

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Matijević, S., 2016. Kontrola instrumentalnih pogreškov laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kogoj, D.): 69 str.

Datum arhiviranja: 01-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Matijević, S., 2016. Kontrola instrumentalnih pogreškov laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kogoj, D.): 69 pp.

Archiving Date: 01-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GEODEZIJA
SMER GEODEZIJA V
INŽENIRSTVU**

Kandidat:

SAŠA MATIJEVIĆ

**KONTROLA INSTRUMENTALNIH POGREŠKOV
LASERSKIH SLEDILNIKOV IN PRIMERJAVA S
TACHIMETRI**

Diplomska naloga št.: 434/GI

**CONTROL OF LASER TRACKERS INSTRUMENTAL
ERRORS AND COMPARISON WITH TACHYMETRES**

Graduation thesis No.: 434/GI

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

Ljubljana, 30. 08. 2016

ERRATA

<u>Stran z napako</u>	<u>Vrstica z napako</u>	<u>Namesto</u>	<u>Naj bo</u>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Spodaj podpisani študent **Saša Matijević**, vpisna številka **26202932**, avtor pisnega zaključnega dela z naslovom: "**Kontrola instrumentalnih pogreškov laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri**".

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, avgust 2016

Saša Matijević

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 528.5:681.783.2(043.2)
- Avtor:** Saša Matijević
- Mentor:** izr. prof. dr. Dušan Kogoj
- Naslov:** Kontrola instrumentalnih pogreškov laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – visokošolski strokovni študij
- Obseg in oprema:** 69 str., 14 preg., 44 sl., 14 en.
- Ključne besede:** laserski sledilnik, tahimeter, SMR, natančnost, koordinate, interferometer, elektrooptični razdaljemer, Leica, Faro, standard, ASME B89.4.19, ISO 10360-10, ISO 17123-3:2001, ISO 17123-4:2012, ISO 17123-5:2012

IZVLEČEK

Laserski sledilniki so zelo natančni merilni sistemi, ki na osnovi interferometričnega ali preciznega absolutnega načina elektronsko izmerijo razdaljo, s pomočjo optično elektronskih enkoderjev pa prostorsko smer. Instrumenti imajo vgrajen mehanizem za usmerjanje žarka, ki sledi premikajoči se tarči. Meritve kotov in razdalje do tarče se uporabijo za izračun koordinate tarče v koordinatnem sistemu instrumenta. V diplomski nalogi so opisani sestavni deli laserskega sledilnika, njegovo delovanje, vplivi na natančnost meritev, določanje natančnosti, standardi za preizkuse, primerjava laserskih sledilnikov s tahimetri in ponudba teh instrumentov na trgu.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 528.5:681.783.2(043.2)
- Author:** Saša Matijević
- Supervisor:** Assoc. Prof. Dušan Kogoj, Ph. D.
- Title:** Control of laser trackers instrumental errors and comparison with tachymetres
- Document type:** Graduation Thesis – Higher professional studies
- Notes:** 69 p., 14 tab., 44 fig., 14 eq.
- Key words:** Laser Tracker, tachymetres, SMR, accuracy, coordinates, interferometer, Electro-optical distance meter, Leica, Faro, standard, ASME B89.4.19, ISO 10360-10, ISO 17123-3:2001, ISO 17123-4:2012, ISO 17123-5:2012

ABSTRACT

Laser trackers are very precise measuring systems which measure distance with interferometric or precise electronic absolute method, using electronic optical encoders they measure the spatial direction. The instruments have a built-in mechanism for directing a beam that follows the moving target. Measurements of angles and distances to the target are used to calculate the coordinates of the target in coordinate system of the instrument. This graduation thesis describes the components of the laser tracker, its performance, influences on the accuracy of measurements, determining the accuracy, standards for testing, comparison of laser trackers with tachymetres, the scope and a review of the market.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Dušanu Kogoju, družini in prijateljem za vso podporo in vse vzpodbudne besede tekom študija.

KAZALO VSEBINE

Errata	I
Izjave	III
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	IV
Bibliographic – documentalistic information	V
Zahvala	VII
1 UVOD	1
2 LASERSKI SLEDILNIK	2
2.1 Zgodovina	2
2.2 Princip delovanja	3
2.3 Področja uporabe	6
3 SESTAVNI DELI LASERSKEGA SLEDILNIKA	7
3.1 Enota za merjenje dolžin	7
3.1.1 Interferometer	7
3.1.1.1 Homodinski interferometer	9
3.1.1.1 Heterodinski interferometer	10
3.1.2 Drugi načini merjenja dolžin – elektrooptični razdaljemer	11
3.1.2.1 Impulzni način	12
3.1.2.2 Fazni način	14
3.2 Mehanizem za usmerjanje žarka (ang. Beam Steering Mechanism)	19
3.3 Položajno občutljiv senzor (angl. Position Sensitive Detector)	21
3.3.1 Segmentna PSD	22
3.3.2 Lateralno-fotoefektivna PSD	22
3.3.3 Fotovoltaični in fotokondukcijski način	233
3.4 Merske tarče	23
3.4.1 Sferni (krogelni) reflektorji	23
3.4.2 Površinsko-točkovna tarča	25
4 POGREŠKI IN NATANČNOST	26
4.1 Pogreški laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri	26
4.1.1 Pogreški v odvisnosti od interferometra in merske optike	27
4.1.1.1 Vrste vplivov	27
4.1.1.2 Vplivi delovnega okolja	28

4.1.1.3	Vpliv vgradnje in kalibracije	29
4.1.2	Pogreški v odvisnosti od mehanizma za usmerjanje žarka	30
4.1.3	Pogreški v odvisnosti od položajno občutljivega senzorja	31
4.1.4	Pogreški v odvisnosti od merske tarče	31
4.1.5	Pogreški v odvisnosti od kotnih enkoderjev	32
4.2	Natančnost meritev z laserskimi sledilniki	33
4.2.2	Natančnost merjenja dolžin	34
4.2.3	Natančnost merjenja kotov	35
4.2.4	Primerjava natančnosti merjenja kotov in dolžin	36
4.2.5	Volumetrična natančnost	36
5	STANDARDI ZA PREIZKUS NATANČNOSTI IN PODAJANJE NATANČNOSTI MERJENIH KOLIČIN	38
5.1	Standard ASME B89.4.19	38
5.2	Standard VDI/VDE 2617 Blat 10	39
5.3	Standard ISO 10360-10	40
5.3.1	Merjenje velikosti in oblike sfernega etalona	42
5.3.2	Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah	43
5.3.3	Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona	44
5.3.4	Predstavitev rezultatov preizkusov	50
6	STANDRADI ZA PREIZKUS ELEKTRONSKIH TAHIMETROV	56
7	PRIMERJAVA TEHNIČNIH LASTNOSTI LASERSKIH SLEDILNIKOV IN ELEKTRONSKIH TAHIMETROV	59
8	PREGLED TRGA	60
8.1	FARO Technologies Inc.	61
8.2	Leica Geosystems	60
8.3	Automated Precision Inc.	62
9	ZAKLJUČEK	63
	VIRI	65

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Geometrija merske baze in vrsta tarč pri merjenju sfernega etalona	43
Preglednica 2:	Značilnosti merske baze pri merjenju v dveh krožnih legah	43
Preglednica 3:	Merski položaji dolžinskega etalona	46
Preglednica 4:	Položaji etalona za dodatna merjenja	47
Preglednica 5:	Dopustne najkrajše in najdaljše testne dolžine vzdolž merskih linij sestava na Sliki 37	50
Preglednica 6:	Predlagana vsebina obrazca, ki naj vsebuje splošne tehnične lastnosti in delovne pogoje	51
Preglednica 7:	Obrazec, ki vsebuje podatke proizvajalca o merski zmogljivosti in rezultatih preizkusov	52
Preglednica 8:	Primer preglednice za zapis rezultatov preizkusa laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona	53
Preglednica 9:	Primerjava tehničnih lastnosti laserskih sledilnikov in elektronskih tahimetrov	59
Preglednica 10:	Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika	61
Preglednica 11:	Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika	60
Preglednica 12:	Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika	62
Preglednica 13:	Povzetek in primerjava standardov za preizkus laserskih sledilnikov	63
Preglednica 14:	Primerjava števila meritev pri standardih za preizkus elektronskega tahimetra	64

KAZALO SLIK

Slika 1:	Skica Greenleafovega površinskega merskega sistema	2
Slika 2:	Lauov laserski sledilnik iz leta 1987	3
Slika 3:	Shematski prikaz laserskega sledilnika z glavnimi sestavnimi deli	3
Slika 4:	Merjenje z laserskim sledilnikom, dva kota in dolžina	4
Slika 5:	Shematski prikaz sledenja tarči	5
Slika 6:	Princip delovanja Michelsonovega interferometera	8
Slika 7:	Svetlobni kolobarji z označeno valovno dolžino izvirne svetlobe	9
Slika 8:	Princip delovanja homodinskega laserskega interferometra	10
Slika 9:	Princip delovanja heterodinskega laserskega interferometra	11
Slika 10:	Osnovni princip delovanja impulznih razdaljemerov	12
Slika 11:	Frekvenca nosilnega vala (impulza) se spreminja linearno s časom	13
Slika 12:	Osnovni princip merjenja dolžine pri faznih razdaljemerih	15
Slika 13:	Dolžina je vsota večkratnika enote in ostanka	16
Slika 14:	Princip meritev dolžine pri faznem načinu s kompenzacijskim postopkom določitve celega števila valov na osnovi zveznega spreminjanja merske frekvence svetlobnega valovanja in enačbe za izračun dolžine	17
Slika 15:	Fina meritev merskega valovanja ("Wobble" merjenje)	18
Slika 16:	Shematski prikaz sferega mehanizma	19
Slika 17:	"Laser Tracer" – shematski prikaz	20
Slika 18:	Tipi senzorjev za optično zaznavanje položaja	21
Slika 19:	a) prostoizračni tip, b) kotna prizma, c) "mačje oko"	23
Slika 20:	SMR (Spherically Mounted Retroreflector), kotna prizma	24
Slika 21:	Merska tarča "mačje oko"	24
Slika 22:	FARO površinsko-točkovna tarča	25
Slika 23:	Pogreški pri vgradnji interferometra	30
Slika 24:	Primer podatkov o natančnosti: kotna levo in dolžinska desno	34
Slika 25:	Merjenje dolžine v smeri točk	35
Slika 26:	Odkloni (prečno odstopanje) pri merjenju kotov	35
Slika 27:	Primerjave kotne in dolžinske natančnosti	36
Slika 28:	Primer postavitve pri večjem številu stojišč, volumetrična natančnost	37
Slika 29:	Merjenje dolžin, postavljenih v različne smeri	39
Slika 30:	25 točk, enakomerno razporejenih po polovici sfernega etalona	42
Slika 31:	Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah	44
Slika 32:	Dolžinski etalon proizvajalca Brunson	45
Slika 33:	Različna položaja postavitve dolžinskega etalona	45

Slika 34:	Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona	45
Slika 35:	Različne postavitve etalona pri preizkusu	47
Slika 36:	Položaji meritev, prevzeti iz standarda VDI/VDE 2617 Blat 10	49
Slika 37:	Sestav iz aneksa D standarda ISO10360-10, ki je alternativa sestavu na Sliki 36	50
Slika 38:	Rezultati uspešno opravljenega preizkusa merjenja dolžine	53
Slika 39:	Rezultati uspešno opravljenega preizkusa merjenja dolžinskega etalona	54
Slika 40:	Rezultati uspešno opravljenega preizkusa določitve položaja v dveh krožnih legah	54
Slika 41:	Rezultati neuspešno opravljenega preizkusa določitve položaja v dveh krožnih legah	55
Slika 42:	Merski bazi za določitev praktične natančnosti teodolita	56
Slika 43:	Merska baza za določitev praktične natančnosti razdaljemera	57
Slika 44:	Skica merske baze za določitev praktične natančnosti tahimetra	58

Ta stran je namenoma prazna.

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Danes je veliko naprav zmožnih merjenja koordinat. Razlikujejo se po natančnosti, načinu in metodi merjenja, prenosnosti itd. V velikem številu industrijskih panog, vključno z avtomobilsko, letalsko in vesoljsko industrijo, je potrebno čim natančneje izmeriti tridimenzionalne podatke (koordinate) oz. značilnosti velikih objektov. Vse bolj uveljavljena naprava za merjenje tridimenzionalnih koordinat je vsestranski laserski sledilnik, prvič predstavljen v poznih osemdesetih letih 20. stoletja. Pred pojavom laserskih sledilnikov so se merjenja koordinat opravljala s koordinatnimi merilnimi stroji, na geodetski način pa s teodoliti, tahimetri in fotogrametričnimi meritvami.

Laserski sledilnik odlikuje visoka natančnost, hitrost in enostavnost uporabe. Kot pove že ime, laserski sledilnik z uporabo laserske svetlobe meri tridimenzionalne koordinate s sledenjem premikajoči se merski tarči, ki je v stiku z merjenim objektom. Laserski sledilnik lahko izmeri koordinate objekta na zelo kratki razdalji in vse do cca. 60 m z mikronsko natančnostjo. Kako laserski sledilniki dosegajo tako visoko natančnost, je opisano v nadaljevanju z razlago načina delovanja, sestave sistema, pripomočkov, načina preizkusov ter vseh zunanjih in notranjih vplivov na natančnost meritev.

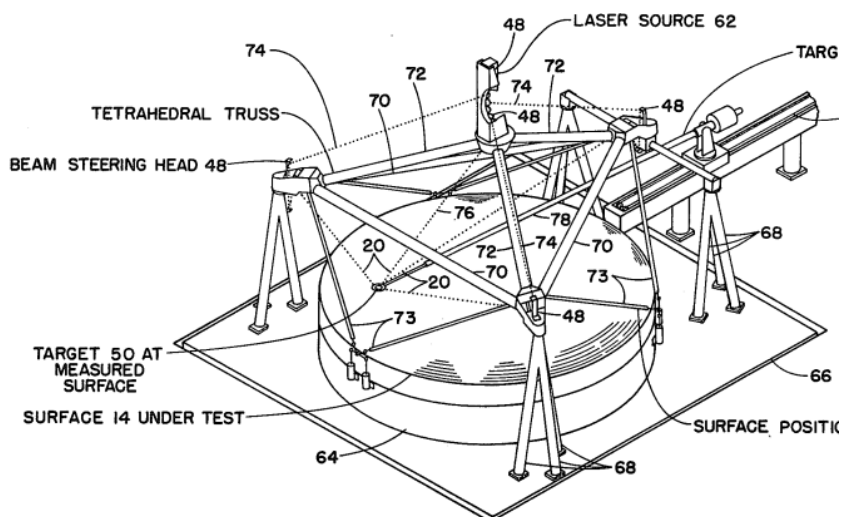
Konstrukcija laserskega sledilnika, princip delovanja in značilnosti merskih vrednosti so v marsičem enake kot pri tahimetrih, klasičnih geodetskih instrumentih. Tudi tehnologija je pri obeh sistemih vse bolj podobna. Zato se zdi primerjava laserskih sledilnikov s sodobnimi tahimetri zelo naravna oz. nujna. Razumevanje laserskih sledilnikov na geodetski način bo zato veliko enostavnejše.

2 LASERSKI SLEDILNIK

Laserski sledilnik je s svojo visoko natančnostjo, prenosljivostjo in prilagodljivostjo uporaben za vrsto kompleksnih nalog na različnih delovnih področjih. Za lažje razumevanje delovanja laserskega sledilnika so v nadaljevanju na kratko opisani: zgodovina razvoja, princip delovanja laserskih sledilnikov in področja uporabe.

2.1 Zgodovina

Prvi laserski sledilniki, ki so se uporabljali za sledenje raket in letal, so bili izdelani leta 1960. Leta 1980 je Allen Greenleaf iz podjetja Itek Systems Optical predstavil površinsko profilni merski sistem, ki je sestavljen iz štirih interferometrov in sledilnega sistema (www.nist.gov).



Slika 1: Skica Greenleafovega površinskega merskega sistema (Patent, Greenleaf in sod., 1981)

Leta 1986 je Kam Lau posodobil Greenleafov sistem, tako da mu je dodal enkoderje za merjenje horizontalnih in vertikalnih kotov. Kombinacija enkoderjev in interferometra je naredila napravo prenosno, vendar je vseeno ohranila sposobnost merjenja koordinat z visoko natančnostjo. Leta 1994 se v laserskih sledilnikih pojavijo CCD-senzorji. Senzorji se uporabljajo za natančnejše sledenje tarči, za merjenje več tarč hkrati itd. V letu 2000 je bila opravljena raziskava o natančnosti meritev z laserskimi sledilniki. Natančnost so preizkušali po metodi sekvenčne multilateracije.



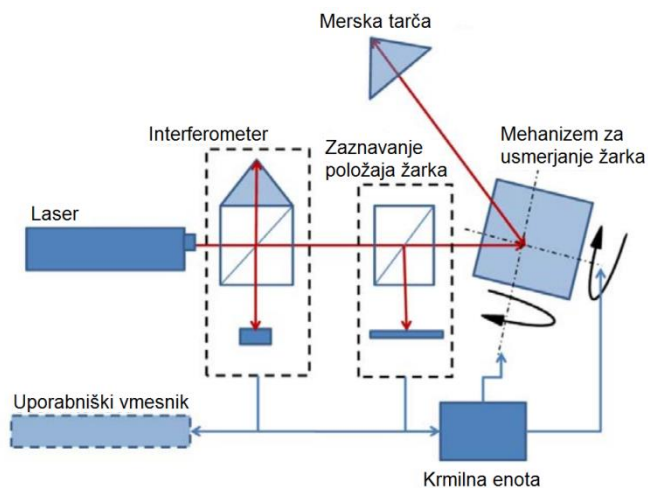
Slika 2: Lauov laserski sledilnik iz leta 1987 (www.nist.gov)

Razvoj sistemov za merjenje dolžin se je dotaknil tudi področja laserskih sledilnikov. Tako lahko danes najdemo v laserski sledilnikih interferometre, precizne absolutne razdaljemere, impulzne razdaljemere in kombinacijo omenjenih naprav.

2.2 Princip delovanja

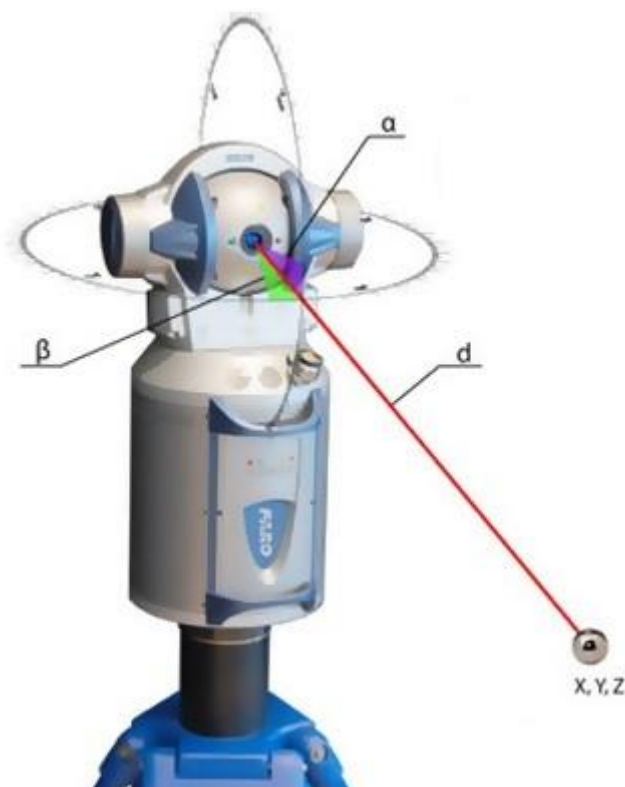
Običajni laserski sledilnik je sestavljen iz naslednjih glavnih sestavnih delov (Gallagher, 2003):

- enote za merjenje dolžin,
- mehanizma za usmerjanje žarka s kotnimi enkoderji,
- položajno občutljive diode,
- merske tarče,
- enote za upravljanje,
- programske opreme.



Slika 3: Shematski prikaz laserskega sledilnika z glavnimi sestavnimi deli (opticalengineering.spiedigitallibrary.org)

Z operativnega vidika je delovanje laserskega sledilnika lahko razumljivo, saj meri dva kota in dolžino.

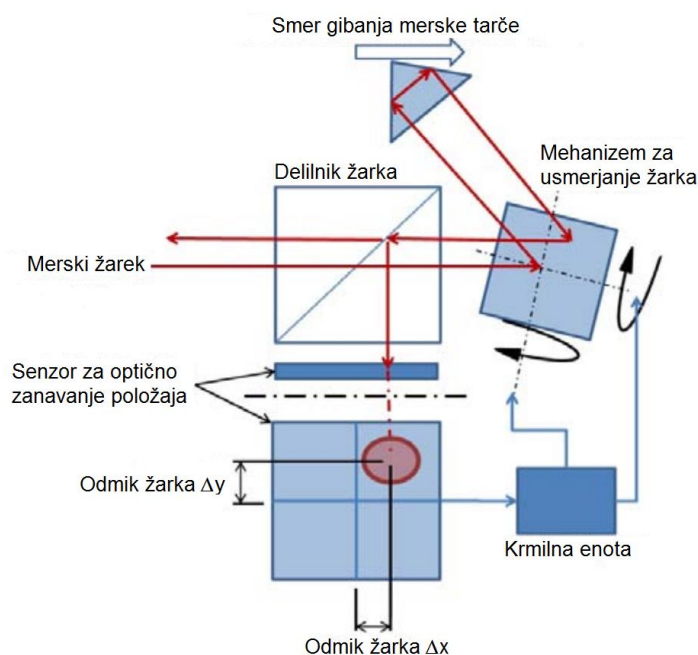


Slika 4: Merjenje z laserskim sledilnikom, dva kota in dolžina (www.faro.com)

Laserski sledilniki merijo dolžino, odvisno od izvedbe sledilnika, na enega ali dva načina, in sicer z interferometri in/ali preciznimi absolutnimi razdaljemerji. Pri merjenju z interferometri se primarni žarek razdeli na merski in referenčni žarek. Nato merski žarek potuje do merske tarče in nazaj. Po vrnitvi od tarče merski žarek interferira z referenčnim žarkom, ta interferenca pa se uporabi za določitev spremembe dolžine do tarče. Merski žarek usmeri proti tarči mehanizem za usmerjanje žarka s pomočjo zrcala. Da je zrcalo zmožno odbiti oz. usmeriti merski žarek od izvora proti tarči, mora imeti možnost vrtenja okoli dveh osi. Tarča odbije merski žarek nazaj proti zrcalu, ki pa žarek odbije naprej proti merskemu senzorju ali prvemu polpropustnemu zrcalu. Če se merski žarek ne vrne v pravilni smeri, to je proti prvemu polpropustnemu zrcalu, interferometer ne more določiti spremembe v dolžini. Ker pa interferometer lahko zazna samo spremembo dolžine med dvema točkama, je potrebno zagotoviti, da se odbiti merski žarek vedno vrne v pravilni smeri. Prekinitev laserskega žarka pomeni prekinitev merjenja.

Ključni koncept delovanja laserskega sledilnika je ta, da se mora merski žarek vrniti na sprejemni sistem instrumenta brez večjih motenj ali zamikov. Premikajočo se tarčo je

potrebno slediti. Sledenje deluje na principu zmanjševanja merjene razlike prostorske smeri med primarnim in odbitim merskim žarkom.



Slika 5: Shematski prikaz sledenja tarči (opticalengineering.spiedigitallibrary.org)

To razliko meri instrument s pomočjo položajno občutljive diode (Positioning Sensitive Diode – PSD) ali CMOS-senzorja. PSD ima štiri elektrode, na vsaki se pojavi fotonapetost, njena velikost je odvisna od oddaljenosti elektrode od središča vpadlega merskega žarka. Fotonapetost na elektrodah je nato ojačana. Na osnovi velikosti napetosti na štirih elektrodah se določi položaj središča žarka na aktivnem območju PSD. Če je sistem kalibriran tako, da se odbiti žarek vrne točno v središče PSD, je izmerjeno odstopanje od središča PSD. Podatek se uporabi za usmerjanje žarka z vrtenjem mehanizma za usmerjanje žarka. Odbiti žarek se tako usmeri točno v središče PSD, obenem pa se tudi primarni merski žarek usmeri točno v sredino tarče. Če krmilni sistem to počne nepretrgoma, pomeni, da ob premikanju zvezno sledi tarči in prav to slednje omogoča merjenje dolžin na interferenčni način.

