

Optické vlastnosti atmosféry, rekonstrukce optického signálu degradovaného průchodem atmosférou

Učební texty k semináři

Autor:

Dr. Ing. Zdeněk Řehoř (UO Brno)

Datum:

22. 10. 2010

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah			1
1.	Optické vlastnosti atmosféry Země		2
	1.1. Útlum optického záření		2
	1.1.1.	Absorpce optického záření	4
	1.1.2.	Rozptyl optického záření v atmosféře	5
	1.2. T	urbulence vzduchu	7
2.	Vliv atmosféry na optický signál		10
	2.1. \	/liv statických vlivů	10
	2.2. \	/liv dynamických vlivů	14
	2.2.1.	Model detekce turbulence metodou "plovoucího bodu"	15
	2.2.2.	Predikce pozice bodu ve frekvenční oblasti	16
3.	Rekonstrukce optického signálu		21
	3.1. Rekonstrukce obrazu s využitím "hardwarových" prostředků		21
	3.1.1.	Spektrální filtrace optického signálu	21
	3.1.2.	Prostorově-frekvenční filtr	23
	3.2. F	Rekonstrukce obrazu s využitím "softwarových" prostředků …	24
	3.2.1.	Lineární zpracování obrazu	25
	3.2.2.	Synchronní snímání a pokročilé metody zpracování obrazu	ı 28
	3.2.3.	Restaurace dynamických vlivů na optický signál	32
4.	Závěr		35
Se	znam po	pužité literatury	

1. Optické vlastnosti atmosféry Země

Pro plnohodnotný popis pozorovaných scén je nutno zahrnout nejen vlastní vlastnosti použitého přístroje, operátora a pozorované scény samotné, ale i přenosové vlastností prostředí – atmosféry. Právě atmosféra Země je jednou z klíčových vlastností, na kterých závisí kvalita přijímaného optického signálu.

S rostoucí vzdáleností objektů je vliv atmosféry stále markantnější. V této části je proto proveden zjednodušený popis základních vlivů, které výsledný optický signál ovlivňují. V popisu jsou zahrnuty oba její dominantní vlivy – útlum optického záření i turbulence atmosféry.

1.1. Útlum optického záření

Zjišťování charakteristik pozorovaných objektů (např. jejich vzdáleností) je závislé mj. na okamžitém stavu atmosféry. Na základě znalosti tohoto vlivu je možné provádět analýzu vlivu atmosféry na přenášenou obrazovou informaci a tím i míru vlivu na vlastní parametry optického, popř. optoelektronického přístroje. K výše uvedeným vlivům přispívají nestejnou vahou různé fyzikální jevy v atmosféře se vyskytující. Mezi nejvýraznější patří absorpce a rozptyl optického záření souhrnně označované jako útlum optického záření a turbulence atmosféry.

Útlum optického záření způsobuje zejména pokles intenzity optického záření a pokles kontrastu pozorovaného objektu. Na útlumu optického záření v atmosféře je dán součtem 2 nezávislých fyzikálních jevů – absorpce a rozptylu. V obou případech se jedná v relativně krátkém časovém rozmezí (minuty, desítky minut) z pohledu pozorovatele o děje prakticky statické. Stěžejní pro modelování útlumu optického záření je proto stanovení přenosové funkce atmosféry v závislosti na útlumu optického záření.



Obrázek 1.1 Schéma vlivů působících v atmosféře na výsledné zobrazení

Obrázek 1.2 ilustruje vliv atmosféry na pozorovaný objekt. Obrázek 1.2a demonstruje objekt pozorovaný z krátké vzdálenosti. Obrázek 1.2b pak ukazuje stejnou scénu pozorovanou na hranici meteorologické dohlednosti (v tomto případě 3 km). Při porovnání obou snímku je patrný pokles kvality zobrazení pozorovaného objektu.



Obrázek 1.2 Vliv atmosféry na zobrazení vzdálených objektů. a) snímek nezatížený vlivem atmosféry, b) snímek po průchodu atmosférou

1.1.1. Absorpce optického záření

K **absorpci optického záření** dochází v atmosféře zejména: vodními parami, kysličníkem uhličitým (CO₂) a aerosolovými částicemi.

Pro účely této práce je postačující přiblížení, ve kterém je zahrnuta pouze absorpce vodními parami. Základem pro vyhodnocení je množství obsažené vody w_i na optické trase. Tento parametr je číselně roven výšce vodního sloupce [mm], který vznikne zkondenzováním všech vodních par na trase délky *l*. Je určen vztahem uvedeným např. v [5].

$$w_{l} = \frac{2.167 \cdot 10^{6} \cdot RH \cdot p_{H_{2}O}}{T} \cdot l \cdot \left(\frac{p}{p_{0}}\right)^{0.9},$$
(1.1)

kde pro výpočet parciálního tlaku nasycených vodních par lze využít s výhodou aproximační vztah:

$$p_{H_2O} = \sum_{i=0}^{3} m_i \left(T - 273.15 \right)^i , \qquad (1.2)$$

kde: koeficienty m_i mají hodnotu: $m_0 = 6.107 \times 10^{-4}$ Pa, $m_1 = 4.436 \times 10^{-5}$ PaK⁻¹, $m_2 = 1.429 \times 10^{-6}$ PaK⁻², $m_3 = 2.654 \times 10^{-8}$ PaK⁻³.

Hledanou spektrální transmitanci atmosféry $\tau_{H2O}(\lambda)$ lze následně z množství zkondenzované vody w_l přímo určit z tabelovaných hodnot (viz např. [1]).

Model atmosféry využívá tabelovaných hodnot k aproximaci hodnot (postačuje lineární interpolace) mezi dvěmi nejbližšími sousedními hodnotami. Takto stanovená hodnota je určena s dostatečnou přesností. Spektrální koeficient absorpce pak je určen rovnicí [1]:

$$\alpha \left(\lambda \right) = -\frac{\ln \tau(\lambda)}{s} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-0.9}.$$
 (1.3)

Zpřesnění určení celkového spektrálního koeficientu absorpce je možné především zahrnutím vlivu CO_2 . Hodnoty spektrální transmitance CO_2 jsou rovněž tabelované (např. [2]) pro hodnotu CO_2 0,03 % a standardní atmosférické podmínky dle standardní atmosféry USSA-1962.



Obrázek 1.3 Optické vlastnosti atmosféry Země

Na absorpci optického záření zejména v přízemních vrstvách se podílí rovněž aerosol v ní obsažený. Pro vyčíslení jeho vlivu je zpravidla přijato zjednodušení rovnoměrného rozložení aerosolu podél trasy. Tento předpoklad snižuje přesnost určení hodnoty w_a , ale pro přibližné určení spektrálního koeficientu absorpce vodními částicemi ho lze připustit [1]. Z hodnoty w_a pak lze stanovit spektrální koeficient absorpce vodními aerosolovými částicemi $\alpha_a(\lambda)$ podobně jako pro případ vodních par.

1.1.2. Rozptyl optického záření v atmosféře

Druhým důležitým faktorem ovlivňující útlum optického signálu v atmosféře je **rozptyl optického záření**. K rozptylu optického záření dochází v atmosféře jak na jejích vlastních složkách (molekuly vlastních plynů – zejména dusíku, kyslíku a kysličníku uhličitého, …), tak i na aerosolových částicích, které jsou v ní obsaženy. Pro účely této práce je uvažován pouze rozptyl vzniklý na aerosolových částicích. Rozptyl na vlastních složkách (molekuly vlastních složkách) je pro jeho velikost zanedbán.

