

PROSTOROVÉ MODULACE V KOMPRIMOVANÉ HYPER SPEKTRÁLNÍ MIKROSKOPII

Lukáš Klein <lukas.klein@tul.cz>, Karel Žídek

Komprimované snímání je důležitým nástrojem v pokročilých zobrazovacích principech. Klíčovým prvkem ovlivňujícím kvalitu rekonstrukce je prostorová modulace, která je při měření využita. Tato práce se zabývá komplexním porovnáním různých modulací v hyperspektrální mikroskopii, díky kterému je možno testování v širokém poli podmínek zároveň.

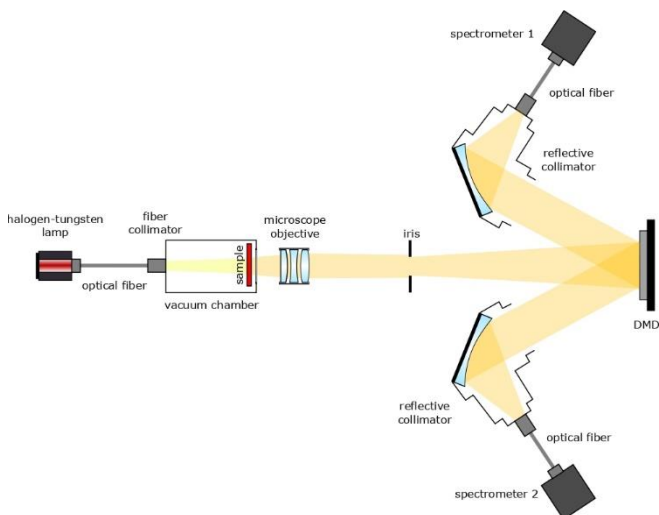
Klíčová slova: komprimované snímání, hyperspektrální zobrazení, DMD, modulace, masky

ÚVOD

Předpokladem pro využití komprimovaného snímání je řídkost vektoru rekonstruovaného signálu. Právě pro tento vektor jsou prostorové modulace bází a jejich volba tedy má velký vliv na výslednou kvalitu rekonstrukce. Cílem výzkumu je určit, které modulace jsou nejvhodnější pro univerzální použití bez závislosti na podobě zobrazovaného vzorku.

Oproti předchozím pracím v této oblasti věnujícím se převážně simulacím a makroskopické aplikaci [1]–[3] je zde důraz na aplikaci modulací v mikroskopii, kde malé množství dostupného světla značně komplikuje situaci. Kombinace s hyperspektrálním snímáním umožňuje testování v různorodých podmínkách (intenzita, inverzní maska, šum) v rámci jednoho měření.

METODIKA



Obrázek 1: Schéma sestavy využitě v experimentu

Využitý systém je detailněji popsán v předchozí práci. [4] Jedná se o dvojitou jednopixelovou kameru, jejíž centrem je modulátor DMD (digital micromirror device), který tvoří matice mikrozrcátek. V závislosti na přichozím napětí se jednotlivá mikrozrcátka nakloní do jednoho ze dvou směrů. Každá prostorová modulace je soubor binárních masek,

kteřé jsou postupně odesílány na DMD a nastaveny na matici. V obou směrech odrazu jsou sběry do optických vláken napojené na spektroskopy, které změří celková spektra pro každou nastavenou masku na modulátoru.

Testovacím vzorkem byl rozlišovací terč USAF 1951, který je složen z proužků o přesných tloušťkách a vzájemných vzdálenostech. Rozlišovací schopnost systému je posuzována podle toho, jak malé proužky dokáže jako jednotlivé zobrazit.

Jelikož má DMD výrazně větší rozlišení (1024x768 pixelů), než je potřebné pro jednopixelovou kameru, jsou zrcátka seskupovány a v závislosti na zvoleném rozlišení se tyto skupiny chovají jako jeden pixel. Pro naši aplikaci jsme zvolili rozlišení 64x64, 128x128 a 256x256.

Při každém testu byl vytvořen soubor 1500 masek, což odpovídá kompresnímu poměru přibližně 36,6 % při rozlišení 64x64, 9,2 % při rozlišení 128x128 a 2,3 % při rozlišení 256x256. Všechna testovací měření byla provedena se stejnými integračními časy u obou spektrometrů.

Výsledky měření byly následně použity při rekonstrukcích jednotlivých hyperspektrálních datakrychlí. Použitý rekonstrukční algoritmus byl TVAL3. V rámci algoritmu je možno nastavit několik parametrů pro ovlivnění rekonstrukce. Pro každou modulaci se mohou optimální parametry lišit a byly voleny individuálně pro získání nejvyšší rekonstrukce v každém případě.

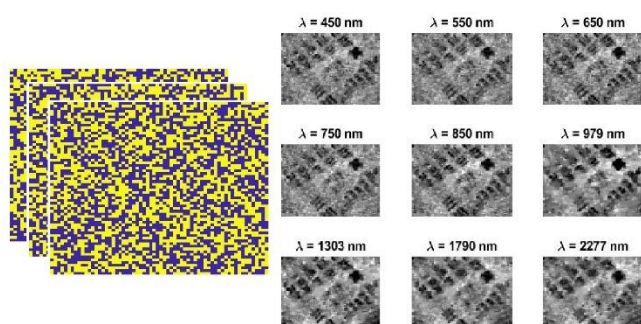
VÝSLEDKY A DISKUZE

Testováno bylo dvacet různých typů prostorové modulace patřících do tří kategorií – náhodné, frekvenční a hybridní.

