

Testovanie dĺžkomerov totálnych staníc

Vincent Jakub¹, Milan Dzúr-Gejdoš¹ a Ján Cirbus²

Testing EDM of Total Stations

The paper is devoted to testing electrooptical distance measuring devices (EDM) built in total stations, than can be used for various tasks in the contemporary geodetic works. A rich market offer and availability of these universal measuring systems with satisfying distance range, excellent accuracy and other parameters, make total stations as dominant terrestrial geodetic instruments.

For successfully applying these instruments, above all for reliable distance measurements, the stability of the modulation frequency is the most important pre-condition. In the article, therefore, there are given some methods to verify the modulation frequency stability. In addition, some ways for determining the EDM distance constant and periodical corrections of the phase measuring unit are introduced for 4 types of EDM: LEICA 1700L, TOPCON GTS6A, TOPCON GTS2, C.ZEISS ELTA50. It were also investigated their possibilities for precise distance survey. Values of the determined constants and periodical corrections are presented in Tab. 2.

Based on the investigation results of the 4 EDM types and using the values m obtained for different distances S , equations of the a posteriori standard deviations in form: $m = (a+b.S)$ were derived too.

Key words: Testing of total station, determination of the modulation frequency, determination of the additional constant and the periodic error, investigation of the EDM – accuracy.

Úvod

Elektronické dĺžkomery sa stali pre geodetov nenahraditeľnými. V priebehu posledných desaťročí postupne odsunuli optické dĺžkomerné prístroje a efektívne sa uplatňujú na meranie kratších dĺžok, ale aj dĺžok veľkosti niekoľko desiatok kilometrov.

Od prvých vývojových konštrukcií, akými boli svetelný Bergstrandov dĺžkomer (1947), mikrovlnný dĺžkomer T.J. Wadleyho (1956) a interferenčný dĺžkomer Väisäläho (1923), sa dĺžkomerné systémy neustále zdokonaľovali a v súčasnosti viaceré firmy vyrábajú rôzne konštruované elektronické dĺžkomery.

Rozdelenie dĺžkomerov podľa fyzikálnej podstaty na svetelné, rádiové a interferenčné nie je jediné. Môže byť aj podľa iných charakteristík. Najpočetnejšou skupinou podľa dosahu sú dĺžkomery: malého dosahu, vhodné na meranie vzdialeností od niekoľkých metrov do 5 km, stredného dosahu do 30 km a veľkého dosahu do 60 km. Rádiové dĺžkomery centimetrovej presnosti sú vhodné na meranie veľkých vzdialeností (TELLUROMETER MRD1 30 – 100 km, typ MRD 210 až do 250 km). Prednostne sú používané v trilaterálnych sieťach. V kozmickej geodézii sa používajú laserové dĺžkomery, rádiolokačné a navigačné systémy, umožňujúce určovať veľmi veľké vzdialenosti medzi Zemou a umelými družicami. Interferenčné dĺžkomery dosahujú najvyššiu presnosť ($m_s \div 10^{-7}$ - 10^{-8}), ale majú malý dosah, napr. systém METRA 3002, upotrebiteľný v strojárstve a metrológii na overovanie dĺžkových meradiel, s dosahom do 30 – 100 m.

Prvé svetelné dĺžkomery boli konštruované ako samostatné jednotky, postupne sa upravovali ako nasadzovacie systémy (AGA, KERN, SOKKIA) na teodolity, s cieľom univerzálneho použitia na meranie viacerých geodetických veličín. Ďalším zdokonalením, so zámerom automatizovať a digitalizovať proces merania, s následným programovým spracovaním i grafickým výstupom riešených úloh, vznikli integrované systémy, označované ako totálne stanice (TS), niektorými výrobcami (LEICA, ZEISS) pomenované ako elektronické tachymetre.