Atmosférický aerosol se vyznačuje značně variabilním rozložením v čase i prostoru. Rovněž rozměrové složení jednotlivých druhů aerosolu je značně

proměnné. Přitom aerosol se podílí v běžných středoevropských podmínkách v přízemních vrstvách atmosféry na celkové hodnotě rozptylu rozhodující měrou.

Model pro přibližné určení spektrálního koeficientu rozptylu $\beta(\lambda)$ [km⁻¹] lze určit ze vztahu [3]:

$$\beta(\lambda) = \frac{3.91}{S_m} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{0.585S_m^{1/3}},$$
(1.4)

kde: S_m... meteorologická dohlednost [km].

Ze známých vlastností útlumu lze následně popsat vliv útlumu na optický signál. Ten je možné výhodně popsat obecně komplexní přenosovou funkcí systému (tj. v tomto případě atmosféry). Protože v této práci je řešena pouze otázka **přenosové funkce** z hlediska přenosu nekoherentního optického signálu je dále pracováno pouze s modulem této funkce - **modulační přenosovou funkcí** (MTF). Pro jednoduchost je dále předpokládáno, že je vliv atmosféry homogenní v celém zorném poli pozorovacího přístroje. MTF se mění během dne jen velmi pozvolna. Proto ji lze z pohledu krátkodobého pozorování považovat za statickou. Na základě znalosti koeficientu absorpce a rozptylu lze vyjádřit zjednodušený model MTF útlumu optického záření v atmosféře ve tvaru [5]:

$$\exp\left\{-\left[\alpha(\lambda)\cdot s + \beta(\lambda)\cdot s \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2\right]\right\}, \operatorname{pro} f_r < f_c,$$
(1.5)

(1 -)

 $M_{a}(f_{r},r,\lambda) =$

$$\exp\left\{-[\alpha(\lambda)+\beta(\lambda)]\cdot s\right\}, \ \mathsf{pro}f_r \ge f_c,$$

kde: $\alpha(\lambda)$.. spektrální koeficient absorpce [km⁻¹], $\beta(\lambda)$.. spektrální koeficient rozptylu [km⁻¹], *s* .. délka trasy [km], *r* .. char. poloměr částice aerosolu [μ m], λ .. vlnová délka optického záření [μ m], *f_r* .. prostorová frekvence

[čar/rad], f_c .. mezní prostorová frekvence [čar/rad], kde: $f_c = \frac{r}{\lambda}$.

1.2. Turbulence vzduchu

Z pohledu pozorovatele **turbulence atmosféry** způsobuje zejména prostorově závislý odklon optického záření od původního směru šíření což se v rovině pozorovatele projevuje fluktuacemi amplitudy optického záření a geometrickými deformacemi pozorovaného obrazu.

Pro popis vlivu turbulence je používán strukturální parametr indexu lomu C_n^2 . V [5] byl experimentálně ověřen regresivní model umožňující určení C_n^2 pomocí standardně měřených meteorologických údajů:

$$C_n^2 = A_1 W + B_1 T + C_1 R H + C_2 R H^2 + C_3 R H^3 + D_1 W S + D_2 W S^2 + D_3 W S^3 + E_1 S F + F_1 T C S A + G$$
(1.6)

kde: W ... časová váhová funkce (viz. obrázek 1.4),





Obdobně jako v případě útlumu lze stanovit *MTF* turbulence atmosféry. Na základě znalosti strukturálního parametru indexu lomu C_n^2 lze MTF turbulence atmosféry se zohledněním délky expozice jednoho snímku definovat jako [5]:

- a) pro dlouhé expozice: $MTF_{turbul} = \exp(-57.3 \cdot f_r^{5/3} \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-1/3} \cdot s)$
- b) pro krátké expozice:

$$MTF_{turbul} = \exp\left\{-57.3 \cdot f_r^{5/3} \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-1/3} \cdot s \cdot \left[1 - x \cdot \left(\frac{\lambda \cdot f_r}{D}\right)^{1/3}\right]\right\},$$

kde:

*f*_{*r*} ... prostorová frekvence [čar/rad],

 C_n^2 ... strukturální parametr indexu lomu [m^{2/3}],

 λ ... vlnová délka [µm],

s ... délka trasy [km],

- x... je roven 1 pro blízké pole, 0,5 pro vzdálené pole [-],
- D ... průměr vstupní apertury [mm].

Za krátkou expozici lze přitom považovat expozici, jejíž délka je podstatně kratší než střední doba jedné fluktuace amplitudy přijímaného optického záření (typicky 5 ÷10 ms). Na rozdíl od útlumu nelze v tomto případě předpokládat, že vliv turbulence je homogenní v celém zorném poli.

Na základě znalosti dílčích MTF útlumu a rozptylu lze stanovit výslednou MTF atmosféry. Ta, při přijetí předpokladu vzájemné nezávislosti těchto vlivů, je dána součinem dílčích přenosových funkcí:

$$MTF = MTF_a \cdot MTF_{turbul} \tag{1.8}$$

(1.7)

U soudobých zobrazovacích systémů není vliv atmosféry kompenzován. Nerespektování této skutečnosti způsobuje mj. pokles kontrastu cíl proti pozadí, a tím zhoršení kvality zobrazení (zejména na dlouhých trasách) a zmenšení vzdálenosti, na které lze pozorovaný cíl zobrazovacím systémem zjistit, případně rozpoznat, s požadovanou pravděpodobností.

Pozn.: V atmosféře dochází nejen k rychlým změnám indexu lomu v důsledku turbulence, ale i k mnohem pomalejším. Pomalé změny indexu lomu vzduchu mají za následek refrakci paprsků. Úhel mezi tečnou paprsku v počátečným nebo konečným bodem optické dráhy a přímkou, která spojuje počátečný a konečný bod se nazývá úhel refrakce. Pro úhel refrakce, pod kterým dopadne paprsek na vstupní pupilu optické soustavy lze ze zákonu lomu odvodit vztah:

$$\alpha_p = \int_0^s \frac{\sin \alpha}{n} \cdot \frac{dn}{dT} \cdot |\nabla T| \cdot ds$$
(1.9)

kde: ∇T ... gradient teploty [K].

Pro případ déle trvajícího pozorování je proto nutno zahrnou i tento vliv. V opačném případě lze vliv refrakce zanedbat.

2. VLIV ATMOSFÉRY NA OPTICKÝ SIGNÁL

Vliv atmosféry na výsledné zobrazení optickým/optoelektronickým systémem se projevuje zejména poklesem intenzity optického záření během šíření v atmosféře, snížením kontrastu cíl/pozadí, fluktuací přijímané úrovně optického záření vlivem turbulence, deformací obrazů pozorovaných objektů a zkreslením barevných charakteristik objektů. Pro zpracování optického signálu je možno pohlížet na vliv atmosféry i z časového hlediska. Pak lze vliv atmosféry rozdělit na: statický a dynamický vliv atmosféry. Rozdělení vlivu atmosféry na statický a dynamický umožňuje přistoupit k jejich separaci a tím ke kvantifikování jejich dílčích vlivů, popř. následně i k přijetí opatření pro minimalizaci jednotlivých vlivů.

