

Specifika digitalizace spekter celého slunečního disku a jejich zpracování do spektroheliogramů

Miroslav Klvaňa, *Astronomický ústav Akademie věd České republiky, observatoř Ondřejov, Česká republika, mklvana @asu.cas.cz*

Adriana Garcia, *Observatorio Astronomico, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, adriana @mat.uc.pt*

Václav Bumba, *Astronomický ústav Akademie věd České republiky, observatoř Ondřejov, Česká republika, bumba @asu.cas.cz*

Abstrakt

Aplikace CCD čipů v astronomických přístrojích, konstruovaných pro záznam měření na fotografickou emulzi přináší sebou jisté problémy. Problémy se stupňují, pokud zobrazujeme a digitalizujeme celý sluneční disk. Jedná se o nutnou změnu parametrů optického systému a odstranění jasových a tvarových deformací disku, vznikajících v důsledku změny záznamového média. Na příkladu spektroheliografu Astronomického ústavu university v Coimbre tyto problémy analyzujeme a popisujeme možnosti jejich řešení.

1. ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

Pozorování spektroheliogramů v Astronomickém ústavu university v Coimbre má dlouholetou tradici. Na základě úzké spolupráce s observatoří v Meudonu byl v Coimbre právě před osmdesáti léty uveden do provozu klasický spektroheliograf, umožňující snímat na fotografickou emulzi kvalitní spektroheliogramy různých vlnových délek.

V současné době vznikla potřeba nahradit fotografickou emulzi CCD prvkem. Hlavním důvodem je postupné zužování sortimentu vyráběných fotografických materiálů. Testy, provedené v minulých letech ukázaly (Klvaňa a kol., 2005), že v porovnání s levnějšími videosystémy jsou přes podstatně vyšší cenu klasické CCD kamery pro astronomické aplikace nesporně vhodnější.

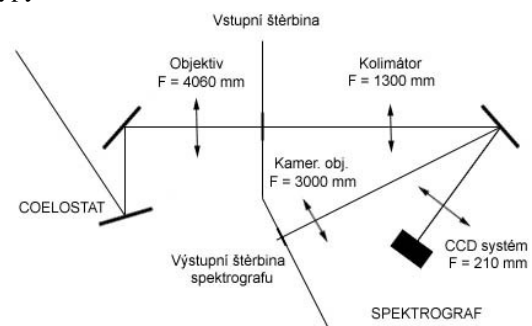
V současné době je v Astronomickém ústavu university v Coimbre testován ve zkušebním provozu nový CCD-spektroheliograf, při jehož vývoji jsme získali řadu zkušeností, popisovaných v tomto příspěvku.

2. OPTICKÝ SYSTÉM DALEKOHLEDU

Čočkový objektiv horizontálního dalekohledu má ohniskovou vzdálenost $F_D = 4060$ mm a průměr 250 mm (viz obr.1). Dalekohled je napájen dvěma zrcadly coelostatu. Maximální průměr slunečního disku na vstupní štěrbíně spektrografu bude 38,5 mm.

3. OPTICKÝ SYSTÉM SPEKTROGRAFU

Spektrograf je sestaven z čočkového kolimátoru s ohniskem 1300 mm a průměrem 150 mm, čočkového kamerového objektivu s ohniskem 3000 mm a průměrem 132 mm a reflexní difrakční mřížky se 300 vrypů na mm.



Obr.1: Původní optický systém dalekohledu a spektrografu v Coimbre s nově nainstalovaným CCD systémem.

4. VLASTNOSTI SPEKTROHELIOGRAFU

Spektroheliograf je proveden velmi precizně. Jsou zde kompenzovány všechny faktory, související se zobrazením celého disku. Spektroheliograf je navržen tak, že beze změny polohy spektrální mřížky můžeme po záměně dvou rámcovacích filtrů exponovat postupně za sebou spektroheliogramy v čáře H_α nebo ve vlnových délkách CaII K3 a CaII K1. Pohyb slunečního disku po vstupní štěrbíně spektrografu zajišťuje pohyblivý objektiv dalekohledu.

