

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Hornicko – geologická fakulta
Institut geodézie a důlního měřictví

MĚŘENÍ ÚHLŮ , SMĚRŮ A REKTIFIKACE

učební texty

Autor :Ing. Dana Sládková

OBSAH

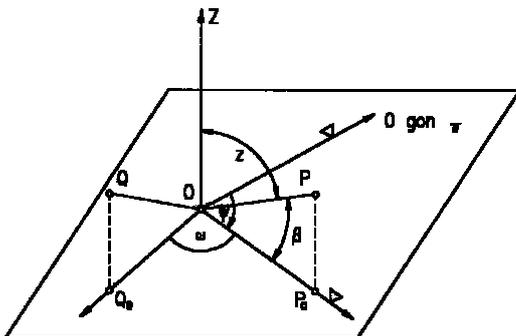
1. SMĚR V PROSTORU A JEHO SLOŽKY	3
1.1 SMĚR VODOROVNÝ	3
1.1.1. <i>Libely</i>	4
1.1.2. <i>Sklonový senzor</i>	6
1.2 SMĚR SVISLÝ	7
1.2.1. <i>Závěsná olovnice</i>	7
1.2.2. <i>Dostřed'ovací tyč</i>	8
1.2.3. <i>Optická centrace</i>	8
1.2.4. <i>Optický provažovač</i>	8
2. TEODOLITY	9
2.1. ZÁKLADNÍ ČÁSTI TEODOLITŮ	9
2.2. CENTRACE A HORIZONTACE TEODOLITU	11
2.3. HLAVNÍ OSY TEODOLITU, OSOVÉ PODMÍNKY A REKTIFIKACE	11
2.4. TEODOLITY S KOVOVÝMI KRUHY	12
2.5. TEODOLITY SE SKLENĚNÝMI KRUHY	12
2.6. ELEKTRONICKÉ TEODOLITY	12
2.7. NĚKTERÉ DRUHY A TYPY TEODOLITŮ	13
3. MĚŘENÍ VODOROVNÝCH ÚHLŮ	13
3.1. JEDNODUCHÉ MĚŘENÍ ÚHLŮ	13
3.2. MĚŘENÍ ÚHLŮ V ŘADÁCH A SKUPINÁCH	14
3.3. MĚŘENÍ ÚHLŮ NÁSOBENÍM	14
3.4. CHYBY PŘI MĚŘENÍ VODOROVNÝCH ÚHLŮ A SMĚRŮ	14
3.4.1. <i>Chyby strojové</i>	14
3.4.2. <i>Chyby měřické</i>	15
3.4.3. <i>Chyby z prostředí</i>	15
3.4.4. <i>Přesnost měření vodorovných směrů a úhlů</i>	15
4. MĚŘENÍ ZENITOVÝCH (SVISLÝCH) ÚHLŮ	16
4.1. METODY MĚŘENÍ ZENITOVÝCH ÚHLŮ	17
4.2. CHYBY ZENITOVÝCH (SVISLÝCH) ÚHLŮ	17
4.3. GYROTEODOLITY	17
4.3.1. <i>Princip činnosti gyroskopů (setrvačníků)</i>	17
4.3.2. <i>Měření azimutů</i>	18
4.3.3. <i>Výpočet a přesnost azimutů</i>	18
6. ÚHLOMĚRNÉ POMŮCKY	19

Měření směrů a úhlů

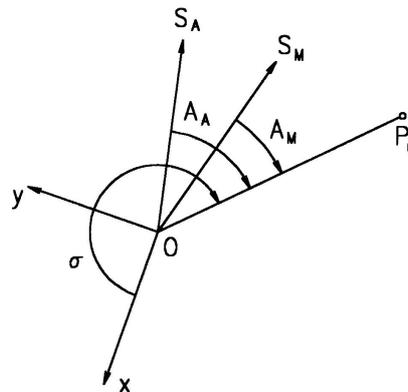
Směry a úhly patří v geodézii k základním určujícím prvkům, pomocí kterých určujeme polohu bodu v prostoru, nebo pomocí kterých provádíme jejich vytyčení. Úhly měříme ve vodorovné rovině a potom jsou to úhly vodorovné, nebo ve svislé rovině a pak to mohou být úhly výškové, hloubkové nebo zenitní. Úhly a směry měříme speciálními přístroji, z nichž nejpoužívanější jsou teodolity.

1. Směr v prostoru a jeho složky

Prostorová poloha směru vycházejícího z počátku soustavy O na bod P v prostoru (viz obr. 1.1) je stanovena dvěma úhlovými složkami – vodorovným (horizontálním) úhlem ψ a svislým (vertikálním) úhlem β , nebo zenitovým úhlem z , ležícími ve vertikální rovině (Z, O, P_0P) . Vodorovný úhel ω svírají vertikální roviny procházející body OP_0 (levé rameno úhlu) a body OQ_0 (pravé rameno úhlu). Spojnice OP_0 a OQ_0 jsou vodorovnými průměty prostorových směrů OP a OQ . Leží-li levé rameno úhlu ψ v kladném směru osy x rovinného souřadnicového systému x, y stává se vodorovný úhel ω směrníkem σ . Je-li levé rameno úhlu ψ totožné se severním směrem zeměpisného poledníku nebo se severním směrem magnetického poledníku, nazývá se úhel ω astronomickým azimutem A_A anebo magnetickým azimutem A_M (viz obr. 1.2). Směrník σ a azimuty A_A a A_M jsou tzv. orientované úhly a běžně se v geodézii používají.



Obr. 1.1 Prostorová poloha směru



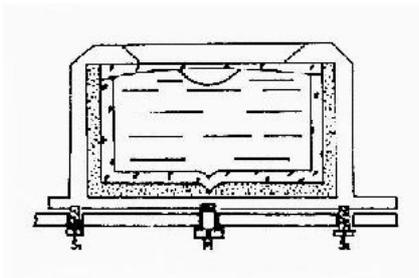
Obr. 1.2 Orientované úhly

Svislý (vertikální úhel β svírá prostorový směr OP s jeho vodorovným průmětem OP_0 . V geodézii se často používá zenitový úhel z , který svírá směr OP se svislým směrem, procházejícím zenitem Z (viz obr. 1.1). Výhodou zenitového úhlu je skutečnost, že nabývá na rozdíl od svislého úhlu β jen kladné velikosti od 0 gon do 200 gon.

1.1 Směr vodorovný

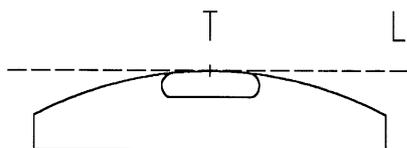
Vodorovný směr a vodorovná rovina se vytyčuje zpravidla libelami a sklonovými senzory, které umožňují s potřebnou přesností urovnat všechny základní geodetické přístroje a pomůcky.

1.1.1. Libely

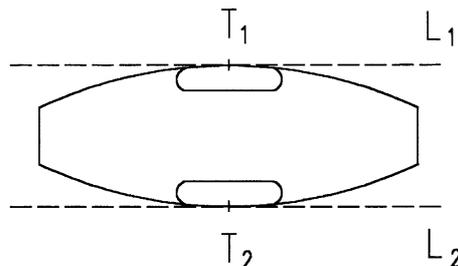


Libely rozeznáváme krabicové (viz.obr.1.3) a trubicové. Trubicové libely dělíme dále na jednoosé (viz.obr.1.4) a dvouosé - reverzní (viz obr.1.5).