Koordinate tarče oz. merjene točke so določene na podlagi relativnih prostorskih polarnih koordinat – odčitkov na kotnih enkoderjih, in interferenčno merjenje dolžine. Izmerjena dolžina se nanaša na izhodiščni položaj reflektorja oz. tarče (Home Position).

Laserski sledilniki zbirajo tridimenzionalne podatke oz. koordinate merskih točk, ki jih nato s pomočjo programske opreme pripišejo geometrijskim objektom kot so točke, ravnine, krogle, valji itd. Običajno so podatki prikazani v lokalnem koordinatnem sistemu, vezani na merjeni objekt. Ravna površina objekta lahko predstavlja XY ravnino. Druga možnost je ta, da se koordinatni sistem vzpostavi glede na linije in točke merjenega objekta.

Včasih je potrebno merjenje izvesti z večih stojišč. S tem lahko zajamemo vse točke na objektu, ki jih želimo izmeriti. Posamezna stojišča povežemo v lokalno izhodiščno mrežo. Koordinate stojišč in orientacije sledilnika na posameznem stojišču so osnova, da instrument vse meritve samodejno transformira v prvotni lokalni koordinatni sistem.

2.3 Področja uporabe

Laserski sledilniki se zaradi vsestranskosti uporabljajo na vseh področjih meroslovja (Ačko, 2011):

Zakonsko meroslovje ureja področje točnosti meritev, ki vplivajo na transparentnost pri prometu z blagom in s storitvami ter na zdravje in varnost. Glavne naloge so: definiranje področij uporabe in vrst zakonskih meril, vzpostavitev zakonskih določil za uporabo takšnih meril ter nadzor nad merili med uporabo.

Znanstveno meroslovje se ukvarja z organizacijo in razvojem etalonov ter njihovim vzdrževanjem na najvišji ravni. Naloga znanstvenega meroslovja je tudi razvoj merilnih metod in instrumentov.

Industrijsko meroslovje zagotavlja ustrezno in pravilno uporabo merilnih instrumentov v industriji, strojništvu, gradbeništvu itd. (v proizvodnih, kontrolnih in preskusnih procesih). Glavne naloge so: izbira merilnih instrumentov, razvoj merilnih postopkov, zagotavljanje ustreznih merilnih pogojev, umerjanje, vzdrževanje merilnih instrumentov in usposabljanje kadra za meritve.

"Znanstveno in industrijsko meroslovje je smiselno obravnavati skupaj, saj industrijsko meroslovje nujno potrebuje podporo znanstvenega za zagotavljanje mednarodne primerljivosti meritev na najvišji točnostni ravni. Seveda pa iz istega razloga tudi zakonsko potrebuje podporo znanstvenega, vendar je zveza tu manj očitna, saj se zakonsko meroslovje ne ukvarja z meroslovno problematiko na najvišji točnostni ravni, ampak je poudarek na zakonsko-formalnih ureditvah, ki omogočajo državni, regijski ali mednarodni nadzor nad določenimi vrstami meritev." (Močnik, 2010)

3 SESTAVNI DELI LASERSKEGA SLEDILNIKA

Laserski sledilnik trenutno velja za eno od najnatančnejših naprav za merjenje koordinat, zato je treba ne glede na njegovo v osnovi enostavno uporabo in enostaven princip delovanja poznati njegove sestavne dele in pribor. Z njimi povezujemo prednosti, slabosti, omejitve in zmogljivosti laserskega sledilnika. V naslednjih poglavjih so opisani sestavni deli laserskega sledilnika, razdeljeni v glavne skupine (glej poglavje 2.2).

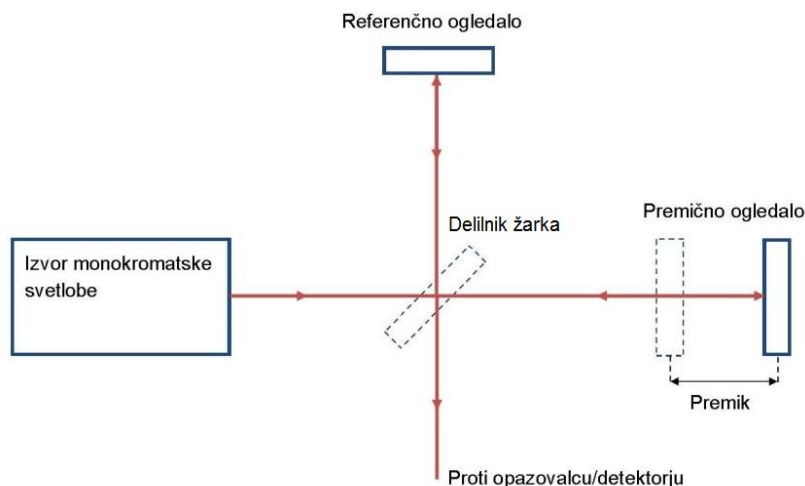
3.1 Enota za merjenje dolžin

Enota za merjenje dolžin je ena od najpomembnejših sestavnih komponent laserskih sledilnikov. Ti so svoj sloves pridobili ravno na račun omenjene enote, saj gre za najbolj natančno mersko komponento. V geodeziji in širše v meroslovju je merjenje dolžin vedno predstavljalo velik izziv. Z izumom interferometra in drugih elektrooptičnih razdaljemerov se je področje merjenja dolžin začelo bliskovito razvijati. Vsi laserski sledilniki za najnatančnejše meritve že od izuma uporabljajo za merjenje dolžin interferometer. So se pa v zadnjih letih pojavili laserski sledilniki, ki uporabljajo kombinacijo faznih ali impulznih razdaljemerov, skupaj z interferometričnim načinom merjenja dolžin ali celo kot samostojni sistem za merjenje dolžin.

3.1.1 Interferometer

Dolžinski interferometer, ki ga je leta 1881 predstavil Albert Michelson, se je razvil v merilni instrument z visoko natančnostjo. Ker gre pri interferometriji za merjenje, ki temelji na interferenci svetlobe, na njeno natančnost vplivata le valovna dolžina svetlobnega vira in medija, v katerem meritev poteka. Michelsonov interferometer je prikazan v shemi na Sliki 6.

Monokromatska svetloba je usmerjena na polpropustno ogledalo, ki deluje kot amplitudni delilnik svetlobnega žarka. Del svetlobe potuje proti premičnemu ogledalu in se v njem odbije nazaj v smeri izvora. Drugi del svetlobe se odbije pri 90° v smeri referenčnega ogledala, kjer se še enkrat odbije in se v cepilcu žarka znova združi s prvim delom, tam pa se nato opazuje oz. zaznava njuna interferenca.



Slika 6: Princip delovanja Michelsonovega interferometra (lastni vir)

Če je valovna dolžina svetlobnega vira znana, lahko dolžino premika ogledala izračunamo iz spremembe intenzivnosti na detektorju. Iz tega je razvidno, da gre za relativno meritev, saj je možno izmeriti samo premik in ne razdalje. Od izuma interferometra je Michelsonov interferometer doživel številne različice, vse pa delujejo na principu merjenja premika z uporabo svetlobne interference. Sodobni interferometri uporabljajo za merjenje premika kot vir svetlobe helij-neonov (HeNe) laser zaradi koherence žarka na dolge dolžine in relativno kratke vidne valovne dolžine. Laserske interferometre delimo v dve vrsti glede na način zaznavanja in delitev žarka, in sicer v homodinske in heterodinske interferometre.

Prednosti interferetrov:

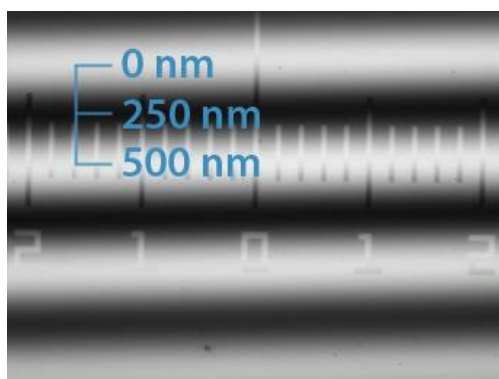
- najnatančnejši način merjenja dolžin,
- merjenje dolžin z največjo ločljivostjo.

Slabosti interferenčnih razdaljemerov:

- postopek meritev je zelo zahteven in zato potrebujemo drag instrumentarij in pribor,
- merjenje dolžine je mogoče le, če je zagotovljen kontinuiran premik merske prizme od začetne do končne točke,
- smiselno je meriti dolžine le do 50 m, zato se jih uporablja le v specializiranih sistemih – laserski sledilnik, laboratorij ... (Kogoj, 2002).

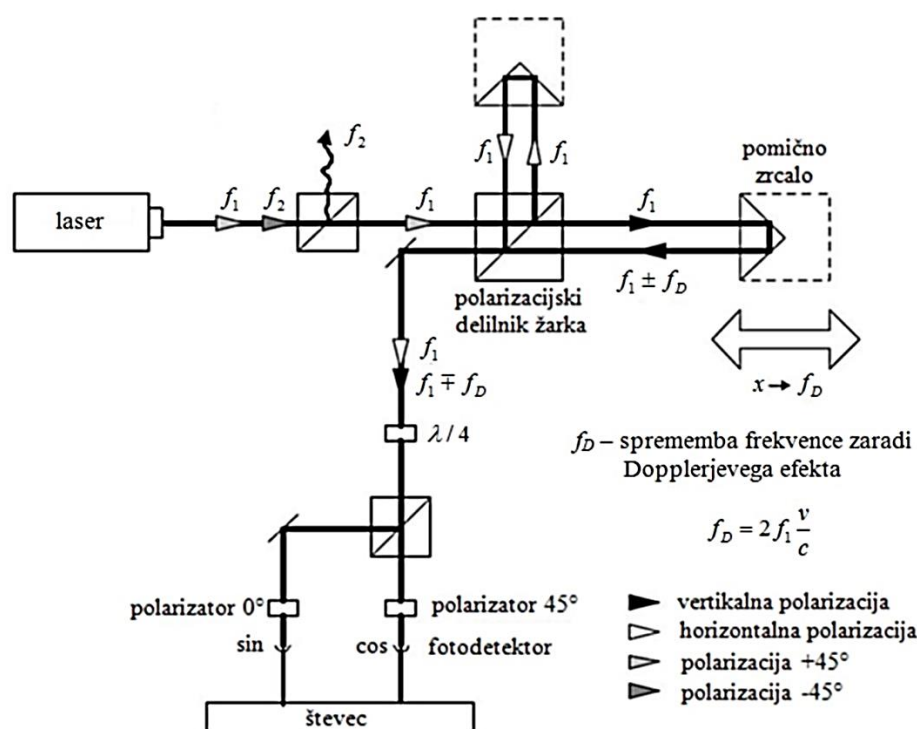
3.1.1.1 Homodinski interferometer

Večina komercialnih homodinskih laserskih interferometrov je sestavljenih iz stabilnega enofrekvenčnega laserskega vira svetlobe, polarizacijske optike, fotodetektorjev in merske elektronike. Vir svetlobe v homodinskem interferometru je ponavadi HeNe-laser z enofrekvenčnim žarkom, ki se kot izhodni žarek sestoji iz ene polarizacije pod kotom 45° ali krožno polariziranega žarka. Izhodni žarek je razdeljen na referenčni in merski žarek v interferometru s cepilcem žarka. Po odboju od tarče se žarka znova združita v cepilcu žarka. Pogoj za uspešno opazovanje interference žarkov je, da imata žarka enako polarizacijo. To dosežemo z uporabo linearnega polarizatorja, usmerjenega pod kotom 45° glede na delilnik žarka. Združena žarka tečeta kot signal skozi fotodetektor, nameščen v merski elektroniki, ki šteje svetlobne kolobarje interference žarkov. En svetlobni kolobar predstavlja eno spremembo intenzivnosti svetlobe pri interferenci žarkov od maksimuma (svetlo) do minimuma (temno) in nazaj do maksimuma, kar predstavlja spremembo premika za polovico valovne dolžine vira svetlobe. Ker v tem primeru ne obstaja bistvena časovna odvisnost merskega in referenčnega žarka, se ta tip interferometra imenuje tudi DC (enosmerni) interferometer.



Slika 7: Svetlobni kolobarji z označeno valovno dolžino izvirne svetlobe
(www.omniscan.co.uk/optical-profiler)

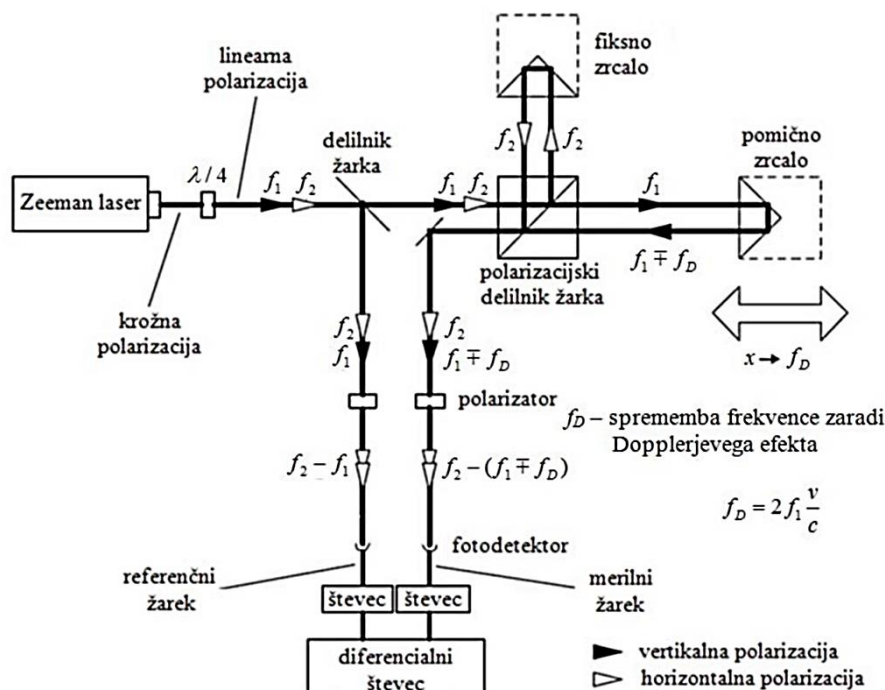
Na Sliki 8 je prikazan način delovanja homodinskega interferometra. Če sta oba žarka drug proti drugemu idealno naravnana, se svetlobni kolobar pojavi kot idealni krog, če pa se pojavi polarizacijsko mešanje žarkov, pride do periodičnih odstopanj, ki so prisotna v merskem signalu, kar ima za posledico svetlobni kolobar v obliki elipse. Tudi različne ojačitve in šum žarka v obeh detektorjih se odražajo v obliki elipse. Heydemann je predstavil metodo za preoblikovanje elipse, kot posledico periodičnega odstopanja, v krog s pravilno konfiguracijo detektorjev, smeri zaznavanja in neobčutljivosti na spremembe intenzitete svetlobe. S tem je pripomogel k zmanjšanju vpliva periodičnih odstopanj na rezultate meritev.



Slika 8: Princip delovanja homodinskega laserskega interferometra (Močnik, 2010)

3.1.1.2 Heterodinski interferometer

Vir svetlobe v heterodinskem in homodinskem interferometru je HeNe-laser s stabilnim žarkom. Glavna razlika med tema načinoma interferometrije je, da heterodinski interferometer uporablja pri meritvi dve frekvenci, kar posledično pripelje do razlike v frekvenci merskega in referenčnega žarka. Razlika frekvenc med merilnim in referenčnim žarkom predstavlja rezultat meritve. Dve frekvenci oz. frekvenčni zamik so lahko generirani z Zeemanovim laserjem. Zeemanov način generiranja frekvenčnega zamika uporablja magnetno polje, usmerjeno vzdolž osi cevi ohišja laserja. Drugi način generiranja dveh frekvenc pa uporablja akustično-optični modulator, npr. Braggovo celico, ki jo poganja kvarčni oscilator. Z Zeemanovo tehniko je frekvenčni zamik omejen z najvišjo vrednostjo ± 4 MHz, pri akustično-optičnem modulatorju je ta vrednost višja, in sicer 20 MHz ali več. V heterodinskem interferometru sta polarizaciji žarka pravokotni ena na drugo. " Heterodinska metoda poda pravilen rezultat le v primeru, če f_D ne presega razlike frekvenc laserja $f_2 - f_1$. V praksi znaša ta razlika v odvisnosti od Zeemanovega efekta približno 1 MHz. Naslednja slabost heterodinske metode je tudi, da za meritev potrebujemo dve frekvenci, medtem ko pri homodinski drugo frekvenco lahko uporabimo npr. za merjenje v drugi osi." (Močnik, 2010)



Slika 9: Princip delovanja heterodinskega laserskega interferometra (Močnik, 2010)

3.1.2 Drugi načini merjenja dolžin – elektrooptični razdaljemer

Vse laserske sledilnike povezujemo z visoko natančnostjo meritev. Z razvojem ostalih tipov elektrooptičnih razdaljemerov (EOR) se je razvijala oz. povečevala tudi natančnost merjenja dolžin z EOR. Interferometer še vedno ostaja način za najnatančnejše merjenje dolžin, ker pa gre posledično za zapleten in cenovno zelo drag sistem, so proizvajalci laserskih sledilnikov začeli zamenjevati interferometre s faznimi oz. impulznimi razdaljemerji ali kombinirati dolžinske interferometre in fazne oz. impulzne razdaljemerje, saj v določenih okoliščinah ne potrebujemo tako natančnih sistemov. Za najnatančnejše aplikacije se še vedno uporabljajo laserski sledilniki, ki imajo samo dolžinski interferometer.

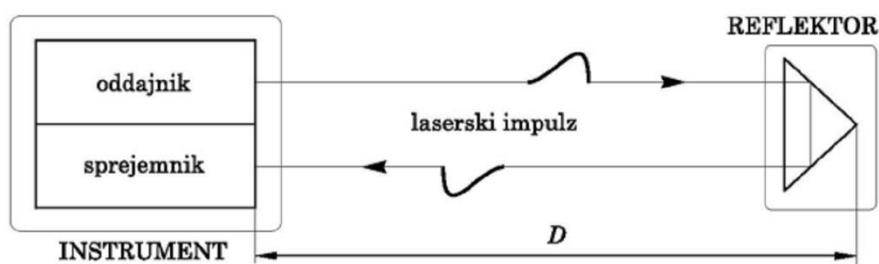
Ena od že omenjenih slabosti interferometričnih meritev dolžine je, da so vse meritve relativne, to pomeni, da ne merimo absolutne razdalje od laserskega sledilnika do tarče, ampak relativni premik med njima in nato naprej do naslednje točke. Če se med meritvijo zgodi prekinitev merskega žarka, je potrebno meritev ponoviti. Da bi se izognili nevšečnostim ob prekinitvi žarka (pot nazaj na Home-točko na laserskem sledilniku), so proizvajalci razvili sistem, kjer se ob prekinitvi pri meritvi z interferometrom razdalja med laserskim sledilnikom in tarčo izmeri z drugo enoto EOR in nato ponovno nadaljuje z interferometrom. Komercialno imenujejo ta način meritev absolutni interferometer (AIFM). Ker način delovanja interferometra ne dopušča merjenja absolutnih dolžin, se za imenom skriva sistem, ki za ponastavitev Home-točke ob prekinitvi žarka uporabi fazni ali impulzni razdaljemer in nato

interferometer za vse nadaljnje meritve. Ker imajo ostali elektrooptični razdaljermi slabšo natančnost kot interferometer, je temu primerno določena tudi zmogljivost sistema. Se je pa z razvojem laserskih sledilnikov razvijalo tudi področje absolutne interferometrije. Sistem, ki je preklapljal med interferometrom in drugo enoto EOR, je nasledil sistem, ki hkrati uporablja interferometer in fazni način z kompenzacijskim postopkom določitve celega števila valov na osnovi zveznega spreminjanja merske frekvence svetlobnega valovanja. Pri nekaterih proizvajalcih pa so sistem nasledili zmogljivi interferometrom podobnimi instrumenti za absolutno merjenje dolžin (ADM).

3.1.2.1 Impulzni način

Osnovni način merjenja z impulznimi razdaljermi je od vseh načinov merjenja dolžin najpreprostejši. Temelji na direktnem merjenju časa, ki ga svetlobni impulz potrebuje, da prepotuje razdaljo od razdaljermera do reflektorja in nazaj. (Kogoj, 2002)

Impulzni razdaljermi so svoje ime dobili po obliki svetlobnega žarka, s katerim merijo dolžino. Sistem izvora svetlobe v instrumentu generira prekinjeno svetlobno valovanje v obliki svetlobnih impulzov. Svetlobni impulz je zelo kratek svetlobni sunek pravokotne ali trikotne oblike. Čas trajanja impulza je približno 10 ns, kar pomeni, da je njegova dolžina približno 3 m. (Kogoj, 2002)



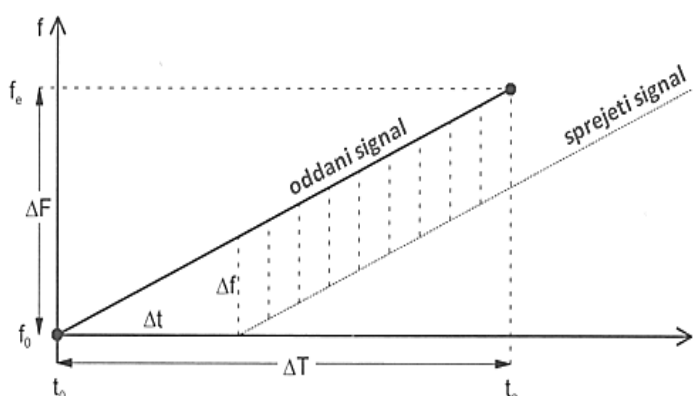
Slika 10: Osnovni princip delovanja impulznih razdaljermov (Kogoj, 2002)

Ob poznani hitrosti svetlobe je izračun dolžine enostaven. Svetlobni impulz zato, da dvakrat preteče merjeno razdaljo, potrebuje čas Δt . Instrument ta čas izmeri direktno. Ker je Δt pomembna količina za določitev merjenja razdalje, nas zanima, s kakšno natančnostjo je potrebno določiti ta časovni interval. (Kogoj, 2011)

$$\text{dolžina: } D = \frac{c * \Delta t}{2} \rightarrow \text{izrazimo } \Delta t: \Delta t = \frac{2D}{c} \rightarrow \text{standardni odklon } \Delta t: \sigma_{\Delta t} = \frac{2}{c} * \sigma_D$$

Iz enačb je razvidno, da natančnost določitve Δt ni odvisna od velikosti dolžine, ampak od tega, kako natančno želimo določiti dolžino. "V primeru, da hočemo dolžino določiti z natančnostjo ± 5 mm, moramo Δt določiti z natančnostjo ± 0.033 ns." (Skakić, 2007) Zaradi nezadostne natančnosti merjenja Δt , se impulzni razdaljermi niso uveljavili vse do devetdesetih let 20. stoletja.

Drugi način merjenja dolžine, ki temelji na impulznem načinu, je postopek z linearno frekvenčno modulacijo, tako imenovano "Chirp" modulacijo. Tu se frekvenca impulza oziroma nosilnega valovanja f_N linearno spreminja glede na čas (Joeckel in sod., 2008).