Prvá totálna stanica GEODIMETER 700, vyrobená v roku 1971 firmou AGA, je určená na merie dĺžok od 100 m do 5 km, s presnosťou $\pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ km})$ jej hmotnosť je až 14,5 kg, súpravu tvorí viacero častí, čo do istej miery nedáva predpoklad pohodlnosti pri práci s ňou. Súčasná TS predstavujú dokonalú integráciu elektronického teodolitu, svetelného dĺžkomera a PC jednotky, pričom zabezpečujú kompatibilitu s početnými prístrojmi (napr. LEICA TC 1700, SOKKIA 2000, presnosť 2 mm + 2 ppm, hmotnosti 6,4-5,7 kg). Rôzne elektronické doplnky, ako napr.: dvojosý senzorický kompenzátor, samočinné urovnávanie indexu výškového kruhu, digitálna, resp. grafická informácia o stave horizontácie TS prostredníctvom elektronickej libely, centrácia laserovou olovnícou, osvetlenie zámerného kríža, samočinný výpočet strednej chyby meranej vzdialenosti (vnútorná presnosť dĺžkomera), operačné kroky na obojstrannom alfanumerickom displeji, zabezpečenie bezreflektorového merania niektorými typmi TS (LEICA TPS 300), samočinné rozpoznávanie cieľa pri motorizovaných verziách (LEICA TDM 5000, GEODIMETER S500, S600), nekonečné pohybovky a iné konštrukčné vylepšenia, poskytujú lepší používateľský komfort, adaptabilitu i univerzálne uplatnenie pri riešení rozmanitých geodeticko – meračských úloh.

¹ Ing. Vincent Jakub, Ing. Milan Dzúr-Gejdoš, Geometra, Pražská 4, 040 11 Košice

² doc. Ján Cirbus, CSc., Katedra geodézie a geofyziky, FBERG Technickej univerzity, 043 84 Košice, Park Komenského 19 (Recenzované, revidovaná verzia dodaná 10.11.2000)

Postup testovania dĺžkomerov

Správnosť meraných dĺžok závisí na stabilite modulačnej frekvencie svetelného dĺžkomera, čo vyplýva zo vzťahu

$$\lambda_m = c / f \quad (1)$$

kde

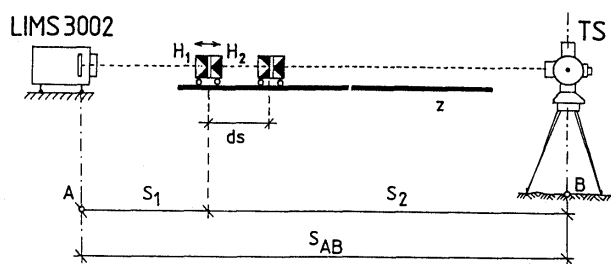
- c je rýchlosť šírenia sa svetla vo vákuu, $299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ ms}^{-1}$,
- f je frekvencia vysokofrekvenčného oscilátora, výrobcom zabezpečená s presnosťou $2 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$.

Stabilita frekvencie s uvedenou presnosťou zaisťujú správnosť meranej dĺžky 0,2 mm na 1 km.

Overovanie modulačnej frekvencie

Prevádzkovaním TS môže dôjsť v elektronických obvodoch k zmenám, ktoré spôsobujú zmenu frekvencie oscilátora, alebo opravárske práce, najmä na fázomernej jednotke, zapríčinia zmenu frekvencie. Overovanie stability môžeme vykonať:

1. Komparáciou vysokofrekvenčného oscilátora pomocou frekvenčného normálu (presnosti $1 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}$). Tieto služby si môžu záujemcovia objednať na Slovenskom metrologickom ústave v Bratislave;
2. Sprostredkovane, porovnaním dĺžok S_i , meraných na základnici dlhšej minimálne λ_m , rozdelenej na úseky 0,1 – 0,5 m (presnosti 0,2 – 0,5 m);
3. Porovnaním dĺžok medzi bodmi bodového poľa vyššieho rádu, pri ktorých sa predpokladá stabilita, s dĺžkami meranými TS. Pri tomto spôsobe, nakoľko sa jedná o väčšie vzdialenosti, treba uvažovať s matematickou (redukcia na elipsoidickú dĺžku), fyzikálnou (uváženie indexu lomu konkrétneho prostredia) korekciou, ako aj vykonať redukciu dĺžky do zobrazovacej roviny;
4. Overovanie interferenčným komparátorom, nar. METRA LIMS 3002, LOS (LIMTEK Blansko) a i., diferenčným postupom (Cirbus, 1985), naznačeným na obr. 1.