Obr. 1.3 Krabicová libela

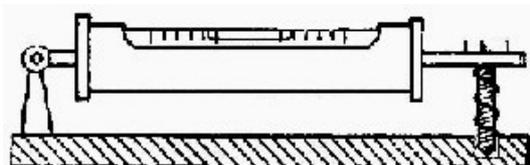


Obr. 1.4 Trubicová jednoosá libela

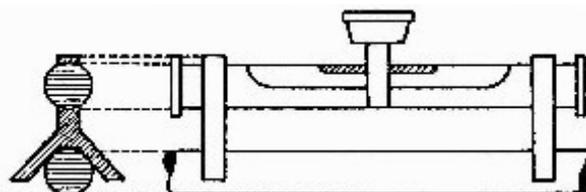


Obr. 1.5 Trubicová dvouosá libela

Trubicové libely se vyrábí jednak samostatné a nebo pevně umístěné na přístrojích. K samostatným libelám patří např. libela stolová (viz obr.1.6) nebo libela sázecí (viz. obr. 1.7). Patří zde např. libela indexová, alhidádová, nivelační



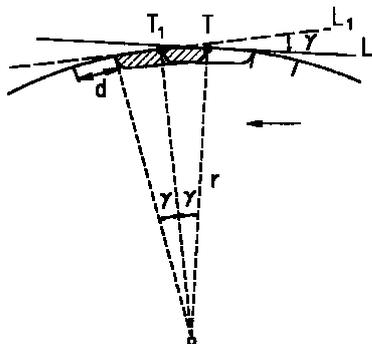
Obr. 1.6 Stolová libela



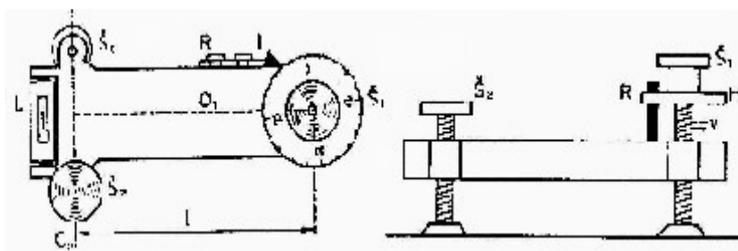
Obr. 1.7 Sázecí libela

Parametry libel

Každá libela je charakterizovaná citlivostí, přesností a pohyblivostí. Citlivost libely je dána výrazem $\gamma = \rho d / r$ (viz obr. 1.8). K určení citlivosti se používá rektifikačního pravítka (viz obr. 1.9).



Obr. 1.8 Citlivost libely



Obr. 1.9 Schéma rektifikačního pravítka

Rektifikační pravítka se skládá z kovového pravítka l o délce např. 30 cm. Na jedné straně je uchyceno mikrometrickým šroubem \check{S}_1 a na druhé straně stavěcími šrouby \check{S}_2, \check{S}_3 . K příčnému urovňání pravítka slouží libela L . Pohybem mikrometrického šroubu lze naklánět pravítka kolem osy O_2 . Hlavice mikrometrického šroubu je dělena na 100 dílků. K dělené hlavici je přiřazena svislá dělená stupnice R . Jeden dílek této stupnice odpovídá jedné otočce mikrometrického šroubu. Při známé délce pravítka l a výšce v odpovídající jedné otočce šroubu je možno určit hodnotu náklonu pravítka odpovídající jedné otočce šroubu.

Libela, jejíž citlivost se určuje, se položí na rektifikační pravítka a urovná se. Pak se libela naklání pomocí mikrometrického šroubu do obou krajních poloh stupnice. V obou případech se čtou údaje v_1, v_2 na mikrometrickém šroubu \check{S}_1 .

Úhel náklonu libely odpovídá rozdílu $\Delta v = v_2 - v_1$.

Citlivost zkoušené libely se vypočte ze vztahu $\gamma = \rho \Delta v / l n$, kde n je počet dílků stupnice mezi krajními polohami.

Přesnost libely je definována nejmenším úhlem, který je možno s libelou ještě určit. Přesnost libely je závislá na citlivosti libely a způsobu jakým libelu urovnáváme. Pokud se zařazuje bublina do středu libely přímým pozorováním (prostým okem) dá se poloha bubliny odhadnout s přesností na 1/5 dílku. Ke zvýšení přesnosti urovňání se používá koincidenčních libel. U těchto libel se pomocí hranolové soustavy převádí obraz konců bubliny vedle sebe (koincidenční čtení). Koincidenční libely se často používají k urovňání indexů výškového kruhu u teodolitů se skleněnými kruhy a záměr u libelových nivelačních přístrojů.

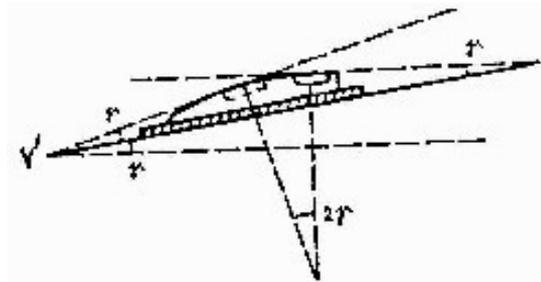
Pohyblivost libely se rozumí minimální úhel o který je třeba naklonit libelu, abychom zaznamenali změnu v poloze bubliny.

Kontrola a rektifikace libel

Základní podmínkou u samostatných libel je, aby osa libely byla rovnoběžná s podložkou. Ke kontrole se položí libela na rektifikační pravítka a pomocí mikrometrického šroubu se urovná. Pak se libela přesadí o $2R$. Je-li libela rektifikovaná zůstane bublina ve stejné poloze. U nerektifikované libely svírá osa libely s rovinou podložky malý úhel γ (viz obr.1.10), takže po přesazení libely se bublina vychýlí o úhel 2γ (viz. obr.1.11).



Obr. 1.10 Výchylka nerektifikované libely



Obr. 1.11 Výchylka 2γ po přesazení

Oprava se provede tak, že polovinu odchylky odstraníme rektifikačními šroubky libely a druhou polovinu mikrometrickým šroubem pravítka. Postup opakujeme pokud není uvedena podmínka splněna. Kontrola libel pevně spojených s přístrojem se děje obdobně. Například alhidádová libela se urovná nad dvěma stavěcími šrouby a potom nad třetím stavěcím šroubem. V této poloze otočíme alhidádou o přímý úhel. Při vychýlení bubliny se polovina odstraní rektifikačními šroubky libely a druhá polovina třetím stavěcím šroubem.

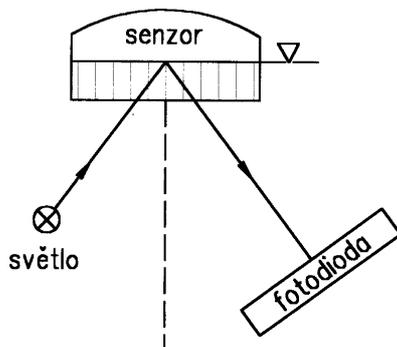
1.1.2. Sklonový senzor

Sklonový senzor najdeme u současných elektronických teodolitů. Sklonový senzor dovoluje během měření sledovat odchylky alhidádové (vertikální) osy a točné (horizontální) osy od správné polohy. Všechny měřené vodorovné směry a zenitové úhly se automaticky opravují o vliv odchylky alhidádové osy v závislosti na úhlu, který svírají vertikální roviny proložené záměrou a odchýlenou alhidádovou osou a na zenitovém úhlu.

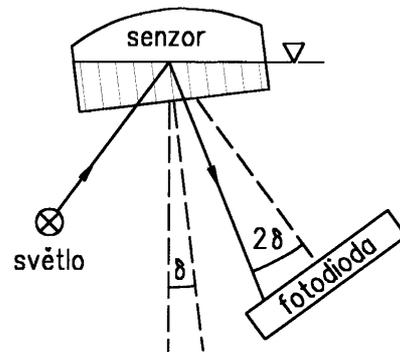
Sklonové senzory jsou buď kyvadlové nebo kapalinové. Kyvadlový senzor bývá často použit u některých teodolitů se skleněnými kruhy k urovnání čtecích indexů u vertikálních kruhů. Kapalinový senzor je zpravidla součástí elektronických teodolitů.

