

MODELOVÁNÍ A MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK OBRAZOVÝCH SNÍMAČŮ

Karel Fliegel

ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky

Pro popis přenosových vlastností a jako objektivní měřítko kvality optických a elektrooptických systémů se používá modulační přenosová funkce *MTF* (*Modulation Transfer Function*). Tento příspěvek se zabývá použitím zobecněné *MTF* vzorkovaných struktur obrazových snímačů (např. *CCD*, *CMOS*, *CID*) za účelem implementace modelu obrazového systému s využitím grafického uživatelského rozhraní *GUI* v programovém prostředí *Matlab*. Použitý model uvažuje vliv tvaru fotocitlivé oblasti detektoru, vzorkovacího procesu, ale také dalších parametrů, jako je účinnost přenosu náboje, či difuze na průběh *MTF*. Měření přenosových charakteristik reálné zobrazovací soustavy – digitálního fotoaparátu – bylo provedeno s využitím univerzálního měřicího systému realizovaném jako *GUI* v *Matlabu*. Oba realizované nástroje jsou díky *GUI* dobře použitelné též pro výukové účely.

1 Přenosové vlastnosti optických soustav

Nejmenší detail, který může optická soustava vytvořit, je popsán prostorovou impulsovou odezvou $h(x, y)$. Impulsová odezva, v optických systémech označovaná jako bodová rozptylová funkce *PSF* (*Point Spread Function*), popisuje prostorové rozložení jasu v obrazové rovině soustavy v případě použití bodového zdroje v rovině předmětové. *PSF* je tedy odezvou zobrazovací soustavy na dvou-rozměrný *Diracův impuls*.

Na Obr. 1 je znázorněna zobrazovací soustava (pro zjednodušení s jednotkovým zvětšením), na jejímž vstupu v předmětové rovině je bodový zdroj $f(x, y) = \delta(x - x', y - y')$ a výstupem je posunutá impulsová odezva $g(x, y) = h(x - x', y - y')$ v rovině obrazové.

Mezi předmětem na vstupu tzv. lineární a prostorově invariantní zobrazovací soustavy *LSI* (*Linear Shift Invariant*) a obrazem na jejím výstupu platí vztah

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (1)$$

kde výsledné prostorové rozložení jasu v obrazové rovině $g(x, y)$ je dáno konvolucí prostorového rozložení jasu v předmětové rovině $f(x, y)$ a impulsové odezvy $h(x, y)$, označované jako *PSF*.

Konvoluční teorém převádí výpočetně náročnou konvoluci v prostorové oblasti na mnohem méně náročné násobení v oblasti kmitočtové. Aplikací Fourierovy transformace na obě strany rovnice (1) vychází

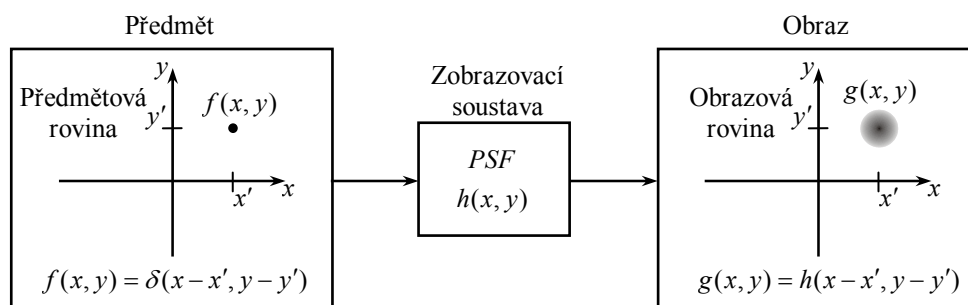
$$\mathcal{F}\{g(x, y)\} = \mathcal{F}\{f(x, y) * h(x, y)\} \quad (2)$$

a s uvážením konvolučního teorému platí

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v). \quad (3)$$

Funkce $F(u, v)$ je Fourierovým obrazem funkce $f(x, y)$ a vyjadřuje spektrum předmětu na vstupu zobrazovací soustavy, funkce $G(u, v)$ je Fourierovým obrazem funkce $g(x, y)$ a vyjadřuje spektrum obrazu na výstupu soustavy, $H(u, v)$ je přenosová funkce, která dává do vztahu tato spektra. Proměnné u, v vyjadřují složky takzvaných prostorových kmitočtů ve směru souřadných os x, y .

Skládá-li se zobrazovací soustava z n *nezávislých* subsystémů, které jsou popsány svými



Obr. 1: Impulsová odezva zobrazovací soustavy *PSF*

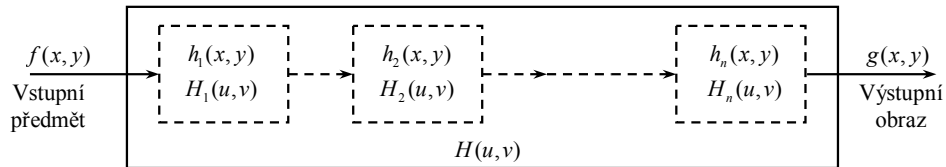
impulsovými odezvami $h_1(x, y) \dots h_n(x, y)$, je celková impulsová odezva soustavy

$$h(x, y) = h_1(x, y) * h_2(x, y) * \dots * h_n(x, y) . \quad (4)$$

S využitím konvolučního teorému je možno převést konvoluci impulsových odezev na prosté násobení odpovídajících přenosových funkcí $H_1(u, v) \dots H_n(u, v)$, kdy pro celkovou přenosovou funkci $H(u, v)$ platí

$$H(u, v) = H_1(u, v) \cdot H_2(u, v) \cdot \dots \cdot H_n(u, v) . \quad (5)$$

V obou případech (4) i (5) je důležitým předpokladem vzájemná *nezávislost* parciálních impulsových odezev resp. přenosových funkcí jednotlivých zobrazovacích subsystémů.