2.1. Vliv statických vlivů

Za **statické vlivy** lze považovat vlivy, jejichž úroveň zůstává v krátkém časovém horizontu prakticky neměnná, nebo se mění kolem určité hodnoty. To umožňuje využít kvantifikace střední hodnoty tohoto vlivu nejen k jeho popisu, ale zejména i k jeho potlačení. Mimo útlumu optického záření lze mezi statické vlivy zahrnout i atmosférickou refrakci a pro případ dostatečně dlouhých expozicí částečně i turbulenci vzduchu.

Jak již bylo uvedeno, vliv útlumu atmosféry se na výsledném zobrazení optickým, resp. optoelektronickým systémem projevuje zejména poklesem intenzity optického záření během šíření v atmosféře a snížením kontrastu cíl/pozadí.

S výhodou lze popsat vliv statických vlivů prostřednictvím jejich modulační přenosové funkce (MTF) [1]. Nízké prostorové frekvence v obraze "nesou" základní informaci o umístění a o základních tvarech objektů. Střední oblast prostorových frekvencí je významná pro správné rozdělení stupnice záře a zobrazení základních obrysů objektů. Vysoké prostorové frekvence mají zásadní roli pro zobrazení jemných struktur obrazu, a ostrých přechodů mezi objekty a jejich pozadím.

Ze znalosti MTF atmosféry lze usuzovat na celou řadu vlastností nejen atmosféry, ale i výsledného obrazu. Kvalitou obrazu je rozuměna veličina

vyjadřující věrnost reprodukce prostorové distribuce určitého parametru (např. záře) na výstupu zobrazovacího systému vzhledem k distribuci tohoto parametru v rovině objektu. MTF atmosféry lze využít pro hodnocení kvality obrazu následujícími způsoby:

1) Mírou kvality je hodnota, na kterou poklesne MTF při určité prostorové frekvenci.

2) Mírou kvality je prostorová frekvence, na které hodnota MTF poklesne na definovanou úroveň. Volené hodnoty jsou zpravidla v rozmezí (0,001-0,707).

3) Mírou kvality je koeficient určený z průběhu MTF.

Nevýhodou prvního a druhého způsobu hodnocení kvality obrazu je, že nerespektují celý průběh MTF, ale pouze její část. Hodnocení kvality obrazu podle třetího způsobu respektuje celý průběh MTF, nebo jeho podstatnou část, a je proto považován za nejvhodnější pro další využití. Pro **hodnocení kvality zobrazení** je v odborné literatuře často využíván koeficient MCFA (Modulation Contrast Function Area)), který je definován vztahem [např. 2]:

$$MCFA = \int_{0}^{\infty} \frac{MTF(f_r)}{f_r} df_r$$
(2.1)

kde f_r je prostorová frekvence [čar/rad] a *MTF* je modulační přenosová funkce atmosféry.

Podle [4] lze obraz jehož hodnota MCFA je větší než 0,68 považovat za kvalitní. Omezení vyvolaná atmosférickým přenosovým kanálem se prakticky neprojevují. Pro MCFA z intervalu (0,5-0,68) je obraz nadále kvalitní. Vliv atmosférického přenosového kanálu je patrný zejména na zobrazení jemných struktur sledovaného objektu (tj. struktur s rozměry srovnatelnými s rozlišovací mezí použitého zobrazovacího systému). Pro MCFA (0,33-0,5) dochází v obraze k výrazné degradaci. Přesto jsou v něm zřetelné všechny charakteristické struktury. Pro MCFA (0,1-0,33) jsou v obraze patrné pouze základní struktury. Vhodným zpracováním obrazu je však možné ve značné míře tyto informace restaurovat. Pro MCFA menší než 0,1 je obraz zcela degradován. Nenávratně se ztrácí základní informace o všech objektech. S klesající hodnotou koeficientu přenosu kontrastu MCFA klesá i hodnota dosahu optoelektronického přístroje oproti jeho teoretické hodnotě. Kolikrát bude tato vzdálenost menší oproti teoretické hodnotě lze vyjádřit vztahem [4]:

$$z_{t} = 1 + \frac{\ln(\frac{MCFA_{id}}{MCFA_{poz}})}{MCFA_{id}}, \qquad (2.2)$$

kde: MCFA_{id} je koeficient kvality zobrazení bez vlivu atmosféry a MCFA_{poz} koeficient kvality pozorovaného obrazu. Výhodné se zde jeví využití modelu atmosféry [1], který z meteorologických údajů (teplota s relativní vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, ...) umožňuje stanovit hodnotu koeficientu *MCFA* a tím i koeficient zkrácení dosahu optoelektronického přístroje.



Obrázek 2.1 Koeficient zkrácení dosahu optoelektronického přístroje

Pro hodnocení středního vlivu turbulence na optický signál je výhodné využít model turbulence (viz. kapitolu 0) vyjadřující závislost strukturálního koeficientu turbulence na stěžejních meteorologických parametrech. Mimo již uvedeného zkrácení dosahu optického přístroje lze analyzovat i další závislosti a dopady. Z provedené analýzy [2] vyplývá, že s rostoucí rychlostí větru a relativní vlhkostí vzduchu strukturální koeficient turbulence (a tím i vliv turbulence jako takové) klesá. Naopak s rostoucí teplotou vzduchu a zejména s rostoucí hustotou energie slunečního záření (slunečního svitu) roste.

Vliv turbulence ukážeme na příkladu chyby měření dálky u optoelektronického systému využívajícího měření vrcholového úhlu (tzv. paralaxy) mezi měřeným

objektem a základnou přístroje (tzv. bází). S využitím uvedeného modelu turbulence lze vyjádřit průměrné chyby způsobené turbulencí vzduchu. Na základě analýzy meteorologických údajů ve středoevropském regionu a s využitím modelu turbulence (viz kapitolu 0) lze v rozsahu běžných meteorologických situací přistoupit k přibližnému určení rozložení chyby dopadového úhlu paprsku a tím i např. chyby určené dálky vlivem turbulence. Pro strukturální koeficient C_n z intervalu (1*10⁻⁸ ÷ 5*10⁻⁷) lze pro modelování rozložení chyb využít normálního rozdělení $N(\mu_T, \sigma_T)$ [6]. Hodnota parametru μ je rovna 0 a parametr σ_T nabývá hodnot z intervalu (0, $\sigma_{T, max}$), kde pro $\sigma_{T, max}$ platí [3]:

$$\sigma_{T,\max} = \frac{\Delta s_t}{\psi} , \qquad (2.3)$$

kde: ψ je koeficient podobnosti [-], který nabývá zpravidla hodnot v rozmezí (1-3); typická hodnota pro běžné meteorologické podmínky ve středoevropském regionu je kolem 2,5.

Obrázek 2.2 ilustruje chybu určené dálky pro slabou, středně silnou a silnou turbulenci. Příklad chyby způsobené slabou turbulencí ($C_n=5\cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1/3}$), středně silnou turbulencí ($Cn=5\cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1/3}$) i silnou turbulencí ($Cn=5\cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$) je stanovena pro bázi přístroje rovnu 1m a vstupní pupilu objektivů 50 mm.

Z uvedeného např. vyplývá, že ve slabé turbulenci je chyba určené dálky prakticky zanedbatelná a dosahuje hodnot pod 1% měřené dálky. Pro středně silnou turbulenci dosahuje chyba hodnot do 5% měřené dálky. V silné turbulenci však chyba může dosáhnout až 25-33% měřené vzdálenosti.

Pro velmi dlouhé expozice v turbulentní atmosféře ustupuje deformace tvarů vlivem turbulence atmosféry do pozadí (vliv "skládání" kratších expozic do jedné delší). To způsobuje pokles kontrastu pozorované scény. Chyba určené dálky je pak určena obdobně jako v případě nepřesného zamíření vlivem poklesu kontrastu pozorované scény.