5. ZVLÁŠTNOSTI APLIKACE CCD PRVKŮ

Aplikace CCD prvků v klasických astronomických přístrojích, původně určených pro práci s fotografickou emulzí, vede obecně ke změně parametrů jejich optiky. Důvodem je velikost CCD čipu. Rozlišovací schopnost čipu je zhruba stejného řádu, jako u fotografické emulze, ovšem jeho velikost je podstatně menší. Pro záznam dostatečně velké oblasti musíme volit kompromis, zvětšující rozměry oblasti na úkor rozlišovací schopnosti.

Dalším důležitým faktorem, který přizpůsobení astronomického přístroje ovlivňuje je skutečnost, že klasické přístroje byly většinou zdaleka nevyužívaly plnou rozlišovací schopnost fotografické emulze. Velikost obrazu na jejich výstupu byla mnohem větší, než vlastnosti emulze vyžadovaly.

Pokud přístroj, určený původně pro práci s fotografickou emulzí přizpůsobíme pro práci se CCD čipem, je pak potřebná změna velikosti obrazu na jeho výstupu značná. V případě tohoto spektroheliografu se jedná o zmenšení původního výstupního obrazu téměř 15x.

6. KRITÉRIA PRO ÚPRAVY PŘÍSTROJE

S přihlédnutím na kontinuitu provozu současného spektroheliografu bylo rozhodnuto, že:

- v maximální míře bude zachována stávající konstrukce bez stavebních úprav,
- budou zachovány obě možnosti využití přístroje, jednak pro práci s fotografickou emulzí a jednak se CCD kamerou,
- bude použita kamera CCD-1300LN, výrobek firmy VDS Vosskuhler GmbH, [2],
- stávající optický systém zůstane beze změn,
- do prostoru spektrografu bude umístěn další kamerový objektiv s ohniskovou vzdáleností, nastavitelnou v rozmezí 200-240 mm a se CCD kamerou,
- zachovat operativnost přístroje, tzn. pracovat co nejrychleji, aby bylo možno získávat spektroheliogramy i v krátkých intervalech mezi mraky.

Na základě těchto kritérií bylo do spektrografu umístěno nové optické rameno s předřadnými filtry, objektivem a CCD kamerou.

7. REŽIM DIGITALIZACE SPEKTER

Při digitalizaci spekter, určených pro sestavení spektroheliogramů je třeba během digitalizace zajistit rovnoměrný posuv obrazu slunečního disku po vstupní štěrbíně spektrografu.

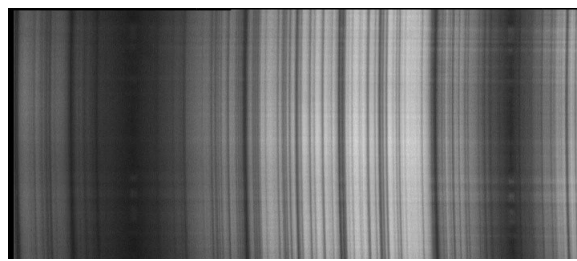
Nejrovnoměrnějšího posuvu dosáhneme využitím denního chodu Slunce. Nevýhodou této varianty je, že sluneční disk se vůči vstupní štěrbíně pohybuje ne vždy kolmo, ale úhel jeho pohybu závisí na nastavení zrcadel coelostatu. Deformaci disku, která tím vznikne, je možno při zpracování obrazu eliminovat.

Tato varianta má však i další nevýhody: prodlužuje dobu, potřebnou pro digitalizaci spekter celého disku a při velkých úhlech směru pohybu slunečního disku vůči horizontální rovině je obtížné nastavit správně jeho počáteční polohu.

Z těchto důvodů jsme se nakonec rozhodli pro druhou variantu – využití existujícího skanovacího systému spektroheliografu. Tento systém umožňuje rovnoměrný pohyb objektivu dalekohledu v horizontálním směru a tím i pohyb obrazu slunečního disku kolmo ke vstupní štěrbíně spektrografu.

8. ZAKŘIVENÍ SPEKTRÁLNÍCH ČAR

Při zobrazování spektra celého slunečního disku může ve spektrografu dojít ke značnému zakřivení spektrálních čar (viz obr.2). Pro práci s fotografickou emulzí bylo toto zakřivení korigováno zakřivením vstupní a výstupní štěrbiny.



