



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Milan Vrtunski

**MODEL GEOSENZORSKE MREŽE ZA
MONITORING TERENA I OBJEKATA U
REALNOM VREMENU**

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2018



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Милан Вртунски
Ментор, МН:	Проф. др Миро Говедарица
Наслов рада, НР:	Модел геосензорске мреже за мониторинг терена и објеката у реалном времену
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина, Нови Сад
Година, ГО:	2018
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7/ 124/ 78/ 12/ 77/ -/ -
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Геоинформатика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Геосензорске мреже, мониторинг у реалном времену, деформације, геодетски инструменти, геотехнички сензори
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Праћење промена, односно, мониторинг терена и објеката је задатак од изузетног значаја, јер омогућава, у првом реду, правовремено реаговање и тиме смањење материјалне штете и људских жртава. Примена модерних технологија у области сензора и комуникација обезбеђује мониторинг терена и објеката у реалном времену. Просторно дистрибуирани сензори – геосензорска мрежа, прикупљају податке, који се на рачунарима складиште и анализирају. Дисертација се бави моделом геосензорске мреже, као општим решењем за мониторинг терена и објеката, које представља полазну основу од које се може доћи до система који задовољава постављене захтеве.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Александар Ристић, ванр. проф. Члан: др Драган Стојановић, ред. проф. Члан: др Ђорђе Пржуљ, доцент Члан: др Душан Јовановић, доцент Члан, ментор: др Миро Говедарица, ред. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :		
Identification number, INO :		
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual printed material	
Contents code, CC :	Doctoral disertation	
Author, AU :	Milan Vrtunski	
Mentor, MN :	Prof. Miro Govedarica, PhD	
Title, TI :	Model of geosensor network for real-time monitoring of terrain and objects	
Language of text, LT :	Serbian	
Language of abstract, LA :	Serbian/English	
Country of publication, CP :	Republic of Serbia	
Locality of publication, LP :	Vojvodina	
Publication year, PY :	2018.	
Publisher, PB :	Author's reprint	
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	7/ 124/ 78/ 12/ 77/ -/ -	
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering	
Scientific discipline, SD :	Geoinformatics	
Subject/Key words, S/KW :	Geosensor networks, real-time monitoring, deformations, geodetic instruments, geotechnical sensors	
UC		
Holding data, HD :	lbrary of the Faculty of technical sciences, Novi Sad	
Note, N :		
Abstract, AB :	Observing of changes, that is, monitoring of terrain and objects, is very significant task, since it enables timely response and thus decreasing of material damage and human casualties. Usage of modern sensor and communication technologies provides real-time monitoring of terrain and objects. Spatially distributed sensors, i.e. geosensor network, gather the data which are then stored and analyzed. In this disertation a model of geosensor network is proposed as a generalized solution for monitoring of terrain and objects which can represent a basis in creating a system that can be altered to meet the requirements in certain cases.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :		
Defended on, DE :		
Defended Board, DB :	President: Aleksandar Ristic, PhD, associate professor	
	Member: Dragan Stojanović, PhD, full professor	
	Member: Đorđe Pržulj, PhD, assistant professor	Menthor's sign
	Member: Dušan Jovanović, PhD, assistant professor	
	Member, Mentor: Miro Govedarica, PhD, full professor	

Spisak slika

Slika 1: Deo sistema za monitoring klizišta u Ankoni	11
Slika 2: Arhitektura sistema za monitoring parametara okoline baziranog na SWE specifikacijama.....	12
Slika 3: Glavna mreža – 3. nivo	14
Slika 4: Položaj modularnih dinamičkih kolona	15
Slika 5: DMS Sistem za rano upozorenje.....	16
Slika 6: Most Ting Kau	17
Slika 7: Raspored senzora na mostu Ting Kau.....	18
Slika 8: Analiza tačnosti u geodetskim mrežama.....	31
Slika 9: Eksperimentalne standardne devijacije koordinata tačaka u 2-D mrežama.....	34
Slika 10: Položajna tačnost tačaka u 2D mrežama.....	34
Slika 11: Robotizovana totalna stanica	39
Slika 12: Direct-drive motori za pokretanje robotizovane totalne stanice, bazirani na piezo efektu.....	40
Slika 13: Robotizovana totalna stanica postavljena na betonskom stubu u zaštitnoj kućici....	42
Slika 14: Segmenti GPS	43
Slika 15: Komponente GPS signala	44
Slika 16: Višestruka refleksija GNSS signala	48
Slika 17: Površina preseka sfera u slučaju međusobno udaljenih (a) i bliskih (b) satelita.....	49
Slika 18: Različiti tipovi kodiranih i optičkih podela na nivelmanskim letvama	55
Slika 19: Digitalni nivelir Leica DNA03	56
Slika 20: Laserski skener sa pratećom opremom	57
Slika 21: Princip merenja inklinometrom	57
Slika 22: Princip kretanja inklinometarske sonde unutar cevi	58
Slika 23: Formiranje vertikalnog profila primenom inklinometra	58
Slika 24: Piezometarska sonda.....	59
Slika 25: Senzor pritiska: a) sa slobodnom žicom, b) sa lepljenom trakom	59
Slika 26 :Tipični oblici folijskog tenzoelementa sa naznakom pravca u kojem je osetljiv na deformaciju: a) linearna folija, b) moment-folija sa dva elementa, c) folija sa tri elementa, d) membranska folija.....	60
Slika 27 : Princip rada jednostrukog i trostrukog ekstenzometra.....	61
Slika 28: Fiber optički senzor savijanja (FOSS)	62
Slika 29: Akcelerometri instalirani na betonskoj konstrukciji mosta	63
Slika 30: Senzor vlažnosti vazduha u prirodnoj veličini.....	64
Slika 31: Senzor količine padavina - rain guage	65

Slika 32: Interpretacija radargrama – slojevi zemljišta u telu klizišta	66
Slika 33: Synthetic Aperture Radar - SAR.....	67
Slika 34: Point-to-point veza.....	69
Slika 35: Način povezivanja inteligentih senzora u mrežu sa računarom	69
Slika 36: Višenivovska mreža senzora	70
Slika 37: Dvonivovska magistralna mreža	70
Slika 38: Bežično povezivanje senzora	71
Slika 39: Primer konfiguracije GeoMos sistema.....	73
Slika 40: Šema interakcije između senzora i aplikacije preko Sensor Manager-a.....	75
Slika 41: GNSS strategija za obradu podataka u realnom vremenu.....	77
Slika 42: GNSS strategija za naknadnu obradu podataka	78
Slika 43: Primer jednog monitoring sistema (Trimble)	79
Slika 44: Sensor Web Enablement (OGC)	81
Slika 45 : Pregled SWE standarda (Jirka i Remke, 2009).....	81
Slika 46: Šematski prikaz sistema za monitoring nivoa vode baziranog na OGC SWE standardima	84
Slika 47: Šematski prikaz arhitekture sistema za monitoring	88
Slika 48: Prelaz iz Stanja 1 u Stanje 2 kao akcija izazvana događajem Prekoračenje limita... 91	
Slika 49: Graf geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata	92
Slika 50: Dijagram stanja za totalnu stanicu	93
Slika 51: Dijagram stanja za GNSS prijemnik.....	93
Slika 52: Dijagram stanja senzora sa digitalnim izlazom	94
Slika 53: Dijagram stanja komunikacionog čvora – logger podataka.....	95
Slika 54: Generalizovani model merenja deformacija u realnom vremenu	97
Slika 55: Šematski prikaz sistema implementiranog u eksperimentu	101
Slika 56: Fizički model padinskih procesa.....	101
Slika 57: Geodetska prizma za monitoring postavljena na panel.....	102
Slika 58: Tiltmetar instaliran na fizičkom modelu	102
Slika 59: Logger podataka Campbell Scientific CR100 sa povezanim tiltmetrom.....	103
Slika 60: Robotizovana totalna stanica Leica TCRP1201+	103
Slika 61: Koordinatni sistem projekta i lokalni koordinatni sistemi prizama i tiltmetra	104
Slika 62: Kosa ravan, tiltmetar u dva položaja, merene i računate veličine.....	105
Slika 63: Longitudinalni pomeraji prizama.....	109
Slika 64: Transverzalni pomeraji prizama.....	109
Slika 65: Ugaoni pomeraji mereni tiltmetrom.....	110
Slika 66: Pomeraji niz kosu ravan mereni virtualnim sensorom	110
Slika 67: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 1 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija).....	111

Slika 68: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 2 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija).....	111
Slika 69: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 3 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija).....	111
Slika 70: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 4 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija).....	111
Slika 71: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 5 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija).....	112
Slika 72: Pomeraji niz kosu ravan mereni virtualnim senzorom (plava linija); zadati pomeraji niz kosu ravan tj. duž X ose lokalnog koordinatnog sistema tiltmetra (smeđa linija); longitudinalni pomeraj prizme 3 (zelena linija). Zadati pomeraji tiltmetra i prizme	112
Slika 73: Vrednost virtualnog senzora GeoT_EC koji predstavlja proveru greške u merenjima tiltmetrom. Kada se pojavi alarm na tiltmetru ali ne i prizmi 3, virtualni senzor dobije vrednost 10 što ukazuje da merenje tiltmetrom sadrži grešku.	113
Slika 74: Definisane klase limita.....	113
Slika 75: Dodeljivanje klase limita tačkama (npr. tački Prism_1 je dodeljena klasa Default)	114
Slika 76: Upozorenje o prekoračenju trećeg nivoa limita za merenje virtualnim senzorom u panelu Messages. Time je signalizirano da je došlo do greške u merenju tiltmetrom.	114
Slika 77: Upozorenje o prekoračenju trećeg nivoa limita za merenje virtualnim senzorom u panelu Messages. Time je signalizirano da je došlo do greške u merenju na prizmi 4, prouzrokovane pomeranjem totalne stanice.	114

Spisak tabela

Tabela 1: Sistem senzora na mostu Ting Kau	17
Tabela 2: Senzori za merenje veličina u WASHMS	19
Tabela 3: Tipične vrednosti grešaka pri relativnom pozicioniranju.....	52
Tabela 4: Tipične vrednosti grešaka pri određivanju pomeraja	54
Tabela 5: Glavne karakteristike komercijalnih softverskih rešenja za monitoring	85
Tabela 6: Senzori kao fizičke komponente i kao čvorovi geosenzorske mreže.....	94
Tabela 7: Rezultati analize tačnosti za APOS-NS mrežu permanentnih stanica sa GNSS prijemnicima postavljenim na 10 tačaka	99
Tabela 8: Rezultati analize tačnosti za mrežu sa 8 tačaka i dve stanice.....	100
Tabela 9: Lookup tabela virtualnog senzora GeoT_EC	106
Tabela 10: Lookup tabela virtualnog senzora Prism4_EC	107
Tabela 11: Zadati pomeraji prizama i tiltmetra. Sve vrednosti su date u milimetrima.	107
Tabela 12: Rezultati merenja pomeraja prizama.....	108

Sadržaj

Spisak slika.....	2
Spisak tabela.....	4
1. Uvod.....	7
2. Stanje u oblasti.....	9
2.1 Razvoj sistema za monitoring.....	10
2.2 Primeri postojećih rešenja	12
2.2.1 Studija slučaja: klizište u Ankoni, Italija	12
2.2.1.1 Sistem za površinsko praćenje	12
2.2.1.2 Sistem za geotehnički monitoring (DMS)	14
2.2.1.3 Sistem prenosa podataka.....	16
2.2.2 Sistem za monitoring mostova na kosim utegama WASHMS	16
3. Koncepti izvođenja monitoringa.....	21
3.1. Konvencionalni pristup.....	21
3.2. Monitoring deformacija u realnom vremenu.....	35
4. Tehnologije u monitoringu terena i objekata	37
4.1. Akvizicija podataka - merenje	38
4.1.1. Geodetski senzori	38
4.1.1.1. Totalne stanice	38
4.1.1.2. Globalni navigacioni satelitski sistemi – GNSS	42
4.1.1.3. Digitalni niveliri.....	54
4.1.1.4. Terestrički laserski skeneri.....	56
4.1.2. Geotehnički senzori.....	57
4.1.2.1. Senzori za merenje ugla	57
4.1.2.2. Senzori za merenje pritiska i sile	58
4.1.2.3. Senzori za merenje dužine	60
4.1.2.4. Senzori zasnovani na optičkim vlaknima	61
4.1.2.5. Senzori vibracija – akcelerometri	62
4.1.3. Ostali senzori.....	63
4.1.4. Tehnologije za indirektno izvođenje merenja	65

4.1.4.1.	Georadar.....	65
4.1.4.2.	Synthetic Aperture Radar (SAR)	67
4.2.	Komunikacija.....	68
4.2.1.	Mreže sa kablovskom konekcijom.....	68
4.2.2.	Bežična komunikacija	71
4.3.	Softverska rešenja u oblasti monitoringa.....	72
4.3.1.	Leica GeoMos	72
4.3.2.	Leica GNSS Spider	75
4.3.3.	Trimble deformacioni monitoring sistem.....	78
4.3.4.	Standardi za web-bazirana rešenja	80
4.3.4.1.	SWE Informacioni model	81
4.3.4.2.	SWE Servisni model	82
4.3.5.	52° North	82
4.3.5.1.	Primena SWE standarda u okviru 52° North	83
4.3.6.	Analiza softverskih rešenja	84
5.	Sistem za monitoring terena i objekata u realnom vremenu	87
5.1	Arhitektura sistema za monitoring terena i objekata	87
5.2	Formalni opis modela geosenzorske mreže	89
5.3	Model geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata.....	91
5.4	Model implementacionog rešenja geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata	95
5.5	Tačnost i pouzdanost mreže	97
6	Studija slučaja – implementacija modela sistema za monitoring deformacija u laboratorijskim uslovima.....	101
6.1	Postavka eksperimenta	101
6.2	Rezultati i diskusija	107
7	Zaključak.....	115
	Literatura	116

1. Uvod

U oblasti praćenja ponašanja terena i objekata (klizišta, otvoreni kopovi, brane, mostovi itd.) ulazi se u sasvim novu tehnološku eru. Ona se karakteriše primenom savremenih tehnologija za akviziciju podataka: globalni satelitski sistemi za pozicioniranje (GNSS), motorizovane totalne stanice, moderni geotehnički senzori, skeneri. Pored naglog razvoja sa stanovišta instrumenata i napredak na polju komunikacija (pre svega bežičnih) je doprineo da se na ovu oblast počne primenjivati nov pristup. On je podrazumevao permanentno praćenje terena i objekata sa tačnošću koja je zadovoljavala postavljene zahteve. Pored tačnosti ovakvi sistemi su morali ispuniti i druge zahteve: konfigurabilnost, modularnost, dostupnost, robusnost itd.

Zadaci praćenja dimenzija i pozicije objekata i terena spadaju u osnovne zadatke koji se sreću u geodetskoj praksi. Njihova rešenja se nalaze u domenu deformacione analize koja podrazumeva periodično vršenje merenja i poređenje rezultata, kao i primene geotehničkih senzora koji omogućuju merenje i nekih drugih fizičkih veličina. Karakteristike kako geodetske tako i geotehničke instrumentacije su dugo vremena bile takve da je za izvođenje merenja i obradu podataka bilo potrebno određeno vreme što je onemogućavalo sprovođenje praćenja u realnom vremenu i blisko realnom vremenu.

Razvojem instrumentacije i komunikacionih tehnologija vreme potrebno za akviziciju i obradu podataka se drastično smanjilo. Primena metoda automatskog prepoznavanja oblika u okviru senzorske tehnologije omogućila je automatsko izvođenje merenja (bez prisustva operatera), dok su bežične komunikacione tehnologije omogućile postavljanje mernih instrumenata na pogodne lokacije bez ograničenja u smislu dostupnosti komunikacija. Takođe, povećanje procesorske moći računara obezbedilo je dovoljno brzu obradu i reprezentaciju rezultata.

Primena novih tehnologija u sistemima za praćenje deformacija objekata i terena dovela je do mogućnosti praćenja u realnom vremenu. To dalje obezbeđuje nove funkcionalnosti: implementaciju alarmnih sistema, analizu istorijskih podataka, mogućnosti brze primene sanacionih mera itd.

Posmatrano u širem kontekstu, razvoj senzorske tehnologije je doveo implementacije sistema čija je namena praćenje raznih parametara okoline u realnom vremenu. Kod ovih sistema prisutna je potreba za poznavanjem prostorne komponente. Stoga su se pojavili standardi koji se odnose na ovu oblast. Primena ovih standarda obezbeđuje ispunjavanje prethodno navedenih zahteva. Standardi definisani od strane konzorcijuma OGC (Open Geospatial Consortium) iz familije SWE (Sensor Web Enablement) odnose se na ovu oblast.

Istraživački deo rada na disertaciji se odnosi na analizu postojećih tehnologija koje se primenjuju u oblasti praćenja terena i objekata u realnom vremenu. To uključuje dogovarajuće senzore, pre svega geodetske i geotehničke, metode praćenja kao i primenjivane komunikacione tehnologije. Takođe će biti razmotrena postojeća softverska rešenja kao i OGC SWE standardi. Biće izvršena analiza implementiranih sistema baziranih na ovim standardima.

U okviru eksperimentalnog dela disertacije biće izvršena implementacija sistema za praćenje terena i objekata u realnom vremenu. Sistem će biti realizovan primenom dostupnog komercijalnog softverskog rešenja. Karakteristike ovog sistema će biti detaljno ispitane. Potom je potrebno definisati model sistema realizovanog u vidu senzorske mreže bazirane na OGC SWE standardima (hardverska komponenta je u oba slučaja ista). Ovaj model treba da bude takav da u istoj ili većoj meri zadovolji zahteve koji su definisani analizom prethodno realizovanog sistema. Definisani model treba da pokaže u kojoj meri postojeći standardi omogućavaju zadovoljavanje zahteva koje zadaci praćenja u realnom vremenu postavljaju pred jedan tako realizovan sistem, kao i da ukaže na razlike u primeni jednog i drugog sistema. Ovi rezultati mogu da pruže i nove smernice u primeni standarda u ovoj oblasti.

Predmet naučnog istraživanja u okviru doktorske disertacije su problemi i zadaci tokom projektovanja i implementacije sistema za monitoring deformacija terena i objekata, pri čemu će se razmotriti hardverski, softverski i komunikacioni aspekti ovakvog sistema. Sistem treba da omogući praćenje u realnom i blisko realnom vremenu. Formirati model sistema u vidu senzorske mreže čija arhitektura treba da zadovolji zahteve razmotrene u analizi. Model treba implementirati korišćenjem dostupnih komercijalnih rešenja u ovoj oblasti. Polazne hipoteze su da je moguće formirati model sistema za monitoring terena i objekata u realnom vremenu u vidu geosenzorske mreže i da takav model može da obezbedi funkcionalnosti koje sistem za monitoring treba da poseduje.

Cilj naučnog istraživanja, u skladu obrazloženim predmetom, je formiranje modela sistema za monitoring zasnovanog na standardima. Na osnovu sistema realizovanog pomoću prihvaćenog komercijalnog rešenja detaljno će biti definisani zahtevi koje sistem treba da ispuni u opštem smislu, te će se nakon realizacije sistema zasnovanog na standardima utvrditi u kojoj meri su ti zahtevi ostvareni.

2. Stanje u oblasti

Rešenja za praćenje ponašanja terena i objekata nalazila su se u dva domena. U prvom su dominantni bili geotehnički senzori kojima su se fizičke veličine od interesa merile u realnom i blisko realnom vremenu. Sistemi su bili različitog stepena integracije, od pojedinačnih senzora do visoko integriranih sistema koji su omogućavali merenja različitim sensorima na većem broju lokacija uz nadzor sa jedne pozicije. U drugom domenu primarni je geodetski pristup koji je jedino bio primenjiv van realnog vremena [4, 76]. Razvijena mikro mreža objekta se koristi kao osnova za preiodična merenja pozicija tačaka od interesa.

Razvoj različitih tehnologija, pomenut u prethodnom poglavlju, rezultovao je preklapanjem ova dva domena obuhvatajući geotehničke i geodetske senzore u jedinstvene sisteme kojima je moguće izvoditi monitoring u realnom vremenu. Ovi sistemi imaju dve glavne oblasti primene:

1. Monitoring terena – praćenje nestabilnog terena na lokacijama gde je moguće kretanje zbog prirodnih uzroka (klizišta, odroni, nasipi) ili antropogenog uticaja (kamenolomi, otvoreni kopovi) [3, 59, 65, 72, 73].
2. Monitoring objekata – praćenje veštačkih objekata i konstrukcija (mostovi, brane, zgrade) [17, 23, 28, 35, 36, 37, 68].

Primarni zadatak sistema za monitoring terena i objekata je detekcija vrednosti merenih veličina koje prekoračuju zadate tolerancije [29]. Pored ovoga, obezbeđuju veliku količinu podataka na osnovu kojih je moguće izvoditi različite analize, kako geodetske, tako i geološke, geotehničke, statičke, strukturalne, procene štete i rizika, planiranje bezbednosnih i sanacionih mera [3, 42, 43, 45, 46].

Monitoring terena se izvodi na lokacijama na kojima je poznato da je moguće kretanje velike količine materijala koje može izazvati veliku materijalnu štetu i/ili ugroziti živote ljudi. U zavisnosti od tipa terena koji se prati odabira se odgovarajući skup senzora. Gotovo uvek su u sistem uključeni geodetski senzori kojima se vrši pozicioniranje tačaka na površini tla. Karakteristično za ove sisteme je korišćenje geotehničkih senzora kojima se prate promene u tlu ili na samoj površini tla. U slučaju praćenja klizišta, na telu klizišta i u blizini prave se bušotine u koje se postavljaju inklinometri i ekstenzometri kojima se prate pomeranja slojeva zemljišta, piezometri kojima se prati nivo vode sadržane u tlu, a u nekim slučajevima koriste se i senzori bazirani na optičkim vlaknima. Za praćenje odrona karakteristično je korišćenje posebne vrste ekstenzometara, krek-metara, kojima je moguće meriti širine pukotina sa sub-milimetarskom tačnošću. S obzirom da je aktivacija klizišta uzrokovana velikom količinom padavina za njihov monitoring karakteristična je i primena kišomera. Ovime je omogućeno rano upozoravanje na moguću aktivaciju klizišta kada količina padavina pređe kritičnu vrednost.

Kod monitoringa objekata senzori se uglavnom postavljaju na površinu, ali u unutar konstrukcije. Za ovu namenu geotehnički senzori se proizvode u odgovarajućim, hermetički zatvorenim kućištima što omogućava neometan rad senzora unutar betonske konstrukcije. Senzori se postavljaju na kritične tačke konstrukcije, tj. na mesta gde se očekuju maksimalne vrednosti merenih veličina ili na kojima je od posebnog značaja konstantno praćenje vrednosti merene veličine. Na primer na mostovima te tačke su ankeri, dilatacione spojnice, ose i vrhovi nosećih stubova, ose puta, ose i vrhovi kula, ivice mostova, sredine konstrukcija itd. Slično terenu, i na objektima se često mere uglovna pomeranja inklinometrima, s tim što su ovi inklinometri drugačije konstrukcije i postavljaju se na zidove i stubove objekta (u literaturi i praksi je za ovakve inklinometre često korišćen naziv tiltmetar). Takođe se koriste senzori za merenje fizičkih veličina koje izazivaju deformaciju kao što su merne trake, merne ćelije i akcelerometri. U nekim slučajevima (uobičajeno kod monitoringa brana) koriste se i piezometri koji se postavljaju u tlo u blizini objekta. Deformacije na objektima mogu biti izazvane i atmosferskim uticajima te se često koriste i meteorološki senzori, pre svih anemometri za merenje brzine i pravca vetra, kao i termometri za merenje temperature.

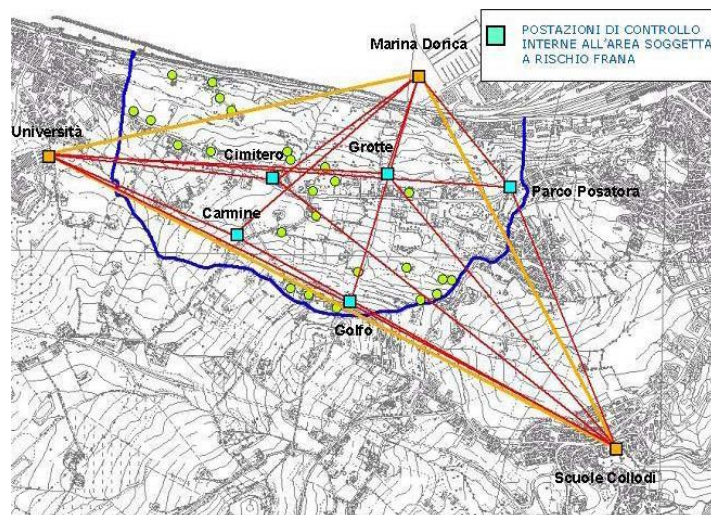
2.1 Razvoj sistema za monitoring

Problematika praćenja deformacija terena i objekata predstavlja jednu od velikih grupa zadataka koji se rešavaju u okviru geodezije, odnosno inženjerske geodezije i deformacione analize. Razvijen je čitav niz metoda koje služe rešavanju ovih zadataka. Zajedničko im je da se uspostavlja geodetska mreža i vrši početna, tzv. nulta serija merenja i potom se, prilikom svake sledeće serije merenja, određuje razlika u odnosu na nultu. Merenja su se izvodila manuelno, korišćenjem teodolita, daljinomera i nivelira. Pored geodetskih instrumenata za praćenje deformacija primenjivani su i drugi senzori, prvenstveno geotehnički (inklinometri, ekstenzometri i dr.).

Razvojem geodetskih instrumenata dolazi do promena i u metodologiji praćenja deformacija. Već pojavom totalne stanice, instrumenta koji može da meri i uglove i dužine, eliminisana je potreba za daljinomerima. Jedan od najznačajnijih trenutaka bio je početak korišćenja tehnologije satelitskog pozicioniranja (GPS) u geodetskom premeru. Iako u početku tačnost nije mogla zadovoljiti zahteve kod deformacionih merenja, sredinom osamdesetih godina vršena su prva ispitivanja kojima je utvrđeno da je premer GPS tehnologijom dostigao traženi nivo tačnosti [26]. Prvobitno su u primeni bile samo statičke metode pozicioniranja, ali razvojem prijemnika i poboljšavanjem njihovih performansi, kao i razvojem bežičnih komunikacija, počele su se primenjivati i kinematičke metode. GPS prijemnik je elektronski uređaj koji, za razliku od konvencionalnih geodetskih instrumenata, ne sadrži mehaničke i optičke sklopove. To ga čini izuzetno robusnim i omogućava njegovo postavljanje na terenu

bez posebne zaštite od vremenskih uslova. Tokom devedesetih godina prošlog veka pojavljuju se totalne stanice opremljene elektromotorima koji su omogućavali da se instrument samostalno kreće oko alhidadine i ose durbina. Upotreba motorizovanih totalnih stanica omogućuje trodimenzionalno kontinuirano automatsko praćenje deformacija [4]. Na taj način motorizovana totalna stanica postaje nezaobilazni deo gotovo svakog sistema za monitoring deformacija u realnom vremenu [67]. Takođe i geotehnički senzori se počinju opremiti standardizovanim komunikacionim interfejsima čime postaju primenjivi u sistemima za monitoring.

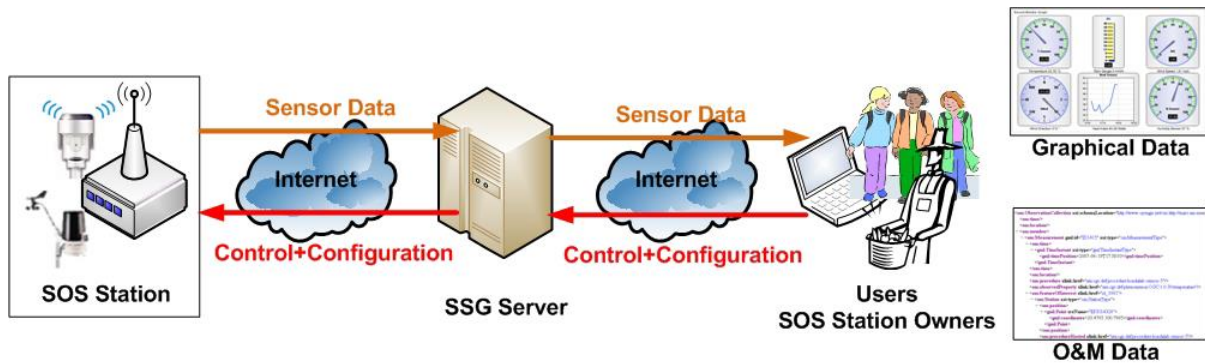
Ovakva raznovrsnost senzora koji su sposobni da automatski vrše opažanja i distribuiraju podatke dovodi do njihovih povezivanja u senzorske mreže. Pojavljuju se komercijalna softverska rešenja koja pored prikupljanja podataka sa senzora omogućavaju i njihovu obradu, analizu i vizualizaciju. Jedan od najpoznatijih softverskih paketa te namene je Leica GeoMOS [70]. Ovakve mreže su razvijane za monitoring klizišta u SAD [39, 60, 61]. U italijanskom gradu Ankoni instaliran je sistem za praćenje klizišta u realnom vremenu, sastavljen od GPS prijemnika, totalnih stanica i geotehničkih senzora [13, 14, 22] (Slika 1). U Kini je uspostavljen jedan sistem za monitoring baziran na GPS tehnologiji [78]. Pored naprednih senzora, kao pomoćne primenjuju se i druge tehnologije akvizicije, npr. fotogrametrija [5, 11, 50], prikupljeni podaci postaju dostupni preko interneta [16, 71], dok se i u obradi podataka počinje sa primenom naprednih metoda [1, 6, 49, 52].



Slika 1: Deo sistema za monitoring klizišta u Ankoni

Napredak senzorske tehnologije je imao za posledicu da i drugi tipovi senzora postanu sastavni delovi senzorskih mreža raznih namena. To je dovelo do potrebe za standardizacijom na tom polju, te Open Geospatial Consortium (OGC) donosi familiju specifikacija pod nazivom Sensor Web Enablement [10]. Od donošenja prvih verzija ovih specifikacija do danas realizovano je više Sensor Web sistema zasnovanih na njima. Tako je grupa istraživača iz Tajlanda i Japana

realizovala mrežu fieldservera, odnosno senzorskih stanica za monitoring određenih parametara okoline [31] (Slika 2), dok je grupa istraživača iz Irske realizovala senzorsku mrežu namenjenu dugoročnom monitoringu kvaliteta voda [38]. Ekspertski GIS za monitoring hazarda je razvijen u Kanadi i u bazi podataka pohranjuje podatke formatirane prema Sensor Observation Service specifikaciji iz SWE grupe standarda [47]. Radna grupa Nord52 okviru koje deluje i podgrupa SWE, razvija softverska rešenja bazirana na ovim specifikacijama, i do sada postoji više primera primene njihovih rešenja [10].



Slika 2: Arhitektura sistema za monitoring parametara okoline baziranog na SWE specifikacijama

2.2 Primeri postojećih rešenja

2.2.1 Studija slučaja: klizište u Ankoni, Italija

Sistem ranog upozorenja u Ankoni sastoji se od međusobno integrisanih manjih sistema: za površinsko praćenje, za geotehnički monitoring (DMS) i za prenos i obradu podataka merenja.

2.2.1.1 Sistem za površinsko praćenje

Sistem za površinsko praćenje čine:

- 7 automatizovanih totalnih stanica visoke preciznosti,
- 230 reflektora (prizmi) (postavljenih delimično na 64 stambena objekta, a delimično na drugim objektima i infrastrukturalnim objektima),
- 26 jednofrekventnih GPS prijemnika (instalirana na stambenim objektima),
- 8 dvofrekventnih GPS prijemnika (referentno),
- 7 visoko preciznih inklinometara, koji su postavljeni kao senzori radi kontrole stabilnosti glavnih stanica I i II nivoa mreže (automatski geodetski boksovi).

Kombinacijom različitih instrumenata: GPS, automatizovanih totalnih stanica i inklinometara, omogućeno je praćenje velikog broja prethodno određenih tačaka u tri dimenzije (Y, X, Z), odnosno omogućeno je njihovo nadgledanje primenom različitih mernih tehnika i sa različitih pozicija za kontrolu. Primenom dvofrekventnih GPS instrumenta osigurava se visoki kvalitet GPS merenja i veća raznovrsnost sistema uopšte.

Ovaj sistem za praćenje je formiran sa ciljem da registruje svako površinsko pomeranje mase u oblasti klizišta i pomeranje stambenih objekata. U slučaju pomeranja oglašava se alarm, koji prihvata Kontrolni centar 24 sata dnevno, a koji je smešten u gradskoj Skupštini. Tehničari u Kontrolnom centru tada procenjuju da li je potrebno da se aktivira Plan za vanredne situacije. Ciklus merenja je postavljen na 30 minuta, ali u slučaju opasnosti ili nakon dužeg kišnog perioda, merenja u okviru sistema mogu da se vrše na svim tačkama pomoću dvofrekventnih GPS prijemnika, u realnom vremenu (RTK metoda) i automatskih totalnih stanica.

Površinsko praćenje se zasniva na: GPS sistemu koji funkcioniše na tri aktivna nivoa, 7 automatizovanih totalnih stanica i naknadnoj kontroli glavnih stanica koja se vrši pomoću 7 visoko preciznih inklinometara [14].

GPS sistem

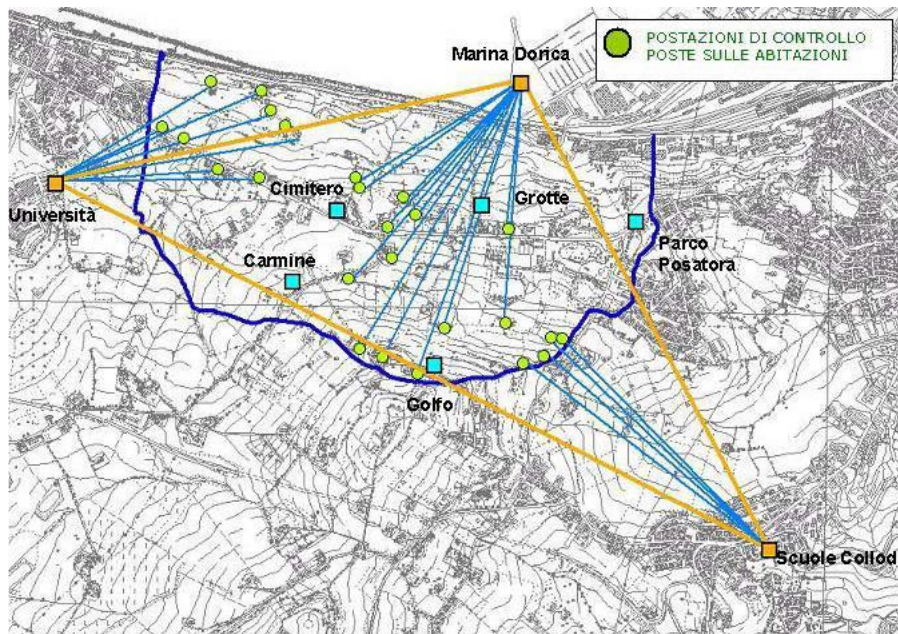
1. Glavnu mrežu (I nivo, aktivan u realnom vremenu) čine tri glavne stanice, koje se nalaze izvan oblasti klizišta na koje su postavljena tri dvofrekventna GPS prijemnika od kojih su dva postavljena na stabilnim zgradama, a treći je postavljen u geodetskom boksu, na 18m visokom armiranom betonskom stubu.

2. Sekundarnu mrežu (II nivo, aktivan u realnom vremenu) čini pet glavnih stanica, koje se nalaze na području klizišta, na koje je postavljeno pet dvofrekventnih GPS prijemnika, od kojih jedan na zgradi, a ostala četiri u geodetskim boksovima, na armiranim betonskim stubovima visine 12m-18m. Ovih osam GPS prijemnika formira visoko preciznu mrežu, koja u okviru sistema za rano upozorenje funkcioniše na različitim nivoima kontrole, čime se osigurava da mreža jednofrekventnih GPS prijemnika nakon oglašavanja alarma može da radi u realnom vremenu.

3. Tercijarnu mrežu (III nivo, aktivan u realnom vremenu) čini 26 jednofrekventnih GPS prijemnika, postavljenih na 26 stambenih objekata u oblasti klizišta (Slika 3).

Automatizovane totalne stanice

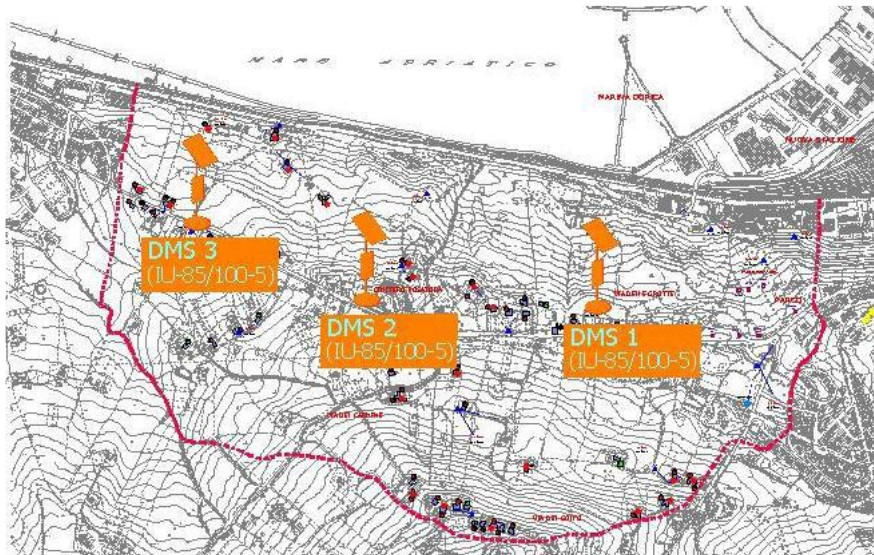
Sedam automatizovanih totalnih stanica postavljeno je u okviru mreža I i II nivoa, na istim mestima na kojima se nalaze i GPS prijemnici. Pomoću ovih totalnih stanica, merenjem uglova i dužina vrši se kontrola 230 reflektora postavljenih na stambene objekte i na konsolidacione strukture izgrađene u oblasti klizišta (Slika 3).



Slika 3: Glavna mreža – 3. nivo

2.2.1.2 Sistem za geotehnički monitoring (DMS)

Sistem za geotehnički monitoring (DMS) čine tri bušotine, dubine 100m, u koje su postavljene modularne dinamičke kolone (Slika 4). Svaka kolona je sastavljena od 85 biaksijalnih inklinometrijskih modula (mernog opsega $\pm 20^\circ$, tačnosti $0,01^\circ$), dva piezometrijska senzora (mernog opsega 100psi, tačnosti 0,01m) i 85 temperaturnih senzora (mernog opsega $0-70^\circ$, tačnosti $0,1^\circ\text{C}$). Kolone su u bušotini smeštene tako da se u prvih 10 i poslednjih 15 metara bušotine ne nalaze instrumenti.



Slika 4: Položaj modularnih dinamičkih kolona

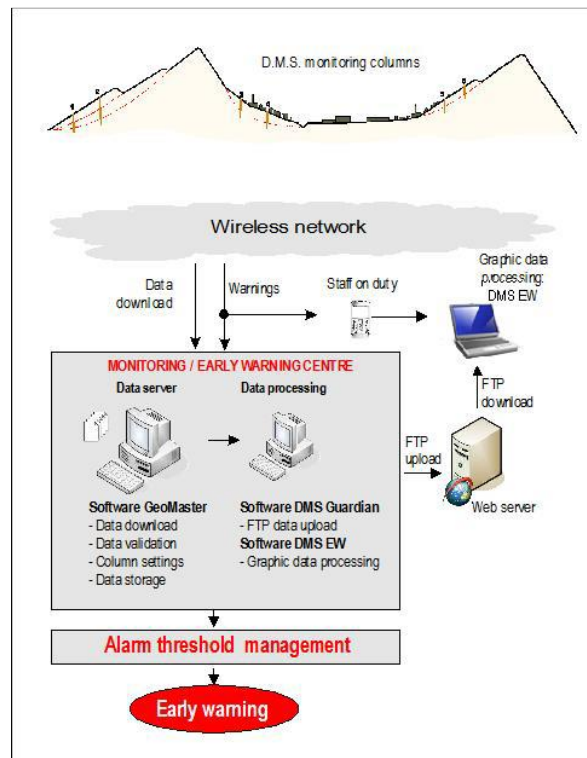
DMS može da se montira na licu mesta, odnosno potrebni instrumenti mogu da se povežu tako da čine niz nalik spiralnom užetu, a u svakom nizu mora biti neophodan broj geotehničkih i geofizičkih senzora (modula). Elektronske table koje služe za sakupljanje i prenos podataka takođe su neizostavni deo sistema.

