

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum
Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica

Jaroslav Pospíšil

Optická přenosová funkce objektivů, její reprezentace z hlediska experimentálního a klasifikace metod jejího měření

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica, Vol. 12 (1972), No. 1, 273--291

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/119987>

Terms of use:

© Palacký University Olomouc, Faculty of Science, 1972

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

*Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky
Vedoucí katedry: prof. Dr. Josef Fuka*

OPTICKÁ PŘENOSOVÁ FUNKCE OBJEKTIVŮ, JEJÍ REPREZENTACE Z HLEDISKA EXPERIMENTÁLNÍHO A KLASIFIKACE METOD JEJÍHO MĚŘENÍ

JAROSLAV POSPÍŠIL

(Předloženo dne 30. června 1971)

Věnováno prof. dr. Josefu Fukovi k 65. narozeninám.

1. Úvod

Optická přenosová funkce je objektivním kritériem kvality zobrazení lineárními zobrazovacími soustavami a elementy. Pro praxi je velmi významná optická přenosová funkce vztahující se na nekoherentní zobrazení. V tomto článku je pro tento případ zobrazení optická přenosová funkce definována a jsou uvedeny její reprezentace z hlediska experimentálního. Dále jsou uvedeny úvahy o hodnocení přesnosti měření optické přenosové funkce a je provedena základní klasifikace metod jejího měření.

2. Obecné úvahy a historické poznámky

Čočkové zobrazovací soustavy (objektivy) lze v souladu s prací [1] považovat za lineární. Zobrazení těmito soustavami je obecně ovlivňováno mnohými činiteli, které způsobují, že zobrazení není ideální. Vedle stupně koherence zobrazovaného předmětu zobrazení ovlivňují geometrické a vlnové aberace, odraz a rozptyl světla a jeho absorpce v optické soustavě. Velikost a výskyt uvedených faktorů jsou určeny geometrií čočkových soustav, jejich materiálem a stejnorodostí jeho struktury, povrchem optických elementů a dokonalostí jeho opracování. Zobrazení je dále ovlivněno dokonalostí centrování optických elementů, zaostřením obrazu, velikostí a prostorovým rozložením předmětu, který se zobrazuje, zobrazovacím úhlem, relativním otvorem optické soustavy, jejím korekčním stavem a též druhem světla, kterým se zobrazení realizuje.

U optických soustav se uvedené faktory vyskytují v různé míře, proto se liší jejich kvalita. Je třeba definovat objektivní kritérium, pomocí kterého lze stanovit kvalitu optických zobrazovacích soustav, které je dovoluje vzájemně srovnávat, pomáhat je korigovat a navrhovat.

Kritérium kvality obrazu musí být exaktní, objektivní, reprodukovatelné a přitom musí souhlasit se subjektivně pocítovanou jakostí obrazu, kterou ovlivňují především tyto hlavní vlastnosti optického obrazu: kontrast, ostrost kresby a velikost zobrazovaných detailů.

Podle práce [2] musí kritérium kvality obrazu být teoreticky a experimentálně vyjadřitelné, má poskytovat možnost jeho stanovení i při zobrazení složenými zobrazovacími soustavami a má být použitelné při zobrazení předmětů libovolné struktury.

Dosavadní způsoby hodnocení kvality optických soustav lze podle práce [3] rozdělit na dvě skupiny. První skupinu tvoří metody diferencující (analyzující) a druhá skupina je tvořena metodami integrujícími (syntetizujícími). Analyzující metody určují jednotlivé geometrické vady, kdežto integrujícími metodami zkoumáme obraz v celku. Diferencující metody neposkytují názor o úhrnné kvalitě obrazu a jsou vhodné jen pro laboratorní testování typů čoček, kdežto integrujících metod lze užít jak pro zkoušení typů čoček, tak i pro jejich sériové testování ve výrobních provozech optických továren.

K stanovení kvality obrazu v celku jsou vhodné integrující metody. K integrujícím metodám řadíme metody zjišťování rozlišovací meze optické soustavy a metody zkoumání a analýzy obrazu vhodného předmětu s determinovaným nebo stochastickým prostorovým rozložením jasu.

K stanovení kvality obrazu je třeba zvolit vhodný způsob jeho analýzy. Studium en tvaru zobrazených předmětů nebo měření rozlišovací meze nedává nám úplnou informaci o kvalitě obrazu. Podle práce [1] vhodné kritérium kvality obrazu poskytují Fourierova analýza a studium zobrazovacích soustav z hlediska teorie sdělování.

Počátek nového pohledu na zobrazovací proces a jeho kvalitu, to jest pohledu z hlediska teorie sdělování, lze nalézt již na konci minulého a začátkem tohoto století v pracích J. W. Strutta (Lorda Rayleigha) a E. Abbeho, kteří zjistili, že čočkové zobrazovací soustavy mají svou rozlišovací mez, která je projevem vlnové vlastnosti světla. Chovají se tedy čočkové zobrazovací soustavy jako dolnoprostupné filtry prostorových frekvencí (viz práce [4] a [5], které navazují na výsledky G. Airyho [6]). Tento pohled na zobrazovací soustavy byl teoreticky rozpracován v knize P. M. Duffieux [1].

V experimentu se koncepce Fourierovy analýzy objevila v práci A. Arnulfa [7], který navrhl vizuálně zkoumat optické soustavy pomocí obrazového kontrastu čárového periodického testu v závislosti na jeho prostorové frekvenci. Toto hledisko se stalo podkladem pro vizuální metody měření optické přenosové funkce objektivů o jejichž propracování se hlavně zasloužil J. F. Simon [8].

Pro fotografický způsob zjišťování optických přenosových funkcí je základem práce E. W. Selwyna [9], který používal sinusových testů pro proměřování fotografických objektivů a fotografických materiálů, jejichž použití předtím navrhl H. Frieser [10].

Uvedené základní práce byly podkladem pro široký a hluboký teoretický a experimentální výzkum zobrazovacích soustav na základě Fourierovy analýzy. Teorie Duffieuxova byla dále rozvinuta hlavně pracemi H. H. Hopkinse [11], E. L. O'Neill [12] až [14], A. Marechala a M. Francona [15] a dalšími.

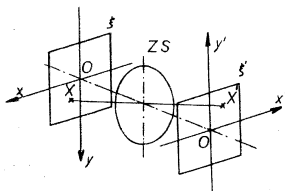
Počátek moderních experimentálních metod měření optické přenosové funkce, založených na elektrické bázi, lze nalézt v pracích H. C. Montgomeryho, M. Borna a R. Fürtha a W. Herriotta (viz práce [16] až [18]). Propracování základních moderních metod měření optické přenosové funkce objektivů bylo provedeno O. H. Schadem, P. I. Lindbergem, H. D. Polsterem, H. H. Hopkinsem, L. R. Bakerem, H. Kubotou a H. Ohzuem (viz práce [19] až [26]).

Vzhledem k tomu, že optická přenosová funkce je objektivním kritériem kvality zobrazovacích soustav, objevují se snahy zavést tuto funkci jako mezinárodní standart kvality obrazu (viz práce [27]).

Optickou přenosovou funkci, která je zavedena v následující části tohoto článku, lze zjišťovat poččetně i experimentálně. Tento článek je zaměřen na experimentální problematiku ve vztahu k objektivům.