Princip činnosti kapalinových senzorů je uveden schematicky na obr.1.12 a obr.1.13. Od povrchu kapaliny, který v nádobce zaujímá vždy vodorovnou polohu, se odrazí světelný signál přiváděný pevným optickým systémem. Je-li sklonový senzor rektifikován a alhidádová osa je totožná se směrem tížnice, dopadá odražený signál přesně na rozhraní kvadrantové fotodiody (viz obr.1.12). V každém kvadrantu je osvětlena stejná plocha a tak vzniká i stejná intenzita vzniklých fotoproudů I_1 až I_4 (viz obr.1.14).

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$



Obr. 1.12 Urovnaný senzor

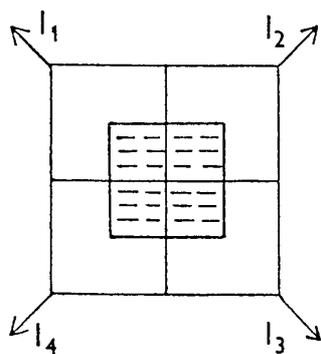


Obr. 1.13 Skloněný senzor

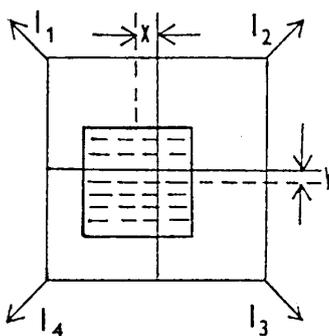
Při odklonu δ alhidádové osy ve směru tížnice se o stejný úhel skloní i kapalinový senzor (viz obr.1.13). Pouze povrch kapaliny zaujímá nadále vodorovnou polohu a tím se odražený světelný signál odchýlí o dvojnásobnou úhlovou odchylku 2δ . Světelný signál dopadá na kvadranty fotodiody nesymetricky (viz obr.1.15). Z nesejných intenzit fotoproudů I_1 až I_4 lze vypočítat lineární posuny středu světelného signálu ve dvou směrech k sobě kolmých, z nichž jeden se volí ve směru točné osy dalekohledu

$$x = k_1 \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \equiv k_1 \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4}, \quad y = k_2 \frac{I_1 - I_4}{I_1 + I_4} \equiv k_2 \frac{I_2 - I_3}{I_2 + I_3}$$

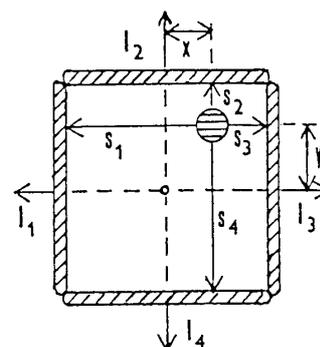
V rovnicích značí k_1 , k_2 konstanty úměrnosti. Hodnoty x, y odpovídají složkám odchylky alhidádové osy a z nich se automaticky vypočítají opravy měřených směrů a úhlů.



Obr.1.14 Světelná stopa při urovnaném senzoru



Obr.1.15 Světelná stopa při skloněném senzoru



Obr.1.16 Speciální fotodioda

Pokud by světelná stopa dopadala jen na plochu jednoho kvadrantu fotodiody, nemůže být stanoven sklon alhidádové osy. Tuto nevýhodu odstraňuje speciální fotodioda. Sestává z plošné diody s přidavnou odporovou rovinou (viz obr.1.16). Vyrobený fotoproud je v odporové rovině veden ke čtyřem postranním elektrodám. Intenzity fotoproudů I_1 až I_4 jsou nepřímo úměrné drahám s_1 až s_4 v odporové rovině. Reciproké hodnoty intenzit fotoproudů jsou mírou vzdáleností s_1 až s_4 , takže délky x, y od středu odporové roviny definují velikost úhlové odchylky alhidádové osy

$$x = \frac{1}{2}(s_1 - s_3) \quad y = \frac{1}{2}(s_2 - s_4)$$

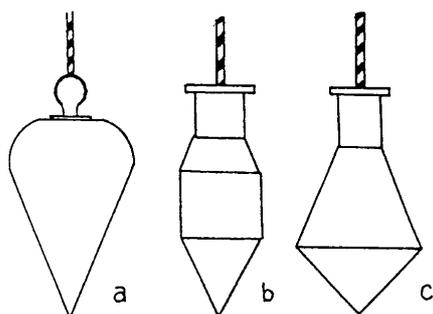
S oběma typy plošných diod se dosahuje přesnosti automatického určení úhlové odchylky alhidádové osy až na 0,1 mgon.

1.2 Směr svislý

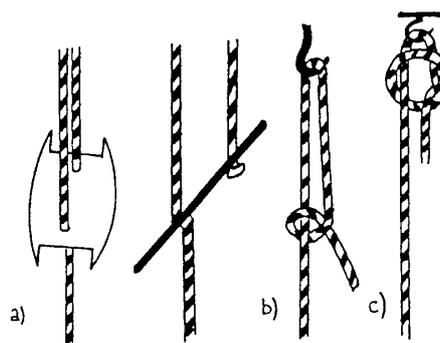
K určování a zjišťování svislého směru (tížnice) se používají olovnice. Olovnice můžeme rozdělit na : olovnice závěsné, dostředovací tyče a olovnice optické.

1.2.1. Závěsná olovnice

Tato olovnice se skládá ze závaží, které má tvar rotačního tělesa a tenkého závěsu (provázku) (viz obr.1.17). Pro běžné práce v geodézii se používá olovnice o hmotnosti 100 až 250 g. Pro provažování v důlních dílech i několik desítek kilogramů.



Obr. 1.17 Tvary závěsných olovnic



Obr. 1.18 Úprava závěsů olovnic

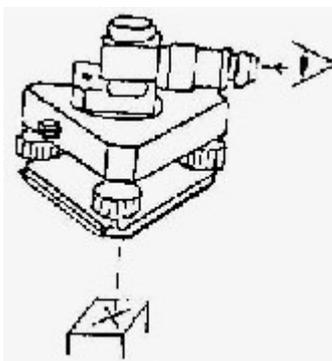
Při centraci přístrojů je nutné měnit délku závěsu. Měníme ji pomocí průvlečky (viz obr.1.18 a), jednoduchého uzlu (viz.obr.1.18 b), pomocí geodetického uzlu (viz obr.1.18 c). Přesnost centrace se uvádí hodnotou 5 až 10 mm při délce závěsu 1,5 m a dobrých meteorologických podmínkách (bezvětrí).

1.2.2. Dostřed'ovací tyč

Skládá se ze dvou teleskopicky zasouvacích částí , z nichž vnitřní je opatřena dělenou stupnicí, která umožňuje určit výšku hlavy stativu nebo přímo klopné osy teodolitu nad stabilizačním bodem. Vnější část tyče je opatřena krabicovou libelou. Přesnost centrace se uvádí hodnotou 5 až 10 mm.

1.2.3. Optická centrace

Optická olovnice je v podstatě optickou osou pod pravým nebo je zabudovaná do umísťuje do třínožky a urovnává na centračním zařízení (viz centrovat na body umístěné pod optické centrace je 0,5 až 1,0 zabudována v je-jich třínožkách. také optický centrovač vlastní elektronických tachymetrů používají k centraci



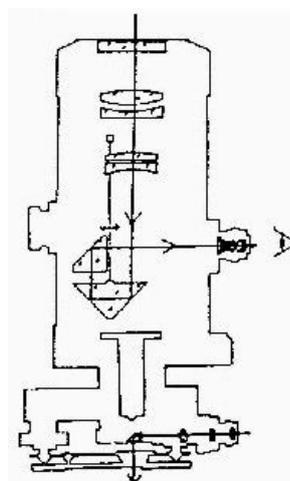
Obr. 1.19 Optický centrovač

malý dalekohled se zalomenou úhlem. Vyrábí se jako samostatná geodetických přístrojů. Samostatná se se pomocí křížových libel, umístěných obr.1.19) Optickou olovnici můžeme přístrojem i nad přístrojem. Přesnost mm. U teodolitů je optická olovnice Optickou olovnici, která je nazývána také většina současně vyráběných tachymetrů. Některé typy těchto laserového světla.