Moduli su povezani specijalnim 2D/3D fleksibilnim spojnicama koje dozvoljavaju jaku, kontinualnu prilagodljivost krivinama i uvrtnjima bušotine, a da se pri tom potpuno zadrži orijentacija u odnosu na referentni sistem, definisan tokom instalacije.

Podaci se od DMS instrumentalne kolone šalju RS485 protokolom do kontrolne jedinice, koja te podatke poredi sa unapred postavljenim graničnim vrednostima i pohranjuje ih u cirkularni bafer (Slika 5).

Kontrolna jedinica svakog minuta skenira kolonu i vrši procenu da li postoji potreba za aktiviranjem alarma. U slučaju pomeranja većih od dozvoljenih vrednosti, kontrolna jedinica šalje upozoravajuću SMS poruku ili direktan poziv osoblju u monitoring centru. Isto će se desiti i u slučaju naglog porasta gornjeg nivoa podzemnih voda. U okviru sistema postoje 4 nivoa upozorenja.

U monitoring centru, pomoću kontrolnog softvera GeoMaster vrši se pohranjivanje podataka iz cirkularnog bafera.



Slika 5: DMS Sistem za rano upozorenje

DMS Early Warning (DMS Ew) je softver koji je posebno razvijen za potrebe Sistema za rano upozorenje. Služi za vizualizaciju podpovršinskih podataka u monitoring centru i svuda gde je moguća Internet konekcija. Pomoću ovog softvera moguće je odrediti pomeranja po pravcima istok-zapad i sever-jug, promene temperature i gornjeg nivoa podzemnih voda, a moguće je i konstruisati dijagrame za svaki modul u odabranom vremenskom intervalu.

2.2.1.3 Sistem prenosa podataka

Prenos podataka koji se prikupljaju sa različitih senzora vrši se na dva načina:

1. Mreža I i II nivoa: prenos podataka dobijenih u okviru ove dve mreže u gradski monitoring centar se vrši u realnom vremenu preko WiFi Standard HyperLan veze. Sistem za prenos je zasnovan na glavnoj radio vezi, koja funkcioniše po principu tačka po tačka, između automatizovanih totalnih stanica i monitoring centra. Prenos podataka u realnom vremenu se vrši preko nekih slobodnih frekvencija radio veza (HyperLan).
2. Mreža III nivoa: Prenos podataka iz ove mreže se vrši preko periodičnog GSM-a, a podaci se prikupljaju svakih šest sati.

2.2.2 Sistem za monitoring mostova na kosim utegama WASHMS

U Hong Kongu je razvijen sistem pod nazivom WASHMS (*Wind And Structural Health Monitoring System*) namenjen monitoringu mostova [77]. Implementiran je na tri mosta (Tsing Ma, Kap Shui Mun i Ting Kau, Slika 6) i glavni zadatak je da kroz prikupljanje i obradu podataka sa različitih senzora detektuje i oceni bilo koje simptome operativnih anomalija i/ili propadanja ili oštećenja koja mogu uticati na korišćenje i bezbednost mostova.

Sistem je sastavljen iz šest modula: sistem senzora, sistem za akviziciju i prenos podataka, sistem za obradu i kontrolu podataka, sistem za ocenu stanja mosta, prenosivi sistem za akviziciju podataka, i prenosivi sistem za ispitivanje i održavanje.



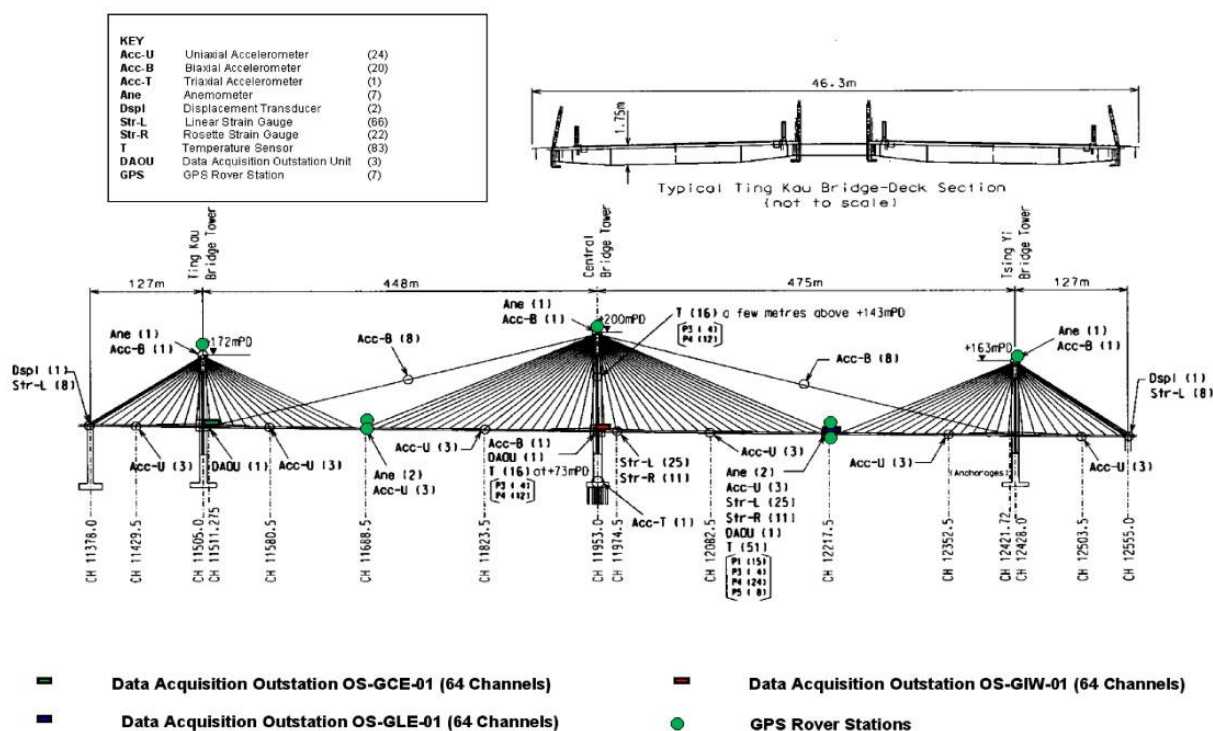
Slika 6: Most Ting Kau

Sistem senzora se sastoji iz devet tipova senzora: anemometara, temperaturnih senzora, akcelerometara, dinamičkih senzora težine, GPS-a, senzora visine, senzora pomeraja, mernih traka i nadzornih kamera. Ovi senzore signale prosleđuju jedinicama sistema za akviziciju preko neoklopljenih CAT5 kablova (UTP).

Tabela 1: Sistem senzora na mostu Ting Kau

Data type	Sensor type	Signal type	Sensor	Channel	Sampling rate per sensor (Hz)	Total raw data** archived per hour (MB)
Wind	Ultrasonic Anemometer	Digital	4	12	2.56	0.61
	Propeller Anemometer	Analog	3	9		
Temperature	TMA1 (steel bolt)	Digital	15	8	0.07	0.02
	TMA3 (air)	Digital	12			
	TMA5 (concrete)	Digital	48			
	TMA6 (asphalt)	Digital	8			
Traffic	Bending plate	Digital	6	2		0.35
Displacement	Longitudinal movement	Digital	2	2	2.56	0.06
Acceleration (fixed)	Uniaxial accelerometer	Analog	24	24	25.6*	12.42
	Biaxial accelerometer	Analog	20	40		
	Triaxial accelerometer	Analog	1	3		
Strain	Single strain gauge	Analog	66	66	25.6, 51.2	42.41
	Rosette strain gauge	Analog	22	66		
GPS	Rover station	Digital	27	27	10	157*
	Reference station	Digital	2	2		
IMS	CCTV video cameras	Video	16 [†]	16	2.5	1811**

Prostorni raspored senzora na podužnom i poprečnom profilu mosta prikazan je na Slika 7.



Slika 7: Raspored senzora na mostu Ting Kau

Sistem za akviziciju i prenos podataka se sastoji od jedinica koje su povezane fiber-optičkim kablovima. Arhitektura mreže u postojećim implementacijama je token-ring, dok će u narednim biti ethernet. Broj ovih jedinica po mostu zavisi od broja potrebnih kanala velike brzine, dok lokacija zavisi od prostornog rasporeda analognih senzora, pogotovo onih sa nelinearnom karakteristikom kao npr. merne trake.

Sistem za obradu i kontrolu podataka, kao i sistem za ocenu stanja mosta se sastoje od serverskih računara baziranih na UNIX operativnom sistemu, i nekoliko radnih stanica. Softver u sistemu za obradu i kontrolu podatak je baziran na MATLAB i LabView softverskim paketima, kao i odgovarajućem softveru za rad sa GPS podacima. U okviru ovog sistema vrši se obrada, prenos, arhiviranje i prikaz podataka. Sistem za ocenu stanja mosta uključuje specijalizovana softverska rešenja, kao i paket koji radi u MATLAB okruženju za identifikaciju dinamičkih karakteristika mosta iz merenja vibracija.

Veličine koje se prate u okviru monitoringa se mogu podeliti u tri kategorije (*Tabela 2*):

1. Izvori opterećenja (ulazni parametri): vetar, temperatura, drumski i železnički saobraćaj, seizmička naprezanja
2. Karakteristike sistema (sistemski parametri): koeficijenti statičkih uticaja i globalne dinamičke karakteristike
3. Odziv mosta (izlazni parametri): varijacija geometrijske konfiguracije (pomeraji mosta), raspodela opterećenja i naprezanja, sile u kablovima i ocena zamora konstrukcije mosta.

Tabela 2: Senzori za merenje veličina u WASHMS

Monitoring category	Monitoring items	Required types of sensor	Major monitoring parameters
Loading sources	Wind loading	Ultrasonic anemometers (usually at deck levels) Propeller anemometers (usually at tower-tops) Barometers* Rainfall gauges*	Mean and gust wind-rose diagrams Gradient and gust wind speed profiles Wind incidences Wind turbulence intensities Time and length scales of turbulent winds Turbulent wind spectra Horizontal and vertical coherences ¹ Effective bridge temperatures
	Temperature loading	Platinum RTD type for measuring the temperatures in structural steel, concrete, asphalt pavement and air Thermocouplers for cables	Different temperatures Air temperatures Asphalt pavement temperatures
	Highway loading	Dynamic weigh-in-motion sensors (bending-plate type) Weldable strain gauges CCTV video cameras	Gross vehicular weight per vehicle Axle-load distributions HA lane factor Traffic patterns Bridge deflection under traffic jams Highway loading spectrum Strain/stress distribution in truss/girder
	Railway loading	Weldable strain gauges CCTV video cameras	Bogie loads each train line on Train loading spectrum Strain/stress distribution in truss/girder

	Seismic loading	Servo-type accelerometers	Acceleration spectra near tower and anchorage Deck and tower response spectra
	Corrosion status [†]	Corrosion sensors*	Ingress rate of deleterious substances migrating into concrete such as chlorides and carbon-dioxide (concrete towers)
System characteristics	Static influence coefficients	Hygrometers*	Influence lines for train loading
		Level sensing stations [†]	
		Global positioning systems Weldable strain gauges	Influence lines for highway loading Influence surfaces for deck plates
	Global dynamic characteristics	Servo-type accelerometers	Modal frequencies
		Weldable strain gauges	Mode shapes Modal damping ratios Mass participation factors
Bridge responses	Tensile forces in cables	Servo-type accelerometers	Tensile force in individual cable (including main cables, suspenders and stay cables)
	Geometric configuration	Global positioning system	Thermal movements of cables and deck
		Level-sensing stations [†]	Wind-induced movements in cables, deck and towers
		Displacement transducers Servo-type accelerometers	Seismic-induced movements in deck Highway-induced movement in deck and cables [†]
		Anemometers	Railway-induced movement in deck and cables [†]
		Temperature sensors	Creep and shrinkage effects in concrete towers
	Strain/stress distribution	Vibrating-wire strain gauges*	Stress/force distributions in rocker bearings Stress/force distribution in horizontal bracing members for wind monitoring
		Weldable strain gauges	
		Vibrating-wire strain gauges*	Stress/force distribution in truss/girder members Stress/force demand ratios in key components
	Fatigue stress estimation	Weldable strain gauges	Rainflow count of cycles at different stress levels

3. Koncepti izvođenja monitoringa

U ne tako davnoj prošlosti u geodeziji su bile dominantne klasične metode deformacionog monitoringa. U okviru klasičnih metoda određivanja deformacija primenjuju su isključivo geodetske metode: terestrička metoda (podrazumeva korišćenje konvencionalnih geodetskih instrumenata), a od pojave GPS-a sredinom 80-ih godina prošlog veka uključena su i satelitska merenja.

Problemi koje treba rešiti u okviru klasične deformacione analize su:

- Određivanje deformacionog modela (izbor tačaka na “objektu” i tlu na kojem se on nalazi i tačaka referentne mreže),
- Deformaciona analiza (izbor stabilnih tačaka referentnog dela geodetske mreže),
- Formiranje projekta deformacionih merenja (izbor optimalne metode i tačnosti određivanja koordinata i komponenti prostornog pomeranja),
- Način realizacije merenja i prezentacije rezultata.

Na terenu se vrši samo registracija podataka, a obrada rezultata merenja se vrši naknadno u kancelariji pomoću specijalizovanog softvera. U poređenju sa savremenim metodama deformacionog monitoringa, ova metoda je resursno zahtevna i nedovoljno efikasna. Sam proces merenja je dugotrajan i podrazumeva angažovanje značajnog broja radnika, pogotovo ako se uzme u obzir merenje u više epoha. Od izvršenja merenja do analize i interpretacije rezultata merenja takođe prolazi značajan vremenski period, što je sa aspekta mogućih posledica po objekat, neprihvatljivo. U slučaju predviđanja geoloških procesa, primenom klasičnih metoda deformacione analize ne bi bilo moguće da se ti procesi predvide na vreme, i tako umanje posledice katastrofe i izbegnu ljudske žrtve.

3.1. Konvencionalni pristup

U okviru deformacionog monitoringa, epohe merenja se u procesu obrade podataka, uglavnom izravnavaju po metodi najmanjih kvadrata (MNK) [69]. Ova metoda se takođe primenjuje za upoređivanje epoha i utvrđivanje deformacija. U deformacionim sistemima, koji se baziraju na GPS merenjima, na primer, koristi se sekvencijalna metoda najmanjih kvadrata [2].

Međutim, bez obzira na matematički model izravananja koji je primenjen, deformacioni monitoring sistemi koriste unapred određene algoritme za datumsku analizu, otklanjanje grubih grešaka i promašaja iz rezultata merenja, kao i analizu deformacione mreže [18]. Takođe,

potrebni su algoritmi za odbacivanje ekstremnih vrednosti (outlier-a), statističke testove i analizu relativnih deformacija [15].

Može se reći da sistem za deformacioni monitoring podrazumeva četiri osnovna koraka:

- sakupljanje podataka,
- izravnjanje i statističke testove,
- kontrolu stabilnosti referentnih tačaka i
- analize i utvrđivanje deformacija [27].

U prvom koraku, uspostavlja se kontrolna mreža i pravi se plan opažanja, u cilju postizanja zahtevane tačnosti i preciznosti. Opažanja se vrše u različitim epohama, tj. u različitim vremenskim periodima.

U drugom koraku, vrši se izravnjanje rezultata merenja u okviru svake epohe posebno, primenom MNK metode. U okviru izravnjanja moguće je primeniti globalni test (Chi-kvadrat test), lokalni test (Tau test ili Data Snooping), ili test reziduala (popravaka). Neophodno je izvršiti početnu proveru podataka, i testirati aposteriori varijans faktore obe epohe pre deformacione analize. Analiza datuma i deformacije mreže je obavezna pre izravnjanja, zbog problema koji se javljaju u toku deformacionog monitoringa, kao što su deficit ranga i celokupna geometrija mreže za monitoring.

Analiza datuma definiše fiksne parametre u deformacionoj mreži, čija stabilnost može da se analizira u okviru izravnjanja jedne, dve ili više epoha uporedo [15]. Defekti datuma takođe mogu da se uklone Bayesian-ovim metodom najmanjih kvadrata ili S-transformacijom (Helmertovom transformacijom). S druge strane, analiza mreže pomaže u otkrivanju previše ograničenih mreža i defekata konfiguracije deformacionih mreža, koje mogu da se poboljšaju dodatnim merenjima.

U trećem koraku, vrši se kontrola stabilnosti referentnih tačaka. Ovaj proces obično uključuje upoređenje dve epohe i analizu slobodne mreže. Nakon toga, određuju se koordinatne razlike između epoha i kofaktorske matrice zajedničkih referentnih tačaka, a zatim se analizira stabilnost referentnih tačaka. Dva najčešće korišćena metoda za analiziranje stabilnosti referentnih tačaka su test ograničenosti i robustni metod. U testu ograničenosti, nakon izvršenih izravnjanja merenja u svakoj epohi posebno, primenjuje se kombinovano izravnjanje na obe epohe. Rezultati izravnjanja slobodne mreže se proveravaju u skladu sa ovim testom. Otkrivanje nestabilne referentne tačke vodi do promene datuma mreže.

Postoji više robustnih testova, od kojih neki koriste Helemertovu transformaciju za otkrivanje nestabilnih referentnih tačaka.

U četvrtom koraku, vrši se utvrđivanje deformacija. Postupak utvrđivanja deformacija je sličan postupku izravnjanja u drugom koraku, s tim što su ovde neophodna merenja iz obe epohe za izravnjanje i za određivanje kombinovane varijans kovarijans matrice, u cilju dobijanja relativnih elipsi grešaka, izračunavanja dužina između tačaka i određivanja standardne devijacije. Statistički značajna deformacija tačke je najčešće povezana sa 95% intervalom poverenja za pomeranje tačaka između epoha.

Leica Geosystems je u saradnji sa firmom Technet GmbH iz Berlina razvila svoja softverska rešenja za obradu podataka u okviru deformacione analize, tj. za izravnjanje rezultata merenja i upoređivanje epoha merenja.

Dve glavne komponente GeoMoS sistema predstavljaju aplikacije Monitor i Analyser. Pored njih, jako važnu ulogu u obradi podataka ima i aplikacija Adjustment, koja se koristi za izravnjanje rezultata merenja, deformacionu analizu i simulaciju mreže. U ovom poglavlju biće ukratko prikazani elementi matematičkog modela za izravnjanje firme Technet, koji su primenjeni i u aplikaciji Adjustment.

Mogućnost izravnjanja Technet GmbH nudi u okviru softvera *Systra*, koji je, u stvari, namenjen za geometrijsku integraciju heterogenih GIS podataka pomoću interkonektovane transformacije i homogenizacije. Pored koordinata za transformaciju, algoritam za izravnjanje procesuiru i geometrijska ograničenja i geodetska merenja.

U *Systra* softveru sva merenja se jednako tretiraju. To znači da nema razlike između merenja izvršenih u cilju određivanja koordinata i popravaka ili kontrolnih merenja. Struktura mreže da se modeluje kroz pozicioniranje i dodeljivanje težina merenjima. Merenja su korelisana, a svako merenje utiče na određivanje koordinata tačaka (uticaj merenja zavisi od konfiguracije).

Mrežu, koja se izravnava, automatski formiraju postojeće referentne tačke i merenja. Kao rezultat dobija se funkcionalni model projekta, koji sadrži jednačine popravaka izravnjanja.

Većina jednačina popravaka koje se formiraju u izravnjanju su nelinearne. To znači da će, u funkcionalnom modelu izravnjanja, u generalnom pristupu,

$$L + V = A X \quad (3.1)$$

gde je:

L – matrica opažanja,

V – matrica popravaka merenja,

A – matrica dizajna (opisuje geometriju mreže) i

X – matrica nepoznatih (npr. koordinate tačaka),
koeficijenti matrice A biti u funkciji nepoznatih parametara, tj.

$$A = f(X) \quad (3.2)$$

Ovaj sistem jednačina se rešava putem iteracija. Koeficijenti matrice A se određuju pomoću približnih vrednosti nepoznatih parametara iz matrice X , dobijenih iz prve iteracije. Novi, poboljšani koeficijenti se određuju na osnovu vrednosti nepoznatih parametara iz sledeće iteracije itd. Potrebno je što tačnije odrediti početne vrednosti nepoznatih parametara, kako bi iteracioni proces trajao što kraće.

Izravnjanje 1. korak: Konjugovani gradijent

Međutim, za rešavanje jednačina popravaka u okviru *Systra* softvera nisu potrebne približne vrednosti, već se iterativni proces realizuje putem konjugovanih gradijenata. Ova strategija ne koristi matrice, već jednostavne strukture podataka tipa “sistem-tačka-lista”. Vrlo je robusna, čak i kada su u rezultate merenja uključeni promašaji.

Ovo izravnjanje se koristi u cilju određivanja približnih koordinata, koje se nalaze u opsegu validnosti linearizacije jednačina popravaka, za strogo izravnjanje koje predstavlja sledeći korak u određivanju nepoznatih parametara.

Tokom računanja, grube greške se uporedo otkrivaju i eliminišu na lokalnom nivou. To se postiže velikim smanjenjem težina relevantnih merenja.

Metoda konjugovanih gradijenata je numerički vrlo stabilna i neosetljiva na deficit ranga matrice. U prednosti je u odnosu na druge metode u slučaju nedostatka konfiguracije, jer tada nije potrebno sprovesti strogo izravnjanje.

Određivanje približnih vrednosti

U prvom koraku iterativnog procesa grubo se određuju približne koordinate svih tačaka. Da bi se približne vrednosti odredile po principima posrednog izravnjanja, mogu da se koriste samo linearne jednačine popravaka. Jednačine popravaka referentnih tačaka četvoro-parametarske transformacije su linearne. Tom prilikom se polarne koordinate transformišu u ortogonalne. U narednim koracima iterativnog procesa biće upotrebljene nelinearne jednačine popravaka, u cilju preciznijeg određivanja koordinata.

Prednost ovakvog postupka je u tome što približne vrednosti mogu da se odrede automatski bez funkcija veza.

Ovo zahteva ozbiljno razmatranje nekoliko aspekata. Svaka nova tačka mora da bude određena bar jednom ili preko apscise i ordinate ili preko ugla i dužine. Približne koordinate nije moguće odrediti, na primer, lučnim presekom iz nelinearnih jednačina popravaka. Taj problem može da se reši uvođenjem približnih ortogonalnih ili polarnih merenja, koja bi služila samo za grubo određivanje približnih koordinata. Da bi se eliminisao uticaj izravnjanja, odnosno uticaj težina ovih pseudo-merenja u izravnjanju, usvajaju se nerealno visoke vrednosti njihovih standardnih devijacija.

Takođe, u određivanju grubih približnih koordinata nedostaju nelinearne jednačine popravaka razmere, što znači da je razmera lokalnog koordinatnog sistema nepoznata. U tom slučaju usvaja se proizvoljna razmera. U posebnim konfiguracijama (npr. nepovoljna konfiguracija referentnih tačaka) ova činjenica može da dovede do pogrešno određenih sistemskih parametara i približnih koordinata već u prvoj iteraciji u pojedinačnim sistemima. Ovaj problem, kao što je već objašnjeno, može da se reši uvođenjem pseudo-merenja za odgovarajuće marginalne tačke mreže.

Eliminacija loših merenja

Grube greške mogu automatski da se otkriju i eliminišu tokom određivanja koordinata tačaka, u iterativnom procesu.

Rešenje prvog sistema jednačina popravaka daje velike popravke merenjima, ako ona sadrže greške merenja. Obično najveće popravke ukazuju na merenja koja sadrže grubu grešku. Nakon odbacivanja takvih merenja, ponavlja se postupak izravnjanja.

Veličina grube greške mora unapred da se odredi. Kriterijum za eliminaciju grešaka je maksimalna vrednost normalizovane popravke (NV). U 1. koraku izravnjanja još uvek nije moguće odrediti normalizovane popravke, pa se njihove vrednosti dobijaju kao količnik popravke i apriori standardne devijacije.

To znači da, ako je unapred određeno $NV = 10$, a merenje je dobilo popravku 10cm i njegova ocenjena standardna devijacija je 1cm, prepoznaje se kao "grubo pogrešno" i odbacuje se.

Eliminacija promašaja iz izravnjanja se vrši tako što se njihovim težinama dodeljuje vrednost nula. Na taj način, ova merenja su formalno još uvek prisutna u izravnjanju, ali na njega nemaju uticaj. Ovakav postupak je vrlo efektan, jer merenja koja su možda greškom odbačena mogu ponovo da se proanaliziraju na osnovu vrednosti njihovih konačnih popravaka.

Rezultati ovakvog približnog izravnjanja i kontrolna merenja mogu da se upotrebe za sledeći korak - strogo izravnjanje.

Izravnjanje 2. korak: Strogo izravnjanje

U drugom koraku izravnjanja sistem normalnih jednačina se rešava direktno Cholesky algoritmom, u okviru koga se prvo određuju standardne devijacije i redundance.

Jednačine popravaka

Potrebno je koristiti transformacione modele sa 3, 4, 5, ili 6 parametara. Nepoznate su koordinate u glavnom sistemu i transformacioni parametri svakog sistema. Od druge iteracije uključene su sve jednačine popravaka.

Lokalne koordinate

Sledeće jednačine popravaka važe za transformaciju tačke $P_j(t_j, u_j)$ iz lokalnog u glavni koordinatni sistem:

$$\begin{aligned}v_{x_j} &= a_i t_j - b_i u_j + x_i - x_j \\v_{y_j} &= b_i t_j - a_i u_j + y_i - y_j\end{aligned}\tag{3.3}$$

Ove jednačine su linearne za nepoznate sistemske parametre a_i , b_i , x_i i y_i i za nepoznate koordinate x_j , y_j za tačku P_j .

Referentne tačke

Koordinate referentnih tačaka se tretiraju kao merenja (pokretne referentne tačke). Važi:

$$\begin{aligned}v_{x_i} &= \bar{x}_i - x_i \\v_{y_i} &= \bar{y}_i - y_i\end{aligned}\tag{3.4}$$

x_i i y_i su približne vrednosti koordinata referentnih tačaka, a \bar{x}_i i \bar{y}_i su njihove ocenjene vrednosti.

Razmera

Važi sledeća jednačina popravaka:

$$v_{m_i} = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} - m_i \quad (3.5)$$

m_i je razmera sistema i . Nelinearne jednačine popravaka za a_i i b_i se ponovo linearizuju nakon svakog iteracionog procesa. Ako je varijansa mala, rešenje se približava 3-parametarskoj transformaciji (2 translacije, 1 rotacija).

Apsciska odstojanja

Za tačku P_j , sa apscisnim merenjem t_j u lokalnom koordinatnom sistemu i , važi:

$$v_{t_j} = a_i(y_j - y_i) + b_i(x_j - x_i) - (a_i^2 + b_i^2)t_j \quad (3.6)$$

a_i , b_i , x_i i y_i su transformacioni parametri sistema i u kome su izvršena merenja.

Ordinate

Za tačku P_j , sa merenom ordinatom u_j u lokalnom koordinatnom sistemu i , važi sledeća jednačina popravaka:

$$v_{u_j} = b_i(y_j - y_i) - a_i(x_j - x_i) - (a_i^2 + b_i^2)u_j \quad (3.7)$$

Presek dve prave

Jednačine popravaka za tačku $P_o(Y_o, X_o)$, dobijenu presekom dve prave, glase:

$$\begin{aligned} v_{t_o} &= \frac{(y_o - y_1)(x_2 - x_1)}{s_{12}} - \frac{(x_o - x_1)(y_2 - y_1)}{s_{12}} \\ v_{u_o} &= \frac{(y_o - y_3)(x_4 - x_3)}{s_{34}} - \frac{(x_o - x_3)(y_4 - y_3)}{s_{34}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Ove jednačine opisuju poprečna odstupanja tačke P_o od linija. Linije su definisane tačkama P_1 i P_2 i tačkama P_3 i P_4 .

Uglovna merenja

Za mereni pravac r_{ik} između tačaka P_j i P_k važi sledeća jednačina popravaka:

$$v_{r_{ik}} = \arctan\left(\frac{y_k - y_i}{x_k - x_i}\right) + \omega - r_{ik} \quad (3.9)$$

Afina transformacija

Za svaki sistem, umesto Helmertove može da se primeni afina transformacija:

$$\begin{aligned} v_{x_j} &= a_i t_j - b_i u_j + x_i - x_j \\ v_{y_j} &= c_i t_j - d_i u_j + y_i - y_j \end{aligned} \quad (3.10)$$

a_i , b_i , c_i i d_i su nepoznati transformacioni parametri sistema i .

5-parametarska transformacija

Izjednačenjem rotacija oko x i y ose sistema i , izabrana afina transformacija se konvertuje u 5-parametarsku transformaciju. Važi:

$$v_{s_i} = a_i d_i - b_i c_i \quad (3.11)$$

Elipse grešaka

Polu ose elipsi grešaka zavise od konfiguracije i pozicioniranja mreže i odnose se na datum mreže. Velike standardne devijacije koordinata ili dugačke polu ose elipsi grešaka ukazuju na to da su tačke loše određene po tom pravcu, a ne na prisustvo grubih grešaka u merenjima.

Popravke v

Popravke se računaju kao razlike izravnatih i merenih vrednosti. Ocenjene (izravnate) vrednosti se dobijaju iz vektora nepoznatih X (koordinate, sistemski parametri).

$$v_i = \bar{L}_i - L_i \quad (3.12)$$

Popravke merenja zavise od težina i konfiguracije mreže i zbog toga su samo uslovno pogodne za procenu kvaliteta u odnosu na otkrivanje grešaka.

Normalizovane popravke

Normalizovane popravke se formalno računaju kao količnik popravaka i njihove standardne devijacije.

$$NV_i = \frac{v_i}{m_{v_i}} \quad (3.13)$$

gde je:

v_i - popravka merenja,

m_{v_i} - standardna devijacija popravaka.

Standardna devijacija popravaka nakon izravnjanja zavisi od težine merene veličine, kao i od konfiguracije mreže. Očekuje se da popravke rezultata merenja koji ne sadrže grube greške budu jednake svojim standardnim devijacijama, što znači da će normalizovane popravke imati vrednost 1. Zbog operacije deljenja otpada uticaj težina i konfiguracije mreže, pa normalizovane popravke mogu da se koriste kao test vrednosti za grube greške (autlajere).

Ocenjene grube greške GF

Veličina GF daje informaciju o eventualnom postojanju grube greške u merenju.

$$GF_i = -\frac{v_i}{r_i} \quad (3.14)$$

gde je:

v_i - popravka merenja,

r_i - deo redundanse popravke.

Deo redundanse EV

Deo redundanse EV , izražen u procentima, pokazuje koliko je neko merenje kontrolisano od strane ostalih merenja u izravnjanju. EV može da se izračuna za svako merenje pomoću odgovarajućeg koeficijenta sa glavne dijagonale matrice:

$$EV_i = \left(1 - \left(A(A^T P A)^{-1} A^T\right) P\right)_{ii} \cdot 100\% \quad (3.15)$$

gde je:

A – matrica dizajna,

P – matrica težina.

Iz jednačine (5.15) se izvodi zaključak da kontrola merenja ne zavisi od samog merenja, već od konfiguracije mreže i tačnosti merenja.

Vrednosti dela redundanse mogu da se interpretiraju na sledeći način:

100% - potpuno kontrolisano merenje,

100% - 40% - dobro kontrolisano merenje,

40% - 10% - kontrolisano merenje,

10% - 1% - slabo kontrolisano merenje i

1% - 0% - nekontrolisano merenje.

Što je veća vrednost *EV* nekog merenja, to je veća mogućnost otkrivanja grube greške u tom merenju.

Otkrivanje grešaka

Da li će neka metoda izravnjanja biti prihvaćena ili ne, uglavnom zavisi od toga kolika je mogućnost otkrivanja grubih grešaka. U ovom konceptu moraju da budu uključeni i tip i verovatan broj mogućih grešaka.

Male grube greške mogu da budu otkrivene već u nelinearnom, početnom izravnjanju, pomoću statističkih testova, ako ne izlaze iz područja linearizacije, s obzirom da je linearizacija validna samo u linearnom modelu i da zahteva konvergenciju računanja. Obično su takva računanja uključena u iterativni proces.

Male grube greške odgovaraju vrednostima normalizovanih popravaka *NV*. Važi sledeća klasifikacija mogućih grešaka:

$NV < 2.5$ - sistem ne prepoznaje grešku,

$NV < 4.0$ - greška je moguća,

$NV > 4.0$ - greška je vrlo moguća.

Ako podaci sadrže velike grube greške, konvergencija računanja, kao u mnogim nelinearnim problemima, u većini slučajeva ne može da bude zagarantovana. Zbog toga se koriste pojednostavljeni modeli izravnjanja, koji su mnogo robusniji u pogledu velikih grubih grešaka. Nakon eliminisanja grubih grešaka, trebalo bi ispravno modelovati stohastičke kvalitete merenih vrednosti. Ovakav pristup bi trebalo da bude linearan i numerički stabilan, s obzirom da tada nema problema po pitanju konvergencije.

Velike grube greške mogu da se automatski otkriju i eliminišu tokom računanja koordinata. Veličinu grubih grešaka je potrebno unapred definisati. Kriterijum za eliminaciju greške je maksimalna vrednost normalizovane popravke *NV*, koja je nezavisna od vrste merenja.

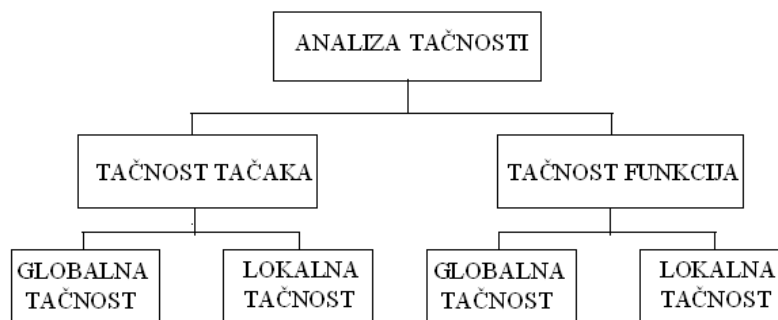
Pseudo greške, ili grube greške koje to nisu, mogu da se jave u toku 1. koraka izravnjanja. Proces izravnjanja u 1. koraku započinje bez početnih približnih vrednosti, a u isto vreme omogućava automatsko odbacivanje merenja sa vrlo velikim vrednostima u svakoj iteraciji. U slučaju nelinearnih merenja, to može da dovede do pogrešnih odbacivanja, s obzirom da u toj fazi još uvek nije postignuta stabilnost približnih koordinata.

Defektna merenja koja nisu otkrivena kao pogrešna, ostaju u izravnjanju zajedno sa svojim standardnim devijacijama, i utiču na rezultat izravnjanja.

Ocena tačnosti

U matematičkim modelima izravnjanja geodetskih mreža, nakon primene algoritma izravnjanja obavlja se ocena tačnosti dobijenih rezultata iz izravnjanja koja je podjednako značajna kao i sami rezultati.

U oceni tačnosti iz izravnjanja geodetskih mreža najčešće se koristi eksperimentalna standardna devijacija jedinice težine i kovarijacione matrice izravnatih veličina. Analiza tačnosti odnosi se na tačnost tačaka i funkcija geodetskih mreža. Ocena tačnosti može biti globalna, ako se određuje jedna vrednost kao reprezent za ceo skup veličina u geodetskoj mreži, ili lokalna ocena tačnosti ako se ona odnosi na pojedine veličine.



Slika 8: Analiza tačnosti u geodetskim mrežama

Na tačnost geodetske mreže utiču:

- dizajn mreže,
- tačnost merenih veličina,
- greške datih veličina.

Dizajn mreže zavisi od terenskih uslova (konfiguracije terena, zarašćenosti, organizacije radilišta, položaja datih tačaka, itd.), vrste i veličine objekata (tunel, most, brana, itd.) i sposobnosti stručnjaka da u datim uslovima projektuje mrežu koja će prvenstveno da odgovara svojoj nameni, ali i od tačnosti koja je projektom utvrđena.

Više faktora ima uticaj na tačnost merenih veličina (instrument, metoda rada, atmosferski uslovi itd.). Na osnovu prethodne analize tačnosti može da se izvrši izbor odgovarajućeg instrumenta i metode rada, kao i da se obezbede ostali uslovi koji su neophodni da bi se postigla željena tačnost merenih veličina.

Na greške datih veličina nije moguće uticati. Zato se kod preciznih radova (mreža gde se zahteva visoka tačnost), mreže izravnavaju u lokalnom koordinatnom sistemu i na taj način odstranjuje se uticaj grešaka datih veličina. Zatim se koordinate tačaka transformišu iz lokalnog u državni koordinatni sistem. Transformacija se obavlja na osnovu tačaka čije su koordinate poznate u oba koordinatna sistema.

Tačnost merenih veličina u geodetskoj mreži

Eksperimentalna standardna devijacija jedinice težine s_o ili a posteriori standardna devijacija jedinice težine, daje ocenu tačnosti merenih veličina **I** nakon izravnjanja geodetske mreže.

Ova ocena je globalna mera tačnosti merenja u geodetskoj mreži, a zavisi od popravaka merenih veličina, tj. tačnosti merenih veličina i broja stepeni slobode u geodetskoj mreži:

$$s_o = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v}}{\text{tr}(\mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{Q}_v)}} \quad (3.16)$$

Ako su vrednosti popravaka manje po apsolutnom iznosu i broj stepeni slobode veći onda je manja vrednost s_o odnosno, dobija se veća tačnost merenih veličina u geodetskoj mreži.

Matematičko očekivanje eksperimentalne varijanse jedinice težine s_o^2 jednako je varijansi σ_o^2 odnosno

$$E(s_o^2) = \sigma_o^2 \quad (3.17)$$

pa se u modelima izravnjanja određuje eksperimentalna standardna devijacija jedinice težine s_o kao ocenjena vrednost standardne devijacije jedinice težine σ_o .

Tačnost nepoznatih parametara

Eksperimentalne standardne devijacije nepoznatih parametara s_{x_i} daju informacije o oceni tačnosti dobijenih vrednosti nepoznatih parametara iz izravnjanja $\hat{\mathbf{x}}$.

U modelu posrednog izravnjanja eksperimentalna kovarijaciona matrica je

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}} = s_o^2 \times \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = s_o^2 \times (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (3.18)$$

gde je $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}$ matrica kofaktora nepoznatih parametara, ili eksperimentalne standardne devijacije nepoznatih parametara

$$s_{x_i} = s_o \cdot \sqrt{Q_{x_i x_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, u) \quad (3.19)$$

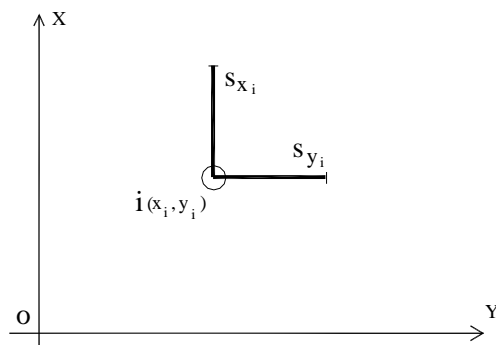
gde je s_o eksperimentalna standardna devijacija a $Q_{x_i x_i}$ ($i = 1, 2, \dots, u$) su koeficijenti na glavnoj dijagonali simetrične matrice kofaktora nepoznatih parametara

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{pmatrix} Q_{x_1 x_1} & Q_{x_1 x_2} & \dots & Q_{x_1 x_u} \\ Q_{x_2 x_1} & Q_{x_2 x_2} & \dots & Q_{x_2 x_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{x_u x_1} & Q_{x_u x_2} & \dots & Q_{x_u x_u} \end{pmatrix}. \quad (3.20)$$

Prema prethodnim izrazima sledi da tačnost nepoznatih parametara zavisi od tačnosti merenih veličina u geodetskoj mreži (s_o) i njenog dizajna ($\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}$).

U geodetskim mrežama nepoznati parametri su najčešće koordinate tačaka i neophodno je pored izravnatih vrednosti koordinata tačaka odrediti i njihovu tačnost iz izravnjanja.

U 2-D geodetskim mrežama u izravnjanju učestvuju nepoznate koordinate tačaka $i(x_i, y_i)$, a iz izravnjanja se određuju njihove odgovarajuće eksperimentalne standardne devijacije (s_{x_i}, s_{y_i}) izravnatih vrednosti koordinata tačaka $i(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$. Eksperimentalne standardne devijacije s_{x_i} daju informacije o tačnosti izravnatih koordinata po X osi a s_{y_i} o tačnosti izravnatih koordinata po Y osi (Slika 9).