3. Definice optické přenosové funkce

Předpokládejme nekoherentní zobrazení lineární a izoplanární optickou soustavou ZS bez rušivých vlivů. Bez újmy na obecnosti předpokládejme dále, že příčné zvětšení obrazu je jednotkové, takže souřadnice obrazové a předmětové roviny budou v absolutní hodnotě stejné a ideální obraz předmětu lze považovat za předmět.



Obr. 1. Schematický obrázek k odvození optické přenosové funkce objektivů.

Nechť v předmětové rovině ξ je libovolný předmět, z něhož vychází nekoherentní světelné svazky. Obraz tohoto předmětu se vytvoří v obrazové rovině ξ' (obr. 1). Libovolný bod $X(x, y)$ roviny ξ se zobrazí do bodu $X'(x', y')$.

Označíme-li jas předmětu $L(x, y)$ a jemu odpovídající osvětlení v obrazové rovině označíme $E(x', y')$, pak podle práce [1] lze jejich vzájemný vztah vyjádřit konvolučním integrálem

$$E(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x, y' - y) L(x, y) dx dy, \quad (1)$$

kde $E_d(x' - x, y' - y)$ je distribuční funkce obrazu libovolného bodu $X(x, y)$, vystihující rozložení osvětlení v obrazu tohoto bodu.

Konvoluční integrál (1) lze též vyjádřit takto:

$$E(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x, y) L(x' - x, y' - y) dx dy.$$

Vystihneme nyní konvoluční vztah (1) v doméně prostorových frekvencí σ a θ ve směru souřadnic x a y . Lze psát:

$$e(\sigma, \theta) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \exp[-i 2\pi(\sigma x' + \theta y')] dx' dy' \quad (2)$$

$$e_d(\sigma, \vartheta) = \iiint_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x, y' - y) \exp \{-i 2\pi[\sigma(x' - x) + \vartheta(y' - y)]\} \cdot d(x' - x) d(y' - y) \quad (3)$$

$$I(\sigma, \vartheta) = \iint_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \exp[-i 2\pi(\sigma x + \vartheta y)] dx dy.$$

Funkci $e(\sigma, \vartheta)$ je možno pomocí vztahu (1) rozepsat takto:

$$e(\sigma, \vartheta) = \iiint_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x, y' - y) L(x, y) \exp[-i 2\pi(\sigma x' + \vartheta y')] dx' dy' dx dy.$$

Položíme-li

$$\begin{aligned} x' - x &= x_0 \\ y' - y &= y_0, \end{aligned}$$

dostaneme:

$$e(\sigma, \vartheta) = \iiint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) L(x, y) \exp\{-i 2\pi[\sigma(x_0 + x) + \vartheta(y_0 + y)]\} \cdot dx dy d(x_0 + x) d(y_0 + y)$$

nebo

$$\begin{aligned} e(\sigma, \vartheta) &= \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) \exp[-i 2\pi(\sigma x_0 + \vartheta y_0)] dx_0 dy_0 \cdot \\ &\cdot \iint_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \exp[-i 2\pi(\sigma x + \vartheta y)] dx dy. \end{aligned} \quad (4)$$

Protože

$$\iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) \exp[-i 2\pi(\sigma x_0 + \vartheta y_0)] dx_0 dy_0 = e_d(\sigma, \vartheta) \quad (5)$$

a

$$\iint_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \exp[-i 2\pi(\sigma x + \vartheta y)] dx dy = I(\sigma, \vartheta),$$

lze vztah (4) napsat ve tvaru

$$e(\sigma, \vartheta) = e_d(\sigma, \vartheta) I(\sigma, \vartheta)$$

nebo

$$e_d(\sigma, \vartheta) = \frac{e(\sigma, \vartheta)}{I(\sigma, \vartheta)}. \quad (6)$$

Funkce $e_d(\sigma, \vartheta)$ charakterizuje kvalitu optické soustavy; její normovanou hodnotu označíme $g(\sigma, \vartheta)$ a nazveme ji optickou přenosovou funkcí. Lze ji vyjádřit vztahem:

$$g(\sigma, \vartheta) = p e_d(\sigma, \vartheta) \quad (7)$$

nebo pomocí rovnice (3):

$$g(\sigma, \vartheta) = p \iiint_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x, y' - y) \exp\{-i 2\pi[\sigma(x' - x) + \vartheta(y' - y)]\} \cdot d(x' - x) d(y' - y), \quad (8)$$

kde

$$p = \frac{1}{e_d(0,0)} = \frac{1}{\iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x, y' - y) d(x' - x) d(y' - y)}$$

Protože platí rovnice (6), lze též psát:

$$g(\sigma, \vartheta) = p \frac{e(\sigma, \vartheta)}{l(\sigma, \vartheta)} = p \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \exp[-i 2\pi (\sigma x' + \vartheta y')] dx' dy'}{\iint_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \exp[-i 2\pi (\sigma x + \vartheta y)] dx dy}, \quad (9)$$

přičemž

$$p = \frac{l(0, 0)}{e(0, 0)} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} L(x, y) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} E(x', y') dx' dy'}. \quad (10)$$

Je-li

$$\frac{l(\sigma, \vartheta)}{l(0, 0)} = 1,$$

pak z rovnic (9) a (10) plyne:

$$g(\sigma, \vartheta) = \frac{e(\sigma, \vartheta)}{e(0, 0)}.$$

Z rovnice (8) vyplývá, že optická přenosová funkce je obecně komplexní. Vyjádříme-li ji pomocí vztahu (5), dostaneme:

$$g(\sigma, \vartheta) = p \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) \exp[-i 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0)] dx_0 dy_0,$$

kde

$$p = \frac{1}{\iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) dx_0 dy_0}.$$

Protože

$$\exp[-i 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0)] = \cos 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0) - i \sin 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0),$$

je

$$g(\sigma, \vartheta) = p \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) \cos 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0) dx_0 dy_0 - \\ - i \iint_{-\infty}^{\infty} E_d(x_0, y_0) \sin 2\pi (\sigma x_0 + \vartheta y_0) dx_0 dy_0$$

nebo

$$g(\sigma, \vartheta) = \text{Reg}(\sigma, \vartheta) - i \text{Img}(\sigma, \vartheta). \quad (11)$$

Ve výrazu (11) je

$$\text{Re}g(\alpha, \beta) = \int \int E_0(x_0, y_0) \cos 2\pi (cx_0 + dy_0) dx_0 dy_0$$

$$\text{Im}g(\alpha, \beta) = \int \int E_0(x_0, y_0) \sin 2\pi (cx_0 + dy_0) dx_0 dy_0$$

Ze vztahu (11) je možno vypočítat absolutní hodnotu funkce $g(\alpha, \beta)$:

$$|g(\alpha, \beta)| = r(\alpha, \beta) = |\text{Re}g(\alpha, \beta) + i \text{Im}g(\alpha, \beta)| \quad (12)$$

Funkci $T(\alpha, \beta) = |g(\alpha, \beta)|$ nazveme funkcí přenosu kontrastu a hodnoty této funkce pro dané prostorové frekvence budeme nazývat amplitudami optické přenosové funkce.