Obr.2: Příklad jednoho z téměř tisícové série spekter pro sestavení spektroheliogramu ve vybrané vlnové délce. Vertikálně jsou pod sebou seřazena spektra jednotlivých bodů, nacházejících se v době expozice snímku na vstupní štěrbíně spektrografu. Zleva čára CaII-K, zprava CaII-H.

Při sesazování spektroheliogramu pro vlnovou délku, v níž chceme konkrétní spektroheliogram získat, musíme tvar spektrálních čar respektovat.

Rovněž konstrukční zakřivení vstupní štěrbiny spektrografu, jejíž poloměr je 400 mm znamená, že body ve spektru se nenalézají na přímce, ale jejich poloha při vykreslování spektroheliogramu musí být patřičně korigována.

9. ZJIŠTĚNÍ TVARU SPEKTRÁLNÍ ČÁRY

Tvar zakřivení spektrální čáry můžeme určit fitováním jejího profilu a proložením hladké křivky minimy profilů v jednotlivých řádcích. Tato metoda je náročná na čas, potřebný pro zpracování spekter a proto jsme v případě získávání spektroheliogramů použili jinou metodu, vycházející z následujících předpokladů:

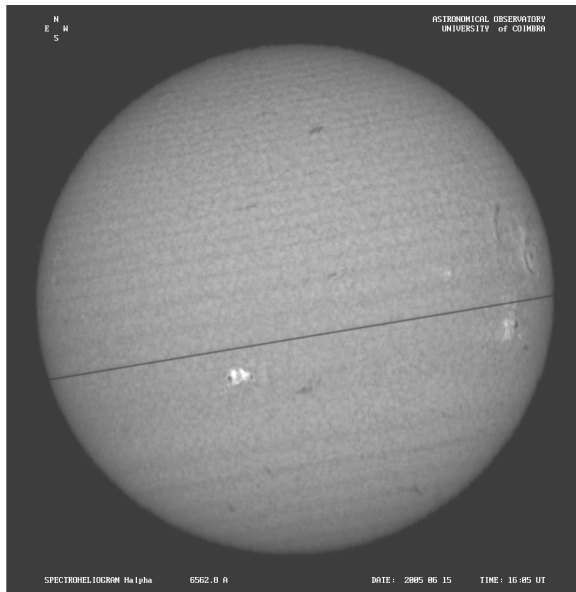
- změny tvaru a pohyb spektrální čáry ve spektrografu v důsledku přístrojových nestabilit můžeme po dobu digitalizace spekter jednoho měření (cca 1 minuta), zanedbat.
- tvar spektrální čáry můžeme pro účely získávání spektroheliogramů aproximovat obecnou parabolou.

Parabolu, fitující zakřivení spektrální čáry definujeme třemi body, nacházejícími se na horním a dolním konci spektrální čáry a v jejím středu. Správné zakřivení paraboly, odpovídající její optimální poloze a tvaru, hledáme na základě minimalizace součtu interpolovaných jasů spektrální čáry, v bodech, ležících na parabole, přičemž zakřivení paraboly měníme vzájemným subpixelovým posuvem všech tří bodů ve směru řádků.

Vhodnost popisovaného postupu jsme ověřili zatím u širokých spektrálních čar H_{α} a $CaII K$.

10. ÚPRAVA SPEKTER

První operací, kterou je se spektrem nutno provést, je odstranit ze spektra nehomogenity, způsobené nečistotami a defekty v optické cestě a na CCD čipu. Speciálně u spektroheliogramů se výrazně uplatňují nečistoty na vstupní štěrbině spektrografu, které ve spektroheliogramu vytvářejí tenké, zřetelně viditelné horizontální čáry (obr.3). Tyto a i další defekty v datech odstraníme operací flat field.



Obr.3: Spektroheliogram, pořízený ve spektrální čáře H_{α} , včetně interferenčních pruhů, orientačního vlákna a nečistot na vstupní štěrbině spektrografu.

10.1. Standardní a modifikovaný flat field

Pro provedení flat fieldu je třeba mít k dispozici data, potřebná pro flat field. Je to záznam temného proudu a záznam vlastních dat flat fieldu. Modifikaci pracovních postupů uvádíme průběžně v textu.

