Spektrální charakteristiky filtrů

Kamil Hornoch

Filip Hroch

Tento dokument popisuje zpracování a výsledky testování fotometrických filtrů pro Vývojovou optickou dílnu v Turnově.

První kapitola obsahuje popis použitého pozorovacího vybavení a základní předzpracování. Další teoretický podklad zpracování. V posledních dvou kapitolách je uveden postup zpracování, výsledky a jejich interpretace.

Použité přístroje

Všechna naše měření byla prováděna na dvou pozorovacích stanovištích s komerčními CCD kamerami firmy SBIG. Na stanovišti v Lelekovicích byla celou dobu užívána kamera ST-6 se zlepšenou citlivostí na UV v Newtonově ohnisku 35cm reflektoru. Na observatoři MonteBoo byla používána kamera ST-8 montovaná také v Newtonově ohnisku 60cm reflektoru. V obou případech byly použity expozice v rozmezí 30 - 60 sekund.

Zpracování CCD snímků bylo realizováno standardním postupem s použitím fotometrického balíku Munipack. Po odečtení temných snímků a korekci o různou citlivost pixelů na světlo (flat-field) byla provedena aperturní fotometrie s clonkami o poloměrech přibližně 2 - 3 úhlové vteřiny. Seeing ve všech nocích nepřekročil 2 vteřiny. Přestože se jedná o velmi husté pole nebylo nasazeno zpracování pomocí PSF, neboť nevede k podstatnému zvýšení přesnosti a je nesrovnatelně náročnější.

Pro zpracování snímků byly použity pouze hvězdy v rozmezí 11. - 15. magnitudy v příslušném filtru. Jasnější konec magnitudové škály tak nebyl narušen saturací jasných hvězd a dolní pak měřícími chybami slabých objektů.

Principy zpracování

Při analýze vlastností nebeských objektů rozkládáme jejich záření do různých spektrálních oborů. To nám umožňuje jejich důkladnější poznání. Tento postup je analogický existenci tří různobarevných čípků v našem oku, které umožňují lidem barevné vidění.

Technicky lze k analýze světla použít různých přístrojů. Nicméně nejrozšířenější je vzhledem na svou cenu použití spektrálních filtrů, skel dotovaných některým pigmentem tak aby pohlcoval nebo propouštěl světlo v dané spektrální oblasti. Během doby vzniklo několik sad filtrů pokrývajících viditelnou oblast spektra s případnými přesahy do v blízké UV i IR oblasti tak, aby se pokryla citlivost některého v praxi široce používaného detektoru. Problém před kterým stojí astronomové je porovnání výsledků získaných rozdílnými sadami filtrů případně stejnou sadou filtrů s jiným přístrojem, detektorem atd.

Základním parametrem každého filtru je jeho spektrální charakteristika, tj závislost propustnosti filtru na vlnové délce. Ovšem, spektrální charakteristiky dvou stejných filtrů vyrobených například stejným výrobcem ve dvou různých sériích budou mít drobné rozdíly. Odchylky přirozeně nebudou velké, nicméně při požadavku poměrně vysoké přesnosti výsledků bude třeba tyto rozdíly zjistit a data o ně opravit.

Představme si, například, spektrální charakteristiku dvou ideálních filtrů tak jak je zobrazena na obr 1. Jde o dvě delta funkce se středy centrovanými na dvě rozdílné vlnové délky. Záření, které propustí jeden druhým neprojde a naopak. Takže při jednoduchém experimentu, kdy zařadíme oba na optickou lavici za sebe, žádné světlo neprojde.

V praxi mají filtry profil podobný spíše Gaussově funkci nebo některému nižšímu Hermiteovu polynomu. Podobný experiment s oběma filtry sice výrazně světlo zeslabí avšak úplně nepohltí.