Z rovnice (11) a (12) je zřejmé, že též platí:

$$\text{Re}g(\alpha, \beta) = T(\alpha, \beta) \cos \theta(\alpha, \beta) \quad (13)$$

$$\text{Im}g(\alpha, \beta) = T(\alpha, \beta) \sin \theta(\alpha, \beta) \quad (14)$$

kde

Funkce $\theta(\alpha, \beta)$ bude nazývána funkcí přenosu fáze a její hodnoty pro dané prostorové frekvence nazveme fázemi optické přenosové funkce.

Vztah (7) lze považovat za definici optické přenosové funkce. Z něho plyne, že optická přenosová funkce je normovaná Fourierovou transformací distribuční funkce obrazu bodu, vytvořeného zkoumanou optickou soustavou. Optickou přenosovou funkcí lze však též stanovit podle rovnice (9) jako normovaný poměr Fourierových transformací světelných distribucí obrazu a předmětu, přičemž předmět může mít libovolný tvar.

Funkce přenosu kontrastu dostatečně popisuje vlastnosti zobrazení se zřetelem na intenzity světla pro různé prostorové frekvence předmětu, kdežto funkce přenosu fáze je mírou posunutí rozložení obrazových intenzit vzhledem k předemto-
vým intenzitám pro různé prostorové frekvence. Tyto fázové posuny se projevují při mimoosovém zobrazení. Při osovém zobrazení má hodnoty

$$\theta(\alpha, \beta) = k\beta \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Pomocí funkcí $T(\alpha, \beta)$ a $\theta(\alpha, \beta)$ lze optickou přenosovou funkci vyjádřit též takto:

$$g(\alpha, \beta) = r(\alpha, \beta) \exp [i \theta(\alpha, \beta)] \quad (16)$$

4. Reprezentace optické přenosové funkce z hlediska experimentálního

Pro experimentální účely je v souladu s prací [28] vhodnější jednorozměrné vyjádření optické přenosové funkce. Vyplyvá to z požadavku zkoumat závislost intenzitních poměrů v obrazu na struktuře předmětu tak, aby byla co nejjednodušší a také z toho, že většina optických testů má jednorozměrnou strukturu nebo experimentální vyhodnocování obrazů je možno provádět jen pro jeden směr.

Základní jednorozměrné tvary pro optickou přenosovou funkci jsou:

neboli

$$g(\sigma) = q \int_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x) \exp[-i 2\pi \sigma(x' - x)] d(x' - x),$$

kde

$$q = \frac{1}{e_d(0)} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} E_d(x' - x) d(x' - x)}.$$

Nebo:

$$g(\sigma) = q \frac{e(\sigma)}{l(\sigma)} = q \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E(x') \exp(-i 2\pi \sigma x') dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) \exp(-i 2\pi \sigma x) dx},$$

přičemž

$$q = \frac{l(0)}{e(0)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E(x') dx'}$$

Pro

$$\frac{l(\sigma)}{l(0)} = 1$$

je

$$g(\sigma) = \frac{e(\sigma)}{e(0)}.$$

V uvedených vztazích pro optickou přenosovou funkci $g(\sigma)$ je funkce $E_d(x' - x)$ distribuční funkce obrazu nekoherentně svítící přímky, realizované úzkou štěrbinou, kolmou ke směru $(x' - x)$ (funkce $E_d(x' - x)$ udává distribuci osvětlení v obrazu přímky).

Vztahy (11) až (16) mají pro jednorozměrnou doménu následující tvary:

$$g(\sigma) = \text{Reg}(\sigma) - i \text{Img}(\sigma)$$

$$\tau(\sigma) = \sqrt{\text{Reg}(\sigma)^2 + \text{Img}(\sigma)^2} \quad (17)$$

$$\text{Reg}(\sigma) = \tau(\sigma) \cos \theta(\sigma) \quad (18)$$

$$\text{Img}(\sigma) = \tau(\sigma) \sin \theta(\sigma) \quad (19)$$

$$\theta(\sigma) = \arctg \frac{\text{Img}(\sigma)}{\text{Reg}(\sigma)} \quad (20)$$

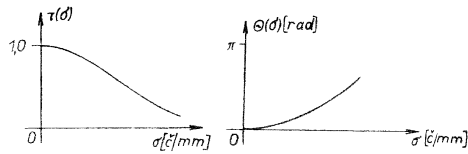
$$g(\sigma) = \tau(\sigma) \exp[-i \theta(\sigma)]. \quad (21)$$

Pro funkce $\tau(\sigma)$, $\theta(\sigma)$, $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$ platí:

$$\tau(0) = 1, \theta(0) = 0, \text{Reg}(0) = 1, \text{Img}(0) = 0.$$

Nejběžněji je optická přenosová funkce reprezentována samostatnými funkcemi $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$ nebo funkcemi $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$. Uvedené reprezentace optické přenosové funkce jsou základní. Mohou být vyjádřeny numericky nebo graficky některým ze způsobů podle obrázků 2 a 3 nebo numericky a graficky současně.

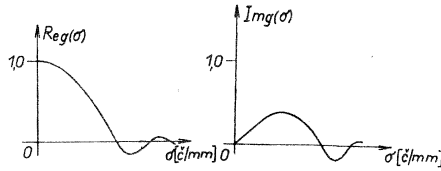
Optickou přenosovou funkci je též možno vyjádřit jedním grafem v komplexní



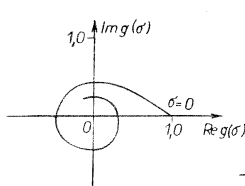
Obr. 2. Grafická reprezentace optické přenosové funkce pomocí funkce přenosu kontrastu $\tau(\sigma)$ a funkce přenosu fáze $\theta(\sigma)$.

rovině. Jeden možný průběh je uvedena na obrázku 4. Každý bod znázornění optické přenosové funkce v komplexní rovině odpovídá jedné prostorové frekvence σ .

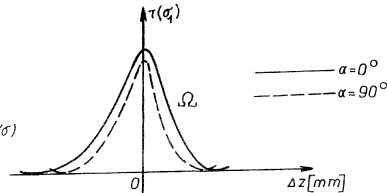
Optická přenosová funkce $g(\sigma)$ je funkcí prostorové frekvence σ pro směr x svírající s referenčním směrem v předmětové rovině obecně úhel (azimut) α . Za základ lze brát vodorovný směr v předmětové rovině. Pro něj je $\alpha = 0^\circ$. Kromě toho optická přenosová funkce závisí na dalších parametrech. Tyto parametry jsou: zobrazovací úhel Ω , vlnová délka světla λ použitého pro zobrazení, clonové číslo c zkoumané optické soustavy (proměňovaného objektivu), poloha obrazové roviny určená velikostí rozostření Δz podél optické osy zkoumané optické soustavy od roviny nejlepšího zaostření.



Obr. 3. Grafická reprezentace optické přenosové funkce pomocí její reálné a imaginární složky $Reg(\sigma)$ a $Img(\sigma)$.