Slika 11: Frekvenca nosilnega vala (impulza) se spreminja linearno s časom (Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16)

Generira se impulz z veliko dolžino in časovnim trajanjem ΔT , ki ima na začetni točki merjenja časa t_0 frekvenco f_0 in na končni točki merjenja časa t_e frekvenco f_e . Od reflektorja odbiti impulz nato potuje nazaj v instrument. Odhodni referenčni in merilni signal pokazeta razliko frekvence Δf . Iz Δf lahko izračunamo čas potovanja impulza Δt (Zabret, 2014):

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{\Delta F} \Delta f; \quad \Delta T = t_e - t_0; \quad \Delta F = f_e - f_0$$

Iskano dolžino pa dobimo z enačbo:

$$D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta F} \Delta f$$

Doseg pri tem načinu merjenja ne predstavlja nikakršnega problema. Teoretično je možno doseči merjenje razdalj na več kot 100 km (Laser radar). Če pa hočemo, da prevladuje ločljivost, je v potrebno doseg omejiti. Kljub temu so pri natančnih meritvah še vedno mogoče razdalje do 100 m. Ločljivost je pri tem načinu občutno slabša kot pri klasični laserski interferometriji – le 0,01 mm. Vendar za večino uporabe v industrijski merski tehniki to

zadošča. Metoda s stališča hitrosti razvoja predstavlja velik potencial (Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16).

3.1.2.2 Fazni način

Način delovanja faznih razdaljemerov temelji na moduliranem elektromagnetnem valovanju. Modulacija je združitev dveh ali več valovanj iste vrste. Združujemo dve elektromagnetni valovanji, ki se lahko ujemata v fazi ali frekvenci, lahko pa sta oba elementa različna. Modulacija pomeni spremembo valovanj v času in prostoru.

Pri faznih razdaljemerih združujemo dve valovanji, in sicer (Kogoj, 2002):

- nosilno valovanje
Svetilo (luminiscenčna dioda, laser ali laserska dioda – včasih termična in plinska svetila) je izvor elektromagnetnega valovanja zelo visokih frekvenc (~ 10 GHz) f_N . To valovanje zagotavlja premočrnost širjenja v atmosferi. Govorimo o nosilnem valovanju oziroma nosilcu informacijske faze (kot merski trak brez označene razdelbe). Doseg instrumenta, hitrost valovanja in absorpcija svetlobe so odvisni od lastnosti širjenja nosilnega valovanja.

- mersko valovanje
Nosilno valovanje je modulirano z merskim, katerega izvor je kvarčni (kremenov) kristal. Kvarčni kristal generira modulacijsko (mersko) frekvenco f_M , ki je bistveno nižja od f_N . Dandanes razdaljemerji uporabljajo frekvence od 15 MHz do 100 MHz, natančnejši pa tudi do 500 MHz. Modulacijska frekvenca nam zagotavlja dolžinsko mersko enoto. Velikost te je odvisna od velikosti modulacijske frekvence in znaša od 10 m do 1,5 m, pri najnatančnejših do 30 cm.

Vrsta modulacije je odvisna od parametra valovanja, ki je spremenljiv. Najpogostejši sta amplitudna in frekvenčna modulacija, v uporabi pa je tudi fazna modulacija. Nosilno valovanje je mogoče glede na tip svetila modulirati na dva načina. Poznamo direktno in indirektno modulacijo. Pri faznih razdaljemerih se največkrat uporablja amplitudna modulacija. Amplitudno modulirano valovanje, ki je rezultat združitve nosilnega in merskega valovanja, ima spremenljivo amplitudo. Na osnovi jakosti svetlobnega žarka nato instrument določi fazo merskega valovanja.

Princip merjenja pri faznih razdaljemernih:

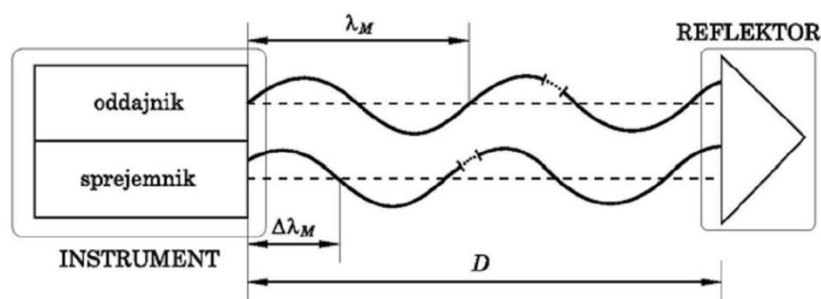
Valovna dolžina merskega vala (moduliranega valovanja) je odvisna od modulatorske frekvence in sredstva, skozi katerega se valovanje širi (Kogoj, 2002).

$$\lambda_M = \frac{c}{f_M}$$

λ_M – valovna dolžina moduliranega valovanja

f_M – modulatorska frekvenca

c – hitrost nosilnega svetlobnega valovanja v sredstvu.



Slika 12: Osnovni princip merjenja dolžine pri faznih razdaljemernih (Kogoj, 2002)

Celotno pot merskega žarka (dvakrat pretečeno dolžino od razdaljemera do reflektorja) zapišemo v enotah modulatorskih valovnih dolžin. Dolžina med začetno in končno točko je:

$$2D = N\lambda_M + \Delta\lambda_M$$

$$D = N\frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}$$

N – število polovičnih valovnih dolžin na merjeni poti

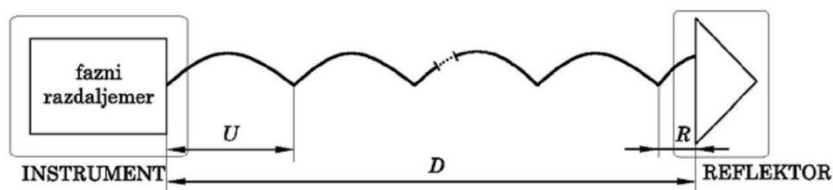
$\Delta\lambda_M$ – del modulatorske valovne dolžine, ki ga določimo na osnovi merjenja fazne razlike med merskim žarkom in referenčnim žarkom, in sicer:

$$\Delta\lambda_M = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda_M$$

Pri tem gre za določanje števila polovičnih modulatorskih valovnih dolžin N in fazne razlike $\Delta\varphi$ med merskim in referenčnim žarkom. Bistvo celotnega postopka meritve je ugotoviti fazne razlike med primerjanima žarkoma, od koder izhaja tudi ime fazni razdaljemeri.

Izmeriti dolžino pomeni določiti število merskih enot (U) in velikost ostanka (R).

$$\frac{\lambda_M}{2} = U \text{ in } \frac{\Delta\lambda_M}{2} = R \rightarrow D = NU + R$$

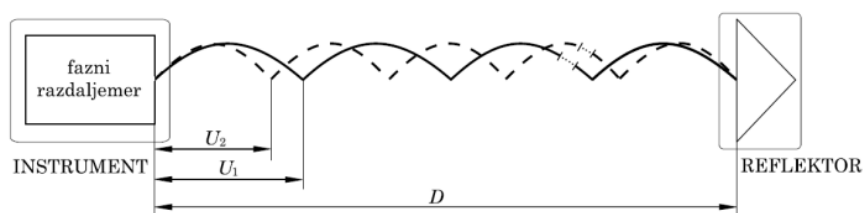


Slika 13: Dolžina je vsota večkratnika enote in ostanka (Kogoj, 2002)

Celo število modulacijskih valovnih dolžin oziroma merilnih enot U se lahko določi samo posredno. Za določitev števila N je potrebno meriti dolžino z različnimi vrednostmi merilnih enot U oziroma različnimi modulacijskimi frekvencami f_M . Te vrednosti modulacijskih frekvenc instrument generira s prekrivanjem frekvenc, ki so običajno večkratniki osnovne frekvence, ali z zveznim spreminjanjem modulacijske frekvence (Kogoj, 2002).

Fazni način merjenja dolžine se uporablja v ADM sledilnikih. Proizvajalec Leica Geosystems je bil prvi, ki je v laserski sledilnik vključil ADM sistem. Predstavitev laserskega sledilnika LTD500 leta 1995 je temeljito spremenila njihov način uporabe. V obdobju nekaj let so vsi večji proizvajalci laserskih sledilnikov dali na trg neko vrsto ADM tehnologije. Nekateri so se preveč posvečali samo hitrosti takšnih sistemov namesto natančnosti. Problem teh »hitrih« sistemov je bil, da se je z njihovo uporabo občutno zmanjšala dosegljiva natančnost laserskega sledilnika. Čeprav so nekateri proizvajalci želeli preusmeriti trg v uporabo laserskih sledilnikov z ADM sistemom, so bili primorani v svoji ponudbi obdržati interferenčne laserske sledilnike za uporabo pri meritvah, ki zahtevajo zelo visoko natančnost. Cilj nadaljnega razvoja je bila izdelava visoko natančnega ADM laserskega sledilnika z zmožnostjo statičnega in dinamičnega merjenja dolžin. (Zabret, 2014)

Razvoj visoko natančnega ADM laserskega sledilnika z zmožnostjo statičnega in dinamičnega merjenja dolžin je pripeljal do absolutnega interferometra (AIFM), ki ga je proizvajalec Leica Geosystems predstavil leta 2008. Laserski sledilniki, ki temeljijo na tehnologiji AIFM, uporabljajo za izmero dolžine ob prekinitvi princip merjenja, kot ga je uporabljal Mekometer ME 5000, to je fazni način s kompenzacijskim postopkom določitve celega števila valov na osnovi zveznega spreminjanja merske frekvence svetlobnega valovanja.



Slika 14: Princip meritev dolžine pri faznem načinu s kompenzacijskim postopkom določitve celega števila valov na osnovi zveznega spreminjanja merske frekvence svetlobnega valovanja in enačbe za izračun dolžine (Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16)

Pri tem načinu meritev je uporabljena polarizacijska modulacija, osnova za določitev dolžine pa ni enota U ampak modulacijska frekvenca f_M . (Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16)

Za izračun dolžine potrebujemo tri glavne parametre in sicer valovno dolžino izvora svetlobe (nosilnega valovanja, λ_N), hitrost svetlobe (dejanski lomni količnik, nd) in modulacijsko frekvenco polarizirane svetlobe (nosilnega valovanja, f_M).

$$D = N \frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}$$

$$D = NU + R$$

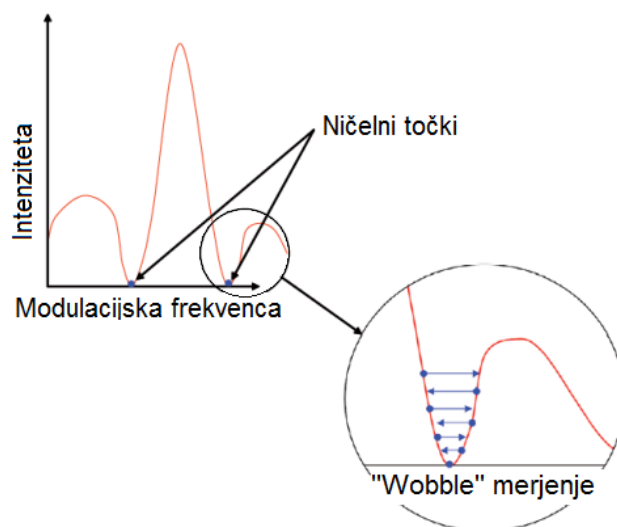
$$f_{M1}: R_1 = 0 \quad U_1 = \frac{c}{2f_{M1}}$$

$$D = N_1 U_1 \rightarrow D = N_2 U_2 = (N_1 + 1) U_2$$

$$D = Rnd \left(\frac{f_{M1}}{f_{M2} - f_{M1}} \right) U_1 = Rnd \left(\frac{f_{M1}}{f_{M2} - f_{M1}} \right) \frac{c}{2f_{M1}}$$

$$D = Rnd \left(\frac{f_{M2}}{f_{M2} - f_{M1}} \right) U_2 = Rnd \left(\frac{f_{M2}}{f_{M2} - f_{M1}} \right) \frac{c}{2f_{M2}}$$

Najpomembnejši parameter pri ADM sistemih je modulacijska frekvenca, toda za natančno merjenje dolžine moramo definirati ničelno točko povratnega (merskega) signala (najnižja točka vala). Natančna določitev ničle (fina meritev) je rezultat ponavljajočih merjenj, ki zahtevajo čas. Ta fina meritev merskega valovanja ("Wobble" merjenje) je vrsta nihajne meritve, ki skače naprej/nazaj preko minimalne točke valovanja, in meri odklone, iz katerih se izračuna srednja lega.



Slika 15: Fina meritve merskega valovanja ("Wobble" merjenje)
(Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16)

V primeru, da reflektor miruje, je ničelna točka vedno na isti oddaljenosti. V nasprotnem primeru, ko reflektor potuje, potuje tudi val in s tem ničelna točka. Dejstvo je, da tudi če se reflektor giblje, se oblika vala ne spremeni, val se giblje le v odnosu na razdaljo, ki jo preteče premikajoči se reflektor. Posledično za določitev minimuma ne potrebujemo več mirujočega reflektorja, ampak je potrebno določiti relativni premik v času trajanja absolutne meritve. Tu svojo vlogo nastopi interferometer.

Potek meritev pri AIFM (Kogoj, Interferenčni način merjenja dolžin, GMS 2015-16):

- Ovira povzroči prekinitev žarka – merjenje se prekine – kratkočasovna prekinitev.
- Ko se vidnost ponovno vzpostavi, se sproži ADM in istočasno še IFM merjenje.
- Čas ADM merjenja Δt je cca 0.2 s. ADM v tem času določa ničelno točko.
- ADM za izračun absolutne vrednosti dolžine v trenutku uporabi IFM meritve v časovnem intervalu Δt .
- Rezultat AIFM merjenja je stalna povezava ADM in IFM načina merjenja dolžin.
- Od tu naprej IFM ponovno meri relativne premike tarče oz. relativno dolžino.

Z drugimi besedami, takoj ko je laserski žarek usmerjen na reflektor, začne interferometer slediti njegovo relativno gibanje. Sistem ADM nato izmeri dolžino in uporabi informacijo interferometra za kompenzacijo premikanja reflektorja med meritvijo dolžine in ničelne točke.

3.2 Mehanizem za usmerjanje žarka (angl. Beam Steering Mechanism)

Mehanizem za usmerjanje žarka je sestavljen iz:

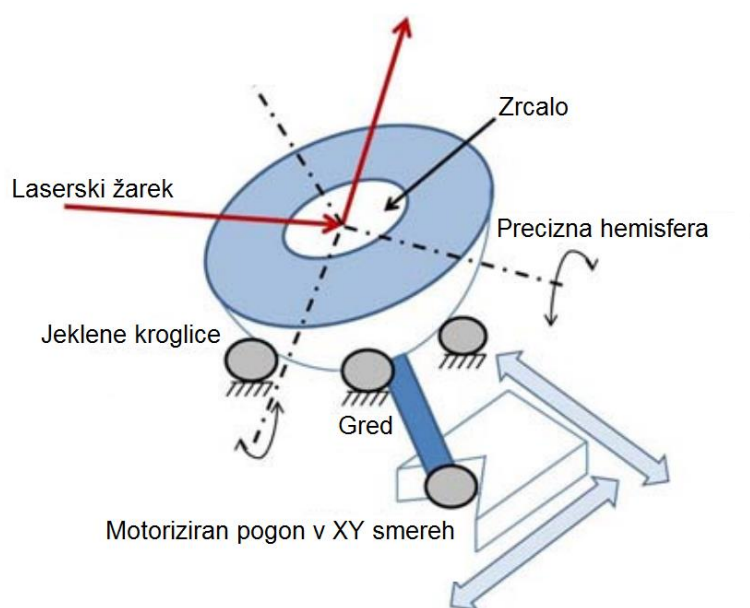
- pogonov,
- kotnih enkoderjev,
- zrcala,
- nosilca zrcala,
- sistema za krmiljenje pogonov.

Štirje različni tipi mehanizmov za usmerjanje žarka so predstavljeni v nadaljevanju.

Ležajni tip ima nosilec zrcala pritrjen na dva medsebojno neodvisna ležaja. Ta tip mehanizma lahko zrcalo hkrati zavrti v dve zahtevani smeri.

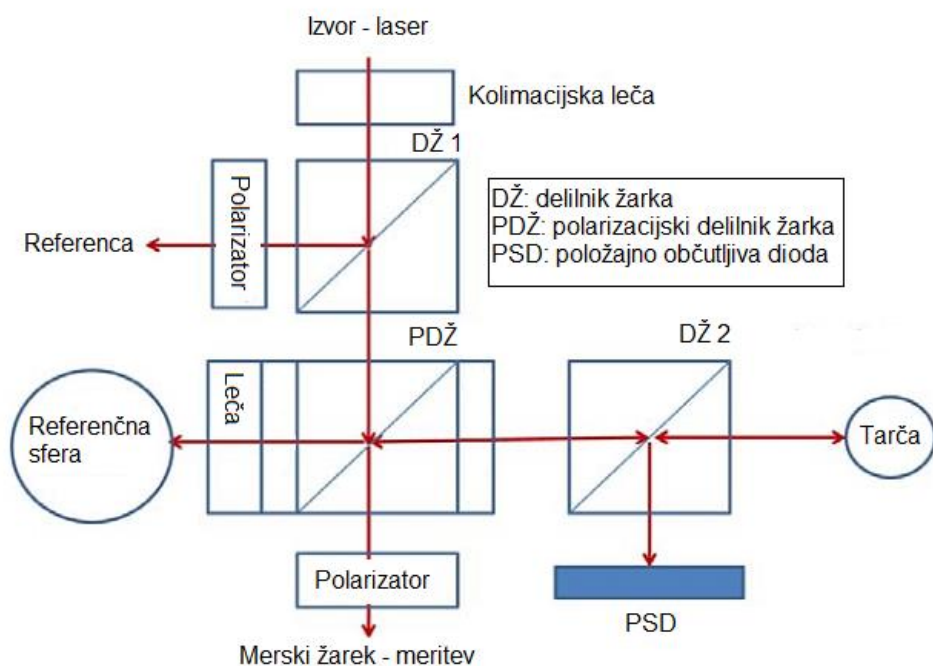
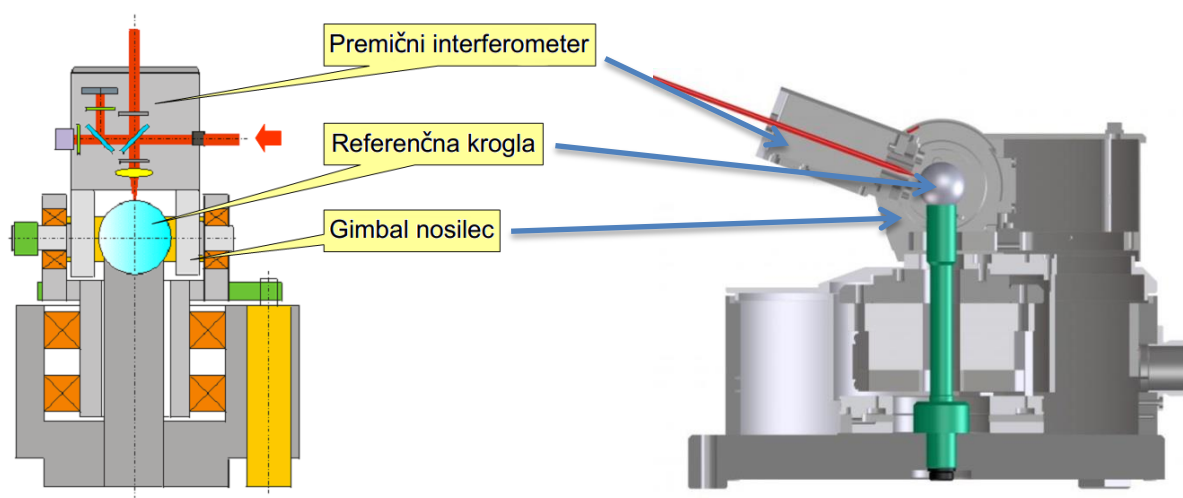
Druga izvedba je mehanizem, sestavljen iz dveh zrcal, pritrjenih vsakega na svoj ležaj. Tako ima vsako zrcalo svojo os vrtenja oz. premika. Ta tip mehanizma se imenuje "Scanning Mirrors" (podobna tehnologija se uporablja tudi pri okenskih terestričnih laserskih skenerjih). Težava tega mehanizma je, da neskladnost vrtilnih osi ležajev povzroča znatno napako pri merjenju z laserskimi sledilniki.

Tretji tip je sferni mehanizem. Zrcalo je pritrjeno na polovico sfere, ki leži na treh jeklenih kroglicah. Sfero premika pogon, ki je z njo povezan z zatičem.



Slika 16: Shematski prikaz sfernega mehanizma (opticalengineering.spiedigitallibrary.org)

Zadnji od opisanih tipov mehanizmov za usmerjanje žarka je "Laser Tracer", ki uporablja referenčno sfero, okoli katere se vrti enota interferometra. Glavni žarek sestavljata dva pravokotno polarizirana žarka, ki sta ločena s polarizacijskim delilnikom žarka. En žarek potuje skozi delilnik žarka kot referenčni žarek, medtem ko se drugi odbije proti referenčni sferi in od nje proti merski tarči. Ko se žarek odbije od tarče nazaj proti delilniku žarka, ta odbije žarek v smeri referenčnega žarka in tako ustvari potrebno interferenco. Pri vseh laserskih sledilnikih, ki omogočajo sledenje tarči, je merski žarek ob povratku na drugem delilniku žarka odbit še na položajno občutljivo diodo. Meritve tega sensorja se nato uporabijo za vrtenje interferometra okoli referenčne sfere tako, da sledi tarči.



Slika 17: "Laser Tracer" – shematski prikaz (<http://www.mantechgeometrics.co.uk/>)

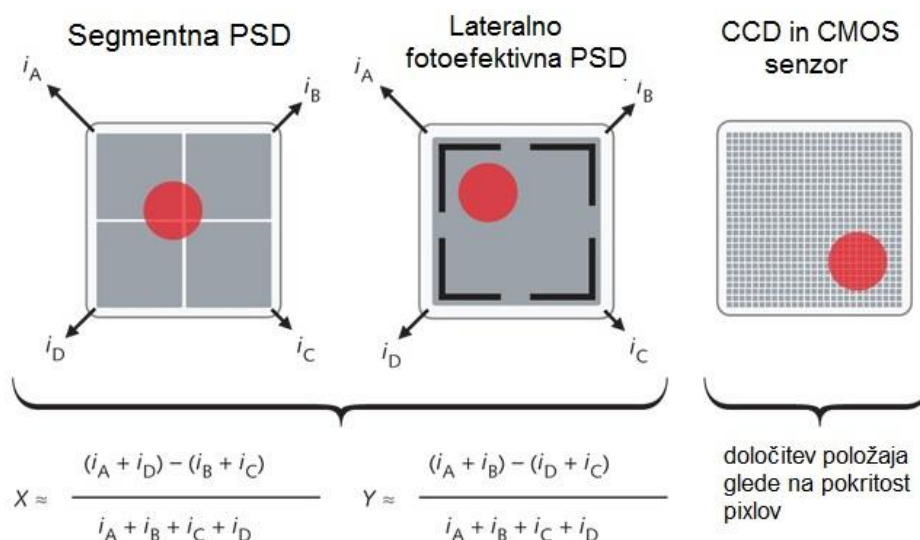
Prednost tega mehanizma je da, ko se interferometer vrti okoli referenčne sfere, radialna in prečna odstopanja mehanske osi bistveno ne vplivajo na natančnost merjenja, tako kot pri "Scanning Mirrors" mehanizmu. Še ena prednost "Laser Tracer" mehanizma je ta, da je toplota laserske glave odmaknjena od merske optike, saj so žarki od izvora do interferometra dostavljeni po optičnih vlaknih.

3.3 Položajno občutljiv senzor (angl. Position Sensitive Detector)

Položajno občutljiv senzor se uporablja za merjenje razlike med točko, v kateri se je merski žarek odbil v tarči, in središčem tarče. Je najbolj kritičen sestavni del laserskega sledilnika, saj je od njega odvisna hitrost sledenja tarči.

Položajno občutljiv senzor je običajno silicijeva fotodioda (PSD, angl. Position Sensitive Diode), ki se uporablja za optično zaznavanje položaja. Sestavljena je iz uporovne plasti, ki je pritrjena na silicijevo podlago, in elektrod, nameščenih na robovih uporovne plasti, kjer se meri fotonapetost. Ta se ustvari kot rezultat fotoefekta, njena velikost je odvisna od razdalje težišča žarka od elektrode na aktivni površini senzorja. Fotonapetost se običajno ojača in pretvori tako, da tvori uporaben podatek za krmilni sistem.