1.2.4. Optický provažovač

Při speciálních pracích je někdy nutné vytyčit který je stabilizován. Na vytyčené svislici se vyhledají a vytyčí další geodetické body. Jedná se o do různých výškových horizontů. Svislici lze pomocí olovnice s velkou hmotností závaží nebo provažovače (viz obr.1.20). Tyto se umísťují na nosiče. Mají krátké dalekohledy jejichž optické osy pravým úhlem a jsou opatřeny záměrným urovnání přístroje pomocí libel nebo při záměry kompenzátořem realizuje záměrný paprsek

Polohová přesnost vytyčení se uvádí hodnotou přístrojů bývají 100 až 150 m. U nás jsou nejvíce provažovače ZENITLOT PZL 100.



Obr.1.20 Optický provažovač

svislici nad bodem, v různých výškách přenesení polohy bodu realizovat mechanicky pomocí optického stativy nebo speciální jsou zalomeny pod obrazcem. Při přesném samočinném urovnání svislici. 0,5 až 1,0 mm. dosahy rozšířeny optické

2. Teodolity

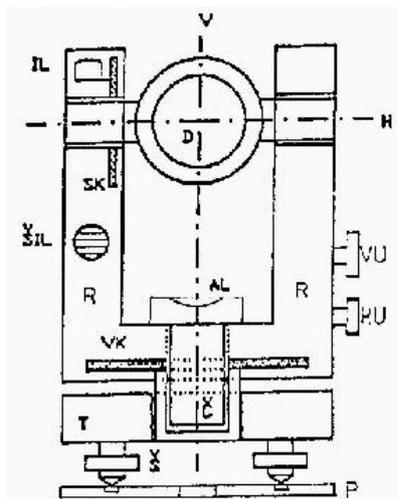
Z hlediska vývoje se rozlišují teodolity s kovovými kruhy, teodolity se skleněnými kruhy (repetiční, s limbem na postrk) a teodolity elektronické.

Podle přesnosti se dělí na technické (minutové) používané pro běžné práce, možnost čtení na $0,01^{\text{gon}}$, přesné (vteřinové) užívané při budování bodových polí pro podrobná měření, možnost čtení na $0,2 \text{ mgon}$, velmi přesné (triangulační) užívané při některých pracích v inženýrské geodézii a k budování přesných úhlových sítí, s přesností čtení kolem $0,05 \text{ mgon}$.

2.1. Základní části teodolitů

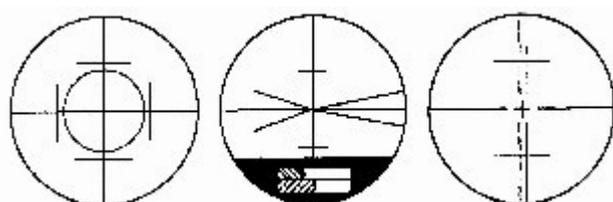
Teodolit se skládá ze tří základních částí (viz obr.2.1) *alhidády*, *limbu* a *třínožky*.

- **Alhidáda** je horní část přístroje, která je ukončena čepem Č zapadajícím do pouzdra válce umožňující její otáčení kolem svislé (vertikální) točné osy V. Na alhidádě jsou umístěna ramena alhidády s ložisky do kterých je uložena osa dalekohledu zvaná klopná (horizontální) osa dalekohledu H. Okolo ní se otáčí dalekohled ve svislé rovině, což umožňuje měřit teodolitem ve dvou polohách dalekohledu. V první poloze dalekohledu se nachází svislý kruh SK vlevo od okuláru (ve druhé poloze je vpravo) dalekohledu. Oba dva pohyby umožňují nastavit záměrnou přímku dalekohledu do libovolného směru v prostoru.

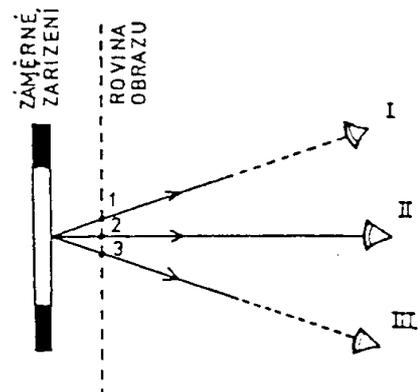


Obr.2.1 Schéma teodolitu

Dalekohled D slouží k mnohonásobnému zvětšení obrazu předmětu a ke spolehlivému nastavení na cíl. Ke geodetickým účelům se používá dalekohled *astronomický* (Keplerův). Základními částmi dalekohledu je objektiv, okulár a záměrný obrazec. K pozorování obrazu vytvořeného objektivem slouží *okulár*, který má podobnou funkci jako lupa. K zacílení dalekohledu na požadovaný směr slouží *záměrný obrazec* (viz obr.2.2). K tomu, aby bylo při měření dosaženo kvalitních výsledků je nutné, aby byly obraz cíle i rysek záměrného obrazce zaostřeny. Při správném zaostření cíle a rysek záměrného obrazce musí být totožná předmětová rovina okuláru s rovinou v níž je umístěn záměrný obrazec. Jinak vzniká tzv. *paralaxa záměrného obrazce* (viz obr.2.3). O paralaxe se přesvědčíme tím, že jemně pohybujeme okem za okulárem v některém směru. V případě, že nejsou obě roviny totožné, pohybuje se obraz záměrných rysek po obraze cíle. Pak je nutné zaostření opravit, aby nevznikla velká chyba v měřených směrech. Kvalita dalekohledu pro různé měřické úkony se posuzuje podle zvětšení dalekohledu, zorného pole, světelnosti a rozlišovací schopnosti dalekohledu.



Obr.2.2 Záměrné obrazce



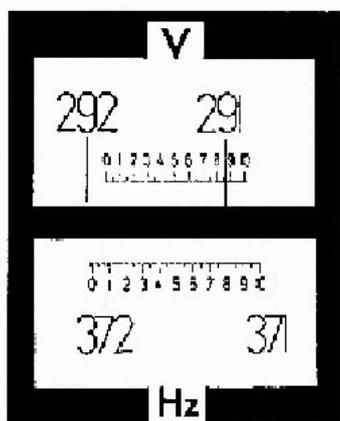
Obr.2.3 Paralaxa

Vodorovný kruh VK je při měření nepohyblivý, svislý kruh SK, který je pevně spojen s klopnou osou dalekohledu se otáčí současně s dalekohledem kolem klopné osy H.

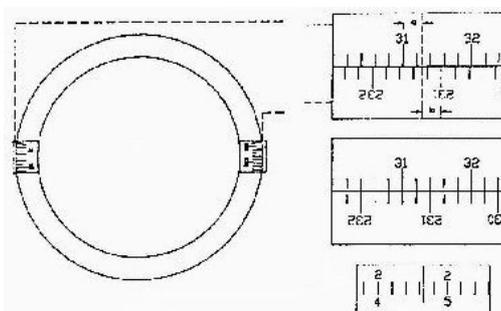
Alhidádová (trubicová) libela AL je umístěna mezi rameny alhidády. Tato libela slouží k urovnání osy alhidády do svislice. Urovnání libely se děje pomocí stavěcích šroubů třínožky. Na alhidádě je umístěna i krabicová libela, pomocí níž se urovná přístroj jen přibližně. Pak následuje přesné urovnání pomocí alhidádové libely.

Indexová libela IL je upevněna ve vodorovné poloze na spojnicí protilehlých čtecích indexů na rameni alhidády (u starších teodolitů). Indexy slouží ke čtení svislých úhlů na svislém kruhu. Indexová libela se urovnává pomocí indexového šroubu ŠIL, umístěného na rameni alhidády a slouží k přesnému urovnání indexů do vodorovné polohy. U teodolitů se skleněnými kruhy vyráběných v posledních desetiletích se k urovnání čtecích indexů používá automatických optických kompenzátorů. Kompenzátor sestává ze zavěšeného jednoho nebo několika speciálních hranolů umístěných v rameni alhidády. Kompenzátor urovnává optickou cestou vodorovnou polohu indexů v rozmezí několika desítek miligonů.