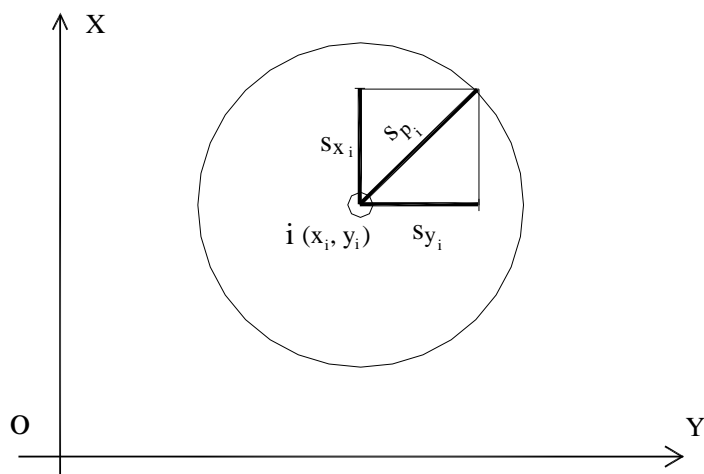
Slika 9: Eksperimentalne standardne devijacije koordinata tačaka u 2-D mrežama

Položajna tačnost tačaka

Položajna tačnost tačaka geodetske 2-D mreže, nakon izravnjanja određuje se po formuli

$$s_{p_i} = \sqrt{s_{x_i}^2 + s_{y_i}^2} = s_o \cdot \sqrt{Q_{x_i x_i} + Q_{y_i y_i}} \quad (3.21)$$

Eksperimentalna standardna devijacija položaja tačke s_{p_i} zavisi od eksperimentalnih standardnih devijacija po koordinatnim osama s_{x_i} i s_{y_i} . Često se krug poluprečnika s_{p_i} naziva krug grešaka (Slika 10).



Slika 10: Položajna tačnost tačaka u 2D mrežama

U GeoMoS aplikaciji Adjustment korisniku su ponuđene standardne, tj. najčešće korišćene vrednosti nekih parametara i veličina. U slučaju da korisnik želi da upotrebi neke druge

vrednosti, koje su posledica karakteristika mreže i merenja u njoj, omogućeno mu je da izvrši unos tih vrednosti koje se odnose na sledeće veličine i parametre:

- a priori standardnu devijaciju jedinice težine,
- standardnu devijaciju merenih veličina i
- nivo značajnosti, tj. verovatnoću za potrebe otkrivanja grubih grešaka.

Matematički model koji se primenjuje za analizu tačnosti u Adjustment softveru predstavlja deo posrednog izravnjanja mreže. Njegovom primenom se dobijaju parametri i kriterijumi kvaliteta mreže, koji praktično zavise od konfiguracije same mreže, vrste i tačnosti merenih veličina, broja suvišnih merenja i primenjenih metoda merenja.

3.2. Monitoring deformacija u realnom vremenu

Savremeni deformacioni monitoring objekata i prirodnih pojava može da se realizuje korišćenjem različitih sistema i tehnika. Izbor instrumenata i metoda merenja, ili kreiranje odgovarajućeg sistema za monitoring zavisi od vrste deformacije, koja će takođe uticati na metode analize stabilnosti i ceo proces monitoringa deformacija. Najvažnija karakteristika tih sistema je da oni u potpunosti mogu da se automatizuju. Automatizacija sistema za monitoring omogućuje da se iznenadne promene u pomeranju detektuju u trenutku nastanka. Vršiti se online analiza rezultata merenja i računanje deformacija u realnom vremenu. U okviru ovakvog sistema formiran je poseban sistem za alarmiranje, koji nadležnom osoblju šalje poruke upozorenja usled detektovanih pomeranja koja prevazilaze granične vrednosti. Moguća je integracija različitih vrsta senzora, odnosno do krajnjih rezultata se dolazi kombinacijom geodetskih i geotehničkih (negeodetskih) metoda. Od geodetskih instrumenata u ovakvim sistemima, najzastupljenije su robotizovane totalne stanice i GNSS prijemnici. Robotizovane totalne stanice predstavljaju ekonomično rešenje za merenje velikog broja tačaka i za merenje do prirodnih površina. Daju visoku preciznost po položaju i visini i ne zahtevaju otvoreno nebo. Sa druge strane, pomoću GNSS se obezbeđuje rad u svim vremenskim uslovima. Merenja su učestala i sinhronizovana i ne zahtevaju dogledanje do ciljnih tačaka (markera), moguće je i merenje na dugim rastojanjima (preko 10km).

Automatizovani monitoring sistem ima mnoge prednosti:

- moguće je sakupiti veliku količinu podataka u jedinici vremena,
- angažuje malu količinu radne snage,
- informacije se dobijaju u realnom vremenu, pa je moguća brza reakcija u cilju rešavanja potencijalno hazardnih situacija,
- moguća je integracija različitih vrsta senzora, čime se sistem prilagođava specifičnim karakteristikama procesa i

- nudi veću tačnost od drugih geodetskih tehnika.

Zahvaljujući ovakvim sistemima, mogu se otkriti značajne deformacije i na vreme izbeći ozbiljna oštećenja, ili čak spasiti ljudski životi.

4. Tehnologije u monitoringu terena i objekata

Glavna odlika sistema za monitoring terena i objekata je autonoman rad u realnom vremenu. Potrebno je da sistem bude takav da omogući automatsko izvršavanje merenja, skladištenje podataka, kao i indikaciju alarma. Pri svemu ovome sistem treba da bude što otporniji na različite eksterne i interne uticaje kako bi se obezbedio kontinuiran rad.

Uzimajući sve ovo u obzir, četiri osobine se moraju razmotriti prilikom uspostavljanja sistema za monitoring:

1. Tačnost – zavisi od konkretnog objekta koji se osmatra. Najčešće je dovoljna centimetarska tačnost merenja pomeraja, ali u nekim slučajevima (pogotovo kod monitoringa objekata) neophodna je tačnost reda milimetra.
2. Modularnost – podrazumeva mogućnost promene elemenata sistema (senzora, komunikacionog uređaja...) uz minimalni prekid u radu.
3. Konfigurabilnost – mogućnost podešavanja parametara sistema poput dužine ciklusa opažanja, vrednosti tolerancija itd. Prilikom projektovanja sistema poželjno je da broj podesivih parametara bude što veći kako bi sistem bio optimalno dizajniran, dok se prilikom eksploatacije sistema zahteva minimalni utrošak vremena prilikom promene vrednosti parametara.
4. Robusnost – otpornost na uticaje i detekcija grešaka obezbeđuju autonoman i pouzdan rad sistema. Ona se ostvaruje adekvatnom instalacijom senzora, zaštitom od atmosferskih uticaja, definisanjem višestrukih merenja kao i procedura za proveru kojima je moguće detektovati pogrešna merenja i/ili eventualni kvar senzora.

Prilikom eksploatacije sistem za monitoring najjednostavnija sekvenca operacija koja se izvodi se sastoji od merenja sensorima tj. akvizicije, prenosa podataka i potom njihovo skladištenje. U skladu sa tim strukturu sistema čine tri celine:

1. Akvizicioni podsistem – čine ga senzori kojima se vrše merenja. Mogu meriti jednu ili više veličina. Izbor odgovarajućih senzora obezbeđuje traženu tačnost sistema, a ima uticaj i na nivo robusnosti.
2. Komunikacioni podsistem – veze između senzora i računara, kao i između samih računara. Komunikacija se može ostvarivati putem odgovarajućih kablova ili bežično, koristeći analogne i digitalne signale.
3. Računari sa instaliranim odgovarajućim softverom – obezbeđuju skladištenje podataka sa senzora, konfigurisanje sistema, analizu podataka, njihovu vizualizaciju i distribuciju. Izbor odgovarajućeg softverskog rešenja ima ključnu ulogu u ostvarivanju traženog nivoa modularnosti i konfigurabilnosti sistema.

4.1. Akvizicija podataka - merenje

4.1.1. Geodetski senzori

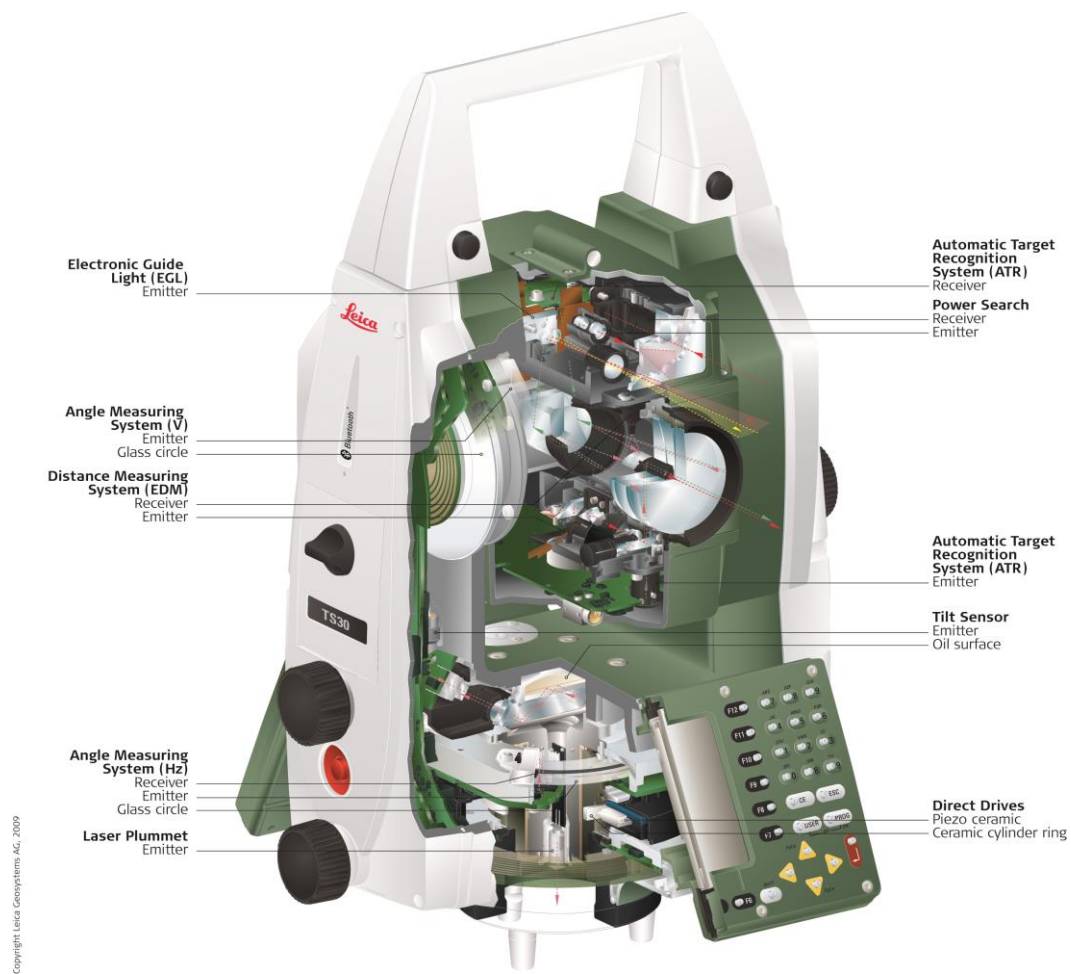
Geodetski instrumenti su u ne tako davnoj prošlosti bili jedini senzori koji su koristili za potrebe deformacionih merenja i monitoringa generalno. Ovu grupu instrumenata čine: totalne stanice (u prošlosti su to bili teodoliti), niveliri, GNSS uređaji, i dr. Lokacije na koje se geodetski instrumenti postavljaju su pretežno van zona deformacija, sem u slučaju GNSS tehnologije kada se GNSS prijemnici i antene ciljano postavljaju na karakteristična mesta kako bi se što bolje odredila nastala deformacija.

Kada je u pitanju skladištenje memorije, geodetski instrumenti poseduju internu memoriju na koju beleže i čuvaju rezultate merenja ostavrene na terenu. Povezivanjem senzora u geosenzorsku mrežu ostvaruju se mnogi benefiti koji se ogledaju u brzini prikupljanja i obrade podataka kao i skladištenju istih, i samim tim dobija se na vremenu u slučaju da nastale defomacije ugrožavaju ljudske živote.

4.1.1.1. Totalne stanice

Kombinovanjem elektronskog teodolita, distomata i računarske jedinice napravljen je instrument nazvan totalna stanica, koja objedinjuje sve karakteristike ova tri uređaja u jednu celinu. Tako totalna stanica meri za svako pojedinačno merenje sve parametre: horizontalni ugao, vertikalni ugao i udaljenost do opažane tačke.

Tokom poslednjih godina mnogi proizvođači geodetske opreme su razvili modele koji se međusobno razilkuju u pogledu tačnosti, dometa, brzine prikupljanja podataka kao i mogućnosti *on-line* obrade podataka [30].



Slika 11: Robotizovana totalna stanica

Robotizovane totalne stanice (Slika 11) su geodetski instrumenti za premer terena koji u sebi sadrže teodolit sa autonomnim režimom rada (*Automatic Target Recognition* - ATR) i laser za merenje dužina, koji može da meri dužine i do nereflektujućih površina. Motori koji su zaduženi za pokretanje instrumenta mogu precizno da postave instrument ka željenoj vizurnoj tački (Slika 12). Ova metoda je posebno pogodna za visoko precizna merenja, jer su eliminisane greške operatera [24].



Slika 12: Direct-drive motori za pokretanje robotizovane totalne stanice, bazirani na piezo efektu

Ovi instrumenti su takođe u stanju da prate prizmu u pokretu i da pri tome mere horizontalni i vertikalni ugao kao i udaljenost do prizme. Ako se prizma kreće i ako nekim slučajem robotizovana totalna stanica nije u stanju da očita njenu poziciju, obično je programirana tako da preskoči njeno čitanje i da nastavi dalje sa premerom ostalih prizmi.

Tačnost kojom totalne stanice mere uglove je u rasponu od 1" do 7", i dužine od 1mm+2ppm do 3mm+2ppm, u zavisnosti od tipa instrumenta, dok je vreme potrebno za registrovanje tačke oko 1 sekunde. Domet kod totalnih stanica prilikom korišćenja prizme se kreće od 3500m – 5000m, a bez prizme od 70m – 1000m [21].

Osamdesetih godina prošlog veka automatski sistem za nadzor se ugrađivao u precizne teodolite. Ovaj sistem se sastojao od servo-motora koji su bili zaduženi za pokretanje čitavog sistema i video kamere. Moderni sistemi kakve danas srećeno su mnogo sofisticiraniji. Ovakvi instrumenti u sebi sadrže laser koji emituje infracrveni signal koji stiže do prizme, i biva prelaman u sistemu prizminih sočiva, tako da se odbijeni signal reflektuje tačno iz centra prizme.

Nakon što operater izvrši nultu seriju merenja, izračuna približne koordinate svake ciljane prizme, ATR sistem je u stanju da sam vrši merenja željeni broj puta. Takođe pred korisnika se postavlja i mogućnost da sam izabere koliki će biti radijus pretraživanja, prag tolerancije, vreme izvršavanja naredne serije kao i mnoga druga podešavanja koja se nalaze u operativnom meniju [24].

Kao i kod svih drugih metoda, tako i totalne stanice imaju svoje prednosti i ograničenja u upotrebi. Pozitivne karakteristike robotizovanih totalnih stanica čine da se merenje 3D prostornih koordinata obavlja daljinski, bez operatera. Tačke koje se prate ne moraju biti pojedinačno povezane i svi elementi se lako menjaju ukoliko dodje do kvara. Ova jednostavnost postavljanja se odnosi na lokacije sa ograničenim prostorom za instalacije. Ako je neophodno, instrument se može postaviti u zoni građevinskih radova gde prašina kao i vibracije nepovoljno utiču na rezultate merenja, ali pažljivim odabirom lokacije za instrument, mogu se ostvariti merenja zadovoljavajuće tačnosti. Po završetku projekta, instrumentii svi prateći delovi se lako mogu ukloniti, ali prizme se ostavljaju na svojim mestima radi nekih budućih deformacionih merenja [21].

Visoki troškovi pri kupovini robotizovane totalne stanice se odnose većinski na sam instrument, tako da angažovanje operatera kod radova manjeg obima treba uzeti u razmatranje sa ekonomskog aspekta. Imajući u vidu da svaka robotizovana totalna stanica košta više desetina hiljada evra, zaštitne mere se moraju preduzeti od samog postavljanja instrumenta na željenu lokaciju. Instrument se stoga postavlja u neku vrstu kaveza koja predstavlja određen vid zaštite, ali i dalje ostaje opasnost od krađe ili havarisanja, nezavisno od lokacije, da li je u urbanoj ili ruralnoj sredini [50].

Kada je postavljen manji broj prizmi, njihova bezbednost je ugoržena od strane vandala i ogleđa se u pozicionom ometanju ili potpunom uklanjanju i uništavanju prizmi. Zaštitna kućišta mogu sačuvati robotizovanu totalnu stanicu od vremenskih uticaja, ali zaštita mora biti u funkciji linije dogledanja između instrumenta i signala (Slika 13).

Između instrumenta i prizme moraju biti postignute čiste vizure, tako da pozicija instrumenta mora unapred biti određena. Prirodne pojave kao što su kiša, sneg, magla, kao i voda na prizminom sistemu sočiva će značajno smanjiti performanse sistema. Ovakve prirodne pojave mogu u postpunosti sprečiti rad robotizovane totalne stanice. Kako je sam proizvođač naveo, tada instrumenti u većini slučajeva, ne mogu postići zadovoljavajuću tačnost [21].



Slika 13: Robotizovana totalna stanica postavljena na betonskom stubu u zaštitnoj kućici

4.1.1.2. Globalni navigacioni satelitski sistemi – GNSS

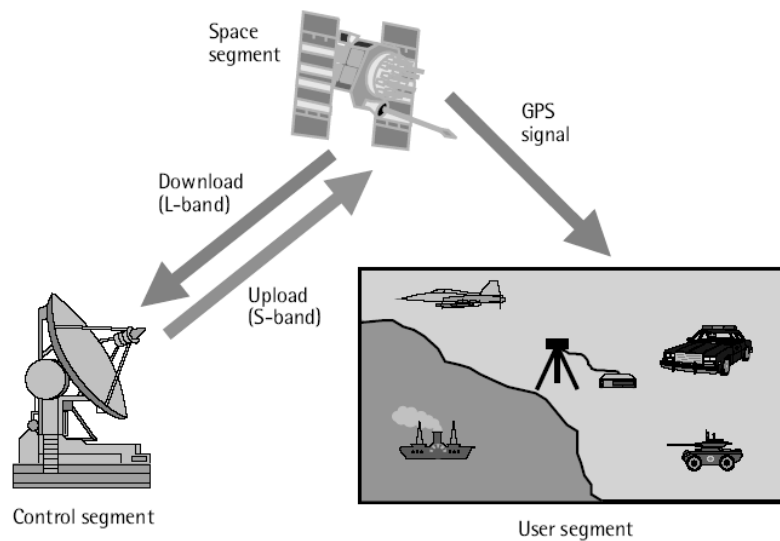
Razvoj satelitske tehnologije omogućio je napredak i u mnogim drugim disciplinama. Jedna od njih je i geodezija koja je globalne sisteme za navigaciju pomoću satelita (GNSS) prihvatila kao vanredno pogodan alat za različita merenja. Kroz praksu se pokazalo da je za merenja jednake tačnosti potrebno znatno manje i vremena i sredstava nego kada se koriste standardne tehnike geodetskog premera [9]. Takođe, GNSS prijemnici svojim fizičkim i mernim karakteristikama u velikom broju slučajeva predstavljaju odgovarajuće senzore u sistemima za monitoring [19, 40, 65].

Postoji više GNSS sistema od kojih su dva funkcionalna (američki GPS i ruski GLONASS), dok su ostali u različitim fazama razvoja (evropski Galileo, kineski Compass i dr). Međutim, samo je GPS u potpunosti funkcionalan, tj. omogućava određivanje pozicije sa uniformnom tačnošću na čitavoj zemaljskoj kugli.

Segmenti GPS

GPS se sastoji iz tri segmenta: svemirskog, zemaljskog ili kontrolnog i korisničkog segmenta (Slika 14). Svemirski segment čini 24 operativna i nekoliko rezervnih satelita. Operativni sateliti su raspoređeni u šest orbitalnih ravni (po četiri satelita u svakoj ravni) koje su

postavljene pod uglom od 55° u odnosu na ravan Ekvatora. Svaki satelit obiđe Zemlju za 12 sati.



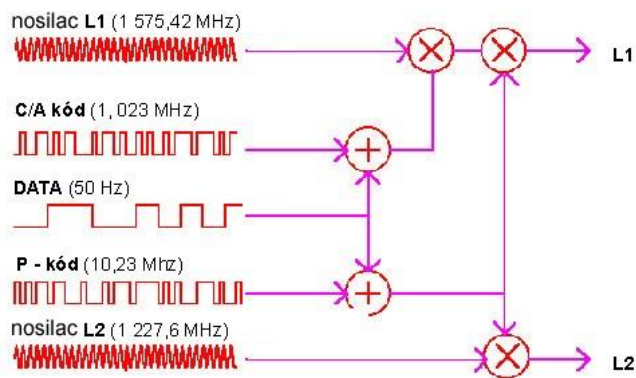
Slika 14: Segmenti GPS

Kontrolni segment se sastoji od pet kontrolnih stanica, glavne kontrolne stanice (Master control station) i antena. Kontrolne stanice i antene su uglavnom pozicionirane na istoj lokaciji i tako su raspoređene po površini Zemlje da je komunikacija sa bilo kojim satelitom moguća svakog trenutka sa bar jedne stanice. Funkcija kontrolnog segmenta je nadzor rada satelita i njihovih podсистема, računanje različitih korekcija, slanje podataka satelitima itd. Podaci se sa satelita prikupljaju u kontrolnim stanicama i odatle prosleđuju glavnoj kontrolnoj stanici smeštenoj u Kolorado Springsu u SAD. Glavna kontrolna stanica obrađuje prispele podatke, određuje korekcije (putanja, časovnika itd) i preko zemaljskih antena ih šalje satelitima.

Korisnički segment čine svi uređaji koji mogu da prime i pravilno obrade signal sa GPS satelita. GPS uređaji postoje u različitim oblicima: ručni, ugrađeni ili integrisani (u mobilne telefone, ručne satove itd), geodetski (koji se montiraju na različite stative). Kako korisnici samo primaju signal sa satelita, za GPS se kaže da je pasivan odnosno jednosmeran sistem.

Signali

Sateliti ka korisnicima emituju složen signal na dve frekvencije [33]. Signal se sastoji iz tri komponente: nosilaca, PRN kodova i navigacione poruke (Slika 15). Nosioci su prostoperiodični sinusni signali. Emituju se na dve frekvencije: L1 nosilac, na frekvenciji 1575.42MHz i L2 nosilac na frekvenciji 1227.6MHz. Frekvencije se dobijaju kao umnošci osnovnog takta frekvencije 10.23MHz koji se generiše atomskim časovnicima.



Slika 15: Komponente GPS signala

PRN (Pseudo-Random Noise) kodovi su digitalni signali. Iako su deterministički signali, zbog svojih statističkih karakteristika se nazivaju šumovima (Noise, engl. šum). C/A (Coarse/Acquisition) kod ima takt od 1.023Mhz i emituje se samo na L1 nosiocu. P (Precise) kod ima takt od 10.23MHz i emituje se na obe frekvencije nosioca. Civilnim korisnicima je dostupan samo C/A kod, dok je P kod dostupan samo vojsci. Svaki satelit ima jedinstveni kod i osim za određivanje rastojanja, kod se koristi i za identifikaciju satelita. Na taj način se realizuje kodno multipleksiranje signala – CDMA (Code Division Multiple Access).

Navigaciona poruka je digitalni signal, učestanosti 50Hz, koji sadrži podatke potrebne za rad sistema i određivanje pozicije. Pored podataka o stanju podsistema na satelitima, različitih podataka za korekcije, navigaciona poruka sadrži i podatke o putanjama satelita – efemeride, koji su neophodni za računanje pozicije prijemnika.

Određivanje pseudorastojanja

Prilikom merenja pozicije GPS-om, potrebno je odrediti rastojanje od satelita do GPS prijemnika. Kako je određeno rastojanje inicijalno opterećeno uticajem različitih izvora grešaka ono se naziva pseudorastojanje. Postoje dve metode za određivanje pseudorastojanja – kodna i fazna [75].

Kodnom metodom se pseudorastojanje meri posredno preko merenja vremena. U prijemniku se generiše kodna sekvenca identična sekvenci primeljenoj sa satelita. Razlika između dve sekvence je u vremenu, odnosno primljena sekvenca je pomerenjena u vremenu (Δt). Ta razlika je upravo ono vreme koje je bilo potrebno signalu da stigne od satelita do prijemnika. Kako je brzina prostiranja signala poznata ($c=299792.458\text{km/s}$) pseudorastojanje se određuje kao proizvod vremena i brzine:

$$\rho = c \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Posmatrano geometrijski, rastojanje između satelita i prijemnika se dobija kao:

$$\rho_R^S = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2} \quad (4.2)$$

gde je:

- ρ_R^S - geometrijsko rastojanje
- (X_R, Y_R, Z_R) – pravougle koordinate prijemnika
- (X^S, Y^S, Z^S) – pravougle koordinate satelita

Kada se uzmu u obzir uticaji nesavršenosti časovnika, jonosferska i troposferska refrakcija, matematički model za pseudorastojanje dobijeno kodnim merenjem je:

$$R_R^S = \rho_R^S + c \cdot (\delta t^S - \delta t_R) + I_R^S + T_R^S + \varepsilon_R \quad (4.3)$$

gde je:

- R_R^S - pseudorastojanje između satelita i prijemnika
- ρ_R^S - geometrijsko rastojanje između satelita i prijemnika
- c - brzina svetlosti
- δt^S - sistemska greška časovnika u satelitu
- δt_R - sistemska greška časovnika u prijemniku
- I_R^S - uticaj jonosfere između satelita i prijemnika
- T_R^S - uticaj troposfere između satelita i prijemnika
- ε_R - slučajne greške kodnih merenja pseudorastojanja

Fazna metoda se zasniva na korišćenju nosilaca i mogućnosti prijemnika da registruje fazu nosećeg signala. Rastojanje između satelita i prijemnika se određuje kao zbir celih perioda nosioca i faze. Broj celih perioda je nemoguće ustanoviti korišćenjem samo jednog prijemnika i taj problem se naziva fazna neodređenost. Stoga se ukoliko se koristi fazna metoda merenje obavlja sa bar dva prijemnika istovremeno. Matematički model za pseudorastojanje dobijeno faznim merenjem je:

$$R_R^S = \rho_R^S + c \cdot (\delta t^S - \delta t_R) + N \cdot \lambda - I_R^S + T_R^S + \varepsilon_\varphi \quad (4.4)$$

gde je:

- N - ceo broj talasnih dužina
- λ - talasna dužina
- ε_φ - slučajne greške faznih merenja pseudorastojanja

Ostale veličine su identične veličinama u izrazu za kodno merenje pseudorastojanja. Eliminisanje uticaja se postiže određivanjem jednostrukih, dvostrukih ili trostrukih faznih razlika. Ako dva prijemnika na tačkama T_1 i T_2 prate satelit j u istom trenutku vremena t izraz za jednostruke razlike se dobija kao:

$$D_{12}^j(t) = \rho_2^j(t) - \rho_1^j(t) + (N_2^j - N_1^j) \cdot \lambda - c \cdot (\Delta t_2^j - \Delta t_1^j) \quad (4.5)$$

Razlike faznih neodređenosti i nesinhronizacije časovnika su:

$$N_{12}^j = N_2^j - N_1^j; \Delta t_2^j - \Delta t_1^j = \delta t_{12}^j \quad (4.6)$$

Izraz za jednostruke razlike postaje:

$$D_{12}^j(t) = \rho_2^j(t) - \rho_1^j(t) + N_{12}^j \cdot \lambda - c \cdot \delta t_{12}^j \quad (4.7)$$

Prednost jednostrukih razlika je što ne sadrže greške orbite i greške atmosfere.

Dvostruke razlike se, za dve stanice T_1 i T_2 dobijaju oduzimanjem jednostrukih razlika, za isti vremenski trenutak ali za dva različita satelita:

$$DD_{12}^{jk}(t) = D_{12}^k(t) - D_{12}^j(t) \quad (4.8)$$

Uvrštavanjem izraza za jednostruke razlike i sređivanjem izraza dobija se:

$$DD_{12}^{jk}(t) + \rho_1^k(t) - \rho_1^j(t) = \rho_2^k(t) - \rho_2^j(t) + N_{12}^{jk} \cdot \lambda \quad (4.9)$$

Gde je $N_{12}^{jk} = N_{12}^k - N_{12}^j$

Dvostrukim razlikama se eliminišu greške časovnika u prijemnicima i na satelitima.

Trostruke razlike za dve stanice T_1 i T_2 i dva satelita j i k dobijaju se oduzimanjem dvostrukih razlika za dva različita vremenska trenutka merenja t_1 i t_2 :

$$DDD_{12}^{jk}(t_{12}) = DD_{12}^{jk}(t_2) - DD_{12}^{jk}(t_1) \quad (4.10)$$

Odnosno nakon uvrštavanja i sređivanja izraza:

$$DDD_{12}^{jk}(t_{12}) = [\rho_2^k(t_2) - \rho_2^j(t_2)] - [\rho_2^k(t_1) - \rho_2^j(t_1)] \quad (4.11)$$

Trostrukim razlikama se eliminišu fazne neodređenosti.

Greške merenja

Prema izvoru greške merenja GNSS-om se mogu podeliti u četiri grupe:

- Sistem – greške usled nesavršenosti čitavog sistema

- Atmosfera – greške koje se javljaju usled uticaja atmosfere na signal
- Okolina – greške usled uticaja okoline mernog mesta
- Prijemnik – greške usled nesavršenosti prijemnika

Sistemske greske su greške prouzrokovane tehničkim nesavršenostima samog sistema [25]:

Greška časovnika na satelitu - svaki satelit ima ugrađena četiri atomska časovnika, pri čemu je jedan aktivan a tri su rezervna. Greška ovih časovnika je bila reda ~ 1 ms, što odgovara rastojanju od ~ 300 km. Usavršavanjem sistema greška je svedena u opseg od 8,64 do 17,28 ns, što odgovara rastojanju od 2,59 do 5,18 m. Kontrolni segment sračunava popravku časovnika i prosleđuje je u okviru navigacione poruke.

Greška efemerida - Orbite satelita (efemeride) se izračunavaju svakih sat vremena na osnovu putanje satelita u protekla četiri sata. Nepreciznost pozicije satelita može da prouzrokuje grešku pozicije prijemnika od 2 do 5 metara (maksimalno 50 metara sa uključenom SA). Može se značajno umanjiti korišćenjem diferencijalne korekcije, jer baza i rover prate iste satelite. Greška efemerida se može eliminisati i korišćenjem preciznih efemerida koje se mogu preuzeti od IGS (*International GNSS Service*).

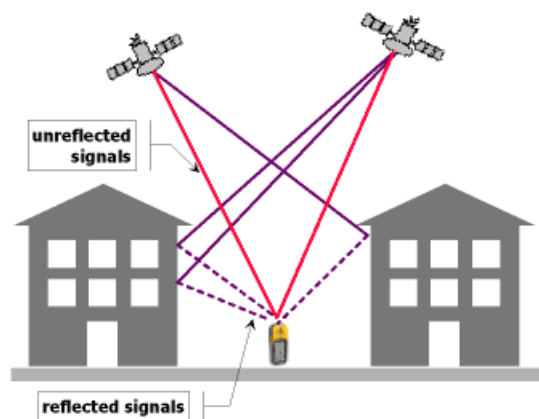
Selective availability (SA) - namerno degradiranje GPS signala. Uvedeno je 1990. godine iz bezbednosnih razloga. Greška merenja pozicije tačke pri uključenoj SA je i do 100 m. Ukinuta 2000. godine, ali je ostavljena mogućnost da se uključi po potrebi. U praksi se primenom diferencijalne korekcije uticaj SA se može značajno umanjiti, ali ne i potpuno eliminisati.

Greške izazvane relativističkim uticajima - usled kretanja satelita relativno velikom brzinom (~ 3.8 km/s), javljaju se efekti izazvani relativističkim uticajima: greška usled opšteg relativiteta (zakrivljenje prostora i vremena), greška usled specijalnog relativiteta (brži protok vremena pri većoj brzini kretanja), greška kao posledica ekscentriciteta krivine (orbite satelita nisu kružne već eliptične), greška kao posledica prolaska satelita kroz apogej (najbližu) i perigej (najdalju tačku orbite prema Zemlji), greška kao posledica rotacije Zemlje u toku procesa opažanja (*Sagnac* efekat). Ukupno usled relativističkih uticaja greška može iznositi i do $38 \mu\text{s}$ /dan što odgovara rastojanju od preko 11 km. Prve dve greške se kompenzuju tako što je oscilator na satelitu podešen na 10.22999999545 MHz, što se na Zemlji (prijemniku) opaža kao 10.23 MHz. Za ostale greške računa se korekcija pomoću podataka sadržanih u navigacionoj poruci.

Zbog veće gustine brzina propagacije signala je manja kroz atmosferu nego kroz vakum. Pri analizi uticaja atmosfere na prostiranje GNSS signala posmatra se uticaj gornjeg sloja (jonosfere) i donjeg sloja (troposfere). Jonsfera je sloj između 70 i 1000 km visine. Utiče na propagaciju signala usled velike koncentracije naelektrisanih čestica koja dovodi do disperzije i prelamanja - refrakcije signala. Uticaj jonsfere zavisi od frekvencije obrnuto je

proporcionalan elevaciji satelita, a oko pet puta je veći danju nego noću (~15m do 45m danju, ~3m do 9m noću). Može se u znatnoj meri umanjiti korišćenjem dvofrekventnih prijemnika. Troposfera je niži sloj atmosfere (do 50km visine). Kašnjenje signala ne zavisi od frekvencije, već od lokalne temperature, pritiska i relativne vlažnosti. Za ocenu uticaja troposfere koristi se neki od empirijskih matematičkih modela troposfere: Saastamoinen-ov (najčešće korišćen u Evropi), Hopfield-ov, Essen i Froome-ov i dr. Parametri troposfere zavise od lokalnih uslova merenja, korelacija izvora grešaka na krajevima bazne linije značajno slabi sa povećanjem dužine bazne linije. Već na rastojanju od 100km uticaji troposfere na bazni prijemnik i rover nisu korelisani.

Višestruka refleksija signala od okolnih objekata (*multipath*) je jedan od glavnih izvora grešaka koji prati GNSS rezultate merenja. GNSS signal do antene može dopreti na dva načina: kao direktan signal pravolinijski i kao indirektan signal reflektovan od tla ili nekog objekta u blizini (Slika 16). Veličina greške zavisi od jačine reflektovanog signala (što zavisi od koeficijenta refleksije površi) i mogućnosti antene da eliminiše reflektovane signale. U ekstremnim slučajevima može doći do prekida u prijemu signala. Pri kodnom merenju, greška je veća pri korišćenju C/A koda nego P koda, zbog manje frekvencije C/A koda. Prema podacima iz literature, veličina greške je oko 1m, mada su pri kraćim intervalima merenja uočene amplitude i od 20m. Pri faznim merenjima, može se pokazati da greška iznosi do $\frac{1}{4}$ talasne dužine nosioca (za L1 5cm, za L2 nosilac 6cm). Greška se može umanjiti primenom nekih algoritama za filtriranje signala, postavljanjem zaštitnika sa donje strane antene i primenom antene pogodnih konstrukcija (prvenstveno choke-ring antene).

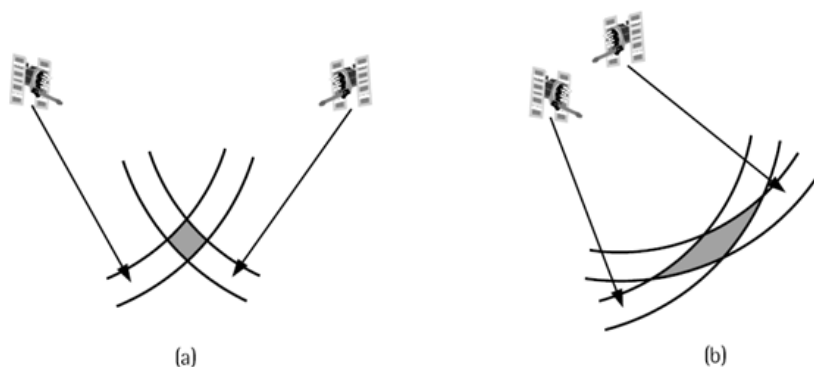


Slika 16: Višestruka refleksija GNSS signala

Kako su GNSS prijemnici namenjeni prijemu radio signala u vidu elektromagnetnih talasa, vrlo su osetljivi na smetnje u radio-opsegu. EMI (*ElectroMagnetic Interference*) – elektromagnetne smetnje emituju električni uređaji (elektromotori, transformatori, predajnici). Ovi signali se mešaju (dolazi do interferencije) sa GNSS signalima i uzrokuju odstupanja u merenjima, a u

nekim slučajevima do poteškoća u radu prijemnika. U ekstremnim slučajevima, usled izuzetno jakih smetnji, može doći do kvara GNSS prijemnika. Greška se umanjuje korišćenjem uređaja otpornim na smetnje. U nekim situacijama (najčešće vojne primene) se smetnje namerno generišu. Takve smetnje se nazivaju *jamming* i *spoofing*.

DOP faktori (*Dilution Of Precision*) opisuju uticaj prostornog rasporeda (geometrije) satelita na preciznost merenja. Sfere oko satelita nisu idealne pa njihov presek ima određenu površinu (Slika 17). Što su sateliti na međusobno manjem rastojanju DOP je veći, tj. presek sfera ima veću površinu pa je i merenje manje precizno.



Slika 17: Površina preseka sfera u slučaju međusobno udaljenih (a) i bliskih (b) satelita

Matrica A je formirana od vektora $a_i=(a_{xi}, b_{yi}, c_{zi}, 1)$. To su jedinični vektori usmereni od prijemnika ka i-tom satelitu. Ako uzmemo da je:

$$(A^T \cdot A)^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ & & D_{33} & D_{34} \\ & & & D_{44} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Faktori DOP se definišu na sledeći način:

$$\begin{array}{ll} \text{Geometric DOP} & GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}} \\ \text{Position DOP} & PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \\ \text{Horizontal DOP} & HDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22}} \\ \text{Vertical DOP} & VDOP = \sqrt{D_{33}} \\ \text{Time DOP} & TDOP = \sqrt{D_{44}} / c \end{array} \quad (4.13)$$

Metode pozicioniranja

Postoji više različitih metoda pozicioniranja pomoću GNSS [75]. Razlike među njima su u samom postupku merenja i tačnosti dobijenih pozicija, a oni proizilaze iz vrste pozicionog problema. Pod pozicioniranjem se podrazumeva određivanje prostornih položaja objekata.

Postoje dve vrste pozicioniranja i to:

apsolutno pozicioniranje

relativno pozicioniranje

Kod apsolutnog pozicioniranja položaj se određuje u globalnom elipsoidnom koordinatnom sistemu, koji je vezan za Zemlju, a kod relativnog pozicioniranja položaj se određuje u odnosu na neku tačku, koja se usvaja kao početak lokalnog koordinatnog sistema.

Tri osnovna poziciona problema su:

- Pozicioniranje jedne tačke (apsolutno pozicioniranje)
- Pozicioniranje dve tačke (relativno pozicioniranje ili "problem baze")
- Pozicioniranje više tačaka (mreže)

Uopštena podela pozicioniranja pomoću globalnog pozicionog sistema, se prema nameni vrši, na dve oblasti: za potrebe geodetskog premera i za navigaciju. U geodetskom premeru apsolutno pozicioniranje se retko koristi zbog male tačnosti, dok relativno pozicioniranje ima veoma široku primenu zbog visoke tačnosti pozicioniranja. Metode naknadne obrade podataka PPK (Post Processing Kinematic) i metode u realnom vremenu RTK (Real Time Kinematic) su ranijih godina bile ravnomerno zastupljene, ali poslednjih godina se sve više teži primeni RTK metode tj ka obradi podataka u realnom vremenu. U primeni kod geodetskog premera koriste se fazna ili kodna merenja [9].

Postoje dva režima rada pri određivanju koordinata tačaka:

1. statički (za vreme opažanja prijemnici ostaju nepokretni),
2. kinematički (za vreme opažanja prijemnici se kreću),

Prednost statičke metode je što se tako ostvaruje veliki broj prekobrojnih merenja, što je veoma povoljno za izravnjanje rezultata merenja, dok se kod kinematičke metode rezultati dobijaju u realnom vremenu, ali se zato koordinate tačaka određuju bez ili sa vrlo malim brojem prekobrojnih merenja. Najviša tačnost se dobija relativnim pozicioniranjem – faznim merenjima – u statičkom režimu rada.

