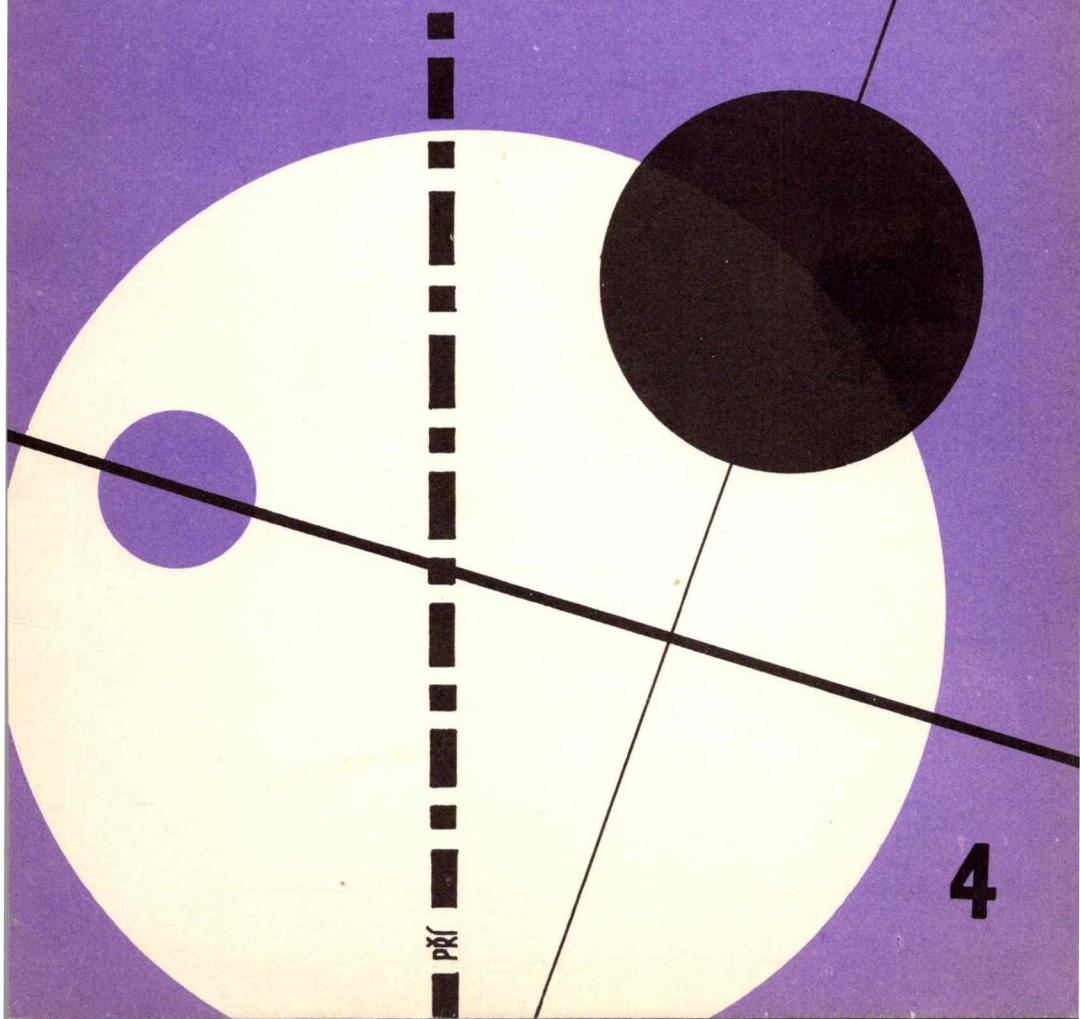


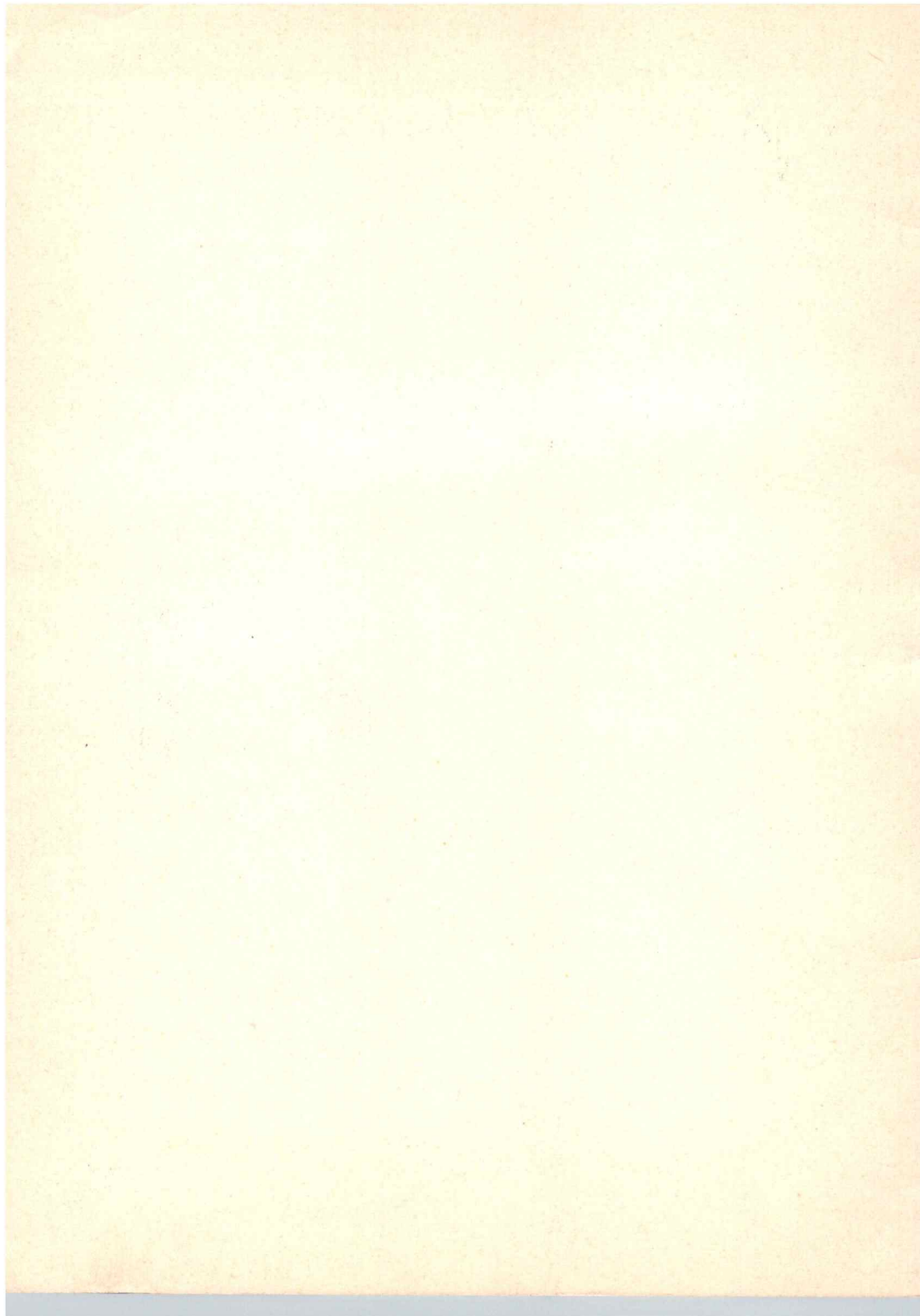
KOSMICKÉ ROZHLEDY

NEPERIODICKÝ VĚSTNÍK ČESKOSLOVENSKÉ
ASTRONOMICKÉ SPOLEČNOSTI PŘI ČSAV



PŘÍ

4



J. Zicha

Pět let provozu dvoumetrového reflektoru na observatoři
v Ondřejově

23. srpna letošního roku uplynulo již pět let od slavnostní chvíle, kdy oficiálním uvedením dvoumetrového reflektoru do provozu vyvrcholila práce mnoha desítek vědeckých i technických pracovníků a dělníků všech profesí. Třetí dalekohled této velikosti vyrobený u firmy Carl Zeiss Jena, devátý až jedenáctý ve světovém žebříčku, zahájil zkušební provoz.