Obrázek 2.2: Chyba dálky vlivem turbulence

2.2. Vliv dynamických vlivů

Nejvýznamnějším dynamickým vlivem, který ovlivňuje vlastnosti optického signálu přijímaného po průchodu atmosférou je turbulence vzduchu zejména pak, přijímáme-li optický signál optoelektronickým zařízením s krátkými expozicemi.

Z pohledu pozorovatele představuje deformace pozorovaného obrazu (resp. přijímaného optického signálu) **fluktuační pole** tvořené **fragmenty**, jejichž intenzita a souvztažnost (tj. sobě si odpovídající souřadnice) se mění v čase. Fragmentem se přitom nerozumí jediný obrazový bod, ale množina bodů, jejichž parametry lze v daném čase vůči sobě považovat za konstantní. Pro jednoduchost popisu se dále zaměříme pouze na fluktuaci jediného fragmentu – tzv. záměrného bodu. Zobecnění fluktuací na celou obrazovou rovinu není předmětem této práce.

Pro popis dynamických vlivů atmosféry na optický signál je klíčové stanovit vhodný algoritmus nejen určení polohy, ale zejména predikce pohybu záměrného bodu (sledovaného fragmentu). Na základě výsledků dlouhodobých měření a analýz byl autorem této práce sestaven matematický model driftu záměrného bodu, který umožňuje popsat s dostatečnou přesností pohyb záměrného bodu a to i v blízké budoucnosti (tj. v nejbližší periodě jeho pohybu). To vytváří základní předpoklad pro kompenzaci driftu záměrného bodu HW prostředky. Uvedený model umožňuje mimo vlastní hodnotu driftu stanovit pro definovanou zájmovou oblast i jeho převažující směr.

2.2.1. Model detekce turbulence metodou "plovoucího bodu"

Na obraz pozorované scény degradované vlivem turbulence atmosféry lze pohlížet jako na obraz složený z jednotlivých polí/fragmentů. Jednotlivé fragmenty se vůči sobě pohybují různými směry a rychlostmi. Velikost jejich pohybu je funkcí intenzity turbulence atmosféry. V důsledku toho dochází ke změnám souřadnic jednotlivých fragmentů (resp. jejich význačných bodů) a neustálému kolísání intenzity optického záření přicházejícímu od jednotlivých obrazových bodů pozorované scény. Výchozím předpokladem je, že scénu mezi jednotlivými snímky lze považovat za přibližně statickou (není v ní žádný rychle se pohybující cíl).

Základem **metody "plovoucího bodu"** je využití matematického popisu "optického proudu" ze série po sobě jdoucích snímků ze změn intenzity fragmentu v závislosti na jeho pozici a čase s využitím Taylorovy řady :

$$E(x, y, t) = E_0(x, y, t) + \frac{\partial E_1(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial E_1(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial E_1(x, y, t)}{\partial t} + \dots,$$
(2.4)

kde: $E_i(x,y,t)$... intenzita optického záření v obrazovém poli v souřadnici (x,y) v čase t.

Pro zpracování optického proudu vyvolaného vlivem turbulence lze vyšší řády parciálních derivací zanedbat. Vlastní popis optického proudu vzniklého ze sekvence snímků v čase t a (t+dt) platí:

$$-\frac{\partial E(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial E(x, y, t)}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E(x, y, t)}{\partial y} \frac{dy}{dt},$$
(2.5)

resp.
$$\nabla E(x, y, t)\mathbf{v} + \frac{\partial E(x, y, t)}{\partial t} = 0$$
, (2.6)

kde: ∇ ... operátor prostorového gradientu intenzity fragmentu,

v... vektor rychlosti pohybu fragmentu (obrazového bodu).

2.2.2. Predikce pozice bodu ve frekvenční oblasti

Pro úspěšnou predikci driftu záměrného bodu je předpokládáno, že jeho pohyb je spojitý bez skokových změn. Dále je předpokládáno, že v krátkém časovém intervalu lze vlastní pohyb záměrného bodu rozdělit na složku systémovou a náhodnou. Systémová složka je zastoupena dominantní frekvencí (frekvencemi), která určuje základní pohyb záměrného bodu kolem střední hodnoty. Na ní jsou superponovány další, náhodné složky. Vyjádřeno v časové oblasti:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{S} + \mathbf{Q}_{R}, \qquad (2.7)$$

kde: **Q** ... celkový vektor pohybu záměrného bodu,

Qs ... systémová složka pohybu,

Q_R ... náhodná složka pohybu.

Za předpokladu platnosti superpozice signálu lze výše uvedený vztah přepsat do frekvenční oblasti:

$$F = F_s + F_R. \tag{2.8}$$

Predikce polohy záměrného bodu ve spektrální oblasti vychází z matematického popisu systémové složky turbulence. Náhodná složka (z pohledu signálu šum) pak způsobuje odchylky v predikované poloze.

Základem metody extrapolace spektra je rozdělení spektra *F* na oblasti se stejným obsahem (resp. počtem hodnot) – ekvivalent kvartil, popř. decil.

$$kons = \int_{j=u}^{u+\Delta} F_j df$$
(2.9)



Obrázek 2.3: Diskretizace spektra turbulence do oblastí

Postačující je zpravidla 10 oblastí – F_1 až F_{10} . S ohledem na typické spektrum turbulence jsou oblasti s nižšími frekvencemi zpravidla užší (a vyšší) než oblasti popisující vyšší frekvence.

Každá tato oblast je vyhodnocena samostatně. V dalším zpracování je zastoupena charakteristickou frekvencí, která odpovídá pozici kvantilu uvnitř oblasti. Ze změn hodnoty uvnitř oblasti je vytvořen stavový vektor W_j (obsahuje informaci jak o amplitudě χ_j tak i fázi φ_j). W_j tedy obsahuje vývoj dané oblasti spektra za určitý časový úsek.

$$W_{j} = \left[\chi_{j} e^{i\varphi_{j}} \chi_{j-1} e^{i\varphi_{j-1}} \chi_{j-2} e^{i\varphi_{j-2}} \dots \right]$$
(2.10)

Tento přístup umožňuje popsat nejen velikost příslušné charakteristické frekvence (pro přísně periodický signál by stavový vektor W_j byl nulový), ale i její tendenci vývoje ("systémovou" změnu amplitudy, popř. fáze). Z hodnot stavového vektoru W_j je extrapolována budoucí hodnota vektoru W_{j+1} . K tomu lze využít postup uvedený výše v části věnované predikci pozice záměrného bodu v časové oblasti.



Obrázek 2.4: Stavový vektor Wi a jeho aproximace (amplitudová složka)

červeně – aproximační funkce, modře – predikovaná hodnota

Oproti případu extrapolace v časové oblasti je výsledná hodnota komplexní (nese informaci jak o velikosti, tak i fázi charakteristické frekvence). Výsledné diskrétní spektrum $F_{d,j+1}$ je pak dáno složením dílčích oblastí W_{j+1} .



Obrázek 2.5: Srovnání chyby predikce záměrného bodu

tečkovaně (fialově) … střední hodnota driftu vlivem turbulence, čárkovaně (zeleně) … chyba predikované pozice za předpokladu rovnoměrného pohybu bodu, čerchovaně (modře) … chyba predikované pozice metodou nejmenších čtverců, plná (červená) … chyba predikované pozice z vývoje spektra turbulence

Uvedený přístup k driftu záměrného bodu vlivem turbulence umožňuje s dostatečnou přesností provádět dostatečně přesný odhad pozice bodu oproti

odhadu přímo v časové oblasti ve větším časovém horizontu (řádově jednotek period dominantních frekvencí).