Obr. 2: Celková optická přenosová funkce zobrazovací soustavy

Přenosová funkce $H(u, v)$ se v zobrazovacích soustavách označuje jako optická přenosová funkce, neboli *OTF (Optical Transfer Function)*. Fourierovým obrazem impulsové odezvy $h(x, y)$ je vyjma speciálních případů symetrie *PSF*, obecně komplexní funkce *OTF*

$$OTF \equiv \mathcal{F}\{h(x, y)\} = |H(u, v)| e^{j\phi(u, v)} . \quad (6)$$

Přenosová funkce $H(u, v)$ je komplexní, má tedy modul a fázi. Modul *OTF* se označuje jako modulační přenosová funkce, neboli *MTF (Modulation Transfer Function)*

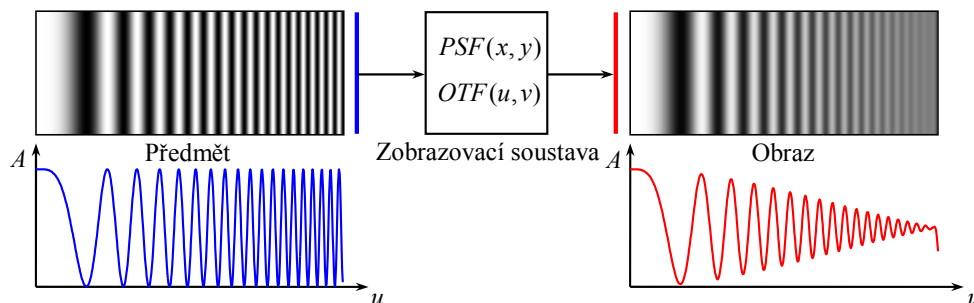
$$MTF \equiv |H(u, v)| \quad (7)$$

a argument *OTF* se nazývá fázová přenosová funkce, neboli *PTF (Phase Transfer Function)*

$$PTF \equiv \angle H(u, v) = \phi(u, v) . \quad (8)$$

Modulační přenosová funkce *MTF* má mezi charakteristikami popisujícími přenosové vlastnosti zobrazovacích soustav výsadní postavení. Vedle definice *MTF* jako modulu *OTF* uvedené ve vztahu (7), se běžně používá ekvivalentní definice *MTF* vycházející z názorné představy sledování kontrastu sinusového testovacího obrazce s proměnným prostorovým kmitočtem na výstupu zobrazovacího systému. Toto přiblížení prakticky odpovídá sestavám používaným pro měření *MTF* u reálných zobrazovacích systémů.

Modulační přenosová funkce *MTF* se pro *LSI* zobrazovací soustavy definuje jako podíl kontrastu výstupního obrazu v obrazové rovině ku kontrastu vstupního předmětu v předmětové rovině zobrazovacího systému.



Obr. 3: Ilustrace vlivu *MTF* na kontrast obrazu na výstupu soustavy

Kontrast M , označovaný v případě sinusového obrazce též jako modulace, je definován podílem amplitudy střídavé sinusové složky ac ku složce stejnosměrné dc

$$M = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} = \frac{ac}{dc} , \quad (9)$$

kde A_{max} je maximální a A_{min} minimální hodnota jasu.

Výstupem *LSI* zobrazovací soustavy je v případě sinusového obrazce na vstupu opět sinusový obrazec. Omezená prostorová rozlišovací schopnost systému způsobí snížení kontrastu obrazu na výstupu M_o oproti kontrastu předmětu na jeho vstupu M_i , což vyjadřuje veličina nazývaná přenos modulace *MT* (*Modulation Transfer*)

$$MT = \frac{M_o}{M_i}. \quad (10)$$

Modulační přenosová funkce *MTF* je dána kmitočtovou závislostí přenosu modulace *MT*

$$MTF \equiv \frac{M_o(u, v)}{M_i(u, v)}, \quad (11)$$

kde u, v jsou prostorové kmitočty. *MTF* se obvykle udává jako poměrná charakteristika normovaná pro nulový prostorový kmitočet k jedné.

Pro potřeby měření *MTF* se používá harmonický pruhový testovací obrazec, který je ve zjednodušeném jednorozměrném případě definován funkcí

$$f(x; u) = A_0 (1 + \cos(2\pi ux)), \quad (12)$$

kde x je prostorová souřadnice a u je prostorový kmitočet ve směru x .

Testovací obrazec na vstupu má obvykle nulovou hodnotu minimálního jasu $A_{min} = 0$, pak je kontrast předmětu na vstupu zobrazovací soustavy jednotkový $M_i = 1$ a pro *MTF* podle rovnice (11) platí

$$MTF \equiv M_o(u) = \frac{|H(u)|}{H(0)}, \quad (13)$$

což odpovídá vyjádření *MTF* jako poměrné charakteristiky normované pro nulový prostorový kmitočet k jedné.

2 MTF jednoduché optické soustavy

Vzhledem k vlnové povaze světla nemůže žádná optická soustava se vstupní aperturou (otvorem) konečných rozměrů zobrazit bodový zdroj světla z roviny předmětové jako ideální bod do roviny obrazové. Vlivem difrakce (ohybu) světla bude zobrazovaný bod rozostřený a difrakční obrazec, který takový systém vytvoří, se nazývá *Airyho disk*. Optická soustava, která má dokonale korigovány všechny zobrazovací vady a trpí pouze rozostřením obrazu vlivem difrakce, se označuje anglickým termínem *diffraction limited*.

