

Využití prostředí MATLAB pro simulaci optického zpracování informace

Petr Páta, Miloš Klíma, Jan Kaiser

Katedra radioelektroniky, K337, ČVUT FEL Praha, Technická 2, 166 27, Praha 6
E-mail: pata@fel.cvut.cz, klima@fel.cvut.cz, xkaiserj@fel.cvut.cz

Abstrakt

Optické zpracování obrazové informace je novým moderním a bezesporu perspektivním přístupem ve zpracování obrazu a signálu. Analogie klasických numerických metod jako je násobení matice s vektorem, resp. maticí, Fourierově transformaci, korelaci filtraci a jiné je možné optickou cestou realizovat snadným experimentálním uspořádáním. To je možné především elektrickou neutralitou fotonů, jejich rychlým pohybem a také principiálním masivním paralelismem. V práci jsou prezentovány základní úlohy z optického zpracování obrazové informace využívané k výuce studentů na katedře radioelektroniky FEL ČVUT v Praze. Každá metoda má svou simulační část ve které je numericky spočítán výsledek v programovém prostředí MATLAB a dále část experimentální ve které jsou výsledky prakticky ověřeny.

1. Úvod

Aplikace optického přístupu ke zpracování obrazové informace s sebou přináší mnoho nesporných výhod. Jako nosiče informace se využívá fotonů, které jsou elektricky neutrální a pohybují se rychlostí světla. Díky elektrické neutralitě neprobíhá coulombovská interakce mezi jednotlivými fotony. Je tedy možné na malém prostoru přenášet mnoho různých svazků, které se mohou navzájem i křížit. Optické systémy nabízí rozmanité aplikace použitelné především ve zpracování obrazu a signálu [1]. V první řadě je nutné uvést analogové paralelní násobení, prostorová a časová integrace, přizpůsobená filtrace a 2D korelace. Ve všech těchto aplikacích se využívá poslední obrovské výhody optického přístupu ke zpracování informace – skutečně masivního paralelismu. Fotony do systému vstupují, procházejí jím a opět vycházejí v paralelním svazku.

Zvláštním případem optického procesoru je tzv. algebraický procesor. Ten nabízí implementaci násobení matice s vektorem a matice s maticí. Tyto procesory jsou vhodné ve všech případech zpracování signálu, kde se využívá maticový přístup (viz Kalmanova filtrace apod.). Nesmírnou výhodou použití optického přístupu je také přirozená, fyzikální, implementace Fourierovy transformace jako výsledek difrakce světla. Vhodné použití této vlastnosti s sebou přinese úsporu času při výpočtu dvourozměrné filtrace, korelace a např. i konvoluce.

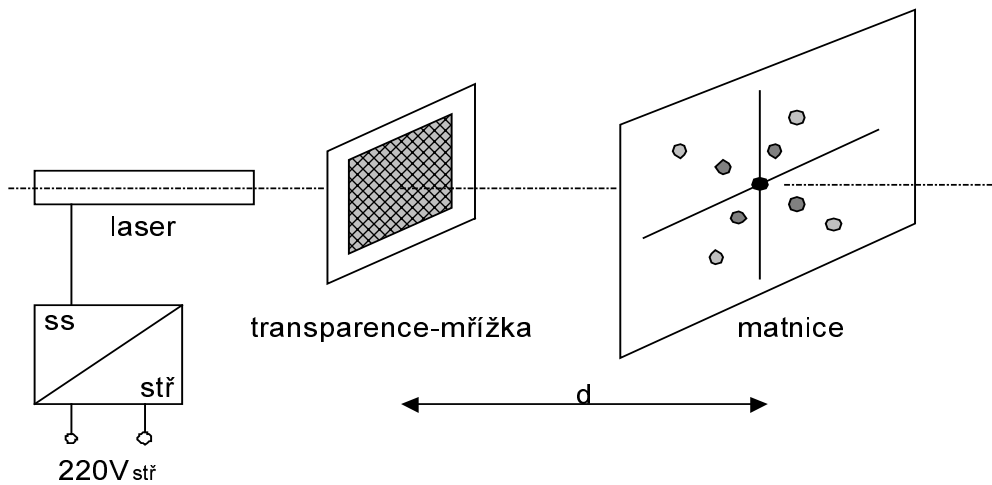
V této jsou popsány základní fyzikální úlohy z optického zpracování obrazové informace. Při jejich výběru byl kladen zvláštní důraz na názornost a především ilustrativnost vlastností optického přístupu. Úlohy jsou připravovány a postupně realizovány ve výuce studentů na FEL ČVUT v předmětech Zpracování obrazu a fotonika a Vybrané partie z fotoniky na katedře radioelektroniky. Každý problém je nejprve teoreticky vysvětlen, potom je prováděna numerická simulace v programovém prostředí MATLAB. Výsledky z této simulace jsou srovnány s reálnými naměřenými výsledky.

