

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni študij geodezije,
Geodezija

Kandidatka:
Marjeta Ščap

Testiranje digitalnega nivelirja Leica DNA 03 za vpliv osvetljenosti late

Diplomska naloga št.: 837

Mentor:
doc. dr. Aleš Breznikar

Somentor:
izr. prof. dr. Zvonko Jagličić

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **MARJETA ŠČAP** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»TESTIRANJE DIGITALNEGA NIVELIRJA LEICA DNA 03 ZA VPLIV OSVETLJENOSTI LATE«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Hrušica, 31.05.2010

Marjeta Ščap

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 528.54 (043.2)
- Avtor:** Marjeta Ščap
- Mentor:** doc. dr. Aleš Breznikar, univ. dipl. inž. geod.
- Somentor:** doc. dr. Zvonko Jagličič, univ. dipl. fiz.
- Naslov:** Testiranje digitalnega nivelirja Leica DNA 03 za vpliv osvetljenosti late
- Obseg in oprema:** 54 str., 2 pregl., 33 sl., 11 en., 1 graf., 3 pril.
- Ključne besede:** digitalni nivelir, kodna nivelmanska lata, elektromagnetno valovanje, infrardeča svetloba, CCD senzor, osvetljenost late

Izvleček

V teoretičnem delu diplomske naloge je predstavljena metoda geometričnega nivelmana skupaj z opremo za niveliranje, kjer so podrobneje opisani digitalni nivelirji in kodne nivelmanske late. Opisani so tudi postopki iz vrednotenja slike kodne late za različne proizvajalce geodetskih instrumentov. Nadalje je predstavljen pojem elektromagnetnega valovanja, infrardeča svetloba kot del spektra elektromagnetnega valovanja, disperzija svetlobe, osvetljenost ter različne vrste optičnih spektralnih analizatorjev (spektrometrov). Posebno poglavje je posvečeno zgradbi in delovanju CCD senzorja, kot enemu izmed ključnih elementov postopka določitve odčitka.

V praktičnem delu je predstavljena problematika ne idealne osvetljenosti nivelmanske late in s tem povezane težave pri določanju odčitka. Raziskava je razdeljena v tri sklope: meritve v mraku in temi, uporaba barvnih filtrov in meritve pri umetni svetlobi. Glavna cilja praktičnega dela diplomske naloge sta bila določitev mejne količine svetlobe (fotonov), ki je potrebna da instrument uspešno iz vrednoti sliko late in predstavitev uporabnosti različnih vrst svetil pri niveliranju ob slabi osvetlitvi prostora.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.54 (043.2)
Author: Marjeta Ščap
Supervisor: Assist.Prof.Dr. Aleš Breznikar
Cosupervisor: Assist.Prof.Dr. Zvonko Jagličić
Title: Check of digital level Leica DNA 03 for levelling staff illumination
Notes: 54 p., 2 tab., 33 fig., 11 eq., 1 graph., 3 ann.
Key words: digital level, coded levelling staff, electromagnetic waves, infrared light, CCD sensor, staff illumination

Abstract

In theoretical part of my graduation thesis I first introduced geometric levelling method together with levelling equipment, where digital levels and coded levelling staffs are described. Procedures of coded staff readings for different manufacturers of geodetic instruments are also explained. Further, electromagnetic waves, infrared light as part of electromagnetic spectrum, dispersion of light, illumination and spectrometers are presented. Special chapter is dedicated to the structure and working of CCD sensor, as one of the key element for successful reading.

In practical part I presented difficulties in reading determination because of poor coded staff illumination. Research is divided on three parts: measurements in twilight and darkness, use of color filters and measurements in artificial illumination. The main aims of practical work were to determine critical amount of light (photons), which is necessary for successful measuring, and presentation of different kinds of lighting equipment and its suitability for levelling in bad illumination conditions..

ZAHVALA

Najprej se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Alešu Breznikarju in somentorju doc. dr. Zvonku Jagličiću za usmerjanje in dajanje koristnih nasvetov med nastajanjem diplomske naloge in izkazano pomoč pri praktičnem delu.

Zahvala gre tudi moji družini za moralno in finančno podporo skozi celoten študij ter podjetju Geosfera, d.o.o. za štipendiranje.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 PRECIZNI NIVELIRJI IN NIVELIRANJE	3
2.1 Geometrični nivelman	3
2.2 Precizni nivelirji	4
2.3 Digitalni nivelirji	5
2.3.1 Zgradba in delovanje digitalnega nivelirja.....	7
2.4 Nivelmanske late.....	8
2.4.1 Zgradba preciznih invar nivelmanskih lat	9
2.4.2 Oblike kodnih razdelb nivelmanskih lat.....	10
2.4.2.1 Leica.....	10
2.4.2.2 Trimble (Zeiss).....	11
2.4.2.3 Topcon.....	12
2.4.2.4 Sokkia.....	13
2.5 Različni postopki izrednotenja slike pri digitalnih nivelirjih	14
2.5.1 Korelacijski postopek.....	15
2.5.2 Postopek merskega položaja – geometrični postopek	17
2.5.3 Postopek frekvenčne analize – Fourierova analiza	18
2.5.4 Postopek merskega položaja pri Sokkii.....	18
3 ELEKTROMAGNETNO VALOVANJE	19
3.1 Opis valovanja	19
3.2 Spekter elektromagnetnega valovanja.....	20
3.3 Elektromagnetno sevanje.....	22
3.4 Disperzija svetlobe.....	25
3.5 Osvetljenost	25
3.6 Infrardeča svetloba.....	26
3.6.1 Odkritje IR svetlobe	26

3.6.2	Opredelitev IR spektra.....	27
3.6.3	Izvori IR svetlobe	27
3.7	Spektrometrija in spektrometri.....	28
3.7.1	Zgradba in princip delovanja spektrometra z uklonsko mrežico.....	29
3.7.2	Disperzijski spektrometer z uklonsko mrežico.....	30
3.7.3	Disperzijski spektrometer s periodično strukturo	31
3.7.4	Skenirni disperzijski spektrometer.....	31
4	CCD SENZORJI (TIPALA).....	32
4.1	Vrste CCD tipal.....	32
4.2	Delovanje CCD tipala.....	33
5	TESTIRANJE DIGITALNEGA NIVELIRJA LEICA DNA 03 ZA VPLIV OSVETLJENOSTI LATE.....	36
5.1	Seznam uporabljene opreme.....	36
5.1.1	Lastnosti digitalnega nivelirja Leica DNA 03.....	37
5.1.2	Lastnosti optičnega spektrometra AvaSpec – 2048.....	38
5.2	Opis problema in motiv za izvedbo raziskave.....	38
5.3	Merjenje v mraku in temi	39
5.3.1	Izbira primerne kraja in časa meritev	39
5.3.2	Zajem svetlobnega spektra.....	39
5.3.3	Testiranje digitalnega nivelirja.....	40
5.3.4	Rezultati in ugotovitve.....	40
5.4	Uporaba barvnih filtrov	42
5.4.1	Spekter svetlobe brez uporabe barvnega filtra	43
5.4.2	Spekter svetlobe skozi barvni filter	43
5.5	Svetila kot umetni izvori svetlobe	45
5.5.1	Žarnica z žarilno nitko	45
5.5.2	Halogenska žarnica	46
5.5.3	Varčna sijalka.....	46
5.5.4	LED dioda.....	47
5.5.5	Spektri različnih vrst svetil	48

5.5.5.1	Spekter žarnice z žarilno nitko.....	48
5.5.5.2	Spekter halogenske žarnice	49
5.5.5.3	Spekter varčne žarnice	50
5.5.5.4	Spekter bele LED diode.....	51
6	ZAKLJUČEK.....	52
VIRI.....		53
PRILOGE.....		55

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Osnovni princip geometričnega nivelmana z uporabo izmenišč	4
Slika 2.2: Zgradba digitalnega nivelirja NA 2000	8
Slika 2.3: Vrste nivelmanskih lat (od leve proti desni si sledijo lata z E razdelbo, z razdelbo v obliki šahovnice, delno digitalizirana lata, lata z dvojno razdelbo in kodna lata)	9
Slika 2.4: Zgradba precizne invar nivelmanske late	10
Slika 2.5: Leicino kodiranje nivelmanske late	11
Slika 2.6: Princip kodiranja pri Trimblu	12
Slika 2.7: Topconovo kodiranje	13
Slika 2.8: Novo Topconovo kodiranje	13
Slika 2.9: Sokkiin način kodiranja	14
Slika 2.10: Koordinatni sistem kroskorelacijske funkcije	16
Slika 2.11: Področje grobe in fine primerjave	17
Slika 3.1: Elektromagnetno valovanje	19
Slika 3.2: Spekter elektromagnetnega valovanja	21
Slika 3.3: Spekter svetlobe, ki jo oddaja črno telo pri različnih temperaturah (Kuščer et al., 2000)	25
Slika 3.4: Pri prehodu bele svetlobe skozi optično prizmo dobimo zaradi odvisnosti lomnega količnika od valovne dolžine na drugi strani cel spekter barv (mavrico)	25
Slika 3.5: Sir Frederick William Herschell in odkritje infrardeče svetlobe	27
Slika 3.6: Zasnova sodobnega spektrometra	30
Slika 4.1: Arhitektura medvrstičnega in polnega tipala CCD	33
Slika 4.2: Osnovni princip registracije svetlobe pri CCD tehnologiji	34
Slika 4.3: Osnovni princip delovanja vrstičnega CCD tipala	35
Slika 5.1: Primer zajetega spektra dnevne svetlobe	40
Slika 5.2: Barvni filtri	42
Slika 5.3: Od late odbit svetlobni spekter	43
Slika 5.4: Svetlobni spekter skozi moder filter (čas zajema: 10 s)	44
Slika 5.5: Svetlobni spekter skozi rdeč filter (čas zajema: 5 s)	44
Slika 5.6: Žarnica z žarilno nitko	45

Slika 5.7: Halogenska žarnica	46
Slika 5.8: Varčna sijalka.....	47
Slika 5.9: LED žarnica	47
Slika 5.10: Spekter žarnice z žarilno nitko.....	49
Slika 5.11: Spekter halogenske žarnice.....	49
Slika 5.12: Spekter varčne žarnice.....	50
Slika 5.13: Spekter bele LED diode.....	51

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Tehnične značilnosti digitalnega nivelirja Leica DNA 03	37
Preglednica 2: Tehnične značilnosti spektrometra AvaSpec – 2048	38

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Časovno padanje števila fotonov IR svetlobe dne 10.12.2009 (za valovno dolžino 750 nm).....	41
---	----

OKRAJŠAVE

CCD	Charge Coupled Device
RBC	Random Bidirectional Code (slov.: slučajna dvosmerna koda)
FFT	Fast Fourier Transformation (slov.: hitra Fourierova transformacija)
EMV	elektromagnetno valovanje
IR	infrardeča
LED	Light Emitting Diode (slov.: svetleča dioda)
RAW	surova oblika datoteke
FGG	Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo

1 UVOD

Kot metoda je geometrični nivelman skupina geodetskih del, katerih cilj je določitev višinskih razlik med izbranimi višinskimi točkami. Je najbolj natančna geodetska metoda višinomerstva in eden najbolj natančnih geodetskih merskih postopkov. Metodo uporabljamo pri določanju višin višinskih geodetskih točk (reperjev), ki jih povezujemo v višinske oziroma nivelmanske geodetske mreže, višin točk v lokalnih inženirskih mrežah, metoda pa je nenadomestljiva pri natančnih meritvah višinskih deformacij in premikov objektov (detajlni nivelman) ter natančnih višinskih zakoličbah pri gradnji objektov in postavitvi strojev. Prav tako se geometrični nivelman uporablja za različne znanstvene raziskave o Zemlji in objektih na njej. V to skupino sodi določitev oblike geoida, določanje vertikalnih premikov zemeljske skorje (tektonski premiki), plimovanje zemeljske skorje, merjenje višinskih razlik za napovedovanje potresov, določevanje srednjega nivoja morja in raziskave koeficienta zemeljske refrakcije.

Hiter razvoj geodetskih instrumentov in uporaba elektronike sta povzročila temeljite spremembe pri izvajanju najrazličnejših geodetskih meritev in hkrati omogočila razvoj digitalnega nivelirja, ki po ceni in natančnosti popolnoma nadomešča klasični nivelir. Sodobni digitalni nivelirji so s svojimi številnimi prednostmi praktično že izpodrinili klasične. Uporaba digitalnih nivelirjev je priporočljiva povsod, kjer je treba opraviti veliko dela, saj v takšnem primeru lahko privarčujemo tudi do 50 odstotkov časa.

Pri geometričnem nivelmanu, ob uporabi digitalnega nivelirja, se pojavljajo predvsem dodatni specifični pogoški kot posledica zunanjih vplivov, pa tudi sistematični vplivi, ki kvarijo natančnost meritev. Pogosto predstavlja problem ne idealna osvetljenost nivelmanske late. Vsi digitalni nivelirji normalno uporabljajo naravno svetlobo, ki pa se nadalje v detektorju svetlobe razcepi v dva dela: infrardeči in vidni del. Če svetlobni CCD senzor v instrumentu zajame premalo infrardeče svetlobe, izvrednotenje slike ni možno. Problem nastane pri meritvah v temnih prostorih, kjer smo pogosto podvrženi vplivu umetnih virov svetlobe z različnimi svetlobnimi spektri. Na težave z nezadostno količino infrardeče svetlobe naletimo tudi pri merjenju pri spremenljivi intenziteti naravne svetlobe (v mraku). Vpliv direktne

sončne svetlobe povzroča nehomogeno intenzivnost svetlobe zaradi nastanka senc na lati in s tem spremembo svetlobnega spektra.

Vpliv osvetljenosti late je v dostopni strokovni literaturi po mojem prepričanju premalo in preslabo razložen, zato sem se odločila, da to problematiko opišem v svoji diplomski nalogi.

2 PRECIZNI NIVELIRJI IN NIVELIRANJE

2.1 Geometrični nivelman

Geometrični nivelman velja za najnatančnejšo klasično metodo merjenja višinskih razlik. Merski postopek je v osnovi zelo enostaven, teorija geometričnega nivelmana pa je izdelana do podrobnosti. Kot metoda je geometrični nivelman skupina geodetskih del (terenske meritve in pisarniško delo), katerih cilj je določitev višinskih razlik med izbranimi višinskimi točkami. Povezujemo trajno stabilizirane višinske geodetske točke – reperje. Reperje povezujemo v nivelmanske mreže, ki so osnova za detajlno višinsko izmero in zakoličbo.

Višinsko razliko med dvema točkama določimo s pomočjo nivelirja, ki zagotavlja horizontalno vizurno linijo in čitanja razdelbe na vertikalno postavljenih nivelmanskih latah. Lati sta postavljeni vertikalno na ničelno nivojsko ploskev. Višinsko razliko med dvema točkama izračunamo po naslednji enačbi:

$$\Delta h = l_z - l_s, \quad (1)$$

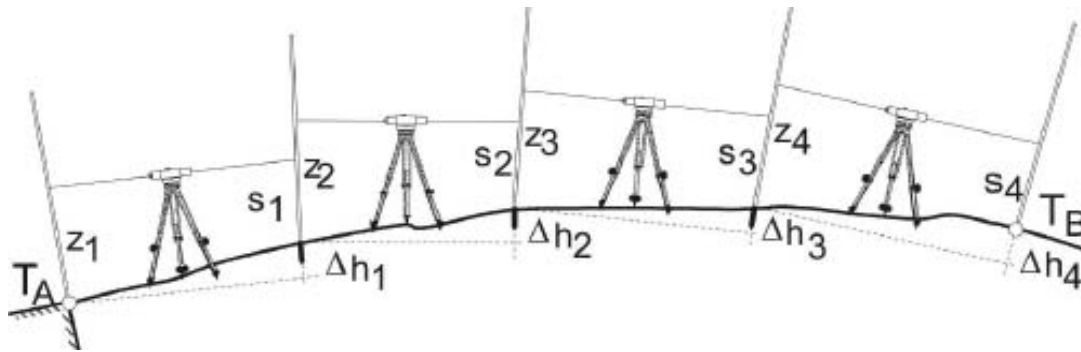
kjer je:

Δh ... višinska razlika med točkama,

l_z ... odčitek na lati zadaj,

l_s ... odčitek na lati spredaj.

V primerih večje oddaljenosti med točkama osnovni postopek ponavljamo z uporabo izmenišč. To so začasno stabilizirane višinske točke. Za stabilizacijo teh točk uporabljamo podnožke ali žabe.



Slika 2.1: Osnovni princip geometričnega nivelmana z uporabo izmenišč

Višinska razlika med točkama A in B je enaka vsoti delnih višinskih razlik:

$$\Delta h_A^B = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4,$$

$$\Delta h_A^B = l_Z^1 - l_S^1 + l_Z^2 - l_S^2 + l_Z^3 - l_S^3 + l_Z^4 - l_S^4,$$

$$\Delta h_A^B = \sum l_Z - \sum l_S. \quad (2)$$

Enačbe veljajo v pravokotnem koordinatnem sistemu. V splošnem pa moramo upoštevati tudi ukrivljenost Zemlje in nivelmansko refrakcijo.

2.2 Precizni nivelirji

Pri merjenju višinskih razlik z metodo geometričnega nivelmana uporabljamo nivelirje. To so (predvsem nivelirji majhne in srednje natančnosti) v osnovi dokaj preprosti optično mehanski, v sodobnosti pa vse bolj kompleksni elektronski instrumenti, katerih najpomembnejša funkcija je zagotavljanje horizontalne vizurne osi. Pri merjenju z nivelirjem zato najpogosteje obravnavamo bistveni instrumentalni pogrešek – pogrešek horizontalnosti vizurne osi. Ob uravnani dozni libeli (približno horizontiranem instrumentu) mora biti vizurna os horizontalna.

Natančnost nivelirjev je običajno podana z dvema parametroma, ki sta vezana tudi na vrsto uporabljene nivelmanske late (navadna, invar). Natančnost pri merjenju na daljše oddaljenosti določa standardna deviacija kilometra dvojnega nivelmana (dolžina poti niveliranja je 1 km, niveliramo v obeh smereh), posebej pa je podana natančnost instrumenta pri prenosu višine (enkratna postavitvev). Pri podajanju natančnosti se proizvajalci sklicujejo na standardizirana postopka preizkusa instrumenta DIN 18723-2 ali ISO 8322-2. Vrednosti standardne deviacije kilometra dvojnega nivelmana so ocenjene na osnovi odstopanj od aritmetične sredine iz rezultatov niza meritev v izbrani mreži (DIN 40 meritev, ISO 10 meritev).

Nivelirje po natančnosti razvrstimo v pet skupin (Deumlich, 2002)

- nivelirji majhne natančnosti $\sigma_{\Delta h} > 10 \text{ mm/km}$,
- nivelirji srednje natančnosti $3 \text{ mm/km} < \sigma_{\Delta h} \leq 10 \text{ mm/km}$,
- nivelirji visoke natančnosti $1 \text{ mm/km} < \sigma_{\Delta h} \leq 3 \text{ mm/km}$,
- nivelirji zelo visoke natančnosti $0.5 \text{ mm/km} < \sigma_{\Delta h} \leq 1 \text{ mm/km}$,
- nivelirji najvišje natančnosti $\sigma_{\Delta h} \leq 0.5 \text{ mm/km}$.

2.3 Digitalni nivelirji

Že od nekdaj je bila v stroki prisotna želja, da bi na nivelmanskih letah odčitke določali avtomatsko. Digitalni nivelirji švicarskega podjetja Leica Geosystems so bili prvi na svetu, ki so bili opremljeni z elektronskim sistemom za obdelavo slik za določitev višine in dolžine. Leta 1990 so izdelali prvi digitalni nivelir, kjer je bila uspešno uporabljena enodimenzionalna digitalna obdelava s CCD (Charge Coupled Device) tehnologijo, ki jo danes najdemo v vsaki ljubiteljski kameri ali fotoaparatu. Digitalni nivelirji so sicer kompleksni elektronski instrumenti, ki pa so za uporabo enostavni. Način določanja odčitka na lati je popolnoma avtomatiziran, princip horizontiranja vizurne linije pa je enak kot pri klasičnih instrumentih, zato prav tako zahtevajo ustrezno kontrolo instrumenta in uporabo primerne postopka meritev.

Digitalni nivelirji imajo vgrajen senzor za elektronsko pretvorbo analogne slike kodne

nivelmanske late v digitalen odčitek. Uporabljena je CCD tehnologija, ki s pomočjo optike zabeleži sliko late (določen odsek kodne razdelbe), ter v vgrajenem procesorju spremeni kodirani odčitek late v digitalno vrednost. CCD tehnologijo so izumili leta 1969 v Bellovih laboratorijih. Prvotno je bil to nov tip računalniškega spomina, vendar so kmalu ugotovili uporabnost za zapis slik (video kamere, kasneje fotoaparati). Določitev odčitka na lati temelji na postopku izvrednotenja slike kodne late, ki se razlikuje glede na proizvajalca.