Optická přenosová funkce difrakčně omezené optické soustavy s kruhovou aperturou získaná jako Fourierova transformace impulsové odezvy [1] je

$$OTF(u_r) = H(u_r) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{u_r}{u_c}\right) - \frac{u_r}{u_c} \sqrt{1 - \left(\frac{u_r}{u_c}\right)^2} \right] & u_r \leq u_c \\ 0 & u_r > u_c \end{cases}, \quad (14)$$

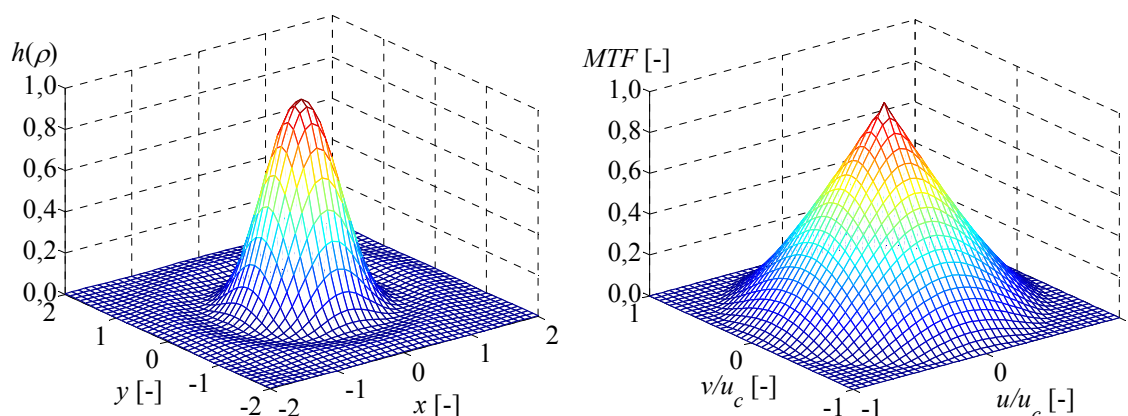
kde u_r je prostorový kmitočet v radiálním směru (vzhledem ke kruhové symetrii *OTF*) a u_c je mezní prostorový kmitočet optické soustavy v obrazové rovině. Pro tento mezní kmitočet platí vztah

$$u_c = \frac{1}{\lambda(F/\#)}, \quad (15)$$

kde λ je vlnová délka a parametr $F/\#$ je pro předmět v nekonečnu $a \rightarrow \infty$ (prakticky $a \gg f \approx a > 100f$) dán poměrem ohniskové vzdálenosti f čočky a průměru apertury (otvoru, pupily) D

$$F/\# = \frac{f}{D}, a \rightarrow \infty. \quad (16)$$

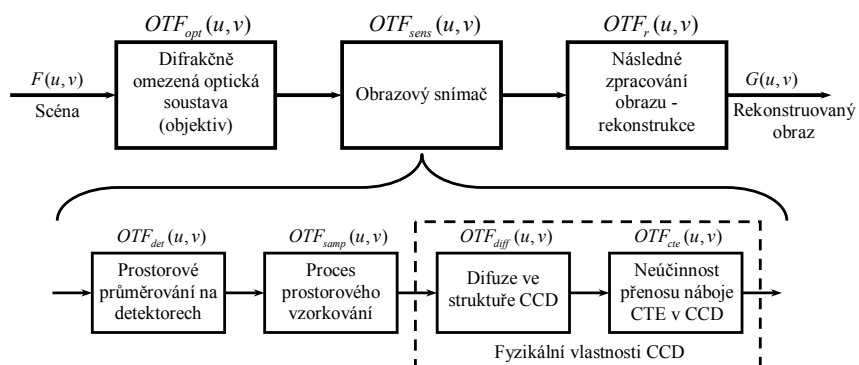
Na Obr. 4 je graficky znázorněn profil difrakčního obrazce (impulsové odezvy optické soustavy) a MTF difrakčně omezené optické soustavy pro kruhovou aperturu.



Obr. 4: Profil difrakčního obrazce a MTF difrakčně omezené optické soustavy pro kruhovou aperturu

3 Model použitý pro výpočet celkové MTF systému s obrazovým snímačem

Model uvažovaného systému zahrnuje difrakčně omezenou optiku a vlastní obrazový senzor. V dnešní době jsou zdaleka nejrozšířenějšími typy obrazových senzorů CCD snímače, proto jsou v modelu zahrnuty přenosové charakteristiky, které jsou ovlivněny také konstrukčními vlastnostmi CCD , jako je difuze, či účinnost přenosu náboje CTE (*Charge Transfer Efficiency*). V praxi je celková MTF obrazového systému závislá též na použitých algoritmech následného zpracování obrazové informace z obrazového snímače. Tato problematika je však extrémně rozsáhlá a v modelu není zahrnuta.



Obr. 5: Model obrazového systému s obrazovým snímačem pro výpočet celkové MTF

Model obrazového systému z Obr. 5 se skládá ze znázorněných subsystémů a celková optická přenosová funkce $OTF(u, v)$ je dána součinem parciálních OTF jednotlivých subsystémů

$$OTF(u, v) = OTF_{opt}(u, v) \cdot OTF_{sens}(u, v) \cdot OTF_r(u, v), \quad (17)$$

kde $OTF_{opt}(u, v)$ je optická přenosová funkce optického subsystému, $OTF_{sens}(u, v)$ je optická přenosová funkce vlastního obrazového snímače a $OTF_r(u, v)$ je ekvivalentní optická přenosová funkce následného zpracování – zde pro zjednodušení uvažována $OTF_r(u, v) = 1$. Celková optická přenosová funkce modelu obrazového systému bez následného zpracování je tedy dána

