános a súa variación periódica no espazo (frecuencia espacial) e no tempo (frecuencia temporal). Medindo a intensidade dun só campo do xeito descrito, a información da fase pérdese. Cómpre comparar dous campos eléctricos distintos, combinándoos de forma que teñamos unha superposición de campos:

$$E = E_1 + E_2 \tag{1}$$

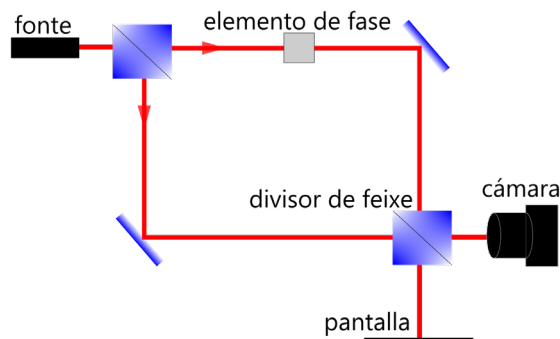
E polo tanto:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2) \tag{2}$$

Onde se ve claramente que se xera unha distribución espacial da enerxía gobernada precisamente pola diferenza de fase. Á inversa, da medida do patrón de interferencia pode calcularse a diferenza de fase. Polo réxime de frecuencias espaciais nas que traballamos, esta diferenza de fase é unha magnitude extremadamente sensible, o que se traduce en que poderemos realizar medidas de alta precisión, xa que pequenas variacións no camiño óptico tradúcense en variacións apreciables no patrón interferencial.

Para combinar campos electromagnéticos empréganse interferómetros, que son configuracións especiais de elementos ópticos como espellos, divisores de feixe etc. que fan percorrer aos campos camiños distintos e despois recombínanos para dar lugar á interferencia. Un dos interferómetros máis salientables é o interferómetro de *Mach-Zehnder*. A súa configuración básica amósase na Figura 1.

**Figura 1: Esquema básico dun interferómetro Mach-Zehnder no contexto do algoritmo de catro saltos**

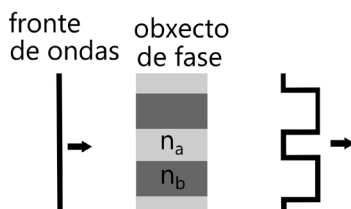


Fonte: Elaboración propia.

Os compoñentes elementais dun interferómetro destas características son un dous espellos e dous divisores de feixe (DF). O principio de funcionamento é o seguinte: a luz entra polo primeiro DF proveniente dunha fonte de iluminación coherente como pode ser un láser. O DF divide o feixe en dous; un que percorrerá o brazo superior do interferómetro e outro o inferior. Nun dos brazos, neste caso o superior, colócase un elemento de fase, é dicir, un obxecto que non altera a amplitude do campo incidente pero si a fase. Sirva como exemplo de elemento de fase a Figura 2. Neste caso, o obxecto posúe rexións alternas ben diferenciadas de distintos índices de refracción ( $n_a > n_b$ ), o que fai variar o camiño óptico que percorren distintos puntos da fronte de ondas do campo.

Se o interferómetro está ben aliñado, os dous brazos miden o mesmo e o camiño óptico introducido é igual salvo polo obxecto de fase. Os dous feixes son recombinados no segundo DF, téndose superposición de campos e por tanto interferencia. Ese patrón interferencial recóllese no sensor CMOS dunha cámara, que debe conectarse a un ordenador para a adquisición de imaxes. Na saída complementaria do mesmo DF pode colocarse opcionalmente unha pantalla para inspeccionar o patrón de interferencia a simple vista e en tempo real, ademais da cámara.

**Figura 2. Efecto dun obxecto de fase sobre unha fronte de ondas plana.**



Fonte: Elaboración propia.

Adaptando a Ecuación (2) a este caso particular teremos:

$$I = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\Phi_o - \Phi_r) \quad (3)$$

Onde  $I_o$  é a intensidade da onda viaxando polo brazo no que se atopa o obxecto e  $I_r$  é a onda que viaxa polo brazo sen obxecto ou de referencia. A diferenza de fase entre estas ondas será, no caso ideal, a fase introducida polo obxecto.

A un nivel operativo, para que o interferómetro funcione adecuadamente, este deberá estar ben aliñado, e o feixe entrante ben filtrado. Para aliñalo, cómpre quitar o obxecto, e débense ir axustando os diferentes compoñentes de forma que á saída os feixes provenientes dos dous brazos emerzan paralelos, sen que aparezan franxas de interferencia, e sexan, ademais, transversalmente coincidentes. En canto ao filtrado, trátase de que o feixe láser incida no sistema óptico o máis limpo posible, isto é, que se pareza o máximo posible a un feixe *gaussiano* ideal. A técnica do filtrado espacial requirirá de parte das sesións teóricas expositivas previas; é, ademais, un tema común a varias prácticas do módulo.