Razvoj avtomatiziranih instrumentov je spremenil tradicionalne tehnike merjenja. Postopki so hitrejši, predvsem pa enostavnejši. Naj omenim le nekaj najpomembnejših razlik med sistemi za digitalno niveliranje in niveliranjem s klasičnim instrumentom:

- pri digitalnem nivelirju je vsak odčitek avtomatsko procesiran s pomočjo elektro-optičnih elementov, medtem ko pri niveliranju s klasičnim instrumentom operater določa odčitek na lati s pomočjo vizurne linije in optičnih delov instrumenta,
- pri digitalnem nivelirju je CCD tehnologija nadomestila oko opazovalca,
- v obdelavo odčitka je pri sistemih za digitalno niveliranje vključenih več kodnih elementov (intervalni zajem),
- pri klasičnem niveliranju odčitek temelji na merilu razdelbe late, pri digitalnem niveliranju pa lahko govorimo o dveh merilih: merilu instrumenta in merilu kodne late. Ti dve merili bi morali biti enaki, vendar se zaradi poškodb nivelmanske late in staranja CCD senzorja lahko spreminjata,
- digitalni nivelirji omogočajo shranjevanje meritev v pomnilnik instrumenta, prenos merskih vrednosti na računalnik ter obdelavo podatkov z ustrežno programsko opremo,
- digitalni nivelir ima vgrajen senzor za ugotavljanje položaja fokusirnih leč in elektronski nadzor delovanja kompenzatorja,
- zaradi avtomatskega odčitavanja in shranjevanja se pri digitalnem niveliranju izognemo napakam, ki so posledica napačnega čitanja in zapisovanja odčitkov,
- digitalni nivelirji imajo vgrajenih več programov za sprotno kontrolo meritev na terenu.

2.3.1 Zgradba in delovanje digitalnega nivelirja

Digitalni nivelirji so sestavljeni iz enakih optičnih in mehanskih komponent kot klasični kompenzacijski nivelirji in jih lahko na enak način tudi uporabljamo. Daljnogled je sestavljen iz okularja, objektiva, kompenzatorja, nitnega križa, leče za fokusiranje in delilnika žarkov. Kompenzator je povezan z dušilcem nihanja. Neomejeno nihanje nihala nadzira kontrolni senzor. V delilniku žarka je vpadli del svetlobe usmerjen proti senzorju za elektronsko pretvorbo slike. Delilnik žarka proti slikovnemu senzorju pravokotno preusmeri infrardeči del svetlobe, vidni del pa potuje do okularja. Vrstični CCD senzor spremeni kodni vzorec late v analogni signal. V nizu dolgem približno 6.5 mm je razvrščenih 256 svetlobno občutljivih fotodiod s premerom 25 μm , ki predstavljajo slikovne elemente. Preko A/D pretvornika se nato analogni signal pretvori v digitalnega. Položaj fokusirne leče služi za grobo določitev oddaljenosti late. Računalnik izračuna to razdaljo po enačbi:

$$df = \frac{K}{S}, \quad (3)$$

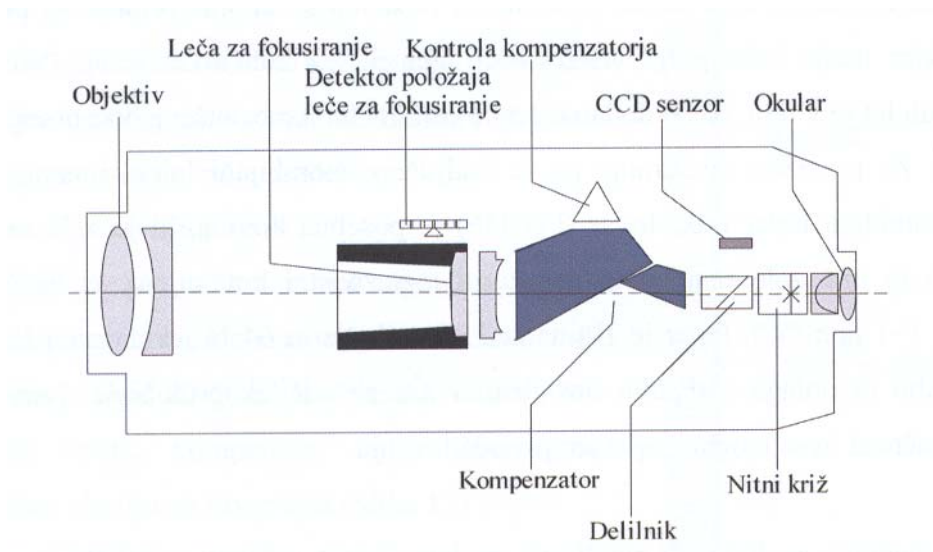
kjer je:

df ... približna razdalja do late,

K ... konstanta daljnogleda,

S ... premik fokusirne leče.

Procesorska enota, ki vodi potek meritve, le-to iz vrednoti in posreduje popravke. Po obdelavi se na ekranu instrumenta pojavita odčitek na lati in popravljena razdalja do late.



Slika 2.2: Zgradba digitalnega nivelirja NA 2000

2.4 Nivelmanske late

Pri niveliranju s klasičnimi nivelirji se uporabljajo nivelmanske late s črtno centimetrsko ali polcentimetrsko razdelbo. Oštevilčba si sledi na vsakem decimetru, ničelno točko razdelbe pa predstavlja peta late.

Pri latah z E razdelbo lahko jasno določimo decimeter, centimeter oziroma polcentimeter. Razdelba je največkrat rdeče in črne barve.

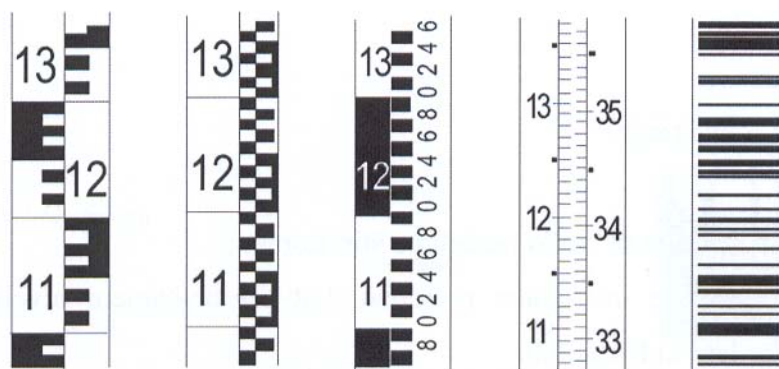
Late z razdelbo v obliki šahovnice se uporabljajo predvsem pri boljši osvetljenosti, ker je kontrastnost belih polj veliko večja kot pri črnih ali rdečih poljih.

Prednost delno digitaliziranih lat je v tem, da so dodatne črtice centimetrsko označene, kar omogoča hitrejše čitanje.

Pri preciznem nivelmanu uporabljamo izključno invar nivelmanske late, ki so lahko različnih širin in dolžin. Invar je posebna zlitina, sestavljena iz 64% jekla in 36% niklja in ima majhen temperaturni razteznostni koeficient, ki znaša približno $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. To je 10-krat manjša vrednost kot pri linearnem razteznostnem koeficientu jekla. Invar lata z dvojno črtno razdelbo

ima dve razdelbi. Druga je glede na prvo zamaknjena za konstanto late C , ki je različna za različne proizvajalce (npr. Zeiss: $C = 60650$ za pol-centimetrsko razdelbo in $C = 30325$ za centimetrsko razdelbo). Uporaba lat z dvojno razdelbo poveča natančnost odčitka, omogoča kontrolo grobih pogreškov pri čitanju na lati, zmanjša vpliv pogreškov late in eliminira vpliv posedanja stativa instrumenta.

Danes pa so, predvsem zaradi razvoja sistema za digitalno niveliranje, večinoma v uporabi kodne nivelmanske late. Razdelba ni več oštevilčena, ampak je sestavljena iz binarne kode. To kodo predstavlja zaporedje svetlih in temnih polj različnih dimenzij. Kodiranje nivelmanske late in postopek izvedenja se pri različnih proizvajalcih razlikujeta.



Slika 2.3: Vrste nivelmanskih lat (od leve proti desni si sledijo: lata z E razdelbo, lata z razdelbo v obliki šahovnice, delno digitalizirana lata, lata z dvojno razdelbo in kodna lata)

2.4.1 Zgradba preciznih invar nivelmanskih lat

Včasih so bili okvirji zlepljeni iz več plasti lesa, tako da so bili odporni proti zvijanju. Danes so okvirji ponavadi kovinski (aluminijasti) in različnih profilov. Na zgornjem in spodnjem koncu sta pravokotno na okvir pritrjeni kovinski ploščici. Zgornja ploščica služi kot zaščita, spodnja ploščica pa definira ničlo razdelbe (peta late). V žlebu okvirja je vpet invar trak, ki predstavlja nosilec razdelbe. Invar trak je na zgornji strani togo vpet, na drugi strani pa je vpet preko vzmeti (mehanizma) s silo 100 N. Mehanizem kompenzira raztezanje okvirja zaradi temperaturnih sprememb. Minimalna sprememba dolžine okvirja ali zvijanje okvirja bistveno ne vplivata na silo napenjanja invar traku in posledično tudi ne na dolžino razdelbe. Na okvir je pritrjena tudi dozna libela, ki omogoča vertikalno postavitev nivelmanske late.



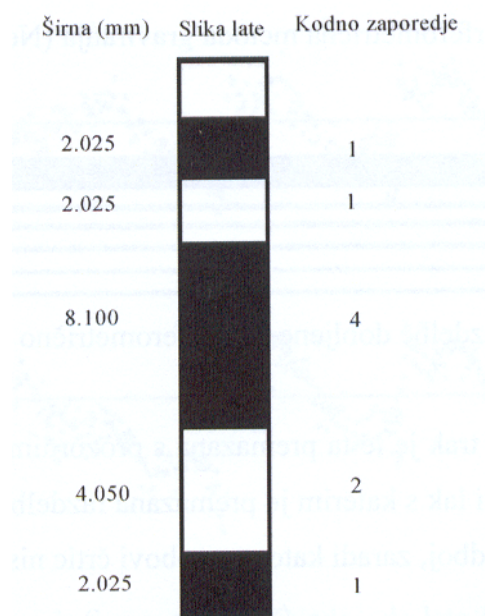
Slika 2.4: Zgradba precizne invar nivelmanske late

2.4.2 Oblike kodnih razdelb nivelmanskih lat

2.4.2.1 Leica

Koda lat švicarskega proizvajalca geodetskih instrumentov Leice je sestavljena iz črno-belih oz. črno-rumenih elementov (polj) različnih dimenzij, ki predstavljajo posebno vrsto binarne kode. Ker instrument deluje v infrardečem delu spektra, so polja ponavadi črno-rumena. Definiran je osnovni interval (element), katerega širina znaša 2.025 mm. Širina vsake druge

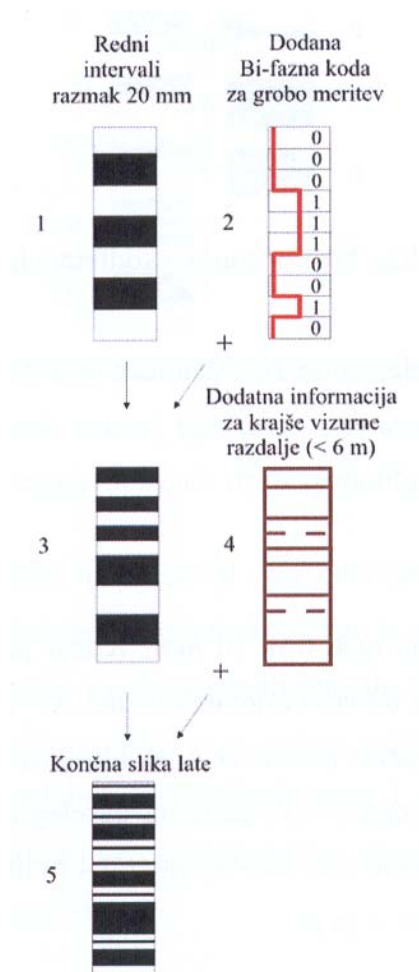
črtice je večkratnik osnovnega intervala. Koda je sestavljena iz zaporedja naravnih števil in se ne ponavlja. Največji možni mnogokratnik je število 15, zato lahko največja širina polja znaša 30.75 mm. Koda nivelmanske late dolžine 4050 mm vsebuje največ 2000 osnovnih kodnih elementov.



Slika 2.5: Leicino kodiranje nivelmanske late

2.4.2.2 Trimble (Zeiss)

Koda temelji na osnovnem intervalu velikosti 2 cm, ki predstavlja 1 bit. Sestavljena je tako, da lahko iz 30 cm velikega odseka nivelmanske late določimo jasen položaj merske slike. Dolžina late ne sme presežati 4 m. Osnovni intervali so podani na podlagi t.i. Bi-fazne kode, ki temelji na dejstvu, da po vsakem bitu nastopi sprememba svetlosti, zato se lahko vsak bit kode uporabi kot merski interval. Ničelni biti imajo na sredini intervala dodano svetlo-temno menjavo, ki mora biti prepoznavna tudi na večjih oddaljenostih instrumenta od late. Ta informacija služi za določitev intervala, kar pa ne velja za razdalje, krajše od 6 m. V tem primeru za enolično določitev nastane premalo intervalov. Zato so bile dodane še ožje kodne črtice širine 1 - 2 mm, tako da bi bile tudi meritve pri tako kratkih razdaljah jasno in zanesljivo določene.

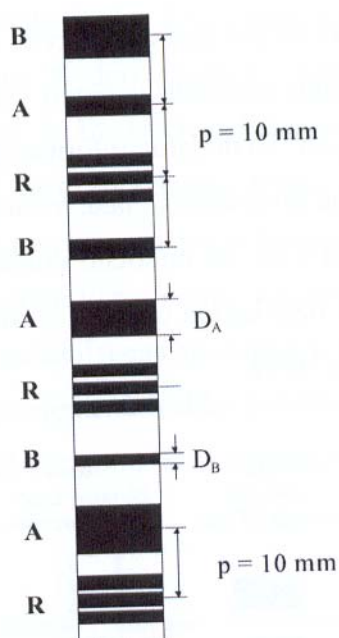


Slika 2.6: Princip kodiranja pri Trimblu

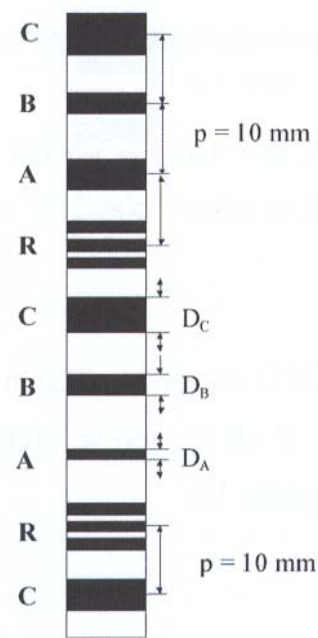
2.4.2.3 Topcon

Topconova koda je sestavljena iz treh osnovnih elementov: iz A , B in R elementa. Kodni elementi so razporejeni ciklično s fiksnim razmakom $p = 10$ mm, v zaporedju: $R(0)$, $A(0)$, $B(0)$, $R(1)$, $A(1)$, $B(1)$ itd. Referenčni vzorec R je pri vseh elementih $R(i)$ identičen in ga sestavljajo tri 2 mm široke črne črtice. Razmak med njimi znaša 1 mm. Skupna širina elementa $R(i)$ je 8 mm. Širina črtic D , elementov A in B , ustreza amplitudam dveh sinusnih funkcij z rahlo različnima valovnima dolžinama. Prečne širine teoretično lahko merijo med 0 in 10 mm, vendar pa je najmanjša možna širina črtice 1 mm. Vzorec ene kode se ponovi na vsakih 60 cm (valovna dolžina elementa A - λ_A) oz. 57 cm (valovna dolžina elementa B - λ_B). Celotni vzorec se prvič ponovi po 11.40 m (število 1140 je najmanjši skupni

mnogokratnik števil 57 in 60). Zaradi zagotovitve jasnosti, posebej na začetku late, sta oba signala predstavljena še s faznim razmikom $\pi/2$, tako da znotraj 4-metrskega merskega območja vedno obstaja jasna fazna razlika med signaloma *A* in *B*. Leta 1999 je Topcon predstavil novo kodiranje lat za vse njihove instrumente. Osnovni princip in geometrična razmerja so ostali nespremenjeni. Dodana pa je bila tretja groba frekvenca *C*. Kodno zaporedje se glasi: *R(0)*, *A(0)*, *B(0)*, *C(0)*, *R(1)*, *A(1)*, *B(1)*, *C(1)* itd. Nove valovne dolžine znašajo: $\lambda_A = 28$ cm, $\lambda_B = 24$ cm in $\lambda_C = 20$ cm. Zaradi nove kode se lahko uporabljajo tudi late dolžine 5 m.



Slika 2.7: Topconovo kodiranje



Slika 2.8: Novo Topconovo kodiranje

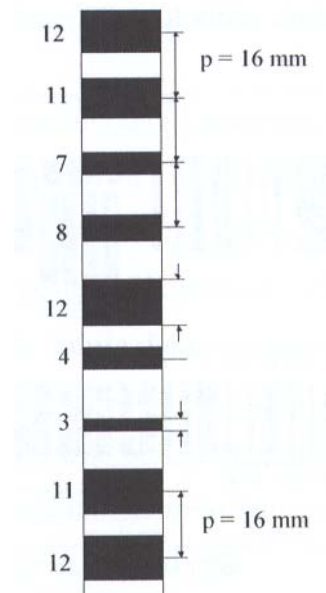
2.4.2.4 Sokkia

Kodiranje nivelmanskih lat se imenuje slučajna dvosmerna koda ali RBC (Random Bidirectional Code). Uporabljen je konstantni osnovni interval *p*. Razmik sredin dveh sosednjih temnih elementov znaša 16 mm. Razdalja dveh poljubnih srednjih položajev je večkratnik osnovnega intervala. Kodiranje za grobo določitev odčitka temelji le na šestih različnih širinah: 3, 4, 7, 8, 11 in 12 mm. Kodno zaporedje je izbrano tako, da je že zaporedje 5 oz. 6 elementov edinstveno in neponovljivo. Posebnost kodiranja je uporaba dveh različnih

načinov izrednotenja:

- za bližnja območja: pri krajših razdaljah se na CCD senzor preslika manj kodnih elementov. Različne širine elementov je možno jasno prepoznati s pomočjo programske opreme za obdelavo slike,
- za oddaljena območja: pri večjih razdaljah senzor ne more več jasno razlikovati širin sosednjih črtic (npr. širine 3 oz. 4 mm, 7 ali 8 mm ter 11 ali 12 mm). Zato se v tem primeru predpostavi, da sta sosednja elementa enake širine, število različnih elementov pa se deli s tri.

Kodno zaporedje je izbrano tako, da je pri obeh naštetih načinih izrednotenja slike edinstveno in omogoča jasno določitev pripadnosti merskega intervala preko 10 m dolgega odseka late. Za enolično določitev pripadnosti teoretično zadostujejo že 4 oz. 6 kodnih elementov. Zaradi avtomatskega zaznavanja orientacije late odpade več kot polovica uporabnih kombinacij in je zato predpostavka za jasno določitev pripadnosti upoštevanje 5 oz. 8 kodnih elementov. Potreben odsek late je za bližnja območja 9 cm, oz. 13 cm pri večjih oddaljenostih med instrumentom in nivelmansko lato pod predpostavko, da ne sme biti zakrit noben segment kode.



Slika 2.9: Sokkiin način kodiranja

2.5 Različni postopki izrednotenja slike pri digitalnih nivelirjih

Poznamo različne postopke digitalnega izrednotenja slik:

- korelacijski postopek (Leica (Wild) NA 2002/3003/DNA 03),
- postopek merskega položaja - geometrični postopek pozicionirane meritve 30 cm

- velikega odseka late (Trimble/Zeiss DiNi 10/20),
- postopek frekvenčne analize – Fourierova analiza (Topcon DL 101/102),
- postopek merskega položaja (Sokkia).

2.5.1 Korelacijski postopek

Določitev odčitka na lati je zasnovana na principu dvodimenzionalne kroskorelacije¹. Določa se vzajemna funkcionalna povezanost med merskim signalom dobljenim na fotodiodah in teoretičnim zapisom kode nivelmanske late, ki je poznana računalniku nivelirja. Kodirana lata je v elektronski obliki zapisana v pomnilniku. Na podlagi digitalizirane slike late, računalnik primerja obe sliki, ki sta med seboj zamaknjeni za določeno vrednost. Računalnik obe sliki premika vzporedno drugo ob drugi in ugotavlja njuno ujemanje. Pri korelacijski funkciji se v digitalnem nivelirju optimirata dva parametra:

- odčitek late (razlika višin med nivelirjem in lato kot pomik slike kodirane late),
- merilo slike kodirane late (funkcija dolžine d med nivelirjem in lato).

Kroskorelacija se izračuna po enačbi:

$$g(L') = \lim_{Y \rightarrow \infty} \frac{1}{2Y} \int_{-Y}^Y Q(y) \cdot P(y - L') dy, \quad (4)$$

kjer je:

$Q(y)$... merjeni signal,

$P(y - L')$... teoretični signal,

Y ... področje integriranja,

y ... os premikanja.