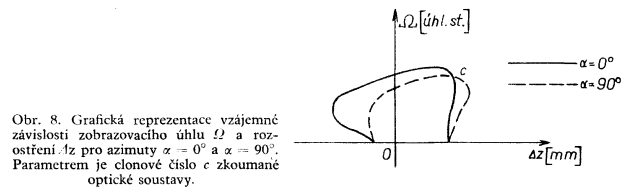
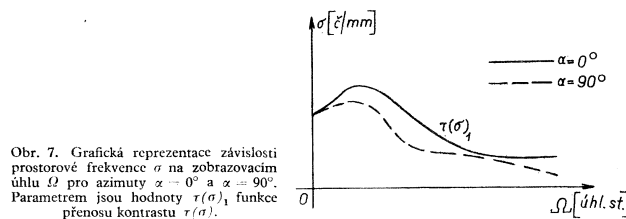
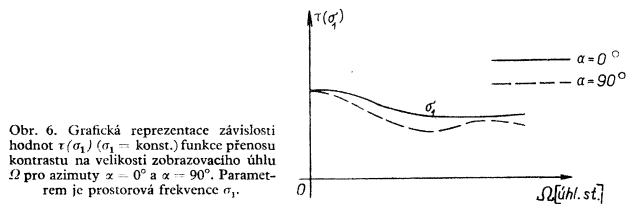


Obr. 4. Grafická reprezentace optické přenosové funkce v komplexní rovině.



Obr. 5. Grafická reprezentace závislosti hodnot $\tau(\sigma_1)$ funkce přenosu kontrastu na velikosti rozostření při konstantní velikosti prostorové frekvence σ_1 pro azimuty $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$. Parametrem je zobrazovací úhel Ω .

Abychom získali celkový názor na kvalitu zkoumané optické soustavy (objektivu), je v souladu s prací [29] třeba získat výsledky podle obrázku 2 nebo 3, popřípadě podle obrázku 4 pro různé zobrazovací parametry. Prakticky stačí výsledky měření vyjádřit pro tangenciální azimut $\alpha = 0^\circ$ a radiální azimut $\alpha = 90^\circ$, pro zaostřený obraz a typické kladné a záporné hodnoty rozostření (za kladné rozostření se bere rozostření od obrazové roviny nejlepšího rozostření směrem ke zkoumané optické soustavě), pro různé typické hodnoty clonového čísla zkoumané optické soustavy, pro složené světlo, některé vlnové délky světla podle druhu zkoumané optické soustavy a pro některé hodnoty zobrazovacího úhlu. Při měření je též třeba zvolit příslušný směr světelných svazků v realizovaném měřicím zařízení, vstupujících do zkoumané optické soustavy a odpovídajících chodu světelných svazků při praktickém použití této soustavy.



Úplně proměření optické přenosové funkce objektivu pro různé zobrazovací parametry je zdoluhavé. V praxi někdy stačí znát jen některé speciální závislosti optické přenosové funkce na zobrazovacích parametrech, případně některé vzájemné závislosti zobrazovacích parametrů. Konkrétní volba reprezentance výsledků měření je určena formou získaných výsledků, použitou metodou a měřicím zařízením. Volbu reprezentance ovlivňuje též účel k jakému je výsledků měření použito [30].

Nejdůležitější a v praxi nejpotebnější speciální závislosti (reprezentace) jsou ty speciální závislosti, které jsou vztaženy k funkci přenosu kontrastu $\tau(\sigma)$. Nejpoužívanější z nich jsou uvedeny na obrázcích 5 až 8. Na obrázku 5 je uvedena reprezentace udávající příklad závislosti hodnot $\tau(\sigma_1)$ funkce přenosu kontrastu na velikosti rozostření Δz při konstantní velikosti prostorové frekvence ($\sigma_1 = \text{konst.}$), pro azimuty $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$. Tyto závislosti se určují pro různé typické hodnoty zobrazovacího úhlu Ω při neměnných ostatních zobrazovacích parametrech.

Obrázek 6 ukazuje příklad závislosti hodnot $\tau(\sigma_1)$ ($\sigma_1 = \text{konst.}$) funkce přenosu kontrastu na velikosti zobrazovacího úhlu Ω pro azimuty $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$. Parametrem je prostorová frekvence σ_1 . Ostatní zobrazovací parametry jsou při měření pevně nastaveny.

Jiný možný typ reprezentace je uveden na obrázku 7. V něm je znázorněna závislost prostorové frekvence σ na zobrazovacím úhlu Ω pro azimuty $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$. Parametrem jsou hodnoty $\tau(\sigma)$, funkce přenosu kontrastu $\tau(\sigma)$. Ostatní zobrazovací parametry jsou konstantní.

Příklad vzájemné závislosti zobrazovacího úhlu Ω a rozostření Δz pro azimuty $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$ je uveden na obrázku 8. Parametrem u této závislosti bývá clonové číslo c zkoumané optické soustavy. Uvedený typ reprezentace se vztahuje ke konstantní hodnotě funkce přenosu kontrastu a ke konstantně nastaveným ostatním zobrazovacím parametrům.

Druh a počet zjišťovaných speciálních závislostí závisí na typu zkoumané optické soustavy a na účelu k jakému mají tyto závislosti sloužit.

Závěrem této části je třeba dodat několik poznámek. Funkce přenosu fáze $\theta(\sigma)$, která v sobě zahrnuje informace o působení mimoosových geometrických aberací nebo též o nepravém rozlišení, je nejnázorněji vystižena reprezentací podle obrázku 2. Je-li optická přenosová funkce vyjádřena reprezentací podle obrázku 3, pak je nutno k získání názoru o průběhu funkce přenosu fáze užít výpočtu podle vzorce (20). Vzorec (18) poskytuje možnost výpočtu hodnot funkce přenosu kontrastu. Jsou-li výsledky měření získány ve formě křivky podle obrázku 4, potom hodnoty funkce přenosu fáze jsou v souladu s rovnicemi (21), (18) a (19) určeny velikostmi úhlů vektorů $g(\sigma)$ s reálnou osou $\text{Reg}(\sigma)$ pro různé prostorové frekvence. Hodnoty funkce přenosu kontrastu jsou dány velikostmi vektorů $g(\sigma)$. Lze ovšem též zjistit průměty vektorů $g(\sigma)$ do reálné a imaginární osy, které udávají hodnoty funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, a na základě vztahů (17) a (20) je pak možno určit hodnoty funkce přenosu kontrastu a funkce přenosu fáze.

Obdobně jako v případě funkce přenosu kontrastu, je možno funkci přenosu fáze vystihnout pro různé zobrazovací parametry nebo lze též ve speciálních případech používat reprezentací vyjadřujících závislost jednotlivých hodnot této funkce na zobrazovacích parametrech, popřípadě vzájemnou závislost některých zobrazovacích parametrů, je-li jedním z parametrů hodnota funkce přenosu fáze. Tyto závislosti nejsou však v praxi tak užitečné jako závislosti vztažené k funkci přenosu kontrastu.

5. Hodnocení přesnosti měření optických přenosových funkcí

Přesnost měření realizovaným měřicím zařízením lze určit buď srovnáním výsledků měření s výsledky získanými přesnými výpočty pro stejné zobrazovací podmínky nebo rychleji jejich srovnáním s výsledky obdrženyými normálovým měřicím zařízením za stejných zobrazovacích podmínek. Pro tento účel jsou nevhodnější interferometrická měřicí zařízení nebo precizně realizovaná měřicí zařízení založená na snímacích metodách, byla-li předtím cejchována pomocí výpočtů.