Představme si nyní poněkud jinou situaci. Máme tři referenční filtry a tři další kopie vyrobené co nejpečlivěji tak, že co nejpřesněji kopírují tuto referenční sérii. Zkusíme předchozí experiment. Vezmeme prostřední referenční filtr a změříme světlo procházející tímto filtrem společně s kombinací všech tří testovaných. Opět budeme měřit světlo prošlé kombinací filtrů. Očekáváme následující výsledky: Oběma prostředními filtry projde prakticky všechno světlo, propustnost této kombinace se tedy blíží jedničce (100%). Množství prošlého světla označíme a, jeho hodnoty budou v rozmezí 0.9 - 1.0 (90 -100 %). U krajních filtrů tomu bude naopak. Světlo prošlé přes oba dva filtry bude silně zatlumeno a určitě neprojde víc jak 10% světla. Množství světla prošlého dvěma krajními filtry označíme b, s hodnotami v rozmezí 0.0 - 0.1.

Vlastně není problém hodnoty těchto koeficientů zjistit teoreticky. Stačí si změřit spektrální charakteristiky filtrů a pak spočítat překrývající se plochy pod jejich křivkami. Změřené hodnoty filtrů by měly těmto hodnotám odpovídat. V praxi má ovšem na spektrální citlivost vliv i detektor a tak je většinou nemožné zjistit skutečné hodnoty jinak než praktickým měřením jasnosti skutečných nebeských objektů.

Jednoduchý experiment v tomto duchu ovšem fungovat nebude. Naše úvahy jsou sice správné, ale používané filtry nesplňují naše předpoklady. Mají velké překryvy (tj příliš se liší od delta funkce). Nicméně vše co bylo řečeno funguje i v případě, že budeme používat poněkud abstraktní filtr který dostaneme jako matematický rozdíl dvou filtrů. Řekněme, že máme filtry R a V. Těžko lze takový filtr sestrojit, ale můžeme změřit propustnosti v jednotlivých filtrech samostatně a pak je odečíst jako dvě čísla, čímž dostáváme propustnost nového filtru V - R.

Přesně stejný postup užíváme i při porovnávání kvality filtrů v astronomii, kde se standardně definované filtry silně překrývají. Například při porovnávání kvalit filtru R s užitím dvou filtrů R a (V-R) očekáváme koeficient před R filtrem blízký jedné a před (V-R) filtrem blízký nule, přesně podle našich úvah. Proto můžeme hodnotu námi měřené magnitudy hvězdy vyjádřit jako

$r = a R + b (V - R)$.

Standardní filtry Kron-Cousinsova systému byly definovány v práci Bessel (1979). Obsahují mimo jiné filtry označené jako UBVRI. Při testovaní našeho filtru r, který se jen nepatrně liší od standardní sady, změříme hodnoty známé hvězdy přes náš filtr r. Obdržená hodnota se bude obecně lišit od očekávané R. Hlavní rozdíl bude pocházet z různé propustnosti naší optické soustavy. Podstatně menší, ale přesto měřitelné rozdíly budou souviset s barvou hvězdy. Proto vyjádříme instrumentální magnitudu hvězdy v závislosti i na sousedním filtru V:

$r = c R + d V$

Rozdíl mezi měřenou r a očekávanou R magnitudou minimalizuje vliv rozdílné propustnosti našeho dalekohledu společně s pohlcováním světla v zemské atmosféře a zdůrazní vliv rozdílné spektrální propustnosti našeho a standardního filtru. Tento rozdíl je

$r - R = (c - 1) + b (V - R)$

a má stejný tvar jako ten, na který jsme přišli poněkud jiným typem úvah. Je to základní princip ze kterého vycházíme při testováni kvality filtrů.

Koeficient b v předchozím vztahu hraje při porovnávání kvality filtrů hlavní roli. Přesně podle našich předchozích úvah očekáváme, že pro filtr přesně shodný se standardním filtrem bude jeho hodnota velmi blízká nule a pro levné napodobeniny se od něj bude více či méně odlišovat. Snaha výrobců proto bude minimalizovat tento koeficient.

Zpracování

Předchozí odstavce daly návod na metodu měření odchylky testovaného filtru od standardní sady. Musíme změřit magnitudy v každém měřeném filtru pro hvězdy s rozličnými hodnotami (V - R), do grafu vynést rozdíly naměřené a očekávané hodnoty v závislosti na barevném indexu příslušné hvězdy. Data by měly vykazovat přímku se směrnicí blízkou nule.