¹ Kroskorelacija je funkcija dveh slik, kjer manjše območje premikamo preko večjega. Za vsak položaj se izračuna koeficient kroskorelacije, ki definira območje najboljšega ujemanja. Uporabljajo se sive vrednosti. Za dve sliki se predpostavlja, da imata identično velikost in azimut ter paralelne optične osi.

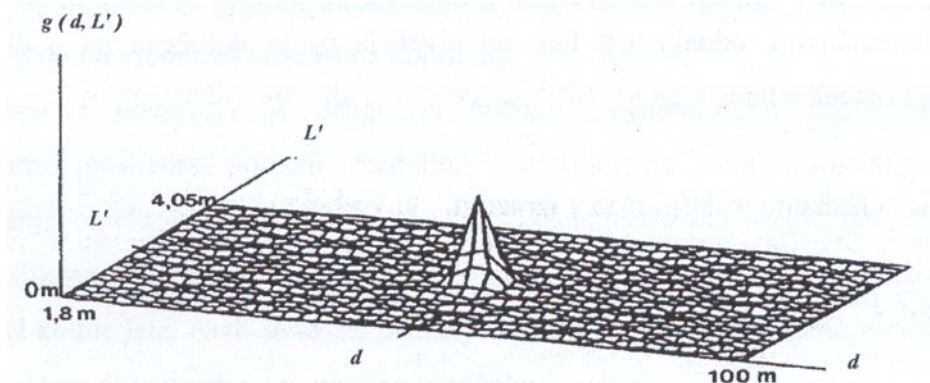
Dvodimenzionalna kroskorelacijska funkcija, s pomočjo katere se določi odčitek L' na lati in dolžina d med nivelirjem in nivelmansko lato, pa je dana z izrazom:

$$g(d, L') = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Q_i(y) \cdot P_i(d, y - L'), \quad (5)$$

kjer je:

$Q(y)$... merjeni signal,

$P(d, y - L')$... teoretični signal izračunan za dolžino d in premaknjen za odčitek L' .



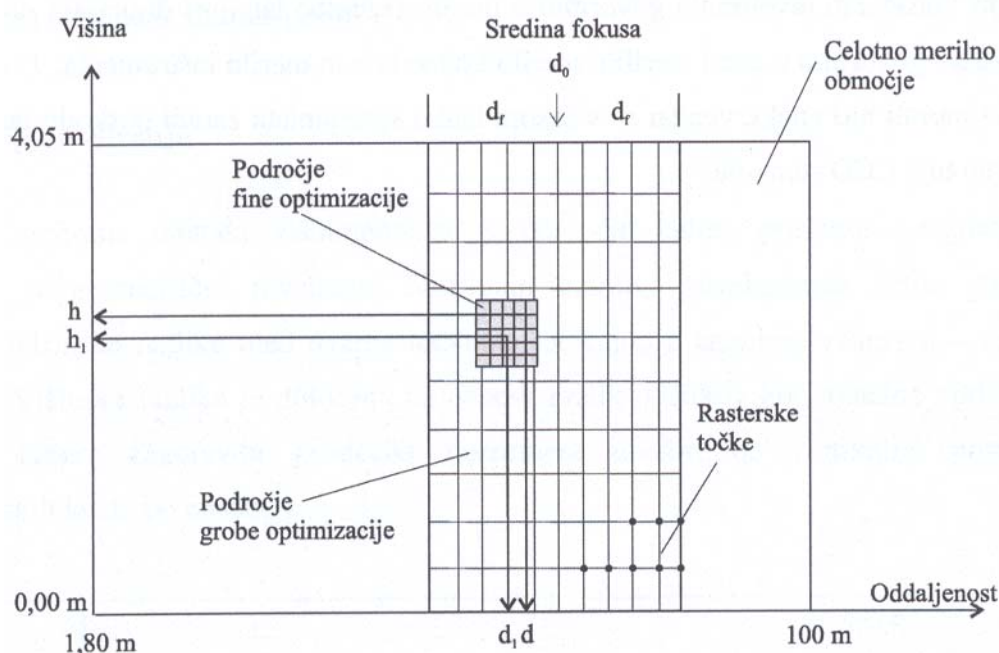
Slika 2.10: Koordinatni sistem kroskorelacijske funkcije

Dolžina med nivelirjem in lato ter odčitek na lati se izrazita s pomočjo koordinat funkcije $g(d, L')$ v koordinatnem sistemu (d, L', g) , ki predstavlja mersko območje digitalnega nivelirja. To območje predstavlja ravnino, ki je omejena s pravokotnikom. Eno stranico pravokotnika določa oddaljenost med instrumentom in lato ter zavzema vrednosti med 1.8 m in 100 m. Drugo stranico pa predstavlja višina odčitka na lati in obsega vrednosti med 0 m in 4.05 m. Za določitev maksimuma kroskorelacijske funkcije bi bilo potrebno izračunati njeno vrednost na celotnem merskem območju. Pri tem bi morali izračunati približno 50 000 korelacijskih koeficientov. Število računskih operacij se zmanjša s t.i. grobim in finim optimiranjem.

Groba določitev maksimuma kroskorelacijske funkcije se izvede s pomočjo približne razdalje med instrumentom in lato na podlagi približnega položaja fokusirnih leč (izostritev slike) v času ekspozicije. S tem se območje primerjave zmanjša za 80 odstotkov. Nadalje omejimo

jakost merskega signala na en bit (0 ali 1). V vsakem preseku rastra (dolžina d , odčitek late L') se računa koeficient korelacijske funkcije. Na mestu, kjer se merski in teoretični signal najboljše ujemata, so vrednosti koeficientov znatno različne (maksimum) od vrednosti ostalih koeficientov.

Ko so izračunane približne koordinate maksimuma kroskorelacijske funkcije, se postopek izvedenja merskega signala nadaljuje s t.i. finim optimiranjem. Relativni položaj slike kode nivelmanske late, ki se preslika na detektor in merilo kode late, se določita z večjo natančnostjo (8 bitov).



Slika 2.11: Področje grobe in fine primerjave

2.5.2 Postopek merskega položaja – geometrični postopek

Izvedenja odčitka pri Zeissovih digitalnih nivelirjih DiNi 10/20 deluje na principu eno-intervalne meritve in temelji na nizu žarkov. Nivelmanska lata je razdeljena na intervale dolžine 2 cm, ki predstavljajo osnovni element kodne meritve na vsaki merski razdalji. V intervalih so nadalje svetlo-temne kodne informacije. Ta postopek odlikuje lastnost, da preko območja med 1.5 in 100 m lahko merimo z minimalnim in konstantnim poljem slike, ki znaša

30 cm, vendar v tem območju ne sme biti prekrita nobena informacija. Vse posamezne merske vrednosti se torej določijo iz 30 cm velikega odseka razdelbe late, ki leži simetrično ob vizurni liniji.

2.5.3 Postopek frekvenčne analize – Fourierova analiza

Pri analizi signala s pomočjo FFT oz. hitre Fourierove transformacije (Fast Fourier Transformation) je merski signal razdeljen v skupno tri frekvenčne komponente, ki se nanašajo na poznano osnovno širino p , ki znaša 10 mm. Z večanjem razdalje med instrumentom in lato se posledično večajo tudi nastopajoče frekvence. Vizurna razdalja se izračuna na osnovi goriščne razdalje, poznane osnovne širine p in širine slike elementa na CCD senzorju. Poleg frekvenc Fourierova analiza podaja tudi fazna položaja φ_A in φ_B . Iz tega sledi prvo grobo odčitavanje. Za precizno odčitavanje poznamo različne tehnike. Pri večjih razdaljah je določen fazni položaj φ_m m -tega piksla, ki predstavlja horizontalno vizurno linijo. Tako je lahko znotraj intervala p interpoliran položaj slikovnih točk. Pri krajših razdaljah se na CCD senzor preslika manj kodnih elementov, zato frekvenčna analiza postane negotova. Vendar pa so posamezni kodni elementi preslikani ostro in kontrastno. Z metodami prepoznavanja (ekstrakcije) robov so posamično določene širine kodnih elementov. Iz širin signalov A in B je mogoče direktno izračunati fazna položaja φ_A in φ_B , s pomočjo katerih se določi grobi odčitek. Precizni odčitek prav tako temelji na zaznavanju posameznih robov, kjer je položaj m -tega piksla interpoliran v pripadajočem intervalu p .

2.5.4 Postopek merskega položaja pri Sokkii

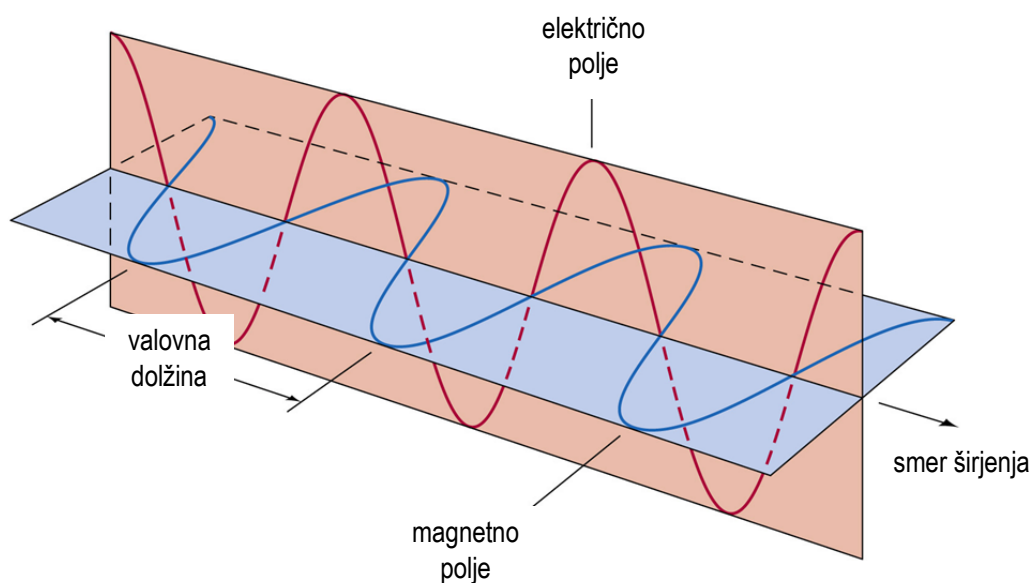
Iz vrednotenja poteka podobno kot pri Zeissovem in Topconovem postopku. Merilo preslikave in razdalja izhajata iz poznanega osnovnega intervala p in njegove velikosti p' na sliki. Gostota črtic služi grobem kodiranju. V okviru precizne meritve velja, da piksel, ki predstavlja elektronski črtni križ, natančno dodeli pripadnost intervala.

3 ELEKTROMAGNETNO VALOVANJE

Elektromagnetno valovanje (EMV) povzroča več različnih mehanizmov, na primer spremembe v energijskem stanju elektronov v atomih, pospeševanje nabitih delcev, razpad radioaktivnih snovi in termično gibanje atomov in molekul.

3.1 Opis valovanja

EMV je transversalno valovanje, v katerem nihata električno (E) in magnetno polje (H) pravokotno drug na drugega, širi pa se v smeri, ki je pravokotna na ravnino, v kateri nihata ti dve polji.



Slika 3.1: Elektromagnetno valovanje

EMV opišemo z naslednjimi tremi lastnostmi:

- valovno dolžino (λ),
- frekvenco (ν),
- amplitudo (A).

Frekvenca in valovna dolžina sta med seboj povezani preko hitrosti valovanja:

$$c = \lambda \nu . \quad (6)$$

Pri tem je c svetlobna hitrost, ki je osnovna naravna konstanta in v praznem prostoru (vakuumu) znaša $c_0 = 299\,792\,458$ m/s $\approx 300\,000$ km/s. V vseh snoveh je hitrost svetlobe manjša kot v vakuumu. Hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja je sicer odvisna od snovi, po kateri se širi. Lomni količnik snovi n je tisti, ki pove, kolikokrat počasneje se svetloba širi v snovi kot v vakuumu.

EMV se obnaša kot valovanje in kot curek fotonov, čemur pravimo valovno-delčni dualizem. Kadar opisujemo elektromagnetno valovanje kot valovanje, ga opišemo s hitrostjo razširjanja ter valovno dolžino ali frekvenco. Ko pa ga opisujemo kot curek delcev, pa podamo njihovo energijo (E). Slednja je neposredno povezana s frekvenco

$$E = h \nu , \quad (7)$$

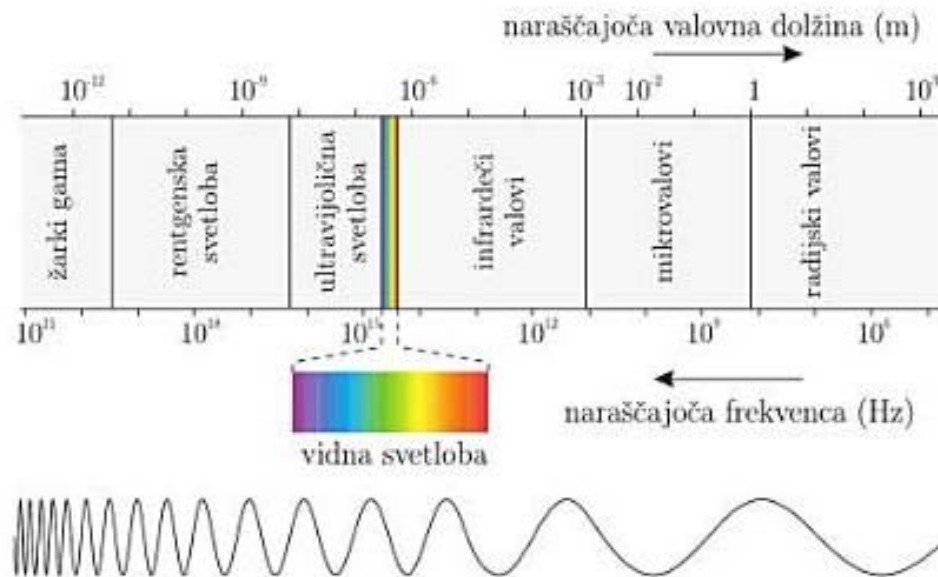
kjer je h Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js (Oštir, 2006).

3.2 Spekter elektromagnetnega valovanja

Spekter EMV je oznaka za celoten razpon valovnih dolžin oziroma frekvenc, ki jih lahko zajame elektromagnetno valovanje. Z oznako pojmuje torej obseg valovanja, ki ga seva, odbija ali prepušča določeno telo (Oštir, 2006).

Spekter EMV lahko razdelimo v posamezne skupine, ki imajo različno energijo, valovno dolžino in frekvenco. Meje med posameznimi deli niso ostre, kljub temu pa lahko določimo nekaj skupin s skupnimi lastnostmi. Najbolj poznani del spektra je vidna svetloba, poleg tega pa so pomembni še radijski valovi, mikrovalovi, infrardeči valovi, ultravijolična svetloba, rentgenski in gama žarki (Oštir, 2006).

V območju dolgih valovnih dolžin (to je pri nizki frekvenci in energiji) srečamo najprej radijske valove. Njihova valovna dolžina je od nekaj 100 m do 1 mm. Radijskim valovom sledijo mikrovalovi, ki zajemajo območje med približno 1 m in 1 mm. Radijske in mikrovalove sevajo antene. Infrardeče valovanje je v območju med 1 mm in 740 nm in ga sevajo segreta trdna telesa in tekočine. Infrardeči sledi vidna svetloba. Gre za območje, v katerem Sonce in podobne zvezde izsevajo največ svetlobe in v katerem so človeške oči najbolj občutljive. Zaradi barvnega vtisa ta del spektra razdelimo na rdečo (625 – 740 nm), oranžno (590 – 625 nm), rumeno (565 – 590 nm), zeleno (520 – 565 nm), turkizno (500 – 520 nm), modro (430 – 500 nm) in vijolično (380 – 430 nm) barvo. Ultravijolična svetloba zajema valovne dolžine med 0.3 μm in 30 nm in nastane s sevanjem zvezd ali s sevanjem plinov. Še bolj energijsko močni so rentgenski žarki, ki imajo valovno dolžino med 10 nm in 100 pm. Nastanejo v rentgenskem aparatu, v katerem močno pospešeni elektroni trkajo ob kovinske tarče in zavorno sevajo oz. izbijajo notranje elektrone iz atomov. Žarki gama predstavljajo elektromagnetno valovanje z največjo energijo, ki jih sevajo posamezna nestabilna jedra pri radioaktivnem razpadu.



Slika 3.2: Spekter elektromagnetnega valovanja

3.3 Elektromagnetno sevanje

Svetlobo v naravi oddajajo segreta trdna telesa, tekočine ter plini, ki so podvrženi razelektritvam. Z eno besedo oddajanje EMV imenujemo sevanje. Sevanje segrelih teles v okolico je neurejeno oddajanje EMV različnih valovnih dolžin, ki jih s skupnim imenom poimenujemo termično elektromagnetno sevanje oz. včasih skrajšano kar termično sevanje. Na ta način telesa oddajajo energijo v okolico, na enak način pa jo tudi prejemajo.

EMV se širi po praznem prostoru s svetlobno hitrostjo in ima približno enako vrednost tudi za širjenje skozi zrak. EMV, ki zadene ob neko snov, se na površini telesa delno odbije, nekaj sevanja pa prodre v globino telesa, vendar na poti, ko potuje skozi snov, slabi oz. se absorbira, tako da se energija valovanja pretvarja v notranjo energijo. Na ta način se snov segreva, poviša se ji temperatura in tudi sama prične bolj sevati. Če je snov, na katero pade EMV dovolj tanka in prepustna za to vrsto valovanja, pa lahko snov določen delež valovanja tudi prepusti. Eksperimentalne izkušnje kažejo, da najbolj sevajo tista telesa, ki tudi največ EMV absorbirajo.

Fiziki so vpeljali pojem idealnega črnega telesa. To je tisto telo, ki absorbira vso vpadlo valovanje vseh valovnih dolžin in ga nič ne odbije. Takšnih idealnih teles v naravi načeloma ni, obstajajo pa nekatera, ki so jim zelo dober približek. En tak primer je Sonce, za katerega rečemo, da seva kot segreto črno telo s temperaturo 5700 K. Tudi za človeka in živali lahko v določenem delu spektra EMV rečemo, da približno sevajo kakor črna telesa, saj je njihov delež absorbiranega valovanja v določenem področju valovnih dolžin zelo blizu 1. Črna telesa imena niso dobila po svoji barvi, pač pa po tem, da absorbirajo vso energijo EMV, ki pade nanje, hkrati pa oddajajo energijo kot termično sevanje v obliki EMV.

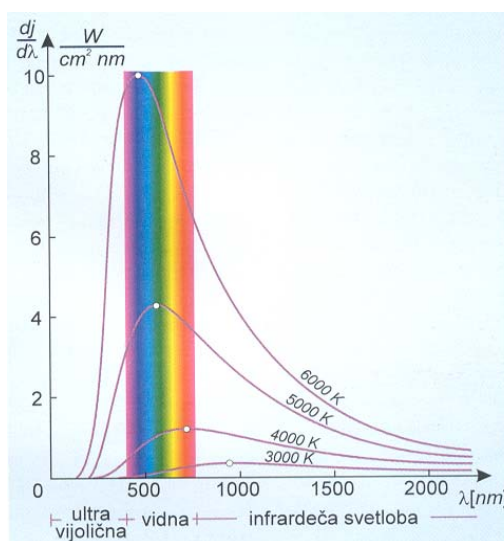
Segreta snov oddaja EMV predvsem s površine, kolikšen je izsevani energijski tok P , pa je odvisno od velikosti sevalne ploskve, njene temperature in vrste sevalne površine. Z eksperimentom lahko ugotovimo, kako je izsevana gostota energijskega toka j , ki ga oddajajo segreta črna telesa, porazdeljena po valovnih dolžinah λ oz. frekvencah ν . Izsevani (emisijski) spekter termičnega sevanja segretega telesa pove, kolikšen delež celotnega energijskega toka termičnega sevanja pripada posamezni valovni dolžini oz. frekvenci EMV. V emisijem

spektru črnega segretega telesa je energija porazdeljena po vseh valovnih dolžinah od 0 do ∞ , le da različni deleži pripadajo različnim valovnim dolžinam. Kapljevine in nekatera trdna telesa imajo zvezne emisijske spektre. Plini za razliko od trdnih teles ne sevajo zvezne, temveč diskretne oziroma črtaste emisijske spektre. Energija, ki jo izsevajo molekule plina, je porazdeljena po točno določenih valovnih dolžinah. Energije posameznih fotonov EM valovanja natanko ustrezajo razlikam energij med energijskimi nivoji elektronov v atomih plina.

Skupna gostota energijskega toka vseh valovnih dolžin, ki ga oddaja trdno črno telo z določeno temperaturo, je podana s Stefanovim zakonom:

$$j = \sigma T^4, \quad (8)$$

ki pove, da je izsevana gostota energijskega toka odvisna od četrte potence temperature sevalne površine (T). Fizikalna konstanta σ se imenuje Stefanova konstanta, njena vrednost pa je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Enota za gostoto energijskega toka j je $[\text{W/m}^2]$. Podatek o gostoti energijskega toka pove, kolikšen energijski tok izseva enota površine segretega telesa. Porazdelitev gostote energijskega toka po valovnih dolžinah pa pove, kolikšno gostoto energijskega toka izseva telo na nekem majhnem intervalu valovnih dolžin.