$$OTF(u, v) = OTF_{opt}(u, v) \cdot OTF_{sens}(u, v), \quad (18)$$

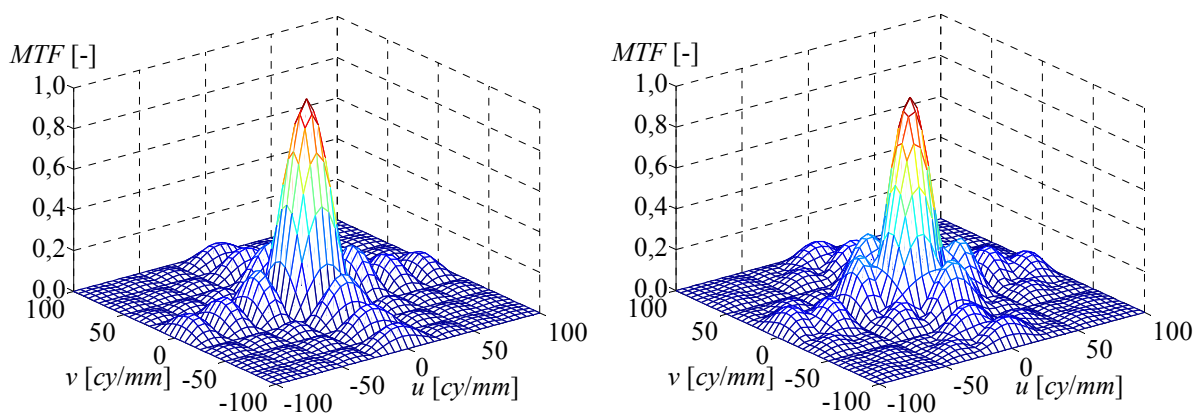
čemuž odpovídá modulační přenosová funkce MTF

$$MTF(u, v) = MTF_{opt}(u, v) \cdot MTF_{sens}(u, v). \quad (19)$$

Přenosové vlastnosti difrakčně omezené optické zobrazovací soustavy byly stručně diskutovány a včetně výsledného vztahu $MTF_{opt}(u, v)$ pro kruhovou aperturu uvedeny výše (14). Problematika určení přenosových charakteristik obrazového senzoru je daleko rozsáhlejší. Ve zjednodušeném modelu systému na Obr. 5 je optická přenosová funkce obrazového snímače $OTF_{sens}(u, v)$ dána součinem

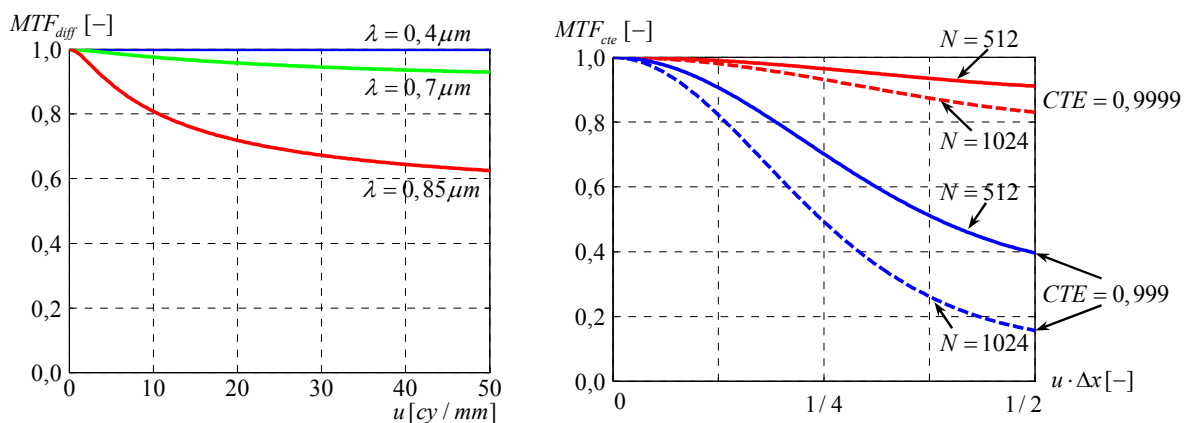
$$OTF_{sens}(u, v) = OTF_{det}(u, v) \cdot OTF_{samp}(u, v) \cdot OTF_{diff}(u, v) \cdot OTF_{cte}(u, v), \quad (20)$$

kde $OTF_{det}(u, v)$ je přenosová funkce detektoru, $OTF_{samp}(u, v)$ je vzorkovací přenosová funkce, $OTF_{diff}(u, v)$ je difuzní přenosová funkce a $OTF_{cte}(u, v)$ je přenosová funkce účinnosti přenosu náboje ve struktuře CCD.



Obr. 6: Dvourozměrné MTF čtvercového detektoru a detektoru ve tvaru písmene L

Přenosová funkce detektoru $OTF_{det}(u, v)$ a vzorkovací přenosová funkce $OTF_{samp}(u, v)$ byly diskutovány a pro různé geometrické tvary aktivní oblasti detektoru, či vzorkovací rastry odvozeny v práci [4] a zejména [5]. Jak přenosová funkce detektoru Obr. 6, tak i vzorkovací přenosová funkce odráží geometrické uspořádání snímače a jedná se tedy o tzv. geometrické MTF .

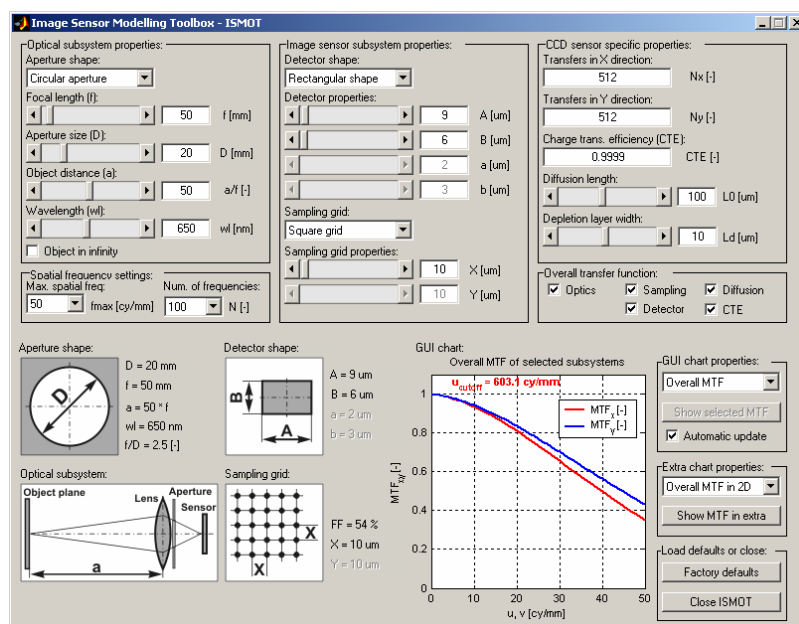


Obr. 7: Průběh difuzní MTF a MTF účinnosti přenosu náboje pro různé parametry CCD snímače