Při analýze přesnosti jednotlivých měření funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$, případně funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, lze používat buď rozdílových funkcí

$$\Delta\tau(\sigma) = \tau(\sigma) - \tau(\sigma)_{sr} \quad (22)$$

$$\Delta\theta(\sigma) = \theta(\sigma) - \theta(\sigma)_{sr}, \quad (23)$$

popřípadě

$$\Delta\text{Reg}(\sigma) = \text{Reg}(\sigma) - \text{Reg}(\sigma)_{sr} \quad (24)$$

$$\Delta\text{Img}(\sigma) = \text{Img}(\sigma) - \text{Img}(\sigma)_{sr} \quad (25)$$

nebo relativních funkcí

$$\delta\tau(\sigma) = 100 \frac{|\Delta\tau(\sigma)|}{|\tau(\sigma)|} \quad (26)$$

$$\delta\theta(\sigma) = 100 \frac{|\Delta\theta(\sigma)|}{|\theta(\sigma)|}, \quad (27)$$

popřípadě

$$\delta\text{Reg}(\sigma) = 100 \frac{|\Delta\text{Reg}(\sigma)|}{|\text{Reg}(\sigma)|} \quad (28)$$

$$\delta\text{Img}(\sigma) = 100 \frac{|\Delta\text{Img}(\sigma)|}{|\text{Img}(\sigma)|}. \quad (29)$$

Ve vztazích (22) až (25) funkce s indexem sr značí správné výsledky. Z velikostí frekvenčních složek funkcí (22) až (29) lze usuzovat na přesnost měřením získaných hodnot funkcí $\tau(\sigma)$, $\theta(\sigma)$, $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$.

Chceme-li vyjádřit přesnost celého průběhu funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$, případně funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, pomocí jedné číselné hodnoty, pak je vhodné zavést relativní plošné chyby průběhu funkcí vztahy:

$$\delta_\tau = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |\Delta\tau(\sigma)| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\tau(\sigma)| d\sigma} \quad (30)$$

$$\delta_\theta = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |\Delta\theta(\sigma)| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\theta(\sigma)| d\sigma}, \quad (31)$$

popřípadě

$$\delta_{\text{Re}} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\text{max}}} |\Delta \text{Reg}(\sigma)| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\text{max}}} |\text{Reg}(\sigma)| d\sigma} \quad (32)$$

$$\delta_{\text{Im}} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\text{max}}} |\Delta \text{Img}(\sigma)| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\text{max}}} |\text{Img}(\sigma)| d\sigma}, \quad (33)$$

kde σ_{max} značí maximální společnou prostorovou frekvenci srovnávaných funkcí.

Provádí-li se analýza výsledků měření funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$, popřípadě funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, pro různé zobrazovací parametry, to jest úplná analýza všech výsledků měření, pak lze zavést průměrnou relativní plošnou chybu všech měření vztahy

$$\bar{\delta}_\tau = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\tau_i}}{N} \quad (34)$$

$$\bar{\delta}_\theta = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\theta_i}}{N}, \quad (35)$$

popřípadě

$$\bar{\delta}_{\text{Re}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\text{Re}_i}}{N} \quad (36)$$

$$\bar{\delta}_{\text{Im}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\text{Im}_i}}{N}, \quad (37)$$

kde N značí počet měření funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$, popřípadě funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, pro různé typické hodnoty zobrazovacích parametrů. Průměrné relativní chyby $\bar{\delta}_\tau$ a $\bar{\delta}_\theta$, případně $\bar{\delta}_{\text{Re}}$ a $\bar{\delta}_{\text{Im}}$, definované vztahy (34) až (37), poskytují celkový názor o přesnosti měření realizovaným měřicím zařízením vztaheného k zobrazovacím parametrům, pro které byla měření provedena.

Jestliže byly měřením stanoveny funkce $\text{Reg}(\delta)$ a $\text{Img}(\sigma)$ a hodnoty funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$ se zjišťují výpočtem nebo obráceně z hodnot funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$ se výpočtem určují hodnoty funkcí $\text{Reg}(\sigma)$ a $\text{Img}(\sigma)$, pak je třeba též určit chyby výsledků výpočtů. Absolutní chyby $\Delta\tau(\sigma)_{ep}$, $\Delta\theta(\sigma)_{ep}$, $\Delta\text{Reg}(\sigma)_{ep}$ a $\Delta\text{Img}(\sigma)_{ep}$ výpočtem zjištěných frekvenčních složek funkcí $\tau(\sigma)_{ep}$, $\theta(\sigma)_{ep}$, $\text{Reg}(\sigma)_{ep}$ a $\text{Img}(\sigma)_{ep}$ je možno určit aplikováním diferenciálního počtu na vztahy (17)

až (20). Dostaneme:

$$d\tau(\sigma) = \frac{\partial \tau(\sigma)}{\partial \operatorname{Re}g(\sigma)} d\operatorname{Re}g(\sigma) + \frac{\partial \tau(\sigma)}{\partial \operatorname{Im}g(\sigma)} d\operatorname{Im}g(\sigma) = \\ = \frac{\operatorname{Re}g(\sigma) d\operatorname{Re}g(\sigma) + \operatorname{Im}g(\sigma) d\operatorname{Im}g(\sigma)}{\sqrt{\operatorname{Re}g(\sigma)^2 + \operatorname{Im}g(\sigma)^2}},$$

$$d\theta(\sigma) = \frac{\partial \theta(\sigma)}{\partial \operatorname{Re}g(\sigma)} d\operatorname{Re}g(\sigma) + \frac{\partial \theta(\sigma)}{\partial \operatorname{Im}g(\sigma)} d\operatorname{Im}g(\sigma) = \\ = \frac{\operatorname{Re}g(\sigma) d\operatorname{Im}g(\sigma) - \operatorname{Im}g(\sigma) d\operatorname{Re}g(\sigma)}{\operatorname{Re}g(\sigma)^2 + \operatorname{Im}g(\sigma)^2},$$

$$d\operatorname{Re}g(\sigma) = \frac{\partial \operatorname{Re}g(\sigma)}{\partial \tau(\sigma)} d\tau(\sigma) + \frac{\partial \operatorname{Re}g(\sigma)}{\partial \theta(\sigma)} d\theta(\sigma) = \\ = \cos \theta(\sigma) d\tau(\sigma) - \tau(\sigma) \sin \theta(\sigma) d\theta(\sigma),$$

$$d\operatorname{Im}g(\sigma) = \frac{\partial \operatorname{Im}g(\sigma)}{\partial \tau(\sigma)} d\tau(\sigma) + \frac{\partial \operatorname{Im}g(\sigma)}{\partial \theta(\sigma)} d\theta(\sigma) = \\ = \sin \theta(\sigma) d\tau(\sigma) + \tau(\sigma) \cos \theta(\sigma) d\theta(\sigma).$$

Nahradme diferenciály v předcházejících vztazích konečnými přírůstky. Tyto přírůstky mají význam absolutních chyb frekvenčních složek vypočtených funkcí $\tau(\sigma)_{vp}$, $\theta(\sigma)_{vp}$, $\operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}$. Lze psát:

$$\Delta \tau(\sigma)_{vp} = \frac{\operatorname{Re}g(\sigma) \Delta \operatorname{Re}g(\sigma) + \operatorname{Im}g(\sigma) \Delta \operatorname{Im}g(\sigma)}{\sqrt{\operatorname{Re}g(\sigma)^2 + \operatorname{Im}g(\sigma)^2}} \quad (38)$$

$$\Delta \theta(\sigma)_{vp} = \frac{\operatorname{Re}g(\sigma) \Delta \operatorname{Im}g(\sigma) - \operatorname{Im}g(\sigma) \Delta \operatorname{Re}g(\sigma)}{\operatorname{Re}g(\sigma)^2 + \operatorname{Im}g(\sigma)^2} \quad (39)$$

$$\Delta \operatorname{Re}g(\sigma)_{vp} = \cos \theta(\sigma) \Delta \tau(\sigma) - \tau(\sigma) \sin \theta(\sigma) \Delta \theta(\sigma) \quad (40)$$

$$\Delta \operatorname{Im}g(\sigma)_{vp} = \sin \theta(\sigma) \Delta \tau(\sigma) + \tau(\sigma) \cos \theta(\sigma) \Delta \theta(\sigma). \quad (41)$$

Indexy vp , vystupujícími ve vztazích (38) až (41), jsou označeny absolutní chyby frekvenčních složek zjištěných výpočtem.