Obr.1. Schéma komparátora dĺžkomerov TS.
Fig.1. Schema of the comparator for EDM of total stations.

Dĺžka úsečky AB je väčšia ako je λ_m overovaného dĺžkomera TS a je daná súčtom úsekov $S_1 + S_2$, určená interferometrom s presnosťou $\pm 5 \mu\text{m}$. Pri komparovaní posúvame po základnici Z spojené odrazné hranolky H_1 a H_2 o malé

hodnoty posunu ds , volené v rozmedzí 0,1 – 0,5 dm. Pri zmene polohy hranolov pre vzdialenosť S_1 určenú interferometrom a vzdialenosť S_2 platia vzťahy:

$$\begin{aligned} S_{AB} &= (S_1 + ds) + (S_2 + ds') \\ S_{AB} &= (S_1 + ds_1) + (S_2 + ds'_1) \\ S_{AB} &= (S_1 + nds_n) + (S_2 + nds'_n) \end{aligned} \quad (2)$$

Rozdiel $ds - ds'$ predstavuje komparačnú hodnotu, použiteľnú na overenie vlnovej dĺžky $\{\lambda_m = n(ds - ds')\}$ modulovanej svetelnej vlny. Údaj ds je indikovaný na stupnici interferometra s vyššie uvedenou presnosťou a ds' je merané s presnosťou overovaného dĺžkomera (Cirbus, 1987).

Z prehľadu uvedených postupov overovania modulačnej frekvencie sú, pre používateľov TS, najdostupnejšie a pritom pomerne nenáročné spôsoby 2 a 3.

Určenie periodickej korekcie

Predpokladom merania správnych dĺžok požadovanej presnosti musia byť v rámci neúplného cyklu ($s' < \pi$) bezchybné tiež domerky. Tieto hodnoty môžeme zistiť kalibráciou fázomerného článku, čím overíme vzťah medzi odčítaním stupnice fázomerného článku a odpovedajúcich úsekov dĺžky (hustoty 0,1 – 0,5 m) základnice, dlhšej minimálne λ_m (napr. 10, 15, 20, 30 m). Korekcia má periodický charakter, vznikajúci prechodom vysokofrekvenčného svetelného vlnenia vysielačou a prijímacou jednotkou.

Zisťovanie periodickej chyby sme vykonali u nasledovných dĺžkomerov TS: LEICA 1700/L, TOPCON GTS 2 a C.ZEISS Elta 50. Grafické zobrazenie overovanej závislosti je v sústave pravouhlých súradníc X,Y.

V smere úsečky X sú vynesené hodnoty fázomernej stupnice ($x_i = 20, 40, \dots, 380$ a 400°), teda $2\pi:20$, odpovedajúce vzdialenostiam bodov komparačnej základnice 10, 10,5, ..., 19,5 a 20 m. V smere poradnice Y sú hodnoty rozdielov $y_i' = S_i^* - S_i'$ (tab.2).

Tab.1. Číselné údaje x_i, y_i určujúce priebeh cyklickej korekcie.
Tab.1. Numerical values x_i, y_i , determining the cyclic correction.