Difuzní přenosová funkce $OTF_{diff}(u, v)$ a přenosová funkce účinnosti přenosu náboje $OTF_{cte}(u, v)$ jsou ovlivněny fyzikálními vlastnostmi struktury CCD snímače. S rostoucí vlnovou délkou dochází k absorpci fotonů ve větší hloubce materiálu detektoru. Vygenerovaný fotoelektron se náhodně pohybuje v polovodičovém substrátu dokud nedojde k rekombinaci, nebo dokud nedosáhne hrany oblastí prostorového náboje. Pokud ke generaci fotoelektronu dochází ve větší hloubce zvětšuje se pravděpodobnost, že dojde k přechodu fotoelektronu do vedlejší buňky. To má za následek rozmazání snímaného obrazu, což popisuje právě difuzní MTF . Struktura CCD snímače je založena na postupném přesunu náboje mezi sousedními elektrodami. Pro správnou funkci snímače je důležité, aby se všechny signálové náboje přenesly z potenciálové jámy pod jednou elektrodou do potenciálové jámy pod elektrodou sousední. Fakt, že účinnost přenosu náboje CTE je menší než jedna znamená, že se vždy malá část náboje nepřesune, ale zpozdí se a přidá až k následujícímu nábojovému svazku a tím dochází k rozmazání snímaného obrazu, což popisuje MTF účinnosti přenosu náboje.

4 Analýza přenosových vlastností obrazových snímačů v Matlabu

Celková modulační přenosová funkce obrazového systému s obrazovým snímačem je dána součinem parciálních přenosových funkcí (17). Průběh každé z těchto parciálních MTF je ovlivněn řadou para-



Obr. 8: Grafické uživatelské rozhraní *ISMOT*

metrů obrazového systému. Pro efektivní zkoumání vlivu jednotlivých parametrů je vhodné využít počítačového programu, který by umožňoval interaktivní analýzu přenosových charakteristik obrazového systému v závislosti na zadaných parametrech. V tomto odstavci je uveden popis grafického uživatelského rozhraní *GUI* (*Graphical User Interface*), které bylo za účelem analýzy přenosových charakteristik obrazových snímačů realizováno v programovém prostředí *Matlab*.

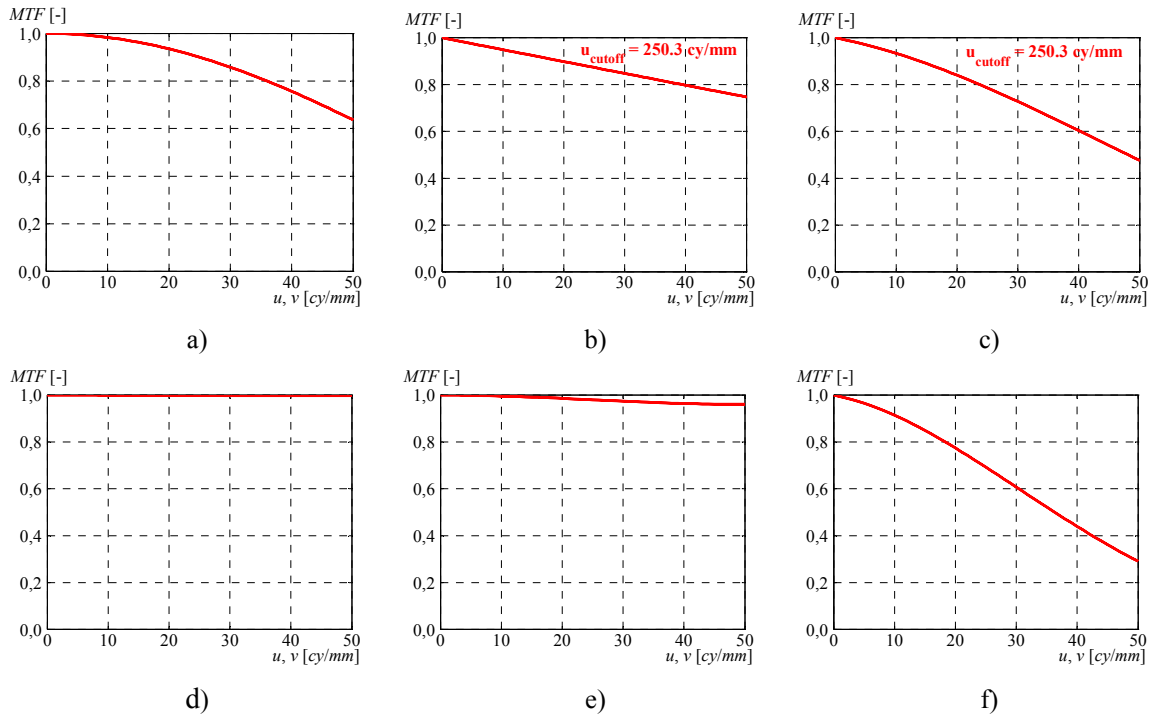
Navržené *GUI ISMOT* (*Image Sensor Modelling Toolbox*) představuje rozhraní mezi uživatelem a základními skripty *Matlabu*. Tyto skripty provádějí podle zadaných parametrů vlastní výpočty charakteristik jednotlivých komponentů celého obrazového systému a výsledky tohoto výpočtu předávají opět *GUI*, které je následně vizualizuje.

Zadávané parametry lze rozdělit do tří základních skupin, jsou to: 1) parametry optického subsystému (difrakčně omezená optická soustava s kruhovou či čtvercovou aperturou), 2) geometrické parametry obrazového snímače popisující tvar a rozměry jednotlivých detektorů a jejich uspořádání po ploše snímače (vzorkovací rastr) a 3) fyzikální vlastnosti snímače *CCD* důležité pro výpočet difuzní *MTF* a *MTF* účinnosti přenosu náboje. Výstupem jsou grafy vypočítaných modulačních přenosových funkcí a to buď jako jednodimenzionální profily nebo dvoudimenzionální přenosové charakteristiky.