Užitím vztahů (26) až (29) pro výpočet zjištěné absolutní chyby $\Delta \tau(\sigma)_{vp}$, $\Delta \theta(\sigma)_{vp}$, $\Delta \operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\Delta \operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}$ dostaneme rovnice pro relativní chyby $\delta \tau(\sigma)_{vp}$, $\delta \theta(\sigma)_{vp}$, $\delta \operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\delta \operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}$ výpočtem určených výsledků $\tau(\sigma)_{vp}$, $\theta(\sigma)_{vp}$, $\operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}$:

$$\delta \tau(\sigma)_{vp} = 100 \frac{|\Delta \tau(\sigma)_{vp}|}{|\tau(\sigma)_{vp}|} \quad (42)$$

$$\delta \theta(\sigma)_{vp} = 100 \frac{|\Delta \theta(\sigma)_{vp}|}{|\theta(\sigma)_{vp}|} \quad (43)$$

$$\delta \operatorname{Re}g(\sigma)_{vp} = 100 \frac{|\Delta \operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}|}{|\operatorname{Re}g(\sigma)_{vp}|} \quad (44)$$

$$\delta \operatorname{Im}g(\sigma)_{vp} = 100 \frac{|\Delta \operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}|}{|\operatorname{Im}g(\sigma)_{vp}|} \quad (45)$$

Pro plošné relativní chyby $\delta_{\epsilon_{\tau}}$, $\delta_{\theta_{\tau}}$, $\delta_{\text{Re}_{\tau}}$ a $\delta_{\text{Im}_{\tau}}$ průběhu vypočtených funkcí $\tau(\sigma)_{vp}$, $\theta(\sigma)_{vp}$, $\text{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\text{Im}g(\sigma)_{vp}$ platí modifikované vztahy (30) až (33) ve tvarech:

$$\delta_{\tau, \tau} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |A \tau(\sigma)_{vp}| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\tau(\sigma)_{vp}| d\sigma} \quad (46)$$

$$\delta_{\theta, \tau} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |A \theta(\sigma)_{vp}| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\theta(\sigma)_{vp}| d\sigma} \quad (47)$$

$$\delta_{\text{Re}, \tau} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |A \text{Re}g(\sigma)_{vp}| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\text{Re}g(\sigma)_{vp}| d\sigma} \quad (48)$$

$$\delta_{\text{Im}, \tau} = 100 \frac{\int_0^{\sigma_{\max}} |A \text{Im}g(\sigma)_{vp}| d\sigma}{\int_0^{\sigma_{\max}} |\text{Im}g(\sigma)_{vp}| d\sigma} \quad (49)$$

Pro průměrné relativní plošné chyby platí v případě vypočtených funkcí $\tau(\sigma)_{vp}$, $\theta(\sigma)_{vp}$, $\text{Re}g(\sigma)_{vp}$ a $\text{Im}g(\sigma)_{vp}$ analogické vztahy (34) až (37) ve tvarech:

$$\bar{\delta}_{\tau, \tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\tau, \tau i}}{N} \quad (50)$$

$$\bar{\delta}_{\theta, \tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\theta, \tau i}}{N} \quad (51)$$

$$\bar{\delta}_{\text{Im}, \tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\text{Im}, \tau i}}{N} \quad (52)$$

$$\bar{\delta}_{\text{Im}, \tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\text{Im}, \tau i}}{N} \quad (53)$$

Předcházející vztahy (22) až (53) poskytují možnost kvantitativního zhodnocení přesnosti každé realizované metody pro měření optické přenosové funkce.

U každé realizované metody je nutné zjistit pro jaké zobrazovací parametry ještě dává dostatečně přesné a reprodukovatelné výsledky pro dostatečně velké rozsahy prostorových frekvencí. Zobrazovací parametry, pro které lze měření provádět, jsou určeny konstrukcí měřicího zařízení. Přesnost a reprodukovatelnost výsledků měření jsou dány použitou metodou a její realizací. Na základě přesnosti a reprodukovatelnosti výsledků měření lze pak vymezit měřicí rozsah realizované metody. Praxe ukázala, že za dostatečně přesné výsledky lze považovat ty, pro které hodnoty absolutních chyb (22), (24) a (25), případně (38), (40) a (41) většinou nepřesahují velikosti $\pm 0,05$. V případě hodnot funkcí přenosu fáze lze ještě za prakticky užitečné výsledky pokládat ty výsledky, jejichž absolutní chyby (23) (případně (39)) většinou nepřesahují hodnoty $\pm 9^\circ$ ($\pm 0,16$ rad).

Platnost předcházejících tolerancí zaručuje prakticky souhlasné průběhy naměřených funkcí s předpokládanými průběhy. Jsou-li předcházející tolerance splněny při opakovaných měřeních za stejných zobrazovacích podmínek, pak realizovaná metoda vykazuje dostatečnou reprodukovatelnost a metoda je vhodná pro praktická použití.

Měřicí rozsah realizované metody je určen rozsahem prostorových frekvencí, pro které jsou předcházející tolerance splněny a výsledky měření jsou reprodukovatelné. Protože obvykle měřicí rozsah realizované metody závisí na zobrazovacích parametrech, je vhodné u každé realizované metody uvést buď minimální a maximální měřicí rozsah nebo nejlépe průměrný měřicí rozsah, což je průměrná hodnota měřicích rozsahů pro různé zobrazovací parametry nastavitelné v realizovaném měřicím zařízení.

Pro měřicí rozsahy vztahené k jednotlivým zobrazovacím parametrům je užitečné zjistit i příslušné relativní plošné chyby (30) až (33), případně (46) až (49), a z nich potom na základě rovnic (34) až (37), případně (50) až (53), je možné zjistit průměrné plošné relativní chyby průběhů funkcí $\tau(\sigma)$, $\theta(\sigma)$, $\text{Reg}(\sigma)$, a $\text{Img}(\sigma)$, případně funkcí $\tau(\sigma)_{\text{vpp}}$, $\theta(\sigma)_{\text{vpp}}$, $\text{Reg}(\sigma)_{\text{vpp}}$ a $\text{Img}(\sigma)_{\text{vpp}}$.