Poznamo tudi druge senzorje za optično zaznavanje položaja, kot sta CCD in CMOS. Vendar je PSD s svojo nanometrično ločljivostjo, pod mikrosekundnim odzivnim časom, relativno enostavnim vezjem in visoko zanesljivostjo najbolj primerna za uporabo v laserski sledilnikih. PSD delimo na dve vrsti: segmentne PSD in lateralno-fotoefektivne PSD.



Slika 18: Tipi senzorjev za optično zaznavanje položaja (www.laserfocusworld.com)

3.3.1 Segmentna PSD

Segmentna PSD je sestavljena iz štirih segmentov, ki so med seboj ločeni z majhnim presledkom, imenovanim "Dead Region" (mrtvo območje). PSD deluje tako, da meri fotonapetost vsakega segmenta. Ko se merski žarek nahaja točno v središču PSD, je vrednost fotonapetosti na vseh segmentih enaka.

Segmentne PSD imajo višjo natančnost kot lateralno-fotoefektivne PSD zaradi ustrežnejše odzivnosti med elementi. Ločljivost segmentne PSD je neodvisna od razmerja med signalom in šumom, kar ji omogoča zaznavanje zelo šibke svetlobe. Slabost te vrste PSD je v zahtevah za nemoteno delovanje senzorja. Te zahteve so:

- premer žarka mora biti večji kot "Dead Region",
- žarek mora neprestano pokrivati vse štiri segmente,
- žarek mora imeti homogeno intenzivnost.

V primeru, da žarek pade samo na zgornja dva segmenta PSD, lahko določimo samo X položaj, prav tako pa premik, večji od 10 % premera žarka povzroči, da merjenje postane nelinearno. Omejitve segmentnih PSD vplivajo na velikost območja sledenja tarče, ki v tem primeru postane majhno in ozko.

3.3.2 Lateralno-fotoefektivna PSD

Lateralno-fotoefektivne PSD so eno- ali dvodimenzionalne in so sestavljene iz enega samega elementa PSD, zato nimajo mrtvih območjih oz. "Dead Region". Položaj žarka je izračunan iz podatka fotonapetosti čez celotno aktivno površino senzorja. Prednost lateralno-fotoefektivnih PSD (pred segmentnimi PSD) je v tem, da imajo zelo širok dinamični razpon in da intenzivnost žarka ne vpliva na merjenje oz. določitev položaja. Glavni slabosti senzorja sta cena in ločljivost, ki je pri tej vrsti odvisna od razmerja med signalom in šumom. Trije tipi lateralno-fotoefektivnih PSD so: duolateralna, tetralateralna in "Pincushion" PSD. Duolateralni tip ima najvišjo zmožnost zaznavanja položaja, kar se pozna pri ceni, saj je ta tip senzorja najdražji. "Pincushion" tip je izboljšana tetralateralna PSD, saj ima večje linearno območje. Oba omenjena tipa pa imata enostavnejšo zasnovo vezja, manjšo temno fotonapetost in hitrejši odzivni čas kot duolateralni tip PSD.

3.3.3 Fotovoltaični in fotokondukcijski način

Obstajata dve metodi, s katerima se za usmerjanje žarka uporabljajo fotodiode, in sicer fotovoltaična in fotokondukcijska. Razlika med metodama je v načinu polarizacije diode. Pri fotovoltaični metodi je katoda negativna, pri fotokondukcijski pa pozitivna. Fotovoltaična metoda se uporablja, ko je pomembna točnost, fotokondukcijska metoda pa takrat, ko je pomembna hitrost.

3.4 Merske tarče

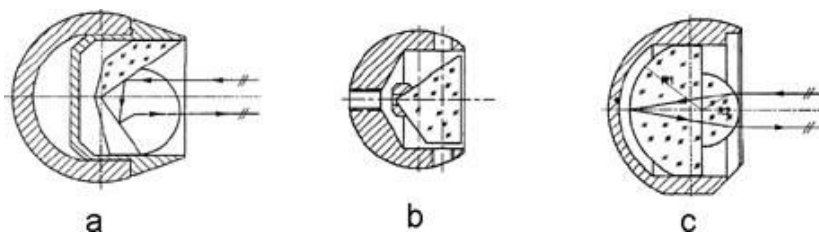
Pri merjenju z laserskimi sledilniki se uporabljata dve vrsti merskih tarč, kotna prizma in mačje oko. Zahteve, ki jih mora izpolnjevati idealna merska tarča, ne glede na vrsto, so:

- zagotoviti mora visoko vzporednost vpadnega in odbitega merskega žarka (primarni žarek se odbije in vrne v vzporedni smeri 180° glede na orientacijo tarče in smeri, iz katere je prišel primarni žarek),
- središče tarče mora biti natanko v točki odboja primarnega žarka,
- tarča mora imeti nizko maso oz. mora biti čim lažja,
- imeti mora čim širši oz. večji sprejemi kot vpadnega žarka.

Ne glede na v nadaljevanju opisane razlike zgradbe zgoraj omenjenih tarč, sta obe vrsti izdelani z enako visoko točnostjo in natančnostjo, da lahko zagotavljata absolutno točnost merjenja središča tarče.

3.4.1 Sferni (krogelni) reflektorji

Ločimo več tipov krogelnih reflektorjev, tako imenovani SMR (Spherically Mounted Retroreflector). Tipi se med seboj razlikujejo glede na izdelavo odbojnega dela SMR (prizme).

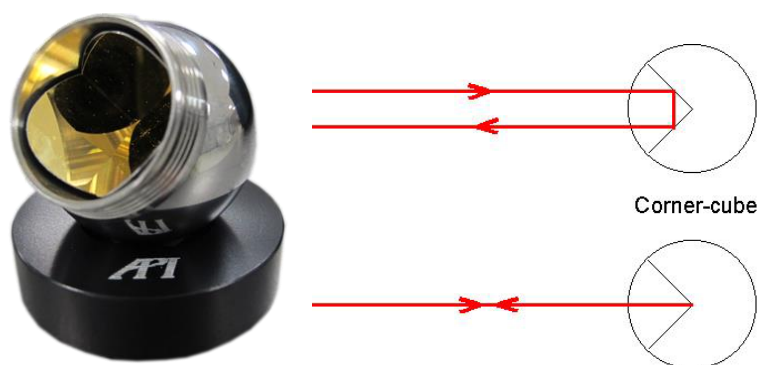


Slika 19: a) prostoizračni tip, b) kotna prizma, c) "mačje oko" (Zabret, 2014)

Poznamo prostozačni tip (med odbojno površino in izrezom krogle je samo zrak) in masivno stekleno kotno prizmo, vstavljeno v kroglo.

V praksi so večinoma uporabljaja prostozačni tip SMR zaradi zmanjšane vpliva refrakcije tarče na žarek (a). Tak tip SMR je majhna krogla, iz katere je izrezan del v obliki vogala kocke s tremi stranskimi ploskvami. Oglišče, ki je hkrati tudi točka odboja, je natančno v središču krogle. Rezultat izreza so tri med seboj pravokotne ploskve, ki so prevlečene z visoko odbojno snovjo (zlato ali srebro), s čimer zagotavljajo visoko vzporednost žarka.

Pri drugem tipu SMR (b) se v kroglo vstavi steklena prizma (podobno kot pri klasičnih reflektorjih elektronskih razdaljemero), ki zapolni votli del izreza v krogli.



Slika 20: SMR (Spherically Mounted Retroreflector), kotna prizma (<http://www.apisensor.com/>)

Pri tretjem tipu (c), "mačje oko", sta v ohišje vgrajeni dve polkrogli s čim bolj enakim lomnim količnikom, vendar različnega radija. Hemisfera, ki predstavlja zadnji del, je prevlečena z visoko odbojno snovjo. Žarek se proti točki odboja lomi na prednji hemisferi in se nato odbije od zadnje hemisfere pod enakim vpadnim kotom. Na površini sprednje hemisfere se še enkrat lomi, tako da izstopi vzporedno vpadnemu žarku. Če pa imata hemisferi enak lomni količnik (blizu 2), postaneta enotna sfera. Ta ima pred hemisfero tri prednosti:

- poenostavljena proizvodnja,
- višja natančnost,
- velik sprejemni kot dohodnega žarka (ta je lahko pri sfernih tarčah 360°).



Slika 21: Merska tarča "mačje oko" (<https://store.hexagonmetrology.us>)

3.4.2 Površinsko-točkovna tarča

Kombinacija zgoraj opisane kotne prizme in posebnega nastavka z zrcalom je privedla do površinsko-točkovne tarče (SRC). Posebnost omenjene tarče je, da je z njo možno meriti katerokoli točko na površini (luknjice, robovi, utori ...), tudi težje dostopno, brez vsakršnega odstopanja zaradi postavitve SMR. Osi SMR in ohišja sta postavljeni tako, da os poteka točno skozi središčno točko SMR. Velika prednost je, poleg zajema težko dostopnih točk, tudi, da ima ta tip tarče veliko večji razpon vpadnega kota merskega žarka kot pri običajnih tarčah.



Slika 22: FARO površinsko-točkovna tarča (www.faro.com)

4 POGREŠKI IN NATANČNOST

To poglavje je namenjeno predstavitvi pomena pogreškov in kako ti vplivajo na natančnost oz. na merjenje pri uporabi laserskega sledilnika. Merilni instrumenti in sistemi se nenehno razvijajo, kar omogoča uporabnikom izkoriščanje številnih funkcij, ki jih ti sistemi ponujajo. V tehničnih specifikacijah večine merskih sistemov se pojavljata izraza ločljivost in ponovljivost, ki sta vedno povezana s pojmom natančnost. Natančnost meritev je odvisna od zmogljivosti oz. natančnosti posameznih sestavnih delov, merske metode in pogreškov sistema.

4.1 Pogreški laserskih sledilnikov in primerjava s tahimetri

V tem poglavju so opisani pogreški posameznih sestavnih delov laserskega sledilnika, saj je zelo pomembno, da poznamo vire in vplive pogreškov merilnega sistema na končni rezultat, v tem primeru koordinato.

Pogreški se delijo na slučajne in sistematične. Slučajni pogreški se, kot nakazuje že samo ime, pojavljajo slučajno in so posledica naključnih neznanih pojavov, katerih vpliv je na meritve neizogiben. Slučajni pogreški se podrejajo zakonu verjetnosti, tako da je možno njihov vpliv zmanjšati s povečanjem števila ponovitev merenj. Sistematični pogreški pa se podrejajo matematičnim in fizikalnim zakonitostim, tako da je možno ugotoviti njihovo velikost in jih računsko odpraviti.

V literaturi se pojavljata dva pristopa opisovanja in ugotavljanja pogreškov laserskega sledilnika oz. njegovih sestavnih delov.

Teoh opisuje naslednje kategorije virov pogreškov (Teoh in sod., 2002):

- vplivi okolja,
- izvedba meritev in vpliv aprkosimacije,
- nezanesljivost referenčnih materialov, uporabljenih za kalibracijo,
- laserski interferometer,
- mehanizem za usmerjanje žarka,
- PSD.

Gallagher pa razlikuje med naslednjimi viri pogreškov (Gallagher, 2003) :

- kotni enkoderji,
- sistem za sledenje,

- ortogonalnost,
- sistem za merjenje razdalje (interferometer),
- neumerjenost žarka.

Ortogonalnost je edinstven pogrešek, saj je geodetski pogrešek (nehorizontalnost Y osi), ki se pojavi, ko prava vertikalna os odstopa od nazivne oz. normalne vertikalne osi in zato ni pravokotna na horizontalno os. V nadaljevanju so pogreški obravnavni po sestavnih delih.

4.1.1 Pogreški v odvisnosti od interferometra in merske optike

Laserski interferometer in merska optika sta v laserskem sledilcu uporabljena kot modularna komponenta. Pogreške, ki jih povzročata ta sestavni del laserskega sledilnika, lahko kljub temu razumemo in njihov vpliv zmanjšamo z določenimi postopki ali metodami merjenja.

4.1.1.1 Vrste vplivov

V literaturi se poleg pogreškov zaradi vpliva okolja, geometričnih in pogreškov instrumenta, kot glavni viri pogreškov pri interferometru in merski optiki omenjajo še geometrijska aberacija oz. odstopanje tarče, neidealne optične komponente in odklon laserskega žarka od matematično določene poti. Vpliv okolja pa vključuje še pogreške zaradi raztezanja materialov, optično-termično odnašanje in temperaturni gradient oz. prehod. Gallagher (2003) navaja še pogreške zaradi vgradnje oz. sestave interferometra in merske optike. Ti pogreški so: "Deadpath" pogrešek, kosinusni pogrešek in Abbeov pogrešek.

Ker gre pri laserskih sledilnikih za zelo natančne instrumente, se tudi najmanjši odkloni od idealnih pogojev ali konstrukcije instrumenta hitro kažejo kot pogreški pri meritvah. So pa določene skupine pogreškov, ki so odvisne od enote za merjenje dolžin, pri laserskih sledilnikih in elektronskih tahimetrih podobne ali celo enake.

Pogreške pri merjenju dolžin z razdaljemerom lahko razdelimo v tri skupine:

Pogreški, odvisni od razdaljemera:

- pogrešek adicijske konstante,
- pogrešek faznih razlik,
- pogrešek centriranja razdaljemera in reflektorja.

Pogreški, odvisni od velikosti razdalje:

- pogrešek merske frekvence,
- pogrešek zaradi meteoroloških vplivov,
- pogrešek hitrosti razširjanja valov.

Ostali pogreški:

- pogrešek zaradi vpliva odboja valovanja od zemeljske površine in drugih objektov, pogrešek orientiranja prizme.

4.1.1.2 Vplivi delovnega okolja

Estler (2002) v svojem delu opisuje tri atmosferske vplive, ki vplivajo na širitev oz. potovanje svetlobe, refrakcijo, spremembo hitrosti svetlobe in turbulenco kot posledico časovno odvisnih refrakcijskih sprememb. Predvidevanje, da laserski žarek potuje s konstantno hitrostjo v ravni črti, ne velja za nelaboratorijske pogoje, saj okoljski pogoji vplivajo na lomni količnik zraka, skozi katerega potuje laserski žarek. Ta sprememba refrakcije se kaže kot sprememba hitrosti svetlobe, kar pa ima za posledico spremembo velikosti valovne dolžine laserske svetlobe. Trije okoljski dejavniki, ki vplivajo na refrakcijski indeks (lomni količnik), so temperatura, tlak in vlažnost.

Vpliv temperature, tlaka in vlage na refrakcijski indeks je mogoče zmanjšati z nadzorovanjem okolja, na primer z uporabo posebnega hlajenja, ki ustvarja laminarni tok nad viri toplote, ter z uporabo vlažilcev zraka. Watson predlaga uporabo interferometra v enakem okolju, saj lahko z uporabo v enakem okolju izničimo napake zaradi spremembe lomnega količnika. Napako valovne dolžine laserja je mogoče zmanjšati s prirejeno Edlenovo enačbo (Gallagher, 2003). V ta namen so laserski sledilniki opremljeni z majhnimi vremenskimi postajami, ki merijo temperaturo, vlago in tlak za zmanjšanje vpliva okolja pod različnimi pogoji.

Estler (2002) navaja, da imajo temperaturni gradienti največji vpliv na pogreške meritev in opisuje dve področji raziskav za odpravo prvega reda atmosferskih popravkov, ki temeljita na dvovalovni (dvobarvni) interferenci in na spremembi optične refrakcije glede na valovno dolžino. Gallagher (2003) opozarja, da temperatura povzroča tudi toplotne deformacije in premike optike.

Pri merjenju dolžin z elektronskimi tahimetri imajo okoljski pogoji enak vpliv kot pri laserskem sledilniku. Za razliko od laserskih sledilnikov, ki so opremljeni z vremenskimi postajami, je potrebno pri meritvah z elektronskimi tahimetri okoljske parametre meriti posebej z ročnimi

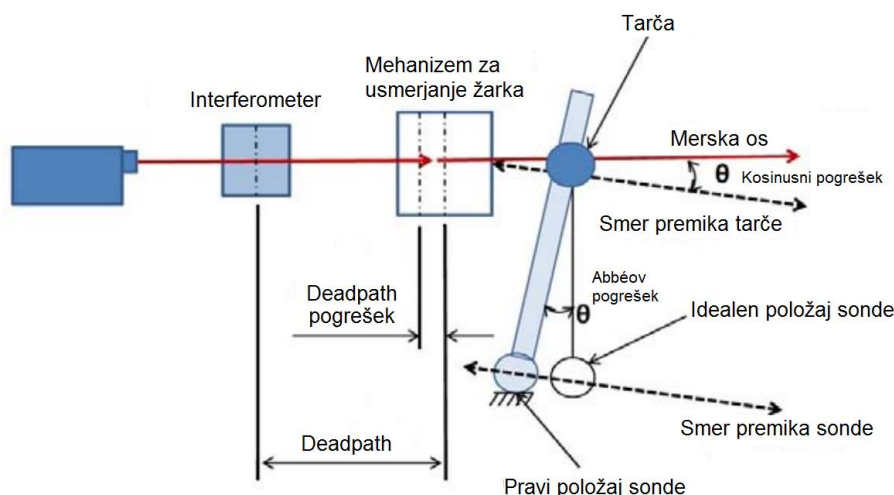
vremenskimi postajam ali ostalimi merilniki okoljskih parametrov (termometer, barometer ipd.). Tu lahko omenimo še vpliv napačno določenih meteoroloških parametrov. Natančneje kot želimo izmeriti dolžino, natančneje je potrebno izmeriti okoljske parametre. Natančneje kot jih bomo izmerili, natančneje bomo lahko določili meteorološke vplive.

Ker je pogrešek zaradi vplivov delovnega okolja (meteoroloških vplivov) slučajni pogrešek, ga je mogoče zmanjšati s povečanjem števila meritev in z merjenjem v različnih meteoroloških pogojih. Načeloma pa v praksi ločimo dva primera upoštevanja meteoroloških parametrov, in sicer že med samimi meritvami (vnos podatkov v programsko opremo instrumenta, ki nato izračuna popravke meritev) ali naknadno pri obdelavi surovih podatkov meritev.

4.1.1.3 Vpliv vgradnje in kalibracije

Interferometer lahko meri le premik tarče glede na izhodiščno merilno razdaljo ali začetni položaj. Napaka v tej kalibrirani vrednosti se prenese v vse meritve. Gallagher (2003) navaja, da je vpliv tega pogreška največji ob velikih naklonih (veliki elevacijski ali depresijski koti). Predlaga, da se merilno območje nahaja v mejah do 30° naklona od horizontalne ravnine in da umerjanje poteka s čim manj pogreški, kajti samo tako je možno zmanjšati vpliv pogreška kalibracije. Pogreški pri vgradnji interferometra so "Deadpath" pogrešek, kosinusni pogrešek in Abbeov pogrešek.

Kosinusni pogrešek se pojavi, ko se merska tarča ne premika vzporedno z osjo merskega žarka. Abbeov pogrešek pa, ko premik izmerjene točke ni vzdolž merilne osi in je ta nepravokotno postavljena na želeno točko. "Deadpath" pogrešek je posledica napake lomnega količnika ter toplotne ekspanzije in deformacije merske optike. Vpliv vgradnje mehanizma za usmerjanje žarka prav tako povzroči pojav "Deadpath" pogreška. Optična nastavitvev in kalibracija mora zagotoviti, da je dolžina poti referenčnega in merskega žarka skozi interferometer enaka, tako da je edina sprememba v poti žarka posledica premika pri merjenju zelene točke.



Slika 23: Pogreški pri vgradnji interferometra (opticalengineering.spiedigitallibrary.org)

4.1.2 Pogreški v odvisnosti od mehanizma za usmerjanje žarka

Pogrešek zaradi mehanizma za usmerjanje žarka, ki je opisan v nadaljevanju, se nanaša na tip instrumenta, ki za usmerjanje žarka uporablja zrcalo. Merjenje dolžin z interferometrom zahteva, da se merski žarek nikoli ne prekine, da je vedno usmerjen proti središču tarče in da se povratni žarek odbije oz. vrne točno v središče rotacijske osi mehanizma za usmerjanje žarka. Zadnja omenjena zahteva je zelo pomembna pri oblikovanju, izdelavi in izbiri tega mehanizma.

Zhuang (1992) v svojem delu opisuje pogrešek meritve zaradi odmika središča zrcala od presečišča osi instrumenta. Omenjeni pogrešek je posledica predpostavke, da je dolžina med izvorom merskega žarka in vpadno točko zrcala fiksna in da je izmerjena dolžina strogo dolžina med vpadno točko in središčem tarče. Obstajajo trije možni razlogi, zaradi katerih nastane pogrešek odmika središča zrcala (Zhuang, 1992):

- odmik vpadne točka zrcala od središča rotacijske osi,
- nestalnost središča rotacije zaradi nepravokotnosti osi,
- problem preseka osi v enaki točki.

Teoh je leta 2002 dopolnil seznam razlogov za nastanek pogreška (Teoh in sod., 2002):

- z vplivom zračnosti zobnikov,
- s trenjem med gibljivimi deli,
- z nepravilnostjo gredi s kotnimi enkoderji,
- s težo ogledal (ki povzroča upogibanje in premikanje pogona).

Zgoraj naštetih razlogov so negeometrijski, zato jih ni mogoče modelirati in posledično tudi ne kalibrirati. Lahko se vključijo v končno oceno merilne negotovosti, njihov vpliv pa je mogoče zmanjšati s skrbno izbiro komponent, postopka projektiranja in sestave mehanizma.

4.1.3 Pogreški v odvisnosti od položajno občutljivega senzorja

Teoh (2002) navaja, da sta glavna vira pogreškov PSD ločljivost in postopek kalibracije, ki je uporabljen za določitev razmerja med izhodnimi podatki senzorja in odstopanjem merskega žarka od središča tarče. Podatki PSD o odstopanju merskega žarka se uporabljajo za določitev, kdaj se žarek nahaja točno v središču tarče. Pri postopku kalibracije se PSD namesti neodvisno od prevodnega dela senzorja, saj ojačanje in pretvorba signala (digitalna ločljivost pretvornika vpliva na končno ločljivost senzorja) prav tako vplivata na pogreške pri merjenju s PSD.

Položajno občutljivi senzor se v elektronskih tahimetrih pojavlja kot sestavni del sistema za avtomatsko prepoznavanje in viziranje tarče. Največkrat gre za CCD ali CMOS-senzor. Zmožnost sistema za fino viziranje tarče se v sodobnih elektronskih tahimetrih giblje okoli 1 mm / 200 m, kar je $1''$ (0,3 mgon). Ločljivost (velikost piksla) CCD ali CMOS-senzorja je v tesni povezavi z natančnostjo meritev oz. zmožnostjo viziranja tarče. Iz tega je mogoče sklepati, da se pogreški v odvisnosti od položajno občutljivega senzorja pojavljajo v enaki meri kot pri laserskih sledilnikih, tudi pri merjenju z elektronskimi tahimetri.

4.1.4 Pogreški v odvisnosti od merske tarče

Merska tarča je kritična komponenta laserskega sledilnika, saj ima dokaj velik vpliv na kakovost meritev. Napaka tarč pri meritvah je lahko ta, da ne odbijajo merskega žarka vzporedno primarnemu žarku (odklon žarka; primarni žarek se ne odbije in se ne vrne v vzporedni smeri 180° glede na orientacijo tarče in smeri, iz katere je prišel primarni žarek), kar se potem pokaže kot pogrešek na PSD ali pa meritev sploh ni mogoča, saj se odbiti žarek ne vrne vzporedno.