Protože *ISMOT* umožňuje ovlivňovat celou řadu parametrů soustavy s obrazovým snímačem, je dále uveden ilustrativní příklady využití, který je spíše praktického charakteru a má sloužit jako demonstrace možností *ISMOT*.

Pro správnou funkci obrazového systému složeného z optiky a obrazového snímače je třeba tyto dva prvky k sobě přizpůsobit, zejména s ohledem na průměr *Airyho disku* a rozměry detektoru. Úkolem je navrhnout parametry optické soustavy vhodné k předem danému obrazovému snímači a vykreslit přenosové charakteristiky celého obrazového systému. K dispozici je plošný *CCD* snímač se čtvercovými detektory o straně $A = 10 \mu\text{m}$, čtvercovým vzorkovacím rastrem se vzorkovací periodou $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ a celkovým počtem detektorů v řádce a sloupci $N_x = N_y = 400$. Tento senzor snímá předmět o maximální výšce $h_{obj} = 20\text{cm}$ ze vzdálenosti $a = 1\text{m}$ ve viditelném spektru optického záření.

MTF detektoru je jako základní komponenta celkové *MTF* obrazového snímače vynesena na Obr. 9 a) až do Nyquistova mezního kmitočtu který je $1/(2\Delta x) = 50\text{cy/mm}$, kde nabývá hodnoty přibližně $MTF = 0,637$. Dále jsou do celkové *MTF* zahrnuty fyzikální vlastnosti *CCD* snímače, tedy difuzní *MTF* a *MTF* ovlivněná sníženou účinností přenosu náboje. Pro tento případ byly do *ISMOT* zadány následující parametry: počet přenosů náboje ve struktuře *CCD* $N_x = N_y = 200$ (byla zvolena poloviční hodnota oproti skutečnému počtu detektorů [5]), účinnost přenosu náboje $CTE = 0,9999$, difuzní délka $L_{diff} = 50 \mu\text{m}$ a šířka oblasti prostorového náboje $L_D = 10 \mu\text{m}$. Z grafů na Obr. 9 d,e) je zřejmé, že *MTF* účinnosti přenosu náboje ani difuzní *MTF* v tomto případě téměř neovlivní celkovou *MTF* obrazové soustavy. Celková *MTF* se na Nyquistově mezním kmitočtu snížila na $MTF = 0,456$. Celková *MTF* modelovaného obrazového systému se zahrnutím všech složek (včetně vzorkovací



Obr. 9: Přizpůsobení optické části a detektoru: a) *MTF* detektoru, b) *MTF* optiky, c) *MTF* optiky a detektoru, d) difuzní *MTF*, e) *MTF* účinnosti přenosu náboje, f) celková *MTF*

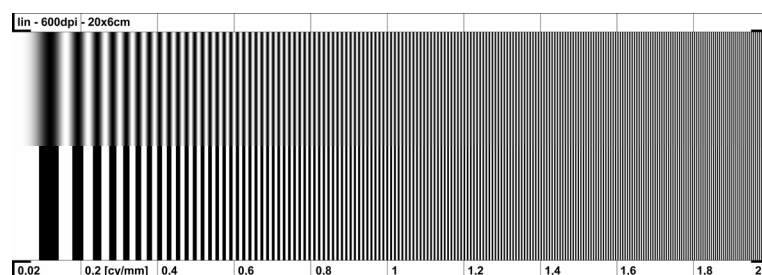
MTF) má pro Nyquistův mezní kmitočet velikost $MTF = 0,290$ (Obr. 9 f). Poklesu celkové *MTF* o $3dB$ oproti maximu přenosu odpovídá prostorový kmitočet přibližně $u_{-3dB} = 24cy/mm$, což představuje rozlišovací schopnost použitého obrazového systému vyjádřenou v počtu cyklů (párů čar) na výšku obrazu $u_{-3dB} \cdot h_{img} = 96cy$. Na tomto příkladu byly ukázány základní možnosti využití grafického uživatelského rozhraní *ISMOT*.

5 Experiment s reálným obrazovým systémem

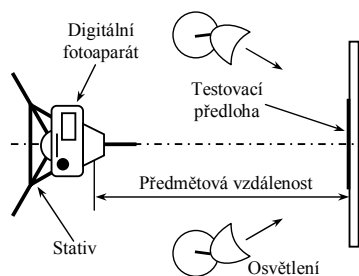
Přenosové vlastnosti reálného obrazového systému jsou ovlivněny množstvím parametrů, z nichž pouze některé se podaří do modelu zahrnout. Volba modelu má zásadní vliv na shodu skutečných a teoreticky předpokládaných vlastností obrazové soustavy. V každém případě je třeba měřením ověřit, zda teoreticky navržená soustava dosahuje požadovaných přenosových parametrů. Speciálně pro vyhodnocení přenosových vlastností těchto soustav bylo realizováno grafické uživatelské rozhraní v programovém prostředí *Matlab*.

Byla použita přímá metoda měření *MTF*, která je v praxi běžně používaná, vychází z definice *MTF* pomocí podílu kontrastu obrazu na výstupu obrazové soustavy a kontrastu obrazové předlohy. Při měření se využívá obrazových vzorů se známou závislostí kontrastu (zpravidla konstantní a rovnou jedné) na prostorovém kmitočtu. Obrazové vzory mohou mít různou podobu. Používají se např. předlohy s lineárně (Obr. 10) či logaritmicky spojitě přeladovanými prostorovými kmitočty, *Siemensova* růžice, obrazové vzory s několika pruhy (zpravidla tři, nebo čtyři) o daném prostorovém kmitočtu a řada dalších [5].