Slika 3.3: Spekter svetlobe, ki jo oddaja črno telo pri različnih temperaturah (Kuščer et al., 2000)

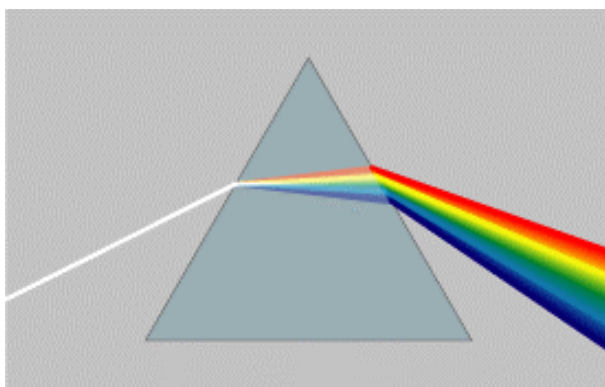
Nekatera telesa sevajo pri danih pogojih manj, kot izračunamo po Stefanovem zakonu. To so t.i. "siva" in "bela" telesa. Stefanov zakon zato popravimo tako, da vpeljemo emisivnost telesa. Emisivnost je definirana kot razmerje izsevanega energijskega toka pri danih pogojih in energijskega toka, ki bi ga pri istih pogojih izsevalo absolutno črno telo. Emisivnost belih teles je 0 in ne sevajo, emisivnost sivih teles pa je $0 < e < 1$ in pri danih pogojih sevajo manj kot črna telesa, katerih emisivnost je enaka 1.

Razen emisijskih spektrov poznamo še odbojne, absorpcijske in prepustne (transmisijske) spektre. Odbojni spekter dobimo, če npr. na neko površino usmerimo elektromagnetno sevanje z določeno spektralno sestavo in izmerimo, kako je energija v odbitem energijskem toku porazdeljena po valovnih dolžinah ali frekvencah. Podobno velja tudi za prepustni spekter, le da v prepustnem spektru izmerimo porazdelitev energijskega toka skozi neko snov prepuščene svetlobe v odvisnosti od valovne dolžine oz. frekvence. Absorpcijskega spektra direktno ne moremo meriti, temveč ga lahko šele določimo na podlagi znanih podatkov o odbojnem in prepustnem spektru. Velja namreč, da je vsota gostot energijskih tokov odbitega, absorbiranega in prepuščenega valovanja enaka gostoti energijskega toka vpadnega valovanja. Še več, deleže energijskih tokov po valovni dolžini oziroma frekvenci lahko obravnavamo neodvisne med seboj.

Za idealna "bela" telesa velja, da je njihova odbojnost enaka 1 po celotnem spektru, odbojnost idealnega "črnega" telesa pa je 0 po celotnem spektru, saj telo vso vpadlo svetlobo absorbira. Ostala telesa imajo odbojnost med 0 in 1. Takih idealnih "črnih" in idealnih "belih" teles, ki bi v celotnem spektru valovnih dolžin v celoti absorbirala oz. v celoti odbijala EMV, v naravi ni, lahko pa z eksperimenti ugotovimo, da določene snovi v posameznem ozkem intervalu valovnih dolžin delujejo približno kot idealna "črna" ali pa "bela" telesa. Za idealna "prozorna" telesa je prepustnost enaka 1 po celotnem spektru valovnih dolžin, za idealna "neprozorna" telesa pa je prepustnost enaka 0. Tudi takih teles, ki bi bila prozorna po celotnem spektru valovnih dolžin, v naravi ni. Snovi, ki jih mi npr. vidimo prozorne za vidno svetlobo, so lahko popolnoma neprozorne v drugem delu spektra EMV.

3.4 Disperzija svetlobe

Z znamenitim Newtonovim poskusom s prizmo prikažemo, da bela svetloba vsebuje mešanico svetlob mavričnih barv. Tanek pramen bele svetlobe, ki ga spustimo skozi prizmo, se na drugi strani kot pahljača razveji v enobarvne pramene. Potek žarkov kaže, da je lomni kvocient stekla za vijolično svetlobo nekoliko večji kakor za rdečo. To pomeni da je hitrost svetlobe v steklu za različne valovne dolžine različna. Disperzijo svetlobe opazamo pri vseh prozornih snoveh.



Slika 3.4: Pri prehodu bele svetlobe skozi optično prizmo dobimo zaradi odvisnosti lomnega količnika od valovne dolžine na drugi strani cel spekter barv (mavrico)

Lomni količnik n za svetlobo je določen kot kvocient med hitrostjo svetlobe v vakuumu (c_0) in hitrostjo svetlobe v snovi (c):

$$n = \frac{c_0}{c}. \quad (9)$$

3.5 Osvetljenost

Gostoto svetlobnega toka, ki pada na poševno ploskev S' , računamo tako, da to ploskev nadomestimo z drugo ploskvijo S , ki stoji pravokotno na žarkih in skozi katero gredo isti žarki, torej isti svetlobni tok P kakor skozi ploskev S' . Če je α vpadni kot žarkov, je svetlobni tok enak:

$$P = jS' \cos \alpha. \quad (10)$$

Koliko svetlobnega toka dobiva vsak m^2 ali cm^2 ploskve S' , pove kvocient svetlobnega toka s ploščino S' :

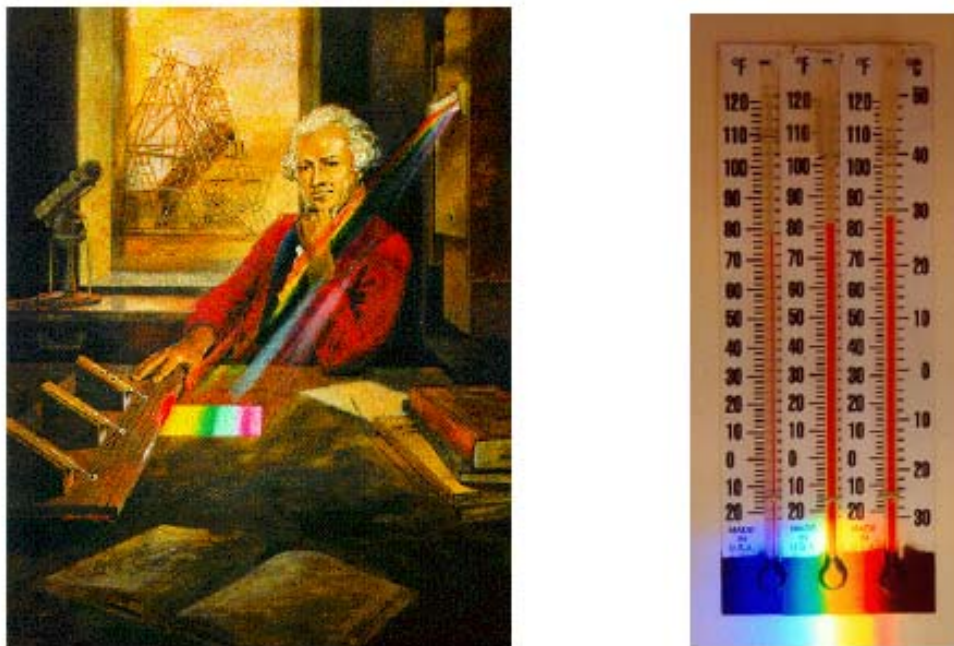
$$\frac{P}{S'} = j \cos \alpha., \quad (11)$$

Ta kvocient se imenuje osvetljenost ploskve S' . Enota je W/m^2 .

3.6 Infrardeča svetloba

3.6.1 Odkritje IR svetlobe

Infrardeče valovanje je leta 1800 odkril angleški astronom Sir Frederick William Herschel. S preprostim poskusom je želel določiti, koliko toplote nosi posamezna barvna komponenta sončne svetlobe. S pomočjo steklene prizme je razklonil žarek bele svetlobe in skozi nastalo mavrico pomikal počrnjeno bučko živosrebrnega termometra. Ugotovil je, da temperatura, ki jo kaže termometer, narašča od modrega proti rdečemu delu spektra. Ko je želel izmeriti tudi temperaturo izven območja vidne svetlobe, je naprej od rdečega dela spektra izmeril še višjo vrednost. Zato je sklepal, da se je tudi v ta predel lomila človeškemu očesu nevidna sončna svetloba. To svetlobo je poimenoval "toplotni žarki". Z nadaljnjimi poskusi je odkril, da se leti razširjajo, odbijajo, uklanjajo in absorbirajo na enak način kot vidna svetloba. Ker je frekvenca valovanja nižja kot pri rdeči svetlobi, je ta svetloba kasneje dobila ime infrardeča svetloba.



Slika 3.5: Sir Frederick William Herschel in odkritje infrardeče svetlobe

3.6.2 Opredelitev IR spektra

Človeško oko je najbolj občutljivo za zeleno svetlobo v okolici valovne dolžine 550 nm. Z večanjem valovne dolžine se jakost odziva niža, dokler pri okoli 750 nm sevanja ne zaznamo več. Ta meja je po definiciji spodnji rob IR spektra, medtem ko na zgornjem koncu valovnih dolžin, na meji z mikrovalovnim področjem, ni enotno sprejetega natančnega dogovora, saj literatura navaja različne vrednosti med 100 mm in 1 mm. V grobem IR svetlobo lahko razdelimo na tri dele, in sicer na daljno infrardečo (10 μm – 1 mm), ki je blizu mikrovalovom, srednjo infrardečo (2.5 μm in 10 μm) ter bližnjo infrardečo (750 nm in 2.5 μm), ki meji na vidno svetlobo in ima podobne lastnosti.

3.6.3 Izvori IR svetlobe

Žarilni izvori IR svetlobe so običajno snovi, katerih emisivnost se v tem delu spektra močno poveča. Največkrat se uporabljata silicijev karbid in torijev oksid. Skozi palico ali cev iz takega materiala preko kovinskih kontaktov teče električni tok, ki snov segreje do želene

temperature. Ti izvori sevajo svetlobo valovnih dolžin do 100 mm, najučinkovitejši pa so pri valovnih dolžinah do 15 mm. Žarnice z volframsko nitko izkoriščajo isti pojav, njihov izsev pa pri valovni dolžini okoli 2.5 mm omejuje IR neprepustnost stekla.

Drug pogost izvor IR sevanja predstavljajo oblačnice, pri katerih električni tok skozi ksenon ali živosrebrne pare povzroča ionizacijo atomov, pri ponovni vezavi elektronov pa izhaja valovanje. Spekter izsevane svetlobe se začne v ultravijoličnem območju in se preko vidnega dela razteza tudi v bližnji IR del, kjer pa zgornjo omejitev zopet predstavlja okoliško steklo.

Obe naštetni skupini izvorov IR svetlobe oddajata zvezen in širok spekter valovanja. Če za določeno uporabo zadostuje ozek spektralni pas in niso potrebne velike svetlobne moči, so ustrezne svetleče diode oz. LED (Light Emitting Diode), ki predstavljajo glavni izvor v daljinskih upravljalnikih in raznovrstnih senzorjih, pogosto pa so uporabne tudi za nekatere namene optičnih komunikacij.

Laserji tudi v IR delu spektra oddajajo koherentno in enobarvno svetlobo z visoko gostoto energijskega toka. Glede na ojačevalni medij jih delimo na plinske, trdninske in polprevodniške. Valovno dolžino izhodne svetlobe določajo energijske razlike med elektronskimi nivoji v izbrani snovi. Zaradi visoke moči so nepogrešljivi pri obdelavi materialov, zaradi enobarvnosti, jakosti in usmerjenosti pa so vir nosilca informacij pri optičnih komunikacijah.

3.7 Spektrometrija in spektrometri

Spektrometrija je znanost, ki na osnovi interakcije svetlobe (elektromagnetnega sevanja) in snovi raziskuje lastnosti svetlobnih izvorov in zgradbo snovi.

Optični spektralni analizatorji (spektrometri) so instrumenti, ki ločujejo oziroma analizirajo svetlobo glede na valovno dolžino. Spektralna analiza je merjenje optične moči v odvisnosti od valovne dolžine. Vsak optični spektralni analizator ima spektralno enoto, ki analizira vhodno svetlobo in jo posreduje detektorju. Fotodetektorji so običajno ena ali skupina

fotodiod, ki pretvorijo analiziran optični signal v električnega. Električni signal, ki ga je potrebno v nekaterih primerih še obdelati, nosi informacijo o jakosti optičnega spektra. Le-ta se običajno prikaže na zaslonu merilnega inštrumenta.

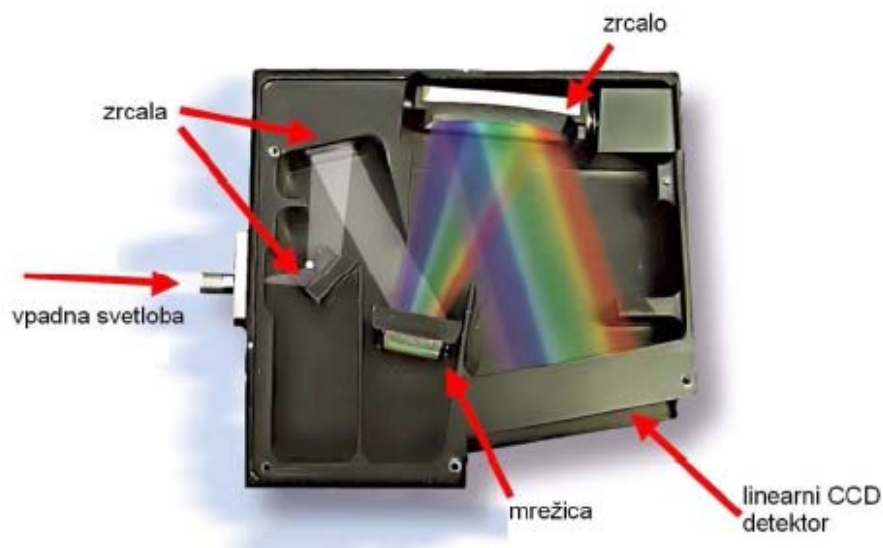
Glede na fizikalni način delovanja ločimo optične spektralne analizatorje v disperzijske in interferometrijske. Glede na število svetlobnih žarkov pa ločimo enožarkovne in večžarkovne optične spektralne analizatorje. Pri optičnem spektralnem analizatorju, ki deluje po disperzijskem fizikalnem načinu, je spektralna enota lahko prizma ali uklonska mrežica. Pri tistih, ki delujejo po interferometrijskem načinu, se za spektralno enoto uporablja Fabry-Perotov optični resonator ali poseben tip Michelsonovega interferometra.

Prvi optični spektralni analizator, ki se je pojavil v začetnem razvoju optike, je za spektralno enoto uporabljal prizmo. Zaradi svoje nenatančnosti v optičnih komunikacijah ni dosegel velikega uspeha in so ga kmalu izpodrinili optični spektralni analizatorji z uklonsko mrežico, ki so danes najbolj uveljavljeni.

3.7.1 Zgradba in princip delovanja spektrometra z uklonsko mrežico

Spektrometer je naprava za merjenje svetlobnega spektra. S spektrometri in ustreznimi vmesniki lahko raziskujemo EMV tudi izven vidnega dela spektra. Namen spektrometra je ločitev svetlobe na posamezne spektralne komponente.

Osnovne komponente vsakega spektrometra so svetlobni izvor, disperzni element in detektor. Eden izmed ključnih elementov sodobnih spektrometrov je uklonska mrežica, ki na principu uklona in interference razkloni vpadno svetlobo, tako da se svetloba različnih valovnih dolžin uklanja pod različnimi koti glede na vpadno smer. Nato svetloba vpade na drugega izmed ključnih sestavnih delov spektrometra, t.j. CCD detektor. Z mestom, kjer posamezen uklonjeni žarek svetlobe vpade na CCD detektor v vodoravni smeri, je določena valovna dolžina.



Slika 3.6: Zasnova sodobnega spektrometra

3.7.2 Disperzijski spektrometer z uklonsko mrežico

Spektrometer, ki deluje na principu uklona na periodični strukturi, je v sedanjem času najpogosteje uporabljen optični spektralni analizator. Uporablja uklonsko mrežico oziroma periodično strukturo. Uklonska mrežica je podana s konstanto mreže d , ki predstavlja razdaljo med režami. Če poznamo konstanto mreže in druge parametre (kot vpadne svetlobe, valovno dolžino vpadne svetlobe), lahko z računom določimo lego spektralnih črt na zaslonu. Na izhodu se pojavi mnogo ravninskih valov, ki se širijo v različnih smereh, imajo različno amplitudo in različno frekvenco. Računska analiza se znatno olajša, ker so amplitude vstopnih valov enake in ker so enake tudi fazne razlike med valovi svetlobe sosednjih rež. Maksimumi posameznih skupin nastopijo pri kotih, za katere je razlika optičnih poti med sosednjima periodama celoštevilska vrednost valovne dolžine. Uklonska mrežica optičnega spektralnega analizatorja mora imeti veliko število rež. Čim večje je število rež, tem ožje so širine glavnih interferenčnih maksimumov, medtem ko število interferenčnih minimumov in neznatnih dodatnih interferenčnih maksimumov med njimi narašča. Amplitude dodatnih maksimumov se zmanjšujejo tako, da postanejo nepomembne v primerjavi z osrednjim maksimumom in z bližnjimi glavnimi interferenčnimi maksimumi. Pri velikem številu rež lahko trdimo, da so med glavnimi interferenčnimi maksimumi temni presledki.

3.7.3 Disperzijski spektrometer s periodično strukturo

Sodobni optični spektralni analizator ima namesto uklonske mrežice periodično strukturo (angl. grating), ki izkorišča Braggov uklonski pojav. Planarna periodična struktura je sestavljena iz velikega števila enakih period v enakomernih presledkih dolžine d . Žarek, ki vpade na periodično strukturo, se loči po valovni dolžini. Svetloba z daljšo valovno dolžino se odklanja bolj od svetlobe s krajšo valovno dolžino. Neskenirni disperzijski optični spektralni analizator z uklonsko mrežico deluje v realnem času brez vsakršnih zakasnitev zaradi analize optičnega signala. Tovrstne izvedbe optičnih spektralnih analizatorjev so posebno primerne za aplikacije, ki delujejo v realnem času oziroma kjer hočemo imeti rezultate meritev v čim krajšem času.

3.7.4 Skenirni disperzijski spektrometer

Disperzijski spektrometer je največkrat izdelan v skenirni izvedbi, kar poenostavi merilni detektor. V tem primeru ima spektralni analizator en detektor in spektralni element rotira okrog svoje osi. Vse bolj se uporabljajo konkavne periodične strukture, ki imajo periode na cilindrični zrcalni površini. Analizatorji z odbojno mrežo imajo prednosti pred tistimi s prozorno mrežo, ker se pri njih ne pojavlja absorpcija svetlobe. Poleg tega pa se s konkavnimi zrcali prihrani druge optične elemente, ki bi bili potrebni pri ravnih zrcalih.

4 CCD SENZORJI (TIPALA)

Senzor oz. CCD tipalo je razvito vezje, ki je sposobno meriti svetlobo, ki pade nanj. V principu je CCD tipalo monokromatska naprava, sestavljena iz drobnih fotodiod (občutljive so na gostoto svetlobnega toka), ki pri osvetlitvi oddajajo električni naboj. Fotodiode so razporejene ena poleg druge v ravno vrsto, vrste pa ena nad drugo. Tako dobimo nekakšno matriko ($m \times n$) elementov, ki se običajno imenuje kar optična ločljivost naprave oz. instrumenta. Zaradi narave razporeditve fotodiod je tudi rezultat v obliki matrike. Slika za računalniško obdelavo je raster sestavljen iz kvadratkov različnih barv in svetlosti. Ti kvadrati so razporejeni po sliki tako kot fotodiode po enoti CCD.