Obrázek 2.5 ilustruje srovnání chyby predikce mezi jednotlivými metodami predikce v podmínkách slabé turbulence (hodnota směrodatné odchylky driftu záměrného bodu je σ =0.7 pix). Předpokládána je obrazová frekvence 60 obr./s. Pohybový vektor **Q** byl vytvořen z 15 předchozích snímků (tj. cca z doby 250 ms, jsou tedy zahrnuty zejména dominantní nízké frekvence). Za nevyhovující je považována taková chyba predikce, kdy je chyba predikce větší, než je hodnota směrodatné odchylky σ .

Nejjednodušší metoda predikce předpokládající rovnoměrný přímočarý pohyb záměrného bodu je pro účely predikce pozice záměrného bodu nevhodná (již na následujícím snímku je chyba predikce velmi často srovnatelná s hodnotou směrodatné odchylky σ). Střední doba přijatelné chyby predikce je v tomto případě cca 15ms.

Lepší výsledky poskytuje využití metody nejmenších čtverců. I v tomto případě má metoda dostatečnou přesnost jen omezenou. Lze ji proto zpravidla využít jen pro následující snímek a to pouze za předpokladu, že se bod pohybuje v okolí své střední pozice. Střední doba akceptovatelné chyby predikce je pro tuto metodu predikce pro uvažovanou situaci 33 ms.

Nejlepší podmínky dává využití analýzy spektra turbulence. S přijatelnou přesností bylo v tomto případě možné predikovat pozici bodu cca 4-5 obrázku vpřed. Střední doba přípustné chyby byla cca 80 ms. V případě snížení nároků na přesnost predikce např. na jeden pixel je střední doba úspěšné predikce polohy dokonce cca 150 ms.

V podmínkách silné turbulence je doba úspěšné predikce obdobná. Uvažujme např. hodnotu směrodatné odchylky driftu záměrného bodu σ =3.1 pixelu. Odhad pozice záměrného bodu algoritmem využívajícím predikci ve frekvenční oblasti v tomto případě dokázal úspěšně predikovat polohu s chybou menší než σ po dobu téměř 300 ms. Ve velké míře se na délce úspěšné predikce podílela právě velká hodnota turbulence, která byla do značné míry ustálená a podíl náhodné složky byl velmi nízký.



Obrázek 2.6: Srovnání chyby predikce záměrného bodu v silné turbulenci

tečkovaně (fialově) … střední hodnota driftu vlivem turbulence, čárkovaně (zeleně) … chyba predikované pozice za předpokladu rovnoměrného pohybu bodu, čerchovaně (modře) … chyba predikované pozice metodou nejmenších čtverců, plná (červená) … chyba predikované pozice z vývoje spektra turbulence

3. REKONSTRUKCE OPTICKÉHO SIGNÁLU

Na základě poznatků uvedených v předchozích kapitolách lze přistoupit k efektivní rekonstrukci optického signálu degradovaného průchodem atmosférou. V závislosti na požadavcích na rychlost a kvalitu rekonstrukce je možné zvolit dva přístupy.

S využitím hardwarových prostředků lze prakticky bez časového zpoždění do značné míry potlačit vliv statických vlivů. Jejich schopnost potlačit dynamické vlivy je, pokud pomineme omezené možnosti adaptivní optiky, velmi malá. Tímto omezením netrpí vybrané metody softwarového zpracování optického signálu. Mimo potlačení statických vlivů tak umožňují relativně efektivně potlačit i vliv vlivů dynamických. Jejich využití je ale do značné míry omezeno určitou časovou náročností a tím i vznikajícím časovým zpožděním mezi přijetím obrazové informace a výsledkem jejího zpracování.

3.1. Rekonstrukce obrazu s využitím "hardwarových" prostředků

3.1.1. Spektrální filtrace optického signálu

Obrázek 3.1 ilustruje vliv vlnové délky optického záření procházejícího atmosférou na výsledné zobrazení. Vliv turbulence je ve viditelné a blízké IČ oblasti spektrálně závislý jen minimálně. Jiná situace je v infračervené oblasti, kde je propustnost optického záření omezena tzv. atmosférickými okny (viz obrázek 1.2). Oproti tomu útlum optického záření (zejména rozptyl) mění svoji hodnotu v závislosti na vlnové délce velmi výrazně. S rostoucí vlnovou délkou se jeho vliv zpravidla snižuje. Soudobé CCD a CMOS maticové detektory optického záření mají bez předřazených spektrálních filtrů maximum spektrální citlivosti zpravidla v okolí červené barvy a blízké IČ oblasti. Této vlastnosti lze využít pro snadné snížení vlivu útlumu na výsledné zobrazení.

S využitím modelu atmosféry (kapitola 1) a známé citlivosti typického CCD detektoru lze navrhnout optimální průběh **spektrálního filtru** omezujícího vliv útlumu atmosféry. Obrázek 3.2 ukazuje vhodný průběh spektrálního filtru pro potlačení vlivu atmosféry. V případě černobílých zobrazovacích systémů je optimální průběh zobrazen modře. Svým průběhem jde o obdobu IČ filtru typu pásmová propust optimalizovaného na spektrální vlastnosti atmosféry.



Obrázek 3.1: Spektrální vliv útlumu a turbulence v porovnání se spektrální typického detektoru CCD vyrobeného na bázi křemíku

V případě barevný detektorů (resp.systémů pracujících s barevným obrazem) je nutné zahrnout i určitou část z oblasti kratších vlnových délek. Na obrázku níže je uveden modelový návrh pro Bayerovu masku RGB, kdy zbývající barevné složky jsou označeny červeně a zeleně. Protože filtry využité v Bayerově masce se částečně liší výrobce od výrobce je pro barevnou věrohodnost nutno počítat s částečným vyvážení bílé barvy v obraze.



Obrázek 3.2: Filtr pro omezení vlivu útlumu optického záření A-IR Pro742

Takto navržený filtr umožňuje jednoduchým umístěním v optické soustavě (např. na vstupní pupilu objektivu) výrazné zvýšení kontrastu pozorovaného objektu i za zhoršených meteorologických podmínek vlivem útlumu optického záření. Poněkud složitější je snížení vlivu turbulence atmosféry. V přecházející kapitole uvedený postup predikce pozice záměrného bodu umožňuje využití v systémech určených pro snížení vlivu atmosféry.

Z energetického hlediska je výhodné, aby šířka pracovního pásma optoelektronického přístroje byla co největší. Neměla by však přesahovat šířku aktuálně využívaného atmosférického okna. V případě silného rozptylu optického záření je naopak výhodné zvolit co nejužší pracovní pásmo a to v co největších vlnových délkách na kterých je schopen daný optoelektronický systém pracovat.

Kompromisem pro většinu meteorologických situací je omezení pracovního pásma na třetinu aktuálně používaného atmosférického okna v oblasti větších vlnových délek.

3.1.2. Prostorově-frekvenční filtr

Omezení se pouze na rekonstrukci optického signálu pouze ve spektrální oblasti neumožňuje účinně potlačit zbylé statické vlivy, které se projevují zejména v prostorové oblasti. Proto je vhodné doplnit optický soustavu o subsystém umožňující prostorovou filtraci optického signálu. Obrázek 3.3 ukazuje příklad **prostorově-frekvenčního filtru**.