10.1.1. Snímek temného proudu: Registraci temného proudu provedeme digitalizací cca 50 spekter se zakrytou vstupní štěrbinou spektrografu. Všechna tato spektra zprůměrujeme do jednoho snímku temného proudu $DC(x,y)$.

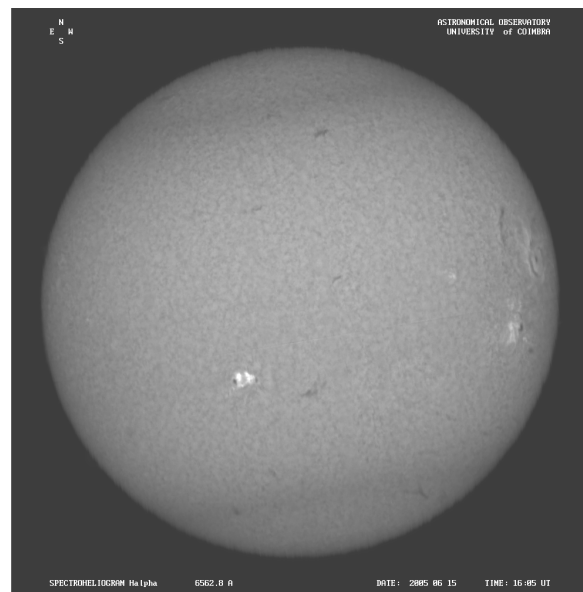
10.1.2. Snímek flat fieldu: Registraci vlastních dat flat fieldu provedeme digitalizací cca 50 spekter během pohybu obrazu slunečního disku po štěrbině. Pokud je obraz slunečního disku menší než výška štěrbině, projíždíme centrální částí disku vertikálně po celé štěrbině. Všechna tato spektra zprůměrujeme do jednoho snímku flat fieldu $FF2(x,y)$.

10.2. Aplikace flat fieldu na spektra:

10.2.1. Od snímku flat fieldu $FF2(x,y)$, který obsahuje temný proud, odečteme nejprve snímek temného proudu $DC(x,y)$ a dostaneme snímek flat fieldového spektra bez temného proudu:

$$FF1(x,y) = FF2(x,y) - DC(x,y) \quad (1)$$

10.2.2. Dále vertikálně zprůměrujeme všechny sloupce flat fieldového spektra $FF1(x,y)$ do křivky $K(x)$. Pokud spektrální čáry nejsou rovné, ale jsou zakřiveny, musíme nejdříve tvar jejich zakřivení zjistit, toto zakřivení odstranit a teprve potom můžeme vertikálně zprůměrovat všechny sloupce flat fieldového spektra do křivky $K(x)$.



Obr.4: Spektroheliogram z obr.3 po odstranění rušivých struktur flat fieldem. Jak je vidět, bylo odstraněno i orientační vlákno na štěrbině.

Jestliže nastane situace, že v různých částech snímku flat fieldového spektra mají spektrální čáry různé zakřivení, je situace ještě složitější. Z tohoto důvodu v našem případě provádíme flat field pouze pro tu část spektra, v níž leží vlnová délka našeho spektroheliogramu a zakřivení spektrální čáry zde přesně známe.

10.2.3. Všechny řádky flat fieldového spektra dělíme odpovídajícími hodnotami křivky $K(x)$ a dostaneme tak normované flat fieldové spektrum:

$$FF(x,y) = FF1(x,y)/K(x) \quad (2)$$

Pro zakřivené spektrální čáry musíme polohu křivky $K(x)$ v ose x podle tohoto zakřivení korigovat.

10.2.4. Obraz snímků korigovaného spektra $SP(x,y)$ pak z původních digitalizovaných snímků $SP1(x,y)$ dostaneme na základě vztahu:

$$SP(x,y) = (SP1(x,y) - DC(x,y)) / FF(x,y) \quad (3)$$

kde $SP1(x,y)$ jsou snímky jednotlivých spekter, digitalizovaných pro sestavení spektroheliogramu.

11. SESTAVENÍ SPEKTROHELIOGRAMU

Postup při sesazování spektroheliogramu se liší v závislosti na tvaru vstupní štěrbině a spektrální čáry, které mohou sluneční disk zdeformovat zcela nepravidelně a na rychlosti digitalizace spekter, která mění poměr horizontálního a vertikálního průměru disku. Popíšeme tyto vlivy podrobněji.