x_i	$S^*[m]$	$S[m]$	$y_i' [mm]$	$y \cos x$	$\cos x$	$V_i [mm]$	$f(x) [mm]$
0°	10,00317	10,006	-2,83	-2,83000	0,00000	0,11674	-2,71325
20	10,49983	10,501	-1,17	-1,11274	-0,36155	-1,47378	-2,64378
40	10,99900	11,001	-2,00	-1,61803	-0,17557	-0,58513	-2,58513
60	11,50100	11,504	-3,00	-1,76336	-2,42705	0,45694	-2,54303
80	12,00033	12,002	-1,67	-0,51606	-1,58826	-0,86428	-2,53248
100	12,50317	12,507	-3,83	0,00000	-3,83000	1,30704	-2,52292
120	12,99867	13,002	-3,33	1,02902	-3,16702	0,78333	-2,64567
140	13,49883	13,500	-1,17	0,68777	-0,94655	-1,42125	-2,59125
160	13,99683	14,000	-3,17	2,56458	-1,86328	0,51849	-2,65151
180	14,50083	14,504	-3,17	3,01485	-0,97958	0,44818	-2,72182
200	14,99683	15,000	-3,17	3,17000	0,00000	0,37469	-2,79531
220	15,49950	15,502	-2,50	2,37764	0,77254	-0,36478	-2,86478
240	16,00267	16,005	-2,33	1,88501	1,36954	-0,59345	-2,92345
260	16,50000	16,505	-5,00	2,93892	4,04508	2,03446	-2,96554
280	16,99933	17,003	-3,67	1,13409	3,49037	0,68303	-2,98697
300	17,49933	17,501	-1,67	0,00000	1,67000	-1,31562	-2,98562
320	17,99867	18,001	-2,33	-0,72000	2,21596	-0,63158	-2,96158
340	18,49900	18,502	-3,00	-1,76336	2,42705	-0,08269	-2,91731
360	18,99950	19,003	-3,50	-2,83156	2,05725	0,64295	-2,85705
380	19,50267	19,505	-2,33	-2,21596	0,72000	-0,45674	-2,78674
400	20,00000	20,003	-3,00	-3,00000	0,00000	0,28675	-2,71325
			57,84	0,43081	2,42893		

Spojnice vyobrazených bodov tvoria empirický polygón overovanej závislosti, ktorý je ďalej aproximovaný cyklickým priebehom (obr.2). Kvôli prehľadnosti je na uvedenom obrázku znázornený len vyrovnaný priebeh periodickej, funkčnej závislosti:

$$f(x) = v_i - y_i' \quad (3)$$

kde v_i je oprava (cyklická korekcia) odčítania na stupnici (displeji) fázomerného článku, v rozsahu modulačnej vlny $\langle 0, 400^\circ \rangle$, daná

$$v_i = A_0 + A_1 \cos x_i + A_2 \sin x_i - y_i' \quad (4)$$

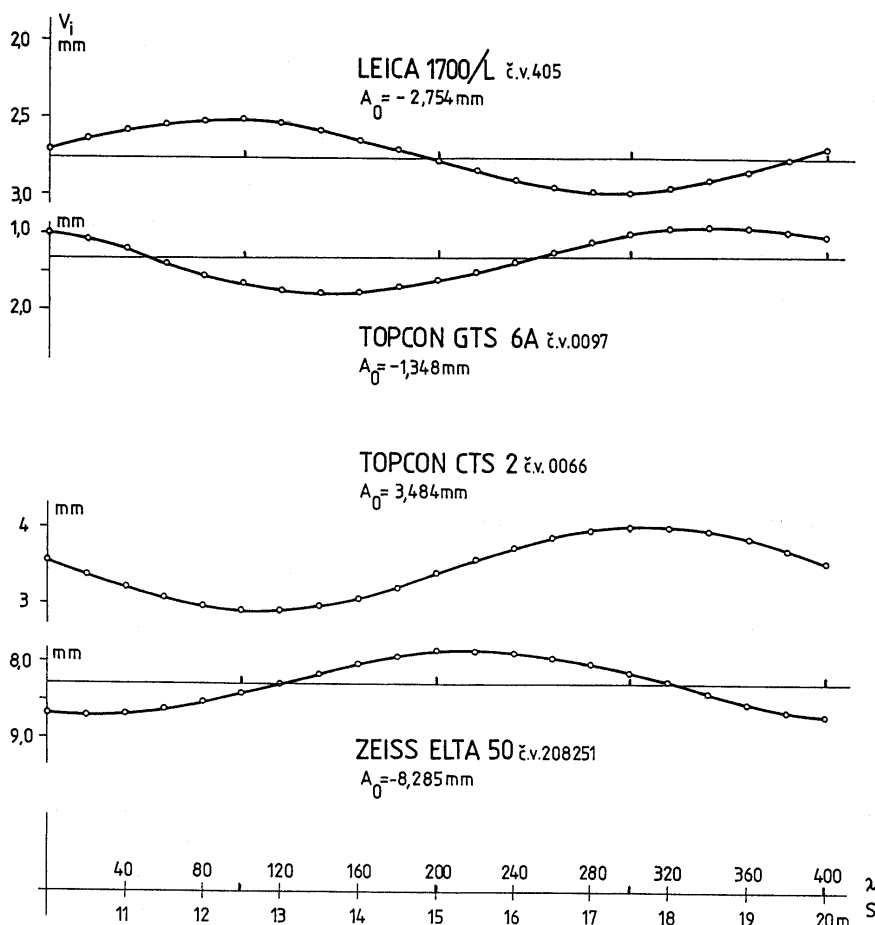
V rovnici (4) vyjadruje A_0 adičnú konštantu dĺžkomera, tvorenú prístrojovou a reflektorovou zložkou, hodnoty A_1, A_2 sú cyklické zložky (periodická korekcia), určené podľa vzťahov:

$$A_0 = \frac{[y_i]}{n} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{2 [y_i' \cdot \cos x_i]}{n} \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{2 [y_i' \cdot \sin x_i]}{n} \quad (7)$$

Grafický priebeh periodickej závislosti testovaných dĺžkomerov totálnych staníc (obr.2) poukazuje na rozdielne vlastnosti fázomerných článkov. Maximála a minimála korekcií funkcie $f(x)$ sú viac alebo menej odchýlené v bodoch úsečky 0, 100, 200, 300 a 400^s. Dĺžkomer TS LEICA a TOPCON CTS2 v porovnaní s prístrojmi TOPCON GTS 6A a C.ZEISS Elta 50 majú regulárnejší priebeh periodickej funkcie. Vzájomné porovnanie číselných výsledkov (A_0 , A_1 , A_2) a štandardných odchýlok je uvedené v tab. 2. Vykonané testovanie má nielen význam, že môžeme hodnotiť, porovnávať jednotlivé typy prístrojov, ale aj použiť zistené parametre a korekcie pre zlepšenie presnosti dĺžkového merania.



Obr.2. Priebeh cyklickej korekcie fázomerného článku.
Fig.2. Cyclic correction of the phase measuring unit.

Určenie adičnej konštanty

Merané šikmé dĺžky sú priame spojnice fyzických značiek bodov bodového poľa. Nakoľko zvislice, ktoré prechádzajú značkami bodov nie sú totožné s vertikálnou osou TS (bodom vyžiarovania svetelnej vlny) a aj rovina odrazného hranola nesplýva so zvislicou meračskej značky, je treba hodnotu meranej dĺžky S' opraviť o hodnotu adičnej konštanty A_0 . Výrobcovia u dĺžkomerov nezabezpečia nulovú hodnotu adičnej konštanty, preto hodnotu tejto korekcie treba zistiť už aj z toho dôvodu, že používatelia používajú rozmanité odrazné hranoly, od viacerých výrobcov, ako aj ich rôzne kombinácie pri meraní väčších dĺžok. V kapitole 2 tohto príspevku (tab.2), sú zistené hodnoty adičnej konštanty A_0 : +3,48, -8,28 mm, presnosti $mA_0 \sim 0,21 - 1,67$ mm.

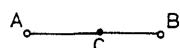
Tab.2. Výsledné hodnoty periodických chýb a štandardných odchýlok testovaných dĺžkomerov TS.
Tab.2. Resulting values of periodical errors and standard deviations for the tested EDM in the total stations.

Prístroj		A_0 [mm]	A_1 [mm]	A_2 [mm]	A_{12} [mm]	mA_0 [mm]	mA_{12} [mm]
LEICA	1700/L	-2,75	0,04	0,23	0,23	0,21	0,29
TOPCON	GTS 6A	-1,35	0,29	-0,33	0,44	0,42	0,59
TOPCON	GTS 2	3,48	0,08	-0,55	0,56	0,4	0,56
C.ZEISS	Elta 50	-8,28	-0,39	-0,15	0,83	1,76	2,49