Pri sfernih tarčah se lahko pojavi tudi pogrešek dolžine optične poti znotraj SMR. Pogrešek optične poti je razlika med dolžinami optične poti skozi SMR pri različnih vpadnih kotih žarka glede na tarčo (orientacija tarče) in je rezultat sferične aberacije, oblikovne napake in nehomogenosti materiala (kakovost materiala za izdelavo, odbojni premaz, prevleka proti bleščanju). Pri kotnih prizmah se oblikovne napake in nehomogenost materiala kaže kot nepravokotnost ploskev ali pa se ploskve ne stikajo v isti točki. Ker pa je sferična tarča ves

čas v kontaktu z merjencem, se tudi vse nepravilnosti v obliki tarče (napačna velikost sfere, nepravna sfera) odražajo kot pogrešek pri meritvah (centriranje tarče).

Tako kot je merska tarča kritična komponenta pri merjenju z laserskimi sledilniki, tako je tudi pri merjenju z elektronskimi tahimetri, saj tarča vpliva na merjenje dolžine in smeri (kotov). Vsi zgoraj naštetih pogreški se lahko pripišejo posamezni komponenti, ki sestavlja mersko tarčo. Mao in Nindl (2009) v svojem delu delita pogrešek v odvisnosti od merske tarče na sledeče vplive:

- orientacija tarče,
- centriranje tarče,
- odklon žarka,
- kakovost materiala (stekla) za izdelavo tarče,
- premaz proti bleščanju,
- odbojni premaz.

4.1.5 Pogreški v odvisnosti od kotnih enkoderjev

Pogreški, odvisni od kotnih enkoderjev in sistema za usmerjanje žarka, predstavljajo največjo oviro laserskih sledilnikov pri doseganju zelo visoke natančnosti, saj ima natančnost merjenja kotov veliko večji vpliv na končno natančnost določitve položaja kot natančnost merjenja dolžin.

Če hočemo doseči sistemsko natančnost položaja 25 μm , mora biti natančnost določitve smeri boljša od 0,5". Za zmanjšanje vpliva pogreškov kotnih enkoderjeve se v laserskih sledilnikih uporabljajo samo najboljši pogoni in kotni enkoderji.

V osnovi je vpliv natančnosti meritve smeri pri elektronskem tahimetru enaka kot pri laserskem sledilniku. Ker obstajajo elektronski tahimetri za različna področja uporabe, je temu prilagojena zmožnost merjenja smeri (kotov), ki se od modela do modela razlikujejo. Elektronski tahimetri za najnatančnejše geodetske naloge se z natančnostjo merjenja smeri (kotov) zelo približajo, če ne celo dosežejo natančnost merjenja smeri (kotov) laserskih sledilnikov.

4.2 Natančnost meritev z laserskimi sledilniki

Natančnost ali akribija, kot se včasih imenuje, je termin, ki ga lahko opišemo kot stopnjo skladnosti med rezultatom merjenja in pravo vrednostjo količine, ki jo merimo. V praksi prave vrednosti nikoli ne poznamo, zato v primerih, kjer je zanesljivost izmerjene količine pomembna, poleg rezultata meritve dodamo še parameter natančnosti meritve.

Laserski sledilniki so po naravi vsestransko uporabni, ne glede na to, da jih pogosto uporabljamo za merjenja, kjer je potrebna najvišja možna natančnost določitve prostorskih koordinat oz. geometrijskih značilnosti velikih objektov. Ena od lastnosti, zaradi katere so laserski sledilniki uspeli prodreti v področje visoke natančnosti, je izjemna natančnost merjenja dolžin (laserski interferometer). Merjena dolžina sama po sebi ni dovolj, če je iskana količina koordinata. Merjenje koordinat z laserskim sledilnikom omogoča dodatni sistem za merjenje kotov (kotni enkoderji). Natančnost koordinate je odvisna od natančnosti merjenja dolžin in kotov.

Razumevanje, predstavitev in uporabnost tehničnih specifikacij je bila dolga leta, pred letom 2006, prepuščena proizvajalcu, interpretacija natančnosti izvedenih meritev pa uporabniku. Šele z uvedbo standarda ASME (angl. The American Society of Mechanical Engineers) B89.4.19-2006 se je navajanje tehničnih specifikacij poenotilo do te mere, da je bilo mogoče primerjati specifikacije različnih proizvajalcev po vsem svetu.

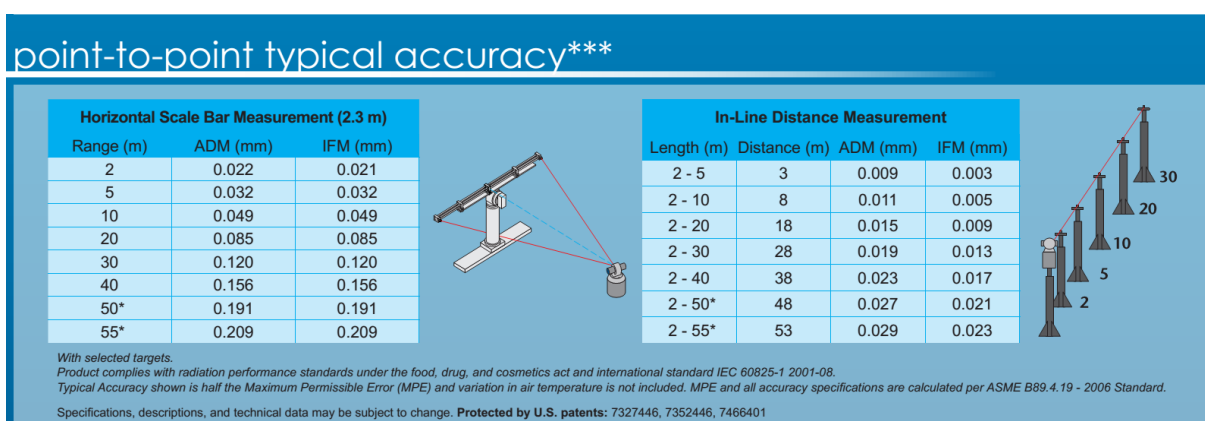
"ASME standard ponuja ponudnikom in posledično uporabnikom laserskih sledilnikov koncept NDP (največji dopustni pogrešek) vrednosti (angl. MPE – Maximum Permissible Error). To je največja vrednost, ki je izmerjeno odstopanje ne sme preseči. Te vrednosti predstavljajo zmogljivost specifičnega testa na znane nominalne vrednosti (običajno preverjene s sledljivim interferometrom), medtem ko pogosto navedene vrednosti 2 sigma (2σ) predstavljajo statistično oceno/vrednost. Koncept je uporaben, ker obsega ekstremne vrednosti pogreška, ki jih dopušča proizvajalec v tehnični specifikaciji. V specifikacijah so poleg NDP vrednosti velikokrat dane tudi tipične vrednosti, ki so definirane kot polovica vrednosti NDP. Tipične vrednosti predstavljajo vrednosti, ki bodo običajno dosežene pri večini meritev." (Zabret, 2014)

Primer podajanja natančnosti za merjenje dolžin in kotov:

za merjenje dolžin (interferometer): $4 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m}/\text{m}$ (ppm),

za merjenje kotov: $36 \mu\text{m} + 0,6 \mu\text{m}/\text{m}$ (ppm).

V vseh primerih navajanja natančnosti laserskega sledilnika obstajata dva podatka, in sicer je prvi podatek začetna natančnost oz. napaka (konstantni del pogreška), medtem ko je drugi podatek, linearni del pogreška, faktor povečevanja napake na določeno oddaljenost. Drugi podatek je odvisen od razdalje, zato je potrebno upoštevati tudi podatke o atmosferskih vplivih. Gornji zapis natančnosti merjenja dolžin in natančnosti merjenja kotov je sicer vprašljiv, saj sta konstantni in linearni del slučajna pogreška, ki ju ni mogoče enostavno sešteti. NDP specifikacije se včasih opisuje kot "tipično" natančnost, v tem primeru pomeni to preplopitev celotne vrednosti NDP natančnosti, ki se navadno doseže v večini primerov.

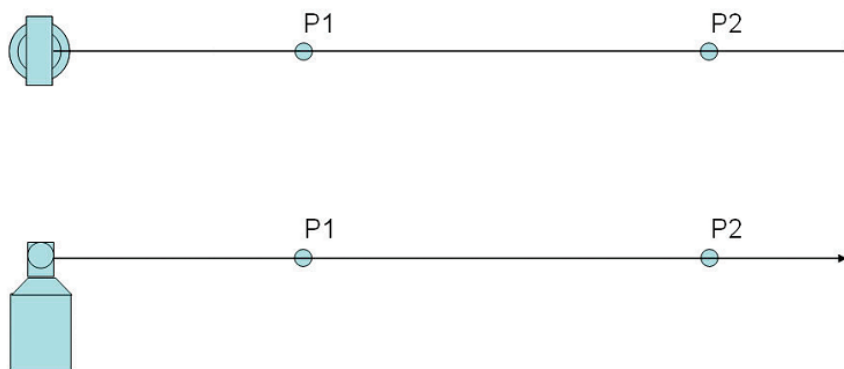


Slika 24: Primer podatkov o natančnosti: kotna levo in dolžinska desno (www.faro.com)

Kar zadeva ustreznost NDP za uporabnika, če je Point-to-Point natančnost v interesu uporabnika, so se nekateri proizvajalci odločili za objavo enačbe, ki se uporablja za izračun NDP in omogoča, da uporabnik izračuna podatke o natančnosti za svojo lastno situacijo.

4.2.2 Natančnost merjenja dolžin

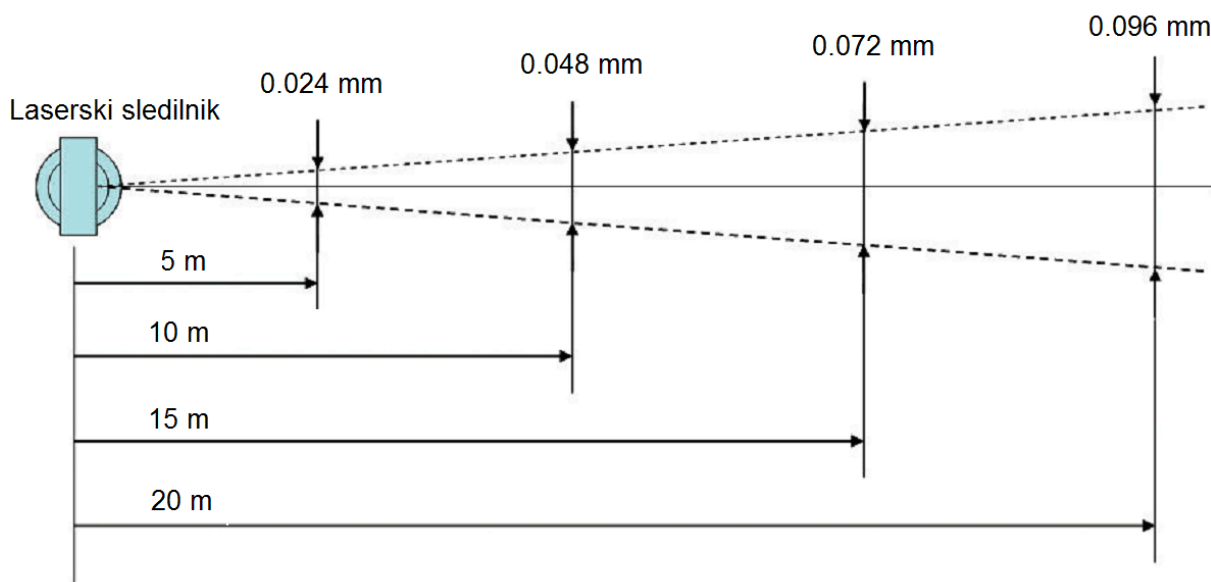
Kot je že omenjeno v prejšnjih poglavjih, so sistemi za merjenje dolžin, ki jih običajno najdemo v laserski sledilnikih, interferometer, interferometer in elektrooptični razdaljemer (v nadaljevanju EOR) ali celo samo EOR. Neodvisno od tega, ali je v uporabi interferometer ali EOR, je izračun natančnosti merjenja dolžin dobro znan in dokumentiran. Interferometri se običajno uporabljajo za merjenje relativnega premika med dvema točkama, rezultat premika pa je razdalja med dvema točkama. Iz tega sledi, da je treba laserski sledilnik za optimalno merjenje dolžin postaviti v smeri točk, med katerima merimo razdaljo, tako da v tem primeru ni vpliva pogreška merjenja kotov.



Slika 25: Merjenje dolžine v smeri točk (www.faro.com)

4.2.3 Natančnost merjenja kotov

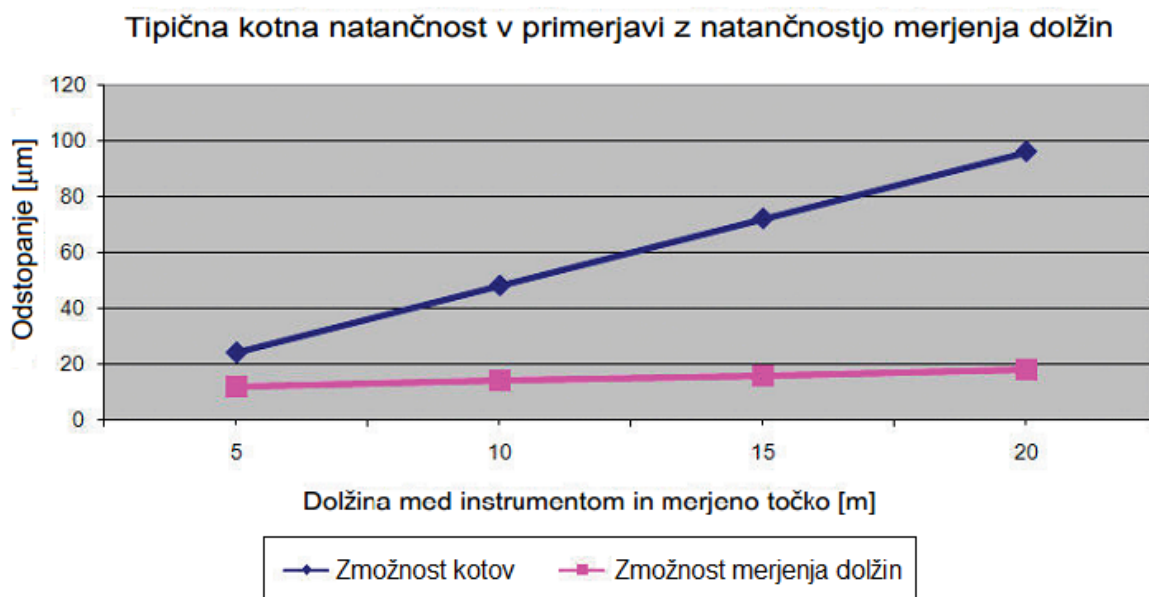
Kotna natančnost se pri laserski sledilnikih poda kot podatek, kako dobro sistem določi oz. bere kotni odčitek preko kotnih enkoderjev, preden tega uporabi skupaj z meritvijo dolžine za izračun koordinate. Slika 26 prikazuje teoretično možne odklone na določeni razdalji od laserskega sledilnika, ki deluje v okviru teoretično določene kotne specifikacije $\pm 0,5''$. Natančnost kotne meritve je podana s prečnim odstopanjem zaradi lažje primerjave z natančnostjo dolžinskih meritev.



Slika 26: Odkloni (prečno odstopanje) pri merjenju kotov (www.faro.com)

4.2.4 Primerjava natančnosti merjenja kotov in dolžin

Pri nekaterih določenih laserskih sledilnikih, ki izvajajo meritve na območjih dimenzij 50 metrov ali več, lahko opazimo, da je sposobnost zelo natančnih meritev kota zelo pomembna, saj prinese večji del napake.



Slika 27: Primerjave kotne in dolžinske natančnosti (www.faro.com)

4.2.5 Volumetrična natančnost

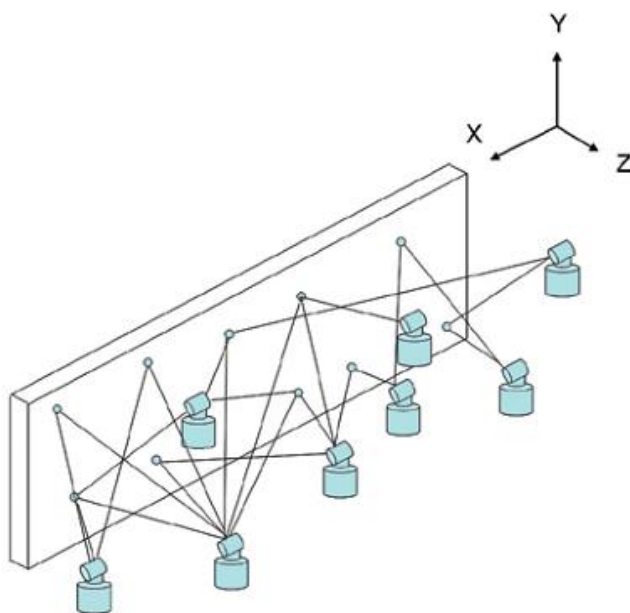
Volumetrična natančnost se pogosto uporablja kot izraz, ki opisuje, kako natančno laserski sledilnik izmeri volumen oz. 3D območje. Kjer obstajajo ilustrirani podatki za volumetrično natančnost s strani proizvajalcev, jih je potrebno uskladiti z možnostjo uporabnika pri postavitvi instrumenta v realni situaciji. Če je merjeno območje veliko, je včasih najpomembnejše, da uporabnik postavi instrument tako, da z enega stojišča vidi vse potrebne in interesente točke.

Uporaba večjega števila stojišč instrumenta bo zmanjšalo oddaljenosti merjenih točk od instrumenta. S tem bomo zmanjšali problem manjše natančnosti kotnih meritev. To je potrebno, če obstajajo praktične ovire pri postavitvi instrumenta, ki vplivajo na kotno natančnost, to pa je pomembno za doseganje visoke natančnosti določitve niza koordinat.

Slika 28 prikazuje razmere, v katerih je izpostavljena zmožnost kotnih meritev laserskega sledilnika, tako da prevladuje razdalja (napaka kotnih meritev).

Pomembne so oz. prevladujejo naslednje situacije:

- laserski sledilnik je omejen z maneverskim prostorom v smeri Z osi,
- z enega stojišča ni mogoče videti vseh točk,
- večje število stojišč je potrebnih za doseganje zahtevane natančnosti,
- zahtevana natančnost je najvišja možna,
- velikost oz. volumen območja narekuje, da je presežena zmožnost merjenja kotov, zlasti v smeri Y (vertikalne) osi,
- dolžine so krajše, vendar pa natančnost merjenja kotov vpliva na natančnost končnega rezultata.



Slika 28: Primer postavitve pri večjem številu stojišč, volumetrična natančnost (www.faro.com)

5 STANDARDI ZA PREIZKUS NATANČNOSTI IN PODAJANJE NATANČNOSTI MERJENIH KOLIČIN

To poglavje je namenjeno pregledu standardov in standardiziranih postopkov preizkusov pogreškov merskih vrednosti oz. vplivov na merjenje. Standard ASME B89.4.19-2006 je bil prvi, ki je določal načine preizkusov laserskih sledilnikov. Sta pa po ASME B89.4.19 sledila dva novejša in bolj izpopolnjena standarda. Nemški standard VDI/VDE (nem. Vereins Deutscher Ingenieure/Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik) 2617 Blat 10 (list 10) in najnovejši med njimi, mednarodni standard ISO (angl. International Organization for Standardization) 10360-10, ki bo podrobneje predstavljen v nadaljevanju.

5.1 Standard ASME B89.4.19

Kot je omenjeno zgoraj, je bil ASME B89.4.19 prvi standard, ki je poenotil področje preizkusov in deklariranje natančnosti laserskih sledilnikov. Standard predpisuje uporabo treh različnih tipov preizkusov za odkrivanje pogreškov oz. določanje natančnosti, in sicer preizkus dolžine (dolžinski etalon), preizkus enote za merjenje dolžin in preizkus laserskega sledilnika v obeh krožnih legah. V tem poglavju ne predstavljam samih preizkusov po standardu ASME B89.4.19, ampak se osredotočam na prednosti in slabosti omenjenega standarda. Razlog je v tem, da je letos (2016) izšel standard ISO 10360-10, trenutno najbolj izpopolnjen standard za preizkus laserskih sledilnikov, ki povzema prednosti standarda ASME B89.4.19 in obenem odpravlja njegove slabosti.

Prednosti ASME B89.4.19

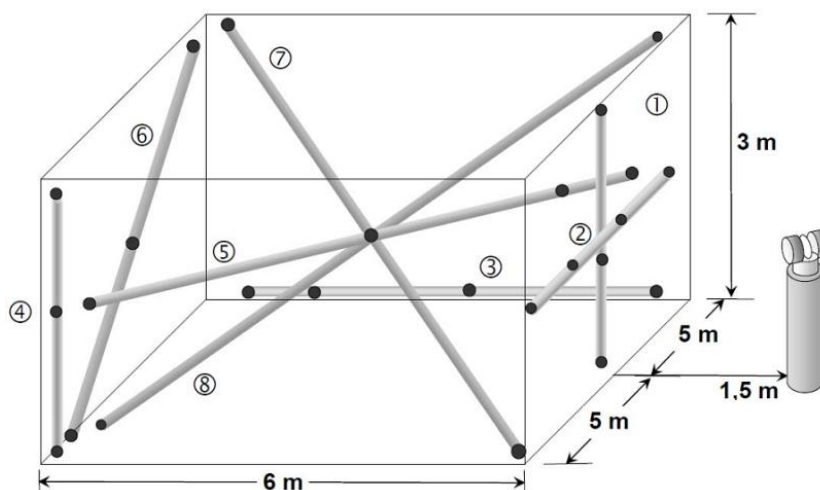
- Ločitev dolžinskih in prostorskih preizkusov omogoča testiranje laserskega sledilnika na mejnem dosegu enote za merjenje dolžin, kar dovoljuje uporabo etalonov manjših dolžin (kot je dolžina 2,3 m) pri preizkusu natančnosti na celotnem merilnem območju.
- Vključitev preizkusa laserskega sledilnika v obeh krožnih legah omogoča hiter in učinkovit preizkus delovanja laserskega sledilnika. Preizkus v obeh krožnih legah je idealen, ker je občutljiv na številne pogreške laserskega sledilnika in ne potrebuje nobenega etalona za njegovo izvedbo.
- Veliko preizkusov, predpisanih s standardom, je občutljivih na različne geometrijske ali optične pogreške laserskega sledilnika. Kot na primer preizkus merjenja dolžin, izveden na štirih različnih smereh Hz kroga (0° , 90° , 180° in 270°), je občutljiv na ekscentričnosti kotnega enkoderja za čitanje Hz smeri.

Slabosti ASME B89.4.19

- Standard predpisuje večje število odvečnih preizkusov. Določa na primer, da je potrebno preizkus vertikalne dolžine izvesti v štirih različnih horizontalnih smereh (0° , 90° , 180° in 270°). Glede na znane pogreške laserskega sledilnika zadostuje že preizkus v eni smeri, saj azimut ne vpliva na vertikalne meritve dolžin – pri merjenju vertikalne dolžine je azimut nespremenjen. Prav tako je nepotreben dvojni preizkus diagonalne dolžine na razdalji 3 in 6 m. Preizkus na 3 m razdalji je bolj občutljiv na pogreške. Pri preizkusu laserskega sledilnika v dveh krožnih legah lahko izpustimo preizkus na oddaljenosti 3 m od sledilnika, saj merjenje na 1 in 6 m od sledilnika zadostujejo za odkrivanje pogreškov, odvisnih od oddaljenosti etalona od laserskega sledilnika.
- Obstaja tudi veliko število simetričnih oz. zelo podobnih postavitv etalona, ki se odražajo na zelo slabi občutljivosti ali celo neobčutljivosti na pogreške. Izboljšavo v tem primeru predstavljajo asimetrične postavitve dolžinskega etalona, ki jih v svoj koncept preizkusov vključuje standard ISO 10360-10.
- Standard se z določenimi preizkusi osredotoča na ločevanje vplivov delovanja posameznih komponent laserskega sledilnika (enkoder za Hz smeri, enkoder za vertikalne smeri, enota za merjenje dolžine) ne glede na to, da vse komponente sestavljajo soodvisen sistem za merjenje tridimenzionalnih koordinat.