Ono što je zajedničko za sve metode, ujedno i za ceo sistem je što se sve koordinate odnose na referentni geodetski koordinatni sistem WGS84. S obzirom na režim rada razlikuju se četiri osnovne metode pozicioniranja globalnim pozicionim sistemom:

- apsolutno statičko pozicioniranje,

- relativno statičko pozicioniranje,
- apsolutno kinematičko pozicioniranje,
- relativno kinematičko pozicioniranje.

U metode apsolutnog pozicioniranja spadaju: apsolutno statičko i apsolutno kinematičko pozicioniranje. Ove metode se odnose na određivanje apsolutnih koordinata tačke, primenom jednog prijemnika. Iako se zovu "apsolutne", ove koordinate su u suštini relativne, jer opisuju položaj tačke u odnosu na geocentar. Apsolutne metode se ne mogu koristiti u geodetske svrhe zbog nedovoljne izlazne tačnosti. Apsolutno statičko pozicioniranje odnosi se na nezavisno određivanje apsolutnih koordinata pojedinačnih tačaka nepomičnim GPS prijemnicima. Merenjem koje traje svega 1 s, postiže se tačnost od 20-50 m upotrebom C/A koda, odnosno 5-20 m upotrebom P koda. Za duže vreme merenja i upotrebom preciznih efemerida postiže se tačnost i od 2-5 m. S obzirom na izlaznu tačnost može se koristiti i za premer nepristupačnih oblasti, geofizička istraživanja i za vojne svrhe. Apsolutno kinematičko pozicioniranje predstavlja kontinuirano određivanje apsolutnih koordinata pokretne GPS antene. Tačnost dobijenih koordinata od 20 – 50 m dobija se za vreme od samo 1 ms, tako da se ova vrsta pozicioniranja koristi za navigaciju kopnenih, vodenih i vazdušnih vozila, ali nema geodetsku primenu. Ovom metodom se dobija najmanja tačnost, tako da je ova metoda naročito pogodna za službe koje zahtevaju praćenje položaja mobilnih objekata u realnom vremenu, bez visoke tačnosti (npr. vojne potrebe, navigacija – kopnenih, vodenih i vazdušnih vozila, orijentaciju u pustinjama i neispitanim područjima).

Relativno statičko pozicioniranje odnosi se na određivanje koordinatnih razlika između dve stanice na kojima su nepomične GNSS antene. Kako se u postupku formiranja koordinatnih razlika uticaji koji su slični za obe stanice većinom anuliraju, relativno statičko pozicioniranje predstavlja režim rada kojim se postiže visoka i geodetski interesantna tačnost. I u ovom načinu pozicioniranja mogu se koristiti kodna merenja, ali se u geodetske svrhe koristi isključivo merenje faze nosećih talasa. Faznim relativnim pozicioniranjem postiže se tačnost od 1 mm/km. Za udaljenost do 100 km postiže se tačnost od 2 mm/km, a i do 1 mm/km uz primenu preciznih efemerida. Prednost metode je da dogledanje stanica nije potrebno, a izlazna tačnost je jednaka ili viša od tačnosti koja se ostvaruje primenom elektrooptičkih daljinomera. Relativnim kinematičkim pozicioniranjem određuju se koordinatne razlike između antene koja je nepomična na tački sa poznatim koordinatama, i druge antene koja se premešta od tačke do tačke (rover) za koje treba odrediti koordinate. Vreme zadržavanja na novoj tački kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Korišćenjem P koda postiže se tačnost od oko 0.5 m, dok upotreba faznih merenja obezbeđuje tačnost od čak 5 mm. Jedini uslov koji mora biti zadovoljen je - kontinuiran prijem signala, bez faznih skokova. RTK je skraćenica od Real Time Kinematic. Referentna stanica ima priključen radio link i re-emituje podatke koje primi sa satelita. Rover takođe ima radio link i prima signale emitovane sa referentne stanice. Rover

takođe prima satelitske podatke direktno sa satelita koristeći svoju sopstvenu GPS antenu. Ova dva seta podataka mogu biti obrađivana zajedno na roveru u cilju rešavanja faznih neodređenosti i dobijanja veoma tačne pozicije relativno u odnosu na referentni prijemnik. Kada je referentni prijemnik postavljen i počeo da emituje podatke preko radio linka, rover može biti aktiviran. Kada rover prati satelite i prima podatke sa referentnog, on može početi proces inicijalizacije. Ovaj proces je sličan inicijalizaciji koja se vrši u naknadnoj obradi merenja, osnovna razlika je u tome što se sada izvodi u realnom vremenu. Nakon izvršene inicijalizacije, fazne neodređenosti su rešene i rover može registrovati tačke i koordinate. U tom trenutku, tačnost bazne linije će biti između 1 – 5 cm. Veoma je važno održavati kontakt sa referentnim prijemnikom, inače rover može izgubiti fazne neodređenosti. Tada rezultati imaju daleko manju pozicionu tačnost. Osim toga, problemi se mogu pojaviti kada se približi preprekama kao što su visoke zgrade, drveće itd. gde satelitski signali mogu biti blokirani. RTK je brzo postao najkorišćeniji metod za izvođenje visokopreciznih, visokotačnih GPS merenja na manjim područjima i može biti korišten za manje aplikacije kao konvencionalna totalna stanica.

Potrebna preciznost za merenja pomeranja klizišta je često reda centimetra. Stoga, glavno pitanje koje se postavlja je da li sateliti koji se kreću po orbitama na 20200km od površine Zemlje mogu biti korišćeni za merenje koordinata ili pomeraja tačaka lociranih na tlu sa preciznošću manjom od centimetra. U počecima korišćenja GPS-a za praćenje klizišta vršeno je više ispitivanja u kojima je potvrđeno da je moguće zadovoljiti ove zahteve za preciznošću. Tako je npr. Gervaise sa saradnicima 1985 upotrebio GPS za premer kontrolne mreže u blizini Ženeve. U trodnevnoj kampanji merenja ostvarena je tačnost od 4mm za vektore od 3 do 13km. Bock i saradnici su u Kaliforniji 1986. godine izvršili merenja više vektora dužina od 71 do 313km i ostvarili preciznost od 0.1ppm. Bonnard i saradnici su istovremenom primenom nekoliko GPS prijemnika ostvarili preciznost reda 1cm prilikom premera klizišta, što je veća preciznost nego kod premera tehnikama triangulacije. Pojedini autori ističu i efikasnost GPS premera kao npr Vaccaro koji je utvrdio da je GPS premer šest puta brži od klasičnog premera. Svi ovi podaci odnose se na statičku metodu premera. Međutim i kinematičke metode zadovoljavaju postavljene zahteve [26]. Tabela 3 daje osnovne karakteristike metoda pozicioniranja koje se najčešće koriste pri praćenju klizišta.

Tabela 3: Tipične vrednosti grešaka pri relativnom pozicioniranju

Metoda	Vreme opažanja po tački (posle inicijalizacije)	Post-procesing	Otpornost na prekide signala	Tipična dužina bazne linije [km]	Tipična vrednost položajne greške bazne linije
Statička	1 i više sati	Da	Robusna	50 – 100	5±1mm + 1±0.1ppm

Brza statička	8 – 20 min	Da	Robusna	15 – 20	5mm + 1ppm
RTK	1 – 10 s	Ne	Osetljiva	10	10mm + 2ppm

Koordinate rovera se računaju iz koordinata baze i izmerenog vektora (bazne linije):

$$X_{rover} = X_{baza} + \Delta X_{bazna_linija} \quad (4.14)$$

Uočava se da na tačnost koordinata rovera utiče greška određivanja bazne linije (data u tabeli 3). Međutim, moraju se uzeti u obzir greške prilikom postavljanja antene baznog prijemnika, kao i greška postavljanja rovera, te ukupna greška će biti suma grešaka bazne linije i postavljanja baze i rovera:

$$e(X_{rover}) = e(X_{baza}) + e(\text{postavljanje_baze}) + e(\Delta X_{bazna_linija}) + e(\text{postavljanje_rovera}) \quad (4.15)$$

Kao što je već pomenuto, glavni zadatak pri praćenju klizišta je određivanje pomeraja u određenom vremenu t (M^t), odnosno određivanje razlike koordinata u dva različita vremenska trenutka:

$$M_{rover}^t = (X_{rover})^t - (X_{rover})^0 = (X_{baza} + \Delta X_{bazna_linija})^t - (X_{baza} + \Delta X_{bazna_linija})^0 \quad (4.16)$$

Ako pretpostavimo da su koordinate baze iste u nultom i trenutku t , prethodni izraz postaje:

$$M_{rover}^t = (\Delta X_{bazna_linija})^t - (\Delta X_{bazna_linija})^0 \quad (4.17)$$

Iz ovog izraza se vidi da greška baze nema uticaj na računanje pomeraja. Pri monitoringu, ukoliko su koordinate baze nisu tačne to nema uticaja na računanje pomeraja, pod uslovom da se uvek koriste iste vrednosti i da je tačka na kojoj je postavljena baza dobro stabilisana. Takođe se može zaključiti da, pošto se računaju razlike, systemske greške se poništavaju, pa se umesto preciznosti govori o tačnosti određivanja pomeraja. Sa tog stanovišta preostali članovi u izrazu za grešku se mogu smatrati nezavisnim i slučajnim:

$$e(M_{rover}) = e(\text{postavljanje_baze})^t + e(\Delta X_{bazna_linija})^t + e(\text{postavljanje_rovera})^t - [e(\text{postavljanje_baze})^0 + e(\Delta X_{bazna_linija})^0 + e(\text{postavljanje_rovera})^0] \quad (4.18)$$

Greške postavljanja zavise od primenjenog metoda postavljanja prijemnika. Najmanje greške se javljaju pri direktnom postavljanju antene na tačku (reda 0.1mm), dok je najveća greška pri

korišćenju štapa sa centričnom libelom (i do 15mm). Često korišćeno rešenje je upotreba geodetskog stativa sa krutim, optičkim ili laserskim viskom gde greška postavljanja iznosi oko 3mm. Tipične vrednosti grešaka pri praćenju klizišta date su u Tabela 4, gde je $e(X_{rover})$ očekivana položajna greška rovera, $e(M_{rover})$ očekivana greška pomeraja u horizontalnoj ravni i $e(\Delta Z_{rover})$ očekivana greška pomeraja u vertikalnoj ravni.

Tabela 4: Tipične vrednosti grešaka pri određivanju pomeraja

Metoda	$e(X_{rover})$ [mm]	$e(M_{rover})$ [mm]	$e(\Delta Z_{rover})$ [mm]
Brza statička	12	17	26
RTK	16	22	35

GPS može biti korišćen kao alternativa ili kao podrška klasičnim tehnikama geodetskog merenja i praćenja klizišta. Pomaže u geotehničkim evaluacijama na strmim padinama pružajući 3D koordinate tačaka na kliznim površinama. GPS pozicioniranje se zasniva na merenju vremena prenosa radio talasa koji su emitovani sa satelita. Da bi prijemnik izračunao svoj položaj on mora imati vidljiva najmanje četiri satelita.

Formiranjem mreže GPS uređaja za praćenje deformacija može da se dobije mnogo veća preciznost nego što bi se dobilo kada bi se koristio samo jedan GPS uređaj. S mrežom ovih uređaja u mogućnosti smo da pratimo i detektujemo pomeranje položaja na kome se nalaze i sami merni instrumenti, tako da ukoliko ne bismo uzeli te deformacije u obzir to ne bi bilo merenje visoke preciznosti.

4.1.1.3. Digitalni niveliri

Napretkom elektronike, naročito tokom šezdesetih godina proteklog veka, omogućen je razvoj geodetskih elektronskih instrumenata manjih dimenzija, pogodnih za rad na terenu. Optički instrumenti se nisu mogli uključiti u takav tok razvoja jer se rezultati merenja kod njih ne mogu automatski registrovati. Zahvaljujući stalnom napretku u tehnologiji izrade, neprestanim inovacijama, razvoju globalnog tržišta, tokom 1980-tih i 1990-tih dolazi do znatnog smanjenja cena elektronskih instrumenata [74].

Zahvaljujući inovativnom konceptu primene letve s kodiranom podelom (Slika 18) i optoelektronskoj obradi signala preslikanog isečka letve, kod digitalnih nivelira je omogućeno automatsko čitanje letve, digitalna registracija i računarska obrada podataka. Automatizacijom nivelanja je znatno uvećana produktivnost pri izvođenju terenskih merenja, budući da više nema potrebe za vizuelnim očitavanjem letvi, zapisivanjem izmerenih podataka i manuelnim računanjima u cilju provođenja kontrola [74].



Slika 18: Različiti tipovi kodiranih i optičkih podela na nivelmanskim letvama

Niveliri najviše tačnosti, odnosno precizni niveliri, kako se najčešće nazivaju, namenjeni su za merenja visinskih razlika u državnim nivelmanskim mrežama viših redova, a važnu primenu imaju i u industrijskim merenjima, građevinarstvu, monitoringu i dr. Glavna razlika nivelira najviše tačnosti u odnosu na jednostavnije nivelire jeste primena mikrometra s planparalelnom pločom. Svi precizni optički niveliri imaju na durbinu ili ugrađen optički mikrometar za očitavanje merne letve ili je on izveden kao posebni deo – odvojena jedinica koja se dodaje niveliru. Zahvaljujući mikrometru, ovim nivelirima se postiže standardno odstupanje merene visinske razlike na 1 km, iz dvostrukog nivelanja od 0,5 mm ili bolje. Končanica durbina ima kod ovih nivelira u jednom delu oblik klina za precizno viziranje crte podele merne letve. Na taj način je tačnost očitavanja nezavisna od veličine slike podele letve, a to znači i od udaljenosti letve. U zavisnosti od podeli letve, merno područje iznosi 5 ili 10 mm.

Digitalni nivelir (Slika 19) izrađen je isto kao nivelir s kompenzatorom. Optički i mehanički delovi su isti. S digitalnim nivelikom mogu se izvoditi i klasična vizualna opažanja. Nivelir ima niz programa kojim omogućavaju kontrolu i obradu dobijenih podataka – očitavanje letve, dužina, broj tačke, stajalište, visinske razlike i dr. Podaci se prenose na računar putem memorijske kartice ili serijskog porta na dalju obradu. Uz digitalni nivelir postoji specijalna letva, koja kao podelu ima binarni kod – kodirana letva. S druge strane letve obično se nalazi klasična podela u jedinicama za dužinu. Ta podela služi pri vizualnom opažanju. Pomoću bar kodnih letvi moguće je meriti dužine od 1.8m do 100m. Ukoliko letva nije vertikalna ili se pomera, nivelir upozorava operatera. Kalibraciji digitalnih nivelira se mora pokloniti značajna pažnja. Kalibracijom se određuju popravke vrednosti čitanja letve, odnosno razmere digitalnog sistema za određivanje visina [34].

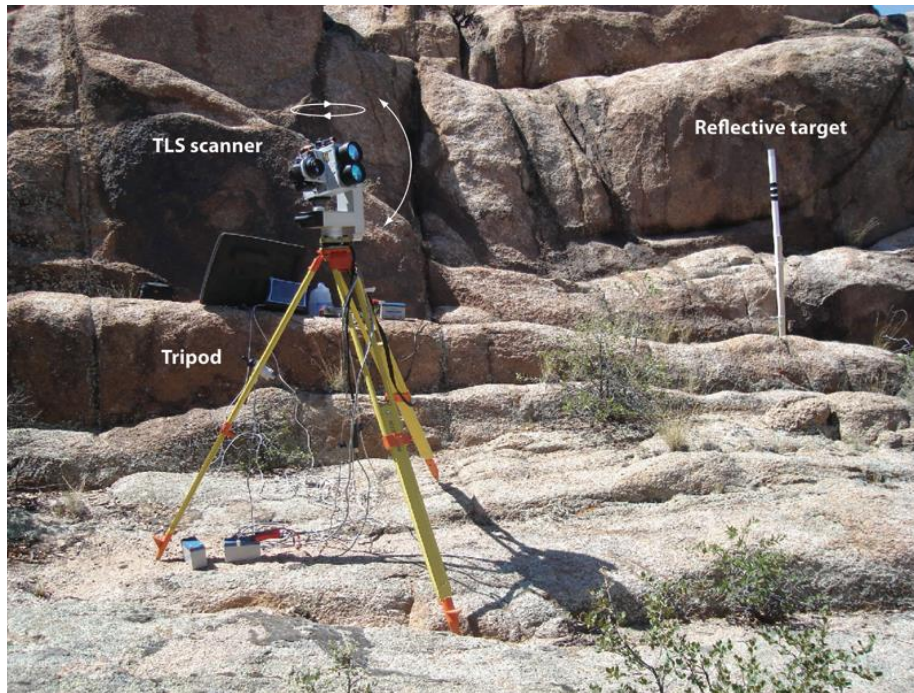


Slika 19: Digitalni nivelir Leica DNA03

4.1.1.4. Terestrički laserski skeneri

Trodimenzionalno lasersko skeniranje je u poslednje vreme postalo popularno u rudarstvu, inženjerstvu ali i u rekonstrukciji objekata od kulturnog značaja (Slika 20). Razlog je velika preciznost i brzina prikupljanja podataka u poređenju sa klasičnim metodama premera. Ova tehnika omogućava dobijanje objedinjenih, sveobuhvatnih, uzastopnih i uzajamno povezanih podataka velike preciznosti, prikazanih u koordinatnom sistemu. Takođe se dobija faktografski opis okvira i konfiguracije posmatranog objekta. Stoga su procene na osnovu takvih informacija bliže stvarnim uslovima. Za dobijanje podataka o padini koristi se metod statističke analize stepena promenljivosti podataka tokom vremenskih serija i 3D lasersko skeniranje.

Na osnovu tako dobijenih podataka moguća je analiza karakterističnog pomeranja tla određene padine [62]. Sistem 3D laserskog skeniranja je u stanju da preciznije predvidi klizanje padine. Međutim, problem kod ovog metoda jeste kako tačno utvrditi koja tačka na laserskom snimku korespondira sa kojom u prostoru.

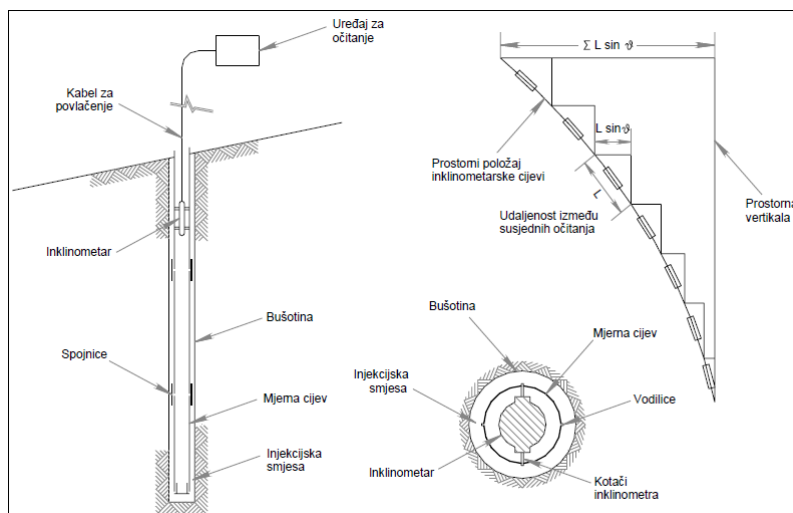


Slika 20: Laserski skener sa pratećom opremom

4.1.2. Geotehnički senzori

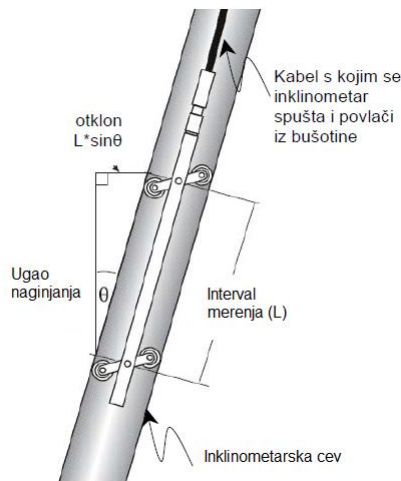
4.1.2.1. Senzori za merenje ugla

Inklinometri se koriste za podzemna merenja horizontalnih pomaka tla. Merenje se zasniva na merenju relativnih uglova zaokreta u tlo ugrađenih pvc cevi koje ujedno služe i za merenje kliznim mikrometrom [41]. Cevi se injektiranjem ugrađuju u izvedene bušotine. Tačnost inklinometra u terenskim uslovima iznosi ± 0.1 mm/m. Princip merenja inklinometrom prikazan je na Slika 21.



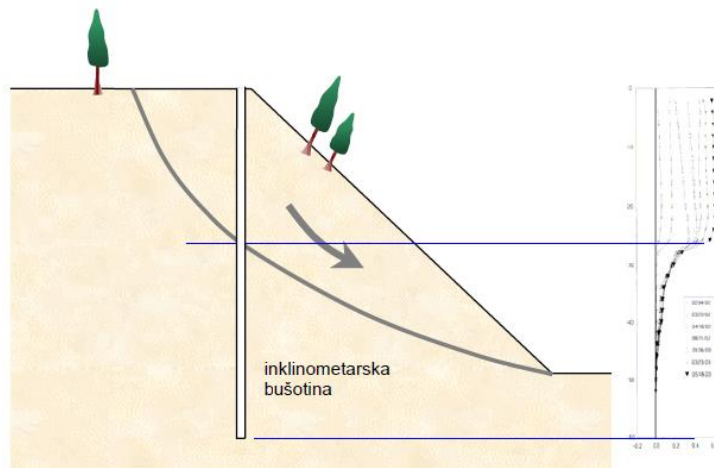
Slika 21: Princip merenja inklinometrom

Pomoću ojačanog električnog kabela inklinometarska sonda spušta se na dno bušotine. Inklinometarske cevi imaju na sebi urezana dva para vodilica koje omogućavaju vođenje inklinometra bez zakretanja. Inklinometar na sebi ima ugrađene točkove koji ulaze u vodilice inklinometarskih cevi (Slika 22). Ugrađen gravitacioni senzor meri ugao zaokreta inklinometarske sonde u odnosu na prostornu vertikalu. Povlačenjem sonde prema vrhu te očitanjem na svaki metar dobijaju se uglovi zaokreta inklinometarske cevi u odnosu na vertikalu. Integraljenjem uglova zaokreta dobijaju se horizontalni pomaci inklinometarske cevi.



Slika 22: Princip kretanja inklinometarske sonde unutar cevi

Inklinometarskim merenjima mogu veoma precizno da se detektuju pomaci na područjima kojima pretil opasnost od klizišta (Slika 23).

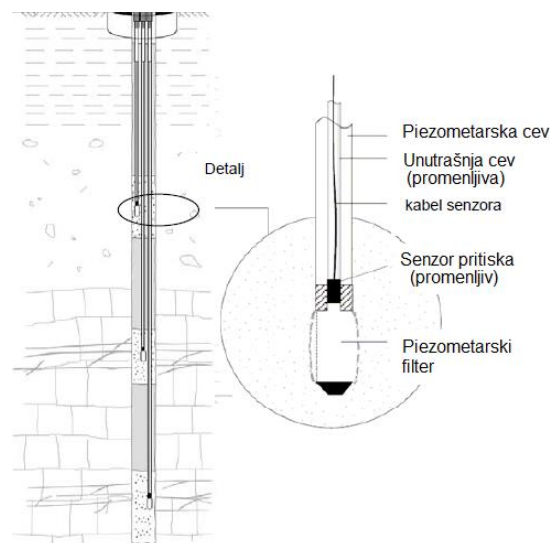


Slika 23: Formiranje vertikalnog profila primenom inklinometra

4.1.2.2. Senzori za merenje pritiska i sile

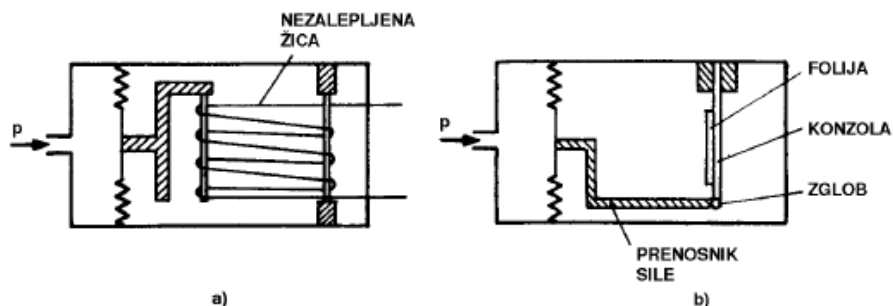
Nivo podzemne vode i piezometarski nivo se može meriti različitim tehnikama. Treba razlikovati nivo podzemnih voda i piezometarski nivo. Nivo podzemne vode je gornja površina podzemne vodene mase na kojoj vlada atmosferski pritisak. Piezometarski nivo je nivo vodenog stubca koji odgovara pritisku vode u nekoj tački u tlu gde je merenje izvršeno.

U jako vodopropusnim slojevima količina vode koja ulazi u cev može biti tako mala da merenje piezometarskog nivoa pomoću vodenog stuba praktično nije moguće. U ovim slučajevima koriste se električne piezometarske sonde velike osetljivosti, tako da brzo reaguju na svaku promenu pritiska (Slika 24). Izmereni podaci o pritisku na poziciji sonde prosleđuju se električnim kablovima do uređaja za akviziciju podataka.



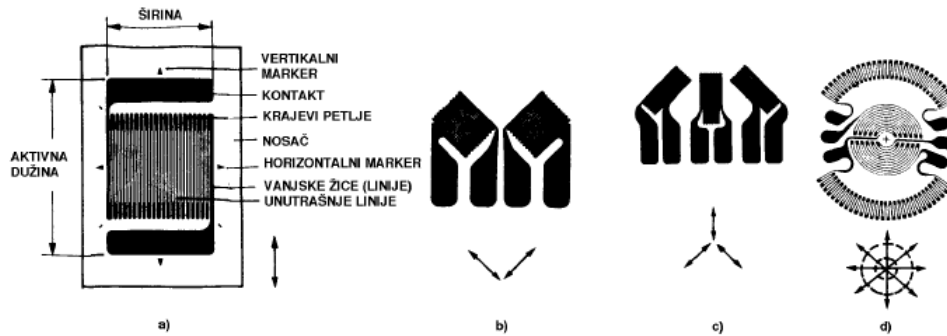
Slika 24: Piezometarska sonda

Tenzonelement (tenzometar, tenzootpornik, rastezna traka, merna traka) je pasivni otpornički senzor mehaničke deformacije (Slika 25). Njegov rad se zasniva na činjenici da se otpor električnog provodnika menja kada je taj provodnik izložen elastičnoj deformaciji. Tenzonelement je prvenstveno namenjen merenju površinskih deformacija, kao i posredno merenju drugih veličina koje mogu izazvati deformaciju. Tako se tenzonelementi primenjuju u gradnji senzora: pritiska, sile, momenta, ubrzanja, vibracije, nivoa i dr.



Slika 25: Senzor pritiska: a) sa slobodnom žicom, b) sa lepljenom trakom

Tenzoleменти u obliku folije se najviše primenjuju (Slika 26). Oblici otporničkog meandra prilagođeni su pravcima u kojima se meri deformacija. Žica od koje se pravi otpornik ima debljinu 0,003-0,01 mm. Materijal od kojeg je napravljena žica treba da ima što veći specifični otpor i što manji temperaturni koeficijent otpora. Veći otpor poželjan je da bi se smanjio uticaj otpora priključnih vodova na tačnost merenja.



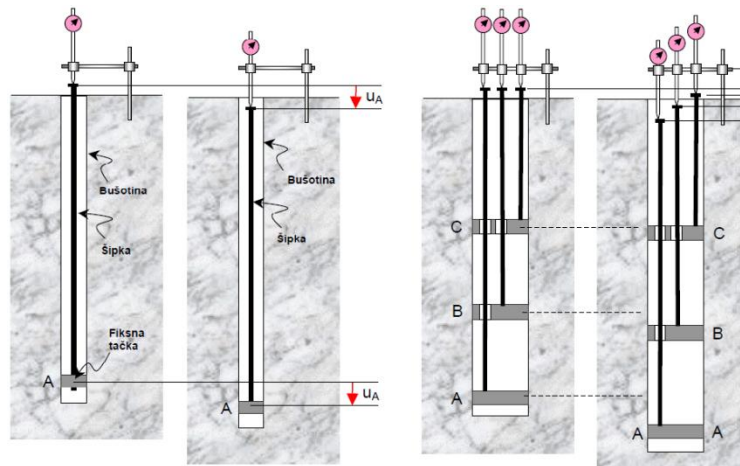
Slika 26 : Tipični oblici folijskog tenzoelementa sa naznakom pravca u kojem je osetljiv na deformaciju: a) linearna folija, b) moment-folija sa dva elementa, c) folija sa tri elementa, d) membranska folija

Otpornički materijal nanesen je na nosač od plastičnog materijala. Takav tenzoelement lepi se na mesto merenja deformacije. Tri faktora su bitna za tačnost merenja: priprema deformacione površine za lepljenje folije, izbor lepila i kvalitet podloge.

4.1.2.3. Senzori za merenje dužine

Ekstenzometri mere pomak dve tačke u pravcu bušotine. Ekstenzometarska merenja (izuzev jednostrukog ekstenzometra) pripadaju grupi tzv. linijskih merenja. Merenja koja se dobijaju upotrebom jednostrukog ekstenzometra su tačkasta. Štapni ekstenzometar se sastoji od jedne ili više ekstenzometarskih šipki i isto toliko merača pomaka. Jedan kraj ekstenzometarske šipke fiksira se u bušotini na željenoj dubini a drugi kraj je na samom vrhu bušotine. Svaki pomak tačke u kojoj je šipka fiksirana preneće se na vrh. Ako se izmeri pomak kraja šipke u odnosu na vrh bušotine tada je detektovan pomak fiksne tačke. Šipke se obično stavljaju u PVC cevi koje ih štite od eventualnog urušavanja bušotine.

Princip rada jednostrukog i trostrukog ekstenzometra prikazan je na Slika 27.



Slika 27 : Princip rada jednostrukog i trostrukog ekstenzometra

4.1.2.4. Senzori zasnovani na optičkim vlaknima

Istezanje materijala i deformacije savijanja su funkcionalno povezane veličine i jedna veličina se obično može izvesti iz druge [12]. Istezanje materijala može da se meri raznim uređajima, dok su senzori za merenje savijanja znatno manje zastupljeni. Tehnike pomaka talasne dužine i svetlosne interferometrije se mogu koristiti za merenje deformacija savijanja ali ovi sistemi su složeni i zahtevaju skupe spektrometre. Sa uvođenjem FOSS merenje deformacije savijanja strukture postalo je lakše i praktičnije. U zavisnosti od mehaničke konfiguracije FOSS, mnoge fizičke veličine, kao što su istezanje, torzija, pozicija, mogu se izračunati na osnovu merenja savijanja [44].

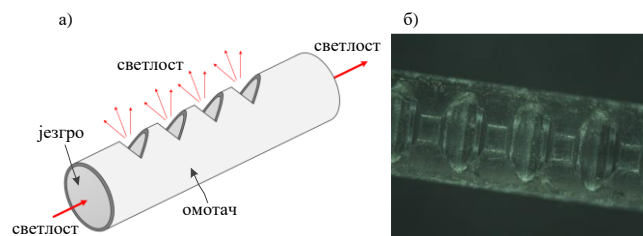
Merne trake se često koriste za merenje pritiska ili istezanja površine strukture, a zatim se savijanje može dobiti kroz funkcionalnu vezu između pritiska, istezanja i savijanja. Međutim, merne trake se ne mogu koristiti za merenje većih deformacija savijanja jer se neće vratiti u njihov prvobitni oblik nakon istezanja.

Prednosti FOSS su otpornost na elektromagnetne smetnje i koroziju, male dimenzije, visoka osetljivost i veliki propusni opseg. Fiber optički senzori mogu da se primene za merenje mnogih fizičkih veličina, kao što su napon, istezanje, temperatura, akustični talasi, itd.

U poslednjih nekoliko godina za merenje deformacija savijanja koriste se optička vlakna sa Bragovom rešetkom (FBG) i dugo-periodičnom rešetkom (LPG). Ovi visoko precizni i kompleksni sistemi zahtevaju skupe svetlosne izvore i analizatore spektra kao složene procese obrade podataka. Takođe, ne mogu razlikovati pozitivno savijanje od negativnog. Pored toga, na njihovu tačnost utiču spoljašnji uticaji, kao što je temperatura tako da je njihova praktična primena ograničena.

U optičkim vlaknima sa step-indeks profilom indeksa prelamanja, svetlosni zraci putuju duž cik-cak putanja, totalno reflektovani na razdvojnoj površini jezgra i omotača. Na mestu savijanja (deformacije) optičkog vlakna svetlost prodire u omotač i dalje u okolnu sredinu, odnosno krajnji rezultat savijanja optičkog vlakna je smanjenje intenziteta svetlosti na izlazu iz istog.

Dok je opisana pojava nepoželjna prilikom upotrebe optičkog vlakna za prenos informacije, može se iskoristiti za senzorske primene. Međutim, značajnija promena intenziteta javlja se tek pri relativno malim poluprečnicima savijanja optičkog vlakna. Osetljivost optičkog vlakna na savijanje može se povećati nanošenjem različitih vrsta strukturalnih nesavršenosti na površinu optičkog vlakna (Slika 28). Upravo na ovom principu zasniva se rad FOSS.



Slika 28: Fiber optički senzor savijanja (FOSS)

4.1.2.5. Senzori vibracija – akcelerometri

Akcelerometar je elektromehanički uređaj koji meri ubrzanje po jednoj ili više osa (2 ili 3 ose) merenjem sile/momenta inercije tela. Analogni akcelerometri na izlazu daju analogni napon, dok digitalni najčešće daju PWM signal. Merenje ubrzanja je jednostavan mehanizam za registrovanje malih kretanja objekta na višoj frekvenciji (ili vibriranja).

Akcelerometri se mogu klasifikovati po više kriterijuma:

- Konstruktivne osobine (način pomeranja i način vešanja)
- Tip izlaznog signala (kontinualni i diskretni)
- Tip veze između merenog ubrzanja i izlaznog signala (prosti i integrirajući)
- Način konverzije ubrzanja u izlazni signal (diskretni i kompenzacioni)
- Odnos vlastite frekvencije akcelerometra i opsega frekventnog spektra merenog ubrzanja (akcelerometri, velosimetri, vibrometri, rezonantni akcelerometri, polurezonantni akcelerometri)

Veliku primenu akcelerometri imaju u dinamičkim testiranjima konstrukcija kao što su mostovi (Slika 29). Pri merenju se beleže amplituda i frekvencija vibracija i ovi podaci su od velikog značaja u analizi stanja konstrukcije i planiranju eventualnih mera sanacije.



Slika 29: Akcelerometri instalirani na betonskoj konstrukciji mosta

4.1.3. Ostali senzori

Pored već pomenutih geodetskih i geotehničkih senzora, svoju ne toliko intenzivnu ali veoma bitnu primenu imaju meteorološki senzori. Za dobijanje sveobuhvatne slike stanja na terenu pored geodetskih senzora kojima se prikupljaju informacije koje su dostupne na površini zemlje, i geotehničkih senzora koji su pretežno zaduženi za prikazivanje stanja zemljišnih slojeva, pogodna je primena meteoroloških senzora, koji služe za predikciju vremenskih uslova u neposrednoj blizini klizišta. Dobijanjem stanja iznad zemljine površine, tj stanjem u atmosferi na odgovarajući način moguće je predvideti kretanje zemljišnih slojeva.

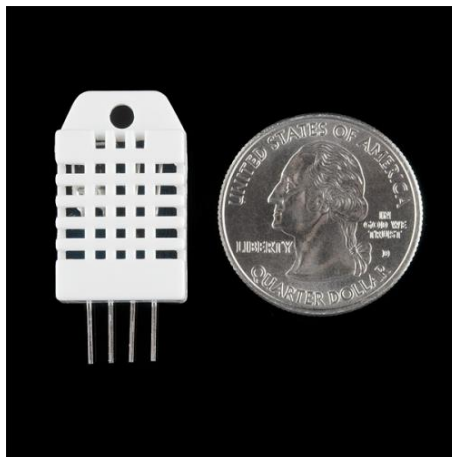
Meteorološki senzori u kompleksnijim geosenzorskim mrežama svoju primenu pronalaze kao alarmni podsistem za monitoring. Kada su u pitanju takve geosenzorske mreže koje pokrivaju područja velike površine i kada se takvo područje prati duži niz godina, za njega je razvijen čitav niz scenarija ili atmosferskih modela, uzimajući u obzir i vremenske prilike. Pažljivim analiziranjem vremenskih prilika na datom području kroz duži vremenski period moguće je formirati modele, koji na odgovarajući način pružaju informacije o mogućim vremenskim

prilikama na osnovu nekoliko podataka. Posedovanje takvih podataka u mnogome podiže kvalitet čitavog sistema sa aspekta količine i raznovrsnosti informacija kojima čitav sistem raspolaže.

Meteorološki senzori sa stanovišta izlaznog signala koji emituju mogu biti analogni i digitalni senzori. Analogni senzori izlazni signal emituju u obliku voltaže ili napona, dok senzori sa digitalnim izlazom signale šalju u vidu bita ili grupe bita koji sadrže informacije koje je taj senzor prikupio.

Senzori koji pronalaze najveću primenu u sistemima za monitoring su senzor temperature i relativne vlažnosti vazduha, i senzor za vrstu i intenzitet padavina.

Senzor temperature i relativne vlažnosti vazduha (Slika 30) sakuplja podatke o temperaturi i relativnoj vlažnosti vazduha. Ovaj senzor omogućava kombinovano merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha. Merenje relativne vlažnosti vazduha teče obično po principu kapaciteta, a merenje temperature na principu otpornosti ili termistorom.



Slika 30: Senzor vlažnosti vazduha u prirodnoj veličini

Senzor za vrstu i intenzitet padavina (Slika 31) može detektovati više različitih nivoa intenziteta padavina ili njihov intenzitet u mm/h i njihov oblik – kiša, sneg i ostali oblici padavina kao što su ledena kiša, grad, susnežica, izmaglica. Senzor se obično zasniva na optičkom principu rada (laser, IR). Njegov rad mora da bude pouzdan a građa robusna tako da bude otporan na prljavštinu koja dospe iz atmosfere. Takođe, mora da da poseduje funkciju za automatsku kalibraciju senzora.



Slika 31: Senzor količine padavina - rain guage

Atmosferski pritisak: Postoji široka raznovrsnost uređaja koji se uglavnom zasnivaju na korišćenju aneroidnih kapsula, vibrirajuće žice ili kristala kvarca koji obezbeđuju output u električnom analognom ili digitalnom obliku.

Temperatura: Najzastupljenije vrste termometara koji se koriste su rezistentni termometri izradjeni samo od metala ili termistori. Rezistentni termometar izradjen od platine i pokazuje veoma dobru dugoročnu stabilnost, te se može smatrati preferencijalnom vrstom senzora.

Padavine: Najčešća oprema za merenje kiše su kišomeri sa kofom. Merači se brzo zakoče zaglavljenom nečistoćom kao što je lišće, pesak i ptičji izmet i dr. Za merenje kiše i snežnih padavina ispod 0° C, različiti delovi merača se moraju pravilno ugrejati. Ovo može dovesti do ozbiljnih problema s električnom energijom, posebno za one sisteme koji rade na baterije. Treba voditi računa jer ugrejani merni uređaji dovode do greške zbog gubitka isparavanja. Može se postići preciznost od 5% do 10% koja se smatra odličnom. Preciznost se može poboljšati time što se kišomer okruži odgovarajućim zaklonom od vetra.

4.1.4. Tehnologije za indirektno izvođenje merenja

4.1.4.1. Georadar

U slučajevima monitoringa terena široku primenu nalazi i georadar (engl. Ground Penetrating Radar – GPR). Ova tehnologija se koristi za detekciju slojeva zemljišta, određivanje nivoa podzemnih voda, detekciju anomalija u strukturi zemljišta, određivanje sadržaja vlage u zemljištu itd.