## 2. O algoritmo de catro saltos

Non obstante, na Ecuación (3) non coñecemos ditas intensidades, xa que a cámara o que rexistra é (debería) algo linealmente proporcional a  $I$ . Debemos buscar polo tanto un método para extraer a cantidade  $\Delta\Phi = \Phi_o - \Phi_r$  da ecuación de arriba. Un método para facelo, que será o que empreguemos, é o *algoritmo de catro saltos* ou, en inglés, o *four-steps algorithm* para a recuperación da fase. Este algoritmo baséase en introducir, de forma controlada e por parte do experimentador, unha fase adicional nun dos brazos, en catro saltos de  $\pi/2$  radiáns:  $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ . Teriamos:

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\Phi_o - \Phi_r) \quad (4a)$$

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\left(\Phi_o - \Phi_r + \frac{\pi}{2}\right) = I_o + I_r - 2\sqrt{I_o I_r} \sin(\Phi_o - \Phi_r) \quad (4b)$$

$$I_3 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\Phi_o - \Phi_r + \pi) = I_o + I_r - 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\Phi_o - \Phi_r) \quad (4c)$$

$$I_4 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\left(\Phi_o - \Phi_r + \frac{3\pi}{2}\right) = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \sin(\Phi_o - \Phi_r) \quad (4d)$$

Vemos que operando con estas intensidades podemos achar a fase, de forma que temos:

$$\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} = \tan(\Phi_o - \Phi_r) \quad (5)$$

*Como introducimos os saltos de fase?* Sabemos que deben ser controlados, de tal forma que o valor introducido sexa o desexado. Doutro xeito, a Ecuación (5) non se verificará e o algoritmo de catro saltos levará a erros. Nun laboratorio de investigación, unha forma de facelo é mediante precisos sistemas piezoeléctricos que despracen un dos espellos lonxitudes moi pequenas, de tal modo que cambiemos o camiño óptico percorrido pola luz nun dos brazos (por exemplo o de referencia) e introduzamos a fase requirida. Con todo, non dispoñemos deste tipo de equipamento (relativamente caro) no laboratorio do alumnado. O que faremos será colocar no brazo de referencia un prisma móbil (mediante parafuso micrométrico) formando un ángulo moi pequeno coa dirección de propagación da luz (desviación que debemos corrixir axustando os espellos). Ao desprazalo, polo tanto, a luz irá atravesando espesores variables de vidro, e irá acumulando distintas fases controladas que deberemos, iso si, calibrar previamente.

### 3. Adquisición das imaxes

A cámara, que manexamos desde o PC, recolle imaxes, o que significa que teremos unha matriz de píxeles dun determinado tamaño; cada píxel levará asociado un certo valor de intensidade. O conxunto de puntos, é dicir, a imaxe, constitúe o patrón de interferencias na zona da fronte de ondas capturada polo sensor CMOS. Teremos entón catro imaxes, unha por cada valor da fase controlada, coas que operaremos para obter a fase en cada punto (píxel) mediante a Ecuación (5).

Na práctica, non obstante, é difícil axustar totalmente o interferómetro. Polo tanto, aínda sen obxecto, teremos unha pequena diferenza de fase entre os campos provenientes de cada un dos brazos. Esta fase constituirá o noso fondo, e medirémola sen obxecto tomando tamén catro imaxes para os mesmos saltos de fase. En total teremos oito imaxes, que constituirán os nosos datos experimentais.

Débese procurar que estas imaxes estean tomadas o mellor posible: iso quere dicir que debemos enfocar apropiadamente o patrón de interferencia sobre o sensor da cámara, e que debemos procurar empregar todo o rango dinámico da cámara sen que exista saturación, é dicir, sen que haxa demasiada luz sobre os nosos píxeles.

As cámaras que temos no laboratorio toman imaxes en branco e negro de oito bits. Isto quere dicir que temos  $2^8$  niveis distintos de iluminación posibles en cada píxel. Dende o 0 (nada de luz), ata 255 (máximo). Isto quere dicir que o sensor ten un tope de valores de luz que distingue. Se para unha certa iluminación, un certo píxel ou grupo de píxeles aquel recolle o valor 255, e seguimos aumentando a cantidade de luz, o sensor seguirá rexistrando 255, e estaremos polo tanto perdendo información da intensidade, que precisamos para calcular a fase. Convén, pois, manterse por debaixo dese nivel. Para isto, pode xogarse, mediante o software da cámara, cos parámetros desta, como son o tempo de exposición, o *pixel clock*, o *frame rate* ou o *gain*. O primeiro destes parámetros ten que ver co tempo no que a cámara está a adquirir imaxes. O segundo ten que ver coa frecuencia á que se renova ou transmite a información dos píxeles. O *frame rate* é o número de imaxes por segundo que amosa a cámara. O derradeiro deles, *gain* ou é a ganancia, é a amplificación do sinal que a cámara realiza. Este último, porén, é conveniente mantelo en 1x, pois ao aumentalo introdúcese ruído. Hai que ter tamén coidado co factor *gamma* e asegurarse de que estea a cero, pois do contrario a relación entre a intensidade e o sinal do sensor vólvese non lineal, e os valores daquela non estarían representados adecuadamente.