5.2 Standard VDI/VDE 2617 Blat 10

VDI/VDE 2617 Blat 10 (list 10) predpisuje preizkus laserskega sledilnika z merjenjem velikega števila dolžin, postavljenih v različne smeri. Standard v tem primeru obravnava laserski sledilnik kot enoten sistem in ne poskuša izolirati posameznih pogreškov.



Slika 29: Merjenje dolžin, postavljenih v različne smeri (Osnetek ISO/WD 10360-10)

Prednosti VDI/VDE 2617 Blat 10

- Standard zahteva merjenje nekaterih zelo velikih razdalj, ki se zelo približajo primerom oz. namenu, za katerega se uporabljajo laserski sledilniki.
- V postopku preizkusov obstaja nekaj zanimivih položajev laserskega sledilnika ali etalona, ki znatno povečajo občutljivost za nekatere pogreške. Na primer pri postavitvi dolžinskega etalona 1,5 m od sledilnika in 1,5 m pod ali nad horizontalno ravnino sledilnika povečamo občutljivost za pogrešek nevertikalnosti stojliščne osi (podobno kot pri pogrešku alhidanj libel tahimetra) laserskega sledilnika. Ta pogrešek je eden težjih za odkrivanje.
- Standard je vpeljal dodaten zanimiv preizkus, in sicer merjenje velikosti in oblike sfernega etalona s sfernim reflektorjem. To je eden od zelo uporabnih preizkusov, saj sferni reflektorji niso brez konstrukcijskih napak.

Slabosti VDI/VDE 2617 Blat 10

- Standard omogoča veliko fleksibilnost pri izbiri razdalj med samim preizkusom. Tu se pojavi riziko, da zaradi slabe izbire razdalj ne bi odkrili določenih pogreškov laserskega sledilnika.
- Ker dolžinski preizkusi niso ločeni od volumetričnih preizkusov dolžin, je potrebno določena merjenja opraviti na zelo dolgih dolžinah. Umerjanje zelo dolgih dolžin pa je zahtevno in mukotrpno delo.
- Preizkus v dveh krožnih legah je opisan samo kot predlog hitrega preizkusa delovanja laserskega sledilnika, čeprav gre v tem primeru za enega najboljših preizkusov. V praksi je preizkus v dveh krožnih legah nepogrešljiv in ga je priporočljivo opraviti tudi med preizkusom po standardu VDI/VDE 2617 Blat 10.

5.3 Standard ISO 10360-10

List 10 standarda ISO 10360, ki je izšel letos (2016) in združuje najboljše lastnosti standardov ASME B89.4.19 in VDI/VDE 2617 Blat 10, določa preizkuse delovanja laserskih sledilnikov z merjenjem umerjenih dolžinskih etalonov, sfernih etalonov in površin v skladu s specifikacijami proizvajalca. Prav tako določa preizkuse periodičnega preverjanja, ki omogočajo uporabniku, da občasno preveri delovanje laserskega sledilnika. Preizkusi delovanja in vnovično preverjanje, podani v tem delu ISO 10360, se uporabljajo samo za laserske sledilnike v kombinaciji s krogelnim reflektorjem.

Standardi, ki pripadajo družini ISO 10360, so novejši standardi, ki jih je pripravila in sprejela tehnična komisija ISO/TC 213 (Naprave za dimenzijske in geometrijske meritve, podajanje in preverjanje specifikacij). S temi standardi so natančno določeni postopki, meritve, pravila in enačbe za izračun natančnosti preizkušanih naprav in uporabljenega pribora za merjenje koordinat.

V omenjeno družino spadajo naslednji standardi:

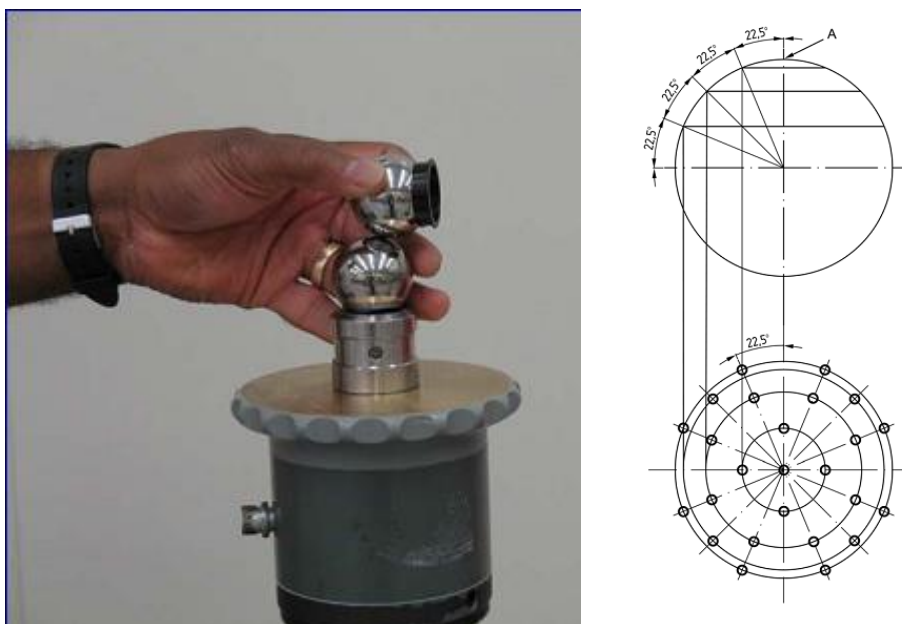
- ISO 10360: Specifikacija geometrijskih veličin izdelka – Preizkusi za sprejemljivost in ponovno overjanje koordinatnih merilnih strojev (KMS),
- ISO 10360-1: Slovar,
- ISO 10360-2: KMS za merjenje dolžinskih mer,
- ISO 10360-3: KMS z osjo rotacijske mize kot četrto osjo,
- ISO 10360-4: KMS, uporabljeni kot merilni skenerji,
- ISO 10360-5: KMS, uporabljeni kot enotipalni in večtipalni sondirni sistemi,
- ISO 10360-6: Ocena napak pri računanju značilnosti Gaussove porazdelitve,
- ISO 10360-7: KMS, opremljeni s sistemi za obdelavo slik,
- ISO 10360-8: KMS z optično distančnimi senzorji,
- ISO 10360-9: KMS z večtipalnimi sondirnimi sistemi,
- ISO 10360-10: Laserski 3D merilniki za merjenje razdalj točka-točka.

V nadaljevanju so predstavljeni preizkusi, predpisani s standardom ISO 10360-10. Preizkusi se delijo na 3 tipe:

- merjenje velikosti in oblike sfernega etalona (angl. Probing size and form error),
- preizkus položajnih pogreškov v dveh krožnih legah (angl. Location errors; two-face test),
- preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona (angl. Length errors).

5.3.1 Merjenje velikosti in oblike sfernega etalona

Namen preizkusa je ocena zmožnosti določitve koordinat posameznih točk v prostoru. Merimo koordinate 25 točk na etalonu – sferi. Izmerjene koordinate uporabimo za izračun sfere, ki se tem točkam najbolj prilega. Uporabimo metodo najmanjših kvadratov popravkov merjenih količin (MNK).



Slika 30: 25 točk, enakomerno razporejenih po polovici sfernega etalona: 1 točka na polu sfere, 4 točke (enakomerno razporejene) $22,5^\circ$ pod polom, 8 točk (enakomerno razporejenih) 45° pod polom in rotiranih za $22,5^\circ$ relativno na prejšnjo skupino točk, 4 točke (enakomerno razporejene) $67,5^\circ$ pod polom in rotiranih za $22,5^\circ$ relativno na prejšnjo skupino točk, 8 točk (enakomerno razporejenih) 90° pod polom in rotiranih za $22,5^\circ$ relativno na prejšnjo skupino točk (Phillips S. D., 2009; Osnutek ISO/WD 10360-10)

Razlika med premerom izračunane sfere po MNK in premerom sfernega etalona je napaka v velikosti sfere. Razlike med radijem izračunane sfere po MNK in oddaljenostjo 25 merjenih točk od središča sfere pa je napaka oblike sfere. Kakršnakoli napaka v obliki sfernega reflektorja vpliva na rezultate preizkusa. Standard predpisuje tudi velikost sfernega etalona. Nominalni premer etalona naj ne bi bil manjši od 10 mm in ne večji od 51 mm, prav tako mora biti etalon kalibriran za premer in obliko, ker je natančnost laserskih sledilnikov odvisna od oddaljenosti, standard predpisuje, na kateri oddaljenosti je potrebno opraviti preizkus.

Preglednica 1: Geometrija merske baze in vrsta tarč pri merjenju sfernega etalona
(ISO 10360-10:2016)

Oddaljenost od laserskega sledilnika	Obvezno za merske tarče	Višina relativna na center rotacije laserskega sledilnika
<2 m*	SMR, SRC, ODR (ang. optical distance sensor and retroreflector combination, npr. ročni triangulacijski laserski skener)	~ enaka višina
~ 10 m	SRC, ODR	več kot 1 m nad ali pod

* Če proizvajalec navaja, da se SRC in ODR tarče uporabljajo na dolžinah, daljših od 2 metrov, se preizkus opravi na najkrajši možni oddaljenosti, določeni za uporabo SRC in ODR.

5.3.2 Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah

Preizkus v dveh krožnih legah je najpreprostejši in zelo občutljiv preizkus. V standardu je priporočeno, da se ta preizkus opravi najprej, saj s svojo občutljivostjo hitro in učinkovito odkrije določene pogreške laserskega sledilnika. Kot sem že omenil, je preizkus sila preprost, vse kar je potrebno narediti je, da izmerimo položaj tarče v obeh krožnih legah, na predpisani oddaljenosti od laserskega sledilnika in na treh različnih smereh horizontalnega enkoderja (različen azimut). Skupno je potrebno opraviti 18 merjenj, ki so v spodnji tabeli razčlenjena po posameznih serijah.

Preglednica 2: Značilnosti merske baze pri merjenju v dveh krožnih legah
(ISO 10360-10:2016)

Številka položaja	Oddaljenost od laserskega sledilnika*	Opis položaja merske tarče pri preizkusu v dveh krožnih legah	Azimut glede na laserski sledilnik*
1–3	1,5 m	merska tarča vsaj 1 m pod centrom rotacije LS	0°, 120°, 240°
4–6	1,5 m	merska tarča na enaki višini kot center rotacije LS	0°, 120°, 240°
7–9	1,5 m	merska tarča vsaj 1 m nad centrom rotacije LS	0°, 120°, 240°
10–12	6 m	merska tarča vsaj 1 m pod centrom rotacije LS	0°, 120°, 240°
13–15	6 m	merska tarča na enaki višini kot center rotacije LS	0°, 120°, 240°
16–18	6 m	merska tarča vsaj 1 m nad centrom rotacije LS	0°, 120°, 240°

* Odstopanje oddaljenosti od laserskega sledilnika mora biti manj kot 10 % predpisane oddaljenosti, odstopanje smeri azimuta pa manj kot 5 %.

Razlika med položajema točke v prvi in drugi krožni legi je položajni pogrešek, ki ga iščemo. Za izračun pogreška uporabimo dolžino, izmerjeno v prvi krožni legi, saj nas ne zanima pogrešek v odvisnosti od dolžine, ampak od horizontalne in vertikalne smeri.



Slika 31: Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah (Phillips S. D., 2009)

Če zapišemo dve izmerjeni lokaciji ene točke kot $(\theta_1, \varphi_1, R_1)$ in $(\theta_2, \varphi_2, R_2)$ v sfernih koordinatah, je enačba za izračun položajnega pogreška:

$$L = R_1 \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + [(|\theta_1 - \theta_2|) \cos \varphi_1]^2}$$

R – izmerjena dolžina

θ – azimut v radianih

φ – polarni kot v radianih

5.3.3 Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona

Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona, postavljenega v različne smeri, odkriva vedenje oz. vpliv pogreškov na natančnost laserskega sledilnika na celotnem merilnem območju. Ker je natančnost merjenja tridimenzionalnih koordinat zelo odvisna od velikosti posameznih pogreškov laserskega sledilnika, lahko trdimo, da se vsi sistematični in slučajni pogreški laserskega sledilnika oz. njegovih komponent direktno prenesejo na natančnost določitve tridimenzionalnih koordinat točke. Preizkus z merjenjem dolžinskega etalona se izvede tako, da se dolžinski etalon (cev iz karbonskih vlaken, ki ima na koncih pritrjene nosilce za krogelni reflektor in kalibrirano dolžino) orientira v različne položaje, glede na stojišče laserskega sledilnika. Z laserskim sledilnikom se nato izmerijo koordinate krajišč etalona, iz njih pa se izračuna (merjena) dolžina etalona. Razlika med kalibrirano in merjeno dolžino je pogrešek pri merjenju dolžinskega etalona ("Length error").



Slika 32: Dolžinski etalon proizvajalca Brunson (www.brunson.us)



Slika 33: Različna položaja postavitve dolžinskega etalona (www.brunson.us)



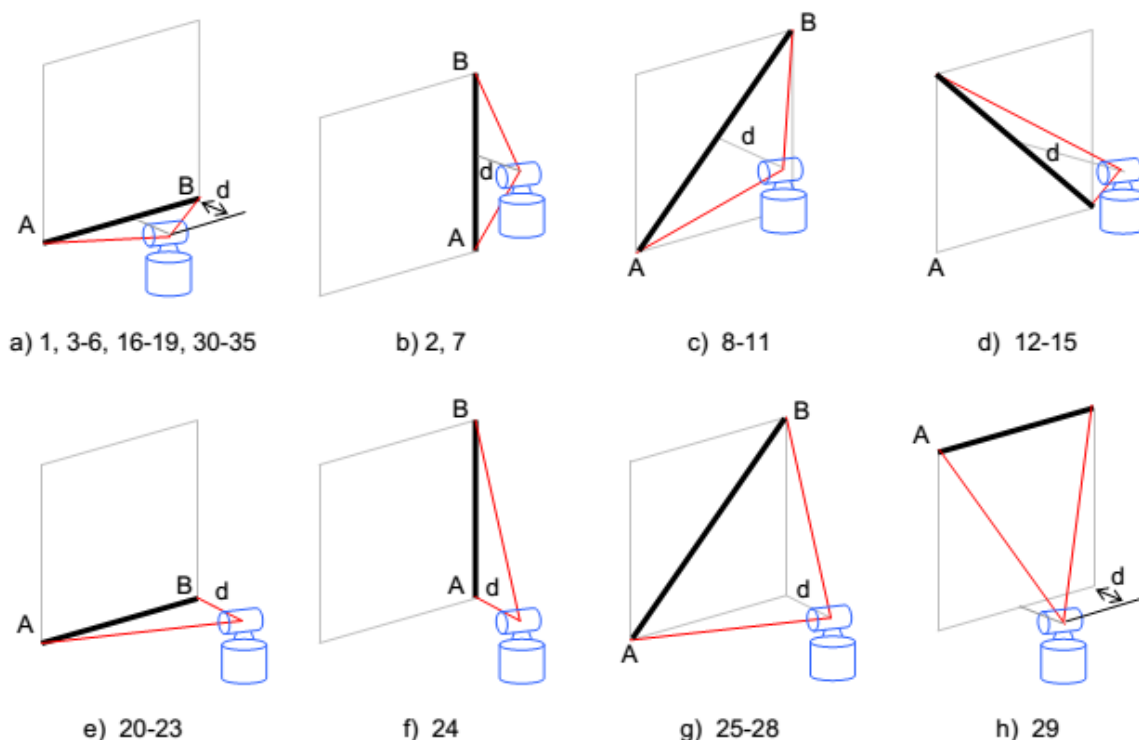
Slika 34: Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona
(www.twitter.com/brunsonus)

Vseh 41 preizkusnih položajev merskega etalona, opisanih v spodnji preglednici, je občutljivih na določeno število pogreškov laserskega sledilnika.

Preglednica 3: Merski položaji dolžinskega etalona (ISO 10360-10:2016)

Številka položaja	Oddaljenost etalona od laserskega sledilnika	Opis položaja dolžinskega etalona pri preizkusu (slika 35)	Azimut glede na laserski sledilnik
1	čim bližje	horizontalno, centrično (krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik), pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik	poljuben azimut
2	čim bližje	vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	poljuben azimut
3–6	3 m	horizontalno, centrično, pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
7	3 m	vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	poljuben azimut
8–11	3 m	desna diagonala, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
12–15	3 m	leva diagonala, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
16–19	6 m	horizontalno, centrično (krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik), pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
20–23	čim bližje	horizontalno, necentrično (eno od krajšč etalona pravokotno na laserski sledilnik) in na enaki višini kot laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
24	čim bližje	vertikalno, necentrično (eno od krajšč etalona pravokotno na laserski sledilnik)	poljuben azimut
25–28	čim bližje	diagonalno, krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik, eno krajšče nad ali pod pravokotnico na ravnino etalona, drugo krajšče pa levo ali desno od laserskega sledilnika	0°, 90°, 180°, 270°
29	čim bližje	horizontalno, centrično, čim višje nad laserskim sledilnikom	poljuben azimut
30–35	čim daljše dolžine*	horizontalno, centrično (krajšči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik), pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik	0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°
36–40	5 testnih dolžin	test 5 dolžin naj bi obsegal vsaj 66 % merilnega dosega enote za merjenje dolžin	poljuben azimut
41	"sintetična" testna dolžina	skladno z aneksom C pri ISO10360-10, uporaba samo pri preizkusih, ko je zahteva po čim manjšem vplivu temperature (meritev dolžinskega etalona, upoštevajoč temperaturni razteznostni koeficient)	poljuben azimut

* Poseben primer "čim daljše dolžine" predpisuje meritev daljšega etalona na večji oddaljenosti od laserskega sledilnika (7–9 m dolg dolžinski etalon na oddaljenosti 7–9 m od laserskega sledilnika).



Slika 35: Različne postavitve etalona pri preizkusu, številke so enake številkam položajem v Preglednici 3 (Osnutek ISO/WD 10360-10)

Ker moramo opraviti 105 preizkusnih merenj dolžine, da zadostimo ostalim delom standarda ISO 10360, je potrebno opraviti, poleg 41 preizkusov, opisanih v Preglednici 3, še 64 dodatnih preizkusov. Ker se vsak laserski sledilnik uporablja za različne namene, je v standardu določeno, da teh dodatnih 64 preizkusov uporabnik ali preizkuševalec izbere sam. Da pa uporabnik ali preizkuševalec ne bi izbral neprimerno položajev merskega etalona ali ponavljal enakih meritev iz Preglednice 3, so v standardu pripravili dve dodatni alternativni možnosti 64 meritev. Ti preizkusi večinoma predstavljajo najboljše dele standarda ASME B89.4.19 in VDI/VDE 2617 Blat 10. V Preglednici 4 so predstavljeni položaji etalona iz standarda ASME B89.4.19.

Preglednica 4: Položaji etalona za dodatna merjenja (ISO 10360-10:2016)

Številka položaja	Oddaljenost etalona od laserskega sledilnika	Opis položaja dolžinskega etalona pri preizkusu	Azimet glede na laserski sledilnik
42–44	3 m	kot položaj št. 7 samo pri drugih azimutih – vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	90°, 180°, 270° relativno na položaj št. 7
45–48	6 m	vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 4

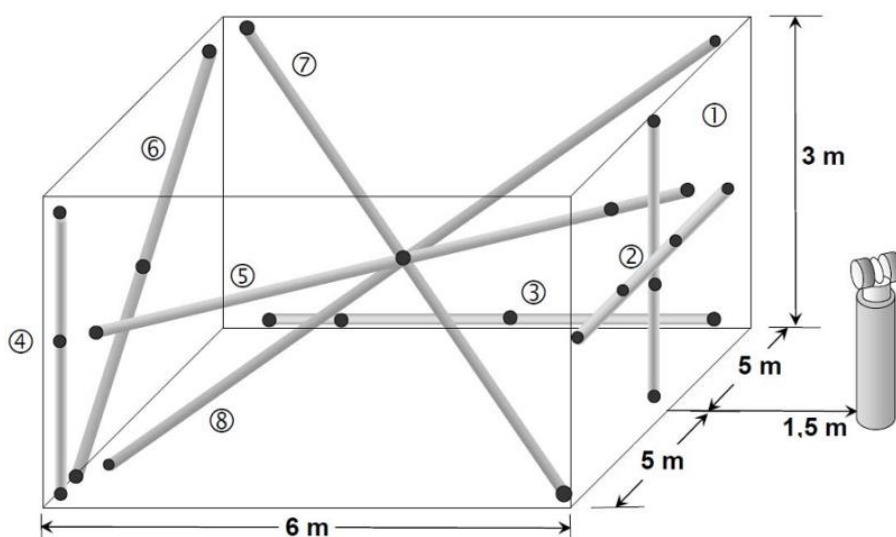
49–52	6 m	desna diagonala, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
53–56	6 m	leva diagonala, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
57–59	čim bližje	kot položaj št. 24 samo pri drugih azimutih – vertikalno, necentrično (eno od krajišč etalona pravokotno na laserski sledilnik)	90°, 180°, 270° relativno na položaj št. 24
60–63	čim bližje	horizontalno, necentrično (eno od krajišč etalona pravokotno na laserski sledilnik) in na enaki višini kot laserski sledilnik, zrcalno kot položaji št. 20–23	0°, 90°, 180°, 270°
64–67	čim bližje	diagonalno, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik, eno krajišče nad ali pod pravokotnico na ravnino etalona, drugo krajišče pa levo ali desno od laserskega sledilnika, nasprotni položaj etalona glede na položaje št. 25–28	0°, 90°, 180°, 270°
68–71	čim bližje	diagonalno, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik, eno krajišče nad ali pod pravokotnico na ravnino etalona, drugo krajišče pa levo ali desno od laserskega sledilnika. zrcalno glede na položaje št. 64–67	0°, 90°, 180°, 270°
72–74	čim bližje	horizontalno, centrično, čim višje nad laserskim sledilnikom	90°, 180°, 270° relativno na položaj št. 29
75–78	6 m	telesna diagonala kocke	0°, 90°, 180°, 270°
79–82	čim bližje	diagonalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik	0°, 90°, 180°, 270°
<i>Preizkus ponovljivosti meritev</i>			
83–86	oddaljenost enaka polovici dolžine etalona	horizontalno, centrično (krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik), pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut
87–90	oddaljenost enaka dvakratniku dolžine etalona	horizontalno, centrično (krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik), pravokotno in na enaki višini kot laserski sledilnik (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut
91–94	oddaljenost enaka polovici dolžine etalona	vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut
95–98	oddaljenost enaka dvakratniku dolžine etalona	vertikalno, center na enaki višini kot laserski sledilnik, krajišči etalona ekvidistančni glede na laserski sledilnik (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 4

99–102	3 m	v kateri koli radialni smeri, kjer bližnje krajišče etalona oddaljeno 3 m od laserskega sledilnika (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut
103–105	6 m	v kateri koli radialni smeri, kjer bližnje krajišče etalona oddaljeno 6 m od laserskega sledilnika (meritve se opravijo v 4 serijah)	poljuben azimut

Na Sliki 36 in 37 so predstavljeni položaji meritev večinoma prevzeti iz standarda VDI/VDE 2617 Blat 10. V tej alternativni možnosti 64 meritev je laserski sledilnik postavljen na sredini daljše stranice merskega volumna in od nje odmaknjen 1,5 m. Višina postavitve laserskega sledilnika je takšna, da sta krajišči etalona enako oddaljeni od laserskega sledilnika. Merski položaji so določeni z osmimi merskimi linijami. Ena od možnih postavitve merskih linij je predstavljena na Sliki 36. Dovoljene so tudi drugačne postavitve merskih linij.