Osnovni princip rada georadara je isti kao i terestričkog radara, tj. emitovanje i prijem reflektovanih elektromagnetnih talasa. Georadar u zemljište emituje elektromagnetne talase u vidu kratkih impulsa. Kada naiđe na promenu u strukturi deo talasa se reflektuje ka anteni, dok deo nastavlja sa propagacijom ka dubljim slojevima. Kašnjenje reflektovanog impulsa zavisi od relativne dubine na kojoj se nalazi promena strukture koja je izazavala refleksiju. Suma ovih refleksija se naziva kompozitni sken, ili samo sken. Dubina na kojoj se nalazi detektovana promena se dobija kao proizvod kašnjenja i brzine propagacije. Kako se, za razliku od terestričkog radara, kod georadara talasi prostiru kroz zemljište a ne kroz vazduh, brzina propagacije zavisi od električnih i magnetnih svojstava zemljišta. Osim u retkim slučajevima, brzina u najvećoj meri zavisi od relativne dielektrične konstante ϵ_R , pa se za primenu usvaja aproksimacija

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_R}}, \quad (4.19)$$

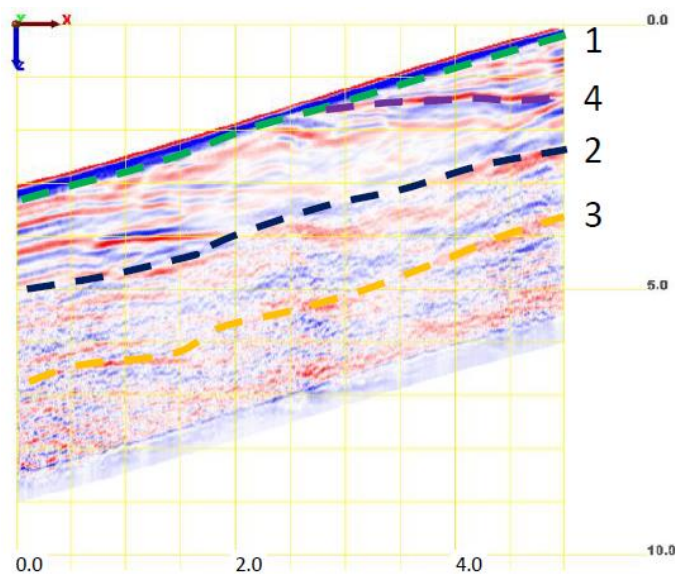
Gde je:

v – brzina prostiranja elektromagnetnog talasa kroz medijum

c – brzina svetlosti u vakuumu ($c \approx 300 \cdot 10^6$ m/s)

ϵ_R – relativna dielektrična konstanta medijuma

Niz sukcesivnih skenova se naziva radargram i interpretacijom radargrama dolazi se do rezultata primene georadara (Slika 32). Koristeći ekspertsko znanje, a uz pomoć odgovarajućih softverskih alata, iz radargrama se dobijaju informacije o dubini slojeva tla, lokaciji podzemnih objekata (npr. podzemne instalacije), dubini klizne ravni na klizištima, lokacijama oštećenja strukture itd [64]. Takođe, u nekim primena koje su od interesa za oblast monitoringa terena (npr. geologija) za interpretaciju nije potrebno formirati radargram već se analizira jedan sken primenom različitih metoda obrade signala u vremenskom i frekventnom domenu.

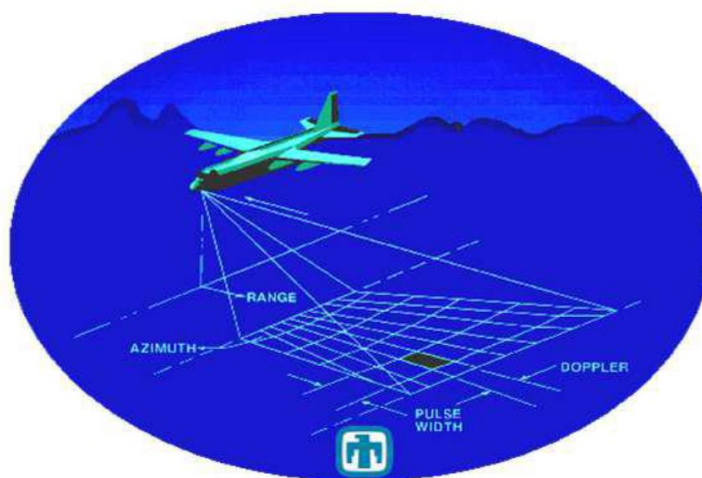


Slika 32: Interpretacija radargrama – slojevi zemljišta u telu klizišta

Uspešna akvizicija podataka pomoću georadara u mnogome zavisi od kvaliteta interpretacije radargrama, odnosno od nivoa znanja operatera koji analizira radargram. Time je tehnologija georadara ograničena na primenu u periodičnom monitoringu, odnosno georadar se ne integriše u sisteme za monitoring u realnom vremenu. Međutim, zahvaljujući napretku u oblastima računarske inteligencije sve više se pojavljuju metode koje omogućavaju automatizaciju interpretacije. Tehnike prepoznavanja oblika (*pattern recognition*), mašinskog učenja (*machine learning*), automatske klasifikacije, i druge, omogućavaju da se interpretacija radargrama podigne na viši nivo automatizacije [63]. Na taj način će i georadar moći biti integrisan u sisteme za monitoring kao jedan od senzora kojim bi se vršila merenja u pravilnim intervalima. Poređenjem skenova ili radargrama iz različitih serija merenja bilo bi moguće detektovati promene u strukturi zemljišta, ne samo u prostornom nego i u vremenskom smislu. Georadar bi takođe bio jedini senzor koji bi obezbeđivao podatke o podpovršinskoj strukturi, a da je pri tom njegova instalacija potpuno neinvazivna, odnosno ne zahteva se instalacija u zemljište.

4.1.4.2. Synthetic Aperture Radar (SAR)

Nadgledanje okoline, mapiranje zemljišnih resursa, pa i vojni sistemi zahtevaju prikaz oblasti tj. snimak u visokoj rezoluciji. U vedini slučajeva radarski snimak može da se napravi u lošim vremenskim uslovima, pa čak i noću [20]. Mogućnost da se izvrše ovakva snimanja terena, objekata, vremenskih uslova i promena u prirodi, pruža SAR – Synthetic Aperture Radar. SAR koristi prednosti dalekodosežnosti prostiranja radarskog signala i mogućnosti elektronskih uređaja da obrade kompleksne informacije kako bi dali prikaze u visokoj rezoluciji [66]. SAR takođe sintetički povedava veličinu antene kako bi povedao rezoluciju azimuta pri istom pulsu signala i istom pravcu prostiranja i time on praktično otklanja tehnički nedostatak RAR radara u vidu fizičkog povedanja antene koje je, naravno ograničeno. Na Slika 33 prikazan je koncept snimanja terena uz pomod SAR-a.



Slika 33: Synthetic Aperture Radar - SAR

Interferometric SAR (InSAR) je radarska tehnika koja se intenzivno koristi u geodeziji i daljinskoj detekciji. Ovaj geodetski metod koristi dve ili više SAR slike kako bi generisao mape površinskih deformacija ili mape digitalnih elevacija (digitalna predstava terena), koristeći faznu razliku talasa koji se vraćaju ka satelitu. Ova tehnika teoretski može da izmeri promene reda centimetra u vremenskom rasponu od dana pa do godine. Za njega su takođe razvijene aplikacije za geofizička posmatranja prirodnih katastrofa kao na primer zemljotresa, vulkana, klizišta itd.

4.2. Komunikacija

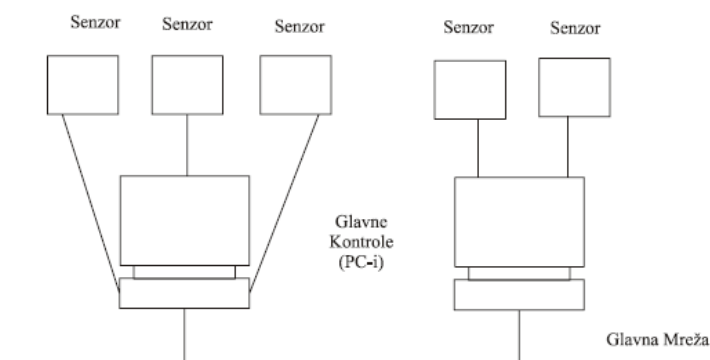
4.2.1. Mreže sa kablovskom konekcijom

Primene mrežnih aplikacija inteligentnih senzora se veoma razlikuju, od nekoliko senzora unutar običnog instrumenta do hiljade senzora distribuiranih širom nekog fabričkog postrojenja. Te mreže mogu biti žične, bežične ili kombinovane (kombinacija žične i bežične) u zavisnosti od aplikacionih zahteva i troškova. Ostale karakteristike, kao što su brzina prenosa, ograničenje snage i fizički broj senzora, igraju važnu ulogu u postavljanju zahteva u pogledu arhitekture senzorske mreže. Osim toga nije izvodivo definisati standardnu arhitekturu koja će biti optimalna za sve senzorske aplikacije, ali je korisno analizirati tipične arhitekture i razmotriti kriterijume kako bi se izabrala odgovarajuća senzorska mreža za datu aplikaciju.

Kad se koristi veći broj senzora, projektanti moraju razmotriti način povezivanja senzora. Kada je potreban konačan broj senzora najzastupljenija arhitektura je *point-to-point* arhitektura, kako bi se povezali senzori na glavni kontrolni sistem gde se prikupljaju podaci. Taj glavni kontrolni sistem može biti PC računar ili neki drugi kontrolni modul unutar sistema. Ova arhitektura je prikazana na (Slika 34). Iako glavni kontroler može biti umrežen kako bi delio informacije, ova arhitektura je najbolja za aplikacije gde umrežavanje senzora nije primarni zahtev. Kod ove arhitekture, komponenta odnosno senzorski moduli ne zahtevaju procesiranje signala unutar samog modula kao ni umrežavanje.

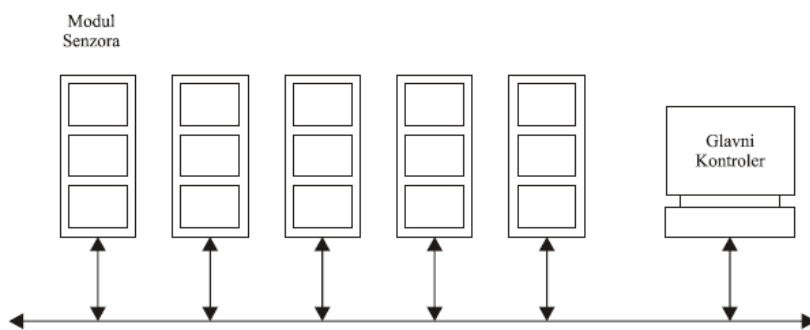
Kod ovog pristupa, svaki senzorski modul sadrži senzor, hardver za obradu signala (tipično je to mikrokontroler) i mrežni interfejs koji može ali ne mora fizički biti integrisan sa mikrokontrolerom. Prednost ovakve arhitekture je da značajno procesiranje signala može biti izvršeno unutar samog senzorskog modula i koristeći standardnu mrežnu magistralu senzor može da deli informacije. I²C magistrala je veoma pogodna za ovakvu arhitekturu, a TII (IEEE P1451.2) magistrala može da se koristi samo kad je jedan senzorski modul vezan na HOST sistem. Primarna slabost ovakve arhitekture je njena ograničena optimizacija resursa, tipično svaki senzorski modul radi kao potpuno autonomna jedinica bez deljenja obrade signala i

interfejsa, čak i u slučaju kad su senzori fizički lokalizovani zajedno. Kao rezultat teško je optimizovati disipaciju i minimizirati senzorsku mrežu.



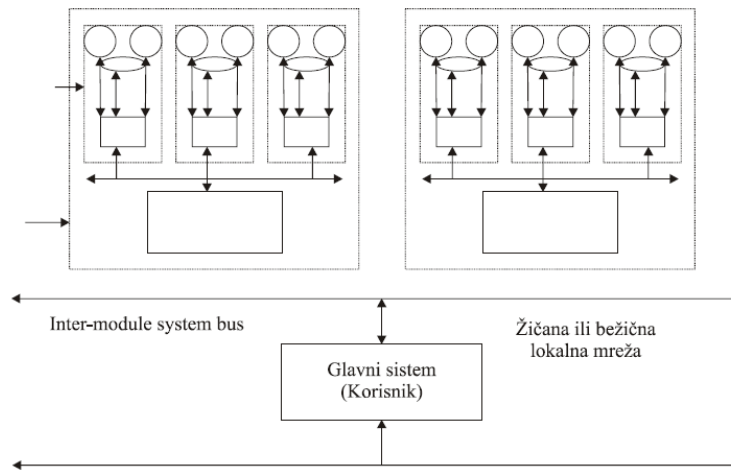
Slika 34: Point-to-point veza

Alternativna arhitektura, koja je postala prilično popularna u mnogim aplikacijama, je ona koja koristi inteligentne senzore vezane na mrežu sa master (glavnim) kontrolnim sistemom kao što je prikazano na Slika 35.



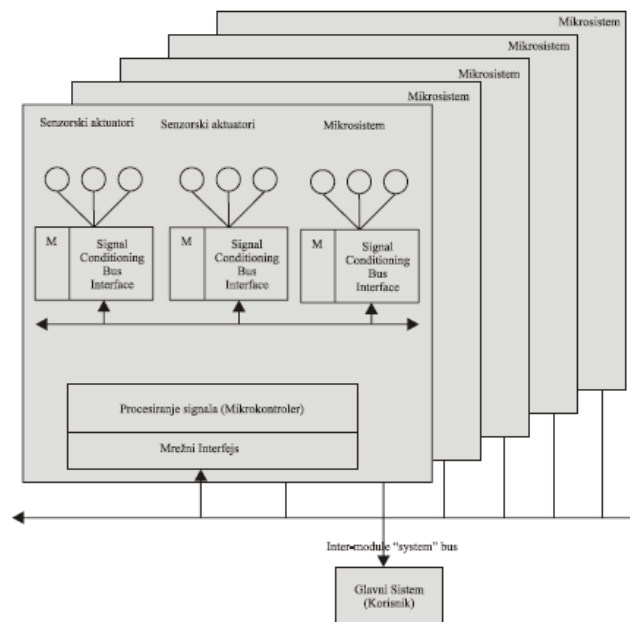
Slika 35: Način povezivanja inteligentnih senzora u mrežu sa računarom

Naredna arhitektura uključuje mnogo kompleksniju višenivovsku mrežu prikazanu na (Slika 36). Ovaj pristup koristi serije komunikacionih magistrala za transport podataka između senzora i aktuatora kroz sekvencu sve više 'inteligentne' elektronike. Ovde su senzori i aktuatori vezani direktno za kolo koje kondicionira signale unutar samog senzorskog čvora. Svaki senzorski čvor komunicira sa mikrosistemskim kontrolerom, tipično preko žične 'intramodulske' magistrale, koji može da ostvari neku signalnu obradu i korekciju – spajanje podataka iz senzorskih čvorova. Mikrosistemski čvorovi komuniciraju preko systemske magistrale koja može biti žična ili bežična zavisno od aplikacije, mogu da dele podatke ili izveštaj sa HOST sistemom za dalje procesiranje i/ili dugoročno memorisanje. Konačno, HOST sistem može biti vezan u neku veću mrežu 'large-scale network', kao što je Internet.



Slika 36: Višenivovska mreža senzora

Postoji nekoliko prednosti ovakve arhitekture kod aplikacija koje koriste veliki broj senzora. Prvo, višenivovska razgranata mreža dozvoljava pristup ogromnom broju senzora/aktuatora (tipično na hiljade u zavisnosti od specijalno izabranog magistralnog protokola) unutar iste mreže. Drugo, ovakav pristup optimizuje resurse za obradu signala tako što dozvoljava da mnoge funkcije budu deljive tako da minimizira redundantnu elektroniku. Slika 37 prikazuje tipičnu dvonivovsku magistralnu mrežu koja koristi ovakvu arhitekturu i ilustruje idealnu lokaciju za kondicionere signala, procesore signala i mrežni hardver koji minimizira zahtevanu elektroniku za ceo sistem.



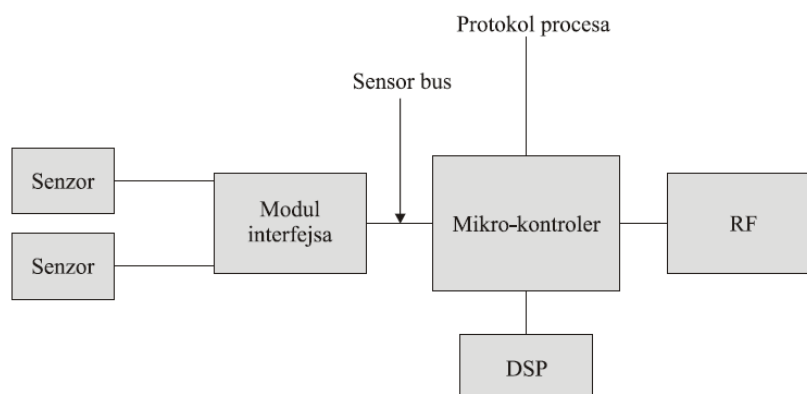
Slika 37: Dvonivovska magistralna mreža

Treće, značajna prednost ovakvog pristupa je redukcija potrošnje celog sistema. Konačno, ova arhitektura je veoma fleksibilna i može biti prilagođena mnogim aplikacijama senzorskih mreža.

4.2.2. Bežična komunikacija

Bežične senzorske mreže kombinuju mikrosenzorsku tehnologiju, obradu signala malih snaga i bežične mreže malih cena u jedan mali sistem. On obezbeđuje distribuiranu mrežu i Internet pristup sensorima i kontrolnim sensorima smeštenim duboko u okruženje ili postrojenje. Senzorski čvorovi su razmešteni preko interesnog područja i poseduju mogućnost RF-komunikacija signalnih procesa i procesa komunikacionih protokola. To omogućava stotinama i hiljadama čvorova da sarađuju u mreži radi izvršavanja velikih zadataka. Primer jedne strukture senzorskih čvorova za bežične mreže je prikazan na Slika 38, iako i arhitekture prikazane na Slika 36 i Slika 37 takođe podržavaju bežične mreže mikrosistemskih modula.

Bežična senzorska mreža se razlikuje od konvencionalne. Mala veličina senzorskog čvora ograničava kapacitet baterije koja je potrebna da bi se svaka operacija efikasno obavila. Ona takođe ograničava i opseg radio-prenosa i sugerise malu *multi-hop* prenosnu strukturu. Korišćenje nekoliko poslednjih čvorova malog dometa radi slanja bita je mnogo efikasnija sa stanovišta energije nego korišćenje jednog čvora *long-hop*. Kod mreža tipa *multi-hop*, čvorovi ne mogu znati apriori optimalan put ka drugim čvorovima. Stoga, novi mrežni protokol je potreban za koordiniranje otkrivanja i praćenja puteva u mreži sa minimalnom potrošnjom snage. Takođe, i u bežičnim senzorskim mrežama, senzorski čvorovi će ostati uglavnom neaktivni za dug vremenski period, a zatim postati iznenadno aktivni kada se nešto detektuje ili se pojavi neki vremenski događaj.



Slika 38: Bežično povezivanje senzora

4.3. Softverska rešenja u oblasti monitoringa

Esencijalna komponenta sistema za monitoring u realnom vremenu je softver. Senzori merenjima generišu podatke koji putem komunikacione komponente stižu do računara. Softver instaliran na računaru te podatke arhivira, obrađuje, analizira, vizualizuje i distribuira. S obzirom na veliku raznolikost senzora poželjno je da softver obezbeđuje podršku za što veći broj senzora. Na softverskoj komponenti sistema je, takođe, zadatak da obezbedi konfigurabilnost sistema, tj. mogućnost podešavanja što većeg broja parametara i time veća efikasnost i prilagodljivost sistema.

Na tržištu postoji nekoliko komercijalnih softverskih paketa. Dominantnu poziciju imaju proizvodi kompanija koje su najzastupljenije u oblasti geodetske opreme i softvera. U ovoj disertaciji će se detaljnije analizirati softverski paket Leica GeoMos. Takođe će biti analiziran paket Leica GNSS Spider, iako njegova primarna namena nije monitoring već upravljanje mrežama permanentnih GNSS stanica, ali poseduje određene funkcionalnosti namenjene monitoringu, a takođe je obezbeđena integracija sa GeoMos-m. U određenoj meri će biti prikazane mogućnosti paketa Trimble 4D Control, dok za softverski paket Topcon Delta Watch, nije bilo moguće pronaći slobodno dostupne detaljnije informacije.

U okviru nekomercijalnih softverskih rešenja ističe se 52°North SOS. To je slobodno dostupna implementacija OGC SWE SOS specifikacije. Ona omogućava unošenje i preuzimanje georeferenciranih podataka opažanja u standardnom formatu (OGC SWE O&M specifikacija), kao i podataka o sensorima (OGC SensorML specifikacija). U narednim podpoglavljima su opisane specifikacije iz OGC SWE familije, kao i 52°North SOS implementacija.

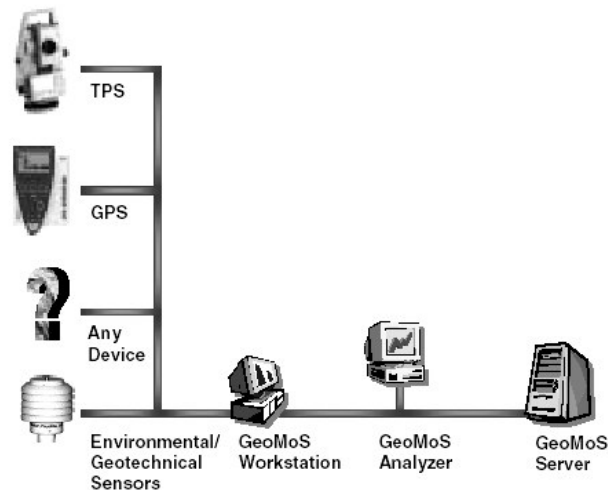
4.3.1. Leica GeoMos

GeoMos je višesenzorski automatizovani sistem za praćenje i analizu deformacija objekata sa značajnim kapacitetima baze podataka i prikaza pomeranja. U sistem može da se integriše više različitih senzora.

Komunikaciju između hardver i softver komponenti sistema je moguće uspostaviti na više načina: putem modema, GSM, WAN, LAN, radio ili kablovske veze, upotrebom TCP/IP Internet tehnologije. Različiti načini konekcije omogućavaju potpunu fleksibilnost po pitanju konfiguracije sistema. Za razmenu podataka GeoMos koristi standardne tehnologije prenosa podataka, što osigurava integritet podataka u slučaju prekida veze.

Sistem upravljanja omogućuje izračunavanje i analiziranje pomeranja, i slanje poruka putem SMS-a, E-mail-a ili digitalnih I/O interfejsa, u skladu sa unapred definisanim graničnim vrednostima. Sistem obezbeđuje punu kontrolu rada perifernih uređaja sa jednog mesta [4].

GeoMos sistem može da se postavi kao Klijent/Server arhitektura za veće sisteme, ili kao zasebna radna stanica za male sisteme. Ovaj sistem je skalabilan, u zavisnosti od veličine projekta [70].



Slika 39: Primer konfiguracije GeoMos sistema

Na Slika 39 je prikazan sistem u kom je klijent konfigurisan kao GeoMos Radna stanica, povezana sa različitim sensorima. Radna stanica prikuplja podatke od senzora, obrađuje ih i šalje na GeoMos Server. GeoMos Analyzer može da radi svuda gde postoji konekcija, pa je Analyzer moguće pokrenuti ili na GeoMos Radnoj stanici ili sa GeoMos Servera.

GeoMos sadrži, pored senzora za prikupljanje podataka, dve osnovne aplikacije:

- 1) Monitor i
- 2) Analyzer.

Monitor je on-line aplikacija koja upravlja radom senzora. Kao senzori mogu se koristiti totalne stanice, GNSS prijemnici, meteorološki i geotehnički senzori. U okviru ovog dela sistema korisnik vrši izbor tačaka na kojima će se realizovati merenja, bira vrste senzora kao i frekvenciju prikupljanja podataka. Takođe, moguće je definisati i granične vrednosti i vrstu poruke koja će se emitovati u slučaju opasnosti putem e-mail-a, mobilne telefonije i sl.

Uloga Analyzer-a jeste da u off-line modu naknadno obradi, analizira i prikaže rezultate merenja. Rezultati merenja mogu da se prikažu grafički ili numerički. Jedan od načina prikaza je vremenski grafik, koji pokazuje trendove pomeranja kroz odabrane vremenske periode. Višestruke tačke mogu da se prikažu simultano na istom grafiku. Moguće je i vektorski prikaz pomeranja za odabranu oblast, pomoću koga korisnik može da uoči mesto na kom se dogodilo

najveće pomeranje. Standardni prikazi podataka mogu da se konfigurisu ili prošire dodatnim prikazima rezultata iz baze podataka [4].

Obe aplikacije mogu da se pokrenu sa jednog računara za male konfiguracije, ili iz računskog centra kod većih konfiguracija.

U okviru GeoMos sistema, na klijentu i serveru, mogu da se koriste različite baze podataka: Access, SQL Server, ili Oracle. Na primer, na klijentu, gde dolazi do brisanja podataka nakon nekoliko meseci, koristi se Microsoft Access. Na serveru gde se podaci skladište i arhiviraju duži vremenski period, koriste se veće baze podataka kao što su Oracle ili SQL Server.

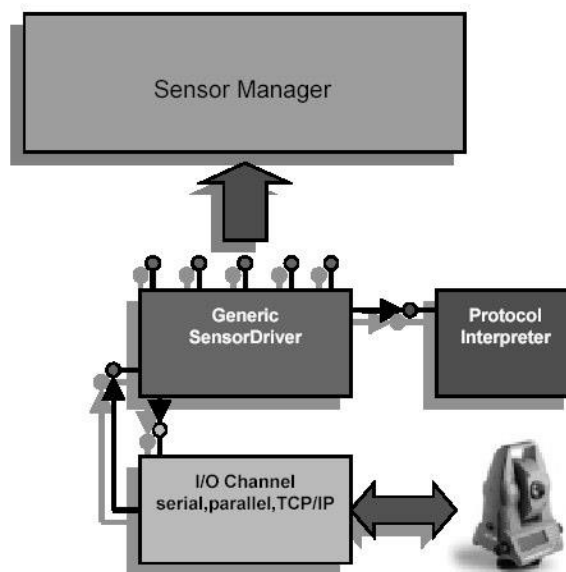
Jedna od najvažnijih komponenti sistema jeste Sensor Manager. On omogućuje povezivanje različitih tipova senzora u jedan sistem, što predstavlja zahtev većine savremenih monitoring projekata. Njegova uloga je praktično povezivanje bilo koje vrste senzora sa aplikacijom. Komunikacija se obavlja direktno između Sensor Manager-a i aplikacije preko standardnog Microsoft COM interfejsa, pri čemu aplikacija saznaje o kom senzoru je reč. U Sensor Manager-u senzori su definisani u standardnim XML tekst fajlovima, tako da dodatni senzori mogu lako da se integrišu u GeoMoS sistem jednostavnim opisom senzora u tekst fajlu, bez dodatnog programiranja. XML fajl definiše protokol, komande, osobine i konfiguraciju senzora.

Protokol – senzor može da se poveže preko input/output porta (npr. redni, paralelni ili TCP/IP).

Komande – u XML fajlu su definisane komande koje senzor može da razume.

Osobine – osobine senzora predstavljaju povratne informacije nakon slanja komandi. Sensor Manager reorganizuje ove podatke i šalje ih nazad aplikaciji u generičkom formatu.

Konfiguracija senzora – postavke i konfiguracija senzora su takođe opisani u XML fajlu. U zavisnosti od opisa senzora, moguće je konfigurisati parametre na daljinu preko Sensor Properties dijaloga u Sensor Manageru.



Slika 40: Šema interakcije između senzora i aplikacije preko Sensor Manager-a

4.3.2. Leica GNSS Spider

Ukoliko se za monitoring koriste isključivo GNSS prijemnici, u tom slučaju je moguće koristiti softverski paket Leica GNSS Spider. Jezgro, koje je integrisano u Leica GNSS Spider referentnu stanicu i GNSS monitoring softver, može da procesira jednofrekventne i dvofrekventne podatke prikupljene iz GPS i/ili GLONASS uređaja u realnom vremenu ili u postprocessing modu.

Tradicionalni pristup GNSS monitoringu u realnom vremenu predstavlja razmeštanje RTK prijemnika po terenu, koji primaju korekcije od obližnje referentne stanice i sami određuju svoje pozicije. Ovakav način obrade podataka ima neke nedostatke:

- za jednu tačku su potrebne dve komunikacione linije (jedna da primi korekcije, a druga da prenese sračunate koordinate),
- može da bude određena samo jedna bazna linija po jednoj tački,
- nije podržana jednofrekventna RTK metoda,
- nije moguća naknadna obrada podataka i
- nije moguće arhiviranje rezultata merenja.

U decentralizovanom pristupu potrebna je samo jedna komunikaciona linija za slanje rezultata merenja na monitoring server. Za svaku tačku moguće je odrediti višestruke bazne linije pomoću različitih referentnih stanica. Ovaj pristup podržava jednofrekventnu RTK metodu, postprocesiranje, kao i arhiviranje i rezultata merenja i obrađenih podataka. U slučaju nepouzdanih veza, moguće je ulogovati se direktno u memoriju GNSS i periodično preuzimati

podatke za postprocesiranje. Ako se korisnik ipak osloni na pouzdanost komunikacionog kanala, GNSS prijemnici moraju da imaju sopstveni prostor za skladištenje memorije (flash card memory).

Leica GNSS Spider softver ima dvostruku namenu. Nudi mnoge mogućnosti referentne stanice za konfiguraciju i kontrolu GNSS senzora, arhiviranje podataka i distribuiranje korekcija, kako za pozicioniranje jedne baze tako i za pozicioniranje mreže RTK prijemnika.

U prilog mogućnostima referentne stanice, GNSS Spider ima mogućnost naprednog procesiranja bazne linije za monitoring aplikacije. Spoj referentne stanice i karakteristika GNSS monitoringa stvara fleksibilnu aplikaciju sa brзом komunikacijom, obradom i upravljanjem podataka.

GNSS Spider može da se kombinuje sa Leica GNSS QC softverom za analizu koordinata, kao i sa bilo kojim drugim softverom za monitoring i analizu, radi integracije sa drugim geotehničkim sensorima. Može da iskoristi mogućnosti napredne provere graničnih vrednosti i slanja poruka koje ima GNSS QC. Integracija se lako vrši strimovanjem rezultata u realnom vremenu, kao i preko TCP/IP portova, serijskih interfejsa ili modema. Svi rezultati mogu da se skladište u tekst fajlove za dalju analizu.

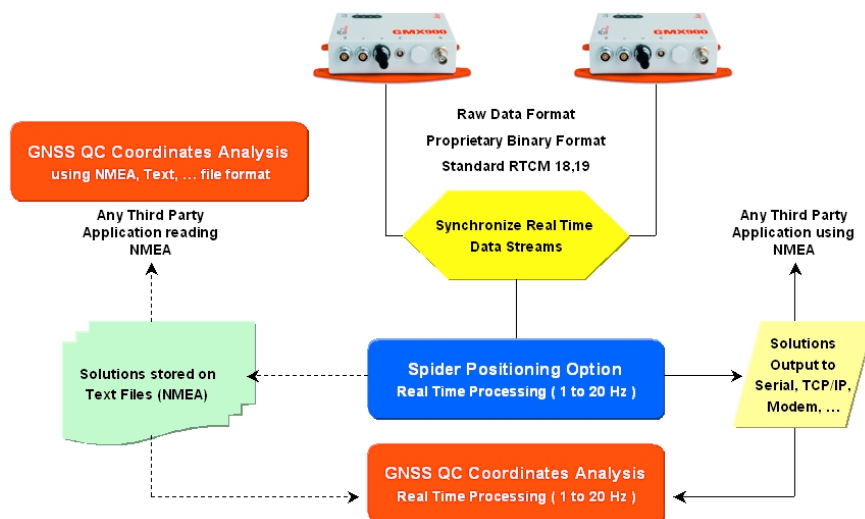
Procesiranje bazne linije u Leica GNSS Spider softveru je podeljeno na dva dela: procesiranje u realnom vremenu i postprocesiranje. Leica GNSS Spider takođe ima mogućnost da ponovo procesira sve fajlove sa rezultatima merenja u RINEX formatu u ova dva moda. To je posebno važno kada prijemnici prvo sakupljaju podatke u periodu od 24 ili 48 sati, a zatim se podaci procesiraju u kasnijoj fazi. Prednost ovoga je što performanse sistema i ocena grešaka koje se odnose na višestruku refleksiju signala mogu da se analiziraju pre trajnog fiksiranja kablova za napajanje i komunikacije.

Jezgro za obradu podataka u realnom vremenu je slično onom u Leica GNSS RTK roveru, ali je modifikovano za monitoring aplikacije. Leica Smart Check tehnologija, koja predstavlja proces ponovljene pretrage, koristi se za kontinualno reverifikovanje podataka u fazi rešavanja neodređenosti. Ovako poboljšan GNSS Spider može da izračuna fiksne pozicije na osnovu jednofrekventnih i dvofrekventnih podataka dobijenih RTK metodom sa visokom pouzdanošću.

Dostupne su tri metode rešavanja neodređenosti: rešavanje neodređenosti u pokretu (on the fly – OTF metoda), inicijalizacija na poznatom markeru (Initialisation on Known Marker – IOKM) i kvazi-statička metoda (Quasi-Static – QSI). OTF metoda dozvoljava potpunu dinamiku prijemnika tokom inicijalizacije po cenu pouzdanosti, posebno kod obrade jednofrekventnih

podataka. IOKM podrazumeva striktno ograničenu dinamiku prijemnika, što nije praktično za monitoring, ali ima mnogo veću pouzdanost. QSI metoda predstavlja kombinaciju prethodne dve – dozvoljava da antena bude u pokretu tokom inicijalizacije, ali ne u tolikoj meri kao kod OTF metode.

GNSS Processing Strategies Real Time from 1Hz up to 20Hz

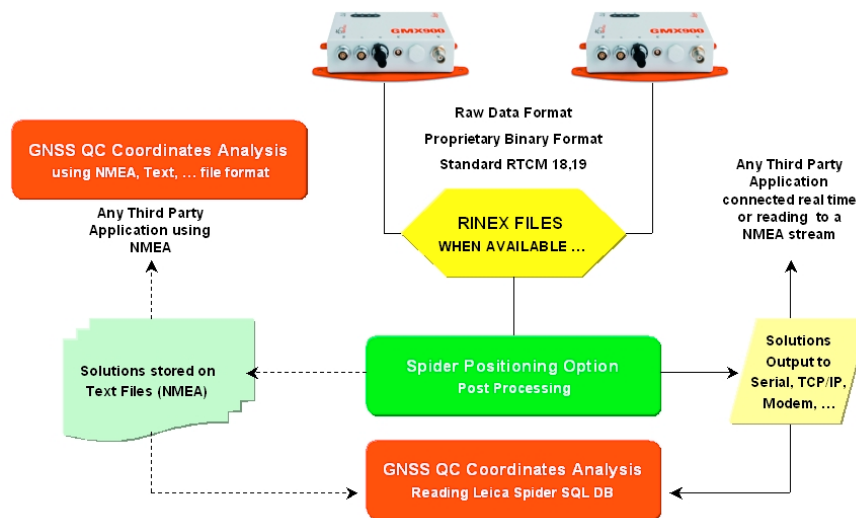


Slika 41: GNSS strategija za obradu podataka u realnom vremenu

Kao i kod procesiranja podataka u realnom vremenu, tako se i kod postprocesiranja koristi proces ponovljene pretrage, u cilju obezbeđivanja pouzdanijeg rešavanja neodređenosti.

Intervali za postprocesiranje između 1 minuta i 24 sata su mogući za dvofrekventne podatke, a intervali između 10 minuta i 24 sata za jednofrekventne podatke.

GNSS Processing Strategies Near RT and Post-Processing ...



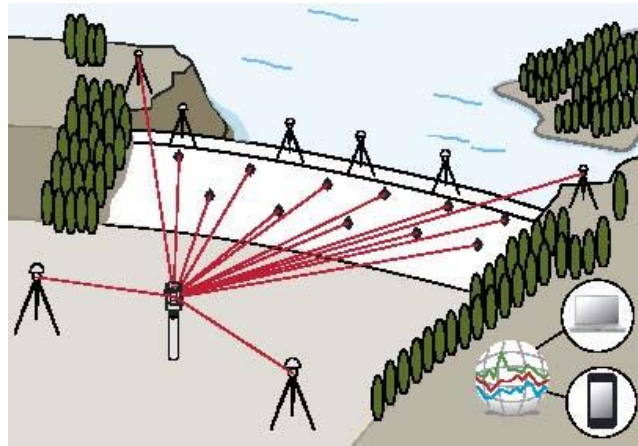
Slika 42: GNSS strategija za naknadnu obradu podataka

Zbog prirode različitih izvora grešaka koje utiču na rezultate GNSS merenja, kao što su greška izazvana uticajem atmosfere, greške orbite i greške usled refleksije signala, rezultujući signali su generalno “bučni”, pa na prvi pogled neće reflektovati pun svoj potencijal.

Stoga je neophodno redukovati šum primenom tehnike filtriranja signala, pa tako GNSS Spider ima mogućnost redukcije šuma od 30% do 45%.

4.3.3. Trimble deformacioni monitoring sistem

Zahtevi za monitoring sistemima rastu širom sveta, bilo da je u pitanju potreba za osmatranjem starih infrastruktura, građevinskih projekata, ili prirodnih fenomena.



Slika 43: Primer jednog monitoring sistema (Trimble)

Kompanija Trimble je razvijen komercijalni, monolitni sistem za deformacioni monitoring, koji obezbeđuje nekoliko mogućnosti:

- Naknadna obrada deformacionih merenja: Intervali merenja mogu da se postave na vremenske periode od nekoliko dana, nedelja ili meseci. To znači da je nakon izvršenih deformacionih merenja, između zadatih intervala moguće upotrebiti instrumente za druge geodetske poslove.
- Automatizovani monitoring u realnom vremenu: Ovakav metod se koristi za projekte koji zahtevaju konstantan monitoring. Merenja se ponavljaju, često, više puta dnevno. Zahvaljujući kontinualnom pristupu u realnom vremenu, moguće je neposredno dobiti povrtane informacije o eventualnim pomeranjima objekta. Sistemi kod ovakvih projekata su skalabilni, odnosno moguće je dodavati instrumente i vršiti dodatna merenja uvek kada se za tim ukaže potreba.
- Kombinovane tehnologije: Trimble monitoring sistemi korisniku ostavljaju mogućnost da kombinuje Trimble GNSS satelitska merenja i podatke dobijene sa optičkih instrumenata u okviru jednog projekta. Trimble GNSS može da se koristi za merenja sa pojedinačnih tačaka, kao i za proveru stabilnosti totalnih stanica na kontrolnim tačkama. Takođe je pogodan za merenja na velikim područjima.

Sistem je prilagodljiv i skalabilan za svaku veličinu projekta, ali je predviđen samo za merenja izvršena Trimble instrumentima.

Za potrebe monitoring sistema, Trimble je razvio dva softvera za prikupljanje podataka sa terena i njihovu obradu.

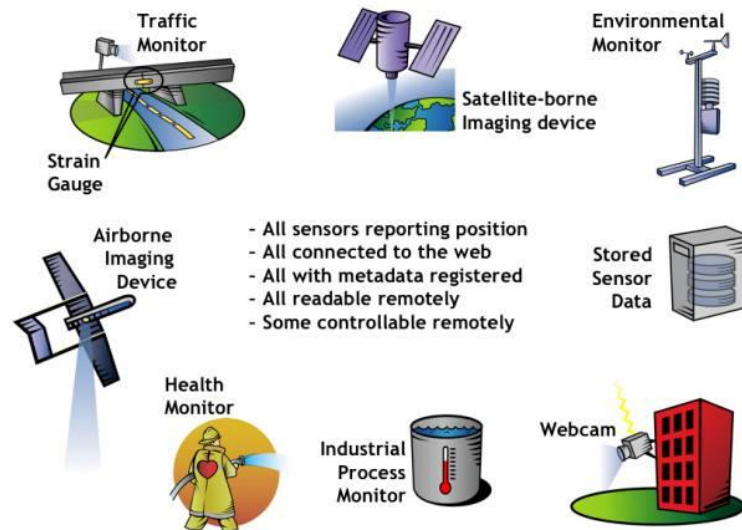
Trimble Access softver je namenjen za prikupljanje deformacionih merenja i upravljanje instrumentima kada nije potreban kontinualana monitoring objekta. Nakon postavljanja instrumenata na terenu, vrši se podešavanje opcija i orijentacija softvera, selektuju se tačke na koje će se vršiti merenja i unosi se broj merenja. Pomoću unapred unetih koordinata kontrolnih i monitoring tačaka, automatski se vrši viziranje i merenje ka vizurnim tačkama. U softveru mogu da se definišu i pohrane standardne procedure merenja, osiguravajući na taj način konzistentnost podataka između dva izlaska na teren. Kada su merenja gotova, Trimble Access omogućava pregled prikupljenih podataka. Pomoću Trimble AccessSync aplikacije prikupljeni podaci se šalju u kancelariju na analizu pomoću Trimble 4D Control softvera.