Čtecí pomůcky a zařízení. Velikosti měřených úhlů se určují na dělených stupnicích kruhu. Ke čtení úhlů v minutách nebo ve vteřinách slouží mikroskop. U starých teodolitů s kovovými kruhy se ke čtení horizontálních a vertikálních úhlů užívaly verniery. U teodolitů se skleněnými kruhy se ke čtení úhlů používají optické mikrometry – *mřížkový mikroskop*, čtení je zřetelné na obr.2.4 (bez optického mikroskopu), s *jednou planparalelní destičkou* (jednoduchý optický mikrometr), a *koincidenční čtení* - na obr.2.5 je znázorněno koincidenční čtení (se dvěma planparalelními destičkami).

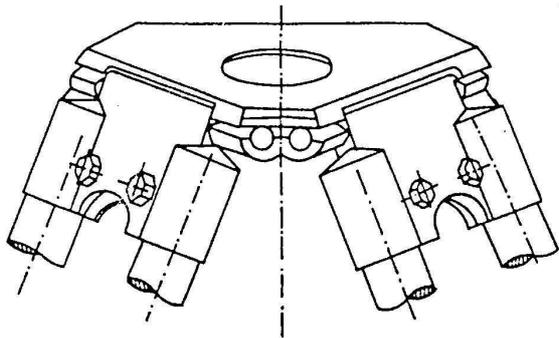


Obr.2.4 Čtení na mřížkovém mikroskopu

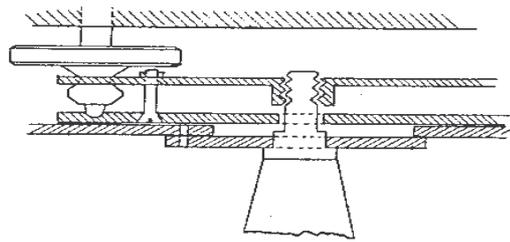


Obr.2.5 Koincidenční čtení

- **Limbus** je spodní část přístroje, která je při měření pevná. Tvoří ji především vodorovný kruh.
- **Ustanovky** umožňují spojení a nebo vzájemné pootočení pevné a pohyblivé části přístroje (třínožky a alhidády). Ustanovky rozlišujeme jemnou a hrubou. Na teodolitech se vyskytují dva páry ustanovek, horizontální a vertikální. Ustanovky mohou být na přístrojích umístěny samostatně nebo koaxiálně (souose).
- **Třínožka** spojuje teodolit se stativem. Je opatřena třemi stavěcími šrouby, které slouží k horizontaci (urovnání) přístroje. V třínožce je upevněn měřicí přístroj. Přístroj se staví ve většině případů na stativ (viz obr.2.6). V jiných případech se přístroj umísťuje na observační pilíře, konzoly nebo na speciální třínožky. Stativ se skládá z hlavy stativu a tří noh. Přístroj je se stativem spojen středovým přichytným šroubem (viz. obr.2.7).



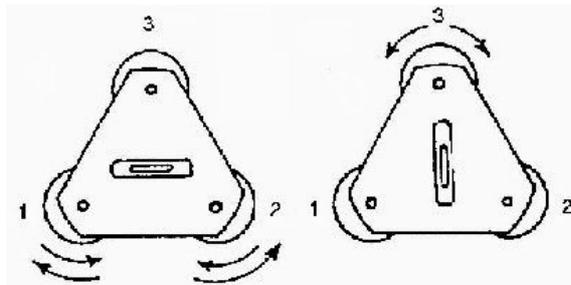
Obr.2.6 Horní část stativ



Obr.2.7 Přichytný šroub

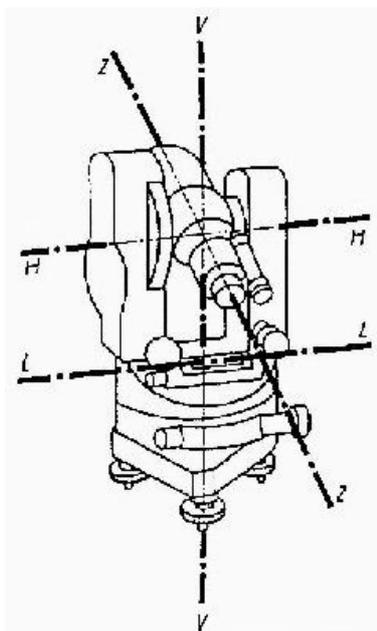
2.2. Centrace a horizontace teodolitu

Při měření směrů a úhlů je třeba teodolit přesně centrovat nad vyznačeným místem na stabilizačním znaku a urovnat jej. Příprava teodolitu před měřením se dělí na centraci (dostředění přístroje), horizontaci nebo-li urovnání (viz obr.2.8) a na zaostření dalekohledu.



Obr.2.8 Schéma horizontace

2.3. Hlavní osy teodolitu, osově podmínky a rektifikace



Obr. 2.9 Osy teodolitu

Pro měřické práce je nutné používat rektifikovaného teodolitu, čímž se rozumí splnění geometrických podmínek vzájemné polohy hlavních os. Základními osami teodolitu (viz.obr.2.9) jsou :osa alhidády V (vertikální osa dalekohledu), klopná osa dalekohledu H , osa alhidádové libely L a záměrná osa dalekohledu Z .

U rektifikovaného teodolitu musí osy splňovat tyto podmínky:
 $V \perp L$, $H \perp V$, $Z \perp H$

a) $V \perp L$ V případě nedodržení této podmínky (bublina trubicové alhidádové libely se vychýlí) je nutné libelu rektifikovat. Polovina výchylky se odstraní oběma stavěcími šrouby a druhá polovina svislými rektifikačními šroubky libely. Postup se opakuje, až bublina zůstane ve středu libely v obou kolmých polohách.

b) $H \perp V$. Vliv této chyby se vyloučí měřením ve dvou polohách dalekohledu.

c) $Z \perp H$. V případě nesplnění této podmínky má přístroj tzv. kolimační chybu . Malou kolimační chybu vyloučíme měření v obou polohách dalekohledu. V případě že chyba je větší, odstraní se pomocí posunu objímky záměrného obrazce. Avšak tato práce vyžaduje odborníka na toto specializovaného.

K dalším zkouškám ověřování teodolitu patří *zkouška svislého kruhu*. Součet čtení v první a ve druhé poloze dalekohledu musí být roven násobku $2R$. Má-li být tato podmínka splněna musí být čtecí indexy ve vodorovné poloze. Vodorovnost indexů nám zaručuje indexová libela (indexová libela), umístěná na rameni indexů, nebo kompenzátor. Pokud podmínka vodorovnosti není splněna má přístroj indexovou chybu. Chybu vyloučíme měřením ve dvou polohách dalekohledu.

2.4. Teodolity s kovovými kruhy

V dnešní době se jedná již o historické teodolity. Dělí se na jednoosé a dvojosé. U jednoosých teodolitů je limbus spojen pevně s třínožkou. U těchto teodolitů se nedá přesně nastavit nulové čtení na počáteční směr.

Dvojosé teodolity mají buď německou úpravu nebo francouzskou. Německá úprava (Reichenbachova) má uspořádání hlavních částí následující : třínožka, limbus a alhidáda. Vlivem tohoto uspořádání může docházet ke strhávání kruhu. U francouzské úpravy jsou hlavní části sestaveny v pořadí limbus, třínožka a alhidáda. Toto uspořádání zamezuje strhávání kruhu při měření. U dvojosých teodolitů je možno nastavit nulu na počáteční směr.