Na pozorovanou barvu hvězd i její intenzitu má vliv řada faktorů, nejen přesnost filtru přes který měříme. Tyto vlivy se musíme v praxi pokusit minimalizovat. Pomineme-li komplikované pozorovací postupy, je nejlepší metoda měření na některém standardním fotometrickém poli, dostatečně hustě pokrytém hvězdami se známými barevnými indexy. Jedním z těchto polí je i okraj kulové hvězdokupy M13, který jsme použili pro získání potřebných dat. Jde o standardní fotometrické pole publikované v článku Forbes, Dawson (1986).

Před vynesením do grafu bylo třeba opravit pozorovaná data o extinkci. To proto, že rozíly mezi standardy a pozorovanými hvězdami se navzájem nepatrně lišily. To se provedlo tak, že se robustní metodou odhadl aritmetický průměr rozdílů na jednom snímku. Tyto rozdíly se pak přepočetly na rozdíl na prvním snímku. Bez této procedury by měla data příliš velký rozptyl a jen velmi obtížně by se odhadovali parametry barevných přímek.

Provedli jsme řadu měření daného pole. Jejich přehled je uveden v tabulce:

Table 1. Přehled napozorovaných dat

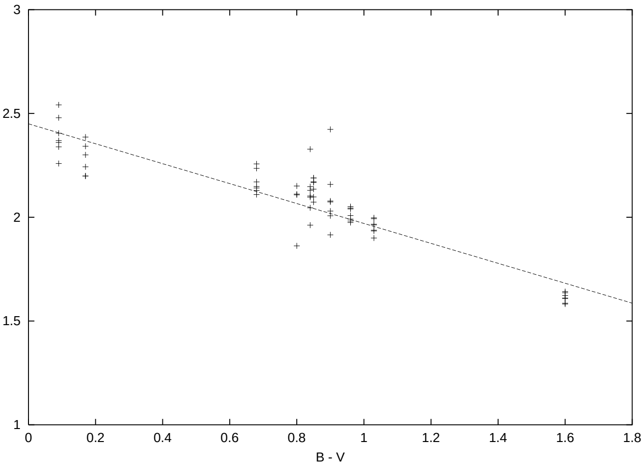
datum	stanoviště, dalekohled	filtry
2000-06-02/03	MonteBoo, 60 cm	standard
2000-07-06/07	MonteBoo, 60 cm	standard
2000-09-09/10	Lelekovice, 35 cm	R p2, B p2
2000-09-10/11	MonteBoo, 60 cm	standard, R p1
2000-09-29/30	Lelekovice, 35 cm	R p1, R p1 + sklo
2000-10-15/16	Lelekovice, 35 cm	R p2 + sklo, B p1 + sklo
2000-10-21/22	Lelekovice, 35 cm	B p1
2000-10-22/23	Lelekovice, 35 cm	R p2 + sklo

Postup zpracování byl jednoduchý. Z oměřeného CCD snímku jsme dostali instrumentální magnitudy, ty jsme odečetli od standardních magnitud pro dané hvězdy a do grafu pak byl vynesen tento rozdíl v závislosti na barevném koeficientu pro danou hvězdu.

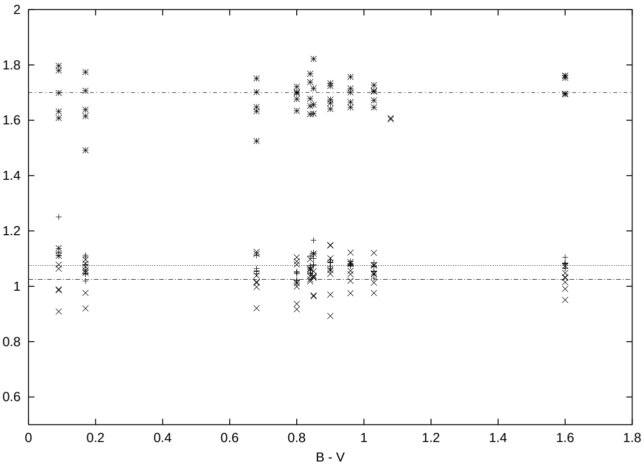
V následujícím přehledu jsou uvedeny grafy. Pro každý filtr jeden graf s popisem, kde jsou rovnice přímek a případný komentář, který blíže popisuje výsledek.

Sada filtrů standard

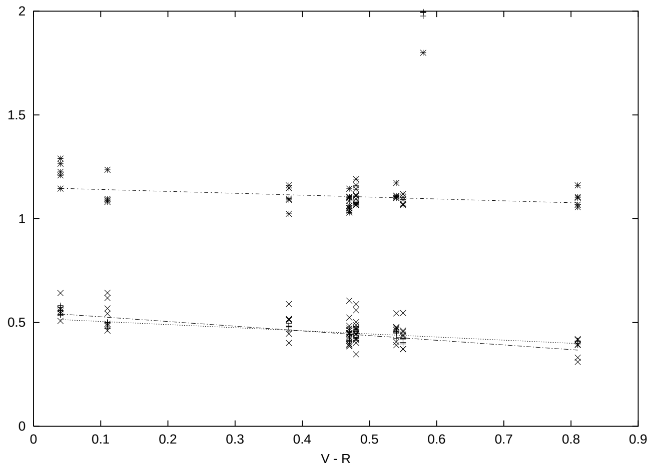
Jde o současnou komerční sada a je hlavní sadou filtru na MonteBoo observatory. Proto s nim bylo prováděno měření již před červencem 2000 tak aby se ověřily její vlastnosti.



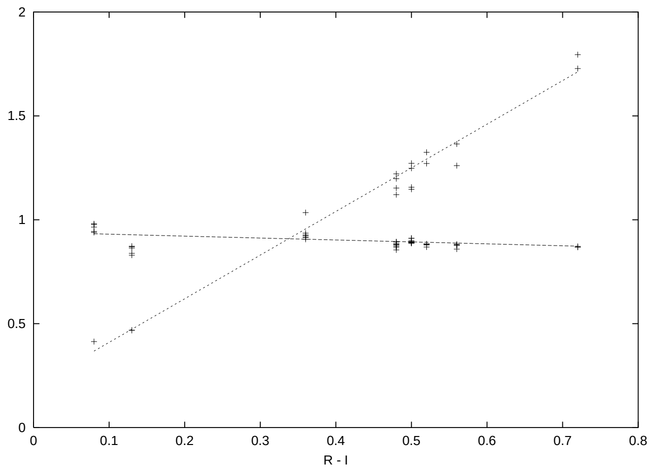
Data z noci 2000-06-02/03 přes B filtr ze standardní sady. Přímka je popsána rovnicí: 2.47 - 0.488 (B - V). Data pouze z jedné noci.



Data pro V filtr ze standardní sady. Přímky a data brána se zdola nahoru. Přímka z noci 2000-07-06/07 je popsána rovnicí: 1.025 - 0.0 (B - V). Přímka z noci 2000-06-02/03 je popsána rovnicí: 1.075 - 0.0 (B - V). Přímka z noci 2000-09-10/11 je popsána rovnicí: 1.700 - 0.0 (B - V). Na snímku jsou data ze tří nocí, první dvě se překrývají, což je především dáno prakticky stejnými pozorovacími podmínkami, kdy bylo pole vysoko nad obzorem v průběhu ideální fotometrické noci. Třetí nejvíc odlišná noc je za průměrných až špatných podmínek (to platí i pro data z dalších filtrů). Zjevný je výrazně větší rozptyl. Nicméně sklon přímky je v rámci měřících chyb nulový a je tedy vidět, že V filtr je prakticky dokonalý.



Data pro R filtr ze standardní sady. Přímky a data brána se zdola nahoru. Přímka z noci 2000-07-06/07 je popsána rovnicí: 0.554 - 0.226 (V - R). Přímka z noci 2000-06-02/03 je popsána rovnicí: 0.518 - 0.151 (V - R). Přímka z noci 2000-09-10/11 je popsána rovnicí: 1.150 - 0.091 (V - R). Podobně jako u filtru V jsou zde data rozdělena podle kvality noci. Parametry definující sklony přímek jsou v rámci chyb v stejné, odlišnou hodnotu v případě noci se špatným počasím lze přičíst spíše rozptylu než reálné hodnotě, i když při hodně inverzním počasí dochází v Brně k atmosférickému zčervenání světla hvězd.

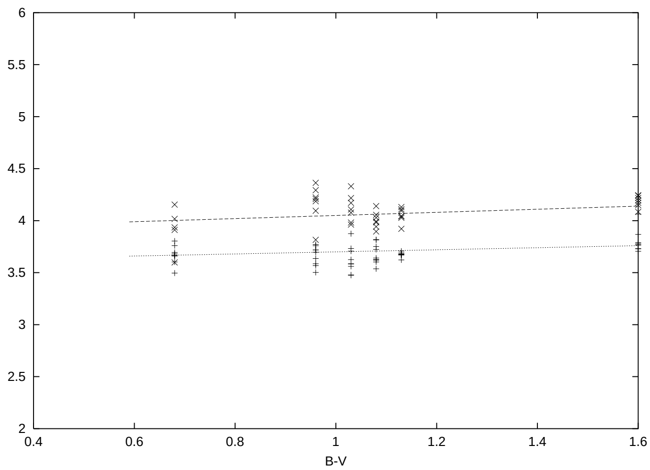


Data pro I filtr ze standardní sady. Přímky a data brána se zdola nahoru. Přímka z noci 2000-06-02/03 je popsána rovnicí: 0.939 - 0.093 (R - I). Přímka z noci 2000-06-02/03 je popsána rovnicí: 0.2 + 2.1 (R - I). Na tomto obrázku je zarážející zjištění. Kromě očekávané přímky se tu objevuje i další nečekaná s poměrně velkým sklonem. Bez dalšího pozorování to nelze potvrdit ani vyvrátit, ale úplně nelze vyloučit že jde o reálný jev, který může být způsobený red-leakem u tohoto filtru. Pozorovatelé již delší dobu upozorňují na skutečnost, že v I filtru existují podezřelé odchylky.

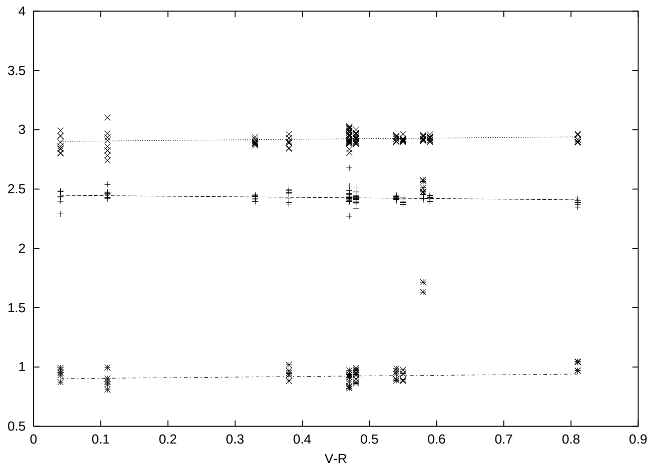
Filtr U

Všeobecně je známo, že CCD kamery jsou velmi málo citlivé ke krátkovlnému záření, což je dáno vlastnostmi použitých polovodičových materiálů. Přesněji řečeno citlivost použitých kamer je tak malá, že nestačí ani na zachycení dostatečného počtu hvězd na vybraném poli kolem M13, natož na jakékoli měření. Jediná možnost změření jeho charakteristik je na vybraných velmi jasných hvězdách. Ovšem k solidnímu ověření U filtru by bylo třeba použít jiný detektor, tj. fotonásobič.

Sada filtrů set 1

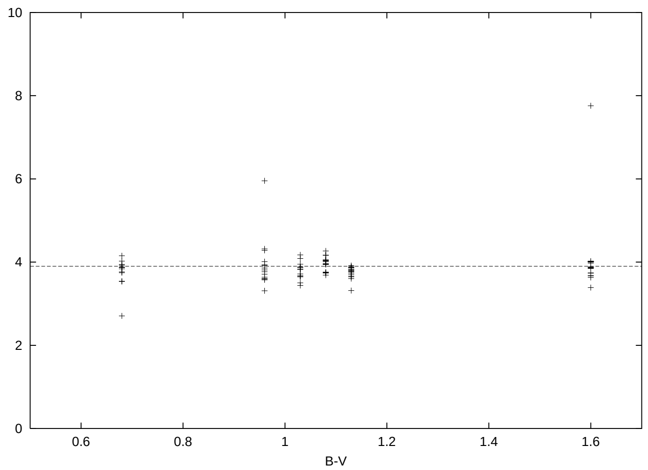


Data pro B filtr ze Set 1 4 mm s a beze skla. Dolní přímka z noci 2000-10-15/16 se sklem je popsána rovnicí: 3.6+0.1 (B-V). Horní přímka z noci 2000-10-21/22 beze skla je popsána rovnicí: 3.9+0.15 (B-V). Pro porovnání je v jednom grafu vyneseno měření bez a s determálním sklem. Nepatrný rozdíl ve směrnici je pravděpodobně nepodstatný. Posun obou závislostí je dán menší propustností skla.

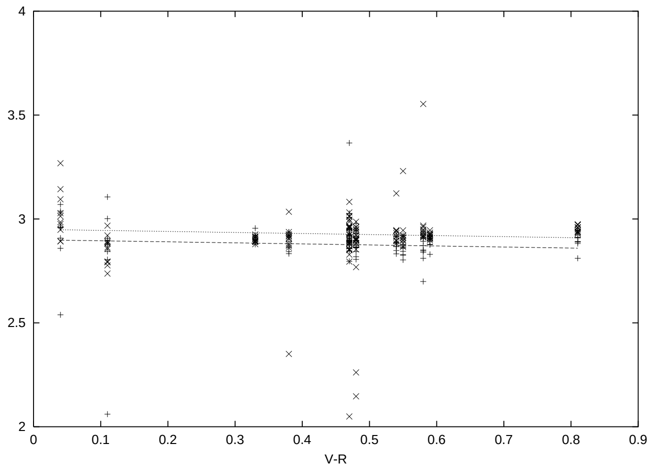


Data pro R filtr ze Set 1 4 mm s a beze skla. Spodní přímka je pro filtr měřený na MonteBoo, dvě horní v Lelekovicích. Prostřední pro samostatný filtr a horní pro filtr v kombinaci s determálním sklem. Přímka z noci 2000-09-10/11 je popsána rovnicí: 0.9+0.05 (V-R). Přímka z noci 2000-09-29/30 pro filtr beze skla je popsána rovnicí: 2.45-0.05 (V-R). Přímka z noci 2000-09-29/30 se sklem je popsána rovnicí: 2.9+0.05 (V-R).

Sada filtrů set 2



Data pro B filtr ze Set 2 6 mm. Přímka z noci 2000-09-09/10 je popsána rovnicí: 3.9-0.0 (B-V).



Data pro R filtr ze Set 2 4 mm se sklem a beze skla. Přímka z noci 2000-09-09/10 beze skla je popsána rovnicí: 2.9-0.05 (V-R). Přímka z noci 2000-10-15/16 a 2000-10-22/23 se sklem je popsána rovnicí: 2.95-0.05 (V-R).