- 1. Vstupní a výstupní optická soustava
- 2. Prostorově-frekvenční modulátor
- 3. Spektrální filtr

Obrázek 3.3: Prostorově frekvenční filtr doplněný o spektrální filtr

Vstupní optická soustava zajišťuje průchod paralelního svazku přes jádro prostorově frekvenčního filtru – prostorově frekvenční modulátor. Vlastní prostorově frekvenční modulátor představuje realizaci inverzní funkce

k přenosové funkci atmosféry. To umožňuje zvýraznění těch prostorových frekvencí, které jsou v atmosféře potlačovány. Prostorově frekvenční modulátor lze realizovat jako konstantní pro určité meteorologické podmínky nebo stavitelný prvek pro určitý omezený rozsah průběhů modulačně přenosové funkce atmosféry a tím i meteorologických podmínek.

Spektrální propustnost celého prostorově frekvenčního filtru je vhodné volit dle kritérií uvedených v kapitole výše pomocí vhodného spektrálního filtru. Výstupní optická soustava pak zajišťuje obnovení sbíhavosti svazku na původní hodnotu.

Jak z povahy modulačně přenosové funkce vyplývá (a tím i funkci k ní inverzní), klíčové pro korektní funkci tohoto filtru je dostatečný odstup vlastního optického signálu od "šumu", tj. fluktuaci optického záření pozadí. V opačném případě tato relativně jednoduchá metoda filtrace selhává.

Mimo potlačení vlivu útlumu optického záření je uvedený prostorově frekvenční filtr vhodný pro potlačení i jiných statických vlivů v atmosféře na optický signál působících (refrakce, vliv turbulence pro dlouhé expozice). I když je principielně možné navrhnout řízený prostorově frekvenční filtr tak, aby jeho aktuální transformační funkce odpovídala většímu rozsahu meteorologických podmínek, není tento přístup příliš úspěšný pro potlačení rychlých lokálních prostorových fluktuací vlivem dynamických jevů – turbulence vzduchu. Pro jejich potlačení je nutné použít jiné řešení. Pokud pomineme možnosti adaptivní optiky, která je schopna velmi účinně potlačit vliv atmosféry, ale jen za podmínky existence referenčního signálu (zpravidla umělé hvězdy) a to pouze v omezeném zorném poli, je nutné použít některou z metod softwarové rekonstrukce optického signálu (obrazu).

3.2. Rekonstrukce obrazu s využitím "softwarových" prostředků

Cílem rekonstrukce obrazu, degradovaného průchodem atmosférou, obecně je zvýšit jeho kvalitu, tzn. omezit v maximálně možné míře vliv atmosférického přenosového kanálu. Výše uvedené modely, jak již bylo uvedeno, popisují střední hodnoty vlivu atmosféry na výsledný obraz a možné postupy potlačení jejího vlivu.

Metody softwarového zpracování optického signálu (obrazu) umožňují sice rovněž odstranit střední vliv atmosféry, a tím i její statický vliv na optický signál, ale jejich možnosti jsou mnohem širší. Pomocí nich lze navíc např. realizovat jak potlačení šumu v obraze (a to energetického – např. šum detektoru, tak i prostorového – fluktuace poloh fragmentů obrazu vlivem turbulence), tak např. i zvýšení výsledné rozlišovací schopnosti přístroje jako takového a to vhodným skládáním za sebou následujících snímků.

3.2.1. Lineární zpracování obrazu

Jednou z nejjednodušších a přitom relativně účinných metod restaurace obrazu je využití **filtru s konečnou impulsní odezvou FIR**. Východiskem pro určení požadované amplitudové frekvenční odezvy filtru je modulačně přenosová funkce atmosféry (*MTF* atmosféry). *MTF* atmosféry lze určit z modelu uvedeném např. v [3]. Vlastní rekonstruovaný obraz *f* pak je určen předpisem:

$$f = Norm[FFT^{-1}(F)], \qquad (3.1)$$

kde $F = FIR \cdot Q$.

Za předpokladu dostatečného odstupu signál/šum je hledaná amplitudová frekvenční odezva filtru FIR je pak čtvercová matice řádu (2n+1), pro kterou platí:

$$FIR = \operatorname{Nor}(\frac{1}{M_f}), \qquad (3.2)$$

kde: Nor vyjadřuje operaci normování (dle maximální hodnoty výrazu $\frac{1}{M_f}$).

Z meteorologických parametrů je určen průběh MTF atmosféry [1]. Pro následné určení rekonstrukčního filtru je postačující [3] rozměr matice 5x5 až 9×9.

Protože výše uvedená *MTF* atmosféry charakterizuje střední vliv atmosféry na výsledný obraz i použití filtru FIR využívajícího její znalosti je touto skutečností

limitováno. Odchylky obrazu při zpracování reálných snímků pak podléhají statistickým charakteristikám daným povahou *MTF* (normální rozdělení). Z toho plyne i omezení jejího použití.

Uvedená metoda je velmi účinná pro kompenzaci statických vlivů (tedy těch, jejichž charakteristiky se mění jen velmi pozvolna), které vyvolávají degradaci zobrazení. Primárně je tedy vhodná pro minimalizaci vlivu útlumu optického záření a částečně i pro kompenzaci degradací obrazu při velmi dlouhých expozicích v turbulentní atmosféře.

Tato metoda s konstantním filtrem FIR nedokáže přímo kompenzovat degradace vyvolané dynamickými jevy (turbulencí atmosféry), tedy ani deformaci vlnoplochy a s tím související projevy. Tento vliv je možné omezit ze série po sobě jdoucích snímků a to pomocí **skládání snímků**.



Obrázek 3.4: Výřez snímku – jasný bod (série snímků ve falešných barvách) a) nejlepší jednotlivý snímek, b) jednotlivý snímek deformovaný turbulencí,

c) průměrný snímek z 10 po sobě jdoucích.

Předpokládejme *n* po sobě jdoucích snímků. Protože jsou snímky pořízeny prakticky za stejných podmínek jednou optickou soustavou, je jejich geometrické zkreslení a zatížení optickými aberacemi prakticky totožné.

Jednotlivé snímky jsou ale degradovány různou měrou vlivem atmosféry (obrázek 1.1). Rovněž vliv snímače (CCD) se projeví náhodným šumem v obraze.

Pro výběr snímků nejméně zatížených náhodnými vlivy je výhodné pro první přiblížení využít např. zobrazení bodu (popř. zobrazení bodových detailů v obraze). Prosté skládání *n* snímků *q* je dáno předpisem:

$$q_{p}(x, y, L) = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_{i}(x, y, L_{i})}{n}.$$
(3.3)

Výsledný snímek složený pomocí tohoto předpisu má do značné míry potlačen náhodný šum vyvolaný detektorem optického záření. Rovněž dynamický vliv atmosféry je do značné míry vyhlazen. Obrázek 3.5 ilustruje příklad skládání *n* po sobě jdoucích snímků. V analyzovaném případě se vliv atmosféry projevuje jen posunem obrazu analyzovaného bodu. Deformace lokálních fragmentů obrazu, které dále snižují účinnost tohoto algoritmu, nejsou uvažovány.