11.1. Štěrbina i spektrální čára bez zakřivení

Klasický spektroheliogram pro zadanou vlnovou délku sestavíme seřazením segmentů korigovaného spektra této vlnové délky chronologicky za sebou. U nezakřivené spektrální čáry a rovné vstupní štěrbině spektrografu mají tyto segmenty tvar obdélníku a výběr je jednoduchý. Jednotlivé segmenty získáme ze snímků digitalizovaných spekter výběrem bodů, odpovídajících svou polohou ve spektru zadané vlnové délce.

11.2. Rovná štěrbiná, zakřivená spektrální čára

Pokud je však spektrální čára zakřivená, je situace složitější. Původní obdélník bude mít vertikální strany deformovány podle zakřivení spektrální čáry. Toto zakřivení musíme nejdříve zjistit a stejně, jako u flat fieldu, odstranit. Získáme tak segmenty tvaru obdélníku jako v předcházejícím odstavci.

Protože body slunečního disku, snímané vstupní štěrbinou spektrografu, leží na vertikální přímce, můžeme tyto segmenty seřadit do spektroheliogramu stejně, jako v případě rovné vstupní štěrbině.

11.2. Štěrbina i spektrální čára jsou zakřiveny

Zakřivení vstupní štěrbině spektrografu se promítá do tvaru spektrální čáry, která je však již deformována optickým systémem. Při linearizaci tvaru spektrální čáry jsou obě tyto deformace odstraňovány současně. Nejprve tedy odstraníme důsledky deformace spektrální čáry postupem, uvedeným v bodě 9.

Zakřivená vstupní štěrbiná spektrografu však dále způsobí, že pokud spektroheliogram vykreslíme klasickou metodou, budou jeho řádky vzájemně posunuty o zakřivení štěrbině. Při vykreslování spektroheliogramu je proto potřeba tyto posuvy korigovat. Posuv je konstantní pro celý řádek a proto je nejjednodušší vykreslit spektroheliogram klasickou metodou a teprve pak deformaci spektroheliogramu po řádcích korigovat podle posuvů, odečtených ze zakřivení vstupní štěrbině.

11.3. Rychlost digitalizace spekter

Optimální rychlost digitalizace spekter umožní dodržet stejný horizontální a vertikální průměr slunečního disku spektroheliogramu. Většinou však rychlost digitalizace a rychlost posuvu slunečního disku po vstupní štěrbině spektrografu spolu se šířkou vykreslovaných segmentů nedovolují dosáhnout stejných průměrů disku a spektroheliogram je nutno v některém z obou směrů převzorkovat.

11.4. Orientace a poloha slunečního disku

Pokud právě popsaným způsobem vykreslíme získaný spektroheliogram, bude se pravděpodobně sluneční disk nacházet mimo střed obrazu a osa rotace Slunce nebude vertikální. Další transformací bude posuv středu slunečního disku na střed obrazu a rotaci disku kolem tohoto středu (případně doplněnou překlopením) tak, aby sever byl nahoře a východ vlevo. Tímto způsobem zajistíme homogenitu celé série měřených dopplergramů.

11.6. Minimalizace ztrát v prostorovém rozlišení

Veškeré posuvy a transformace, uvedené v této kapitole vedou k nutnosti interpolace bodů spektroheliogramu. Pokud budeme každou z právě popsaných operací provádět zvlášť, budeme interpolovat několikrát za sebou. Každá interpolace snižuje prostorové rozlišení obrazu. Proto je třeba uvedené posuvy a transformace provést současně, s jedinou interpolací.

12. VIZUALIZACE SPEKTROHELIOGRAMŮ

Jasy ve spektrech j_{dig} jsou měřeny lineárně a digitalizovány dvanáctibitově, tzn. celočíselně od nuly do 4095. Před měřením je třeba osvětlení čipu nastavit tak, aby celé digitalizované spektrum bylo v tomto rozsahu hodnot. Spektroheliogram ve spektrální čáře, která je tmavší než kontinuum, bude pak příliš tmavý.