Poznámky k použitým numerickým postupům

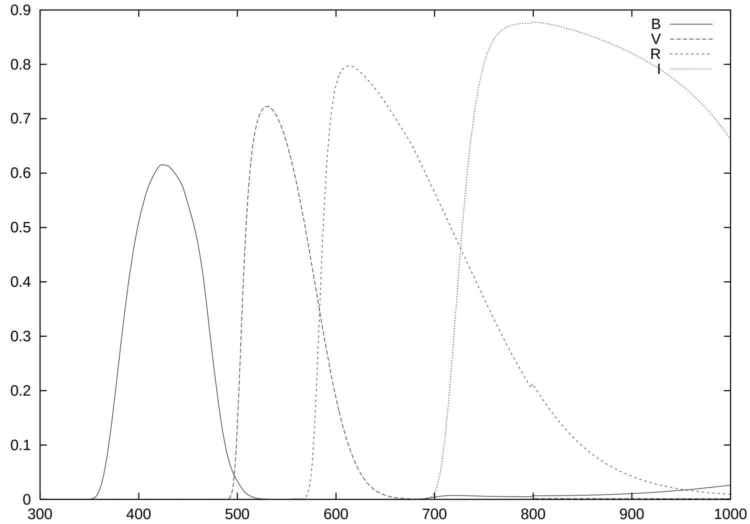
Prokládat přímku s velmi malým sklonem je numericky velmi obtížný úkol. Problém spočívá v tom, že se při výpočtu tradičně používá nevhodný způsob volby bázových funkcí při prokládání polynomu tedy funkcí 1, x. To vede na výpočet špatně podmíněné soustavy lineárních rovnic. Odhad chyb se provádí na základě inverze matice těchto rovnic a ta, protože je špatně podmíněná k nesmyslným výsledkům. Například v našem případě často vycházela standardní chyba směrnice v řádu desítek. To je hlavní důvod proč nejsou uváděny chyby parametrů u proložených přímek. Ani mimořádně sofistikované postupy situaci nezlepší protože jde o vlastnost minimalizované funkce, nikoli použitého algoritmu. Použití jiného typu bázových funkcí vede k robustnímu algoritmu, na druhé straně ovšem také k problematické interpretaci vypočtených parametrů a jejich chyb.

Spektrální profily filtrů

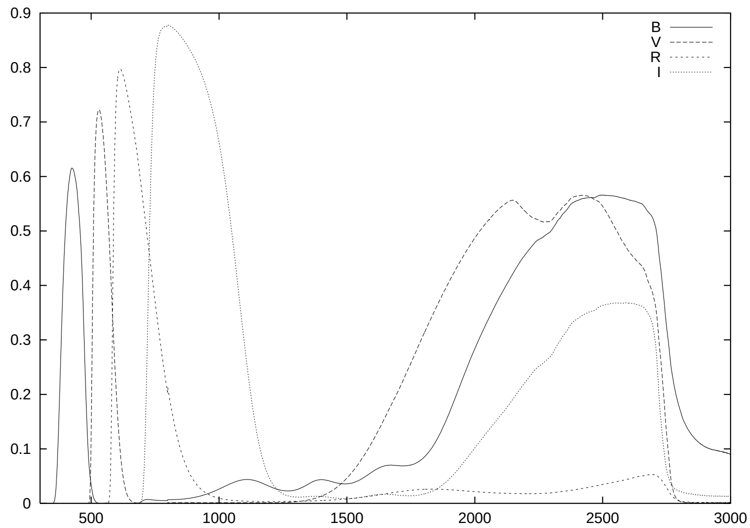
Následující grafy zobrazují spektrální charakteristiky měřených filtrů. Vždy je vynesena závislost propustnosti filtru na vlnové délce v nanometrech. Měření byla prováděna pomocí fourierovského spektrografu.

V následující části jsou grafy pro dvě dvojice filtrů. První pro standardní sadu a následující pro měřené filtry. Na obrázcích je pro větší přehlednost vynesen široký spektrální obor a výřez pro oblast blízkou viditelnému oboru.