### 4. Procesado das imaxes

A forma de procesar as imaxes para poder traballar con elas é mediante ordenador. A modo de exemplo, empregaremos o programa de uso libre GNU Octave, pero pode empregarse calquera outro, Python, por exemplo. Na Figura 3 amósase un extracto do código que se pode empregar para obter a fase.

**Figura 3. Exemplo de código para obter a fase mediante four steps**

```
ic1=imread(imc0.png)
ic2=imread(imcpimedios.png)
ic3=imread(imcpi.png)
ic4=imread(imc3pimedios.png)
is1=imread(ims0.png)
is2=imread(imspimedios.png)
is3=imread(imspi.png)
is4=imread(ims3pimedios.png)

phi_c=atan2(ic4-ic2,ic3-ic1);
phi_s=atan2(is4-is2,is3-is1);

Fase=phi_c-phi_s;
figure(1); imagesc(Fase); axis image; colorbar;
```

Fonte: Elaboración propia.

As primeiras oito liñas (*imread*) len as oito imaxes, en grupos de catro: catro *con* obxecto e catro *sen* el, para medir o fondo. Compútase a diferenza de fase en cada caso coa Ecuación (5), onde se emprega a función *atan2* que xa identifica automaticamente o cuadrante do espazo complexo no que nos atopamos comparando os signos das súas entradas. Réstanse ambas as diferenzas e represéntase a imaxe, cun código de cores, mediante o comando *imagesc*.

O paso seguinte sería proceder co *unwrapping* da fase. Porén, isto escapa do ámbito didáctico desta práctica concreta e polo tanto non se chegará tan lonxe, a menos que o alumno amose interese en afondar na materia. Debe facerse fincapé en que a cuestión do *unwrapping* conta con abundante literatura e aínda constitúe un problema se non aberto ao menos non pechado.

Ao non estar en condicións ideais, a fase sufrirá flutuacións, dadas por vibracións na mesa de traballo, por correntes de aire etc, co cal nin as imaxes individuais nin a fase resultante serán limpas. Isto é, terán ruído. Este é un factor a ter en conta tanto á hora de tomar medidas coma á hora de procesar. O efecto das correntes de aire pode reducirse tapando o interferómetro cunha caixa feita *ad hoc*. As vibracións poden minimizarse manténdose quen experimenta o suficientemente quieto á hora de tomar as medias. Porén, haberá vibracións que serán inevitables e deberemos convivir con elas. De tratarse dun laboratorio de investigación, o interferómetro estaría montado sobre unha cama de aire que se encarga de amortecer estas vibracións. Esta presenza de ruído afecta grandemente ao proceso de *unwrapping*; este é un dos motivos polos que non incluiremos este aspecto na práctica.

## **AVALIACIÓN**

---

Como se adiantou na sección de Metodoloxía, o alumnado deberá realizar unha memoria individual sobre unha das prácticas feitas no laboratorio. A nota desta memoria corresponderase coa nota final na materia. Isto non quere dicir que non se

vaia ter en conta a actitude do alumnado no laboratorio. Xa que un maior interese e aplicación á hora de tomar datos ou manexar o experimento redundará nunha mellora dos resultados experimentais, isto traducirase nunha memoria tamén de maior calidade, deixando abertas, ademais, as portas para que os alumnos aporten algunha innovación propia tanto á toma de datos como a análise posterior dos mesmos.

No caso de que algún dos alumnos obteña na memoria unha nota por baixo de cinco, é dicir, un suspenso, terá a oportunidade de corrixir a memoria para conseguir o aprobado.

En principio, a materia non se avaliará mediante exame, a non ser que deba facerse por razón de causa maior, para o que se empregarán, nese caso, as datas establecidas no calendario de exames.

## BIBLIOGRAFÍA

---

### Libros, papers e apuntes

MALACARA, Daniel, SERVÍN, Manuel e MALACARA, Zacarías (2005): *Interferogram Analysis for Optical Testing*, Second Edition, Taylor & Francis Group, Florida

MALACARA, Daniel (2007): *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, New Jersey e Canadá

JOENATHAN, C. (1 July 1994): Phase-measuring interferometry, new methods and error analysis, APPLIED OPTICS, Vol. 33, No. 19.

Guións de prácticas da materia Técnicas Experimentais Avanzadas do Grao en Física, realizados por Dolores Mouriz Cereijo e Xesús Prieto Blanco

### Recursos na rede

<https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/imaging/basics-of-digital-camera-settings-for-improved-imaging-results/>

<https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/lasers/understanding-spatial-filters/>



Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade

unidadesdidácticas  
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA