ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA

Engenharia Física, Engenharia Biomédica e Biofísica (2º ano)

OBJECTIVOS DE APRENDIZAGEM / ORIENTAÇÕES PARA ESTUDO

18-2-2019

A. Óptica Geométrica

1. A Óptica Geométrica baseia-se no conceito de **raios luminosos**, cuja trajectória é determinada pelo **princípio de Fermat**, sendo rectilínea em meios uniformes. Procura determinar as condições em que a imagem é geometricamente semelhante ao objecto (ambos em planos paralelos e perpendiculares ao eixo óptico, em sistemas com simetria cilíndrica).
2. Apoia-se na equação (não-linear) dos **planos conjugados**, no conceito de **ampliação** transversa e de ampliação longitudinal, razoavelmente verificadas desde que se assuma a **aproximação paraxial**. Apoia-se ainda na distinção entre imagens / objectos **reais / virtuais**, coerente com a convenção de **sinais** habitual.
3. Da forma geral da equação dos planos conjugados e da ampliação transversa, decorrem formas aproximadas – e de validade muito restrita – para sistemas **delgados**, ou para sistemas que operem entre espaços com o mesmo índice de refracção. As formas gerais e específicas das diversas equações devem ser bem conhecidas e aplicadas com propriedade.
4. Os desvios às previsões da equação dos planos conjugados ou a um valor fixo da ampliação transversa entre planos conjugados, são globalmente considerados como “**aberrações**”. As aberrações (monocromáticas ou não-monocromáticas) distinguem-se entre si consoante a sua natureza e/ou existência de feixes com vértice bem definido.
5. Os **pontos cardinais** – cuja localização deve ser conhecida sobretudo em sistemas espessos (que não se possam considerar delgados) - viabilizam a aplicação, única, da equação dos planos conjugados a um sistema constituído por um número arbitrário de componentes ópticos. Em alternativa, a imagem constituída no n-ésimo sistema deve ser considerada como objecto para o sistema de ordem n+1. Ambos, objecto e imagem, podem ser considerados reais ou virtuais.
6. Conceitos adicionais relevantes: sistemas de potência nula (**afocais**); **diafragma** de campo, **pupilas** (entrada e de saída); **profundidade de campo**; **f/#.**
7. Arquitectura e conceitos de sistemas ópticos fundamentais: **olho** humano (incluindo **ametropias** e sua **compensação**); **lupa**; **microscópio**; **telescópios** (incluindo a variante confocal).

B. Ondas [em Óptica Ondulatória]

1. Linearidade da **equação de ondas** e sua importância na geração de soluções complexas com base em combinações lineares de soluções simples.
2. A aproximação da óptica ondulatória deve ser bem entendida: se todas as componentes dos campos **E** e **B** satisfazem a mesma equação de ondas, então uma solução genérica da equação de ondas, u(**r**,t) terá um potencial explicativo relevante.
3. A **irradiância** (observável), em W/m^2, é dada por $2\langle|u(\mathbf{r},t)|^2\rangle$, de modo a garantir coerência com os modelos decorrentes do vector de Poynting, em óptica electromagnética.
4. De entre as soluções **escalares**, u(**r**,t) da equação de ondas, serão particularmente úteis as que, num dado ponto, **r**, forem **periódicas** no tempo. Daqui decorre a equação de **Helmholtz** e a **Amplitude Complexa**, U(**r**). Daqui decorre também a noção de onda **monocromática** e – dada a linearidade da equação de ondas – o modelo usual para ondas **policromáticas**.
5. As soluções monocromáticas mais simples da equação de Helmholtz são as ondas **planas** e as ondas **esféricas** – e suas aproximações, as **paraboloidais**. Admitindo que a amplitude das ondas monocromáticas possa variar lentamente com z, obtém-se as ondas **paraxiais**. Admitindo que a amplitude das ondas monocromáticas possam variar em (x,y) – mas não em z - obtém-se as ondas de **Bessel**.
6. As ondas **gaussianas** são casos especialmente relevantes de ondas paraxiais. Não só têm uma irradiância transversa gaussiana como admitem soluções de “ordem” elevada, associadas a polinómios de Hermite e de Legendre, que impõem os seus zeros às gaussianas.
7. Os parâmetros que caracterizam as ondas planas, esféricas, paraxiais, gaussianas, bem como o cálculo da Amplitude Complexa (em módulo e em fase) em qualquer plano à distância z do plano da fonte, devem ser bem conhecidos, bem como a distinção entre as soluções exactas da equação de Helmholtz e as soluções da equação de **Helmholtz paraxial**.