Obrázek 3.5: Model skládání snímků – odezev bodů a) X odezev z vybraných nejlepších snímků,

 b) modře – ideální odezva bodu, červeně – výsledná odezva vzniklá zprůměrováním dílčích odezev dle a)

Obrázek 3.5b ukazuje výsledek zpracování. Je patrné, že oproti ideální odezvě bodu je výsledná odezva bodu širší. To v praxi znamená nižší rozlišovací schopnost celého systému oproti maximální teoretické hodnotě. Oproti dílčím snímkům však dochází k výraznému zlepšení.

3.2.2. Synchronní snímání a pokročilé metody zpracování obrazu

Prosté zpracování obrazu uvedené v kapitole 3.2.1 umožňuje sice zvýšit kvalitu obrazu degradovaného náhodnými vlivy (např. i šumy detektoru, geometrickým zkreslením optické soustavy, ...), jeho aplikace na potlačení vlivu atmosféry je však omezena na eliminaci jeho středního vlivu nebo zatížena vedlejšími efekty (částeční snížení maximální rozlišovací schopnosti). Obrázek 3.6 ukazuje možné doplnění měřícího/snímacího systému tak, aby bylo možné realizovat rekonstrukci obrazu degradovaného vlivem atmosféry v co nejvyšší možné míře.

CCD1 je uložena v ohniskové rovině přijímacího objektivu a předává do záznamového systému (PC) ostrý obraz pozorované scény, který je základem pro rekonstrukci obrazu.

CCD2 je posunuta mimo obrazovou rovinu. Informace z ní jsou využity k určení deformace vlnoplochy vlivem turbulence atmosféry. V definované vzdáleností před ní je umístěna v případě potřeby referenční mřížka umožňující separovat vliv atmosféry. Umístění snímače mimo ohniskovou rovinu vyvolá v rovině detekce rozostření, jehož velikost závisí na parametrech optické soustavy a velikosti posunu detekční roviny od obrazové. V obrazu tak s rostoucí hodnotou posunu snímače od obrazové roviny (driftu) klesá podíl vyšších obrazových frekvencí. Rozlišení detailů v obraze klesá. Vlastní rozostření obrazu se řídí Gaussovým rozdělením. Vliv atmosféry ale vyvolává deformace předpokládané vlnoplochy od skutečně detekované. Vhodným zpracováním je pak možné separovat vlastní vliv atmosféry od vlastní obrazové informace a takto

obdrženou informaci využít pro rekonstrukci obrazu pořizovaného snímačem CCD1 (viz např. obrázek 3.9).

Vlastní zpracování snímku je pak oproti statickému filtru z kapitoly 3.2.1 **adaptivní filtr**. Parametry vlastního zpracování záznamu je pak možné pro aktuálně zpracovávaný snímek-část snímku dynamicky přizpůsobovat.



Obrázek 3.6: Blokové schéma synchronního snímáni

Existuje celá řada algoritmů, které dokáží s výše uvedenou informací efektivně pracovat. Za všechny uveďme alespoň hojně užívaný **algoritmus Richardson-Lucy**. Tento algoritmus je robustní iterační algoritmus [3], který umožňuje zvýšit kvalitu obrazu a tím i ostrost detailů obrazu. V tomto algoritmu není požadován žádný specifický statistický model šumu, který u jiných algoritmů může vyvolávat nestabilitu řešení. V případě existence šumu ale nesmí být jeho velikost příliš velká (doporučený poměr signál/šum je řádově jednotky, lépe min 10). V tomto případě je řešení velmi stabilní a odolné proti náhodnému šumu. Výhodou rovněž je, že algoritmus rovněž nevyžaduje žádnou a priori informaci o originálním snímku. Celý algoritmus je efektivní zejména při znalosti *PSF*. Jádro algoritmu Richardson-Lucy spočívá v opakovaném volání předpisu:

$$f_{n+1} = f_n H * \left(\frac{q}{H * f_n}\right), \tag{3.4}$$

kde *F_i* je výsledek výpočtu po *i* iteracích a *q* je původní zaznamenaný snímek. *H* je digitalizovaná *PSF*, jejíž iniciační hodnotu lze snadno stanovit z modelu atmosféry.

V případě neznámé funkce odezvy bodu lze výpočet Richadson-Lucy upravit na předpis iterací:

$$H_{n+1} = H_n \cdot \left(f_{n-1} * \frac{q}{H_n * f_n} \right)$$

$$f_{n+1} = f_n H * \left(\frac{q}{H * f_n} \right)$$
(3.5)

Obrázek 3.7 je příklad iterace algoritmu na bodový zdroj – umístěný ve velké vzdálenosti. Vlivem atmosféry je pozorovaný obraz obrázek 3.7 vlevo nahoře). Zpracováním série pořízených snímků je postupnou iterací zvýrazněn obraz do podoby velmi blízké předpokládané teoretické hodnotě. Na snímcích dole jsou již velmi dobře patrné difrakční kroužky, které naznačují velmi vysokou účinnost tohoto algoritmu.



Obrázek 3.7: Výsledek zpracování obrazu bodového zdroje Richardson-Lucy algoritmem.

nahoře zleva po 0 (nezprac.), 8, 16, 32 a dole zleva po 64, 128, 256, 512, 1024 a 2048 interací



Obrázek 3.8: Středně kvadratická chyba rekonstruovaného obrazu algoritmem Richardson-Lucy

Algoritmus Richadson-Lucy je schopen velmi účinně potlačit statické a omezeně i dynamické vlivy atmosféry. Mimo něj existuje přirozeně celá řada algoritmů, které vykazují i vyšší odolnost proti chybám (šumu). Za všechny uveď me alespoň Mezi nejprogresivnější patří algoritmus **S.M.A.R.T.** Základní předpis pro iteraci tohoto algoritmu má tvar:

$$f_{n+1} = f_n \exp\left[H * \ln\left(\frac{q}{H * f_n}\right)\right].$$
(3.6)

Tento algoritmus je odvozen z řady algebraických rekonstrukčních technik, které na obrazovou informaci a celý přenosový řetězec pohlíží coby soustavu lineárních rovnic. Cílem algoritmu pak je nalézt takové řešení soustavy, která bude mít minimalizovanou chybu. Algoritmus S.M.A.R.T pak řeší při každé iterakci celou soustavu rovnic najednou. I přes to konverguje algoritmus velmi pomalu. Jeho řešení je však velmi stabilní.

Pro úplné potlačení dynamických jevů je ale vhodnější použít metodu plovoucího bodu uvedenou v kap. 2.2.1.

3.2.3. Restaurace dynamických vlivů na optický signál

Výchozím pro určení vlivu turbulence na obraz, resp. jí vyvolaného optického proudu, je sekvence snímků. Tato sekvence (např. videosignál) představuje souhrnně dvourozměrnou projekci třírozměrného předmětového prostoru pozorované scény ve čtvrté (časové) dané časovou posloupností jednotlivých snímků sekvence.

Výpočet vycházející z diferencí sekvence snímků může být použit nejen pro určení optického proudu, ale i v budoucnu např. pro detekci pohybujících se objektů. Základní idea určení optického proudu je v lokalizaci jednotlivých fragmentů obrazu, určení jejich význačných bodů (poloha geometrického těžiště, hranice fragmentu) a identifikace korespondujících bodů v následném snímku.

Z poznatků uvedených v kapitole 2.2.2 vyplývá, že měřítko časové změny intenzity obrazového fragmentu v obraze je zejména závislé na prostorovém měřítku této změny vynásobené rychlostí s níž se fragment v obraze pohybuje.

Popis vlivu turbulence se tímto postupem podařilo transformovat na úlohu nalezení operátoru prostorového gradientu intenzity ∇ a vektoru rychlosti fragmentu **v**.