Náhodné masky [1] jsou založené na zcela nahodilém měření. V praktické aplikaci na DMD je pro každý pixel náhodně vybrána hodnota 0 nebo 1. Náhodné masky vychází z předpokladu, že tak s největší pravděpodobností vznikne signál s řídkou reprezentací.

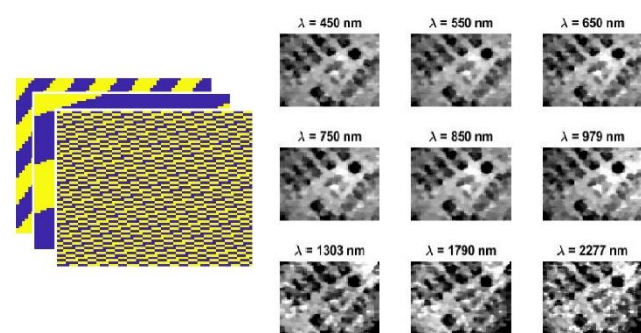
Frekvenční masky [2] jsou vytvořené tak, aby měřily přímo zastoupení určitých složek frekvencí v obraze. V závislosti na typu báze mohou být několika typů. V komprimovaném snímání jsou zkoumané frekvence vybírány náhodně, obvykle lze ale využít předpoklad většího zastoupení nízkých frekvencí a výběr přizpůsobit.

Hybridní masky [3] kombinují obě předchozí kategorie do jedné různými způsoby – dithering, kombinované modulace nebo pronásobování. Cílem těchto masek je těžit z výhod obou kategorií – frekvenční analýzy a náhodného výběru signálu.



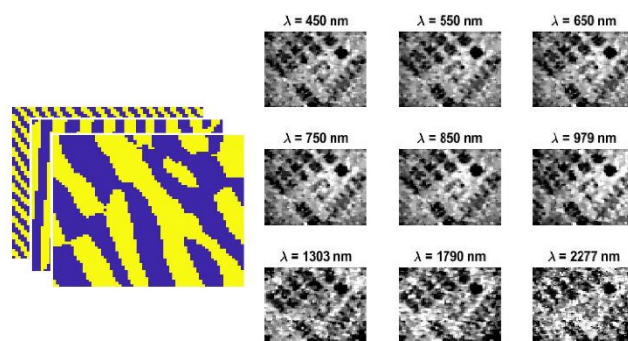
Obrázek 1: Ukázka rekonstrukce s použitím náhodných masek

Z experimentálních pokusů bylo zjištěno, že náhodné masky dobře zobrazují detaily scény (jednotlivé proužky USAF terče) za cenu vyššího zašumění rekonstrukce. Účinnost těchto masek s vyšším rozlišením značně klesala. Námi navržená úprava náhodných masek zlepšila jejich zobrazení detailů a částečně snížila šum.



Obrázek 1: Ukázka rekonstrukce s použitím frekvenčních masek

Frekvenční masky dosahují lepšího kontrastu a menšího celkového zašumění, hůře ale zobrazují detaily. U frekvenčních masek je také patrný rychlý propad účinnosti se slabší intenzitou signálu, a tedy vyšším šumem v měřeních. S vyšším rozlišením nedocházelo k zhoršení účinnosti ale ani k velkému zlepšení rozlišení. Hadamardovská verze frekvenčních masek navíc selhává v rekonstrukci v jednom ze sběrných směrů.



Obrázek 1: Ukázka rekonstrukce s použitím hybridních masek

Rekonstrukce z hybridních masek dosahovaly výsledků dle předpokladů mezi předchozími dvěma kategoriemi. Detaily jsou zobrazené lépe než u frekvenčních masek, ale stále je rekonstrukce náchylná na nízký odstup signálu od šumu.

ZÁVĚR

Provedený výzkum nabízí široké porovnání modulací v náročných podmínkách hyperspektrální mikroskopie. I když jsou například frekvenční masky s oblibou využívány v makroskopickém monochromatickém snímání, z našich výsledků jsou patrné limitace při velkém zašumění signálu v blízké infračervené oblasti.

Výsledky by bylo možné v budoucnu u testovaných modulací pravděpodobně vylepšit úpravou nebo výměnou rekonstrukčního algoritmu. Obzvláště u hyperspektrálního snímání by šly s výhodou implementovat 3D rekonstrukční algoritmy, jelikož totální variace v sousedních spektrálních snímcích bude s velkou pravděpodobností velice nízká.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2023.

REFERENCE

- [1] G. M. Gibson, S. D. Johnson, a M. J. Padgett, „Single-pixel imaging 12 years on: a review“, *Opt Express*, roč. 28, č. 19, s. 28190, zář. 2020, doi: 10.1364/OE.403195.
- [2] Z. Zhang, X. Wang, G. Zheng, a J. Zhong, „Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging“, *Opt Express*, roč. 25, č. 16, s. 19619, srp. 2017, doi: 10.1364/OE.25.019619.
- [3] K. M. Czajkowski, A. Pastuszcak, a R. Kotyński, „Single-pixel imaging with Morlet wavelet correlated random patterns“, *Scientific Reports 2017 8:1*, roč. 8, č. 1, s. 1–8, led. 2018, doi: 10.1038/s41598-017-18968-6.
- [4] L. Klein, J. Touš, a K. Židek, „Spatially encoded hyperspectral compressive microscope for ultrabroadband VIS/NIR hyperspectral imaging“, *Applied Optics, Vol. 62, Issue 15, pp. 4030-4039*, roč. 62, č. 15, s. 4030–4039, kvě. 2023, doi: 10.1364/AO.484214.