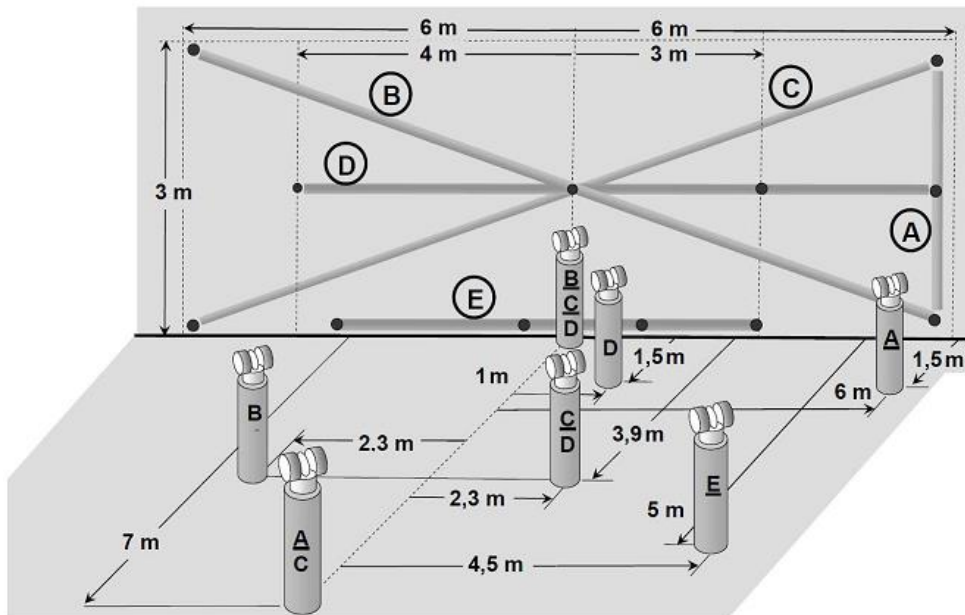


Slika 36: Položaji meritev, prevzeti iz standarda VDI/VDE 2617 Blat 10 (Osnetek ISO/WD 10360-10)

Tej alternativni možnosti pripada merilno območje velikosti 10 m x 6 m x 3 m (dolžina x širina x višina). Če se laserski sledilnik uporablja za merjenje manjših delov, za preizkus zadostuje merilno območje velikosti 5 m x 3 m x 2 m. So pa, glede na različne namene uporabe laserskih sledilnikov, dovoljena tudi merilna območja drugačnih dimenzij. Na Sliki 36 je sestav 8 merskih linij, sestavljen iz 33 posamičnih merjenih dolžin. Iz tega sestava je potrebno z različnimi kombinacijami določiti 64 dodatnih meritev. Vzdlž vsake merske linije je potrebno izmeriti vsaj 3 posamezne dolžine na različnih delih horizontalnega kroga. To pomeni, da je potrebno po vsakem sklopu meritev laserski sledilnik rotirati okoli njegove vertikalne osi za približno 120°.

Na Sliki 37 in Preglednici 5 je predstavljen sestav (aneks D standarda ISO10360-10), ki je alternativa sestavu na Sliki 36. Glavna razlika med sestavoma je, da se na sestavu na Sliki 37 s postavitvijo merskih tarč na steno in zelo natančnim pozicioniranjem ter premikanjem

laserskega sledilnika doseže efekt merjenja merilnega območja, kot je na Sliki 36. Ta način postavitve merilnega območja je največkrat v uporabi, saj je preprostejši za postavitve in kalibracijo.



Slika 37: Sestav iz aneksa D standarda ISO10360-10, ki je alternativa sestavu na Sliki 36 (Osnutek ISO/WD 10360-10)

Preglednica 5: Dopustne najkrajše in najdaljše testne dolžine vzdolž merskih linij sestava na Sliki 37 (Aneks D, ISO 10360-10:2016)

Merska linija	Najkrajša testna dolžina L_{min} [m]	Najdaljša testna dolžina L_{max} [m]	Priporočena najdaljša testna dolžina [m]
A	$L_{min} \geq 0,3$	$2,0 \leq L_{max} \leq 3,0$	3,0
B	$L_{min} \geq 0,3$	$8,1 \leq L_{max} \leq 12,4$	12,0
C	$L_{min} \geq 0,3$	$8,1 \leq L_{max} \leq 12,4$	12,0
D	$L_{min} \geq 0,3$	$6,6 \leq L_{max} \leq 10,0$	9,0
E	$L_{min} \geq 0,3$	$4,0 \leq L_{max} \leq 6,0$	6,0

5.3.4 Predstavitev rezultatov preizkusov

V aneksu A standarda ISO 10360-10:2016 se nahajajo predlogi obrazcev za zapis osnovnih lastnosti, delovnih pogojev in rezultatov preizkusov. Standard ne predpisuje oblike, ampak minimalno vsebino, ki jo morajo vsebovati obrazci. S tem je dopuščena razširitev obrazcev z dodatnimi podatki, saj lahko proizvajalec glede na način uporabe laserskega sledilnika (postavitve laserskega v različne položaje npr. horizontalno, vertikalno, obrnjeno na glavo) poda podatke preizkusov za različne načine uporabe.

Preglednica 6: Predlagana vsebina obrazca, ki naj vsebuje splošne tehnične lastnosti in delovne pogoje (Aneks A, ISO 10360-10:2016)

Obrazec 1: Splošne tehnične lastnosti in delovni pogoji			
DELOVNI POGOJI			
<i>Merilno območje</i>			
<i>Dolžina (doseg)</i>		Min. ____ m	Max. ____ m
<i>Horizontalni kot (azimut)</i>		Min. ____°	Max. ____°
<i>Vertikalni kot (naklon/zenitna razdalja)</i>		Min. ____°	Max. ____°
ali			
<i>Dolžina x širina x višina</i>		____ m x ____ m x ____ m	
a.	<i>Temperaturno območje</i>		
	Delovanje	Min. ____°C	Max. ____°C
	Mejni temperaturni gradient	Min. ____°C/m	Max. ____° C/m
b.	<i>Relativna vlažnost</i>		
	Delovanje	Min. ____ %RH	Max. ____ %RH
c.	<i>Zračni tlak</i>		
	Delovanje	Min. ____ Pa	Max. ____ Pa
d.	<i>Osvetlitev delovnega območja:</i> Proizvajalec je dolžan ugotoviti, če obstaja osvetlitev, ki vpliva na kakovost izvedbe pri določenih primerih.		
e.	<i>Električni podatki</i>	Napetost ____ V	Tok ____ A
		Frekvenca ____ Hz	Prenapetost/Podnapetost ____ V
		Max. prehodna prenapetost ____ V	Trajanje prehodne prenapetosti ____ s
f.	<i>Dopustne postavitve (horizontalno, vertikalno ipd.)</i>	_____	
g.	<i>Tip tarče:</i> tekom preizkusa je potrebno zapisati uporabljen tip in premer tarče.	Premer ____ mm	Tip _____
h.	<i>Kalibrirani dolžinski etalon</i>		
	Temp. razteznostni koeficient α	Min. ____ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Max. ____ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
	Negotovost α		Max. ____ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
i.	<i>Strategija vzorčenja:</i> Proizvajalec mora navesti čas povprečenja in frekvenco vzorčenja, ki je še v okviru deklariranih zmožnosti.	Čas povprečenja ____ s	Frekvenca vzorčenja ____ točk/s
j.	<i>Čas zagona (ogrevanja) naprave</i>	____ minut	
OMEJITVENI POGOJI (preseganje navedenih pogojev lahko poškoduje napravo)			
k.	<i>Temperaturno območje</i>	Min. ____°C	Max. ____°C
l.	<i>Relativna vlažnost</i>	Min. ____ %RH	Max. ____ %RH
m.	<i>Zračni tlak</i>	Min. ____ Pa	Max. ____ Pa

Preglednica 7: Obrazec, ki vsebuje podatke proizvajalca o merski zmogljivosti in rezultatih preizkusov
(Aneks A, ISO 10360-10:2016)

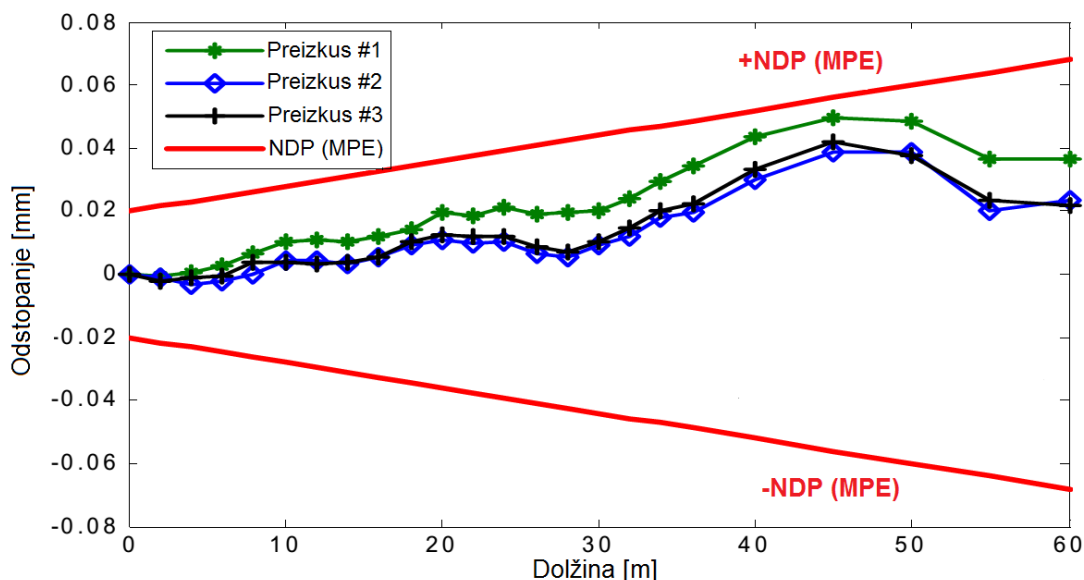
Obrazec 2: Podatki proizvajalca o merski zmogljivosti in rezultatih preizkusov (vse enote v μm)	
Ker so za različne preizkuse dovoljeni različni podatki NDP, se lahko ta tabela prilagodi oz. podaljša, da zajame popolno specifikacijo.	
Preizkus laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona	NDP(MPE)
	"tipična" natančnost (polovica NDP)
	negotovost rezultata preizkusa
	opravi / ni opravi
Meritev dolžinskega etalona upoštevajoč temp. razteznosti koeficient	NDP(MPE)
	"tipična" natančnost (polovica NDP)
	negotovost rezultata preizkusa
	opravi / ni opravi
Merjenje velikosti in oblike sfernega etalona	NDP(MPE)
	"tipična" natančnost (polovica NDP)
	negotovost rezultata preizkusa
	opravi / ni opravi
	NDP(MPE)
	"tipična" natančnost (polovica NDP)
	negotovost rezultata preizkusa
	opravi / ni opravi
Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah	NDP(MPE)
	"tipična" natančnost (polovica NDP)
	negotovost rezultata preizkusa
	opravi / ni opravi
Preizkus opravi	
Datum	
Serijska številka	
Končni rezultat preizkusa (opravi / ni opravi)	

Za zapis rezultatov preizkusa laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona standard predpisuje, da se rezultati zapišejo v preglednici za vsak merski položaj posebej. Primer preglednice je prikazan spodaj.

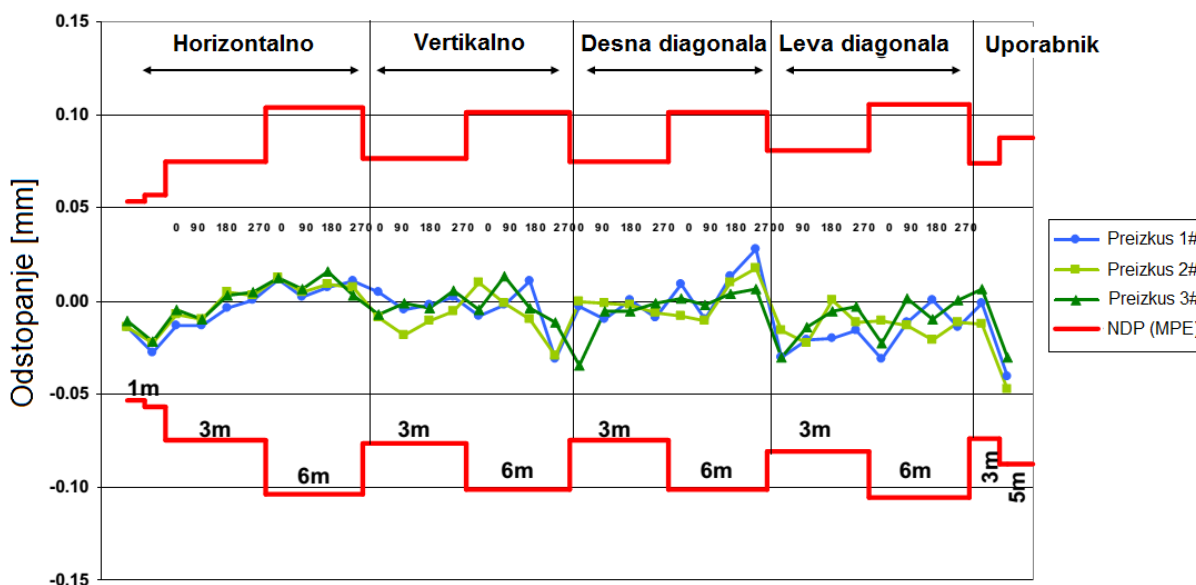
Preglednica 8: Primer preglednice za zapis rezultatov preizkusa laserskega sledilnika z merjenjem dolžinskega etalona (ISO 10360-10:2016)

Enačba za izračun NDP(MPE) 1-35 & 41		poljubna oblika enačbe	
Enačba za izračun NDP(MPE) pri testu dolžin (položaji 36-40)		A+(B/K)L oblika enačbe	
Dodatne enačbe za izračun NDP(MPE)		poljubna oblika enačbe	
Dodatne enačbe za izračun NDP(MPE)		poljubna oblika enačbe	
Številka položaja	NDP(MPE)	Številka položaja	NDP(MPE)
1		22	
2		23	
;		;	
;		41	
21			

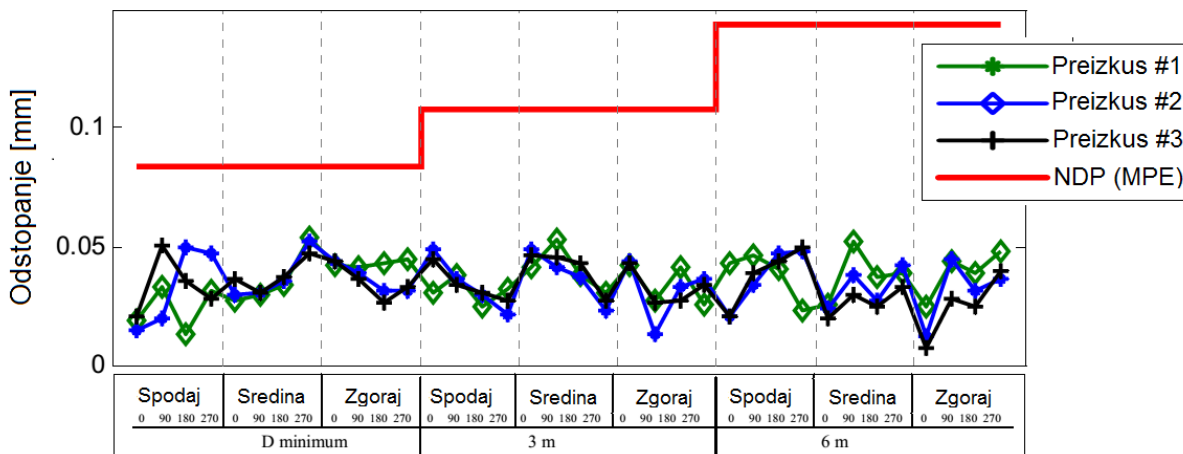
Ker gre v večini primerov za tabelarni zapis velike količine podatkov, se zaradi boljše preglednosti večina proizvajalcev in preizkuševalcev poslužuje grafične predstavitve rezultatov preizkusov s pomočjo grafov. Na spodnjih slikah je nekaj primerov rezultatov različnih preizkusov, opravljenih v skladu s standardom ASME B89.4.19.



Slika 38: Rezultati uspešno opravljenega preizkusa merjenja dolžine (Phillips S. D., 2009)



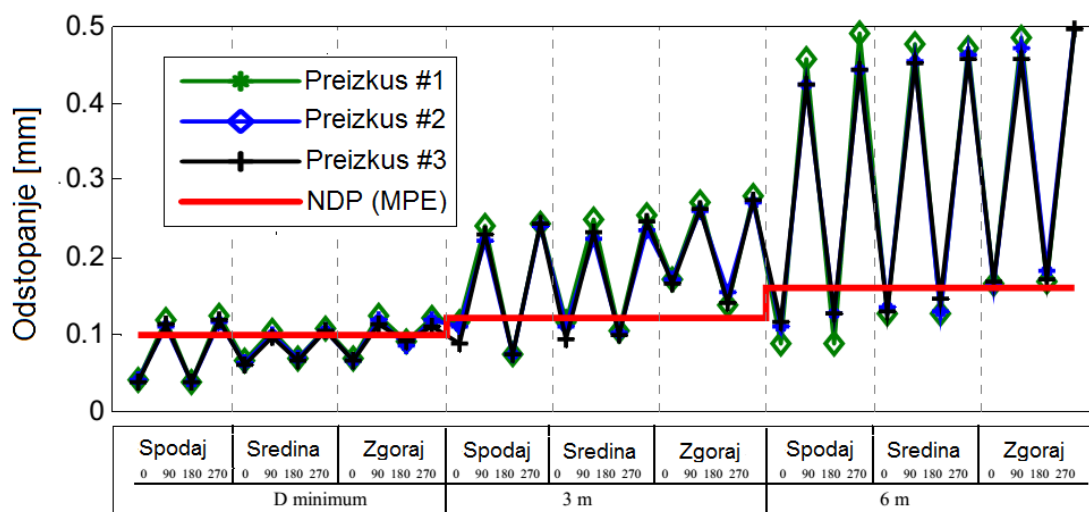
Slika 39: Rezultati uspešno opravljenega preizkusa merjenja dolžinskega etalona (Phillips S. D., 2009)



Slika 40: Rezultati uspešno opravljenega preizkusa določitve položaja v dveh krožnih legah (Phillips S. D., 2009)

Na prejšnjih slikah so bili predstavljeni rezultati laserskega sledilnika, ki ni presegel vrednosti NDP (MPE). To pomeni, da je preizkus prestal uspešno in da meritve z njim dosegajo natančnost, ki jo zagotavlja proizvajalec ali pričakuje uporabnik. Vrednost NDP (MPE) lahko za določene primere uporabe določi uporabnik sam, naj pa ne bi bila boljša kot jo deklarira proizvajalec.

Na spodnji sliki so predstavljeni rezultati preizkusa laserskega sledilnika, ki znatno presega vrednost NDP, kar ima za posledico neuspešno opravljen preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah. S slike je dobro razvidno, kako odstopanje znatno narašča z večanjem oddaljenosti od laserskega sledilnika. V takem primeru proizvajalci predlagajo, da se preizkus opravi ponovno, in sicer po postopku kalibracije laserskega sledilnika (če ta ni bil opravljen pred pričetkom preizkusa), ki ga predpisuje proizvajalec.



Slika 41: Rezultati neuspešno opravljenega preizkusa določitve položaja v dveh krožnih legah (Phillips S. D., 2009)

Postopek kalibracije je pri večini proizvajalcev hiter in učinkovit način odkrivanja nepravilnosti v delovanja laserskega sledilnika in je implementiran v programsko opremo laserskega sledilnika. Če je rezultat preizkusa kljub uspešno opravljeni kalibraciji sistema še vedno negativen, je potrebno laserski sledilnik poslati pooblaščenemu serviserju ali proizvajalcu, da odpravi napako v delovanju.

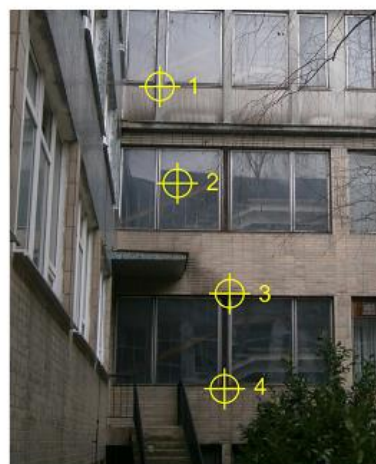
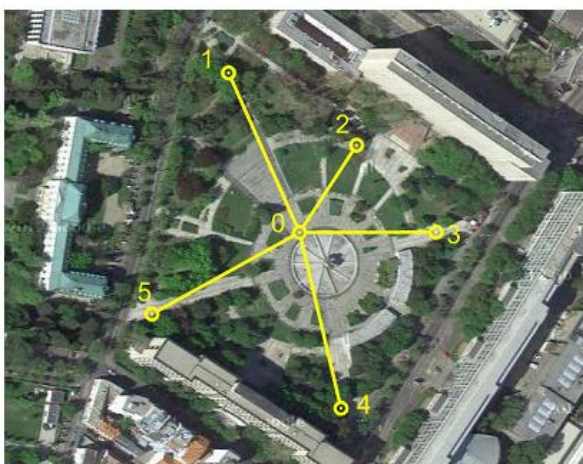
6 STANDARDI ZA PREIZKUS ELEKTRONSKIH TAHIMETROV

V družino mednarodnih standardov ISO 17123 spadajo standardi, ki jih je pripravila in sprejela tehnična komisija TC127/SC6 – Geodetski in merski instrumenti. S temi standardi so natančno določeni postopki preizkusov, postopek merjenja, ter pravila in enačbe za izračun natančnosti geodetskih instrumentov.

V omenjeno družino spadajo naslednji standardi:

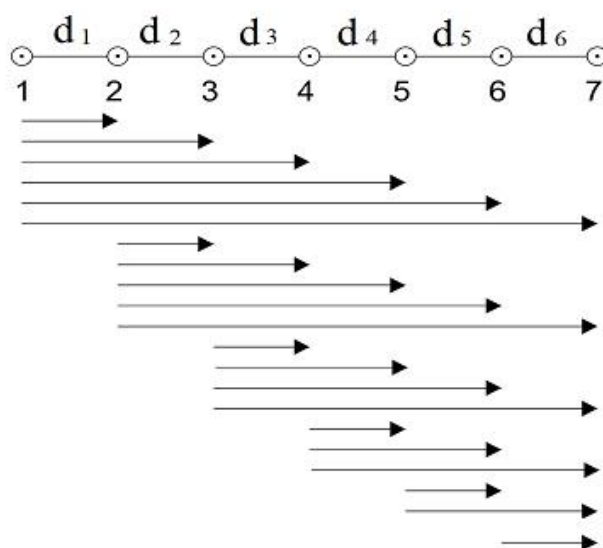
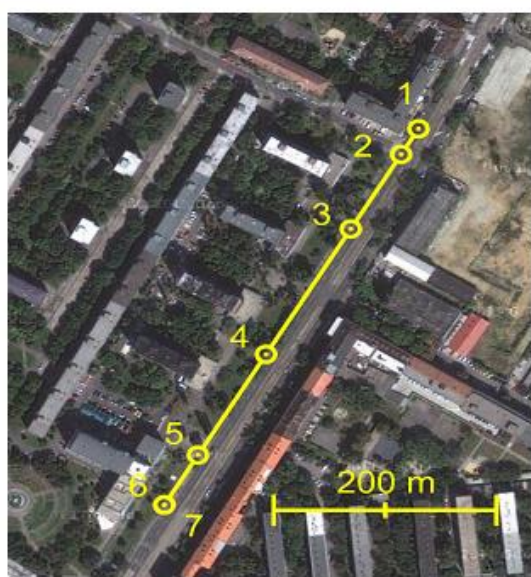
- ISO 17123-1: Teorija (nanaša se na optiko in optične instrumente),
- ISO 17123-2: Nivelirji,
- ISO 17123-3: Teodolit,
- ISO 17123-4: Elektronski razdaljemerji,
- ISO 17123-5: Elektronski tahimetri,
- ISO 17123-6: Ploskovni laserski nivelirji,
- ISO 17123-7: Grezila in
- ISO 17123-8: GNSS sprejemniki.