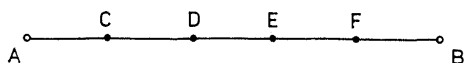
Hodnotu adičnej konštanty, s ohľadom na mierne divergentný svetelný lúč, odporúčame vykonať meraním a porovnaním dĺžok niekoľkých úsekov, v rámci zvolenej 100 – 1000 m dlhej úsečky AB (obr.3), v rovinnom teréne, rozdelenej na niekoľko úsekov. Kratšie 100 až 200 metrové úseky sú volené z dôvodu minimalizácie atmosférických činiteľov (tlaku – p, teploty – t a vlhkosti – e), ovplyvňujúcich index lomu ovzdušia. Atmosférickú korekciu dĺžok meraných svetelným dĺžkomerom TS určuje upravený vzťah

$$K_a = 279,6 - \frac{106 \cdot p}{273,2 + t} \quad (8)$$

podľa ktorého pri $p = 760 \text{ mm Hg}$, $t = 22^\circ\text{C}$, bude oprava 1000 metrovej dĺžky +6,7 mm. Pri kratších úsekoch, napr. 200 metrových, len 1,3 mm, čo je hodnota rovnajúca sa vnútornej presnosti testovaného dĺžkomeru LEICA 1700/L.



Obr.3. Schéma dĺžkových úsekov určovania adičnej konštanty.
Fig.3. Schema of length set for determination of the instrument constant.



V konkrétnom prípade, pre porovnanie hodnoty adičnej konštanty, uvádzanej v tab.2, bolo jej určenie vykonané meraním úsečky $AB = 100,891 \text{ m}$, medzibod C rozdeľujúci úsečku AB na približne rovnaké úseky hodnôt $AC = 57,904 \text{ m}$ a $BC = 42,985 \text{ m}$ dáva adičnú konštantu $A_0 = (AC + BC) - AB = -2 \text{ mm}$, čo s prihliadnutím na centráciu prístroja a odrazného systému, ako aj iných vplyvov (vybočenie bodu C, najmenej jednotky digitálneho odčítania), je hodnota zhodujúca sa s údajom, uvedeným v tab. 2.

Určenie konštanty A_0 na dlhšej úsečke vykonáme meraním príslušných úsekov vo všetkých kombináciách (podľa obr. 3, $n = 15$), z ktorých na základe podmienkového vyrovnania vypočítame vyrovnané hodnoty úsekov a z nich adičnú konštantu:

$$A_0 = (AC + CD + DE + EF + FB) - AB \quad (9)$$

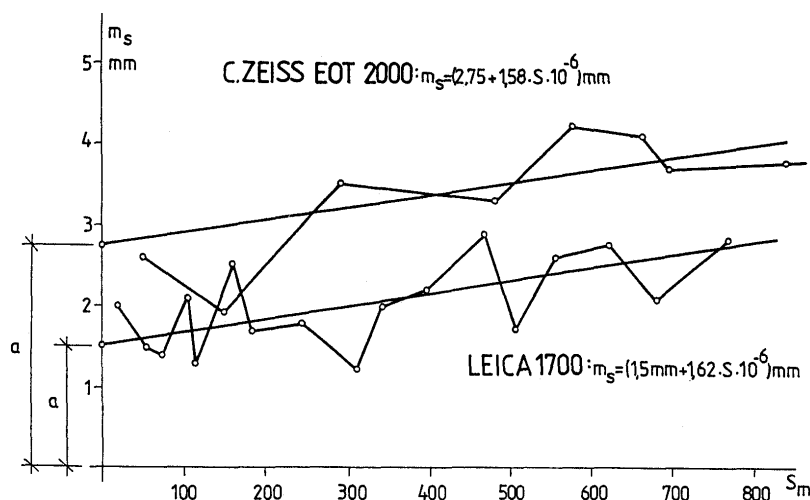
Zistenie presnosti dĺžkomera

Fyzikálne metódy dĺžkového merania mikrovlnnými dĺžkomermi zabezpečujú presnosť, vyjadrenú pomerou chybou $m_r \sim 1 : 400\,000 - 1 : 1\,000\,000$. Väčšina svetelných dĺžkomerov má presnosť $1 : 500\,000 - 1 : 1\,250\,000$, čo v porovnaní s presnosťou optických dĺžkomerov je 50 až 800 násobne vyššia presnosť meraných vzdialeností.