2.5. Teodolity se skleněnými kruhy

Rozlišují se dva typy teodolitů a to s repetiční svorou a s posuvným kruhem (limbem na postrk).

a) Teodolity s repetiční svorou se používají u teodolitů minutových. V případě sepnutí svory se pevně spojí alhidáda s kruhem a po rozepnutí svory zůstává kruh nehybný. U teodolitů s repetiční svorou je možno nastavit požadované čtení na počáteční směr. Alhidádou se otáčí tak dlouho až se ztotožní nula hlavní stupnice s nulou čtecího zařízení na alhidádě. Potom se repetiční svora sepne a zacílí na požadovaný směr. Po zacílení se svora rozepne a měření může začít.

b) Teodolity s limbem na postrk . U těchto teodolitů je otáčení vodorovného kruhu nezávislé na poloze alhidády a počáteční čtení lze nastavit jen přibližně. Nejprve se zacílí na cíl a pomocí pastorku se otáčí kruhem tak dlouho až se nastaví přibližně požadovaná hodnota. Pastorek je chráněn krytkou nebo páčkou s pružinkou. K teodolitům s limbem na postrk patří vteřinové např. Theo 010 A.

2.6. Elektronické teodolity

První významnou cestou konstrukce elektronických teodolitů bylo požití kódových kruhů. Začaly se rozvíjet i další způsoby elektronického čtení úhlů. Patří k nim zejména metoda inkrementální (impulsová), indukční, interferenční a časoměrná. Metody měření úhlů se dělí na statické a dynamické. K dynamickým se řadí časoměrná metoda, u které se rovnoměrně otáčí kruh s dílkou a měření se převádí na měření času.

V sedmdesátých letech se podařilo dosáhnout takové přesnosti, že se již řadu let vyrábějí elektronické teodolity dosahující kvality triangulačních teodolitů.

Čtení úhlů horizontálních a vertikálních se zobrazují na jednostranném nebo oboustranném displeji s tastaturou a lze určit nejmenší měřené úhlové jednotky. Chod přístroje se ovládá pomocí tlačítek na tastatuře, stejně jako zobrazení požadovaných údajů na displeji. Je možno volit různé úhlové jednotky nebo sklon záměry v procentech. Na kruzích lze v daném směru nastavit nulovou hodnotu nebo libovolné jiné čtení úhlu. Teodolity jsou vybaveny sklonovým senzorem indexů pro vertikální kruh a řada z nich dvouosým kapalinovým senzorem ke zjištění sklonu alhidádové osy. Automaticky se zavádějí mimo jiné korekce úhlu ze sklonu alhidádové losy, z kolimační chyby a

korekce vertikálních úhlů ze sklonu indexů u vertikálního kruhu. V počítači teodolitu jsou ukládány databáze souřadnic bodů nebo jiných údajů a vybrané výpočetní programy. Měřené a vypočtené veličiny se ukládají do interní nebo externí paměti v souladu s registračním programem měřických dat. Činnost teodolitů se zpravidla vypíná po určité době ukončení měření nebo při delší měřické přestávce. Chod teodolitů zajišťují vestavěné nebo vnější baterie zpravidla umístěné na noze stativu. Baterie je třeba dobíjet nabíječkou.

2.7. Některé druhy a typy teodolitů

Základní geodetické přístroje, k nimž patří i teodolity, vyrábí řada firem. Jsou to především evropské firmy Leica, Zeiss (Theo 010B/A, Theo 020B/A), Electronics a japonské firmy Topcon, Sokkia, Nikon a Pentax. Před několika lety k nim patřily švýcarské firmy Wild a Kern. V současné době uvedené firmy nabízejí elektronické měřické systémy, nazývané často totálními stanicemi, které sestávají z elektronických teodolitů, dálkoměrů, počítačů a z různých dalších pomůcek a zařízení umožňujících měřickým skupinám vysoký stupeň automatizace měření všech veličin a jejich zpracování. Samostatné elektronické teodolity se dnes vyrábějí jen v omezené míře a firmy k nim nabízejí elektronické dálkoměrné nástavce k přesnému měření délek do vzdálenosti několika set metrů až kilometrů.

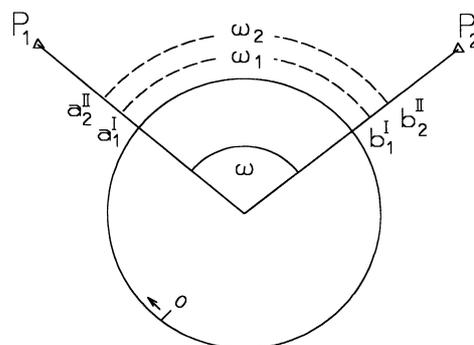
V geodetické praxi se ještě hojně vyskytují i starší teodolity se skleněnými kruhy, jejichž životnost je při dobrém zacházení velmi dlouhá a kvalita měřických výsledků vysoká.

3. Měření vodorovných úhlů

Základním prvkem při měření vodorovných úhlů je směr. Metody měření vodorovných úhlů jsou vypracovány na požadavcích přesnosti měření a konstrukci přístrojů. Měření úhlů dělíme na měření ve dvou polohách dalekohledu, měření úhlů v řadách a skupinách a měření úhlů násobením (repeticí). K získání spolehlivých naměřených hodnot je nutné, aby byl teodolit rektifikovaný, centrováný, horizontovaný a dalekohled dobře zaostřený. V případě, že stavíme teodolit na stativ, je nutné, aby byl stativ pevně postaven. Během měření není možné opravovat horizontaci přístroje a centraci přístroje.

3.1. Jednoduché měření úhlů

Postup je zřetelný z obr. 3.1. V první poloze dalekohledu obdržíme výsledný úhel $\omega_1 = b_1 - a_1$, ve druhé poloze $\omega_2 = b_2 - a_2$. Výsledný úhel z obou poloh pak bude $\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$

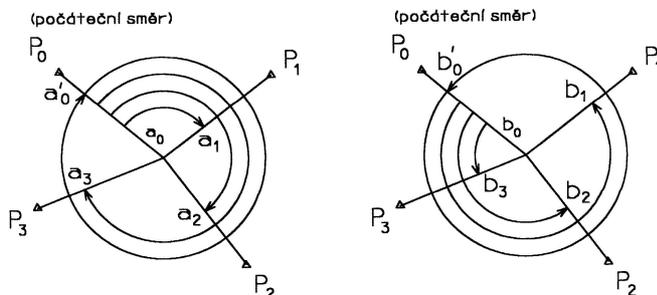


Obr.3.1 Jednoduché měření úhlů

3.2. Měření úhlů v řadách a skupinách

Je založeno na měření vodorovných směrů v obou polohách dalekohledu. Jednotlivé úhly se vypočtou z rozdílu příslušných směrů. Tato metoda je základní metodou při určování bodů polohového pole a většiny měření.

Každá měřická skupina se skládá ze dvou měřických řad. První řada sestává z měření osnova směrů v první poloze dalekohledu. Druhá řada se měří ve druhé poloze dalekohledu.



Obr. 3.2 Měření úhlů v řadách a skupinách

U elektronických teodolitů se výsledky ukládají do paměti teodolitů, U teodolitů se skleněnými kruhy se zapisují do zápisníku.

Postup měření je vidět na obr. 3.2. Uzávěr skupiny vypočtený z průměru z obou řad měření u počátečního a zároveň koncového směru nesmí překročit 2,5 násobek střední chyby teodolitu. Rozdíly obou průměrů jsou výsledkem řady různých druhů náhodných a systematických chyb. Pro dosažení větší přesnosti se provádí měření ve více měřických skupinách. Z důvodu nestejnorného dělení kruhu se nastavuje při každé další skupině na počáteční směr čtení změněné o hodnotu $2R/n$ (n je počet

3.3. Měření úhlů násobením

Tato metoda vznikla v době, kdy byly teodolity s méně přesnými čtecími pomůckami. Podstatou metody je opakované sčítání (repetice) měřeného úhlu. K měření se používalo dříve dvojosého teodolitu, později teodolitu s repetiční svorou.

3.4. Chyby při měření vodorovných úhlů a směrů

Naměřené veličiny jsou zatíženy nevyhnutelnými chybami, které jsou tvořeny řadou náhodných a systematických vlivů. Chyby se dělí na strojové, měřické a z vnějšího prostředí.