K vygenerování obrazových vzorů byl v programovém prostředí *Matlab* navržen jednoúčelový skript. Základem tohoto skriptu jsou vztahy (např. [7]) generující lineárně a logaritmicky přeladovaný



Obr. 10: Obrazový vzor s lineárně přeladovaným prostorovým kmitočtem sinusového a obdélníkového profilu



Obr. 11: Uspořádání měřicího pracoviště pro měření digitálních fotoaparátů

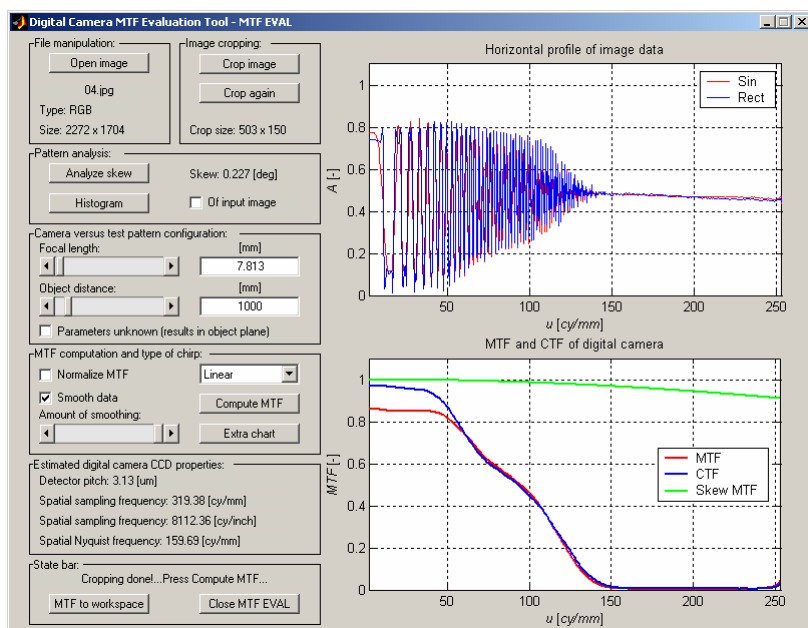
jednorozměrný signál (s harmonickým a obdélníkovým průběhem) převzorkovaný na vyšší vzorkovací kmitočet, než bude odpovídat konečnému obrázku. Pomocí digitální filtrace a následné decimace na požadovaný nižší vzorkovací kmitočet je minimalizován efekt aliasingu. Takto upravené jednorozměrné vektory tvoří řádky výsledné obrazové matice. Prostorové kmitočty obou vygenerovaných obrazových předloh jsou v rozsahu $0,02\text{cy/mm}$ až 2cy/mm .

Pro měření *MTF* digitálního fotografického přístroje bylo použito jednoduché měřicí pracoviště (Obr. 11) sestávající z běžně dostupných komponentů, což umožňuje realizovat podobná měření i v amatérských podmínkách na rozdíl od některých metod, které využívají laserové svazky, či speciální optické přístroje.

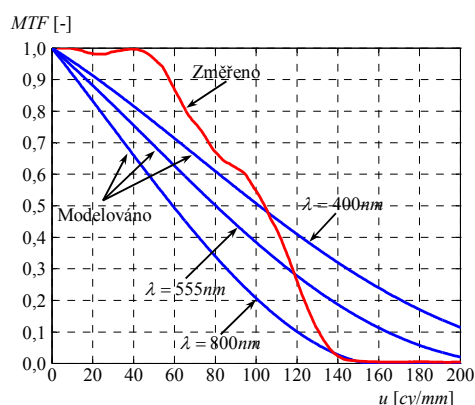
Zpracování výsledků měření bylo vyřešeno realizací jednoúčelového grafické rozhraní *MTF EVAL*, které bylo implementováno v programu *Matlab*. Toto rozhraní umožňuje provádět řadu manipulací s výstupními obrázky měření a jako výsledek poskytuje průběh *MTF* v závislosti na prostorovém kmitočtu v obrazové rovině *CCD* snímače digitálního fotoaparátu a pokud není známa předmětová a ohnisková vzdálenost, jsou uvažovány prostorové kmitočty v rovině předmětové. *MTF EVAL* umožňuje vyhodnocovat *MTF* s použitím pro tento účel speciálně navržené testovací předlohy s lineárně (Obr. 10), či logaritmicky přeladovaným prostorovým kmitočtem.

V předchozím odstavci bylo popsáno grafické uživatelské rozhraní pro modelování přenosových charakteristik obrazových snímačů *ISMOT*. Zajímavé je porovnání modelovaných a změřených přenosových charakteristik. Parametry modelu optického subsystému *ISMOT* vyplývají z konfigurace měření: kruhová apertura objektivu, ohnisková vzdálenost $f = 7,81\text{mm}$, uvažovaný průměr vstupní apertury $D = f/C = 7,81\text{mm}/8 = 0,98\text{mm}$, kde $C = 8$ je clonové číslo (předmětem měření byl digitální fotoaparát *Canon Power Shot A80*).

Pro potřeby modelování v *ISMOT* je uváženo značné zjednodušení subsystému obrazového snímače. Tvar detektoru byl nastaven čtvercový, stejně jako vzorkovací rastr. Rozměr detektoru i vzorkovací perioda čtvercového rastru byly nastaveny na stejnou hodnotu ($FF = 100\%$), která pro



Obr. 12: Grafické uživatelské rozhraní *MTF EVAL*



Obr. 13: Porovnání průběhu *MTF* změřeného a modelovaného v *ISMOT*

výrobcem udávanou rozlišovací schopnost 8114,2857dpi v obrazové rovině vychází $\Delta x = 3,13\mu m$.