Při zobrazování spektroheliogramu se snažíme použít celou škálu densit, která je k dispozici. Proto v daném spektroheliogramu zjistíme nejdříve maximální intenzitu j_{max} a všechny měřené intenzity j_{dig} normujeme do rozsahu hodnot 0,0 – 4095,0:

$$j_{norm} = 4095 j_{dig} / j_{max} \quad (4)$$

Běžně použitelný rozsah pro tisk nebo zobrazení na displeji je 8 bitů, tzn. v rozsahu 256 hodnot. Námi získané hodnoty přepočteme bez ztráty informace do tohoto rozsahu (jsou to již reálná čísla, ne celočíselné hodnoty, jejich rozlišení odpovídá 12-ti bitům):

$$j_{8b} = j_{norm} / 16 \quad (5)$$

Pro zobrazení většího rozsahu hodnot jasů se mezi naměřenými a zobrazovanými hodnotami používají různé převodní křivky. Převodní křivky zvyšují kontrast v určitém jasovém pásmu obrazu a zlepšují tím rozlišení jeho struktury.

Při zobrazování spektroheliogramů se osvědčilo následujících pět křivek, převádějících současně měřené jasy z 12-ti bitového do 8-mi bitového rozsahu. Křivky jsou seřazeny za sebou podle výsledného jasu spektroheliogramu. Z důvodu zvýšení rychlosti zpracování nebyly použity klasické exponenciální a logaritmické funkce.

Křivka W (white disk, obr.5):

$$j_W = 64 \sqrt[4]{j_{8b}} \quad (6)$$



Obr.5: Spektroheliogram v $H\alpha$, vizualizovaný křivkou (6)

Křivka P (protuberance, obr.6):

$$j_P = 16 \sqrt{j_{8b}} \quad (7)$$



Obr.6: Spektroheliogram v $H\alpha$, vizualizovaný křivkou (7)

Křivka N (normální, obr.7):

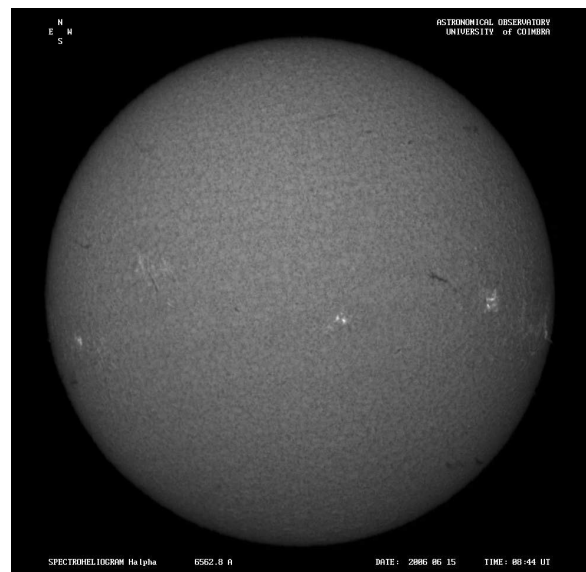
$$j_N = j_{8b} \quad (8)$$



Obr.7: Spektroheliogram v $H\alpha$, vizualizovaný křivkou(8)

Křivka D (dark disk, obr.8):

$$j_D = (j_{8b}/16)^2 \quad (9)$$

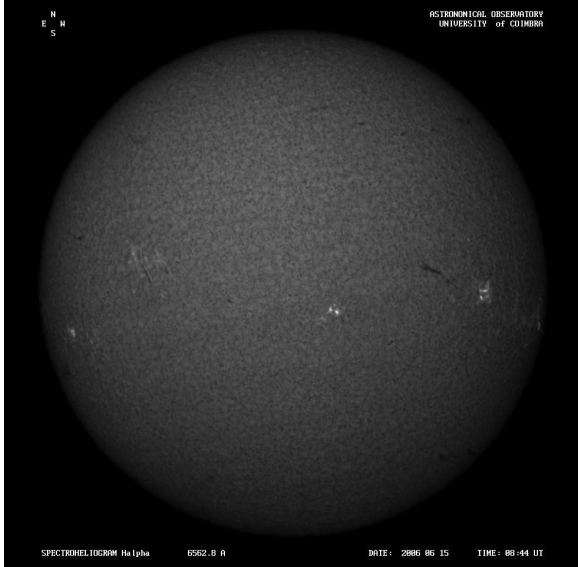


Obr.8: Spektroheliogram v $H\alpha$, vizualizovaný křivkou (9)