3.4.1. Chyby strojové

- Chyba z nesprávného urovnání přístroje, způsobená nepřesnou rektifikací alhidádové libely (není splněna podmínka $L \perp V$)
- Chyba kolimační (není splněna podmínka $Z \perp H$) Měřením směru ve dvou polohách dalekohledu se vliv kolimační chyby vyloučí.
- Chyba ze sklonu klopné osy dalekohledu (není splněna podmínka $H \perp V$). Chyba se vyloučí měřením v obou polohách dalekohledu.
- Chyba z excentricity (výstřednosti) alhidády .Vznik tehdy, když osa alhidády neprochází přesně středem kruhu. Chyba se odstraňuje měřením ve skupinách.
- Chyba z nediametrální polohy indexů (záměrná příčka Z neprochází alhidádovou osou V) Tato chyba je konstantní, takže každý vypočtený úhel, který je rozdílem dvou směrů, je od této chyby oproštěn.

- Chyba z excentricity záměrné roviny je způsobena excentricky umístěným dalekohledem. V případě stejných délek záměr se i při měření v jedné poloze dalekohledu vliv této chyby neprojeví. Čím budou délky záměr rozdílnější, tím bude při měření v jedné poloze dalekohledu měřený úhel zatížen větší chybou.
- Chyba z dělení kruhu. Vliv této chyby se sníží měřením osnovy směrů ve skupinách na různých místech kruhu.
- Chyba ze sklonu roviny limbu je u současných přístrojů zanedbatelná vzhledem k vysoké kvalitě výroby.
- Chyba runová je způsobena nepřesným zvětšením stupnice. Runová chyba se podstatně snižuje u přesných úhlových pracích měření v několika skupinách na různých místech mikrometrické stupnice.

3.4.2. Chyby měřické

K chybám měřickým se řadí všechny chyby způsobené nedokonalostí činností celé měřické skupiny. Patří k nim :

- Chyba z horizontace přístroje (nepřesné urovnání přístroje)
- Chyba z centrace přístroje
- Chyba z nesprávného postavení přístroje
- Chyba v cílení
- Chyba ve čtení stupnice

3.4.3. Chyby z prostředí

Tyto chyby jsou tvořeny celou řadou dílčích vlivů z nepřesné znalosti vlastností atmosféry podél dráhy světelného paprsku (záměry) jdoucí z cíle do objektivu dalekohledu. Nehomogenní prostředí, kterým se světlo šíří, působí nepravidelné změny v indexu lomu a tím i v refrakci paprsků. V důsledku uvedených jevů vznikají neznámé odchylky v měřených směrech, které se pak jeví jako chyby měřených směrů. Z fyzikálních veličin ovlivňujících směr paprsků lze uvést zejména změny teploty, v tlaku vzduchu, vlhkosti vzduchu a přítomnost různých plynů, v první řadě kyslíčnicku uhličitého. Ke dvěma základním chybám z vlivu prostředí patří chyba z refrakce a chyba z vibrace.

- Chyba z refrakce . Tuto chybu ovlivníme výběrem vhodných podmínek při měření.
- Chyba z vibrace

3.4.4. Přesnost měření vodorovných směrů a úhlů

Přesnost měřených směrů Ψ a vypočtených úhlů ω se odhaduje pomocí středních chyb m_Ψ a m_ω :

Úplnou střední chybu M_Ψ směru měřeného v jedné poloze dalekohledu vyjadřuje rovnice

$$M_\Psi^2 = M_\varphi^2 + m_\Delta^2 + m_t^2 ,$$

Kde $M_\varphi^2 = \sum c_i^2 + \sum m_i^2$ je úplná střední chyba zahrnující všechny dílčí chyby přístrojové, měřické a z prostředí a m_Δ , m_t jsou chyby v centraci teodolitu a signálu (terče). Úplná chyba M_φ obsahuje mimo náhodných chyb m_i i řadu systematických složek c_i , které se dají většinou odstranit jen měřeními ve dvou polohách dalekohledu.

Úplná střední chyba M_ω úhlu ω měřeného v jedné poloze dalekohledu je dána výrazem

$$M_\omega^2 = M_\phi^2 + 2(m_\Delta^2 + m_t^2) .$$

V rovnici značí $M_\phi^2 = \sum(c_1 - c_2)_i^2 + 2m_i^2$ úplnou střední chybu úhlu vzniklou dílčími chybami v centraci. Systematické složky $(c_1 - c_2)_i$ úhlu ω se snižují o stálé systematické části chyb. Přesto je možno používat měření vodorovných úhlů v jedné poloze u některých geodetických prací s minutovými teodolity.

Střední chyba m_ψ směrů Ψ měřených ve skupinách charakterizuje přibližný vztah

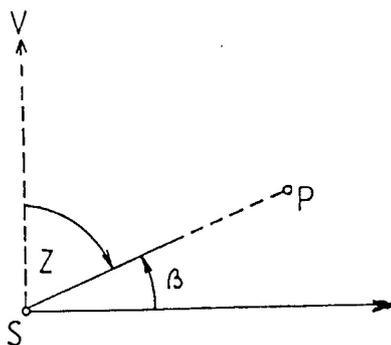
$$m_\psi^2 \doteq m_\phi^2 + m_\Delta^2 + m_t^2 ,$$

protože při této metodě měření se prakticky odstraňuje většina systematických složek. Střední chyba m_ω úhlů měřených ve skupinách má tvar $m_\omega^2 \doteq 2m_\psi^2$.

4. Měření zenitových (svislých) úhlů

Svislé úhly se mohou měřit buď ve skupinách jako vodorovné směry anebo samostatně ihned v první i druhé poloze dalekohledu. Počátečním (nulovým) směrem pro měření vertikálních úhlů je směr svislý nebo vodorovný podle toho, zda se měří zenitové nebo výškové úhly (viz obr. 3.3)

- *zenitový úhel* z je úhel, který svírá směr zenitu (směr tížnice) se zaměřovaným směrem
- *výškový úhel* β je úhel, který svírá vodorovná rovina procházející točnou osou dalekohledu a záměrnou přímkou na měřený směr



Obr. 3.3 Zenitový a výškový úhel

Vzájemný vztah mezi zenitovým úhlem a svislým úhlem je dán výrazem $z + \beta = 100 \text{ gon}$.

4.1. Metody měření zenitových úhlů

Zenitové úhly se měří v jedné nebo ve dvou polohách dalekohledu.

Měření zenitového (svislého) úhlu v jedné poloze dalekohledu se používá převážně při tvorbě mapových podkladů. Při měření v jedné poloze dalekohledu je měřený úhel zejména zatížen indexovou a refrakční chybou.

Měření zenitového (svislého) úhlu v obou polohách dalekohledu. U tohoto měření se vyloučí indexová chyba. Způsob přesnějšího určování velikosti svislých úhlů je probírán při trigonometrickém určování výšek.

4.2. Chyby zenitových (svislých) úhlů

Do této skupiny řadíme tak jako u měření vodorovných směrů chyby strojové, měřické a chyby z prostředí. Mezi chyby strojové patří : chyba kolimační, chyba ze sklonu klopné osy dalekohledu, chyba z nesprávné horizontace přístroje, chyba indexová, chyba z excentricity klopné osy dalekohledu, chyba z excentricity záměrné přímky a chyba z nepřesné centrace přístroje. K chybám měřickým patří : chyba z nepřesného urovnání indexové libely, chyba v zacílení dalekohledu, chyba ve čtení, chyba výšky teodolitu a cíle a chyba z nepřesné centrace přístroje. K chybám z prostředí řadíme chybu z refrakce.