2. Difrakce světla

Vlnové vlastnosti světla se projeví především na strukturách s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou použitého záření. Prochází-li světlo strukturou s proměnnou transparentností dojde k projevu ohybových jevů. Difrakce může probíhat na pravidelné struktuře (např. mříži), otvoru, difrakční mřížce nebo třeba na mikročástečkách. Právě ohyb na pravidelné struktuře, mřížce z vidikonové kamery, je předmět první demonstrace. Poloha maxima jednotlivých spektrálních řádů je popsána známým vztahem

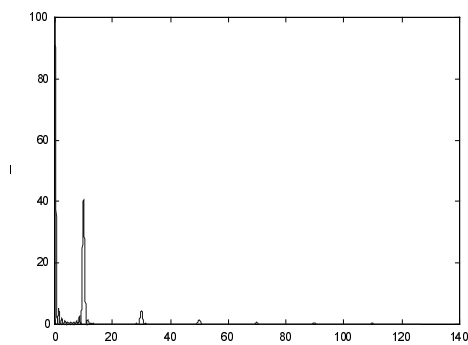
$$d \sin \alpha = N \lambda$$

Zde d je tak zvaná mřížková konstanta, N je řád maxima ($N = 0, 1, 2, \dots$), λ vlnová délka

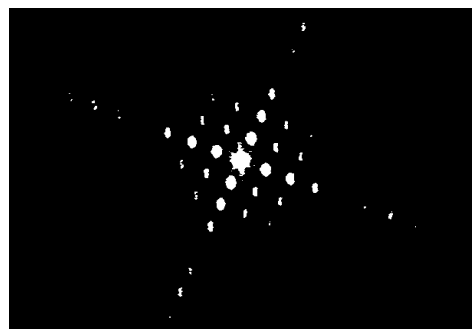


obr. 1 Experimentální uspořádání demonstrace difrakce světla na pravidelné struktuře, mříži.

použitého záření a konečně α je úhel pod kterým dojde k difrakci spektrálního maxima. Tento vztah samozřejmě platí v případě kolmo dopadající vlny na difrakční element. Průběh



obr. 2 Numericky simulovaný průběh amplitudy difrakované světelné vlny na struktuře z obr. 2.



obr. 3 Výsledek experimentu podle obr. 1. Difrakční obrazec optického svazku z červené laserové diody $\lambda = 659 \text{ nm}$ na vidikonové mříži.

intenzity spektra použité mříže byl proveden ve skriptu využívající známé Fraunhoferovo

přiblížení. Výsledek simulace je zobrazen na obr. 3. Ke kontrole numericky získaných výsledků byl realizován experiment sestavený podle obr. 1. Jako zdroj světla byla použita laserová dioda s vlnovou délkou $\lambda = 659 \text{ nm}$. Obraz získaný difrací světla na vidikonové mřížce je zobrazen na obr. 2. Je možné provést srovnání průběhu z obr. 3, kde je zobrazen řez spektrem ve směru jedné hlavní osy označené obvykle symbolem x .