C. Propagação (e difracção) de ondas [em Óptica Ondulatória]

1. O Princípio de **Huygens-Fresnel** é o princípio básico da **propagação** / **difracção** de ondas. Para além da imagem mental que proporciona – baseada na interferência entre ondas esféricas geradas a partir de fontes virtuais - é relevante relacioná-lo com o princípio de **Huygens** da Óptica Geométrica: as superfícies de igual fase são, essencialmente, as superfícies de onda geométricas.
2. É possível estabelecer dois regimes de aproximação do integral de Huygens-Fresnel, consoante a distância, isto é, os ângulos decorrentes de distâncias longitudinais e a dimensão transversa das regiões de interesse, tanto no plano z=0, como no plano de observação.
3. Com as aproximações de **Fresnel** (aproximações parabólicas às ondas esféricas) e de Fraunhofer (aproximações planas às ondas esféricas) pode-se determinar o campo escalar, U_{out}, num plano com base no conhecimento do campo escalar U_{in} noutro plano paralelo ao primeiro. A difracção, em Óptica Ondulatória, formaliza-se entre planos paralelos.

4. Na aproximação de **Fraunhofer**, a relação entre U_{out} e U_{in}, é simples: U_{out} é basicamente a transformada de Fourier de U_{in} - abstraindo de factores de fase sem relevância no cálculo da irradiância – calculada para valores especiais das frequências espaciais.
5. Assim, desde que seja conhecida a **Função de Transmissão em Amplitude** no plano z=0, $t(\xi,\eta)$, é possível calcular a Amplitude Complexa (e a irradiância) difractada em qualquer ponto (x,y,z) a uma distância z que satisfaça a condição de Fraunhofer.
6. A representação da Amplitude Complexa no plano z=0 através da modelação completa da Função de Transmissão em Amplitude no plano z=0 é crítica. Alguns modelos simples para aberturas retangulares, circulares – tanto de fase como de amplitude – únicas ou regularmente distribuídas (redes de difracção), constituem objectivos relevantes da disciplina, designadamente o modelo de uma lente dotada da respectiva fronteira.
7. A aproximação de Fraunhofer impõe uma distância considerável. A interposição de uma **lente**, de distância focal *f*, e a observação no seu plano focal, são equivalentes, matematicamente, à aproximação de Fraunhofer: a mesma equação, desde que $z \rightarrow f$.
8. Como consequência, nos sistemas que formam imagens de objectos no infinito – com imagens no plano focal da lente – como os telescópios ou o olho humano, a imagem é descrita pelo **padrão de difracção de Fraunhofer da pupila de saída da lente**.
9. Daqui decorre a teoria do **limite de resolução** (de **Rayleigh**), que remete para a estrutura de difracção de uma abertura circular, isto é, para a função *sombrero* (ou chapéu mexicano, dada pela razão entre a função de Bessel, $J_1(x)/x$).