Na Obr. 13 je znázorněn změřený průběh *MTF* a průběh *MTF* získaný pro tři vlnové délky modelováním soustavy v *ISMOT*. Celková *MTF* je dána součinem nejdůležitějších parciálních složek *MTF*, a to *MTF* detektoru a *MTF* difrakčně omezené optické soustavy. Z modelovaného průběhu vyplývá, že přenosové vlastnosti tohoto systému jsou pro daný relativní otvor omezeny objektivem přístroje. Toto lze ilustrovat také porovnáním velikosti detektoru $\Delta x = 3,13\mu m$ a průměru *Airyho disku* $d_{Airy} = 10,8\mu m$ pro vlnovou délku $\lambda = 555nm$, což odpovídá meznímu prostorovému kmitočtu optické soustavy $u_c = 226cy/mm$.

Změřená *MTF* nabývá pro nízké prostorové kmitočty větších hodnot než teoreticky modelovaná *MTF* v *ISMOT*. Toto je způsobeno zejména konstrukcí optické soustavy, kde lze pomocí speciálních postupů upravit tvar *OTF* optické části (na úkor světelné propustnosti, difrakční mez nelze překročit) a dosáhnout vyrovnanějšího průběhu *MTF* pro zvolené pásmo prostorových kmitočtů.

I přes poměrně malou korelovanost ve tvaru změřené a modelované *MTF* lze vzhledem k extrémně zjednodušenému modelu považovat výsledek za uspokojivý. *MTF* digitálního fotoaparátu je mimo uvažované *MTF* optické části a detektoru ovlivněna vlastnostmi subsystémů, které nebyly v modelu zahrnuty. Dokonalejší model by musel obsahovat navíc např. reálnou neideálně na optické vady korigovanou optickou soustavu, případnou mikročočkovou strukturu, optický antialiasingový filtr, přesný popis struktury mosaikového (*Bayerova*) barevného filtru, přesnější geometrický model *CCD*, fyzikální model *CCD*, *A/D* převod, interpolační algoritmy zpracování barevné informace (*demosaicing*), dodatečné číslicové zpracování obrazové informace (umělé doostřování), popis ztrátové komprese obrazových dat *JPEG* a mnoho dalších.

6 Závěr

Základní složkou celkové *MTF* obrazového snímače je *MTF* detektoru. Jako další faktor ovlivňující přenosové vlastnosti snímače byl zkoumán vliv vzorkovacího rastru. Protože výsledná *MTF* obrazového snímače není ovlivněna pouze jeho geometrickým uspořádáním, ale také fyzikálními vlastnostmi struktury senzoru, byly do modelu celkové *MTF* zahrnuty též *MTF* difuzní a *MTF* daná sníženou účinností přenosu náboje. Ukázalo se, že tyto dvě složky mají pro běžná uspořádání snímačů na celkovou *MTF* zanedbatelný vliv. Obrazový snímač se nejčastěji využívá ve spojení s optickou zobrazovací soustavou – objektivem. Z tohoto důvodu byla do celkového modelu obrazového systému zahrnuta též *MTF* idealizované difrakčně omezené optické soustavy.

Výsledky uvedeného teoretického rozboru byly využity při implementaci grafického uživatelského rozhraní *ISMOT* (*Image Sensor Modelling Toolbox*) v programovém prostředí *Matlab*. Tento program umožňuje interaktivně měnit řadu parametrů obrazového systému a pozorovat, jaký mají vliv na průběh celkové *MTF* soustavy. Přesnost charakteristik získaných v *ISMOT* je přímo ovlivněna použitým velice zjednodušeným modelem obrazového systému.

Model obrazové soustavy v sobě nemůže zahrnout veškeré parametry ovlivňující výsledné přenosové vlastnosti, a proto má velký význam měření přenosových charakteristik obrazových systémů. Vlastní měření bylo provedeno s využitím pro tento účel speciálně navržených testovacích obrazců s lineárně a logaritmicky přeladovaným prostorovým kmitočtem s následným vyhodnocením výsledků v grafickém uživatelském rozhraní *MTF EVAL* implementovaným v programovém prostředí *Matlab*.

Při porovnání změřených a s pomocí *ISMOT* modelovaných charakteristik není shoda ideální, ale vzhledem k velice zjednodušenému modelu v *ISMOT* a podmínkám měření je až překvapivě dobrá.

7 Poděkování

Tato práce byla podporována grantem č.102/02/0133 Grantové Agentury ČR „Kvalitativní aspekty kompresních metod obrazu v multimediálních systémech“. Část práce byla podpořena grantem v rámci výzkumného záměru doktorského projektu Grantové Agentury ČR č. 102/03/H109 „Metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace“.

8 Literatura

- [1] GOODMAN, Joseph W. *Introduction to Fourier Optics*. Second edition. Electrical and computer engineering series. Boston: McGraw-Hill, 1996.
- [2] PAPOULIS, A. *Systems and transforms with applications in optics*. New York: McGraw-Hill, 1968. 474 s.
- [3] HOLST, Gerald C. *CCD arrays, cameras, and displays*. Second edition. Winter Park (Florida): JCD Publishing; Bellingham (Washington): SPIE PRESS, 1998, 378 s. ISBN 0-9640000-4-0; ISBN 0-81294-2853-1.
- [4] BOREMAN, Glenn D. *Modulation transfer function in optical and electro – optical systems*. Tutorial texts in optical engineering Volume TT52. Bellingham (Washington): SPIE PRESS, 2001, 110 s. ISBN 0-8194-4141-0.
- [5] FLIEGEL, K. *Modelování charakteristik obrazových snímačů v Matlabu*. Praha: ČVUT. Fakulta elektrotechnická. Katedra radioelektroniky, 2004. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Hozman.
- [6] HOZMAN, J., FLIEGEL, K., VÍTEK, S., PÁTA, P. The Effect of Image Sensor Configurations on Image Quality. in *Proc. IWSSIP 03*. Praha, 2003, s. 272-275.
- [7] KADLEC, F. *Zpracování akustických signálů*. Vydání první. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 189 s. ISBN 80-01-02588-8.

Ing. Karel Fliegel, Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT, Technická 6, 166 27 Praha 6.
Tel: +420 2 2435 2113, Fax: +420 2 3333 9801, E-mail: fliegek@fel.cvut.cz