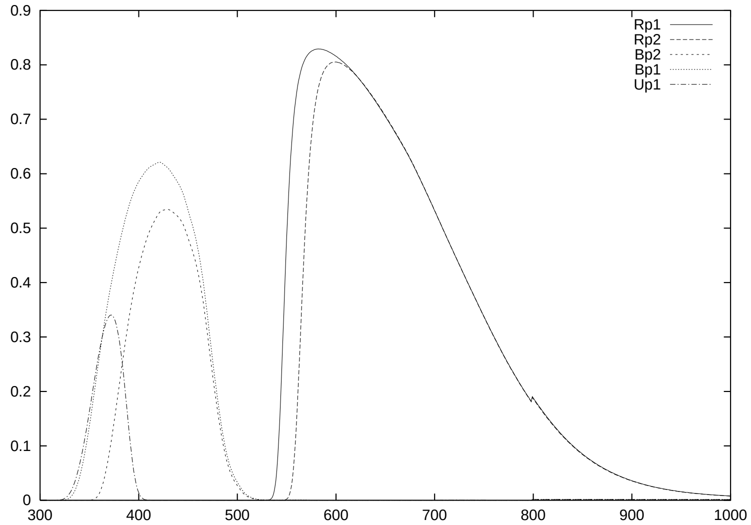
Red-leak je další nežádoucí spektrální okno, které propouští filtr. Na obrázcích pro standardní sadu je nesrovnatelně výraznější než pro novou sadu filtrů.



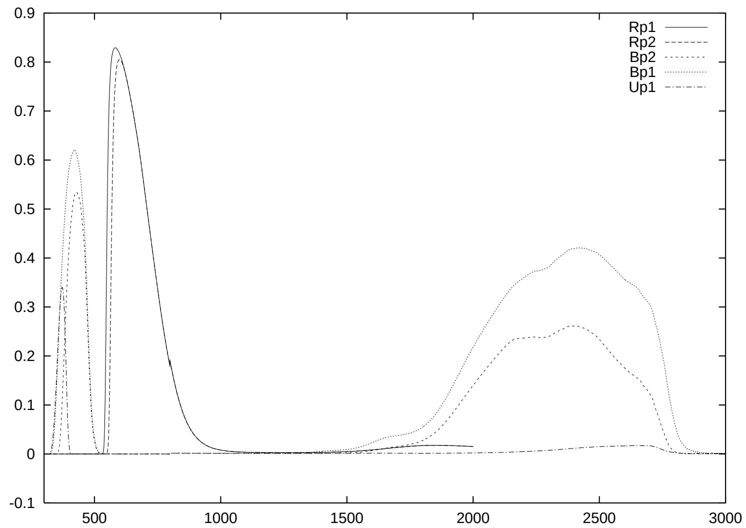
Spektrální charakteristika filtrů Set I. Závislost propustnosti na vlnové délce v rozsahu 300 - 1000 nm.



Spektrální charakteristika filtrů Set I. Závislost propustnosti na vlnové délce v rozsahu 300 - 3000 nm.



Spektrální charakteristika měřených filtrů. Viz legenda na obrázku. Závislost propustnosti na vlnové délce v rozsahu 300 - 1000 nm.



Spektrální charakteristika měřených filtrů. Viz legenda na obrázku. Závislost propustnosti na vlnové délce v rozsahu 300 - 3000 nm.

Doporučení

Všechny hlavní závěry jsou asi rovnou patrné z uvedených grafů, nicméně dovolíme si několik poznámek na závěr. Je zjevné, že současná standardní sada má velmi špatné barevné charakteristiky a to platí především a naštěstí pro filtr B. V filtr je excelentní. R je dobře použitelný. U I filtru se v jedné noci zjistily dvě nezávislé závislosti a bude potřeba se ještě v budoucnosti o tento filtr zajímat podrobněji.

Nové filtry jsou jednoznačně velmi dobré. V mezích měřících chyb, které by ovšem taky stálo za to zmenšovat, jsou R a B nerozlišitelně odlišné od standardu za použití SBIG CCD kamer. Velmi potěšitelné je rapidní zmenšení red-leaku u všech filtrů. Na porovnání filtrů měřených s a bez determálního skla je vidět výrazně menší celkový útlum. Ten bude v praxi po slepení skel výrazně menší, přesto je obecně výhodnější používat tenší filtry.

Reference

Douglas Forbes, Peter C Dawson: A photoelectric BVRI sequence in the field of the globular cluster NGC 6205 (M13), Publ. ASP 98, 102 - 103 (1986)