K jejich nalezení existuje celá řada algoritmů. Ve funkci prostorového gradientu lze využít např. Sobelův operátor gradientu [5]. Jeho stanovení je však spjato s četnými problémy a poskytnuté řešení není vždy dostatečně robustní.

Vlastní pohyb bodu (x, y) pak lze vyjádřit prostřednictvím vektoru $\mathbf{Q}_{(n)}$:

$$\mathbf{Q}_{x}^{(n)} v_{x} + \mathbf{Q}_{y}^{(n)} v_{y} + \mathbf{Q}_{t}^{(n)} = 0, \qquad (3.7)$$

kde v_i ... velikost vektoru v v souřadnici i,

Q⁽ⁿ⁾ ... operátor definovaný vztahem:

$$\mathbf{Y}_{x}^{n} = \frac{\partial \mathbf{Q}_{n}}{\partial x}, \mathbf{Y}_{y}^{n} = \frac{\partial \mathbf{Q}_{n}}{\partial y}$$

$$\mathbf{Y}_{t}^{n} = \frac{\partial \mathbf{Q}_{n}}{\partial t} \approx \mathbf{Q}_{n} - \mathbf{Q}_{n+1}$$
(3.8)

Pohyb sledovaného bodu je možné přirozeně vyjádřit i zpětně, tj. v obrácené posloupnosti snímků (#n+1, #n, #n-1, ...). Sledovaný pohyb má stejnou velikost a opačný směr. Rovnice výše pak bude vyjádřena vztahem:

$$\mathbf{Q}_{x}^{(n+1)}v_{x} + \mathbf{Q}_{y}^{(n+1)}v_{y} - \mathbf{Q}_{t}^{(n+1)} = 0.$$
(3.9)

Kombinací vztahu (3.8) a (3.9) pak obdržíme:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_x^{(n)} \\ \mathbf{Q}_x^{(n+1)} \end{bmatrix} v_x + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_y^{(n)} \\ \mathbf{Q}_y^{(n+1)} \end{bmatrix} v_y + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_t^{(n)} \\ -\mathbf{Q}_t^{(n+1)} \end{bmatrix} = 0.$$
(3.10)

a ekvivalentně platí:

$$\begin{bmatrix} \nabla^{(n)} \\ \nabla^{(n+1)} \end{bmatrix} \mathbf{v} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_t^{(n)} \\ -\mathbf{Q}_t^{(n+1)} \end{bmatrix} = 0.$$
(3.11)

Toto vyjádření popisuje optický proud jehož velikost je dvojnásobná oproti reálné hodnotě. Tento přístup umožňuje řešení, které je oproti jednoduchému přístupu stabilní [5]. Na základě tohoto vztahu již lze přímo provádět odhad driftu sledovaného bodu. K tomu lze využít např. prediktor využívající metodu nejmenších čtverců. Vlastní prediktor pak má tvar:

$$\hat{\mathbf{v}} = \arg\min\left[\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}\mathbf{v} + \begin{bmatrix}\mathbf{Q}_{t}^{(n)}\\-\mathbf{Q}_{t}^{(n+1)}\end{bmatrix}\right]_{2}^{2} = \arg\min_{\mathbf{v}}\left\langle\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}\mathbf{v} + \begin{bmatrix}\mathbf{Q}_{t}^{(n)}\\-\mathbf{Q}_{t}^{(n+1)}\end{bmatrix}\right\rangle^{T}\left\langle\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}\mathbf{v} + \begin{bmatrix}\mathbf{Q}_{t}^{(n)}\\-\mathbf{Q}_{t}^{(n+1)}\end{bmatrix}\right\rangle.$$

$$=\left(\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}^{T}\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}\right)^{-1}\begin{bmatrix}\nabla^{(n)}\\\nabla^{(n+1)}\end{bmatrix}^{T}\begin{bmatrix}\mathbf{Q}_{t}^{(n)}\\-\mathbf{Q}_{t}^{(n+1)}\end{bmatrix}$$

$$(3.12)$$

Primárním požadavkem je, mimo jeho stabilitu řešení, jeho výpočetní náročnost a spolehlivost určení. Současně algoritmus nesmí vyžadovat mimo vlastní sérii vyhodnocovaných snímků žádnou další dodatečnou informaci. Výchozím předpokladem je, že scénu mezi jednotlivými snímky lze považovat za přibližně statickou (není v ní žádný rychle se pohybující objekt).



Obrázek 3.9: Příklad – ukázka časové sekvence driftu fragmentů v obraze turbulencí



Obrázek 3.10: Vizualizace vlivu turbulence

4. ZÁVĚR

Na základě výše uvedeného popisu vlivu atmosféry na optický signál lze usuzovat na její vliv na výsledné zobrazení a ovlivnění technických parametrů daného optoelektronické přístroje. Rovněž je možno predikovat předpokládanou kvalitu zobrazení v závislosti na tendencích vývoje stěžejních meteorologických parametrů, popř. tendence ve vývoji chyb během zjišťování dálek.

Z analýzy v práci uvedených modelů je patrné, že vliv poruch atmosféry na kvalitu zobrazení klesá s rostoucí vlnovou délkou. To platí jak pro vliv útlumu, tak i pro vliv turbulence. Turbulence se navíc výrazně projevuje v čase kolem poledne a to hlavně v letních měsících. Za těchto podmínek je turbulence určující a obvykle několikanásobně převáží vliv útlumu.

V práci dále uvedené zpracování obrazu degradovaného průchodem atmosférou umožňuje další zvýšení kvality pozorovaných obrazů. Je zřejmé, že vhodnou volbou šířky a polohy pracovního pásma je možné výrazně potlačit zejména vliv útlumu optického záření. Vhodným zpracováním pak lze omezit i vliv turbulence vzduchu.

Při "klasickém" zpracování optického signálu je možné dosáhnout výrazného zlepšení kvality obrazu.

Mimo zvýšení celkové kvality obrazu (tj. jeho kontrastu i jasových a geometrických vlastností) je možné dosáhnou i určitého zvýšení rozlišení snímku. Ještě lepších výsledků při rekonstrukci zobrazení lze dosáhnout s využitím pokročilého adaptivního algoritmu, např. Richardson-Lucy, popř. jiným ekvivalentním adaptivním algoritmem.

35

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1]Řehoř Z.: Charakteristiky atmosféry, které mohou ovlivnit přesnost měření pasivních systémů lokalizace objektu; *Výzkumná zpráva projektu CILEPAS*, 120 stran, Brno, 2002.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. *Upper Saddle River*, N.J.:Prentice Hall, 2002.
- [3] Sandot, D.- Dvir, A.- Bergel, I.- Kopeika, N.S.: Restoration of thermal images distorted by the atmosphere, based on measured and theoretical atmospheric modulation transfer fuction; *Optical Engineering, roč. 33*, č.1, str. 44-53, 1994.
- [4] M. J. Black and P. Anandan, "The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fileds," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 63, no. 1, pp. 75–104, January 1996.
- [5]DOSKOČIL, Radek, BALAŽ, Teodor, MACKO, Martin, et al. Real-Time Software Restoration of Optic Image Degraded by the Atmosphere. *Mathematics and Computers in Science and Engineering*, World Scientific and Engineering Academy and Society, WSEAS Press, Athens, s.79-84. ISBN 978-960-474-027-7, Greece, 2008.

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně Kolejní 2906/4 612 00 Brno Česká Republika

http://www.crr.vutbr.cz

info@crr.vutbtr.cz