3. Fourierova transformace optickou cestou

Fourierova transformace je přirozenou vlastností vlnové podstaty světla. Z jejího principu je jasné, že probíhá na jakékoliv struktuře – otvoru, transparentci nebo spojné čočce. Z Huygensova principu vyplývá, že libovolná vlna je tvořena kompozicí sférických vln. Neboli každý bod ležící na vlnoploše vlny se stává elementárním, bodovým, zdrojem záření vytvářejícím novou sférickou vlnu. S využitím tohoto faktu lze získat řešení Helmholtzovy rovnice ve tvaru známého Fresnelova integrálu

$$U(x_i, y_i, z_i) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_{\text{Apertura}} U(x_0, y_0, z_0) e^{\frac{jk}{2z}[(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]} dx_0 dy_0$$

V této rovnici je $U(x_0, y_0, z_0)$ je průběh transparence difrakované struktury, x_0, y_0, z_0 jsou souřadnice probíhající v rovině transparence, k vlnový vektor, x_i, y_i, z_i souřadnice v rovině stínítka, j imaginární jednotka a konečně z je vzdálenost stínítka od transparence.



obr. 4 Vstupní obr. pro numerickou simulaci filtrace ve Fourierově rovině



obr. 5 Numerická simulace filtrace testovacího obrázku filtrem typu dolní propust

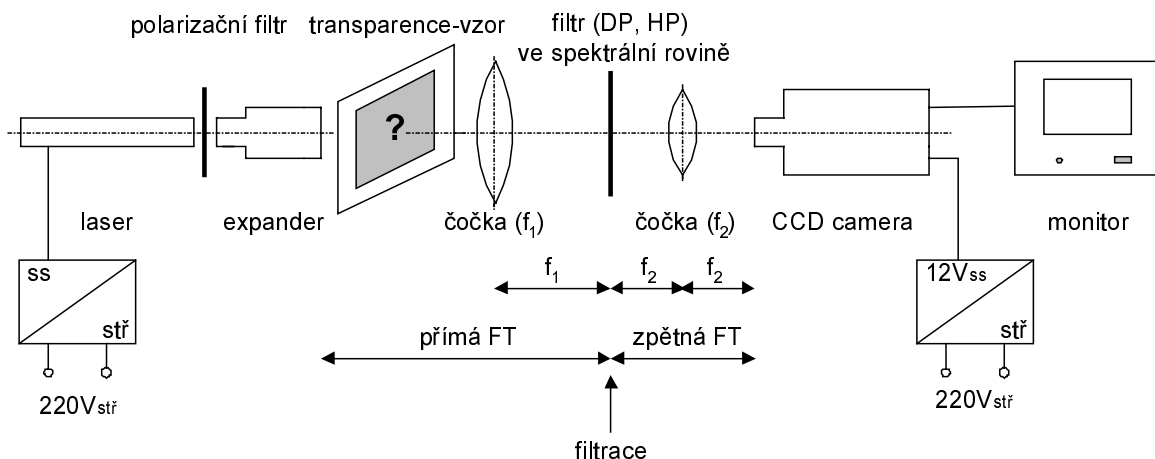
Použijeme-li spojnu čočku k fokusaci spektrálních složek dojdeme k vyjádření Fourierovy transformace optickou cestou

$$U(x_i, y_i, z_i) = e^{j\lambda f} e^{\frac{jk}{2f}(x_0^2 + y_0^2)} \iint_{\text{Apertura}} U(x_0, y_0, z_0) e^{-\frac{j2\pi}{\lambda f}[y_0 y_i + x_0 x_i]} dx_0 dy_0$$

Z podoby rovnice je zřejmé, že spojná čočka s ohniskovou vzdáleností f provádí Fourierovu transformaci pole apertury A ve vzdálenosti právě rovné ohniskové vzdálenosti použité čočky. Této rovině se často také říká fourierovská rovina. Tato významná vlastnost spojně čočky je základem mnoha analogových optických výpočetních systémů.

Příkladem robustnosti tohoto nástroje může být srovnání doby výpočtu Fourierovy transformace matice o rozměrech 64×64 bodů optickou a "digitální" cestou. Optimalizovanému procesoru trvá výpočet algoritmu FFT na zvolené matici v řádu 1 ms . Oproti tomu rychlost "optické implementace" FFT závisí pouze na rychlosti světla v použitém prostředí. S čočkou o ohniskové vzdálenosti $f = 10 \text{ cm}$ je výpočet proveden za $0,33 \text{ ns}$! Rozdíl je tedy více než 6 řádů!!!