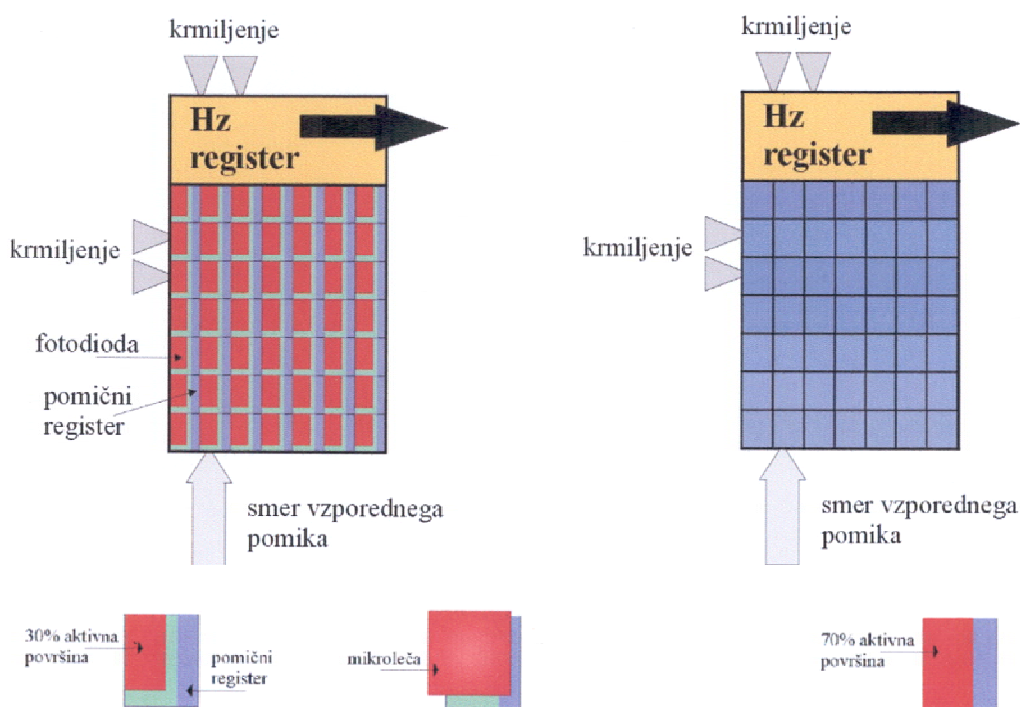
4.1 Vrste CCD tipal

Svetlobna tipala delimo na vrstična in ploskovna tipala. Pri vrstičnih svetlobnih tipalih CCD so fotosenzorji (piksli) razporejeni v vrsti. Uporaba teh tipal je predvsem v enostavnih napravah in za enostavne naloge.

Ploskovna tipala pa delimo na medvrstična in polna CCD tipala. Pri medvrstičnih tipalih je skupaj je nameščenih več vrstičnih tipal (sestavljenih iz niza posameznih fotosenzorjev in pripadajočih pomičnih registrov). Čas osvetlitve uravnava elektronska zaklopka, ki potiska količino zajete svetlobe v navpične pomične registre. Izhod navpičnih pomičnih registrov je speljan v vodoravni register in od tam na izhodni ojačevalnik. Na ta način se zajame celotna podoba. Zaradi elektronike, ki obdaja vsak fotosenzor, je aktivne le 30% površine posameznega piksla. Pred slikovne elemente je zato nameščen sistem mikroleč, ki povečajo učinkovitost zajema na 70%.

Polni CCD nima navpičnih pomičnih registrov. Osvetljevanje slikovnih elementov nadzira mehanski zaklop. Po osvetlitvi se celotna podoba prenese v vodoravni register v "surovi" obliki (RAW format). Ker nima pomičnih registrov in fotosenzorjem pripadajoče elektronike,

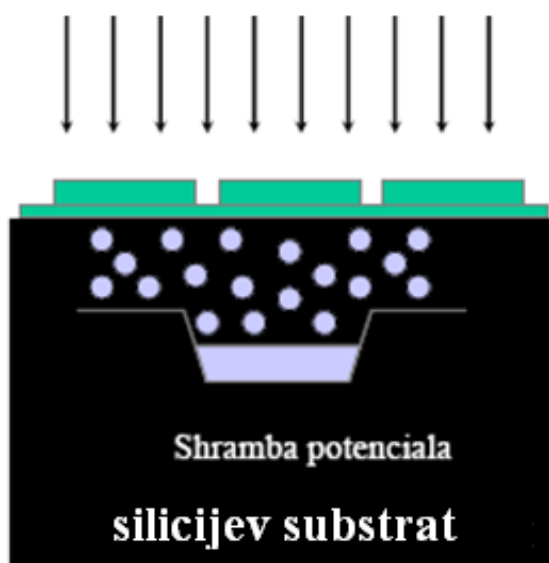
je polni CCD enostavnejši. Aktivna površina znaša 70 % površine piksla in ne potrebuje dodatnih mikroleč.



Slika 4.1: Arhitektura medvrstičnega in polnega tipala CCD

4.2 Delovanje CCD tipala

Tudi različne vrste tipal imajo način delovanja vsaj v prvi fazi enak. Ko se fotoni infrardeče svetlobe zaletijo v silicij (ki je osnova vsem vrstam tipal), vzburijo elektrone. Prosti elektroni se potem nabirajo v "zbiralniku" električnega naboja tako dolgo, dokler je svetlobni element osvetljen.



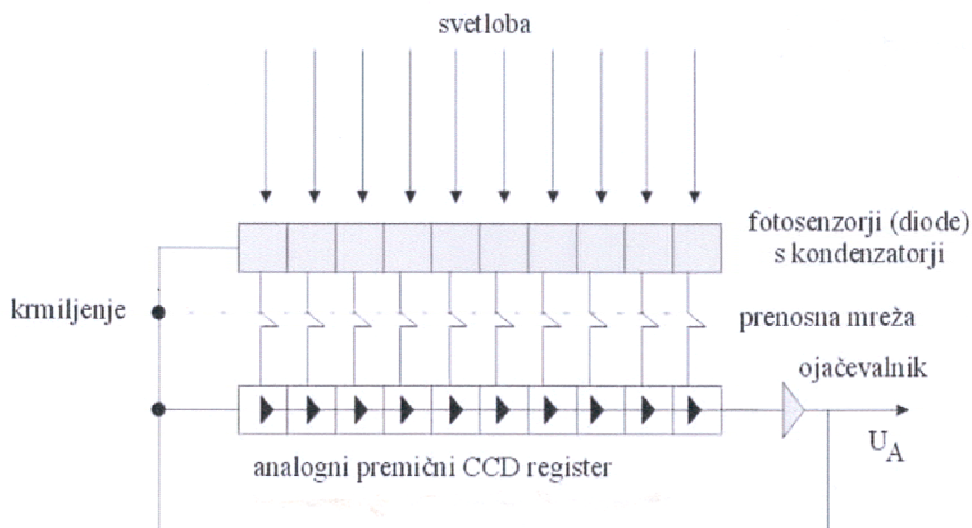
Slika 4.2: Osnovni princip registracije svetlobe pri CCD tehnologiji

Število elektronov, ki se tako sprostijo, bi v idealnih razmerah popolnoma ustrezalo številu fotonov. Toda v resničnem svetu ni tako in praviloma en foton v povprečju sprosti manj kot en elektron, pa še za tega ni nujno, da ga bo tipalo ujelo in uporabilo za ustvarjanje slike. Najpomembnejši dejavnik pri tem je predvsem kakovost uporabljene silicijeve rezine, ki jo na različne načine čistijo, ji ustvarjajo optimalno strukturo, jo obogatijo z dodatnimi elementi, ki povečujejo njeno sposobnost sproščanja elektronov, in podobno. V splošnem velja, da je razmerje med številom prejetih fotonov in sproščenih elektronov okoli 0.7 do 0.8.

Večina tipal ima posamezne svetlobne elemente razporejene v pravokotno mrežo (zmnožek števila svetlobnih elementov v vsaki vrsti in števila vrst pa seveda poda ločljivost tipala). Pri tipalih je nujno, da svetloba pade na svetlobni element čim bolj pravokotno, saj sicer ne sprosti toliko elektronov.

Pri tipalu CCD se naboj polni od vrha proti dnu tipala, vrstico za vrstico (torej gre za navpični pomik vseh nabojev v vrstici), zadnja vrstica pa služi kot vodoravni premični register, ki naboje vsake pike v vrstici zaporedno prenese iz tipala. Ob "izstopu" se vsak naboj še dodatno ojači, dobljeni izhodni signal različnih napetosti pa se končno posreduje ločenemu analogno-

digitalnemu pretvorniku, ki električne napetosti "prevede" v "surovo" (ali RAW) digitalno podobo slike.



Slika 4.3: Osnovni princip delovanja vrstičnega CCD tipala

Ker je pri takem načinu prenašanja naboja le malo izgub ali motenj, ki bi bile posledica delovanja različnih vezij na čipu, so te vrste tipal bistveno manj občutljive za šum. Kljub temu pa nekaj motenj vedno ostane in nekaj naboja se tudi pri takem prenašanju izgubi.

Pri zajemu svetlobe je zelo pomembna tudi velikost tipala. Ob tem je zelo pomembna velikost za svetlobo občutljivega dela posamezne pike - čim večja je ta površina, tem večja je sposobnost zajemanja svetlobe oziroma pretvarjanja fotonov v elektrone (kapacitivnost). To pomeni, da tipala z več pikami, a enako velikostjo ne pomenijo nujno napredka v kakovosti slike, saj se ob manjših svetlobnih elementih nujno zmanjša naboj, ki ga lahko posamezni svetlobni element zajame - s tem pa tudi količina barvnih podrobnosti ali dinamični obseg tipala. Poleg tega je treba izhodne signale bolj ojačiti, to pa povzroča dodatni šum.

5 TESTIRANJE DIGITALNEGA NIVELIRJA LEICA DNA 03 ZA VPLIV OSVETLJENOSTI LATE


5.1 Seznam uporabljene opreme

Za potrebe praktičnih meritev je bila uporabljena sledeča oprema:

- geodetska oprema:
 - 2 digitalna nivelirja Leica DNA 03,
 - 2 stativa GST120-9,
 - 3 dvonožniki GSR111,
 - 3 Leicine kodne nivelmanske late,
 - ročni merski trak,
- oprema za merjenje svetlobnega spektra:
 - optični spektrometer AvaSpec – 2048,
 - programska oprema AvaSoft,
- druga oprema:
 - prenosni računalnik,
 - stoparica,
 - rdeči filter,
 - modri filter,
 - varčna sijalka,
 - žarnica z žarilno nitko,
 - LED svetilka,
 - halogenska svetilka.


5.1.1 Lastnosti digitalnega nivelirja Leica DNA 03

Preglednica 1: Tehnične značilnosti digitalnega nivelirja Leica DNA 03

	
Natančnost (točnost) Elektronska meritev z invar lato s standardno lato Optična meritev Meritev dolžine	standardni odklon km dvojnega nivelmana (ISO17123-2) 0.3 mm 1.0 mm 2.0 mm 1 cm / 20 m (500 ppm)
Mersko območje Elektronska meritev Optična meritev	1.8 m – 110 m od 0.6 m
Čas meritve	3 s
Povečava daljnogleda	24 x
Kompenzator Tip Delovno področje Natančnost	nihalo z magnetnim dušenjem ± 10' 0.3"
Shranjevanje podatkov Vgrajen pomnilnik Dodatni pomnilnik	6000 meritev ali 1650 stojišč PCMCIA kartica (ATA – Flash, SRAM)
Zaslon	LCD, 8 x 24 znakov
Teža (z baterijo GEB 111)	2.8 kg
Temperaturno območje Delo Shranjevanje	-20 °C do +50 °C -40 °C do +70 °C

5.1.2 Lastnosti optičnega spektrometra AvaSpec - 2048

Preglednica 2: Tehnične značilnosti spektrometra AvaSpec - 2048

	
Mersko območje (razpon valovnih dolžin)	200 nm – 1100 nm
Čas meritev	2 ms – 60 s
Resolucija	0.04 nm – 20 nm
Detektor	linearni CCD
Prenos podatkov	14 ms – 31 ms / meritev
Občutljivost	5000 štetij / μW
Teža	1.7 kg
Signal / šum	200 : 1

5.2 Opis problema in motiv za izvedbo raziskave

Pri digitalnih nivelirjih se pojavljajo specifični pogreški, ki so posledica zunanjih vplivov. Velikokrat predstavlja težave ne idealna osvetljenost nivelmanske late. Do tega problema pride pri merjenju v tunelih, industrijskih objektih, itd. Čeprav je nivelmanska lata dobro vidna, se zgodi, da pri nekaterih vrstah umetne svetlobe v zaprtih prostorih digitalni nivelir ne določi odčitka. Delilnik žarka v nivelirju svetlobo, ki se odbije od nivelmanske late, razcepi v dva snopa. Vidni del pošlje do okularja, svetlobo v IR delu spektra pa na detektor slike. Če svetlobni senzor zajame premalo IR svetlobe, izrednotenje slike ni možno. Na podobno težavo naletimo tudi pri merjenju v mraku ali temi.

V nadaljevanju diplomske naloge bom predstavila zbirko poskusov prilagojenih za predstavitev pojma spektra svetlobe, njegovega vpliva na določitev odčitka ter prikaz

spektrov umetnih svetlobnih virov, s katerimi se lahko srečamo pri delu na terenu. Opisala bom tudi vpliv intenzitete svetlobnega toka na uspešnost posamezne meritve.

5.3 Merjenje v mraku in temi

5.3.1. Izbira primerne kraja in časa meritev

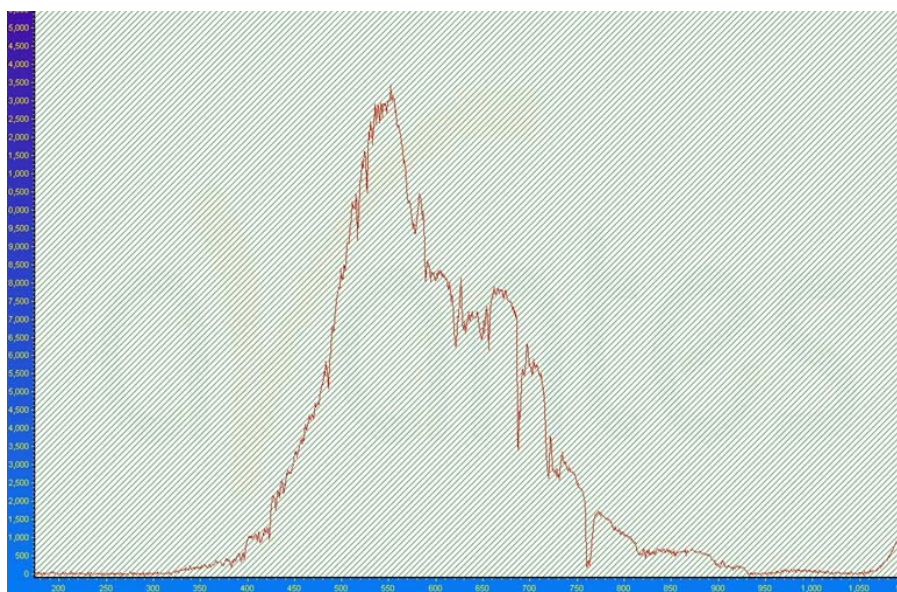
Za nazoren prikaz vpliva osvetljenosti late na določitev odčitka in eliminacijo drugih vplivov na zajem slike in njeno izvedenost sem morala izbrati primeren kraj in čas meritev. Pomembno je, da je teren čim bolj raven (izognemo se vizuram blizu tal) in da v bližini ni kakšnih optičnih ovir (npr. vegetacije, objektov, ograj), ki bi zakrivale posamezne dele razdelbe na lati. Tem kriterijem je zadostila streha Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Meritve so potekale v oblačnem vremenu, da bi se izognila vplivu direktne sončne svetlobe, ki bi lahko povzročila nastanek senc in s tem neenakomerno osvetlitev delov late. Problem pri merjenju v sončnem vremenu je tudi nastanek nivelmanske refrakcije. Nivelmanska refrakcija je vpliv nehomogene atmosfere v prizemnih plasteh ozračja na meritve geometričnega nivelmana. Svetlobni žarek – vizura se namreč na poti od instrumenta do late lomi zaradi prehoda skozi različne optične sloje. Migotanje zraka zaradi refrakcije lahko deformira sliko late tako, da njeno izvedenost ni možno. Poleg vseh naštetih pogojev, ki jih je bilo potrebno upoštevati, pa je bila najpomembnejša izbira ustreznega časa meritev. Za določitev mejne količine svetlobe, ki še omogoča določitev odčitka na lati, je bilo najbolj primerno merjenje v popoldanskem času do mraka in teme. Takrat se namreč intenziteta svetlobnega toka počasi zmanjšuje do te mere, da instrument ni več sposoben meriti.

5.3.2. Zajem svetlobnega spektra

Za vsak časovni interval testiranja instrumenta sem s pomočjo optičnega spektrometra AvaSpec – 2048 v realnem času zajela svetlobni spekter, odbit od kodne nivelmanske late (Priloga A). Ker je svetlobni tok tekom meritev postajal vse bolj šibak, je bilo potrebno za zagotovitev boljše preglednosti postopoma povečevati čas zajema. Kot rezultat sem dobila

podatek o številu detektiranih fotonov za vsako valovno dolžino na intervalu med 200 nm in 1100 nm. Primer detektiranih fotonov za valovno dolžino 750 nm se nahaja v Prilogi C.

Za potrebe določitve mejne količine svetlobe za določitev odčitka nisem potrebovala podatkov o celotnem spektru, saj je digitalni nivelir najbolj občutljiv za bližnjo IR svetlobo. Vse ugotovitve in izsledki v nadaljevanju se zato nanašajo le na ta del svetlobnega spektra.



Slika 5.1: Primer zajetega spektra dnevne svetlobe

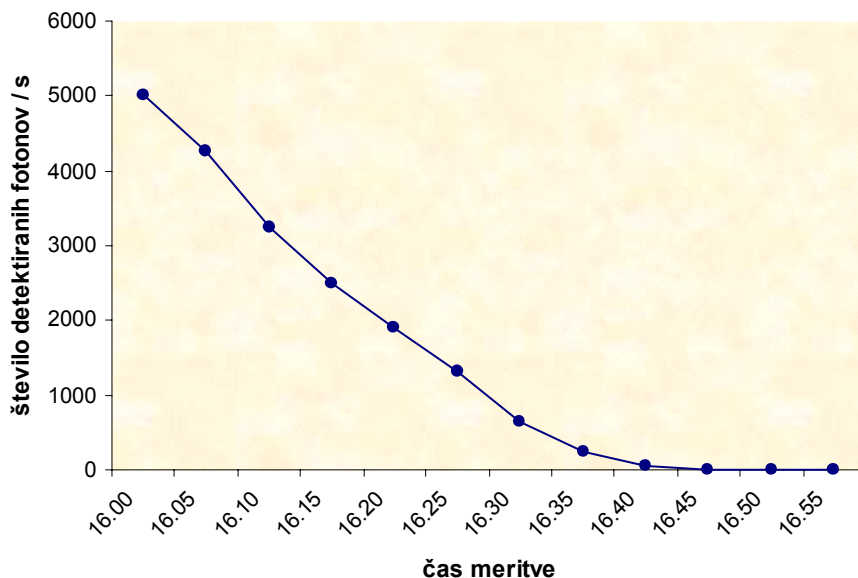
5.3.3 Testiranje digitalnega nivelirja

Za primerjavo sem hkrati testirala dva nivelirja Leica DNA 03. Na oddaljenosti 10 m, 20 m in 30 m od instrumenta sem postavila kodne nivelmanske late. S tem sem želela preveriti, če tudi dolžina vizure vpliva na uspešnost določitve odčitka, glede na to, da so bile vse late enako osvetljene. Podatki o meritvah so zbrani v Prilogi B.

5.3.4 Rezultati in ugotovitve

Pri enobarvni svetlobi imajo vsi fotoni enako energijo; svetlobe raznih barv pa se ločijo ravno v energiji fotonov. Ko foton zadane elektron, slednji prevzame njegovo energijo. Če pa foton

nima dovolj energije, elektrona iz atoma ne more izbiti. V vsakem primeru je energija, ki jo dobi elektron, odvisna od energije fotona, torej od barve svetlobe.



Grafikon 1: Časovno padanje števila fotonov IR svetlobe dne 10.12.2009 (za valovno dolžino 750 nm)

Koliko svetlobe dejansko pride do CCD senzorja, je zelo težko napovedati. Nekaj svetlobe se pri potovanju od late do nivelirja absorbira oz. siplje v ozračju, vendar je ta vpliv zaradi majhne vrednosti absorpcijskega koeficienta zraka za svetlobo zelo majhen, toda ne zanemarljiv. Potrebno je upoštevati tudi odvisnost gostote svetlobnega toka od razdalje med lato in detektorjem. Gostota svetlobnega toka pada s kvadratom te oddaljenosti, če privzamemo, da se svetloba od late odbije enakomerno v vse smeri. Ob 16.35, na 30 m oddaljeni lati, nivelir ni bil več sposoben določiti odčitka, medtem ko z meritvami na bližnjih latah (oddaljenih 20 m oz. 10 m) še ni bilo težav. Ob 16.50 pa ni bilo več možno meriti na nobeno lato.

Za določitev mejne količine IR svetlobe, ki je potrebna za iz vrednotenje slike late, bi morala poznati celoten razpon vrednosti valovnih dolžin, ki jih delilnik žarkov v instrumentu pošlje na CCD senzor. V delilniku je zrcalo z določenim lomnim količnikom. Vpadna svetloba različnih valovnih dolžin se za vsako barvno komponento lomi pod drugačnim kotom. Pri določeni valovni dolžini pa se zgodi popolni odboj. To je spodnja meja intervala valovnih

dolžin, ki jih instrument uporablja za določitev odčitka. Zgornja meja pa je predvsem odvisna od lastnosti CCD senzorja.

Določeno omejitev predstavlja tudi neprimerljivost kakovosti in dimenzij CCD senzorja v spektrometru in nivelirju.