4.3. Gyroteodolity

4.3.1. Princip činnosti gyroskopů (setrvačníků)

Gyroskopy dělíme na :

- Gyroskopy se třemi stupni volnosti (volné)
- Gyroskopy se dvěma stupni volnosti
- Gyroskopy kulové
- Gyroskopy vibrační
- Gyroskopy optické (laserové)

Gyroskopy slouží ke stanovení směru poledníku procházejícího daným bodem. Zjednodušené určení směru poledníku vychází ze tří základních fyzikálních sil, působících na setrvačník. Jsou to rotace setrvačníku, rotace Země a přitažlivá síla Země. Působením základních tří silových momentů vzniká tzv. gyroskopický moment, který nutí osu setrvačníku, aby ležela v poledníkové rovině. Za předpokladu, že osa volného setrvačníku se ztotožňuje např. na počátku pozorování s vertikálou, procházející zvoleným bodem, lze po určitém časovém intervalu zjistit, že obě osy tvoří různoběžky. Přitom vertikála otáčí společně se Zemí směrem k východu, kdežto směr osy setrvačníku zůstává v nezměněném směru vzhledem k rovině ekliptiky. Úhel, který svírá hlavní osa volného setrvačníku s místní vertikálou se postupně zvětšuje úměrně s časem. Obě různoběžky definují rovinu prvního vertikálu a normála k ní vedená leží ve směru místního poledníku. Příkladem gyroskopu se třemi stupni volnosti je kyvadlový gyroskop, visící na torzní pásce, která se používá u gyroteodolitů a gyroskopických nástavců na teodolít.

Teoretické odvození pohybových rovnic osy setrvačníku vychází z Eulerových pohybových rovnic a to ze základní věty mechaniky, tzv. momentové věty, která říká, že součet momentů vnějších sil v libovolném bodě tělesa se rovná časové změně momentu hybnosti tělesa ve stejném bodě. Matematické vztahy jsou uvedeny ve speciální literatuře.

4.3.2. Měření azimutů

Gyroteodolity se skládají ze dvou částí, z teodolitu a z uzavřeného kovového válce se setrvačником. Příslušenství sestává z napájecího bloku, akumulátoru, stativu, buzoly a kabelů.

Měřický postup k určení směru meridiánu a k orientaci osnovy směrů se dělí u gyroskopů zavěšených na torzní pásce na šest etap:

- předběžná orientace – používá se k ní busoly
- určení nulové torzní polohy závěsné pásky
- zaměření osnovy směrů v 1. skupině
- určení rovnovážné polohy osy setrvačnicku – určuje se buď metodou bodů obratu, metodou průchodovou a nebo amplitudovou.
- zaměření osnovy směrů ve 2. skupině
- opakované určení nulové torzní polohy

4.3.3. Výpočet a přesnost azimutů

Gyroskopicky určené azimuty A_i směrů ψ_i se vypočtou ze vztahu (viz obr. 5.1)

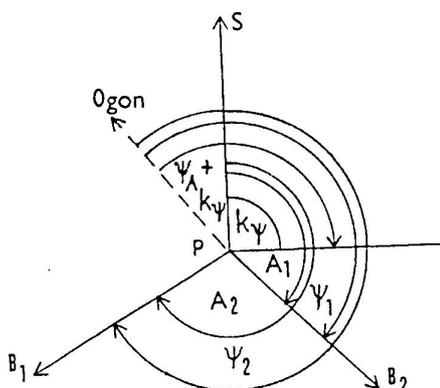
$$A_i = \psi_i - (\psi_A + \psi_\psi) + k_\psi + v_t ,$$

kde k_ψ je adiční konstanta a v_t oprava z tížnicové odchylky.

Adiční konstanta k_ψ se musí určovat na orientačním směru A_0 , jehož azimut je znám s vyšší přesností, než je přesnost měření gyroskopického azimutu A_g . Zpravidla bývá orientační směr A_0 zaměřen astronomicky. Pak adiční konstanta je dána výrazem $k_\psi = A_0 - A_g$.

Při zavedení opravy z tížnicové odchylky θ , se uplatňuje jen její složka η ve směru rovnoběžky

$$v_t = -\eta \cdot \operatorname{tg} \varphi .$$



Obr. 5.1 Schéma určení azimutů

Přesnost je dána výrazem

$$\varepsilon_A = \varepsilon_\psi - \varepsilon_{\psi A} - \varepsilon_{v\psi} + \varepsilon_k + \varepsilon_t \quad .$$

kde $\varepsilon_{\psi A}$ je skutečná chyba měřeného úhlu, ε_A chyba vypočtené rovnovážné polohy ψ_A osy setrvačnicku, ε_k chyba adiční konstanty a ε_t skutečná chyba opravy z tížnicové odchylky.

Odhad střední chyby m_A azimutu A je dán rovnicí

$$m_A^2 = m_\psi^2 + m_{\psi A}^2 + m_{v\psi}^2 + m_k^2 + m_t^2 \quad ,$$

ve které byly nahrazeny všechny skutečné chyby kvadráty středních chyb.

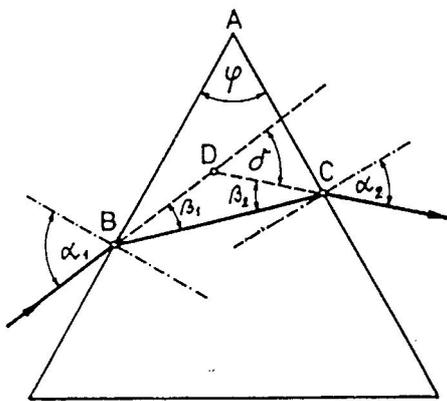
V geodetické praxi se z hlediska přesnosti vyskytují tři skupiny gyroskopických přístrojů : přesné gyroteodolity se střední chybou vypočtených azimutů v intervalu 1 až 2 mgon, gyroteodolity se střední chybou 4 až 5 mgon a gyroskopické nástavce se střední chybou 6 až 9 mgon.

6. Úhломěrné pomůcky

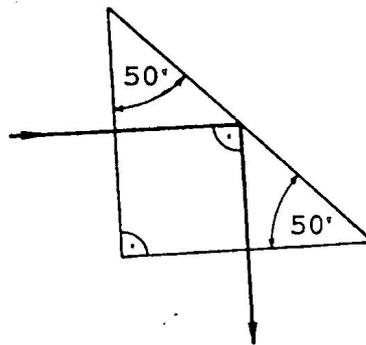
Lámavé hranoly jsou tělesa omezena rovinnými plochami (viz obr. 6.1)

Odravný hranol. Dělí se podle počtu odrazných stěn - s jednou, dvěma, třemi odraznými plochami, složené hranoly. Na obr. 6.2 je znázorněn pravoúhlý hranol, na obr. 6.3 pětiboký hranol a na obr. 6.4 dvojitý pentagonální hranol.

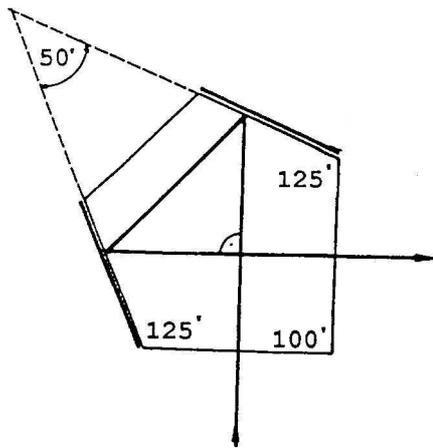
Optický klín je hranol s velmi malým lámavým úhlem.



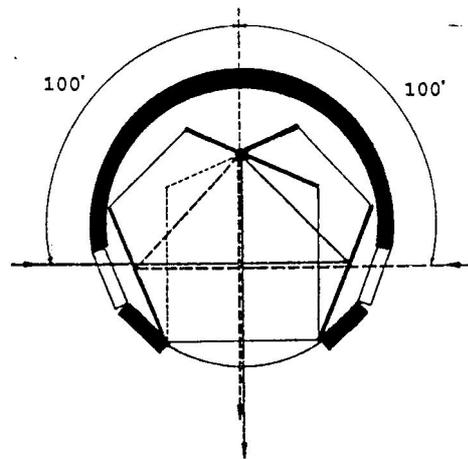
Obr. 6.1 Průchod paprsku hranolem



Obr. 6.2 Pravoúhlý hranol



Obr. 6.3 Pětiboký hranol



Obr. 6.4 Průchod paprsku dvojitým hranolem