D. Interferências [em Óptica Ondulatória]

1. Da **linearidade** da equação de Helmholtz decorre que a soma de Amplitudes Complexas é solução da equação de Helmholtz.
2. O cálculo da distribuição espacial da irradiância, $E(x,y)$, em planos perpendiculares ao eixo dos ZZ, é relevante para quaisquer pares de tipos de ondas (planas, esféricas, gaussianas), em que a **diferença de fase** entre as ondas varie espacialmente.
3. A análise das situações de interferência reduz-se essencialmente aos casos de interferência entre ondas planas e/ou esféricas, contando a posição relativa das respectivas fontes em relação ao plano de observação. Uma das ondas é considerada como referência, a outra contem, através de pequenas variações espaciais ou temporais da fase, a informação desejada.
4. Existem vários tipos de interferómetros: de **divisão de amplitude** ou de **divisão de frente de onda**; de dois feixes ou de feixes múltiplos, com ou sem percas. A sua arquitectura, variáveis de que depende a diferença de fase e perfil das franjas, distinguem-nos. Nomes a conhecer: **Young, Fizeau, Michelson (e variantes), Mach-Zehnder, Fabry-Perot**.
5. Uma cavidade ressonante constitui uma situação em que o número de ondas que se sobrepõem (interferem) é muito elevado, em função das refletividades dos espelhos que a constituem. As características da Amplitude Complexa que daí resulta são da maior relevância para o funcionamento dos lasers: constituição de ondas estacionárias e frequências de ressonância.

E. Óptica Electromagnética (alguns aspectos poderão ser abordados, em função do tempo e dos interesses dos alunos)

1. A chave para a integração das propriedades do meio é a relação **P** = **P**(**E**), desde que a **susceptibilidade dieléctrica** (χ) possa ser representada por um número complexo, e no caso de materiais anisótropos, por tensores de 2ª ordem. Desta relação decorre ainda a **distinção** entre a Óptica linear e a Óptica Não-Linear, esta última na base de uma fenomenologia muito rica.
2. Os modelos de propagação de ondas estudados em Óptica Ondulatória mantém-se válidos, mas é fundamental integrar as propriedades dos meios em que as ondas se propagam, de acordo com a existência ou não de electrões livres (modelo de **Lorentz** para os dieléctricos, ou de **Drude** para metais), e entender a variação espectral de diversas grandezas. As constantes materiais são, assim, representadas por números complexos, de modo a poder ser modelada tanto a ***dispersão*** (variação da velocidade de propagação da onda com a frequência), como a ***absorção*** (igualmente dependente da frequência).
3. Os meios lineares e isótropos são particularmente importantes, neles se verificando relações específicas entre constantes materiais, bem como a **transversalidade** das ondas planas monocromáticas e a **relação entre as amplitudes** dos campos eléctrico e magnético, através da impedância do meio.
4. Devem ser conhecidas muito genericamente as características genéricas dos materiais não-lineares de 2ª e 3ª ordem e alguns fenómenos associados.
5. Nas superfícies de descontinuidade entre dois meios, as equações de Maxwell impõem a **continuidade** das componentes *tangenciais* de **E** e de **H**, e das componentes *normais* de **D** e de **B**. Daqui resultam, respectivamente, as equações da reflexão e da refracção, bem como as 4 **equações de Fresnel** para as polarizações paralela e perpendicular ao plano de incidência.
6. Devem ser compreendidos os modelos para polarização linear, circular, elíptica e ausência de polarização, bem como os principais mecanismos físicos para gerar ou alterar o estado de polarização de uma onda.

F. Lasers (este tópico – designadamente o nº 2 - será utilizado a título de exemplos em interferometria e no tratamento das ondas gaussianas. Os outros tópicos poderão serã brevemente referidos, sendo fundamentais para a compreensão do funcionamento dos lasers).

1. Aspectos quânticos: emissão estimulada, risca de absorção, inversão de populações, ganho *(não coberto)*.
2. Aspectos electromagnéticos: cavidade ressonante, modos estacionários, frequências de ressonância, modos gaussianos, seleção de modos, monocromaticidade, polarização.
3. Geração de impulsos ou de ondas contínuas.
4. Aplicações.

G. Formulário

1. Em todos os seguintes domínios, devem ser compreendidas as fórmulas que constam do Formulário, bem como as grandezas representadas e contextos de utilização.