Uvedený způsob zjišťování měřicího rozsahu realizované metody zajišťuje pro praxi dostatečný souhlas naměřených a správných funkcí. Požadavek, aby v měřicím rozsahu realizované metody relativní chyby (26) až (29), případně (42) až (45), většinou nepřevyšovaly velikosti $\pm 5\%$, vede k menším hodnotám měřicích rozsahů. Takto stanovené měřicí rozsahy se vztahují k velmi dobrým souhlasům naměřených a správných výsledků, avšak nevyjadřují skutečnost, že i pro větší hodnoty prostorových frekvencí lze ještě získat užitečné výsledky. Z tohoto hlediska je prakticky vhodnější předtím uvedené kritérium měřicího rozsahu.

Zjišťování měřicího rozsahu na základě požadavku, aby relativní plošné chyby (30) až (33), případně (46) až (49), nepřevyšovaly hodnotu 5% je hrubší v porovnání s předcházejícími kritérii. Nezajišťuje totiž vždy pro praxi dostatečný souhlas průběhů naměřených a správných funkcí ve všech intervalech prostorových frekvencí.

Z předcházejících úvah je patrné, že prakticky nevhodnějším kritériem měřicího rozsahu je první uvedené kritérium založené na absolutních chybách.

Při hodnocení realizovaného měřicího zařízení pro měření optické přenosové funkce je třeba z řady získaných výsledků pro nastavitelné zobrazovací parametry stanovit průměrný nebo maximální a minimální měřicí rozsah. Přitom na reprodukovatelnost výsledků lze usuzovat z několikerého měření pro každou nastavenou skupinu zobrazovacích parametrů. K zjištěnému průměrnému měřicímu rozsahu nebo k získaným hodnotám maximálního a minimálního

měřicího rozsahu je vhodné připojit údaj o průměrné plošné relativní chybě průběhu naměřených funkcí (zjišťování plošných relativních chyb průběhů naměřených funkcí lze s výhodou provádět metodou měření nepravidelných ploch pomocí vážení nebo pomocí planimetru — viz např. kniha [31]). Pro úplnou charakteristiku realizovaného měřicího zařízení je třeba připojit ještě informace o jeho stavbě, o typech použitých přístrojů a součástí, o nastavitelných zobrazovacích parametrech a o typech objektivů, které lze tímto zařízením proměřovat.

6. Klasifikace metod měření optické přenosové funkce objektivů

Měřicí metody umožňují ověřovat správnost výpočtem zjištěných optických přenosových funkcí. Lze jimi zjišťovat optickou přenosovou funkci i v případech, kdy výpočet je těžký a zdlouhavý. Oproti výpočtovým metodám dovolují experimentální metody snadněji a rychleji zkoumat vliv různých faktorů na průběhy optických přenosových funkcí a lze jimi rychleji zjišťovat optické přenosové funkce víceúhlových lineárních zobrazovacích soustav.

Klasifikaci metod měření optické přenosové funkce objektivů je možné provést z různého hlediska (viz práce [24], [15], [32] až [38]). Základní klasifikaci v současné době existujících metod měření optické přenosové funkce objektivů lze vhodně provést z hlediska typu zobrazovaného předmětu při měření. Podrobnější rozdělení metod je možné učinit na základě různých způsobů matematického vyjádření optické přenosové funkce a na základě metodiky měření.

Podle výše uvedených hledisek lze metody měření optické přenosové funkce objektivů rozdělit na metody s předmětem realizujícím determinovaný prostorový signál a na metody s předmětem realizujícím stochastický prostorový signál (statistické metody).

Metody s determinovaným předmětem se vyznačují tím, že zobrazovaný předmět při měření je popsateľný matematickými formullemi, které přesně vystihují jeho prostorové rozložení jasu. Je používáno periodického testu sinusového nebo pravouhého, popřípadě Moirého mřížky, bodového elementu, šterbiny nebo břítu.

Metody s determinovaným předmětem lze z hlediska matematického vyjádření optické přenosové funkce a metodiky měření rozdělit do těchto základních skupin:

a) *metody měření kontrastů*, u nichž je určována jen funkce přenosu kontrastu z kontrastů periodického obrazu nebo i předmětu pro různé prostorové frekvence předmětu (testu). Tyto metody jsou nejjednodušší a lze je podle použitého indikátoru obrazů a způsobu vyhodnocování kontrastů rozdělit na

α) *visuální metody měření kontrastů*, u kterých je indikátorem a vyhodnocovačem obrazů oko,

β) *fotografické metody měření kontrastů*, u kterých je využito fotografické emulze k indikaci nebo i k vyhodnocování výsledných obrazů;

b) *snímací metody*, u kterých je použito snímací techniky při měření optické přenosové funkce. Tyto metody jsou typické způsobem stanovení frekvenčních složek optické přenosové funkce. Podle způsobu vyhodnocování frekvenčních složek optické přenosové funkce lze snímací metody rozdělit do těchto skupin:

α) snímací metody optické Fourierovy analýzy, kterými stanovení frekvenčních složek optické přenosové funkce je prováděno opticky pomocí harmonického testu nebo aproximačně harmonického testu,

β) snímací metody opticko-elektrické Fourierovy analýzy, u kterých je použito ncharmonického periodického testu k stanovení spektrálních složek optické přenosové funkce za pomoci elektrické eliminace vyšších harmonických složek jeho Fourierova rozvoje,

γ) snímací metody elektrické, numerické a grafické Fourierovy analýzy, u kterých je použito neperiodického předmětu (bodového elementu, šterbiny nebo bříty) k zobrazení zkoumanou optickou soustavou a stanovení spektrálních složek optické přenosové funkce je prováděno buď elektricky pomocí speciálního elektrického Fourierova analyzátoru nebo na základě numerického či grafického způsobu vyhodnocování Fourierových transformací;

c) interferometrické metody, u kterých je optická přenosová funkce zjišťována pomocí interferenční techniky. Tyto metody je možno podle metodiky měření rozdělit na

α) přímé interferometrické metody, které se vyznačují tím, že je při měření optické přenosové funkce realizována autokorelace pupilové funkce zkoumané optické soustavy určující optickou přenosovou funkci,

β) nepřímé interferometrické metody, u kterých je využito harmonického interferogramu jako testu sloužícího k měření optické přenosové funkce způsobem snímací metody optické Fourierovy analýzy,

γ) holografické metody, u nichž je použito laserových paprsků k produkování hologramů obsahujících informace o zobrazovacích vlastnostech zkoumané optické soustavy. Rekonstrukcí hologramů je možno zjistit optickou přenosovou funkci zkoumané optické soustavy;

d) statistické metody, u kterých je k měření optické přenosové funkce použito stacionárního stochastického testu. Optická přenosová funkce je zjistitelná buď

α) statistickou metodou vzájemné korelace, vyplývající z vyjádření optické přenosové funkce pomocí Fourierovy transformace vzájemné korelační funkce stacionárního stochastického testu a jeho obrazu, nebo

β) statistickou metodou autokorelace založenou na vzájemném vztahu optické přenosové funkce a Fourierovy transformace autokorelační funkce obrazu stacionárního stochastického testu.

7. Závěr

Současné realizace metod měření optické přenosové funkce objektivů jsou buď laboratorního provedení nebo jsou zkonstruovány pro rychlá měření optické přenosové funkce v provozech optických továren. U laboratorních realizací, sloužících pro výzkumné práce v oboru optického zobrazení, je snaha získat co nejpřesnější výsledky, otázka rychlosti měření je druhořadá. U měřících zařízení určených pro kontrolní měření v optických továrnách je prvořadá rychlost nastavení měřícího přístroje a měření s ním, při zachování dostatečné přesnosti výsledků měření.