Za analizu merenja i šerovanje informacija, kao i za upravljanje sensorima i merenjima, Trimble je razvio Trimble 4D Control softver, koji se koristi u okviru projekata koji zahtevaju konstantan, automatski monitoring. Moguće je kombinovanje merenja totalnim stanicama i GNSS prijemnicima. Ukoliko se, nakon deformativne analize podataka i upoređivanja serija merenja, otkrije pomeranje objekta koje prevazilazi dozvoljene granice, Trimble 4D Control softver odmah šalje upozorenje nadležnima. Softver takođe formira detaljne izveštaje i grafikone, a zahvaljujući SQL bazama podataka otvorenog pristupa, moguće je razmenjivanje podataka između učesnika u projektu. S obzirom da povezanost elemenata sistema ima ključnu ulogu u jednom monitoring projektu, Trimble 4D Control omogućava pristup sistemu i njegovu kontrolu sa bilo koje lokacije u monitoring mreži.

4.3.4. Standardi za web-bazirana rešenja

Open Geospatial Consortium (OGC) je međunarodna organizacija koju čine 466 kompanija, vladinih agencija i univerziteta. Svi članovi OGC-a učestvuju u procesu konsenzusa, u cilju razvoja interfejs standarda. OGC Standardi podržavaju interoperabilna rešenja i omogućavaju formiranje kompleksnih prostornih informacija i servisa, dostupnih i upotrebljivih pomoću raznih aplikacija.

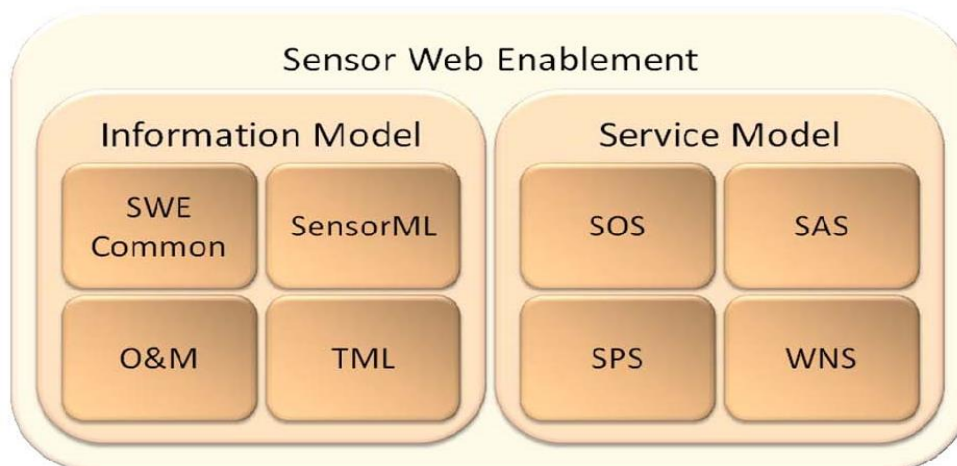
Familija OGC-ovih Sensor Web Enablement (SWE) standarda omogućava da svi tipovi senzora, transduktora i skladišta za senzorske podatke budu dostupni i upotrebljivi preko Web-a.



Slika 44: Sensor Web Enablement (OGC)

U okviru OGC standarda, SWE familija upućuje integraciju senzora i senzorske podatke na Geoprostorni Web [54, 55]. SWE standardi definišu formate senzorskih podataka i metapodataka, kao i interfejsse za pristup senzorskim podacima, kontrolisanje senzora i alarmiranje [8]. SWE standardi mogu da se podele u dve grupe (Slika 45) [32]:

- informacioni model, koji sadrži standarde za format podataka i
- servisni model, koji se odnosi na standardizovane web (servisne) interfejsse za obezbeđivanje neophodne funkcionalnosti.



Slika 45 : Pregled SWE standarda (Jirka i Remke, 2009)

4.3.4.1. SWE Informacioni model

Kao što je već spomenuto, SWE informacioni model se bavi definisanjem podataka i metapodataka. Konkretno, ovaj model obuhvata sledeće standarde:

- SWE Common [8]: SWE standardi koji se oslanjaju na upotrebu zajedničkih baza blokova podataka.
- Sensor Model Language (SensorML) [8, 56]: SensorML je sistem za kodiranje senzorskih metapodataka. Time su obezbeđuju informacije o sensorima, mernim procesima ili fazama tih procesa. Pomoću ovih informacija moguće je interpretirati senzorske podatke i proceniti njihov kvalitet, kao i doneti odluku o pogodnosti seta podataka za određeni zadatak.
- Observations & Measurements (O&M) [51]: O&M se koristi za kodiranje podataka dobijenih opažanjima i merenjima pomoću senzora. Na taj način, O&M predstavlja format podataka za razmenu senzorskih opažanja.
- Transducer Markup Language (TML): Transduktor TML kombinuje kodiranje senzorskih i metapodataka. Optimizovan je za potrebe kontinualnog prenosa podataka (streaming data).

4.3.4.2.SWE Servisni model

Kao i informacioni model, i servisni model obuhvata niz od četiri standarda:

- Sensor Observation Service (SOS) [53, 57]: SOS standard definiše interfejs za pristupanje podacima dobijenim sa senzora. Takođe je moguć pristup opisima senzora, dodavanje novih senzora ili senzorskih podataka. U većini slučajeva, SensorML se koristi za senzorske metapodatke.
- Sensor Alert Service (SAS): klijenti koji koriste SAS mogu da definišu uslove za alarmiranje koje treba da nadgleda SAS instanca. SAS filtrira sva merenja koja dolaze sa senzora. Kada se ispune relevantni uslovi, upozorenje se šalje pretplatniku.
- Sensor Planning Service (SPS): glavna funkcija SPS je kontrola senzora, što uključuje takve zadatke kao što je postavljanje brzine uzorkovanja za senzor ili definisanje oblasti koju treba da pokrije satelit. SPS nudi širok dijapazon funkcija za obavljanje takvih zadataka.
- Web Notification Service (WNS): WNS je poslednji standard iz SWE familije. Za razliku od drugih servisa, WNS se ne odnosi direktno na senzore, već je koncipiran kao servis za pomoć, koji omogućava asinhronu komunikaciju između različitih SWE komponenti. Na primer, SAS može da se osloni na WNS za prenos alarma do svojih pretplatnika.

4.3.5. 52° North

52° North – Initiative for Geospatial Open Source Software je međunarodna organizacija za istraživanje i razvoj, koja ima za cilj podsticanje inovacija kroz svoj kolaborativni softver [10]. Ova organizacija razvija besplatne GIS alate. Razvoj GIS alata se obavlja po grupama, koje se

nazivaju Communities (zajednice). Sensor Web je zajednica u okviru koje se razvijaju alati za monitoring, poštujući OGC standarde iz SWE familije.

4.3.5.1. Primena SWE standarda u okviru 52° North

52° North zajednice, pogotovo zajednice Geo Rights Management, Web Processing Services i Sensor Web Enablement (SWE), se fokusiraju prvenstveno na razvoj koncepta i standarda na polju infrastrukture prostornih podataka.

52° North softverska skladišta sadrže implementacije tipa “open source“ (otvoren softver) svih SWE servisa u verzijama koje odgovaraju najnovijim OGC specifikacijama. Ovaj sveobuhvatni web servis čini osnovu monitoring sistema razvijenog u okviru SWE zajednice.

Postoji nekoliko uobičajenih funkcionalnih zahteva kada je ovaj sistem u pitanju:

- rešenje za pristup podacima iz epoha merenja,
- aktiviranje alarma kada se prekorači kritična vrednost,
- mehanizam za kontrolu senzora.

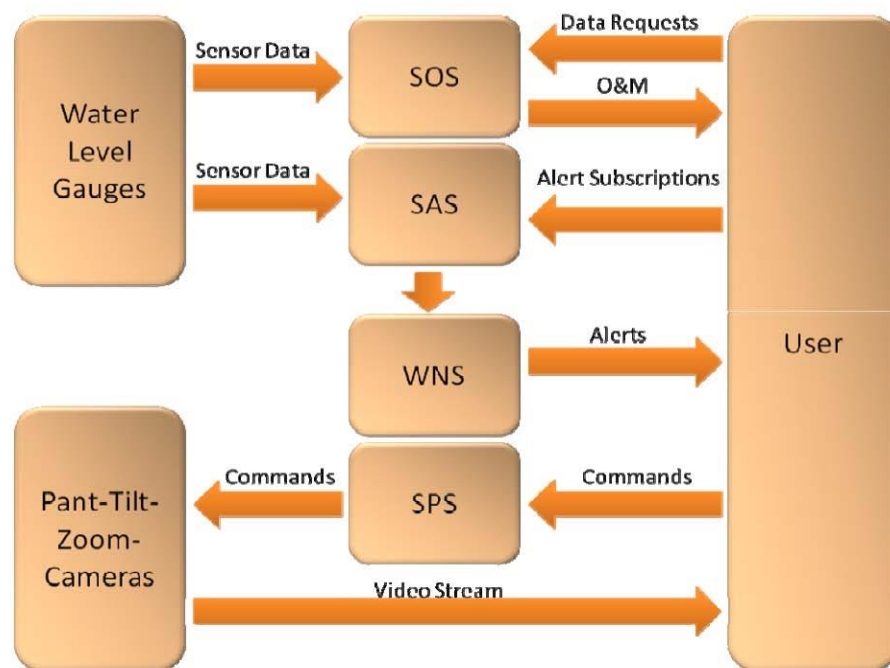
SOS instanca je postavljena u cilju realizacije prvog funkcionalnog zahteva. SOS omogućava pristup rezultatima merenja dobijenih sa senzora. Veza sa postojećom bazom podataka postavljena je na zadnjem kraju SOS instance, čime je omogućena upotreba postojeće infrastrukture za prenos podataka od senzora do centralnog servera. Primenom SOS-a, senzorski podaci su dostupni kroz standardizovan interfejs, u poznatom formatu.

Sledeći korak predstavlja vizualizacija podataka. Pomoću standardizovanog SOS interfejsa senzorski podaci mogu da se integrišu u bilo koju kompatibilnu aplikaciju. To može da bude neki GIS softver, ili SOS web-klijent, razvijen za potrebe konkretnog projekta. Osnovna funkcija ovog klijenta je vizualizacija vremenskih serija (epoha) merenja prikupljenih sa senzora. Osim što podržava takve funkcije kao što je preklapanje dijagrama na kojima su predstavljene serije merenja sa više senzora, u stanju je da prikaže i dodatne metapodatke o samom senzoru. Moguć je i tabelarni prikaz podataka i njihov prenos u csv ili pdf format.

Za realizaciju drugog funkcionalnog zahteva (alarmiranje usled prekoračenja kritičnih vrednosti), koristi se SAS instanca. Senzorski podaci se prosleđuju SAS instanci, koja ih neprestano analizira i upoređuje sa kritičnim vrednostima, koje je postavio korisnik. Kritične vrednosti je moguće postaviti preko web interfejsa. Ovaj interfejs korisniku nudi opcije za definisanje različitih uslova upozorenja i odabir krajnjih tačaka komunikacije (npr. SMS ili

telefonski broj). Na ovaj način SAS instanca je u mogućnosti da otkrije kritična merenja i preko WNS servisa pošalje poruku upozorenja registrovanim pretplatnicima.

Treći funkcionalni zahtev se odnosi na kontrolu senzora. U slučajevima kada je za potrebe projekta neophodno postaviti senzore na udaljene lokacije i kada je nemoguće da zaposleni kontinuirano kontrolišu infrastrukturu, u kritičnim oblastima se postavljaju kamere za nadzor. Kamere se kontrolišu pomoću SPS instance. Kamere sa različitim hardverskim interfejsom moguće je kontrolisati pomoću jednog zajedničkog SWE interfejsa. U slučaju da se područje pokriveno kamerama nalazi u blizini privatnog poseda ili nekog drugog javnog mesta na kojima je zabranjen video nadzor, u skladu sa načelima privatnosti, SPS nudi mogućnost za ograničavanje vidnog polja kamere. Korisnički interfejs za kamere za nadzor se sastoji od Java aplikacije koja interaktivno, u isto vreme, dozvoljava postavljanje parametara i prikazuje trenutnu sliku koju daje kamera.



Slika 46: Šematski prikaz sistema za monitoring nivoa vode baziranog na OGC SWE standardima

4.3.6. Analiza softverskih rešenja

Komercijalna rešenja namenjena monitoringu terena i objekata u realnom vremenu svojim funkcionalnostima omogućuju da sistemi za monitoring koji se na njima baziraju odgovaraju zadacima koji se postavljaju pred njih. Sistemi su modularni, dozvoljavaju proširenja i druge modifikacije sistema bez velikog utroška vremena. Procedure za povezivanje i konfigurisanje senzora, kao i dodavanje tačaka su jednostavne. Isto tako, širok je spektar mogućnosti

konfigurisanja sistema u smislu različitih trajanja ciklusa opažanja, više načina provere prekoračenja graničnih vrednosti, računanja pomeraja po proizvoljnim pravcima itd. Softver takođe podržava robusnost sistema. U slučaju prekida rada nekog senzora ili nemogućnosti da se izvrši merenje upozorava se na taj slučaj. Svi softveri maksimalno iskorišćavaju mogućnosti senzora u smislu tačnosti merenja. Na primer, moguće je merenje u dva položaja durbina totalnom stanicom, a takođe je moguća i atmosferska korekcija za šta se koriste opažanja sa meteoroloških senzora. Ostvaren je i izvestan nivo interoperabilnosti. GeoMos skladišti podatke u MySQL, a Trimble 4D u SQL Server instanci baze podataka odakle je moguće preuzeti podatke i koristiti ih u eksternim aplikacijama.

I pored toga, ne može se smatrati da će ova rešenja zasigurno biti zadovoljavajuća u svim situacijama. Kako je na više mesta u literaturi istaknuto, veoma je važno detektovati pojavu lažnih alarma. Navedena rešenja ne poseduju funkcionalnosti koje su namenjene detekciji lažnih alarma ili pogrešnih merenja. Dalje, iako je podržan širok spektar senzora, oba komercijalna rešenja podržavaju samo robotizovane totalne stanice sopstvene proizvodnje. Isto tako nisu predviđena asinhrona merenja. Ciklusi opažanja totalnom stanicom traju duže nego ciklusi opažanja drugim sensorima zbog relativno velikog broja prizmi koje treba da budu opažane i kretanja koje tom prilikom instrument izvodi. U predstavljenim rešenjima nije moguće u slučaju pojave prekoračenja tolerancije na nekom senzoru na automatizovan način prekinuti postojeći ciklus merenja totalnom stanicom i opažati prizme u blizini senzora na kojem je detektovano prekoračenje. Takođe nije moguće prekinuti period mirovanja totalne stanice (interval od opažanja poslednje prizme do početka novog ciklusa opažanja) i pokrenuti ciklus merenja. Na kraju, iako je korišćenje MySQL i SQL Server baza obezbedilo određen stepen interoperabilnosti, nisu iskorišćeni standardi iz OGC SWE familije čime bi interoperabilnost bila na još višem stepenu.

Tabela 5: Glavne karakteristike komercijalnih softverskih rešenja za monitoring

	Podrška za geodetske senzore drugih proizvođača	Podrška za geotehničke senzore drugih proizvođača	Detekcija lažnih alarma	Manualna promena intervala opažanja	Automatska promena intervala opažanja
Leica GeoMOS	Ne	Da	Delimično	Da	Ne
Trimble 4D Control	Ne	Da	Ne	Da	Ne

Doprinos ove disertacije je generalizovani model opisan na standardizovan način, koji predstavlja uopšteno rešenje za problem monitoringa terena i objekata. Model je u pojedinim delovima razrađen do detalja kako bi se odgovorilo na neke nedostatke obrazložene u prethodnom pasusu. Takođe, u studiji slučaja je model implementiran sistemom baziranom na

jednom od opisanih komercijalnih rešenja tako da su neke funkcionalnosti softvera iskorišćene za prevazilaženje pojedinih navedenih nedostataka. Opisi različitih senzora često primenjivanih u sistemima za monitoring u vidu XML datoteka baziranih na OGC SWE specifikacijama su takođe dati kao prilog podizanju stepena interoperabilnosti. Sveukupno, rešenja predložena u okviru ove disertacije predstavljaju korak u pravcu standardizacije sistema za monitoring terena i objekata.

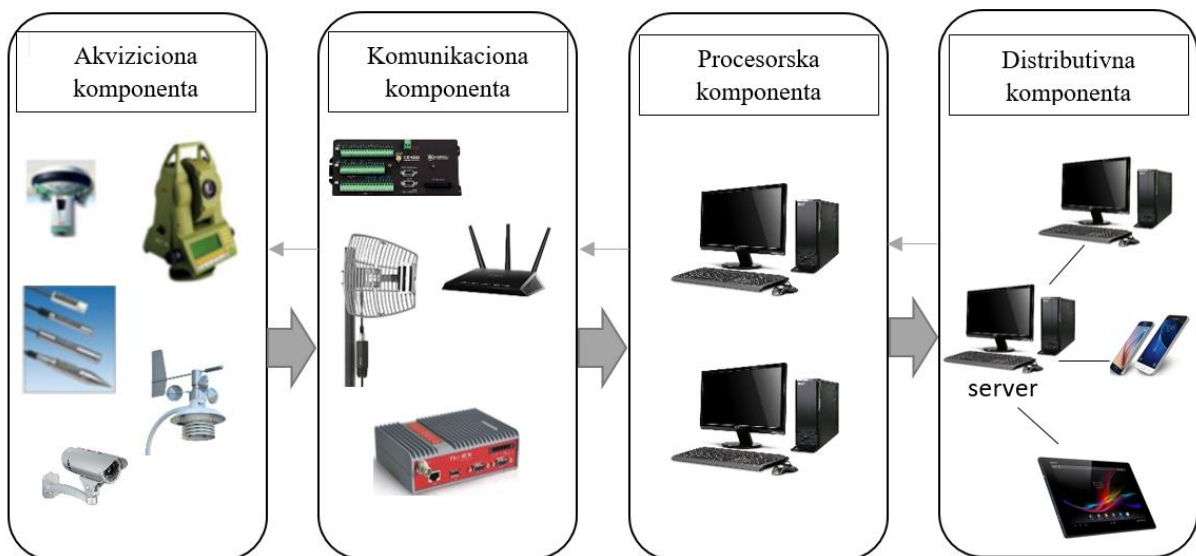
5. Sistem za monitoring terena i objekata u realnom vremenu

5.1 Arhitektura sistema za monitoring terena i objekata

U skladu sa analizom dostupne literature i informacija o postojećim sistemima za monitoring u realnom vremenu, može se definisati arhitektura ovakvih sistema. Ona je podeljena na nekoliko podsistema (Slika 47):

1. Akviziciona komponenta – čine je senzori kojima se izvode merenja, kao i pomoćni senzori. Uopšteno gledano akvizicionu komponentu čine svi elementi koji obezbeđuju ulazne podatke za sistem. Od svih komponenti sistema akviziciona komponenta najviše zavisi od objekta koji se osmatra, kako u smislu tipova senzora koji će se koristiti tako i u smislu njihovog prostornog rasporeda. U slučaju robotizovanih totalnih stanica, koje su primarni geodetski senzori u većini sistema za monitoring, većina prizmi se postavlja na tačke na objektu (kod monitoringa objekata) ili u očekivanoj zoni deformacija (u slučaju monitoringa terena) dok je ostatak na određenoj udaljenosti od objekta (van uticaja deformacija) odnosno na stabilnom delu terena. Takođe, prizme se postavljaju na tačkama objekta gde se očekuju najveće deformacije (npr. sredina raspona na mostovima ili vrhovi stubova) odnosno na najkritičnijim tačkama. Ovakav raspored osmatranih tačaka omogućuje ne samo praćenje deformacija, nego i detekciju lažnih alarma, pogrešnih merenja ili neispravnosti senzora, kao i širenje zone deformacija. I u slučaju GNSS prijemnika veći broj se postavlja na objekat ili u zonu deformacija, a jedan ili više njih van zone. Geotehnički senzori se postavljaju samo na objekat ili unutar njegove konstrukcije (npr. merne trake) odnosno u zoni deformacije. Ređi su slučajevi da ne oni postavljaju van zone deformacija. Primeri rasporeda i načina postavljanja senzora su detaljnije prikazani u poglavlju 2.
2. Komunikaciona komponenta – infrastruktura koja obezbeđuje prenos podataka od senzora (akvizicione komponente) ka jednom ili više računara u sistemu. Arhitektura komunikacione komponente zavisi od vrsta senzora koji čine akvizicionu komponentu, njihovog broja kao i od topologije terena. Koriste se kablovske veze, bežične veze, analogni i digitalni signali, s tim što se analogni signali koriste uglavnom na manjim rastojanjima jer je amplituda signala (naponskog ili strujnog) direktno zavisna od vrednosti merene fizičke veličine. U skladu sa funkcijom koju ima u sistemu, pred komunikacionu komponentu se postavljaju sledeći zahtevi:
 - Komunikacione veze moraju biti robusne – zaštićene od fizičkog oštećenja kablova, odnosno bez smetnji kod bežičnih veza
 - Mora biti omogućena dvosmernu komunikaciju.
 - Kašnjenje prenosa poruke treba da bude minimalno.

- Mora biti omogućeno naknadno povezivanje senzora.
 - Svaki prekid na komunikacionim vezama mora biti detektovan.
3. Procesorska komponenta – hardver i softver koji prihvataju podatke dobijene preko komunikacione komponente, skladište ih, vrše njihovu obradu i vizualizaciju. U zavisnosti od veličine sistema hardverski deo se sastoji od jednog ili više računara koji su u nekim slučajevima prostorno distribuirani. Za primenu u monitoringu postoje računari sa namenskim hardverom i preinstaliranim softverom koji se instaliraju na terenu na samoj lokaciji izvođenja monitoringa kako bi se minimiziralo rastojanje do senzora. Ovi računari su malih dimenzija, u posebnim kućištima i instalacija im je znatno pojednostavljena.
 4. Distributivna komponenta – hardver i softver koji obezbeđuje distribuciju podataka krajnjim korisnicima. U okviru ove komponente nalaze se softverska rešenja bazirana na web tehnologijama. Ona mogu biti zasnovana na OGC SWE specifikacijama čime se interoperabilnost podiže na znatno viši nivo. Takođe mogu biti u pitanju web aplikacije ali i samostalne aplikacije. Hardversku komponentu čine računari i komunikacioni uređaji namenjeni razmeni podataka preko interneta (ruteri, modemi i sl). U slučaju manjih sistema zasnovanih na jednom računaru na njemu je instaliran i izvršava se sav softver, kako softver za obradu i skladištenje podataka tako i softver za distribuciju. Kod većih sistema softver je instaliran na više računara koji su povezani u mrežu. Mreža se projektuje tako da se zadovolje zahtevi po pitanju pouzdanosti, efikasnosti i isplativosti. Kako ovi sistemi moraju obezbediti pravovremenu informaciju o kritičnim događajima, to se obično pouzdanost uzima kao najvažniji kriterijum.



Slika 47: Šematski prikaz arhitekture sistema za monitoring

5.2 Formalni opis modela geosenzorske mreže

Osnovne komponente geosenzorske mreže su:

1. Čvorovi, sa svojim imenima ili identifikatorima
2. Komunikaciona mreža koja povezuje i nameće ograničenja na protok informacija između čvorova
3. Vrednosti parametara okoline koji se mogu pratiti sensorima svakog čvora.

Formalno se osnovne komponente mogu predstaviti kao:

1. Graf $G = (V, E)$, koji modeluje mrežu i veze između čvorova u okviru mreže
2. Funkcija $s: V \rightarrow C$, senzorska funkcija, koja modeluje opažanje sensorom
3. Funkcija $id: V \rightarrow N$, identifikatorska funkcija, koja modeluje identitete ili imena svakog čvora u mreži.

Skup tačaka V u grafu predstavlja čvorove senzorske mreže. Skup ivica E u grafu predstavlja direktne one-hop komunikacione veze između čvorova. Funkcija s reprezentuje podatke koje prikuplja sensor čvora u geosenzorskoj mreži. Šta je kodomen C funkcije s zavisi od primenjenog senzora. U opštem slučaju podrazumeva se da je skup C skup realnih brojeva \mathfrak{R} . Funkcija id predstavlja identifikatore ili imena čvorova u geosenzorskoj mreži. Bez umanjavanja opštosti najčešće se za kodomen funkcije id usvaja skup prirodnih brojeva N . U najvećem broju slučajeva, ali ne uvek, potrebno je da svaki čvor ima jedinstveni identifikator. U tom slučaju funkcija id je injektivna funkcija.

U najjednostavnijoj grupi modela, *neighborhood-based* modelu, jedina prostorna informacija koju čvor poseduje je znanje o susednim čvorovima. Ta informacija je ugrađena u grafu i može se predstaviti funkcijom susedstva $nbr: V \rightarrow 2^V$, gde je $nbr(v) \rightarrow \{v' \in V | (v, v') \in E\}$. U grupi kompleksnijih modela, *extended spatial model*, čvor poseduje informaciju o svojoj i lokaciji susednih čvorova. U ovom kontekstu, pojam lokacija ne podrazumeva samo predstavu lokacije pomoću koordinata, tj. poziciju. Lokalizacija može uključivati i neke manje egzaktne i detaljne kvantitativne informacije o udaljenosti i pravcima između čvorova. Dve su osnovne klase lokacija koje se sreću u geosenzorskim mrežama:

- Apsolutna lokacija, prostorna informacija o lokaciji senzorskog čvora koja se odnosi na neki eksterni referentni sistem. U ovu grupu lokacija spadaju geodetski referentni sistemi koji su u oblasti ove disertacije. Funkcija lokacije u tom slučaju je $p: V \rightarrow \mathfrak{R}^d$, gde je d dimenzionalnost koordinatnog sistema, tj. broj koordinata kojima se opisuje pozicija.
- Relativna lokacija, prostorna informacija o lokaciji senzorskog čvora u odnosu na lokaciju nekog obližnjeg senzorskog čvora.

Prethodne grupe modela, *neighborhood-based* i *extended spatial*, su atemporalni, u smislu da su statični i ne referenciraju promenu tokom vremena. U opštem slučaju, geosenzorske mreže prate promenljive fenomene i same mogu biti promenljive. Moguće je identifikovati tri glavna tipa promene od značaja:

1. Dinamizam okoline: praćenje geografskih fenomena koji se menjaju tokom vremena.
2. Mobilnost čvorova: čvorovi geosenzorske mreže ne moraju biti statični već mogu tokom vremena menjati svoju poziciju.
3. Promenljivost čvorova: čvorovi u geosenzorskoj mreži mogu biti promenljivi u smislu da se mogu aktivirati, deaktivirati i reaktivirati tokom vremena.

Stoga je potrebno proširiti prethodno opisanu strukturu dodajući mogućnost vremenske promenljivosti. Dinamizam okoline se može modelovati korišćenjem vremenski promenljive senzorske funkcije ($s : V \times T \rightarrow \mathcal{R}$) koja predstavlja različite podatke koje senzor generiše tokom vremena. Jedina struktura koja je nepromenljiva je identifikatorska funkcija, jer se podrazumeva da identifikatori imaju konstantne vrednosti tokom vremena.

Algoritam koji izvršava geosenzorska mreža se sastoji od četiri komponente:

1. Ograničenja koja nameće okruženje u kojem se algoritam izvršava
2. Događaji koji se dešavaju na čvorovima
3. Akcije koje se sprovode kao odgovor na različite događaje
4. Stanja čvorova koja omogućavaju zadržavanje znanja o prethodnim interakcijama

Ograničenja obuhvataju pretpostavke koje se usvajaju o okruženju u kom se algoritam izvršavati. Ona se odnose na prethodno spomenutih pet glavnih komponenti:

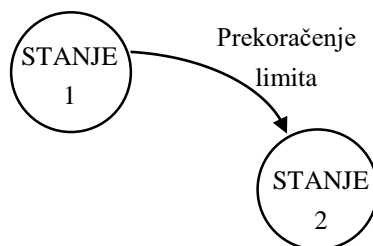
- Neprostrorna ograničenja na veličine koje se mogu meriti senzorima
- Prostorna ograničenja u smislu da li čvorovi mogu registrovati svoju lokaciju, susede, rastojanje, susede itd.
- Vremenska ograničenja u smislu da li se pretpostavlja da su čvorovi statični, promenljivi ili mobilni i da li se opažana okolina menja tokom vremena.
- Ograničenja nesigurnosti u smislu koliko je pouzdana komunikacija, merenje, pozicioniranje i obrada
- Mrežna ograničenja u smislu da li graf planarni ili neplanarni i koje strukture i da li postoje ograničenja na povezanost i topologiju mreže

Interakcije između čvorova se modeluju događajima. Čvorovi u geosenzorskoj mreži su reaktivni tj. reaguju na tri tipa događaja koji se mogu pojaviti na njima:

- Prijem poruke koja je poslata od susednog čvora
- Trigger događaj, kao što je predviđeni alarm ili periodično očitavanje vrednosti senzorom
- Spontani impuls, generisan eksterno, van sistema.

Akcije su procedure kojima se definiše kako će čvor odgovoriti na određeni događaj. One su „atomske“ procedure u smislu da su konačne sekvence operacija koje se moraju završiti u konačnom vremenskom intervalu i moraju se izvršiti bez prekidanja.

Uobičajeno je da čvorovi moraju posedovati određeno znanje o prethodnim interakcijama kako bi na odgovarajući način odgovorili na naredne događaje. Stanja se koriste kako bi se to znanje zadržalo, što omogućuje različite akcije na iste događaje, u zavisnosti od prethodnih interakcija. Svaki čvor mora biti u tačno jednom stanju u jednom trenutku. Za svako stanje i događaj mora se specificirati jedinstvena akcija koju će čvor izvršiti u tom stanju na pojavu određenog događaja. U jednom stanju čvor može izvršiti različite akcije u zavisnosti od događaja. Jedna od akcija može biti i prelazak u drugo stanje. Stanja i prelazi se predstavljaju dijagramima stanja, gde se stanja predstavljaju kružnicama, strelice predstavljaju smer promene dok se pored njih naznačava koji događaj izaziva ovu promenu stanja. U primeru na Slika 48 prikazana je promena iz stanja 1 u stanje 2 kada se pojavi prekoračenje limita merene veličine.



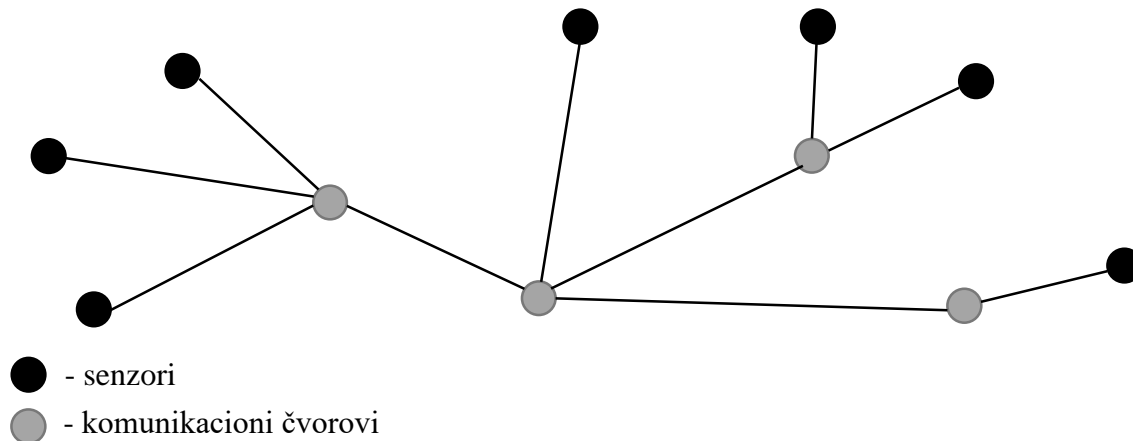
Slika 48: Prelaz iz Stanja 1 u Stanje 2 kao akcija izazvana događajem Prekoračenje limita

5.3 Model geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata

Sitem za monitoring terena i objekata se može posmatrati kao geosenzorska mreža hijerarhijske organizacije sa različitim čvorovima (Slika 49). Kako je ranije navedeno sistemi za monitoring se sastoje od tri celine: senzora, komunikacionih komponenti i računara sa softverom. Ako se ovi elementi posmatraju kao čvorovi, onda ih je moguće podeliti u dve grupe:

1. Senzori – odnosno čvorovi koji mere vrednosti fizičkih veličina, tj. postoji senzorska funkcija kojom se modeluje proces merenja
2. Komunikacioni čvorovi – čvorovi koji ne vrše merenje, tj. za njih ne postoji senzorska funkcija.

Ipak, između ove dve grupe postoji komunikacija koje se odvija u oba smera: senzori komunikacionim čvorovima prosleđuju poruke koje sadrže izmerene vrednosti, dok komunikacioni čvorovi šalju poruke sa komandama.



Slika 49: Graf geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata

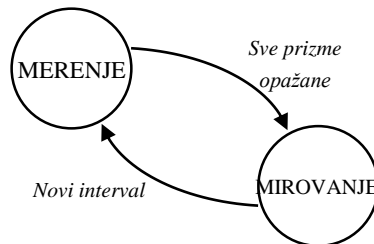
Posmatrano sa stanovišta komunikacije senzori mogu komunicirati na dva načina: analogno, koristeći naponske ili strujne signale, i digitalno, preko nizova bitova u određenom formatu, tj. po određenom protokolu. Ova razlika je bitna i sa aspekta višeg nivoa komunikacije. Naime kod analognih signala nije ostvariva dvosmerna komunikacija, odnosno senzor na svom izlazu sve vreme daje napon ili struju koji odgovaraju trenutnoj vrednosti merene veličine i ne može da prima signale koje mu šalju drugi čvorovi. Sa druge strane senzori koji na svom izlazu daju digitalni signal u najvećem broju slučajeva komuniciraju koristeći standard koji omogućava dvosmernu komunikaciju te su i njihove veze u modelu geosenzorske mreže bidirekzione. Geodetski senzori (totalne stanice, GNSS, niveliri) po pravilu imaju digitalni izlaz, te se može smatrati da je veza sa drugim čvorovima bidirekciona. Kod ostalih tipova senzora, uključujući i geotehničke, sreću se obe vrste signala, te veze mogu biti uni i bidirekzione, pa će se dalje razmatranje uopštiti u zavisnosti od tipa veze sa ostalim čvorovima.

Totalna stanica je statičan senzor koji prati pozicije mobilnih objekata u trodimenzionalnom prostoru tokom vremena. Mobilni objekti u ovom slučaju su prizme kojima se signališu tačke na terenu ili objektu, i predstavljeni su skupom M . Skup prizama čije se pozicije mere se dodeljuje svakoj totalnoj stanici u sistemu. Iako se fizički ovaj skup nalazi u memoriji računara na koji je povezana totalna stanica, kako se ovde razmatra model na logičkom nivou, smatraće se da je skup M informacija koju sadrži totalna stanica, tj. čini komponentu senzora. Merenje pozicije se vrši u pravilnim vremenskim intervalima ili u slučaju da komunikacioni čvor pošalje komandu mimo predviđenog intervala. Nakon merenja totalna stanica pošalje poruku komunikacionom čvoru sa identifikacijom prizme i njenim koordinatama. Kada završi merenje svih prizama miruje dok ne započne sledeći interval. Odavde se može zaključiti da se totalna stanica može naći u dva stanja: aktivno, tokom kojeg se vrši merenje, i mirovanje. Iz stanja mirovanja u aktivno stanje prelazi usled isteka predviđenog vremenskog intervala ili kada stigne

komanda od komunikacionog čvora. Suprotni prelaz se dešava nakon što se izmere pozicije svih prizmi. Senzorska funkcija totalne stanice je preslikavanje na \mathfrak{R}^3 , odnosno:

$$s: M \times T \rightarrow \mathfrak{R}^3 \quad (5.1)$$

Uzimajući sve navedeno u obzir funkcionisanje totalne stanice kao senzora u okviru geosenzorske mreže može se predstaviti dijagramom stanja (Slika 50).

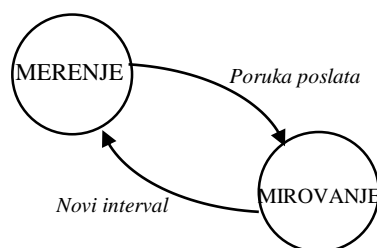


Slika 50: Dijagram stanja za totalnu stanicu

Za razliku od totalne stanice, drugi geodetski senzor koji se veoma često koristi u sistemima za monitoring, GNSS prijemnik, se mora posmatrati kao mobilni senzor, jer se postavlja na tačku čiji se pomeraji tokom vremena žele pratiti. Još jedna razlika je i što GNSS prijemnik šalje komunikacionom čvoru svoju izmerenu poziciju, a ne poziciju nekog eksternog mobilnog objekta, te se poruka sastoji od identifikatora senzora, koji se ne menja, i trenutne pozicije. S tim u skladu se definiše i senzorska funkcija:

$$s: V \times T \rightarrow \mathfrak{R}^3 \quad (5.2)$$

GNSS prijemnik se kao i totalna stanica može nalaziti u dva stanja, merenja i mirovanja, sa tom razlikom da se poruka šalje samo jednom te je događaj koji uzrokuje promenu iz stanja merenja u stanje mirovanja slanje poruke, a ne slanje svih poruka, tj. pozicija svih prizmi.



Slika 51: Dijagram stanja za GNSS prijemnik

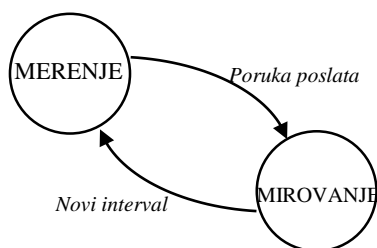
Geotehnički i ostali senzori koji mogu ostvariti samo unidirekcionu komunikaciju na svom izlazu stalno generišu signal, čime su stalno u stanju merenja. Stoga za njih ne postoji promena stanja. Takođe, oni fizički ne sadrže identifikator, u smislu vrednosti upisane u memoriju, ali

su implicitno identifikovani preko veze sa komunikacionim čvorom. Poruka koju oni šalju komunikacionom čvoru koji im je hijerarhijski nadređen sadrži identifikator senzora i izmerenu vrednost. Senzorska funkcija za ove senzore ima oblik

$$s: V \times T \rightarrow \mathfrak{R} \quad (5.3)$$

Ovde je potrebno napomenuti još jednu razliku između modela na logičkom nivou i fizičke realizacije. Kod nekih realizacija se u okviru jednog kućišta nalazi više senzora, te iako je u pitanju jedan uređaj koji će imati jedan skup prostornih koordinata, zapravo se radi o više čvorova, tj. onoliko koliko senzora ima u kućištu. Primer za ovaj slučaj su biaksijalni tiltmetri kod kojih se u jednom kućištu nalaze dva senzora koji mere nagib u dve međusobno ortogonalne ravni.

Kod senzora koji komuniciraju digitalnim signalima postoji mogućnost da je identifikator i fizički smešten u memoriju senzora, mada u praktičnim realizacijama to uglavnom nije slučaj. Sa aspekta merene veličine, senzorska funkcija ima isti oblik kao kod prethodne grupe senzora, a takođe je isti i sadržaj poruke koja se šalje komunikacionom čvoru. U zavisnosti od hardverske realizacije, moguće je senzor konfigurisati tako da inicira komunikaciju umesto da komunikaciju inicira komunikacioni čvor. U tom smislu može se usvojiti da se ovakvi senzori mogu nalaziti u dva stanja, slično geodetskim sensorima, aktivnom, tj. stanju merenja i neaktivnom, stanju mirovanja. Takođe događaji koji izazivaju promenu stanja su slanje poruke (iz aktivnog u neaktivno stanje) i istek intervala (iz neaktivnog u aktivno stanje), što je prikazano na dijagramu stanja (Slika 52).

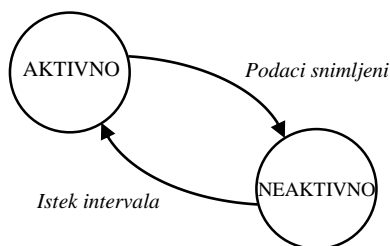


Slika 52: Dijagram stanja senzora sa digitalnim izlazom

Tabela 6: Senzori kao fizičke komponente i kao čvorovi geosenzorske mreže

	Totalna stanica		GNSS		Geotehnički senzor	
Fizička komponenta	Merena veličina (pozicije prizmi)	Interval opažanja	Merena veličina (pozicija antene)	Interval registracije	Merena veličina (ugao, sila, pritisak...)	Interval očitavanja senzora
Čvor	Senzorska funkcija $s: M \times T \rightarrow \mathfrak{R}^3$	Stanja merenja/ mirovanja	Senzorska funkcija $s: V \times T \rightarrow \mathfrak{R}^3$	Stanja merenja/ mirovanja	Senzorska funkcija $s: V \times T \rightarrow \mathfrak{R}$	Stanja merenja/ mirovanja

Komunikacioni čvorovi ne vrše merenja, ali komuniciraju sa ostalim čvorovima u mreži i obavljaju obradu. U ovu grupu čvorova mreže svrstavaju se komunikacioni moduli na koje se povezuju senzori (npr. wireless ruteri, COM serveri) ali i računari na kojima je instaliran softver. Sepcifičan komunikacioni modul je loger podataka (eng. Data logger), uređaj koji se intenzivno koristi u sistemima za monitoring a ima ulogu modula na koji se povezuju senzori sa analognim izlazom. Loger vrši A/D konverziju, memoriše izmerene vrednosti u određenim intervalima i potom ih prosleđuje drugim komunikacionim čvorovima. Loger vrši i obradu podataka merenja, te može da odredi npr. maksimalnu, minimalnu, srednju vrednost, a moguće je računanje vrednosti po složenijim izrazima (npr. temperaturno kompenzovana merenja). Kako loger radi u jednakim vremenskim intervalima (eng. *Scan cycle*) kada očita izlaze senzora, sračuna potrebne vrednosti i ubeleži ih u memoriju on čeka da interval istekne kako bi započeo ciklus ponovo. Stoga se može smatrati da se za loger mogu usvojiti dva stanja, aktivno, u kom vrši sve aktivnosti vezane za merenja i neaktivno, tokom kojeg čeka istek postojećeg intervala. Događaj koji uzrokuje promenu stanja iz aktivno u neaktivno je završetak obrade rezultata merenja sa svih senzora.