V priebehu vývoja elektronických dĺžkomerov sa viaceré práce (Hauf, 1987; Jaakkola, 1971; Parm, 1970; Priam, 1974; Šovan, 1968; s.193-195) zaoberali zistením presnostných charakteristík, odhadu presnosti, ktorá je uvádzaná aposteriornou strednou chybou o všeobecnom tvare

$$m_s = \pm (a + b \cdot S) \quad (10)$$

Prvý člen v rovnici charakterizuje "vnútornú" presnosť prístroja a druhý člen s 90 – 95% pravdepodobnosťou vyjadruje systematický vplyv fyzikálnych činiteľov ovzdušia.



Obr.4. Vyrovnávanie pozorovaných (m_s, S) závislostí aproximáciou.
Fig.4. Adjustment of the observed functions (m_s, S) by approximation.

Zisťovanie presnosti dĺžkomerov TS LEICA 1700/L a C.ZEISS EOT 2000 sme vykonávali meraním dĺžok v rozsahu 30 až 800 m. Získané empirické hodnoty presnosti rôzne veľkých dĺžok dávajú diskkrétne body roviny S , m_s (obr.4), z ktorých bola vypočítaná regresná priamka závislosti m_s na S , majúca v triede lineárnych odhadov minimálnu disperziu zložiek a , b všeobecnej rovnice presnosti (10):

$$\begin{array}{ll} - \text{ u dĺžkomera LEICA 1700/L} & m_s = 1,5 + 1,62.S.10^{-6}, \\ - \text{ u dĺžkomera C.ZEISS EOT 2000} & m_s = 2,15 + 1,58.S.10^{-6}. \end{array}$$

Zistená charakteristika presnosti poukazuje na to, že vplyv systematických chýb (atmosferických činiteľov) na celkovej presnosti prístroja LEICA je 48% a prístroja ZEISS 36%. Výrobca prístroja EOT 2000 udal celkovú presnosť meranej dĺžky hodnotou ± 10 mm, podobne aj u TS C.ZEISS RECOTA.

Záver

Totálne elektronické stanice, ktorých konštrukčnou jednotkou sú svetelné dĺžkomery, sú v súčasnosti najrozšírenejšími geodetickými prístrojmi. Vysokou presnosťou, plnou automatizáciou, metodikou a PC spracovaním zaisťujú veľkú produktivitu, riešených geodetických prác. Podnikateľská sféra vlastní viacero týchto špičkových prístrojov, ktoré sa v praxi veľmi dobre osvedčili a i napriek súčasnému zavádzaniu družicových systémov a GPS technológií ostanú totálne stanice najdostupnejšími a dominantnými prístrojmi mnohých geodetických firiem.

Požiadavka jednotnosti a presnosti merania dĺžok TS vyžaduje, aby ÚGKK SR vytvoril legislatívne a technické podmienky na overovanie modulačných frekvencií a adičnej konštanty na národnej alebo zriadených regionálnych základniciach, čím sa v budúcnosti zabezpečí požadovaná kvalita podrobného bodového poľa.

Literatúra

- CIRBUS, J.: Komparácia dĺžkových meradiel laserinterferometrom. *Sbornik 3. Mezinárodní vědecké konference, VŠB, Ostrava, 1985, s.87-91.*
- CIRBUS, J.: Komparirovanie izmeriteľných prístrojov dlhiny. *Sbornik dokladov VII. MIS, Leningrad, 1987, s. 85- 89.*
- HAUF, M.: Elektronické měření délek I., Praha ČVUT 1971.
- JAAKKOLA, M.: A survey with the Tellurometer MA100. *Survey Rewiev, London , 1971, p. 30 - 34.*
- PARM, T.: Tellurometer Measurements on the Niinisalo 22,2 Baseline. *Helsinki, 1970.*
- PRIAM, Š.: Odhad presnosti elektronických dĺžkomerov. *KDP VUGK, Bratislava 1974.*
- ŠOVAN, M.: Teoretické základy merania vzdialeností pomocou dĺžkomerov, SVOSZ, Bratislava 1968, s. 193-194.