ISO 17123-3 predpisuje postopek določitve praktične natančnosti teodolita pri merjenju horizontalnih in vertikalnih kotov oz. zenitnih razdalj. Natančnost instrumenta je izražena z empirično standardno deviacijo merjene horizontalne smeri in standardno deviacijo merjene zenitne razdalje, merjenih v enem girusu oz. eni ponovitvi in v obeh krožnih legah. Popolni preizkus po ISO 17123-3 predpisuje izvedbo meritev dvakrat v štirih serijah, ob različnih vremenskih pogojih (sončno, oblačno), ki pa naj ne bi bili ekstremni. V vsaki seriji meritev se izvedejo trije girusi (tri ponovitve), v katerih je opazovanih pet točk pri horizontalnih smereh in štiri točke pri vertikalnih smereh. Merjenja izvajamo v obeh krožnih legah. Po preizkusu opravimo še statistično testiranje. Statistično testiranje uporabimo za analizo in interpretacijo rezultatov, dobljenih iz opravljenih meritev na terenu.



Slika 42: Merski bazi za določitev praktične natančnosti teodolita (Sokol in sod., 2014)

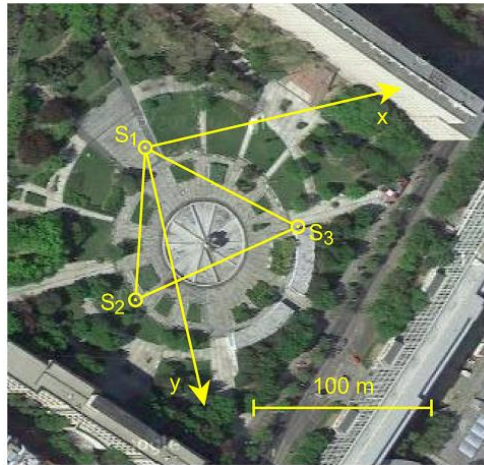
ISO 17123-4 predpisuje postopek določitve praktične natančnosti razdaljema. S preizkusom določimo največjo natančnost, ki jo lahko dosežemo z uporabljenim elektrooptičnim razdaljemerom in ostalo uporabljeno opremo v določenih vremenskih pogojih. Empirični standardni odklon meritve ene razdalje je določen iz kvadratov popravkov izmerjenih razdalj v vseh kombinacijah. Natančnost meritev je izražena z empiričnim standardnim odklonom ene posamezne izmerjene razdalje. Pred pričetkom preizkusa elektronskega razdaljema po standardu ISO 17123-4 je treba zbrati nekaj podatkov in opraviti nekaj izračunov, ki so potrebni za pravilno testiranje instrumenta. Glede na mersko frekvenco razdaljema postavimo testno bazo, ki jo bomo uporabili za izvajanje preizkusa elektrooptičnega razdaljema. Vse testne dolžine morajo biti izmerjene v istem dnevu. Standard priporoča uporabo prisilnega centriranja, saj z uporabo tega eliminiramo pogrešek centriranja. Med merjenjem je potrebno večkrat izmeriti vremenske parametre (temperaturo zraka in zračni tlak), da lahko kasneje izračunamo meteorološke popravke, s katerimi popravimo izmerjene dolžine.



Slika 43: Merska baza za določitev praktične natančnosti razdaljema (Sokol in sod., 2014)

ISO 17123-5 predpisuje postopek določitve praktične natančnosti elektronskega tahimetra pri določitvi koordinat. Empirični standardni odklon koordinate je vsota najmanjših kvadratov popravkov določene koordinate ene točke. Popolni preizkus po ISO 171123-5 je namenjen za izračun natančnosti meritev z uporabo elektronskih tahimetrov. Praktična natančnost elektronskih tahimetrov je določena z empiričnim standardnim odklonom koordinate, merjene enkrat v obeh krožnih legah. Postopek zahteva, da se meritve izvedejo v istem dnevu in v treh serijah meritev. Z meritvami določimo koordinate treh stojišč testne baze. Testno bazo v tem primeru predstavlja trikotnik, najbolje enakostraničen, z dolžino stranic med 100 in 200





m. Po opravljenem preizkusu opravimo še statistično testiranje, ki ga uporabimo za analizo in interpretacijo rezultatov, dobljenih iz opravljenih meritev na terenu.



Slika 44: Skica merske baze za določitev praktične natančnosti tahimetra (Sokol in sod., 2014)

7 PRIMERJAVA TEHNIČNIH LASTNOSTI LASERSKIH SLEDILNIKOV IN ELEKTRONSKIH TAHIMETROV

Preglednica 9: Primerjava tehničnih lastnosti laserskih sledilnikov in elektronskih tahimetrov



PROIZVAJALEC	Leica Geosystems AG			
TIP	laserski sledilnik		elektronski tahimeter	
MODEL	AT960(930)	AT402	Nova TS60	FlexLine TS06plus
				
MERJENJE DOLŽIN				
Tip	AIFM	ADM	EDM	EDM
Natančnost	±0,5 µm/m	±10 µm	0,6 mm + 1 ppm	1,5 mm + 2 ppm
Ločljivost	/	0,1 µm	0,1 mm	0,1 mm
Doseg	80 m (AT930) 20 m (AT960-MR) 80 m (AT960-LR) 80 m (AT960-XR)	160 m	3500 m	3500 m
MERJENJE DOLŽIN BREZ UPORABE REFLEKTORJA				
Natančnost	/	/	2 mm + 2 ppm (0–500 m) 4 mm + 2 ppm (>500 m)	2 mm + 2 ppm (0–500 m) 4 mm + 2 ppm (>500 m)
Ločljivost	/	/	0,1 mm	0,1 mm
Doseg	/	/	>1000 m	>500 m
MERJENJE SMERI				
Natančnost	±15 µm + 6 µm/m	±15 µm + 6 µm/m	0,5"	1" / 2" / 3" / 5" / 7"
Ločljivost	0,07"	0,07"	0,1"	0,1"
Območje meritev (Hz/V)	±360° / ±145°	±360° / ±145°	±360° /	±360° /
MERJENJE KOORDINAT				
Natančnost	±15 µm + 6 µm/m	±15 µm + 6 µm/m	/	/
OSTALO				
Mere (d x š x v, [mm])	258x258x477	221x188x351	248x248x360	225x214x316
Teža (kg)	13,8 (instr.)/ 1,65 (kontr.)	7,3 (instr.)/ 0,8 (kontr.)	7,27	4,2 – 4,5
Stopnja zaščite (voda, prah)	IP54	IP54	IP65	IP55
Območje delovanja (temp. °C, relat. vlažnost)	od 0 do +40, do največ 95 %	od 0 do +40, do največ 95 %	od -20 do +50, do največ 95 %	od -20 do +50, do največ 95 %

8 PREGLED TRGA

V naslednjih poglavjih, razdeljenih po proizvajalcih, so predstavljene tehnične lastnosti in natančnosti različnih tipov laserskih sledilnikov, ki jih na trgu ponujajo proizvajalci Leica Geosystems, FARO Technologies Inc in Automated Precision Inc (API).

8.1 FARO Technologies Inc.

Preglednica 10: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika

MODEL	Vantage	ION
		
MERJENJE DOLŽIN		
Tip	TruADM	AIFM
Izvor svetlobe	653–663 nm	633–635 nm
Laserski razred	2	2
Natančnost	16 μm + 0,8 $\mu\text{m}/\text{m}$	16 μm + 0,8 $\mu\text{m}/\text{m}$ 4 μm + 0,8 $\mu\text{m}/\text{m}$ (IFM)
Ločljivost	0,5 μm	0,5 $\mu\text{m}/$ 0,158 μm (IFM)
Ponovljivost	/	/
Doseg	0–80 m (z izbranimi tarčami)	0–55 m (z izbranimi tarčami)
MERJENJE SMERI		
Natančnost	20 μm + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$	20 μm + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$
Ločljivost	/	/
Ponovljivost	/	/
Območje meritev (Hz/V)	$\pm 360^\circ / 130^\circ$ (+77.9° do -52.1°)	$\pm 270^\circ / 125^\circ$ (+72.5° do -52.5°)
MERJENJE KOORDINAT		
Natančnost	/	/
OSTALO		
Mere (d x š x v, mm)	224 x 224 x 416	311 x 311 x 556
Teža (kg)	12,6 (instr.) / 4,8 (kontr.)	19,5 (instr.) / 5,2 (kontr.)
Stopnja zaščite (voda, prah)	IP52	/
Območje delovanja (temperatura °C, relativna vlažnost)	od -15 do +50, do največ 95 %	od -15 do +50, do največ 95 %

8.2 Leica Geosystems

Preglednica 11: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika

MODEL	AT960 (930)	AT402
		
MERJENJE DOLŽIN		
Tip	AIFM	ADM
Izvor svetlobe	/	/
Laserski razred	2	2
Natančnost	±0,5 μm/m	±10 μm
Ločljivost	/	0,1 μm
Ponovljivost	/	±5 μm
Doseg(Ø)	160 m (AT930) 40 m (AT960-MR) 160 m (AT960-LR) 160 m (AT960-XR)	160 m
MERJENJE SMERI		
Natančnost	±15 μm + 6 μm/m	±15 μm + 6 μm/m
Ločljivost	0,07"	0,07"
Ponovljivost	/	±7,5 μm + 3 μm/m
Območje meritev (Hz/V)	±360° / ±145°	±360° / ±145°
MERJENJE KOORDINAT		
Natančnost	±15 μm + 6 μm/m	±15 μm + 6 μm/m
OSTALO		
Mere (d x š x v, mm)	258 x 258 x 477	221 x 188 x 351
Teža (kg)	13,8 (instr.)/1,65 (kontr.)	7,3 (instr.)/0,8 (kontr.)
Stopnja zaščite (voda, prah)	IP54	IP54
Območje delovanja (temperatura °C, relativna vlažnost)	od 0 do +40, do največ 95 %	od 0 do +40, do največ 95 %

8.3 Automated Precision Inc.

Preglednica 12: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika

MODEL	OMNITRAC2	RADIAN
		
MERJENJE DOLŽIN		
Tip	ADM	IFM+ADM
Izvor svetlobe	/	/
Laserski razred	2	2
Natančnost	$\pm 15 \mu\text{m}$ ali $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$ ali $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$ $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ (IFM)
Ločljivost	/	/
Ponovljivost	/	/
Doseg	0–50 m / 0–80 m (opcija)	0–50 m / 0–80 m (opcija)
MERJENJE SMERI		
Natančnost	$3,5 \mu\text{m/m}$	$3,5 \mu\text{m/m}$
Ločljivost	/	/
Ponovljivost	/	/
Območje meritev (Hz/V)	$\pm 320^\circ / 138^\circ$ (-59° do +79°)	$\pm 320^\circ / 138^\circ$ (-59° do +79°)
MERJENJE KOORDINAT		
Natančnost	$\pm 15 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$	$\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$ (IFM)
OSTALO		
Mere (d x š x v, mm)	198 x 198 x 430	177 x 177 x 355
Teža (kg)	10,9	9 (instr.)/3,2 (kontr.)
Stopnja zaščite (voda, prah)	/	IP54
Območje delovanja (temperatura °C, relativna vlažnost)	od -10 do +45, od 10 % do 95 %	od -10 do +45, od 10 % do 95 %

9 ZAKLJUČEK

V spodnji preglednici je prikazan povzetek in primerjava standardov za preizkus laserskih sledilnikov. Iz preglednice so razvidne prednosti in slabosti posameznih standardov, ki so opisane v prejšnjih poglavjih (odvečno število preizkusov ...) in kako je standard ISO 10360-10 prevzel določene prednosti standardov ASME B89.4.19 in VDI/VDE 2617 Blat 10 pri svojih preizkusih (preizkus v dveh krožnih legah, meritve sfernega etalona). Načeloma je način izvedbe meritev pri preizkusih enak pri vseh standardih.

Preglednica 13: Povzetek in primerjava standardov za preizkus laserskih sledilnikov

Standard	Preizkus z merjenjem dolžinskega etalona	Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah	Meritev velikosti in oblike sfernega etalona	Preizkus natančnosti merjenja dolžine	Meritev dolžinskega etalona, upoštevajoč temp. razteznostni koeficient
ASME B89.4.19	105 meritev	108 meritev	/	18 meritev	/
VDI/VDE 2617 Blat 10	105 meritev	18 meritev	3 preizkusi	/	1 preizkus
ISO 10360-10	105 meritev (41 + 64)	18 meritev	25 meritev (25 točk, 2 preizkusa)	/	1 preizkus (že upoštevan v 105 meritvah pri merjenju dolžinskega etalona)

Ker gre glede na namen za zelo različne instrumente, sem v naslednji preglednici primerjal število meritev, ki jih je potrebno opraviti pri preizkusu po standardu za posamezen instrument. Ker se laserski sledilniki uporabljajo za merjenje koordinat, je logično, da standard ne predpisuje preizkusov zmožnosti merjenja horizontalnih in vertikalnih kotov kot ločen del preizkusov, tako kot je to pri tahimetrih. Pri laserskih sledilnikih je treba pogreške pri merjenju kotov in dolžine obravnavati skupaj, saj se njihov vpliv neposredno prenese v rezultat oz. koordinato.

Za določitev natančnosti merjenja dolžine standard ISO 10360-10 predpisuje 5 testnih dolžin, ki naj bi dosegle dolžino vsaj 66 % dosega enote za merjenje dolžin laserskega sledilnika. Tu je izbira prepuščena preizkuševalcu in način ni tako striktno določen, kot v ISO 17123-4 pri preizkusu EOR elektronskega tahimetra.

Preizkus določitve položaja v dveh krožnih legah pri laserskem sledilniku in preizkus natančnosti določitve koordinat pri elektronskem tahimetru sta po načinu merjenja podobna,

v obeh primerih določamo koordinato točke v obeh krožnih legah, se pa nato pri izračunu natančnosti oz. pogreška zelo razlikujeta.

Preglednica 14: Primerjava števila meritev pri standardih za preizkus elektronskega tahimetra in standarda za preizkus laserskega sledilnika

Standard	Natančnost pri merjenju horizontalnih in vertikalnih kotov oz. zenitnih razdalj	Natančnost merjenja dolžine	Natančnosti določitve koordinat	Skupno število meritev (meritev v dveh krožnih legah = 2 meritvi)
ISO 17123-3	432	/	/	432
ISO 17123-4	/	21	/	21
ISO 17123-5	/	/	36	36
ISO 10360-10	/	5	161	166

Pri vseh preizkusih je potrebno omeniti še čas trajanja preizkušanja, saj celoten sklop preizkusov, opisanih v standardih, zahteva veliko časa in truda. Ker je v današnjih časih čas trajanja zelo pomembna komponenta pri delu, vsebujejo standardi skrajšane postopke preizkusov, ki so primernejši za vmesno preizkušanje instrumenta. Medtem ko naj bi bil celoten preizkus po standardu opravljen po potrebi (periodično), pa vmesne preizkuse uporabimo kot hiter pregled instrumenta na terenu. S tem ugotovimo, če so potrebni nadaljnji ukrepi v zvezi z delovanjem instrumenta.

Glede na zgornje podatke, ki sem jih uporabil za primerjavo, sklepam, da ni smiselno preizkušati laserskih sledilnikov na enak način kot elektronskih tahimetrov. Že zaradi določenih tehničnih karakteristik (doseg enote za merjenje dolžin) in same programske opreme, ki je prilagojena namenu laserskih sledilnikov, je nemogoče opraviti preizkus po ISO 17123-3, -4, -5. Potrebno pa je paziti, da merskih preizkusov ne zamenjujemo s kalibracijo instrumenta. Večina sodobnih elektronskih tahimetrov in vsi laserski sledilniki so opremljeni s programsko opremo za avtomatsko kalibracijo instrumenta. To pa ne pomeni, da ni potrebno instrumentov periodično kalibrirati in preizkusiti s strani akreditiranih institucij.

VIRI

- [1] Gallagher, B. B. 2003. Optical shop applications for laser tracker metrology systems. Magistrsko delo. Tucson, Arizona, ZDA, The University of Arizona, the Faculty of the department of optical sciences, (samozaložba: B. B. Gallagher).
http://www.loft.optics.arizona.edu/documents/journal_articles/2003_Ben_Gallagher.pdf (Pridobljeno 18. 10. 2011.)
- [2] Cosijns, S. J. A. G. 2004. Displacement laser interferometry with sub-nanometer uncertainty. Doktorska disertacija. Eindhoven, Nizozemska, Technische Universiteit Eindhoven. (samozaložba: S. J. A. G. Cosijns).
<http://alexandria.tue.nl/extra2/200412878.pdf> (Pridobljeno 21. 10. 2011.)
- [3] Kogoj, D. 2002. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri. Učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo .
- [4] Močnik, D. 2010. Analiza vpliva postavitve optičnih komponent na merilno negotovost laserskega interferometra. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.
- [5] Skakić, M. 2007. Testiranje elektronskih razdaljmerov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [6] Bridges, B. Technology White Paper, Laser Tracker, FARO Technologies, Inc.,
<http://www.faro.com/>. (Pridobljeno 18. 10. 2011.)
- [7] Wojcik, G. J., Lakanen, S. A., 2002. Laser Tracker, a handy tool for metrology and alignment. Članek. Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois.
7th International Workshop on Accelerator Alignment.
- [8] Burge, J. H., Su, P., idr. Use of a commercial laserski sledilnik for optical alignment. College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- [9] Tehnične specifikacije laserski sledilnik API Radian, Omnitrac, Automated Precision, Inc., <http://www.apisensor.com/>.

-
- [10] Technology White Paper, laser Classification, FARO Technologies, Inc.,
<http://www.faro.com/>.
- [11] Katalog FARO laserski sledilnik Targets, FARO Technologies, Inc.,
<http://www.faro.com/>.
- [12] Tehnične specifikacije FARO laserski sledilnik ION, Vantage FARO Technologies, Inc., <http://www.faro.com/>.
- [13] Technology White Paper, Defining Accuracy, FARO Technologies, Inc.,
<http://www.faro.com/>.
- [14] Žunter, J. 2010. Umerjanje laserskih merilnikov dolžin. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.
- [15] Bridges, B., Hagan, K. 2001. Laserski sledilnik maps three-dimensional features. Članek, American Institute of Physics.
- [16] Estler, W., Edmundson, K., Peggs, G., Parker, D. 2002. Large-scale metrology. CIRP Annals -Manufacturing Technology, izdaja 51, št. 2, str. 587–609.
- [17] Tehnične specifikacije, Leica Geosystems, PCMM system specifications Leica absolute tracker and leica T-products, Leica SMR, Cateye. Datasheet.,
<http://www.leica-geosystems.com/>.
- [18] Tehnične specifikacije Hamamatsu, 2002. Position sensitive diodes. Technical report, Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division.
- [19] Patent, Lau, K. C., and Hocken, R. J. (1987). Three and five axis laser tracking systems. Patent 4714339,
https://www.google.com/patents/US4714339?dq=Patent+4714339&hl=sl&sa=X&ei=djWtU-2uBYa7ygP_p4CAAg&ved=0CBoQ6AEwAA.
- [20] Patent, Allen H. Greenleaf, John T. Watson (1981). Self calibrating contour measuring system using fringe counting interferometers, Patent US4457625 A
<https://www.google.com/patents/US4457625?dq=greenleaf+laser&hl=sl&sa=X&ei=5zWtU4CCA4PpywP7joDADQ&ved=0CCwQ6AEwAg>.

- [21] Zhuang, H., Li, B., Roth, Z. and Xie, X. 1992. Self-calibration and mirror center offset elimination of a multi-beam laser tracking system. Članek. Robotics and autonomous system,s, izdaja 9, št. 4, str. 255–269.

- [22] Teoh, P., Shirinzadeh, B., Foong, C. and Alici, G. (2002). The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique.

- [23] 6 Degrees of Freedom
http://en.wikipedia.org/wiki/Six_degrees_of_freedom

- [24] Zgodovinski pregled uporabe laserjev
http://www.nist.gov/public_affairs/factsheet/laserfest4.cfm

- [25] Naprava za merjenje koordinat, Coordinate measuring machine, MMC
http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine

- [26] Sferna aberacija
http://sl.wikipedia.org/wiki/Sferna_aberacija

- [27] Položajno občutljive diode
http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400

- [28] Položajno občutljive naprave
http://en.wikipedia.org/wiki/Position_sensitive_device

- [29] Tipi položajno občutljivih senzorjev
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-47/issue-8/features/detectors-cmos-cameras-allow-robust-active-stabilization-of-laser-beams.html>

- [30] Preizkus natančnosti laserskega sledilnika
<http://justmetrology.wordpress.com/2011/03/14/checking-laser-tracker-accuracy/>

- [31] Interferenca dveh žarkov
http://www.lepp.cornell.edu/~hoff/LECTURES/09S_510/O2/Interference%20of%20Two%20Beams%20of%20Light

- [32] Zabret, B., 2014. Multisenzorski merilni sistemi in njihova aplikacija v industriji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [33] The Leica Absolute Interferometer. 2008. White paper.
http://hexagonmi.com//media/Hexagon%20MI%20Legacy/m1/metrology/general/white-tech-paper/Leica%20Absolute%20Interferometer_white%20paper_en.ashx
(Pridobljeno 06. 08. 2016.)
- [34] Kogoj, D. 2016. Laserski sledilnik – ppt. Interferenčni način merjenja dolžin GMS 2015-16 – docx, Osebna komunikacija (02. 08. 2016.)
- [35] ISO 10360-10:2016, Ogljed standarda v knjižnici Slovenskega inštituta za standardizacijo , Osebna komunikacija (06.07.2016)
- [36] ISO Working Draft: 10360-10; Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 10: Laser Trackers for measuring point-to-point distances.
- [37] ASME B89.4.19-2006 Standard Performance Evaluation of Laser Based Spherical Coordinate Measurement Systems,
- [38] Brunson KinAiry, How it Works, brošura.
http://www.brunson.us/pdf/Brunson_KinAiry_How-it-Works.pdf
(Pridobljeno: 25. 07. 2016.)
- [39] Lee, V.D., Blackburn, C., in sodelavci, 2014. Proposed Interim Check for Field Testing a Laser Tracker's 3-D Length Measurement Capability Using a Calibrated Scale Bar as a Reference Artifact. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2014/NIST.IR.8016.pdf>
(Pridobljeno 06. 08. 2016.)
- [40] Sokol, Š., Bajtala, M., Ježko, J., 2014. Verification of selected precision parameters of the trimble s8 dr plus robotic total station', International Conference on Engineering Surveying . http://www.svf.stuba.sk/docs/web_katedry/gde/ingeo/TS8-05_Sokol.pdf
(Pridobljeno 06. 08. 2016.)
- [41] Ačko, B., 2008. Osnove meroslovja in merjenje dolžin. Učebnik. Maribor. Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.

[42] Pires, J., 2013. Calibration of laser trackers. Članek. International Congress of Metrology. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/metrology/201306017>
(pridobljeno 09. 07. 2016.)

[43] Mao, J., Nindl., D., 2009. Surveying Reflectors - White Paper Characteristics and Influences [http://leica-geosystems.com/
/media/files/products/white%20papers/leica_surveying_reflectors_wp_en.ashx?la=en](http://leica-geosystems.com/media/files/products/white%20papers/leica_surveying_reflectors_wp_en.ashx?la=en)
(pridobljeno 08. 08. 2016.)

[44] Gassner, G., Ruland, R., Instrument tests with the new Leica AT401.
<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-14300.pdf>
(pridobljeno 08. 08. 2016.)

Ostali viri

[45] API Sensor. 2016.
<http://www.apisensor.com> (Pridobljeno 22. 07. 2016.)

[46] Faro Technologies. 2016.
<http://www.faro.com> (Pridobljeno 22. 07. 2016.)

[47] Hexagon Metrology. 2016.
<http://www.hexagonmetrology.us> (Pridobljeno 22. 07. 2016.)

[48] Leica Geosystems. 2016.
<http://www.leica-geosystems.com> (Pridobljeno 22. 07. 2016.)

[49] Sestavni deli laserskega sledilnika
<http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/journal.aspx> (Pridobljeno 18. 10. 2011.)