5.4 Uporaba barvnih filtrov

Barva snovi v prepuščeni svetlobi je določena s spektralno sestavo vpadne svetlobe in z odvisnostjo prepustnosti snovi od valovne dolžine. Sončna svetloba je sestavljena iz različnih valovnih dolžin in jo vidimo kakor belo. Če belo sončno svetlobo prefiltriramo skozi barvni filter, ki prepušča določen del svetlobnega spektra, dobimo enobarvno svetlobo. Na primer zeleni filter prepušča pretežno svetlobo v zelenem delu svetlobnega spektra.



Slika 5.2: Barvni filtri

Če svetlobni žarek na poti od late do instrumenta naleti na neko oviro oz. snov, lahko ta snov deluje kot naravni svetlobni filter, ki prepušča le svetlobo določenih valovnih dolžin. Lahko pride do slučaja, da lato sicer dobro vidimo, pa vendar instrument ne določi odčitka.

5.4.1 Spekter svetlobe brez uporabe barvnega filtra

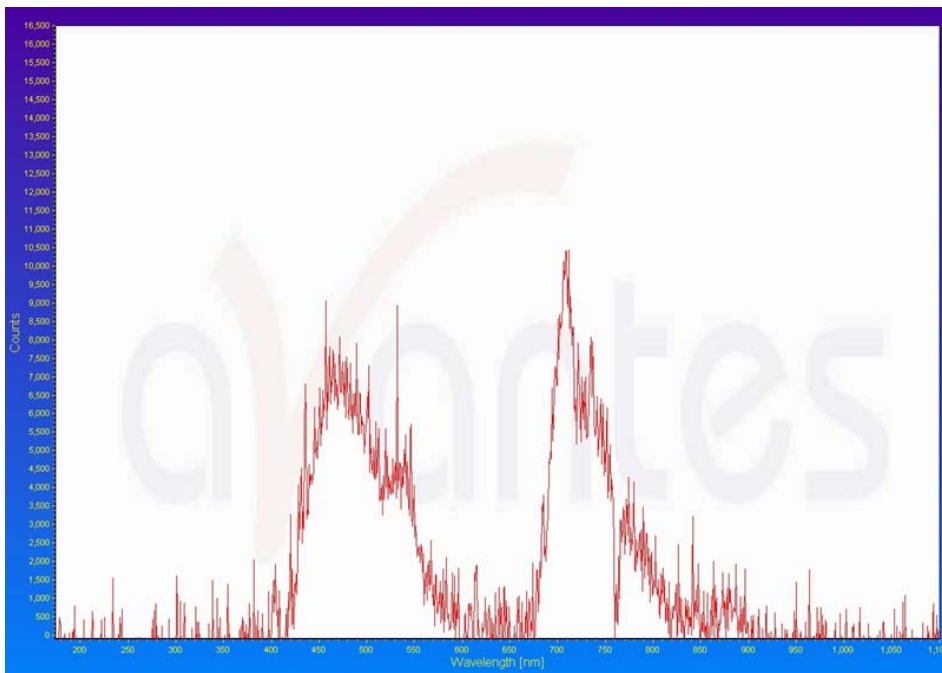
Poskus sem izvedla v laboratoriju pri dnevni svetlobi. Najprej sem izmerila od late odbit svetlobni spekter brez uporabe barvnih filtrov. Zajeti spekter je služil za primerjavo s spektrom svetlobe prepuščenim skozi rdeči in modri filter.



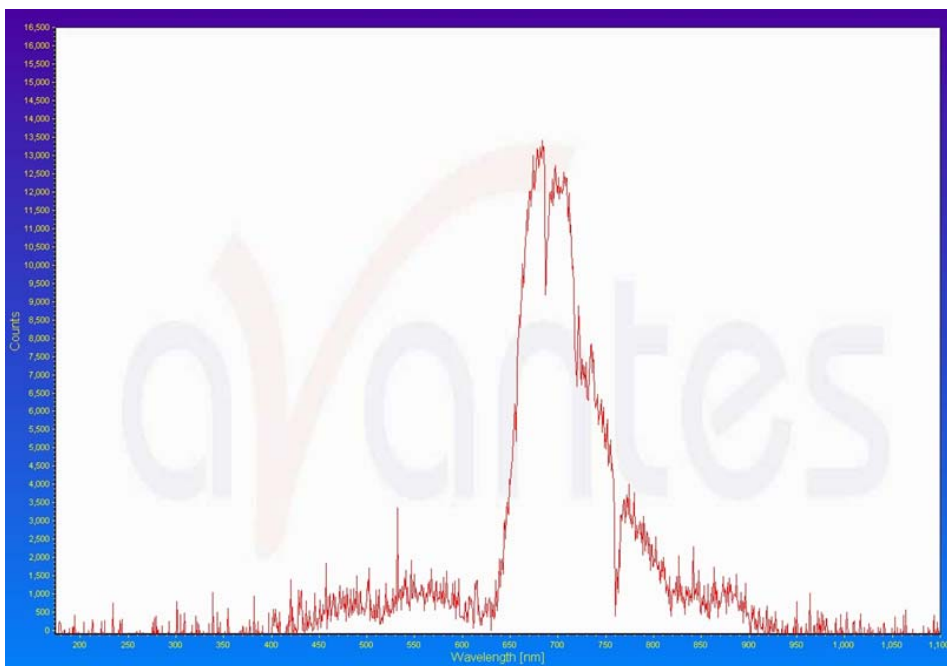
Slika 5.3: Od late odbit svetlobni spekter

5.4.2 Spekter svetlobe skozi barvni filter

Pred spektrometer sem položila dva različna barvna filtra in opazovala spekter prepuščene svetlobe. Opazila sem, da rdeči filter najbolj prepušča svetlobo valovnih dolžin med 600 nm in 900 nm, to je rdečo in del bližnje infrardeče svetlobe. Modri filter pa večinoma prepušča svetlobo valovnih dolžin od 400 nm do 600 nm in svetlobo valovnih dolžin med 650 nm in 850 nm, kar je bilo sicer v nasprotju z mojimi pričakovanji. Kljub temu pa na slikah 5.4 in 5.5 vidimo, da je površina pod grafom v rdečem in IR delu spektra (pri valovnih dolžinah večjih od 620 nm) pri modrem filtru znatno manjša kot pri rdečem. Nivelir je bil kljub filtrirani svetlobi pri uporabi rdečega filtra sposoben meriti. Modri filter pa je absorbiral preveč IR svetlobe, zato merjenje ni bilo uspešno. V obeh primerih lata skozi filter ni bila vidna.



Slika 5.4: Svetlobni spekter skozi moder filter (čas zajema: 10 s)



Slika 5.5: Svetlobni spekter skozi rdeč filter (čas zajema: 5 s)

5.5 Svetila kot umetni izvori svetlobe

V grobem vse umetne svetlobne vire razdelimo na žarnice in sijalke. Pri žarnicah svetloba nastaja z žarjenjem žarilne nitke. Med žarnice prištevamo vsem znane klasične žarnice in halogenske žarnice. Pri sijalkah svetloba nastaja s sevanjem svetlobe po principu razelektritev. Med sijalke prištevamo fluorescenčne in varčne sijalke ter metalhalogenidne, živosrebrove in natrijeve sijalke.

Osnovni dejavniki s katerimi lahko opišemo značilnosti posameznih žarnic oz. sijalk so svetlobni izkoristek (lm/W), barvna temperatura svetlobe (Kelvin oz. K) in faktor barvne razpoznavnosti (od 0 do 100). Svetlobni izkoristek nam da podatek o ekonomičnosti svetlobnega vira oz. koliko svetlobe proizvajajo na enoto (W) porabljene energije. Barvna temperatura svetlobe nam opiše barvo proizvedene svetlobe, ki se pri svetlobnih virih giblje nekje med 2000 K in 6500 K. Nižja ko je vrednost, bolj je svetloba tople oz. bolj rumene barve in obratno. Pri višjih vrednostih je barva svetlobe hladnejša, bolj bele oz. modrikasta.

5.5.1 Žarnica z žarilno nitko

Žarnica je sestavljena iz steklenega ogrodja, v katerega je zaprta tanka v vijačnico zvita žica iz volframa. Kadar skozi žico teče električni tok, se električna energija zaradi upora žice pretvarja v svetlobo in toploto. Pravimo, da žarnica zažari oziroma zasveti. Klasična žarnica z nitko predstavlja enega najpomembnejših izumov človeka in se je tekom časa stalno razvijala. Poleg slabih lastnosti, kot je nizek svetlobni izkoristek, imajo klasične žarnice tudi dobre lastnosti, kot so prijetna in kakovostna svetloba z visokim faktorjem barvne razpoznavnosti, takojšen



Slika 5.6: Žarnica z žarilno nitko

vklop in nizka cena. Svetloba klasičnih žarnic ima odlično barvno razpoznavnost, toplo barvo svetlobe med 2400 K in 2700 K.

5.5.2 Halogenska žarnica

Velik korak naprej v izkoristku in dolžini življenjske dobe je prineslo polnjenje bučke z majhnimi količinami halogenov. Volfram se pri visoki temperaturi napari na steklene stene in nastaja siva plast, ki prepušča manj svetlobe, hkrati pa se tanjša tudi v spiralo oblikovana nitka, dokler žarnica naposled ne pregori. Volfram s halogeni tvori spojino, ki se vrača na hladnejši del nitke. S kroženjem volframa traja nitka dlje, temperaturo in z njo povezano svetlost pa lahko še povišamo. Žarnice, polnjene s halogeni, imajo dvakrat višji izkoristek in več tisoč ur dolgo življenjsko dobo. Izparevanje žarilne nitke preprečuje tudi višji tlak plina v bučki.



Slika 5.7: Halogenska žarnica

5.5.3 Varčna sijalka

Varčne sijalke so se v zadnjih letih precej razvile, tako da imamo danes na izbiro veliko število različnih jakosti in barv proizvedene svetlobe. Varčne sijalke sijejo zato, ker jih vzbuja svetloba višje frekvence (manjše valovne dolžine, npr. UV svetloba) od svetlobe, ki jo nato seva. Pojavu pravimo fluorescenca. Elektroni v atomih snovi, s katerimi so sijalke prevlečene, zaradi UV sevanja prehajajo v višja energetska stanja in se nato postopoma vračajo nazaj v osnovno stanje. Pri tem sevajo svetlobo s frekvenco, ki je sorazmerna spremembi energetskega stanja. Katere frekvence sijalka seva je odvisno od snovi, s katero je prevlečena.

Ker sevajo sijalke večinoma vidno svetlobo, je njihov izkoristek bistveno večji od izkoristka žarnic z volframovo nitko. Zato jim tudi pravimo varčne sijalke. Spekter varčnih žarnic ni zvezen, kar sicer velja za spekter, ki ga seva črno telo. Diskretne komponente v spektru svetlobe pomenijo veliko sevalno moč v ozkih frekvenčnih pasovih, kar deluje na oko izrazito moteče.



Slika 5.8: Varčna sijalka

5.5.4 LED dioda

Svetila opremljena z LED diodami (Light Emitting Diode) so v zadnjem času deležna hitrega razvoja in jih vse pogosteje uporabljamo. Svetleča oz. LED dioda je polprevodniški elektronski element. Njene karakteristike so podobne navadni polprevodniški diodi s to razliko, da kadar prevaja tok, sveti. Razlikujejo se po barvi, obliki in električnih značilnostih. Izsevana svetloba ima valovno dolžino v ozkem spektralnem pasu. Svetleče diode oddajajo svetlobo po principu sevanja trdnih teles.



Slika 5.9: LED žarnica

Bistvo delovanja predstavlja dejstvo, da kadar elektron preskoči na nižje energijsko stanje, odda odvečno energijo v obliki EM sevanja. Če je odvečne energije zadosti, jo zaznamo kot svetlobo. Svetleča dioda je v osnovi polprevodniška dioda, ki pa ni sestavljena iz silicija,

temveč iz drugih materialov, ki sicer porabijo več moči, a sevajo svetlobo. Izsevana svetloba je odvisna od uporabljenih materialov – substratov.

Prednosti LED svetil so predvsem majhna poraba energije, dolga življenjska doba, neobčutljivost na število vklopov in izklopov, majhno segrevanje in s tem povezano oddajanje toplote, barvna stabilnost tekom celotnega cikla obratovanja in majhne dimenzije svetilk. Med pomanjkljivosti pa lahko štejemo še vedno višjo ceno za kakovostna LED svetila in omejene možnosti uporabe zaradi manjših moči in s tem povezane manjše svetilnosti. Intenzivnost barve svetlobe LED diod je zelo velika, tako da ima opazovalec občutek, da vir svetlobe proizvaja več lumnov svetlobe, kot jih dejansko.

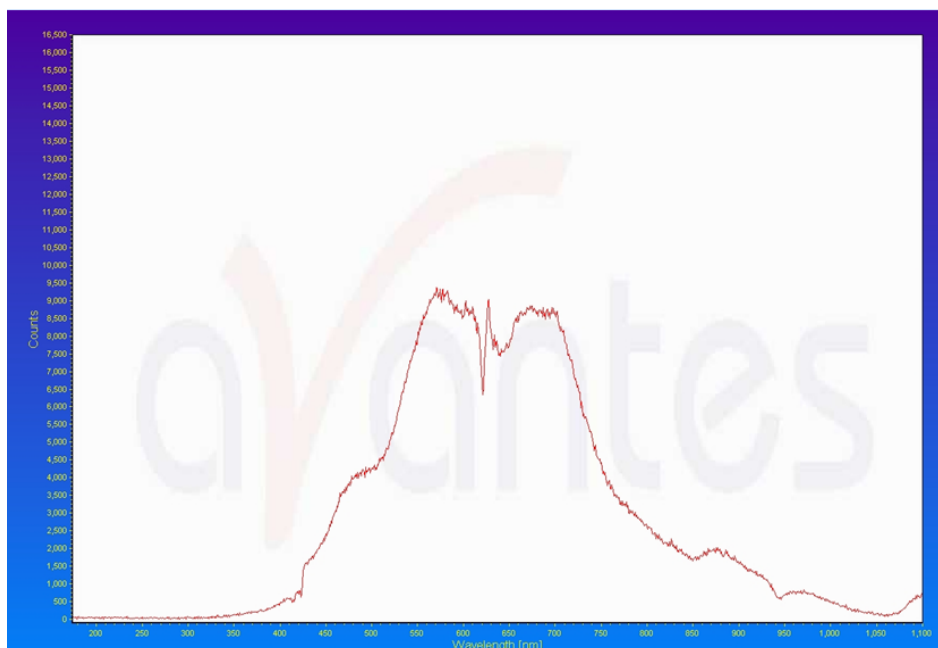
5.5.5 Spektri različnih vrst svetil

Za izvedbo poskusa sem morala doseči popolno temo, saj je lahko okoliška svetloba moteča pri snemanju spektrov različnih svetil. Kot sem omenila že v uvodu v praktični del diplomske naloge, lahko svetloba, ki jo sevajo določene vrste svetil, povzroča težave pri iz vrednotenju slike late. Z meritvami sem ugotavljala, katera svetila niso primerna za osvetlitev zaprtih prostorov za potrebe meritev geometričnega nivelmana. Prav tako naj se taka svetila ne bi uporabljala za morebitno dodatno osvetlitev nivelmanske late.

V nadaljevanju so prikazani zajeti spektri žarnice z žarilno nitko, halogenske žarnice, LED diode in varčne žarnice skupaj s pripadajočimi rezultati merjenja.

5.5.5.1 Spekter žarnice z žarilno nitko

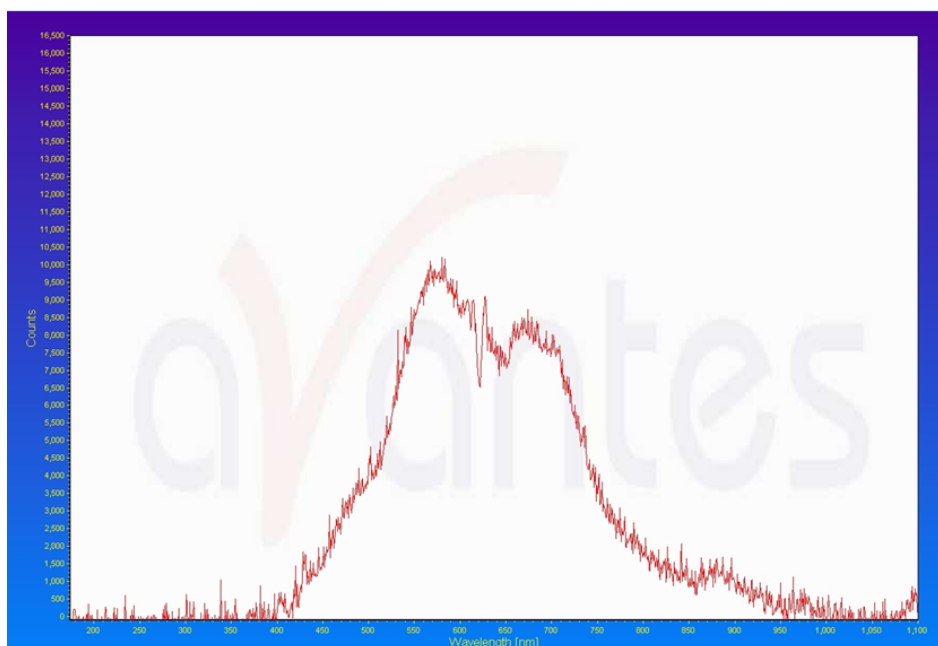
Spekter žarnice z žarilno nitko je zelo podoben tistemu, ki ga seva naravna sončna svetloba. Spekter izsevanega valovanja je zelo širok in močno odvisen od temperature žičke. Znaten delež izsevanega spektra leži v območju IR svetlobe. Vijolične, zelene in modre barve so slabo zastopane, poudarjene pa so rumene in rdeče barve. Spekter ima praviloma vrh v IR področju, kar sicer ne velja za moj primer. Vrh je namreč v rdečem delu spektra.



Slika 5.10: Spekter žarnice z žarilno nitko

Žarnice z žarilno nitko torej lahko uporabimo za osvetlitev prostorov in dodatno osvetlitev late. Eksperiment je pokazal, da ni bilo težav pri določitvi odčitka na lati.

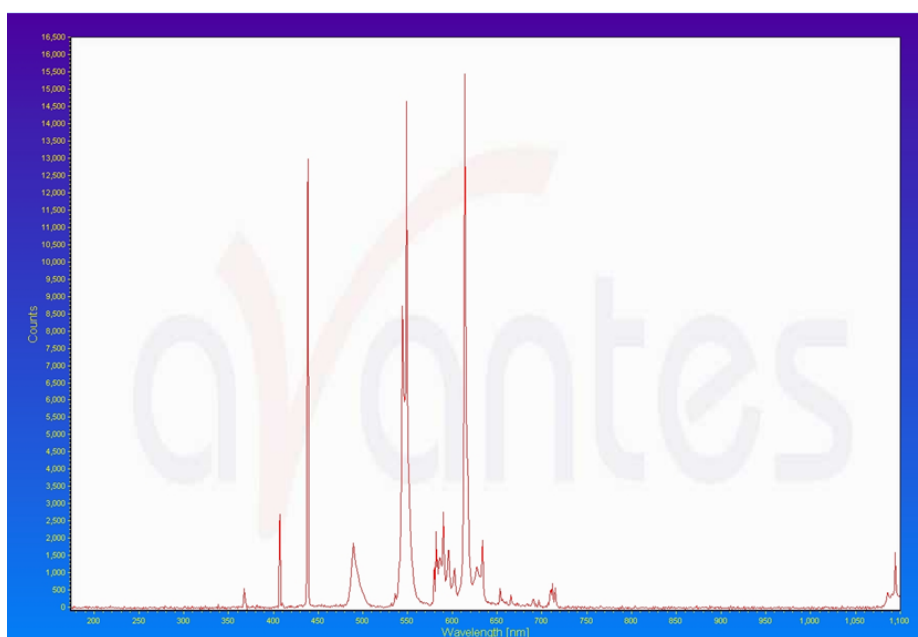
5.5.5.2 Spekter halogenske žarnice



Slika 5.11: Spekter halogenske svetilke

Zopet lahko opazimo podobnost s spektrom sončne svetlobe. Barvni spekter vsebuje vse valovne dolžine. V primerjavi z spektrom navadne žarnice je vrh premaknjen proti manjšim valovnim dolžinam (rumena svetloba). Uporaba halogenskih svetil se s strani geodetske stroke najbolj priporoča. Tudi eksperiment je pokazal, da je bilo čitanje vselej uspešno izvedeno.