Slika 53: Dijagram stanja komunikacionog čvora – loger podataka

5.4 Model implementacionog rešenja geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata

Iako je svaka geosenzorska mreža namenjena monitoringu deformacija jedinstvena, tj. Projektovana za određeni objekat, pojedine faze u projektovanju i implementaciji se mogu smatrati opštim [7]. Redosled ovih faza čini proceduru koja se može smatrati generalizovanim modelom implementacionog rešenja sistema za deformacionih merenja u realnom vremenu.

Primarna namena ovakvog sistema je da obezbedi merenja koje će se izvršavati u automatizovanom režimu i koja će zadovoljavati kriterijume u smislu funkcionalnosti, pouzdanosti, tačnosti, fleksibilnosti i robusnosti. Uzimajući to u obzir veoma je značajno pripremne korake izvesti pažljivo i time ostvariti tražene performanse sistema.

Koraci u projektovanju i funkcionisanju sistema se grubo mogu podeliti u tri grupe:

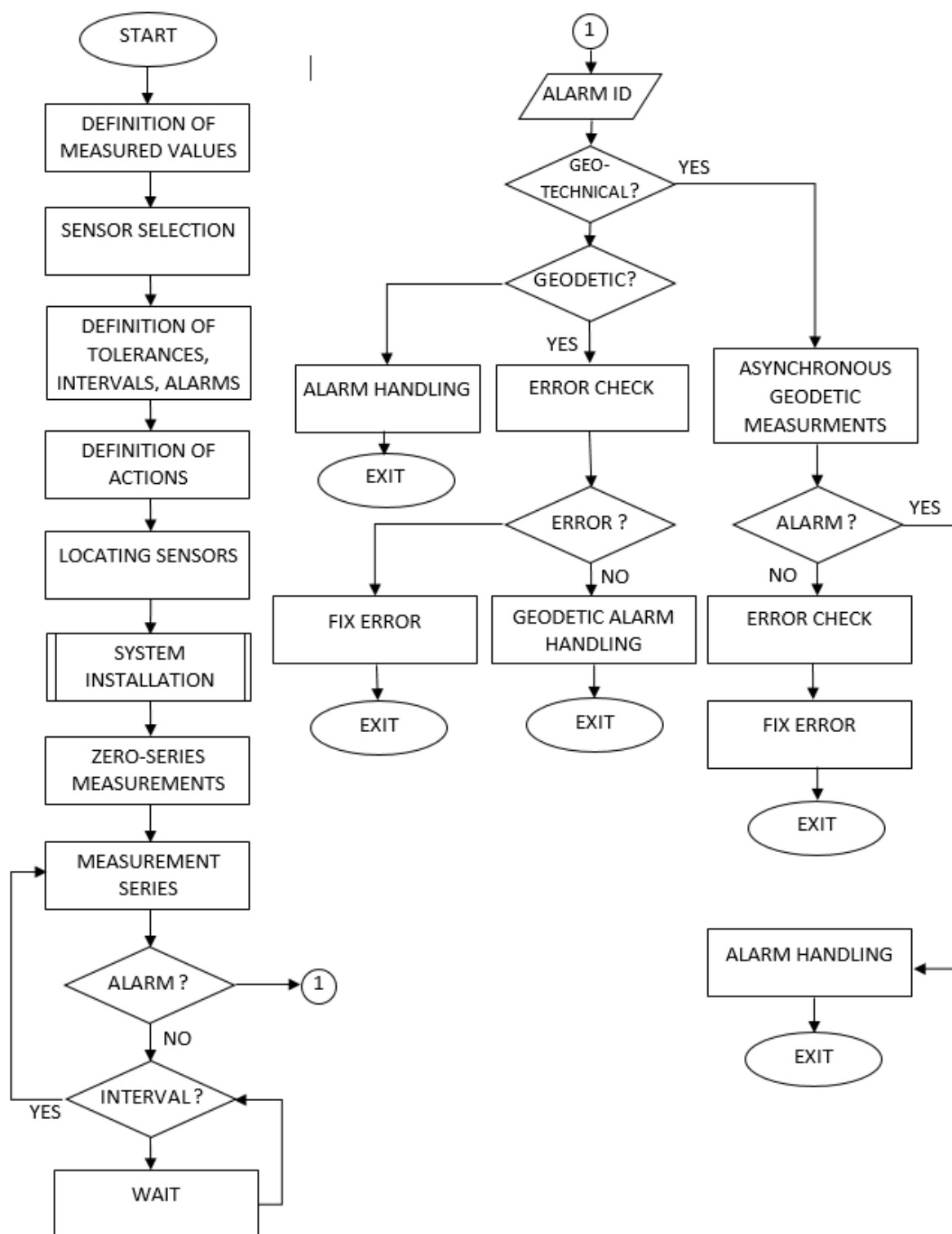
- Planiranje i projektovanje (nisu automatizovani);
- Instalacija sistema;
- Eksploatacija sistema, odnosno sprovođenje merenja u realnom vremenu koja se izvode automatski.

Planiranje i projektovanje se vrše na osnovu prethodnog znanja o objektu nad kojim se vrši monitoring, kao i kapacitetima i mogućnostima tehnologije. Ovi koraci uključuju definisanje merenih veličina, odabir senzora, lociranje senzora, definisanje tolerancija, intervala merenja i graničnih vrednosti. Takođe, specificiraju se i akcije koje se pokreću u slučaju dostizanja graničnih vrednosti i oglašavanja alarma, kao i procedure provere. Instalacija sistema uključuje aktivnosti kao što su postavljanje senzora, njihovo povezivanje, instalaciju i konfigurisanje softvera i testiranje sistema. Kao što je već pomenuto, merenja se izvode automatski, ali neke aktivnosti, kao što su izvođenje nulte serije merenja i održavanje su izuzeci.

S obzirom da se merenja u realnom vremenu ovde posmatraju kao procedura, generalizovani model je predstavljen u vidu algoritma gde blokovi predstavljaju pomenute aktivnosti (Slika 54). Treba napomenuti da prilikom projektovanja ovakvih sistema neke aktivnosti nisu striktno povezana sa merenjima treba takođe uzeti u obzir, kao na primer zaštitu od provale i štete na delovima sistema. Pošto se model odnosi na merenja, ovakve aktivnosti nisu uključene.

Može se uočiti da predloženi je generalizovani model jednostavan u pogledu opisa izvođenja merenja u slučaju kada nema aktivacije alarma. To je iz razloga što druge aktivnosti osim merenja nisu potrebne, osim provere da li je istekao period između dve serije merenja. Takođe, potrebno je proveravati da li je istekao period između redovnih održavanja, ali se to veoma često vrši manuelno, stoga nije uključeno u model.

Najsloženiji deo modela se odnosi na pojavu alarma. Alarmi se mogu pojaviti iz različitih razloga: izmerena vrednost je van tolerancije, vrednost je van mernog opsega, totalna stanica ne može da detektuje prizmu, nema signala sa senzora, aktiviran je senzor provale itd. Veliki broj scenarija je moguć i uvrštavanje detaljnog modela za svaki od ovih scenarija u generalni model nije moguće.



Slika 54: Generalizovani model merenja deformacija u realnom vremenu

5.5 Tačnost i pouzdanost mreže

Jedan od osnovnih zahteva koji se predstavlja pred geosenzorsku mrežu za monitoring je tačnost. U zavisnosti od konkretnog slučaja, tj. objekta ili terena koji se osmatra definiše se

tačnost koju moraju zadovoljiti merenja u mreži. Prvi korak ka realizaciji mreže koja može zadovoljiti traženu tačnost je odabir odgovarajućih senzora. Svaki senzor se karakteriše parametrima koji utiču na kvalitet merenja (tačnost, rezolucija, linearnost, merni opseg) i te će se prilikom izbora senzora odabrati onaj koji omogućuje merenja tražene tačnosti. Drugi korak je pravilna instalacija senzora, ne samo u fizičkom smislu, nego i u smislu programiranja komunikacionih uređaja preko kojih se senzori povezuju na računar. Treći korak, koji nije uvek neophodan, je obezbeđivanje kompenzacionih parametara. Vrednosti koje daju senzori su u suštini signali koji primarno zavise od merene fizičke veličine, ali u manjoj ili većoj meri i od uslova merenja, u prvom redu temperature okoline. Kod geodetskih senzora vrednosti merenja zavise i od pritiska i relativne vlažnosti. Stoga je u nekim slučajevima potrebno obezbediti merenja i ovih veličina kako bi se mogle sračunati vrednosti kompenzacije. Na primer, u kućišta inklinometara se često integrišu senzori temperature. Korigovana vrednost sa senzora se potom računa kao:

$$R_{corr} = R - a \cdot (T - T_0) \quad (5.4)$$

Gde je:

R_{corr} – korigovana vrednost

R – očitana vrednost sa senzora

a – konstanta kompenzacije (data u dokumentaciji senzora)

T – trenutna izmerena temperatura

T_0 – temperatura izmerena u nultoj seriji

Kada su u pitanju geodetski senzori, u prvom redu robotizovane totalne stanice i GNSS, tačnost i pouzdanost mreže se mogu obezbediti i odgovarajućim brojem instrumenata i planom opažanja. Kako se broj tačaka koje se opažaju zna, moguće je odrediti broj senzora i odgovarajući plan opažanja, pri čemu je cilj da se omogući izravnjanje mreže, odnosno da postoje suvišna merenja [48, 58]. Tada je moguće izvesti ocenu tačnosti i pouzdanosti mreže na osnovu koje se za traženu tačnost mogu definisati broj i karakteristike senzora.

Ukoliko se za primer uzme mreža koja se sastoji od 7 tačaka, pri čemu se na jednoj nalazi totalna stanica, izravnjanje nije moguće jer je broj nepoznatih parametara isti sa brojem merenih veličina (svaka tačka podrazumeva tri nepoznata parametra, tj. njene koordinate, a kako ima 6 vizurnih tačaka, ukupan broj nepoznatih parametara je 18. Totalna stanica meri tri veličine – pravac, zenitni ugao i kosu dužinu, što je ukupno 18 merenih veličina). Tačnost merenja tada u potpunosti zavisi od tačnosti instrumenta, kao i uslova u trenutku merenja. Ukoliko se u sistem dodaju dva GNSS prijemnika, jedan na tački gde je totalna stanica, a drugi na novoj, osmoj tački i opaža se vektor između njih, iako je sistem pouzdaniji jer se proverava pozicija stanice, izravnjanje i dalje nije moguće izvesti jer iako postoje nove 3 merene veličine (koordinatne

razlike u okviru vektora) postoje i 3 nova nepoznata parametra (koordinate tačke 8). Ukoliko se dodaju tri GNSS prijemnika, jedan na tački gde je postavljena totalna stanica i dva na novim tačkama, broj nepoznatih parametara raste na 27 (9 tačaka sa po 3 koordinate), a broj merenih veličina je takođe 27 (18 merenih veličina na vizurnim tačkama i 9 koordinatnih razlika). U tom slučaju izravnaje i dalje nije moguće jer nema suvišnih merenja. Međutim, ukoliko se doda četiri GNSS prijemnika broj nepoznatih parametara je 30 (10 tačaka sa po 3 koordinate), ali je broj merenja 36 (18 merenih veličina ka vizurnim tačkama i 18 koordinatnih razlika iz 6 vektora), postoje suvišna merenja i moguće je izvršiti izravnaje. Umesto dodavanja određenog broja GNSS prijemnika moguće je geosenzorsku mrežu integrisati sa mrežom permanentnih GNSS stanica. U tom slučaju, veliki broj GNSS prijemnika i vektora koji se opažaju između njih obezbeđuje pouzdana merenja i zadovoljavajuću tačnost. Ovo je pokazano na primeru mreže permanentnih stanica APOS-NS koja se sastoji od 10 stanica raspoređenih na teritoriji Vojvodine. Ako se vektori opažaju sa tačnošću $0.5\text{mm}+0.1\text{ppm}$ za koordinatne razlike položaja (E – Easting i N – Northing) i $1\text{mm}+0.1\text{ppm}$ za dužine, maksimalne vrednosti poluosa elipsi grešaka iznose 7.9mm i 4mm. Pretpostavljene tačnosti opažanja vektora je moguće ostvariti primenom odgovarajućih GNSS antena, prijemnika i dovoljno dugih perioda opažanja. Osetljivost mreže, tj. minimalni pomeraj koji se može registrovati je 10mm duž velike poluose i 14mm duž male poluose greške. Rezultati analize su dati u Tabela 7.

Tabela 7: Rezultati analize tačnosti za APOS-NS mrežu permanentnih stanica sa GNSS prijemnicima postavljenim na 10 tačaka

Približne koordinate tačaka					Velika poluosa apsolutnih elipsi grešaka	Mala poluosa apsolutnih elipsi grešaka	Najmanji pomeraj u pravcu velike poluose	Najmanji pomeraj u pravcu male poluose
Broj stanice	Grad	E[m]	N[m]	h[m]	A[mm]	B[mm]	dp[mm]	dp[mm]
1	Subotica	397673.205	5106134.247	184.608	5.665	2.677	10.020	4.734
2	Sombor	353968.795	5070009.225	152.018	4.078	3.568	6.310	7.213
3	Kikinda	458011.386	5074808.988	129.500	3.635	3.635	6.428	6.429
4	Vrbas	393972.547	5047488.837	127.500	3.637	2.680	6.432	4.739
5	Zrenjanin	451637.982	5025288.076	136.821	3.655	3.269	5.782	6.464
6	Novi Sad	409910.246	5010928.789	156.757	3.167	2.998	5.303	5.600
7	Šid	360097.201	4998019.660	144.500	3.940	2.754	4.870	6.967
8	Vršac	526032.729	4997907.616	170.446	7.890	2.755	4.872	13.954
9	Pančevo	472289.715	4969393.130	120.500	4.220	3.986	7.049	7.464
10	Šabac	395404.766	4956555.440	122.500	4.453	2.642	7.875	4.672

Međutim, ukoliko se umesto GNSS prijemnika u sistem doda još jedna totalna stanica tada je moguće izvršiti izravnaje mreže. Ako se svakom stanicom opaža preostalih 7 tačaka, to je 14 opažanja odnosno 42 merene veličine. U ovom slučaju umesto 6 postoji 8 tačaka sa nepoznatim koordinatama, dakle 24 nepoznata parametra, što je znatno manje od broja merenih veličina, tj.

postoje suvišna merenja koja omogućuju primenu metode najmanjih kvadrata. Ako se opažanja vrše totalnom stanicom tačnosti 1" za uglove i 1mm+1.5ppm za dužine, maksimalne vrednosti poluosa elipsi grešaka iznose 2.7mm i 1.8mm. Osetljivost mreže, tj. minimalni pomeraj koji se može registrovati je 4.5mm duž velike poluose, 3mm duž male poluose greške i 4.6mm po visini. Rezultati analize su dati u Tabela 8.

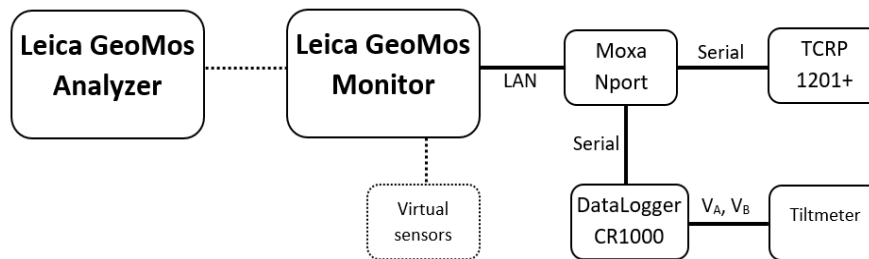
Tabela 8: Rezultati analize tačnosti za mrežu sa 8 tačaka i dve stanice

Približne koordinate tačaka				Velika poluosa apsolutnih elipsi grešaka	Mala poluosa apsolutnih elipsi grešaka	Najmanji pomeraj u pravcu velike poluose	Najmanji pomeraj u pravcu male poluose	Najmanji pomeraj po visini
Broj tacke	Y[m]	X[m]	H[m]	A[mm]	B[mm]	d[mm]	d[mm]	d[mm]
1	1000.000	1000.000	100.000	1.261	0.951	2.095	1.580	1.377
2	1200.000	1000.000	100.000	1.185	0.985	1.969	1.636	1.304
3	900.000	1100.000	110.000	2.089	1.590	3.469	2.640	2.453
4	1000.000	1150.000	110.000	2.017	1.650	3.350	2.741	2.400
5	1100.000	1175.000	110.000	2.084	1.809	3.461	3.005	2.560
6	1200.000	1150.000	110.000	2.199	1.648	3.653	2.736	2.381
7	1300.000	1100.000	110.000	2.259	1.714	3.751	2.846	2.426
8	1500.000	1100.000	120.000	2.697	1.821	4.479	3.025	4.586

6 Studija slučaja – implementacija modela sistema za monitoring deformacija u laboratorijskim uslovima

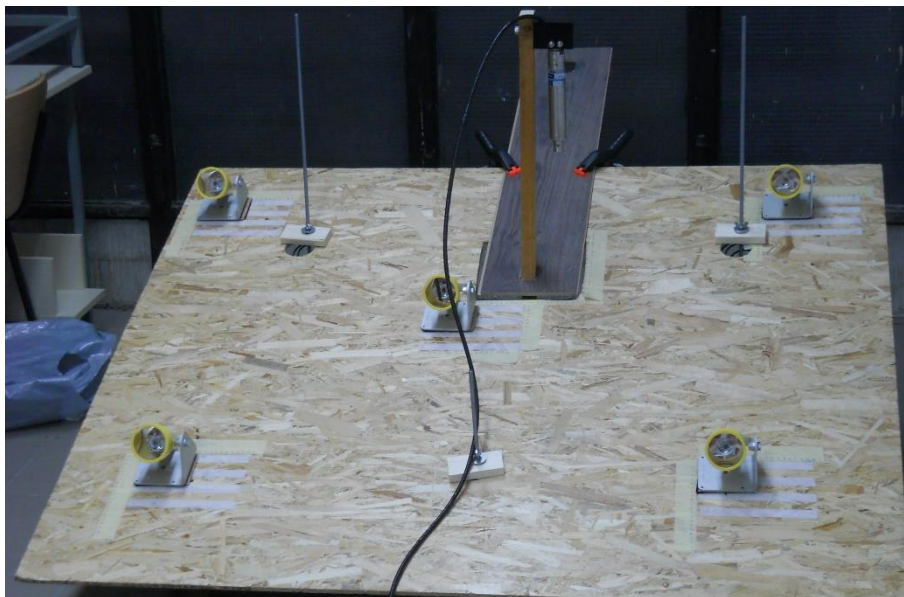
6.1 Postavka eksperimenta

Implementacija generalizovanog modela deformacionih merenja je izvršena u vidu eksperimenta sprovedenog u laboratorijskom okruženju. Projektovan je sistem koji obuhvata geodetske i geotehničke senzore, kao i softver za deformaciona merenja (Slika 55).



Slika 55: Šematski prikaz sistema implementiranog u eksperimentu

Merenja su izvršena na fizičkom modelu koji je kreiran tako da simulira pomeraje u kosoj ravni, kakvi se dešavaju na klizištima (Slika 56). Fizički model se sačinjen od panela na kojem je postavljeno pet prizmi za monitoring. Prizme su pričvršćene za panel lepljivom trakom, tako da se mogu pomerati između serija merenja. Trake sa podeocima na svakih 5mm su postavljene pored prizmi tako da se pomeraj prizme može odrediti u oba pravca u odnosu na stranice panela (Slika 57). Šesta prizma nije postavljena na panel već pored njega i predstavlja fiksnu tačku van očekivane zone deformacija. Ova prizma je korišćena za detekciju grešaka u merenjima.



Slika 56: Fizički model padinskih procesa



Slika 57: Geodetska prizma za monitoring postavljena na panel

Osim prizmi, tiltmetar Geokon 6160 je postavljen tako da se mogu meriti promene u inklinaciji. Slično prizmama, postavljen je tako da je moguće definisati pomeraje paralelne stranicama panela. Ploča je postavljena na panel i letva sa montiranim tiltmetrom je postavljena tako da tesno prolazi kroz otvor na ploči (Slika 58). Uz ivice ploče postavljene su dve trake sa podeocima na 5mm te je moguće odrediti pomeraje ploče, a time i ugaoni pomeraj u A i B ravni tiltmetra. Pomeraji su korišćeni na dva načina: za procenu merenja tiltmetrom (u smislu da veći linearni pomeraj u milimetrima treba da prouzrokuje veće vrednosti očitanih uglova) i za ispitivanje ponašanja virtuelnog senzora.



Slika 58: Tiltmetar instaliran na fizičkom modelu

Tiltmetar je povezan na Campbell Scientific CR1000 logger podataka (Slika 59) koji je programiran da očitava izlaze senzora u A i B ravni svake sekunde i da upisuje srednju vrednost u tabelu svakih 20 sekundi.



Slika 59: Logger podataka Campbell Scientific CR100 sa povezanim tiltmetrom

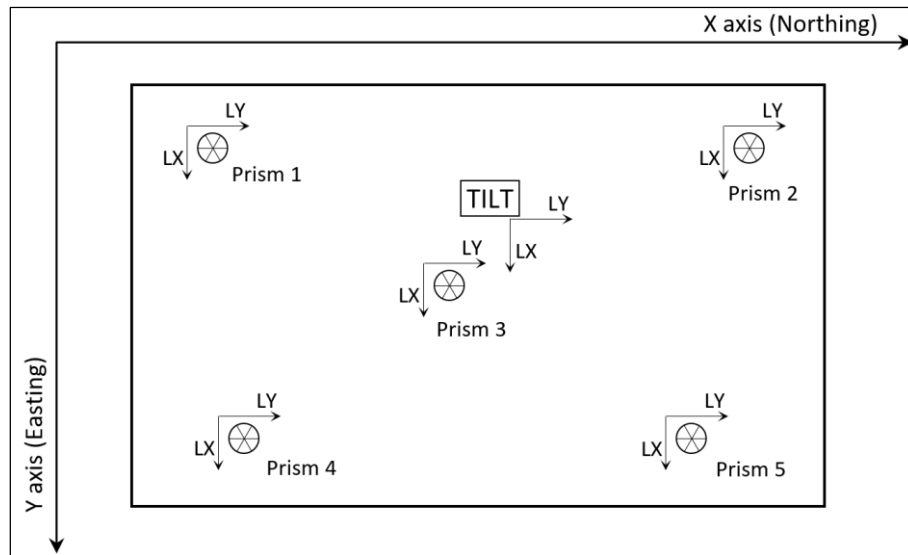
Merenja su izvršena robotizovanom totalnom stanicom Leica TCRP1201+, koja je povezana na računar preko serijskog kabla (Slika 60). Kako je i logger takođe povezan serijskim kablom upotrebljen je MOXA COMServer sa osam serijskih portova.



Slika 60: Robotizovana totalna stanica Leica TCRP1201+

Sva merenja su izvršena pomoću softvera Leica GeoMos Monitor. Kreiran je projekat u lokalnom koordinatnom sistemu čije su ose (Easting, Northing) definisane tako da budu približno paralelne osama koordinatnog sistema prizama (LX, LY) (Slika 61). Jedan profil (proizvoljni pravac u kom se računaju pomeraji) je definisan preko prizmi 1 i 4. Profil je približno paralelan i po smeru suprotan Y osi lokalnog koordinatnog sistema. Povezani su svi

senzori i period između serija merenja je postavljen na 2 minuta za totalnu stanicu i 1 minut za tiltmetar. Kako se merenja tiltmetrom beleže svakih 20 sekundi u logeru GeoMos će svakog minuta preuzeti 6 merenja (3 po ravni). U GeoMos-u je kreiran i virtualni senzor tako da su u okviru eksperimenta izvršena merenja geodetskim, geotehničkim i virtualnim senzorom.



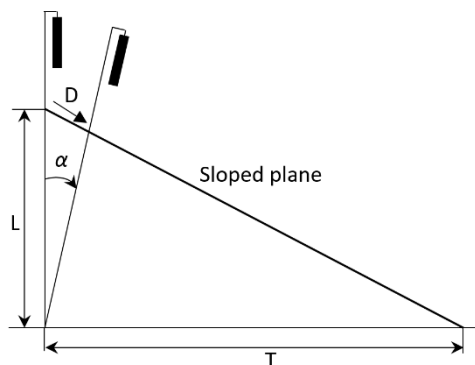
Slika 61: Koordinatni sistem projekta i lokalni koordinatni sistemi prizama i tiltmetra

Virtualni ili soft senzor je softverski modul koji omogućava merenja veličina koje se ne mogu izmeriti direktno, računanjem vrednosti iz direktno merenih. U ovom eksperimentu kreiran je virtualni senzor koji računa pomeraj duž kose ravni preko nagiba izmerenog tiltmetrom (Slika 62). Veza između pomeraja (D) i izmerenog nagiba (α) je data izrazom:

$$D = \frac{T \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\sin\left(\arctg \frac{T}{L}\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{T}{L} \cdot \sin\left(\arctg \frac{T}{L}\right)} \quad (6.1)$$

Gde je α nagib izmeren tiltmetrom u B ravni. Za korišćeni fizički model konstantne vrednosti su $T=0.83\text{m}$ i $L=0.34\text{m}$, te je konačan izraz za virtualni senzor:

$$D = \frac{0.83 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{0.925 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2.258} \quad (6.2)$$



Slika 62: Kosa ravan, tiltmetar u dva položaja, merene i računane veličine

Eksperiment je dizajniran kao simulacija prethodno opisanog generalizovanog modela. S obzirom da je izveden u laboratorijskim uslovima, sa ograničenim skupom senzora, neki koraci, npr. odabir i lociranje senzora, su bili vrlo jednostavni. Definisane merene vrednosti i odabir merenih vrednosti su bili uslovljeni raspoloživim sensorima i fizičkim modelom. Nakon instalacije i povezivanja senzora u sistem u GeoMos softveru su definisani intervali merenja, tolerancije i alarmi. Intervali su relativno kratki (2 minuta za totalnu stanicu i 1 minut za tiltmetar) jer je eksperiment izveden u laboratorijskom okruženju. U realnim uslovima je uobičajeno je da su intervali znatno duži jer je veći broj tačaka koji se opaža, deformacije su spore, a takođe se smanjuje potreban prostor za skladištenje podataka kao i habanje pokretnih delova instrumenata (npr. totalne stanice). Takođe, definisane su granične vrednosti (limiti) za merenja geodetskim i geotehničkim sensorima.

Virtualni senzori su takođe korišćeni za proveru aktivacije alarma na geotehničkom senzoru. U generalizovanom modelu je dato da ako je vrednost izmerena geotehničkim senzorem preko definisanog limita, alarmno stanje koje se pojavi može biti provereno merenjem geodetskim senzorem. U ovom eksperimentu, ako je vrednost izmerena tiltmetrom preko definisanog limita, naredno merenje prizme najbliže tiltmetru (prizma 3) se iskoristi za proveru da li je zaista došlo do alarmnog stanja ili je u pitanju greška, tj. lažno alarmno stanje (false alarm). Ako je pomeraj prizme u veoma malom opsegu (1mm) znači da je u pitanju pogrešno merenje tiltmetrom. U suprotnom, pomeraj je prisutan i alarmno stanje prouzrokovano očitanom vrednošću na tiltmetru je ispravno. Ova provera je realizovana kreiranjem virtualnog senzora (GeoT_EC) koji vraća vrednost 10 ako je u pitanju greška merenja, tj. ako je pomeraj prizme 3 vrlo mali, a uglovni preko limita. U svim drugim slučajevima virtualni senzor vraća vrednost 0 što znači da ili nije došlo do pojave alarma (ako je vrednost uglovnog pomeraja manja od limita) ili je alarmno stanje ispravno (Tabela 9). Vrednost 10 će biti veća od limita postavljenog za ovaj virtualni senzor, tako da će se upozorenje pojaviti u Messages panelu u GeoMos Monitor-u.

Tabela 9: Lookup tabela virtualnog senzora GeoT_EC

Tilt_B > 1	Prism3_L < 0.005	GeoT_EC	Meaning
T	T	10	False alarm
T	F	0	Alarm
F	T	0	No alarm
F	F	0	No alarm
GeoT_EC limit: 0.1			

U slučaju da se detektuje pomeraj prizme veći od definisanog limita softver će prijaviti alarmnu situaciju. U najvećem broju slučajeva pomeraj je prouzrokovan pojavom deformacije na tački signalisanoj prizmom. Međutim, postoji mala verovanoća da je uzrok pomeraja pomeranje totalne stanice. Kako je već pomenuto, totalne stanice se postavljaju na stabilisane tačke (betonski stubovi sa dubokim temeljima), na geološki stabilnom terenu i mogućnost pomeranja instrumenta je izuzetno mala, ali u cilju povećanja pouzdanosti i robusnosti sistema potrebno je realizovati proveru alarmnih stanja uzrokovanih vrednostima geodetskih merenja. Na sličan način kao kod geotehničkih merenja, virtualni senzor je iskorišćen i za proveru greške geodetskih merenja, odnosno merenja totalnom stanicom. U ovu svrhu postavljena je jedna prizma van fizičkog modela i njena pozicija je fiksna, tj. ne menja se tokom izvođenja eksperimenta. Ako je pomeraj posmatrane prizme (u ovom slučaju transversalni pomeraj prizme 4) veći od 50mm signaliziraće se alarmno stanje na toj prizmi. U cilju provere ovog alarma, izmerena vrednost se upoređi sa vrednošću transversalnog pomeraja na fiksnoj prizmi (Prism_F) i ukoliko je pomeraj fiksne prizme veći od 1mm znači da totalna stanica nije stabilna i da je u pitanju lažno alarmno stanje. U suprotnom, pomeraj je prisutan i alarmno stanje prouzrokovano očitano vrednošću na tiltmetru je ispravno. Ova provera je realizovana kreiranjem virtualnog senzora (Prism4_EC) koji vraća vrednost 10 u opisanom slučaju lažnog alarmnog stanja. U svim drugim slučajevima virtualni senzor vraća vrednost 0 što znači da ili nije došlo do pojave alarma (ako je vrednost pomeraja prizme 4 manja od limita) ili je alarmno stanje ispravno (Tabela 10). Vrednost 10 će biti veća od limita postavljenog za ovaj virtualni senzor, tako da će se upozorenje pojaviti u Messages panelu u GeoMos Monitor-u.

Tabela 10: Lookup tabela virtualnog senzora Prism4_EC

Prism4_T > 0.05	PrismF_T > 0.001	Prism4_EC	Meaning
T	T	10	False alarm
T	F	0	Alarm Prism4
F	T	0	Alarm PrismF
F	F	0	No alarm
Prism4_EC limit: 0.1			

6.2 Rezultati i diskusija

Izvršeno je 12 serija merenja, pri čemu su za svaku seriju merenja pomeraji prizama i tiltmetra zadavani posebno (Tabela 11). Pomeraji su zadavani prevashodno u smeru niz kosu ravan, ali u nejednakom rasporedu kako bi se simuliralo pomeranje tela klizišta. Takođe, u šest serija nisu sadavani pomeraji kako bise simulirala situacija da većinu vremena nema deformacije.

Tabela 11: Zadati pomeraji prizama i tiltmetra. Sve vrednosti su date u milimetrima.

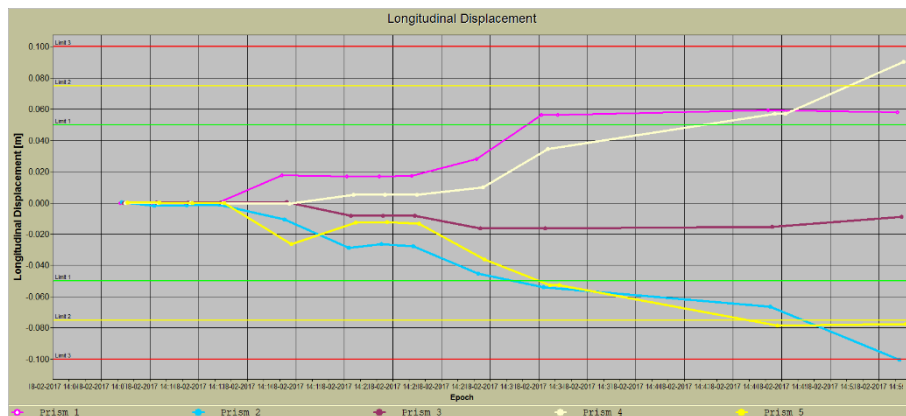
	Prism 1		Prism 2		Prism 3		Prism 4		Prism 5		Tiltmeter	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Series 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Series 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Series 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Series 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Series 5	20	20	10	30	0	10	0	20	30	10	0	10
Series 6	20	30	30	40	10	10	10	30	15	40	10	10
Series 7	20	30	30	40	10	10	10	30	15	40	10	10
Series 8	20	30	30	40	10	10	10	30	15	40	10	10
Series 9	30	40	50	40	20	20	20	50	40	40	20	20
Series 10	60	75	60	50	20	20	40	50	60	50	20	20
Series 11	60	70	70	65	20	15	70	60	90	50	20	15
Series 12	70	90	105	70	10	15	100	70	90	80	10	15

Rezultai merenja su dati u Tabela 12 i na narednim slikama.

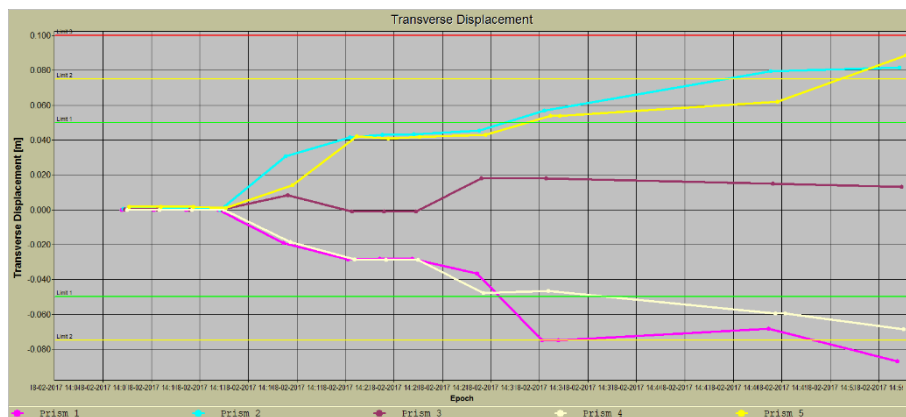
Tabela 12: Rezultati merenja pomeraja prizama.