Průmyslové využití mají v současné době hlavně snímací metody optické, opticko-elektrické a elektrické Fourierovy analýzy a z nich nevhodnější jsou modifikace pro přímé a současné určování funkcí $\tau(\sigma)$ a $\theta(\sigma)$. Interferometrické metody jsou nejpřesnější, ale pro jejich průmyslové využití je třeba složitější konstrukce. Ostatní realizované metody měření optické přenosové funkce mají zatím jen laboratorní využití. U přesně provedených realizací pro provozní účely lze nastavení přístroje a proměření jedné optické přenosové funkce provést v době kolem jedné minuty, u laboratorně realizovaných metod bývá doba nastavení přístroje a vyhodnocení jednoho měření delší.

Z existujících metod měření optické přenosové funkce objektivů jsou nejvíce upracovávány snímací a interferometrické metody. Předmětem dalších výzkumných a vývojových prací bude jednak technické zdokonalování existujících realizačních metod s ohledem na zrychlování a zpřesňování měření, jednak hledání dalších principů a modifikací metod pro zjišťování optické přenosové funkce. V tomto směru jsou nejdůležitější statistické metody a holografická metoda. Dalším logickým směrem výzkumů v oblasti měřicí techniky je vývoj dalších zařízení k automatickému zjišťování závislosti hodnot optické přenosové funkce na zobrazovacích parametrech a zařízení k automatickému sledování závislosti jednotlivých zobrazovacích parametrů.

LITERATURA

- [1] *Duffieux P. M.*: L'Integrale de Fourier et ses Applications a l'Optique, Rennes Soc. An Impr. Oberthur, 1946, 74.
- [2] *Lohmann A.*: Optik, 14, (1957), 510.
- [3] *Rosenhauer K.*: Optik aller Wellenlängen (1959), 260.
- [4] *Lord Rayleigh*: Phil. Magazine, X (1880), 116.
- [5] *Abbe E.*: Abhandlungen über die Theorie des Mikroskopes, Gessamelte Abhandlungen, Bd. 1, Jena (1904).
- [6] *Airy G.*: Camb. Phil. Trans. (1834).
- [7] *Arnulf A.*: La Vision dans les Instruments, Edit. Rev. d'Optique (1937).
- [8] *Simon J.*: Optica Acta, 6 (1959), 279.
- [9] *Selwyn E. W. H.*: Phot. J., 88B (1948), 6.
- [10] *Frieser H.*: Z. Wiss. Phot., 37 (1938), 261.
- [11] *Hopkins H. H.*: Proc. Roy. Soc., A 208 (1951), 263; A 217 (1953), 408; B 69 (1955), 562; A 231 (1955), 69; B 70 (1957), 1002; B 70 (1957), 1162.
- [12] *O'Neill E. L.*: The Modulation Function in Optics, ITEK Corp. (1954).
- [13] *O'Neill E. L.*: Selected Topics in Optics and Communication Theory, ITEK Corp. (1958).
- [14] *O'Neill E. L.*: Introduction to Statistical Optics, Addison-Wesley Publ. Co. INC, Reading Massachusetts, Palo Alto, London (1963).
- [15] *Marchal A., Francon M.*: Struktura optičeskogo izobraženija, Izdatelstvo Mir, Moskva (1964).
- [16] *Montgomery H. C.*: Bell Syst. Tech. J., 17, (1938), 406.
- [17] *Born M., Firth R.*: Nature, 156 (1945), 756.
- [18] *Herrion W.*: J. Opt. Soc. Am., 37 (1947), 472.
- [19] *Schade O. H.*: RCA Rev., IX (1948), 5, 245, 491, 653.
- [20] *Schade O. H.*: J. SMPTE, 56 (1951), 137; 58 (1952), 181; 61 (1953), 97; 64 (1955), 593; 67 (1958), 561.
- [21] *Schade O. H.*: N. B. S. Circular, 526 (1954), 231.
- [22] *Lindberg P. J.*: Optica Acta, 1 (1954), 80.
- [23] *Polster H. D.*: A New Lens Evaluating Instrument, Perkin — Elmer Corp., Eng. Rep. No. 413 (1955).
- [24] *Hopkins H. H.*: Optica Acta, 2 (1955), 23.
- [25] *Baker L. R.*: Proc. Phys. Soc., B 68 (1955), 871.
- [26] *Kubota H., Ohzu H.*: J. Opt. Soc. Am., 47 (1957), 666.

- [27] *JOUR J.*: Optics in Japan, Appl. Optics, 1 (1962), 284.
 [28] *Hopkins H. H.*: Proc. Roy. Soc. A 231 (1955), 91.
 [29] *Murata K., Matsui H.*: Jap. J. Appl. Phys., 4 (1965), Supl. I, 160.
 [30] *Saynagi K.*: Standard Graphical Representations for Optical Transfer Functions, JOERA (1963).
 [31] *Horák Z.I.*: Praktická fyzika, SNTL Praha (1958), 76.
 [32] *Suzuki T.*: Oyo Buturi, 26 (1957), 331.
 [33] *Kinosita K., Yasuhiko T., Koana T., Ogawa I.*: Gidzjuc kenkjū, The Tech. Rep. NHK, Vol. 11 (1959), No. 1, Ser. No. 40, 13.
 [34] *Ose T.*: Šjašin lenso lespons kansū sokuteihōno kenkjū, Rep. Inst. Industr. Science Univ. of Tokyo, 11 (1961), No. 4, 6.
 [35] *Nayanagi K.*: Oyo Buturi, 27 (1958), 637.
 [36] *Minata K.*: Progress in Optics, V, North Holland Publ. Comp. Amsterdam (1966), 201.
 [37] *Gevsinomova O. A., Nilov A. A.*: Tehnika kino i televidenije, 6 (1965), 30.
 [38] *Suzuki T.*: Šjašin lenso lespons to kansū sokuteidōči nošisakuto sonoseido kōdžijōni kansuru kenkjū, Report of Osaka Univ., Vol. 47 (1961).

РЕЗЮМЕ

**ФУНКЦИЯ КОНТРАСТНОСТИ ОБЪЕКТИВОВ, ЕЁ
 ПРЕДСТАВЛЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
 И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЕЁ ИЗМЕРЕНИЯ**

ЯРОСЛАВ ПОСПИШЛ

В статье сделан анализ некогерентной функции контрастности объективов с точки зрения эксперимента. Показано аналитическое выражение функции контрастности и ее представление с точки зрения эксперимента. Дальше, в статье показан возможный метод для оценки результатов измерений и сделана классификация методов для измерения функции контрастности объективов.

SUMMARY

**THE OPTICAL TRANSFER FUNCTION OF OBJECTIVES,
 ITS REPRESENTATIONS FROM THE EXPERIMENTAL
 POINT OF VIEW AND THE CLASSIFICATION OF METHODS
 FOR ITS MEASUREMENT**

JAROSLAV POSPIŠIL

This article analyses the incoherent optical transfer function of objectives from the experimental point of view. There is introduced the analytical expression of the optical transfer function and its experimental representations. Further, a possible way for evaluation of measuring results and classification of methods for measurement of the optical transfer function of objectives are shown.