5.5.5.3 Spekter varčne žarnice

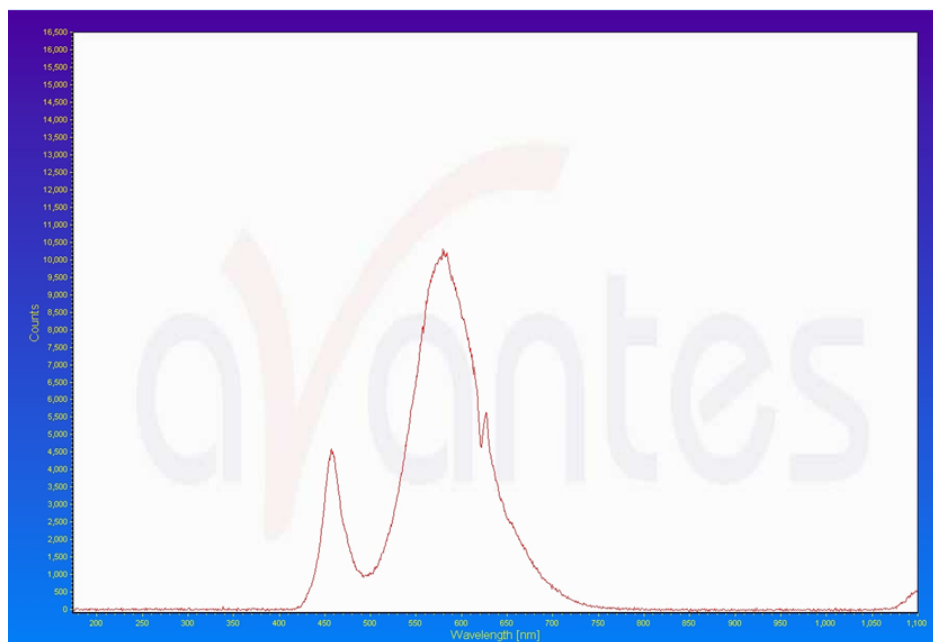


Slika 5.12: Spekter varčne žarnice

Spekter varčnih žarnic ni zvezen, temveč črtast. Diskretne komponente v spektru svetlobe pomenijo veliko sevalno moč v ozkih frekvenčnih pasovih. Največji delež izsevanega spektra pripada rdeči svetlobi pri valovni dolžini 630 nm, sledita ji zelena (550 nm) in modra (430 nm) barva. Ostale barve so zelo malo zastopane, medtem ko valovnih dolžin v IR področju praktično ni. Iz tega razloga varčne žarnice za osvetlitev niso primerne. Instrument namreč ni določil odčitka.

5.5.5.4 Spekter bele LED diode

Barvni spekter belih LED diod je precej bolj bel in modrikast kot sončna svetloba, ki se nagiba proti rumeni in oranžni. V infrardečem spektru skoraj nič ne sevajo, zato sem imela težave pri določanju odčitka. Uporabo LED svetil zato odsvetujem.



Slika 5.13: Spekter bele LED diode

6 ZAKLJUČEK

Pogoj, da lato vidimo, ni zadosten, da bo nivelir določil odčitek na nivelmanski lati. Prešibka naravna ali umetna svetloba, ki ima zelo majhen delež energijskega toka v IR področju, lahko povzroči, da meritev ne bo mogoča.

Za potrebe praktičnih meritev so neuporabne predvsem varčne sijalke in LED diode, ki jih uporabljamo zaradi boljšega izkoristka, saj oddajajo le svetlobo v vidnem delu spektra. Pri dnevni svetlobi, žarnicah na žarilno nitko in halogenskih svetilkah je, poleg vidne svetlobe, vedno dovolj tudi energijskega toka v IR področju. Zato nivelir meri vsakič, ko imamo zadostno osvetljenost late. Pri nekaterih novih vrstah svetil pa je v IR področju premajhen energijski tok. Kljub temu, da skozi okular lato vidimo (vidni del spektra je zadosten), v detektor slike pride premalo IR svetlobe. To smo nazorno pokazali z uporabo dveh različnih barvnih filtrov, ki smo ju postavili pred objektiv. Oba sta toliko zmanjšala svetlobni tok, da lata skozi okular ni bila več vidna. Rdeč filter je v spektru odstranil krajše valovne dolžine. Nivelir je bil, kljub filtrirani svetlobi, sposoben določiti odčitek. Nasprotno pa je moder filter odstranil dolgovalovno svetlobo, zato določitev odčitka ni bila možna.

Vpliv osvetljenosti nivelmanske late lahko zmanjšamo z uporabo primernih vrst svetil in krajšo dolžino vizure.

VIRI

Batagelj, B. 1998. Optični spektralni analizatorji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za optične komunikacije: str. 4-9.

Deumlich, F., Staiger, R. 2002. Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Heidelberg, Wichmann: str. 255-274

Fras Kosmatin, M. 2005. Svetlobni senzorji / tipala. Fotogrametrija – predavanja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: str. 2-11.

Furlan, J. 1980. Osnove nelinearnih elementov. 2. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: 198 str.

Gerbec, J. 2006. Določitev linearnega temp. razteznostnega koeficienta komparatorja nivelmanskih lat MSGL 001. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: str. 11.

Grigillo, D. 2003. Uporaba nemetričnih digitalnih fotoaparatorov v fotogrametriji. Geodetski vestnik 47, 3: 240-250.

Ingensand, H. 1999. The evolution of digital levelling techniques – limitations and new solutions. FIG – The importance of heights, Gävle, Švedska: 9 str.
<http://www.fig.net/commission5/reports/gavle/ingensand.pdf> (1.4.2010)

Kladnik, R. 1971. Osnove fizike za tehnike, 2. del. Ljubljana, Državna založba Slovenije: str. 405-419.

Kogoj, D., Stopar, B. 2008. Geodetska izmera – Geodezija. Strokovni izpit iz geodetske stroke. Programna zasnova in priprava gradiv za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija geodetov: str. 10-12.
http://e-prostor.gov.si/fileadmin/ogs/GEODETSKA_IZMERA.pdf (1.4.2010)

Kuščer, I., Moljk, A., Kranjc, T., Peternelj, J. 2000. Fizika za srednje šole, 2. del. Ljubljana, Državna založba Slovenije: str. 216-230.

Kuščer, I., Moljk, A., Kranjc, T., Peternelj, J., Rosina, M., Strnad, J. 2002. Fizika za srednje šole, 3. del. Ljubljana, Državna založba Slovenije: str. 226-240.

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU: str. 21-24.

Peterson, C. 2000. How It Works: The Charge-Coupled Device, or CCD. Georgetown University. (elektronski vir, ki ni ve dostopen)

Rihtaršič, J. 2005. Merjenje in prikaz spektrov vidne svetlobe v srednji šoli. Osnutek diplomske naloge: 34 str.
http://freeweb.t-2.net/scspec/diplomskaNaloga_Ver1.pdf (15.2.2010)

Topolnik, S. 2009. Sodobni komparatorji nivelmanskih lat v Evropi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Inženirska geodezija: str. 14-15.

Urbančič, I. 2008. Infrardeče tehnologije. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko: 21 str.
<http://www-fl.ijs.si/~ziherl/IRTehnologije.pdf>

Vodopivec, F. 1997. Geodezija II – višinomerstvo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 19-81.

Zupan, M. 2006. Varčne žarnice. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 9 str.
http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/VarcneZarnice2006/VARCNE_ZARNICE.doc
(1.5.2010)

Spletna enciklopedija Wikipedija:
<http://sl.wikipedia.org>

Spletna stran Zvonka Jagličiča:
<http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/zarnice/zarnice.html>

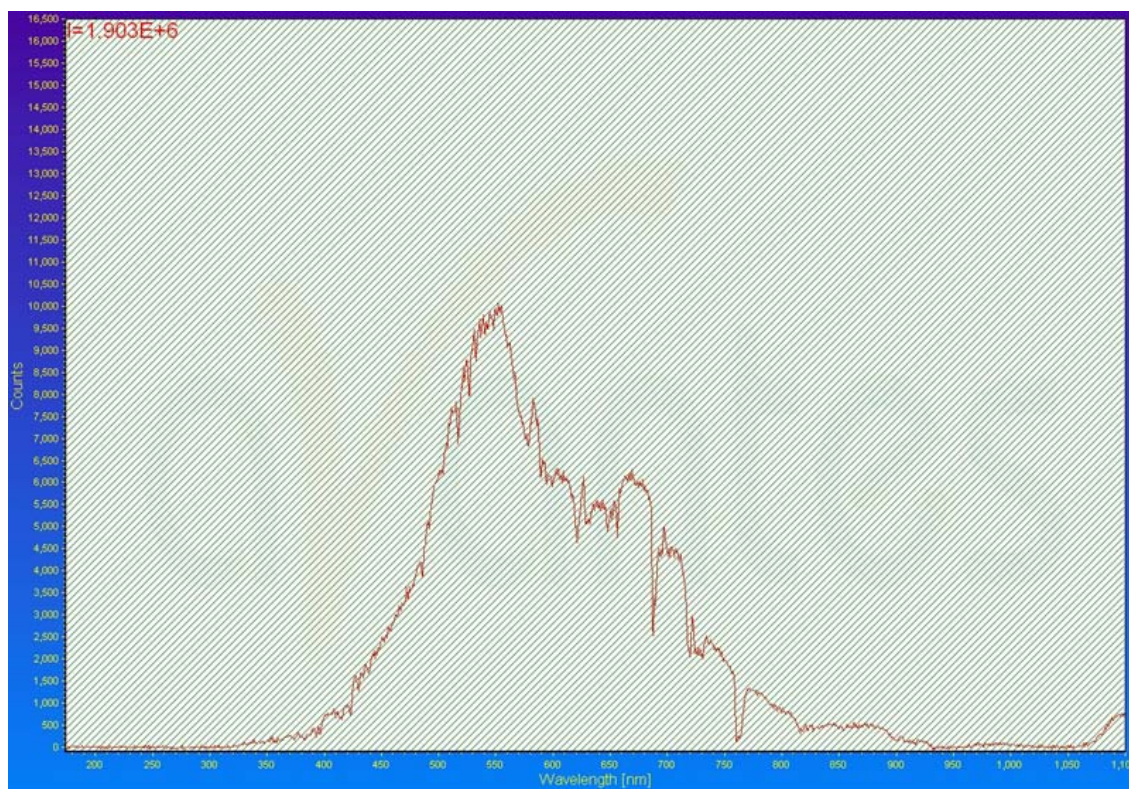
Spletna stran podjetja Avantes:
<http://www.avantes.com>

Spletna stran podjetja Geoservis:
<http://www.geoservis.si>

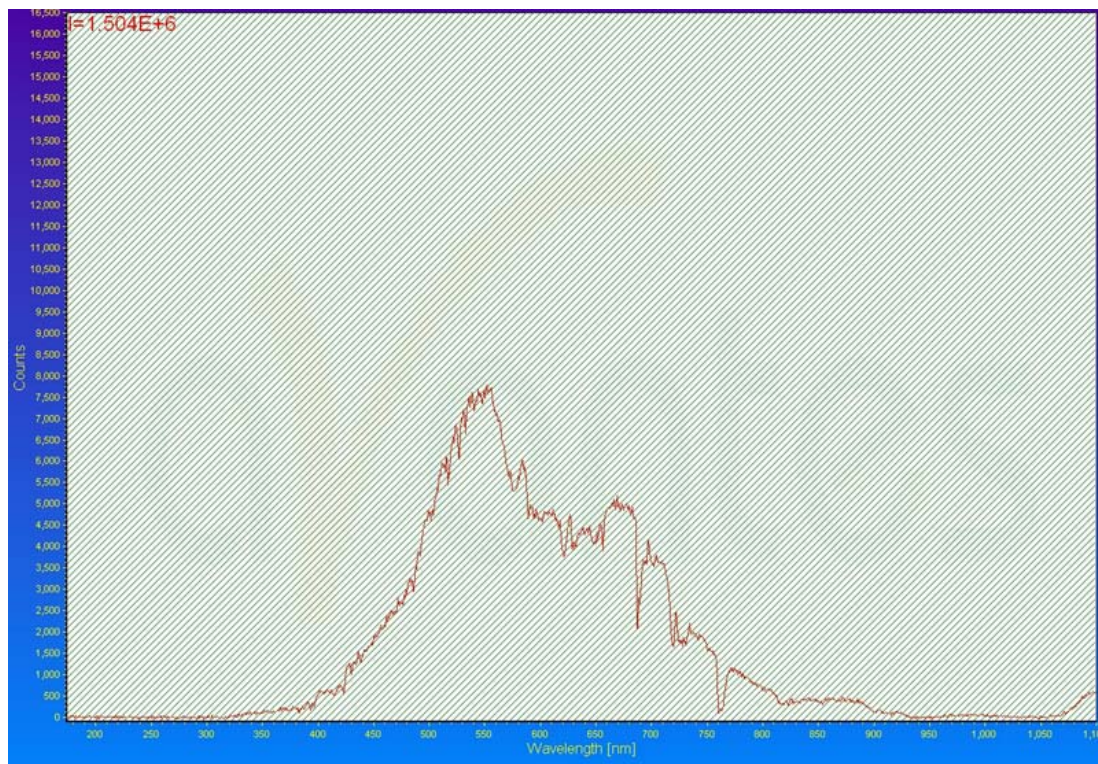
PRILOGE

Priloga A: Zajem spektra dnevne svetlobe na strehi FGG

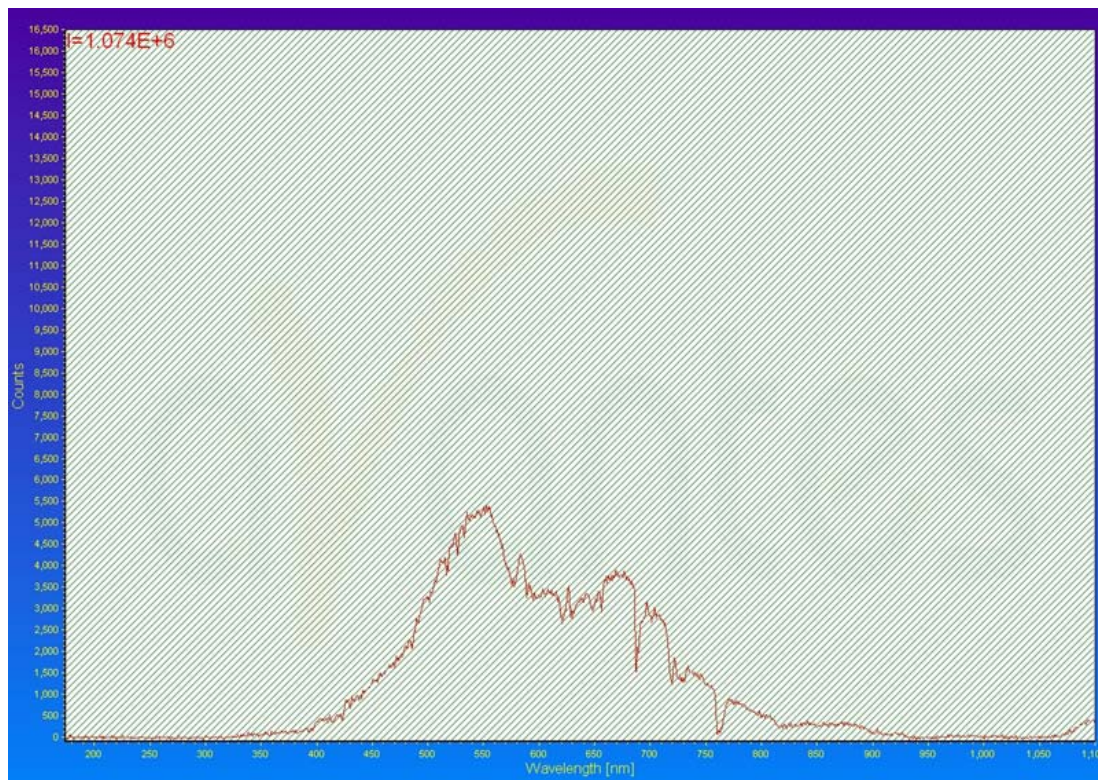
Opomba: Svetlobnega spektra za čas 16.55 ni bilo mogoče zajeti, saj je bil svetlobni tok prešibak glede na merske zmogljivosti uporabljenega spektrometra.



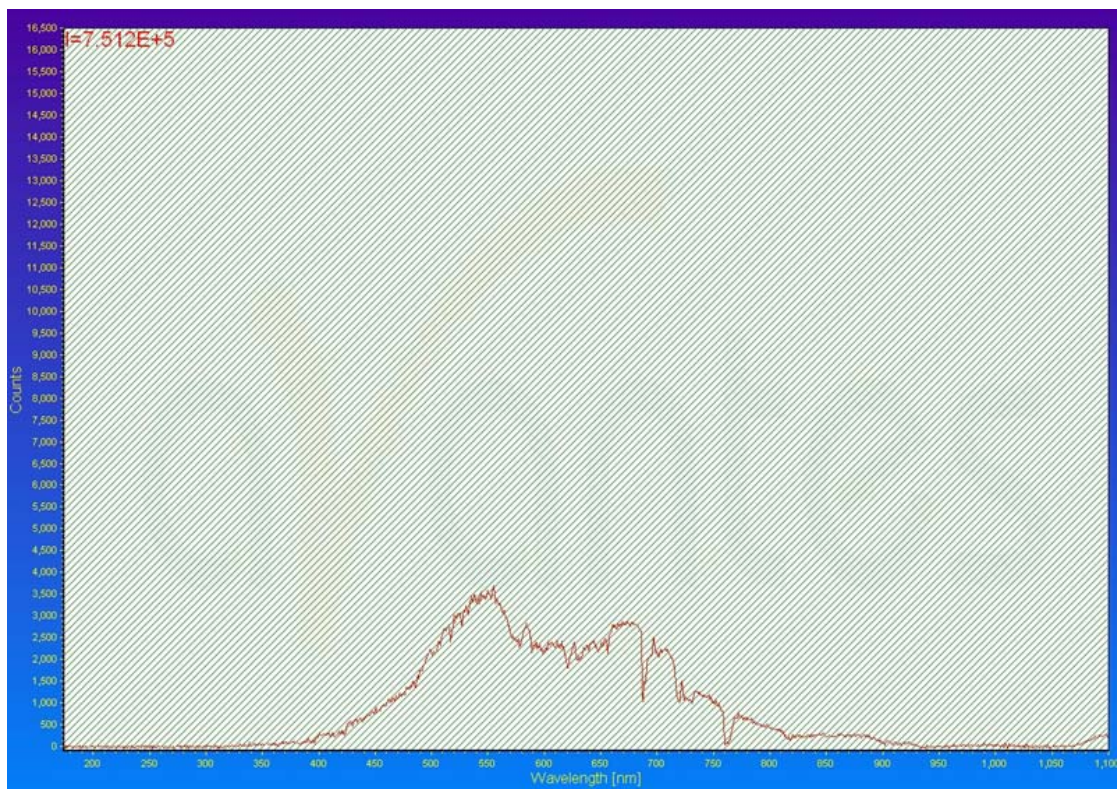
Spekter 1: čas 16.00, čas zajema = 400 ms



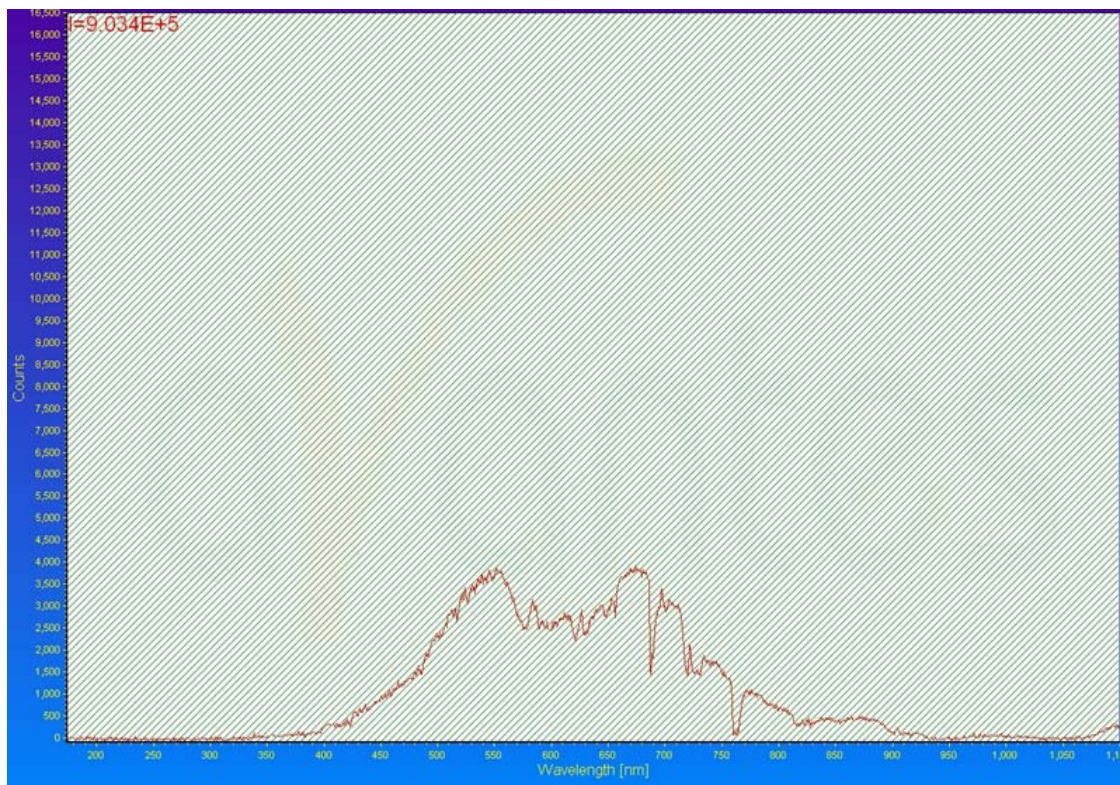
Spekter 2: čas 16.05., čas zajema = 400 ms