Prism	Series	Horizontal angle	Vertical angle	Slope Distance	Target Northing	Target Easting	Target Elevation	Longitudinal Displ. [m]	Transverse Displ. [m]	Height Displ. [m]
Prism_1	1	216° 03' 32.27471"	99° 46' 54.78471"	6.089	44.07	49.084	48.965	0	0	0
Prism_1	2	216° 03' 30.52128"	99° 46' 54.51688"	6.089	44.07	49.084	48.966	0	0	0
Prism_1	3	216° 03' 30.20747"	99° 46' 54.75879"	6.089	44.07	49.084	48.966	0	0	0
Prism_1	4	216° 03' 31.27003"	99° 46' 54.50777"	6.089	44.07	49.084	48.966	0	0	0
Prism_1	5	216° 12' 49.50942"	99° 52' 44.80464"	6.07	44.088	49.103	48.959	0.018	-0.019	-0.007
Prism_1	6	216° 18' 09.21308"	99° 52' 36.30039"	6.069	44.087	49.112	48.959	0.017	-0.028	-0.007
Prism_1	7	216° 18' 04.17188"	99° 52' 36.77374"	6.069	44.087	49.112	48.959	0.017	-0.028	-0.007
Prism_1	8	216° 18' 01.78514"	99° 52' 37.07629"	6.069	44.087	49.112	48.959	0.017	-0.028	-0.007
Prism_1	9	216° 21' 57.62366"	99° 56' 18.05715"	6.058	44.098	49.121	48.954	0.028	-0.037	-0.011
Prism_1	10	216° 41' 28.11996"	100° 05' 35.00150"	6.027	44.126	49.159	48.944	0.056	-0.075	-0.022
Prism_1	11	216° 37' 34.41554"	100° 06' 31.82663"	6.025	44.129	49.153	48.942	0.059	-0.068	-0.023
Prism_1	12	216° 48' 18.82208"	100° 06' 23.71234"	6.024	44.128	49.171	48.943	0.058	-0.087	-0.023
Prism_2	1	227° 41' 02.08708"	99° 44' 21.90960"	6.029	44.065	50.295	48.98	0	0.001	0
Prism_2	2	227° 41' 04.75004"	99° 45' 03.78160"	6.027	44.067	50.295	48.979	-0.002	0.001	-0.001
Prism_2	3	227° 41' 07.34109"	99° 44' 59.50342"	6.028	44.067	50.295	48.979	-0.001	0.001	-0.001
Prism_2	4	227° 40' 43.15882"	99° 44' 52.12296"	6.028	44.067	50.294	48.979	-0.001	0	-0.001
Prism_2	5	227° 58' 26.53868"	99° 47' 48.75973"	6.019	44.078	50.324	48.976	-0.011	0.031	-0.004
Prism_2	6	228° 04' 53.07697"	99° 53' 33.33766"	6.003	44.096	50.334	48.969	-0.029	0.042	-0.011
Prism_2	7	228° 05' 41.21963"	99° 52' 51.63110"	6.005	44.094	50.336	48.97	-0.026	0.043	-0.01
Prism_2	8	228° 05' 52.04703"	99° 53' 13.86363"	6.004	44.095	50.336	48.969	-0.028	0.043	-0.011
Prism_2	9	228° 07' 14.35753"	99° 58' 43.69428"	5.988	44.113	50.338	48.962	-0.045	0.045	-0.017
Prism_2	10	228° 14' 01.18872"	100° 01' 29.53249"	5.98	44.122	50.349	48.959	-0.054	0.057	-0.021
Prism_2	11	228° 27' 18.81261"	100° 04' 25.33645"	5.968	44.136	50.371	48.956	-0.067	0.08	-0.024
Prism_2	12	228° 28' 49.88087"	100° 15' 56.81579"	5.937	44.17	50.371	48.942	-0.1	0.082	-0.038
Prism_3	1	221° 07' 11.45354"	102° 01' 19.24982"	5.683	44.454	49.639	48.816	0	0	0
Prism_3	2	221° 07' 10.18242"	102° 01' 18.36213"	5.683	44.454	49.639	48.816	0	0	0
Prism_3	3	221° 07' 06.63640"	102° 01' 19.29533"	5.683	44.454	49.639	48.816	0	0	0
Prism_3	4	221° 07' 11.56465"	102° 01' 20.43744"	5.683	44.454	49.639	48.816	0	0	0
Prism_3	5	221° 12' 10.71614"	102° 01' 06.69745"	5.683	44.453	49.647	48.817	0	0.008	0
Prism_3	6	221° 06' 28.67587"	102° 04' 18.11703"	5.675	44.462	49.639	48.813	-0.008	-0.001	-0.003
Prism_3	7	221° 06' 25.63651"	102° 04' 18.40334"	5.675	44.462	49.639	48.813	-0.008	-0.001	-0.003
Prism_3	8	221° 06' 24.92317"	102° 04' 18.99738"	5.675	44.462	49.639	48.813	-0.008	-0.001	-0.003
Prism_3	9	221° 18' 15.49592"	102° 07' 01.21990"	5.668	44.469	49.658	48.81	-0.016	0.018	-0.006
Prism_3	10	221° 18' 18.09030"	102° 06' 59.84468"	5.668	44.469	49.658	48.81	-0.016	0.018	-0.006
Prism_3	11	221° 16' 26.51937"	102° 06' 45.81495"	5.669	44.468	49.655	48.81	-0.015	0.015	-0.006
Prism_3	12	221° 15' 13.74525"	102° 04' 30.02257"	5.675	44.462	49.653	48.813	-0.009	0.013	-0.004
Prism_4	1	215° 59' 53.38271"	104° 19' 02.51231"	5.407	44.823	49.195	48.663	0	0	0
Prism_4	2	215° 59' 52.44839"	104° 19' 03.26243"	5.407	44.823	49.195	48.663	0	0	0
Prism_4	3	215° 59' 53.62207"	104° 19' 03.87946"	5.407	44.823	49.195	48.663	0	0	0
Prism_4	4	215° 59' 53.40354"	104° 19' 02.89841"	5.407	44.823	49.195	48.663	0	0	0
Prism_4	5	216° 11' 55.43122"	104° 19' 16.68604"	5.405	44.823	49.213	48.663	-0.001	-0.018	0
Prism_4	6	216° 17' 57.25231"	104° 21' 46.67585"	5.398	44.828	49.223	48.661	0.005	-0.029	-0.002
Prism_4	7	216° 17' 59.39743"	104° 22' 00.21991"	5.398	44.829	49.223	48.661	0.005	-0.029	-0.002
Prism_4	8	216° 17' 57.82571"	104° 21' 47.32764"	5.398	44.828	49.223	48.661	0.005	-0.029	-0.002
Prism_4	9	216° 30' 04.52182"	104° 24' 09.17250"	5.392	44.833	49.243	48.659	0.01	-0.048	-0.004
Prism_4	10	216° 26' 57.00875"	104° 34' 12.38055"	5.371	44.858	49.242	48.649	0.035	-0.047	-0.014
Prism_4	11	216° 33' 17.46629"	104° 43' 42.86839"	5.35	44.88	49.255	48.64	0.057	-0.06	-0.023

Prism_4	12	216° 36' 06.05049"	104° 57' 23.52883"	5.32	44.914	49.264	48.627	0.09	-0.069	-0.036
Prism_5	1	227° 01' 40.73700"	104° 17' 02.65184"	5.362	44.807	50.198	48.677	0	0.002	0
Prism_5	2	227° 01' 40.25378"	104° 17' 06.54210"	5.362	44.807	50.198	48.677	0	0.002	0
Prism_5	3	227° 01' 43.00401"	104° 17' 12.05478"	5.362	44.807	50.199	48.677	0	0.002	0
Prism_5	4	227° 01' 25.86986"	104° 17' 07.12072"	5.362	44.807	50.198	48.677	0	0.001	0
Prism_5	5	227° 09' 54.44732"	104° 28' 12.95734"	5.339	44.834	50.21	48.666	-0.027	0.014	-0.011
Prism_5	6	227° 28' 38.06703"	104° 22' 32.50543"	5.352	44.821	50.239	48.671	-0.012	0.042	-0.005
Prism_5	7	227° 27' 44.18509"	104° 22' 23.97301"	5.352	44.821	50.237	48.671	-0.012	0.041	-0.005
Prism_5	8	227° 28' 20.93764"	104° 22' 59.10035"	5.351	44.822	50.238	48.671	-0.013	0.042	-0.006
Prism_5	9	227° 29' 21.07827"	104° 32' 24.63871"	5.331	44.845	50.239	48.662	-0.036	0.043	-0.015
Prism_5	10	227° 36' 34.99071"	104° 39' 22.86160"	5.317	44.862	50.249	48.655	-0.053	0.054	-0.022
Prism_5	11	227° 42' 17.85758"	104° 48' 45.03279"	5.294	44.888	50.256	48.646	-0.078	0.062	-0.03
Prism_5	12	228° 00' 02.67075"	104° 49' 06.05086"	5.296	44.888	50.282	48.646	-0.077	0.088	-0.031

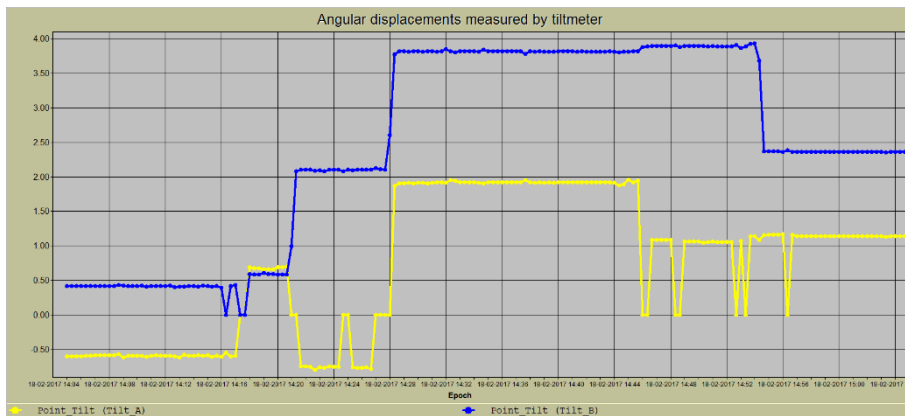


Slika 63: Longitudinalni pomeraji prizama

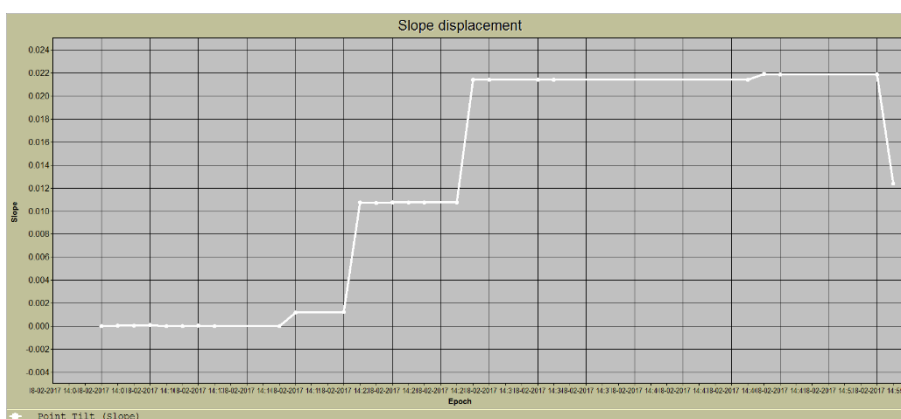


Slika 64: Transverzalni pomeraji prizama

Na Slika 63 i Slika 64 se može uočiti da pomeraji prizama 1 i 4 imaju predznak suprotan od pomeraja ostalih prizmi iako u tabeli 1 stoji da su pomeraji bili u istom smeru. Ovo je iz razloga što je za te dve prizme pomeraj računat u odnosu na definisani profil čiji je smer suprotan smeru Y ose i longitudinalnog pravca.

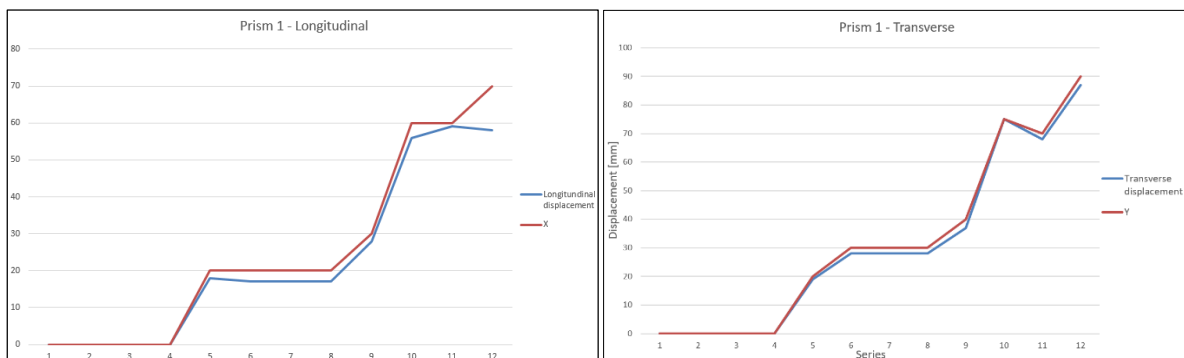


Slika 65: Ugaoni pomeraji mereni tiltmetrom

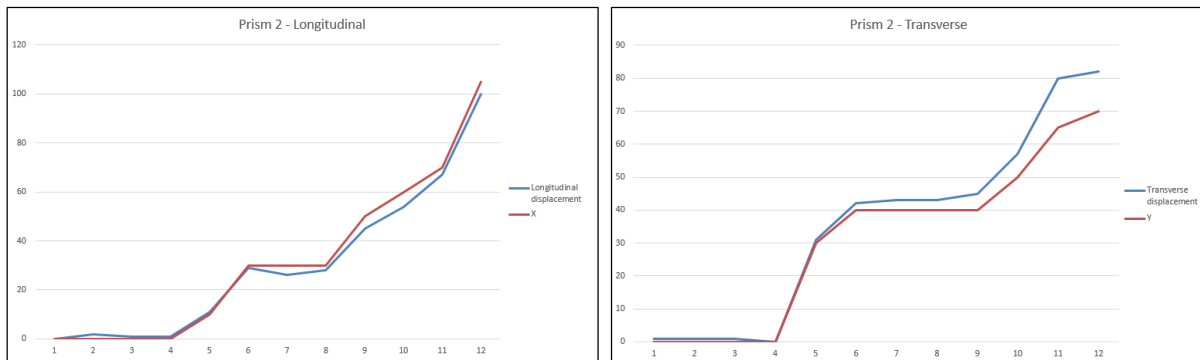


Slika 66: Pomeraji niz kosu ravan mereni virtualnim senzorom

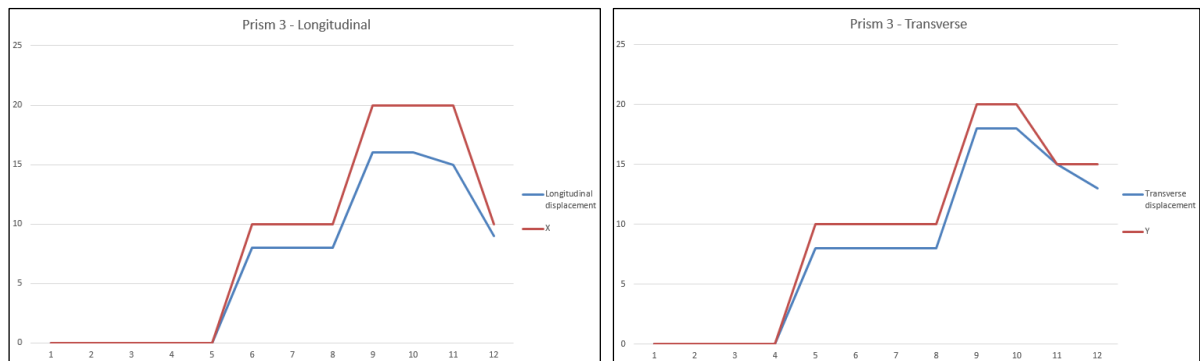
Ostvareni rezultati su upoređeni kako bi se ispitala tačnost. Zadati i ostvareni pomeraji su prikazani grafički. Kako GeoMos softver računa pomeraje u longitudinalnom i transverzalnom pravcu, longitudinalni pomeraji prizama 2, 3 i 5 su negativnog predznaka. U svrhu poređenja sa zadatim pomerajima ove vrednosti su uzete kao apsolutne vrednosti (Slika 68a, Slika 69a, Slika 71a). Transverzalni pomeraji prizama 1 i 4 su takođe negativni, pošto su računati za definisani profil, kao što je prethodno obrazloženo (Slika 64). Na Slika 67b i Slika 70b oni su predstavljeni svojim apsolutnim vrednostima.



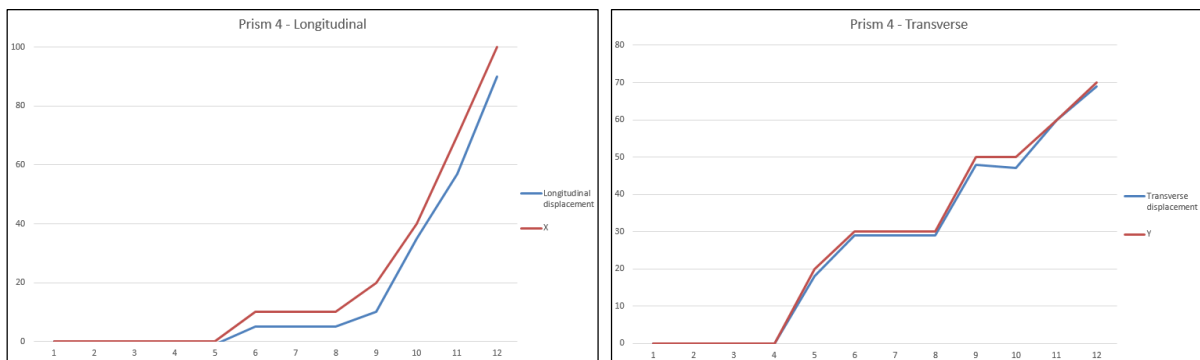
Slika 67: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 1 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija)



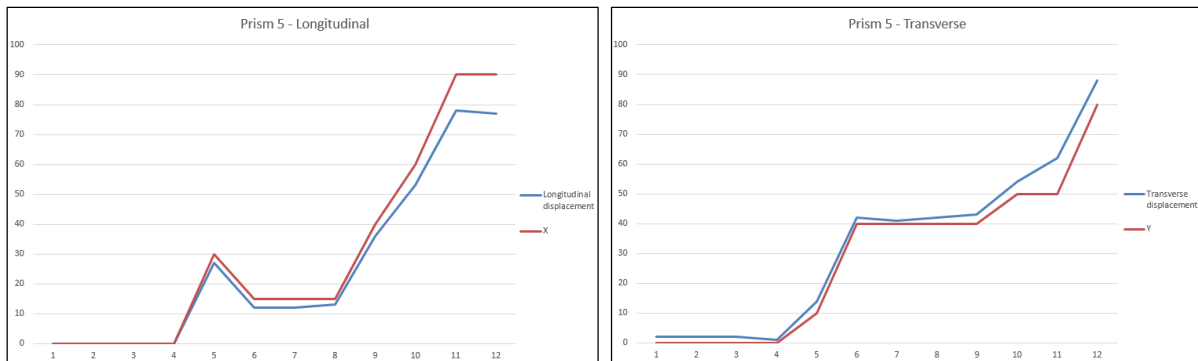
Slika 68: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 2 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija)



Slika 69: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 3 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija)

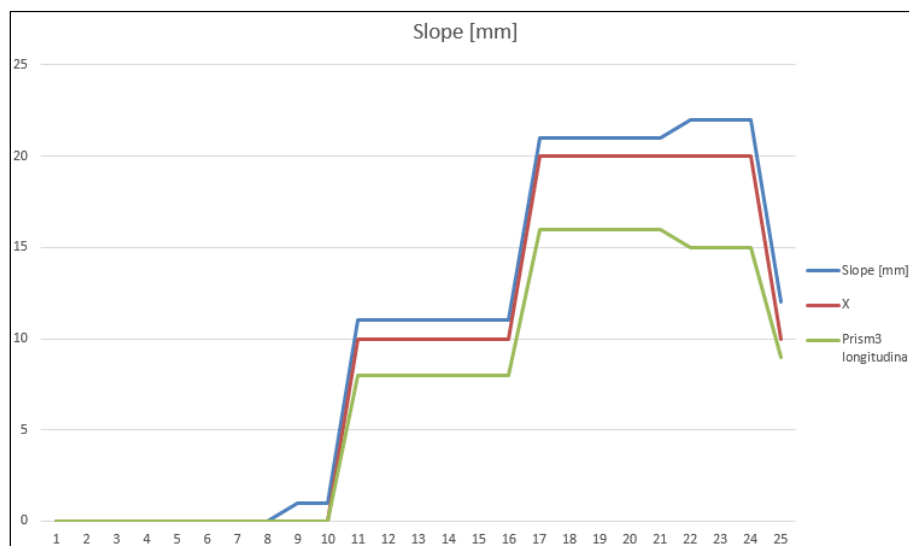


Slika 70: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 4 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija)

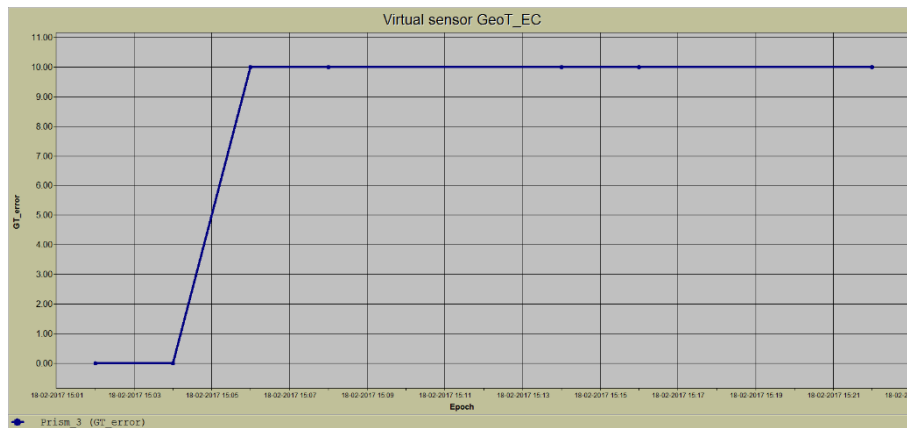


Slika 71: Longitudinalni i transverzalni pomeraji prizme 5 (plava linija). Zadati pomeraji duž X i Z ose lokalnog koordinatnog sistema prizme (smeđa linija)

Pomeraji niz kosu ravan mereni virtualnim senzorom analizirani su na Slika 72. Oni su upoređeni sa longitudinalnim pomerajima prizme 3 koja je bila postavljena vrlo blizu tiltmetra i zadati pomeraji su bili isti. Može se uočiti da se vrednosti merenja virtualnim senzorom u vrlo dobroj meri poklapaju sa zadatim pomerajima, pri čemu je maksimalna greška 2mm. Na prethodnim slikama gde su prikazani pomeraji prizama vidi se da greške mogu biti veće od 2mm. Kada se vrednosti izmerene virtualnim senzorom uporede sa izmerenim pomerajima prizme 3 može se uočiti da je maksimalna greška veća, a to je uzrokovano time što se pomeraj prizme računa po longitudinalnom pravcu koji nije striktno paralelan nagibu a time i pravcu u kom se meri virtualnim senzorom. Ovo dovodi do zaključka da se virtualni senzor može razmatrati za primenu u sistemima za monitoring deformacija u slučajevima kada je potrebno izvršiti određena merenja, ali postoje prepreke i nije moguće izvesti merenja fizičkim senzorima.



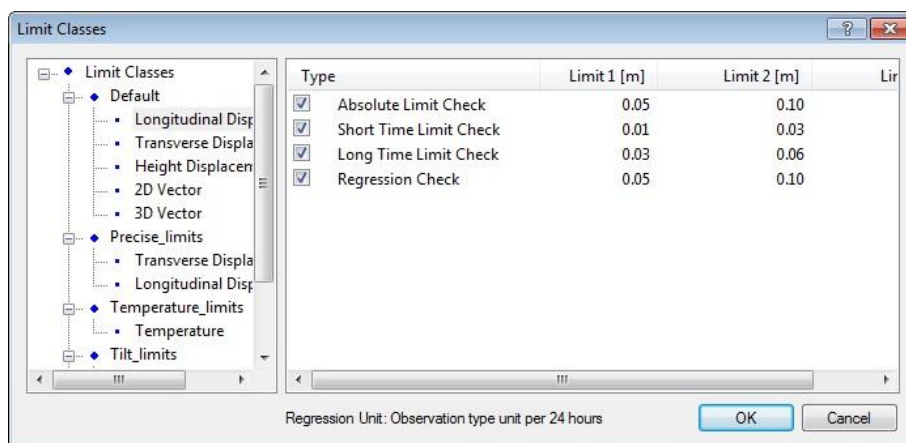
Slika 72: Pomeraji niz kosu ravan mereni virtualnim senzorom (plava linija); zadati pomeraji niz kosu ravan tj. duž X ose lokalnog koordinatnog sistema tiltmetra (smeđa linija); longitudinalni pomeraj prizme 3 (zelena linija). Zadati pomeraji tiltmetra i prizme



Slika 73: Vrednost virtualnog senzora GeoT_EC koji predstavlja proveru greške u merenjima tiltmetrom. Kada se pojavi alarm na tiltmetru ali ne i prizmi 3, virtualni senzor dobije vrednost 10 što ukazuje da merenje tiltmetrom sadrži grešku.

U okviru eksperimenta definisane su i tolerancije, pomoću klasa limita (Limit class, Slika 74). Moguće je definisati proizvoljan broj klasa. Postoje četiri vrste i tri nivoa limita.

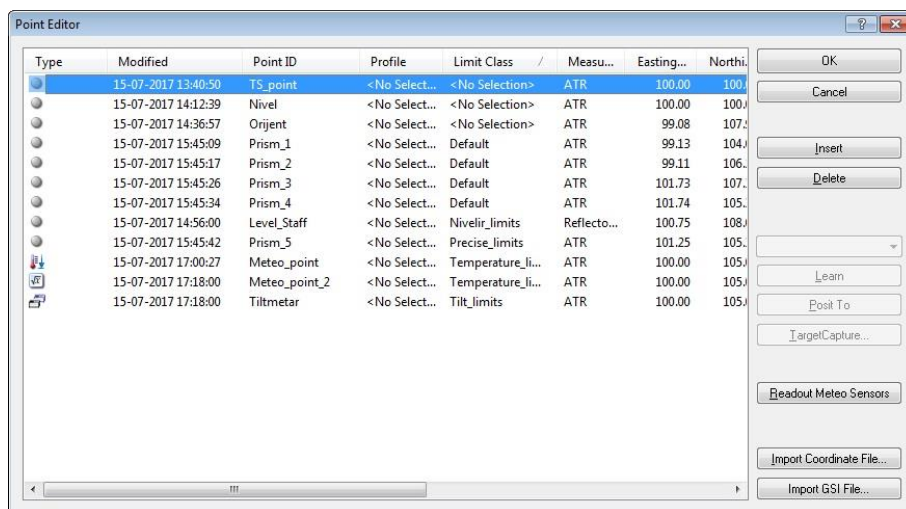
1. Apsolutni limit (Absolute limit) – limit koji se odnosi na razliku vrednosti poslednjeg i nultog merenja.
2. Kratkoročni limit (Short Time limit) – limit koji se odnosi na razliku vrednosti poslednjeg i preposlednjeg merenja.
3. Dugoročni limit (Long Time Limit) – limit koji se odnosi na razliku vrednosti poslednjeg i nekog merenja izvršenog pre određenog, definisanog vremena.
4. Regresioni limit (Regression Limit) – limit koji se odnosi na razliku vrednosti poslednjeg i vrednosti dobijene regresijom na osnovu prethodno merenih vrednosti.



Slika 74: Definisane klase limita

Tri nivoa limita se definišu tako da vrednost limita na drugom nivou mora biti veća od vrednosti na prvom, a vrednost na trećem veća od vrednosti na drugom nivou. U zavisnosti od toga koji nivo je prekoračen prijavljuje se prekoračenje odgovarajućeg nivoa, ali ne i nižeg nivoa (npr. ukoliko je prekoračen treći nivo, prekoračenje prvog i drugog nivoa neće biti prijavljeno). Klase

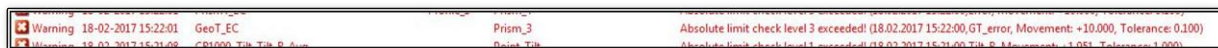
limita se dodeljuju tačkama, pri čemu se jednoj tački se može dodeliti samo jedna klasa (Slika 75).



Slika 75: Dodeljivanje klase limita tačkama (npr. tački Prism_1 je dodeljena klasa Default)

Prekoračenje limita izaziva alarmno stanje koje se signalizira na tri načina: porukom u panelu Messages, slanjem email-a ili SMS-a.

U okviru eksperimenta mehanizam limita je iskorišćen na virtualnom senzoru u cilju detekcije greške merenja geotehničkim senzorom. Kako je prethodno opisano, u slučaju detekcije greške virtualni senzor GeoT_EC dobija vrednost 10. Ova vrednost je veća od trećeg nivoa, te se u panelu Messages ispisuje upozorenje (Slika 76).



Slika 76: Upozorenje o prekoračenju trećeg nivoa limita za merenje virtualnim senzorom u panelu Messages. Time je signalizirano da je došlo do greške u merenju tiltmetrom.

Detekcija lažnih alarmnih stanja prouzrokovanih vrednostima merenja totalnom stanicom je takođe realizovana primenom virtualnih senzora. U slučaju da dođe do pojave lažnog alarma virtualni senzor Prism4_EC dobija vrednost 10, koja je veća od vrednosti limita trećeg nivoa za ovaj senzor i u panelu Messages se pojavljuje upozorenja (Slika 77).



Slika 77: Upozorenje o prekoračenju trećeg nivoa limita za merenje virtualnim senzorom u panelu Messages. Time je signalizirano da je došlo do greške u merenju na prizmi 4, prouzrokovane pomeranjem totalne stanice.

7 Zaključak

Sistemi za monitoring terena i objekata u realnom vremenu su sve zastupljeniji u praksi. I pored većih troškove u odnosu na klasične metode monitoring deformacija prednosti koje ovi sistemi dodnose su veoma značajne.

U okviru disertacije opisane su opšte karakteristike ovih sistema. Prikazani su detalji podsistema, sa posebnim akcentom na senzore. Takođe je dato poređenje konvencionalnih modela praćenja terena i objekata koje su podrazumevale periodično opažanje i savremene metodologije koja omogućava praćenje u realnom vremenu. Dat je prikaz najraširenijih softverskih rešenja u ovoj oblasti. Ispraćen je istorijski razvoj sistema za monitoring u realnom vremenu uz naglasak na značaj uvođenja novih tehnologija. Izvršena je približna klasifikacija sistema za monitoring prema primeni i u skladu sa klasifikacijom predstavljeni su savremeni primeri sistema koji su implementirani u praksi. Detaljno je predstavljena i tehnologija geosenzorskih mreža. Date su osnove tehnologije kao i standardi koji su usvojeni u okviru ove oblasti.

Razvijen je model geosenzorske mreže za monitoring terena i objekata. Model je prikazan na dva načina: korišćenjem formalnog opisa geosenzorske mreže i kao model implementacionog rešenja u vidu algoritma. Pri formiranju modela nastojalo se održati opštost, a uzete su obzir i činjenice iznete u okviru prethodnih poglavlja, kao što su namena, specifičnosti ovih sistema, njihova namena, specifičnosti tehnologija, očekivane karakteristike i performanse, kao i zajedničke osobine sistema implementiranih u praksi. Model je u praksi ispitan realizacijom eksperimenta u laboratorijskim uslovima. Formiran je sistem za monitoring deformacija kojim je izvršeno više serija merenja na fizičkom modelu klizišta. U okviru sistema korišćeni su geodetski i geotehnički senzori, sistem je konfigurisan tako da signalizira prekoračenja dozvoljenih vrednosti, a takođe je implementirano nekoliko procedura za detekciju grešaka i lažnih alarma.

U oblasti sistema za monitoring terena i objekata u realnom vremenu, postoje standardi i preporuke, međutim oni se odnose na pojedinačne tehnologije koje se uobičajeno koriste u ovim sistemima. Rad prezentovan u okviru disertacije je korak u pravcu standardizacije namenjene sistemima za monitoring u realnom vremenu, čime bi projektovanje i implementacija ovih sistema postao bolje uređen inženjerski zadatak.

Literatura

- [1] Acar, M., Ozludemir, M., T., Erol, S., Celik, R., N., Ayan, T. (2008) Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, pp. 213-221
- [2] Andersson, J. V., (2008): A Complete Model for Displacement Monitoring Based on Undifferenced GPS Observations, Ph.D. Thesis, Division of Geodesy, Geodesy Report No 1066, Royal Institute of Technology , Stockholm, Sweden.
- [3] Arnhardt, C., Asch, K., Azzam, R., Bill, R., Fernandez-Steeger, T., M., Homfeld, S., D., Kallash, A., Niemeyer, F., Ritter, H., Toloczyki, M. and Walter, K. (2007) Sensor based Landslide Early Warning System – SLEWS - Development of a geoservice infrastructure as basis for early warning systems for landslides by integration of real-time sensors. GEOTECHNOLOGIEN Science Report, vol. 10, pp. 75-88.
- [4] Ašanin, S., Božić, B., (2004): Dinamičko praćenje deformacionih struktura u realnom vremenu, *Vodoprivreda* 0350-0519, 36 (2004) 211-212 p. 377-384.
- [5] Baldi, P.; Cenni, N.; Fabris, M.; Zanutta, A. (2008). Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data. *Geomorphology* , 102.
- [6] Barla, G.; Antolini, F.; Barla, M.; Mensi, E.; Piovano, G. (2010). Monitoring of the Beauregard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques. *Engineering Geology*, 116.
- [7] Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G., Vetterli, M. (2008) The Hitchhiker's Guide to Successful Wireless Sensor Network Deployments. *Sensys '08 The 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, Raleigh, NC, USA, pp. 43-56
- [8] Botts, M., Percivall, G., Reed, C., Davidson, J., (2006): OGC White Paper – OGC Sensor Web Enablement: Overview and High Level Architecture, OGC 06-046r2, Wayland, MA, USA: OGC.
- [9] Božić, B. *Globalni sistem za pozicioniranje*, 2002, Viša građevinsko-geodetska škola, Beograd, Srbija
- [10] Bröring, A.; Echterhoff, J.; Jirka, S.; Simonis, I.; Everding, T.; Stasch, C.; Liang, S.; Lemmens, R. (2011) New Generation Sensor Web Enablement. *Sensors*, 11, pp. 2652-2699

- [11] Bruckl, E., Brunner, F., K., Kraus, K. (2006) Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology*, 88, pp. 149-159
- [12] Brunner, F., K. (2004) Fibre Optic Sensors: An Overview. *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom
- [13] Cardellini, S. (2011). The early warning system of Ancona for managing and reducing landslide risks. *Climate change adaptation and disaster risk reduction, making cities resilient*, Stockholm
- [14] Cardellini, S.; Osimani, P. (2008) Living with Landslide: The Ancona Case History and Early Warning System. *First World Landslide Forum, Tokio, Japan*
- [15] Caspary, W.F., (2000): Concepts of Network and Deformation Analysis, School of Geomatic Engineering, Monograph 11, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [16] Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R. (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 65, pp. 341-411.
- [17] Chae, M.J., Yoo, H.S., Kim, J.Y. and Cho, M.Y. (2012) Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring. *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 237-252.
- [18] Choudhury, M., Rizos, C., Harvey, B., (2009): A Survey of Techniques and Algorithms in Deformation Monitoring Applications and the Use of the Locata Technology for Such Applications, 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institution of Navigation, Savannah, Georgia, USA, 22-25 September, pages 668-678.
- [19] Coe, J., A., Ellis, W., L., Godt, J., W., Savage, W., Z., Savage, J., E., Michael, J., A., Kibler, J., D., Powers, P., S., Lidke, D., J., Debray, S. (2003) Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998 – March 2002. *Engineering Geology*, 68, pp. 67-101
- [20] Colesanti, C.; Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88.

- [21] Cook, D. (2006). Robotic Total Stations and Remote Data Capture :Challenges in Construction
- [22] Crescenti U., Calista M., Mangifesta M. & Sciarra N. (2004) The Ancona landslide of December 1982
- [23] Duffy, M., A., Hill, C., Whitaker, C., Chrzanowski, A., Lutes, J., Bastin, G. (2001) An Automated and Integrated Monitoring Program for Diamond Valley Lake in California. *The 10th International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California, USA, pp. K-1-K-23
- [24] Dudgeon, D., E. and Lacoss, R., T. (1993). An Overview of Automatic Target Recognition
- [25] El-Rabbany, A. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*, 2002, Artech House, Norwood, USA
- [26] Gili, J.; Corominas, J.; Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology* , 55.
- [27] Harvey, B.R., (2006): Practical Least Squares and Statistics for Land Surveyors, School of Surveying and Spatial Information Systems, Monograph 13, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [28] Hesse, C., Heer, R., Horst, S. and Neuner, H. (2006) A concept for monitoring wind energy turbines with geodetic techniques. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, Germany.
- [29] Heunecke, O., Welsch, W. (2000). Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp 35-44
- [30] <http://www.iitbhu.ac.in/faculty/min/rajesh-rai/NMEICT-Slope/Pdf/10%20Slope%20Instrumentation.pdf>
- [31] Honda, K., Shrestha, A., Witayangkurn, A., Chinnachodteeranun, R., Shimamura, H. (2009) Fieldservers and Sensor Service Grid as Real-time Monitoring Infrastructure for Ubiquitous Sensor Networks. *Sensors*, 9, pp. 2363-2370
- [32] Jirka, S., Remke, A., (2009): Monitoring the Environment with Sensor Web Services, EnviroInfo 2009 (Berlin), Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools.

- [33] Kaplan, E. D. *Understanding GPS: principles and applications - 2nd ed.*, 2006, Norwood, MA, USA: Artech House.
- [34] Kane, W., F., Beck, T., J. and Hughes. J., J. (2000). Applications Of Time Domain Reflectometry To Landslide And Slope Monitoring.
- [35] Kontogianni, V.A. and Stiros, S.C. (2005) Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring. *Engineering Geology*, vol. (79), pp. 115-126.
- [36] Kopáček, A., Lipták, I., Erdélyi, J. and Kyrinovič, P. (2017) Deformation monitoring of Danube bridges in Slovakia by integrated measurement system. FIG Working Week 2017, Helsinki, Finland.
- [37] Kurata, N., Spencer, B.F.J. and Ruiz-Sandoval, M. (2005) Risk monitoring of building with wireless sensor networks. *Structural control and health monitoring*, vol. 12, pp. 315-327.
- [38] Lawlor, A., Torres, J., O'Flynn, B., Wallace, J., Regan, F. (2012) DEPLOY: a long term deployment of a water quality sensor monitoring system. *Sensor Review*, 32/1, pp. 29-38
- [39] Lyttle, P., T. (2008) Landslide Hazard Activities in the United States. *First World Landslide Forum*, Tokio, Japan, pp. 373-375
- [40] Malet, J.-P.; Maquaire, O.; Calais, E. (2002). The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43.
- [41] Maneesha, R., V., Vasudevan, N. (2012) The deployment of deep-earth sensor probes for landslide detection. *Landslides*, 9, pp. 457-474
- [42] Mansour, M., F., Morgenstern, N., R., Martin, C., D. (2011) Expected Damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8, pp.117-131
- [43] Margottini, C. (2008) Prevention Policies for the Protection Against Hydrogeological Disasters in Italy. *First World Landslide Forum*, Tokio, Japan, pp. 393-396
- [44] Marković M., Bajić J., Vrtunski M., Ninkov T., Vasić D., Živanov M.: Application of fiber-optic curvature sensor in deformation measurement process, *Measurement*, 2016, Vol. 92, pp. 50-57, ISSN 0263-2241
- [45] Marui, H. (2008) Emergency Measures and Risk Management after Landslide Disasters Caused by the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake in Japan. *First World Landslide Forum*, Tokio, Japan, pp. 401-404

- [46] Massey, C., Nelis, S. (2008) Landslide Monitoring Data and Its Application to Risk Management, an Example from New Zealand. *First World Landslide Forum*, Tokio, Japan, pp. 409-412
- [47] McCarthy, J., D., Graniero, P., A., Rozic, S., M. (2008) An Integrated GIS-Expert System Framework for Live Hazard Monitoring and Detection. *Sensors*, 8, pp. 830-846
- [48] Mihailović, K., Aleksić, I. *Koncepti mreža u geodetskom premeru*, 2008, Geokarta, Beograd, Srbija
- [49] Miima, J., -B., Niemeier, W., Kraus, B. (2001) A Neural Network Approach to Modelling Geodetic Deformations. *First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS*, pp. 111-116
- [50] Mora, P., Baldi, P., Casula, G., Fabris, M., Ghirotti, M., Mazzini, E., Pesci, A. (2003) Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, 68, pp. 103-121
- [51] Observation and Measurements – Part 1 – Observation schema (2007) Open Geospatial Consortium Inc, OGC 07-022r1
- [52] O'Connor, E., Smeaton, A., F., O'Connor, N., E., Regan, F. (2012) A Neural Network Approach to Smarter Sensor Networks for Water Quality Monitoring. *Sensors*, 12, pp. 4605-4632
- [53] OGC Sensor Observation Service Interface Standard (2012) Open Geospatial Consortium, OGC 12-006
- [54] OGC Sensor Web Enablement Architecture (2008) Open Geospatial Consortium Inc, OGC 06-021r4
- [55] OGC Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture (2007) Open Geospatial Consortium Inc, OGC 07-165
- [56] OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification (2005) Open Geospatial Consortium Inc, OGC 05-086
- [57] OpenGIS Sensor Observation Service Implementation Specification (2006) Open Geospatial Consortium Inc, OGC 06-009r1

- [58] Perović, G. *Least squares*, 2005, University of Belgrade, Faculty of civil engineering, Belgrade, Serbia
- [59] Puglisi, G., Bonaccorso, A., Mattia, M., Aloisi, M., Bonforte, A., Campisi, O., Cantarero, M., Falzone, G., Puglisi, B. and Rossi, M. (2005) New integrated geodetic monitoring system at Stromboli volcano (Italy). *Engineering Geology*, vol. 79, pp.13-31.
- [60] Reid, M., E., LaHausen R., G., Baum, R., L., Kean, J., W., Schulz, W., H., Highland, L., M. (2012) Real-Time Monitoring of Landslides, USGS Fact Sheet 2012-3008
- [61] Reid, M., E., LaHausen R., Ellis, W., L. (2000) Real-Time Monitoring of Active Landslides, USGS Fact Sheet 091-99
- [62] Ristić, A.; Abolmasov, B.; Govedarica, M; Petrovački, D.; Ristić, A. (2012) Shallow-landslide spatial structure interpretation using a multi-geophysical approach. *Acta Geotechnica Slovenica*, 9, 1.
- [63] Ristić A., Bugarinović Ž., Vrtunski M., Govedarica M. (2017) Point coordinates extraction from localized hyperbolic reflections in GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 144, pp. 1-17, ISSN 0926-9851
- [64] Ristić A., Bugarinović Ž., Vrtunski M., Govedarica M., Petrovački D. (2017) Integration of modern remote sensing technologies for faster utility mapping and data extraction. *Construction and Building Materials*, Vol. 154, No. 9, pp. 1183-1198, ISSN 0950-0618(02)00045-4
- [65] Rutledge, D., Gnipp, J., Kramer, J. (2001) Advances in Real-time GPS Deformation Monitoring for Landslides, Volcanoes, and Structures. *The 10th International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California, USA, pp. 110-121
- [66] SAR (http://topex.ucsd.edu/WWW_html/sar.html, <http://www.answers.com/topic/synthetic-aperture-radar?cat=technology>)
- [67] Savvaidis, P. D. (2003). Existing Landslide Monitoring Systems and Techniques. In *From Stars to Earth and Culture*.
- [68] Scaioni, M. and Wang, J. (2016) Technologies for Dam Deformation Measurement: Recent Trends and Future Challenges. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Vienna, Austria.

- [69] Setan, H., Som, Z.A.M., Idris, K.M., (2003): Deformation detection of lightweight concrete block using geodetic and non-geodetic methods, *11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 25-28 May.
- [70] Sippel, K., (2001): Modern Monitoring System Software Development, Session III: Software for deformation data collection, processing, and analysis, *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California, USA, pp. 88-100
- [71] Sladić, D., Vrtunski, M., Alargić, I., Ristić, A., Petrovački, D. (2012) Razvoj geoportala za monitoring klizišta. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, 92, 4, pp. 63-78.
- [72] Thuro, K., Singer, J. and Festl, J. (2013) A Geosensor Network Based Monitoring and Early Warning System for Landslides. *in Landslides Science and Practice*, vol. 2 (Margottini, C. et al., eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 79-86.
- [73] Tu, R., Zhang, P., Zhang, R. and Liu, J. (2016) The study of key issues about integration of GNSS and strong-motion records for real-time earthquake monitoring. *Advances in Space Research*, vol. 58, pp. 304-309.
- [74] Tuno, N., Kogoj, D. (2012). Prošlost, sadašnjost i budućnost preciznih optičkih nivelira
- [75] Vračarić, K., Aleksić, I. *Praktična geodezija*, 2007, Geokarta, Beograd, Srbija
- [76] Welsch, W., M., Huenecke, O. (2001) Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations. *The 10th International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California, USA, pp. 390-412
- [77] Wong, K.Y. (2004) Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. *Structural control and health monitoring*, vol. 11, pp. 91-124
- [78] Zhou, P., Zhou, B., Guo, J., Li, D., Ding, Z., Feng, Y. (2005) A Demonstrative GPS-aided Automatic Landslide Monitoring System in Sichuan Province. *Journal of Global Positioning Systems*, 4, 1-2, pp. 184-191