K demonstraci optické Fourierovy transformace byla vybrána filtrace ve spektrální rovině. Experimentální a vlastně i simulační uspořádání je zobrazeno na obr. 6. Tam v rovině



obr. 6 Experimentální uspořádání demonstrace výpočtu Fourierovy transformace optickou cestou.

označené Filter probíhá filtrace vybraných spektrálních složek. Na obr. 4 je zobrazena vstupní obrazová matice určená k simulaci filtrace ve spektrální rovině. Obr. 5 zachycuje výsledek po upravení filtrem typu dolní propust. Velikost terčíku filtru je možné zvolit analogicky s optickou cestou. Výsledky z tohoto jsou zobrazeny na obr. 7, kde je vstupní obraz a na obr. 8 a 9, kde jsou zachyceny výsledky po filtraci dolní, resp. horní, propustí optickou cestou. V experimentu byl použit červená laserová dioda s $\lambda = 659 \text{ nm}$, polarizační filtr, expander 50x, transparence o rozměrech $24 \times 36 \text{ mm}$, Fourierova spojná čočka $f = 80 \text{ cm}$, dvě rovinná zrcátka, zpětná Fourierova spojná čočka $f = 15 \text{ cm}$, CCD kamera, frame grabber, monitor a pro filtr typu horní propust terčík o vhodných rozměrech, pro dolní propust otvor vybírající pouze spektrální složky blízké základní harmonické.

4. Závěr

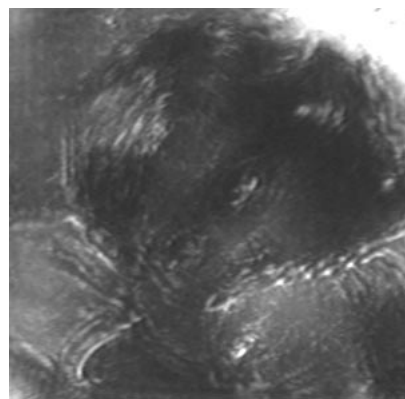
V práci byly prezentovány základní experimenty a numerické simulace demonstrující principy optického zpracování obrazové informace. Dalším možným využitím optického přístupu jsou pokročilé techniky využívající násobení matice s maticí resp. vektorem. Dále to může být metoda známá jako Joint Transform Correlation (JTC), adaptivní filtrace ve Fourierově rovině či optickou implementaci výpočtu různých integrálních transformací –



obr. 7 Vstupní obrazová matice pro experimentální ověření filtrace



obr. 8 Filtrace dolní propustí optickou cestou.



obr. 9 Upravení vstupního obr. filtrem typu horní propust ve Fourierově spektrální rovině optickou cestou.

waveletové, Hadamardově nebo Houghově [3].

Optický přístup ke zpracování signálu je moderní a bezesporu perspektivní směr moderní techniky. K plnému využití výše zmíněných vlastností je třeba vyřešit mnoho nesnází spojených s uváděním teorie do praxe. K tomu by měla sloužit i odborná výchova studentů na FEL ČVUT na katedře radioelektroniky.

5. Poděkování

Tato práce byla podpořena výzkumným projektem "Výuka fotonických metod zpracování informace" FRVŠ číslo 1850/2001. Část práce byla také částečně podpořena výzkumným grantem IGS 300109913 "The Scientific Image Data Optical Processing" ČVUT v Praze.

6. Literatura

- [1] F.T.S.Yu, D.A.Gregory, Optical Pattern Recognition: Architectures and Techniques, Proc. IEEE, 84, 5, May 1996, pp 733-752.
- [2] C.S.Weaver, J.W.Goodman, A technique for optically convolving two functions, Applied Optics, 5, 1966, pp 1248-1249.
- [3] G. Eichman, B. Z. Dong, Coherent optical production of the Hough transform, Applied Optics, 22(6), 1985, pp. 820 – 826.