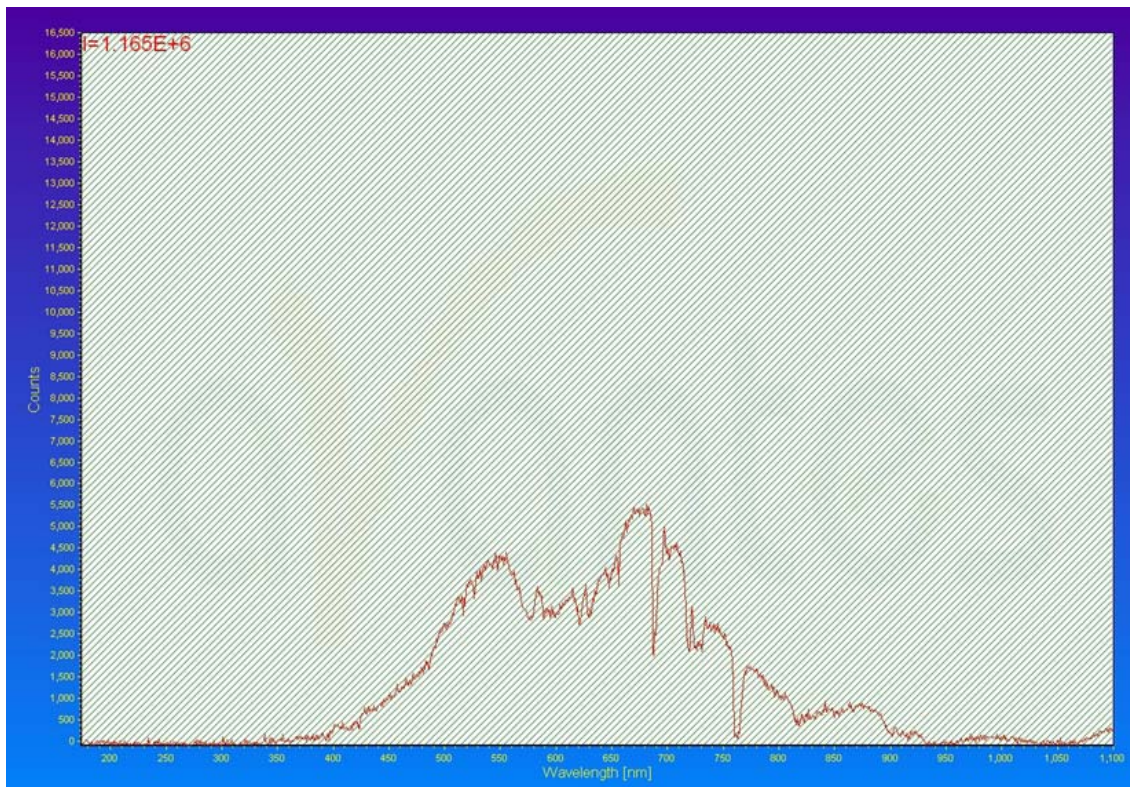
Spekter 3: čas 16.10., čas zajema = 400 ms



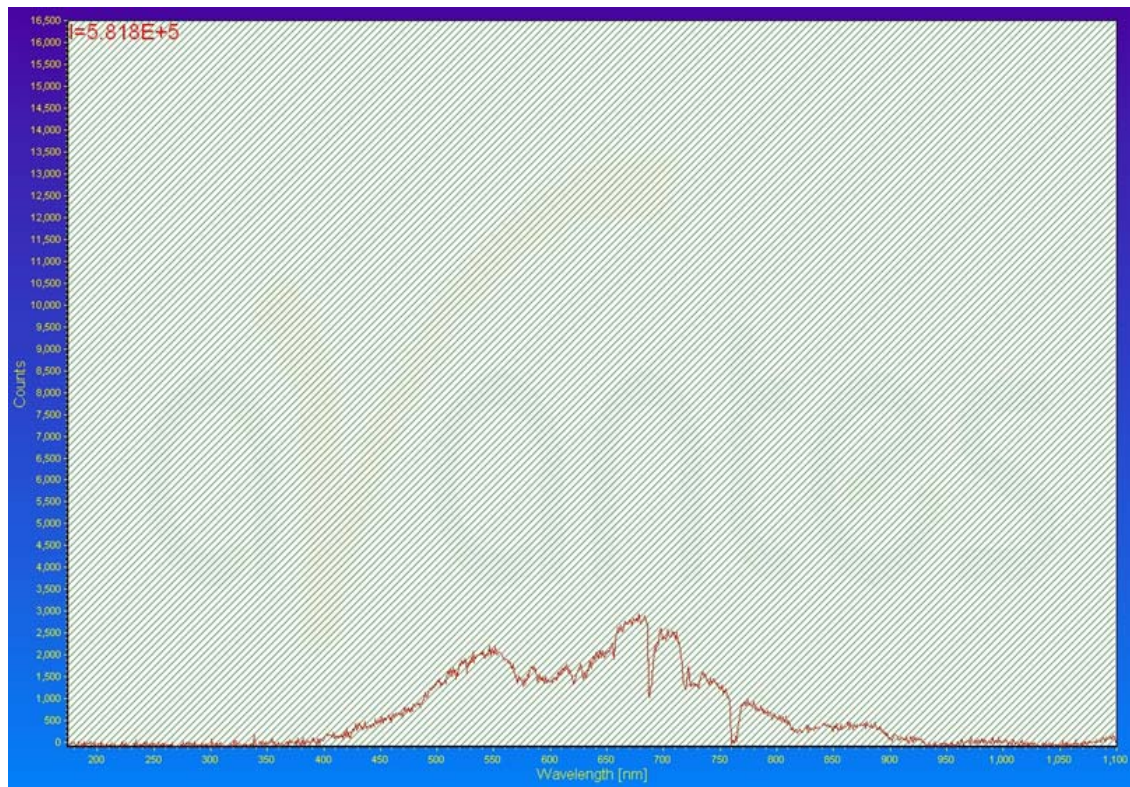
Spekter 4: čas 16.15., čas zajema = 800 ms



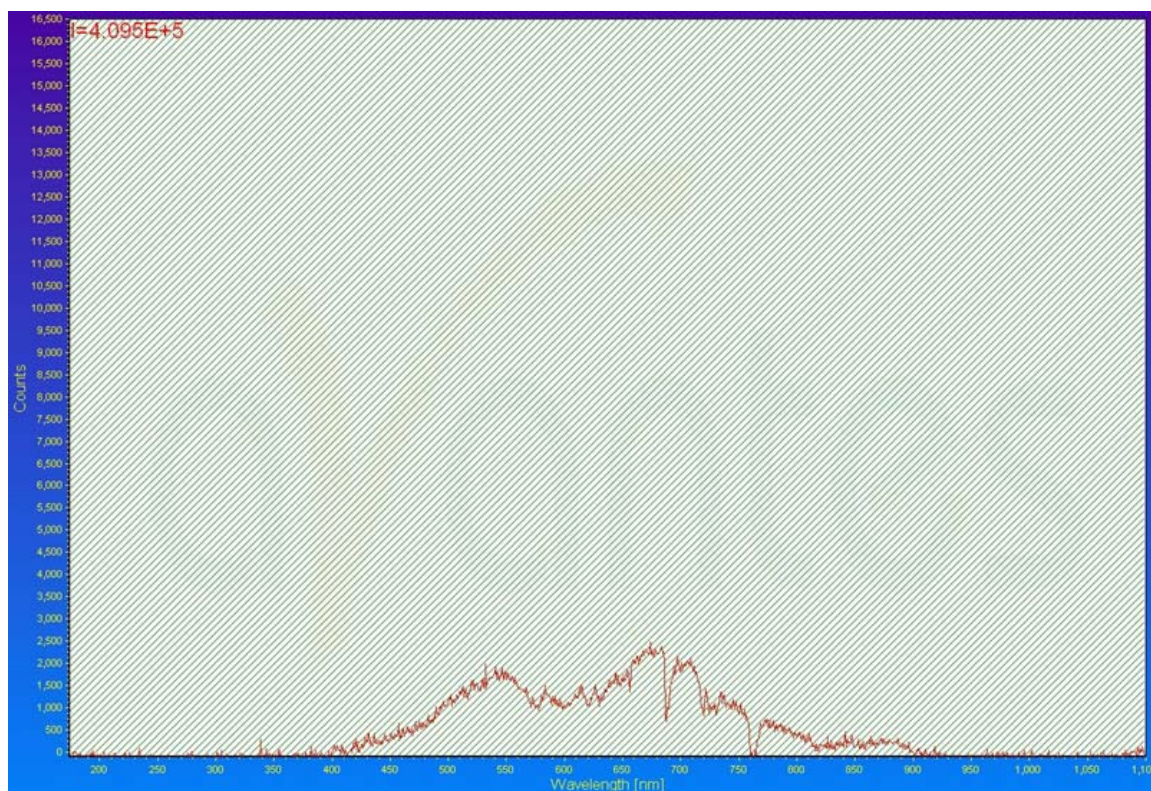
Spekter 5: čas 16.20, čas zajema = 800 ms



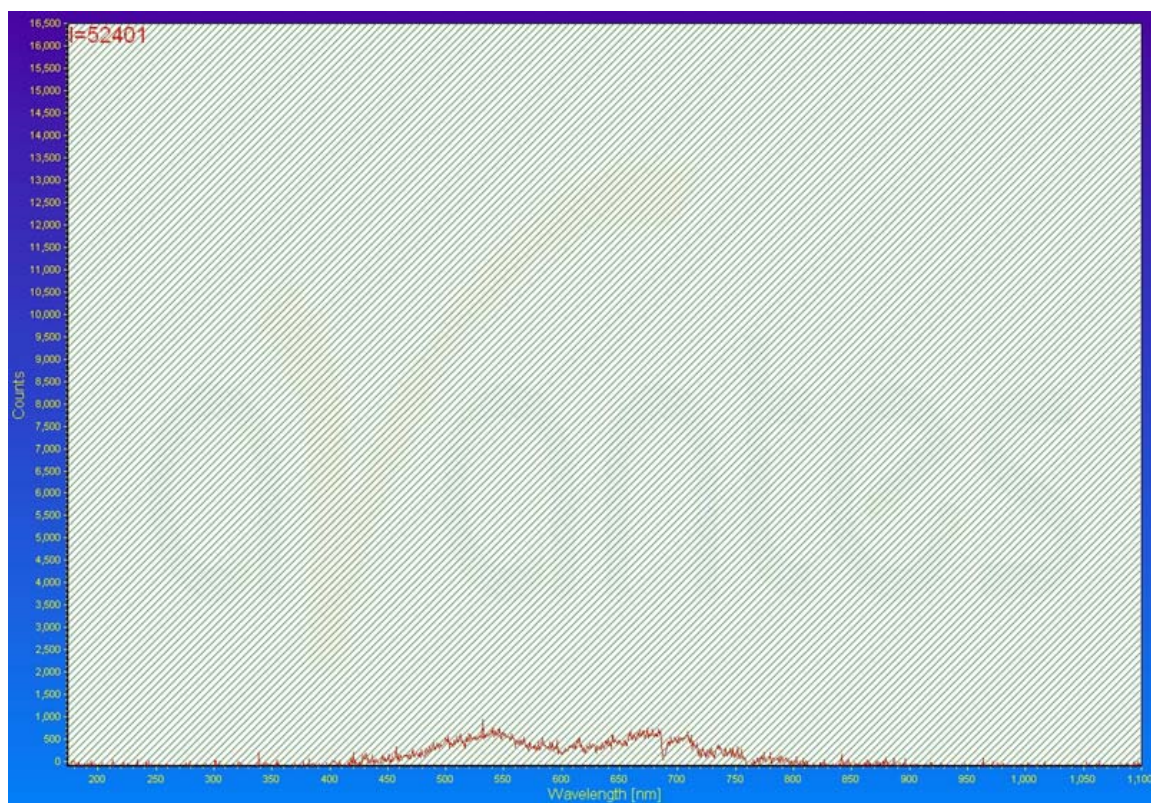
Spekter 6: čas 16.25, čas zajema = 2000 ms



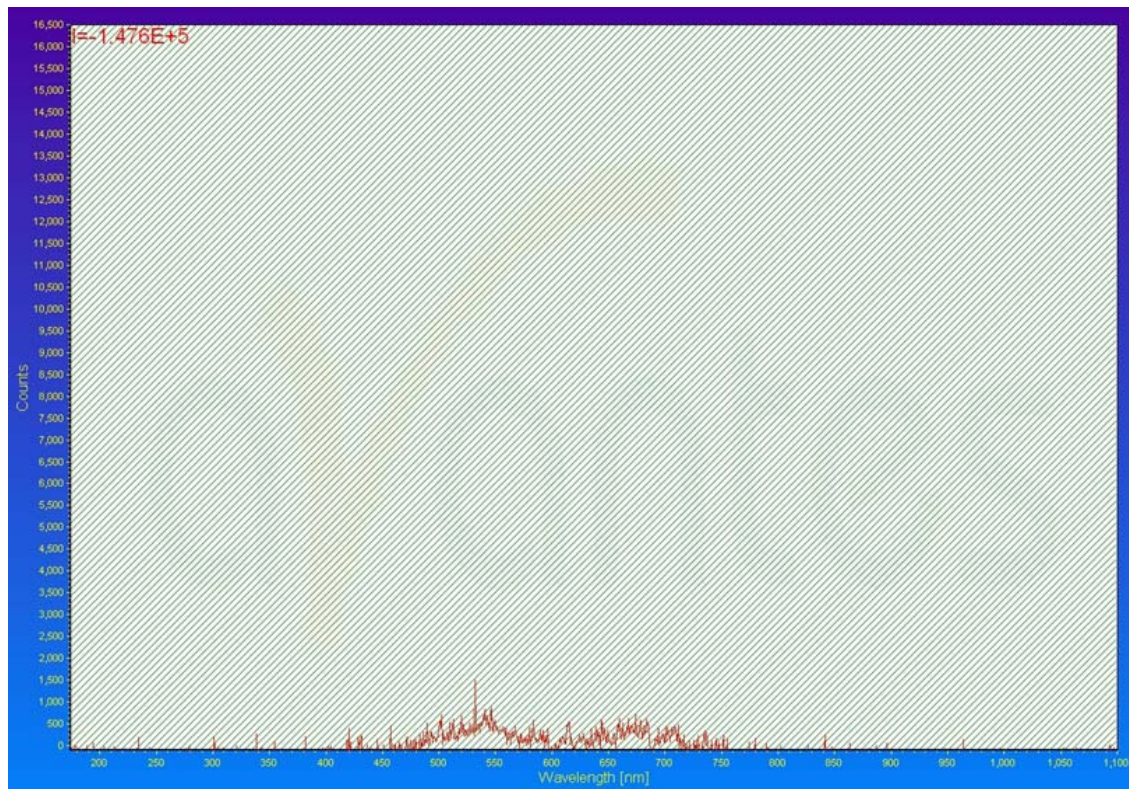
Spekter 7: čas 16.30, čas zajema = 2000 ms



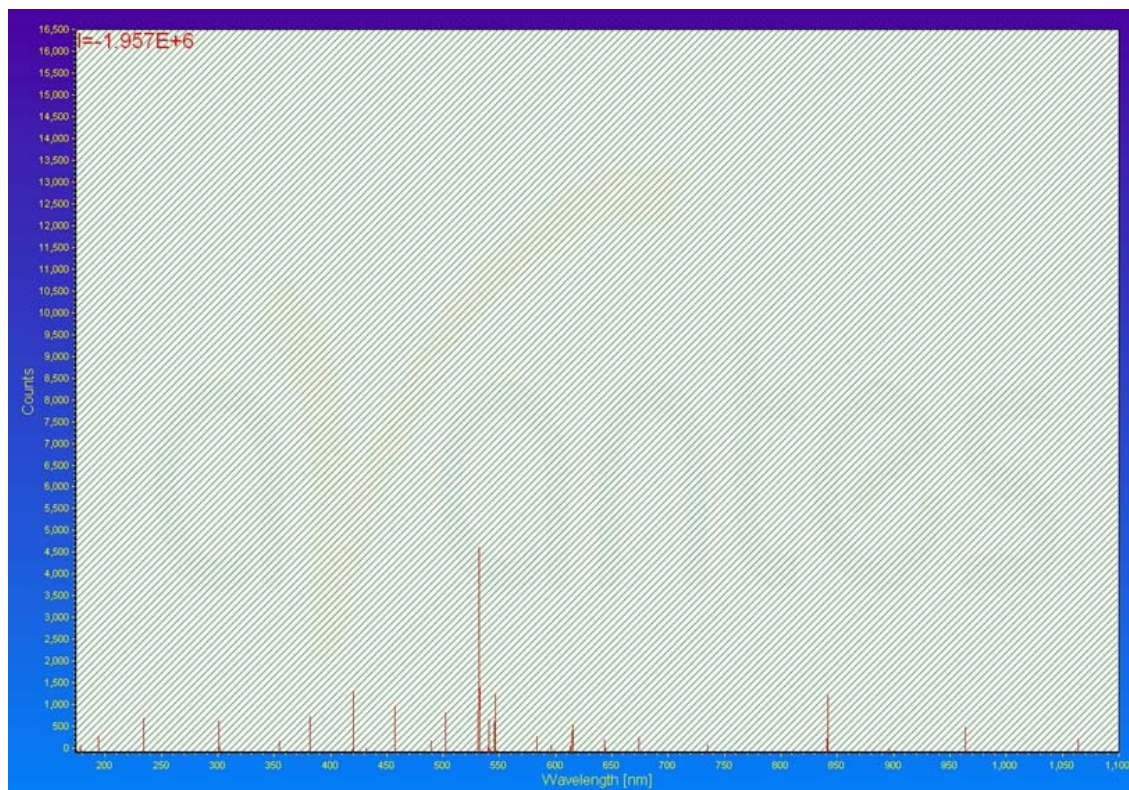
Spekter 8: čas 16.35, čas zajema = 4000 ms



Spekter 9: čas 16.40, čas zajema = 4000 ms



Spekter 10: čas 16.45, čas zajema = 10 s



Spekter 11: čas 16.50, čas zajema = 60 s

Priloga B: Terenski zapisnik za meritve na strehi FGG

čas	lata	Nivelir 1			Nivelir 2		
		odčitek	σ_{AS}	št. odčitkov n	odčitek	σ_{AS}	št. odčitkov n
16.00	1 (d=10m)	1.39194	0.00003	10	1.39747	0.00001	10
	2 (d=20m)	1.40803	0.00002	10	1.42062	0.00002	10
	3 (d=30m)	1.38463	0.00004	10	1.40445	0.00001	10
16.05	1	1.39199	0.00000	10	1.39747	0.00003	10
	2	1.40796	0.00002	10	1.42049	0.00001	10
	3	1.38465	0.00003	10	1.40447	0.00003	10
16.10	1	1.39196	0.00001	10	1.39769	0.00005	10
	2	1.40796	0.00001	10	1.42062	0.00001	10
	3	1.38459	0.00005	10	1.40447	0.00000	10
16.15	1	1.39196	0.00000	10	1.39752	0.00004	10
	2	1.40799	0.00002	10	1.42053	0.00002	10
	3	1.38474	0.00004	10	1.40448	0.00000	10
16.20	1	1.39197	0.00000	10	1.39753	0.00005	10
	2	1.40800	0.00002	10	1.42067	0.00004	10
	3	1.38462	0.00002	10	1.40443	0.00001	10
16.25	1	1.39199	0.00001	10	1.39746	0.00004	10
	2	1.40790	0.00003	10	1.42057	0.00003	10
	3	1.38495	0.00003	10	1.40450	0.00001	10
16.30	1	1.39199	0.00001	10	1.39731	0.00004	10
	2	1.40798	0.00003	10	1.42055	0.00001	10
	3	1.38462	0.00004	6	1.40416	0.00001	8
16.35	1	1.39192	0.00001	10	1.39723	0.00006	10
	2	1.40795	0.00004	9	1.42064	0.00001	7
	3	/	/	/	1.40448	0.00001	5
16.40	1	1.39196	0.00000	2	1.39747	0.00003	2
	2	/	/	/	/	/	/
	3	/	/	/	/	/	/
16.45	1	1.39198	0.00001	1	1.39749	0.00002	1
	2	/	/	/	/	/	/
	3	/	/	/	/	/	/
16.50	1	/	/	/	/	/	/
	2	/	/	/	/	/	/
	3	/	/	/	/	/	/
16.55	1	/	/	/	/	/	/
	2	/	/	/	/	/	/
	3	/	/	/	/	/	/

Priloga C: Določitev števila fotonov za IR svetlobo (pri valovni dolžini 750 nm)

čas meritve	približno število fotonov	trajanje zajema spektra [s]
16.00	2000	0.4
16.05	1700	0.4
16.10	1300	0.4
16.15	2000	0.8
16.20	1500	0.8
16.25	2500	2
16.30	1300	2
16.35	1000	4
16.40	250	4
16.45	250	10
16.50	0	60
16.55	0	60