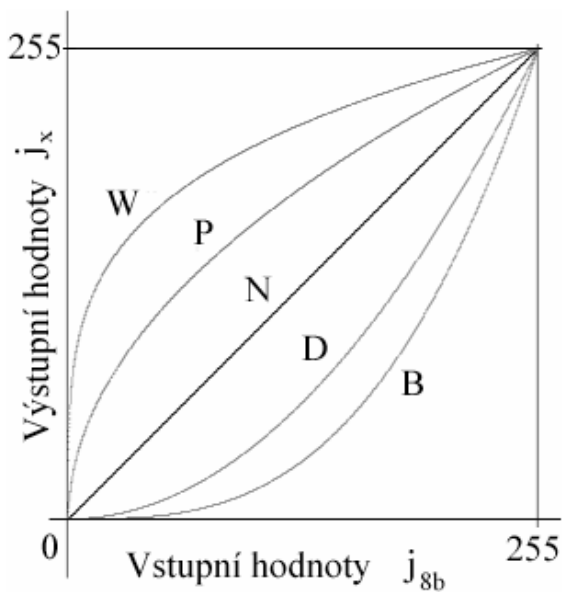
Tyto křivky jsou využívány podle toho, co chceme na spektroheliogramu zvýraznit (aktivita, celý disk, protuberance) a také podle druhu spek-troheliogramu ($H\alpha$, CaII-K3, CaII-K1, kontinuum).

Grafické znázornění křivek je uvedeno na obr.10. Na ose x jsou uvedeny vstupní hodnoty intenzit spektroheliogramu, převedené již do rozsahu 0 – 255. Křivka B (black disk, obr.9):

$$j_B = 4 (j_{8b}/64)^3 \quad (10)$$



Obr.9: Spektroheliogram v $H\alpha$, vizualizovaný křivkou (10)



Obr.10: Tvar převodních křivek (6) – (10), používaných při vizualizaci výsledných spektroheliogramů. Celá škála vstupních intenzit je zde pro názornost transformována z celočíselného rozsahu 0 až 4095 do rozsahu reálných čísel 0.0 – 255.0.

13. UKLÁDÁNÍ SPEKTROHELIOGRAMŮ

Pro zobrazení a tisk plně vyhovují osmibitové formáty PNG a BMP, které odpovídají možnostem zobrazení běžných monitorů a tiskáren. Zde se při zobrazení důležitých částí obrazu (protuberance, rozlišení struktury intenzivní emise na disku) uplatní právě popsané převodní křivky.

Pro digitální zpracování je třeba použít maximální informaci všech 12 bitů, přirozeně bez převodních křivek. Pro tyto účely používáme formát Fits.

Každý spektroheliogram v obrazovém archívu je doprovázen textovým souborem, popisujícím parametry měření, způsob jeho zpracování a obsahujícím další důležité údaje.

14. ZÁVĚR

Spektroheliogramy celého slunečního disku jsou ve srovnání se spektroheliogramy segmentů slunečního disku náročnější na zpracování právě z důvodu přítomnosti výše popsaných vlivů. Jak je vidět z uvedených příkladů, je však možno tyto vlivy kompenzovat a získat tak spektroheliogramy dobré kvality.

Poděkování

Tato práce byla realizována díky účinné podpoře grantového projektu GAČR 205/04/2129, výzkumného záměru AVOZ 1003 0501 a grantového projektu GRICES, Proc. 4.1.1 Ac. Rep. Checa

LITERATURA:

Klvaňa M., Bumba V., Garcia A., 2005, Video-spektroheliograf pro měření fotosférických rychlostních polí, Zborník referátov z 17.celoštátného slnečného seminára, I. Dorotovič(ed), Slov. ústred. hvezdáreň Hurbanovo, 207-211

[2] Technická dokumentace firmy VDS Vosskuhler GmbH, Weiss e Breite 7, D-49084 Osnabruck, SRN