Zamysleme se při této příležitosti nejen nad tím, co bylo přístrojem vykonáno, ale také nad tím, jak přístroj obstál v tomto období po technické stránce. Bude to velmi užitečné již proto, že se před krátkým časem ptal autora posluchač na jedné přednášce, zda se již kvůli generální opravě provádí demontáž dvoumetru.

V tomto článku je nejprve podán ucelený přehled technických parametrů dalekohledu, který doposud v našich publikacích chyběl, a dále stručný popis závad a našich technických projektů.

První přístroj této velikosti vyrobený firmou Carl Zeiss Jena je instalován na Schwartzschildově observatoři v Tautenburgu u Jeny. Je koncipován jako univerzální dalekohled. V základním uspořádání pracuje jak Schmidtova komora a kromě toho je vybaven quasi-Cassegrainovým a quasi-coudé ohniskem. Je uložen na vidlicové montáži, takže jeho optické i mechanické schema je jiné než u našeho dalekohledu.

Náš reflektor je určen zejména pro astrofyzikální výzkum a tomuto použití je podřízena celá koncepce přístroje. Tubus dalekohledu je upevněn na dvouosé paralaktické montáži nového typu. Podpurná montáž se vyznačuje zejména tím, že spojuje výhody montáže anglické a vidlicové, které se nejčastěji u velkých dalekohledů používají, a nemá jejich nevýhod. Montáž umožňuje ničím neomezené natočení tubusu na libovolné místo oblohy jako montáž vidlicová, a k dosažení coudé ohniska jsou nutná pouze dvě rovinná zrcadla jako u montáže anglické.

Zhruba 95 % váhy otočných částí dalekohledu - tedy asi 81 tun - nese hlavní vysokotlaké olejové ložisko. Jeho konstrukce vypadá tak, že přechod hodinové osy do osy deklinační je tvořen částí přesné kulové plochy uložené na dvou litinových polštářích. Mezi ně a kulovou plochu se vhní pod tlakem olej, který zvedne dalekohled o 0,06 mm a takto vzniklou škvírou uniká ven do sběrného potrubí. Lehkost a plynulost otáčení je tedy zaručena mizivě malým třením v kapalině. Proto také k pohonu pohyblivých částí dalekohledu o váze 85 tun rychlostí jedna otáčka za hvězdný den postačí synchronní motorek o výkonu 150 W, tedy asi takový, jako u šicího stroje.

Hlavní zrcadlo je uloženo na 18 bodech, které jsou součástí vyvažovacího mechanismu, jehož reakce procházejí zhruba těžištěm zrcadla v každé jeho možné poloze. Zrcadlo se pak chová tak, jako kdyby leželo na vyvážené míse vah, takže k justážním malým pohybům je potřeba síla jen několika kp při váze zrcadla 2340 kp. Zrcadlo je parabolické, plné a vyrobené ze zrcadlového skla s vysokým obsahem křemene, což se projevuje malým koeficientem tepelné roztažnosti. Ve středu zrcadla je otvor o průměru 250 mm. Největší odchylka funkční plochy zrcadla od teoretické paraboly je menší než 0,0001 mm, tj. 1000 Å.

Představa o výkonnosti dvometru plyne z dále uvedeného příkladu: za dobrých pozorovacích podmínek je prosté lidské oko schopno vidět plamen svíčky na vzdálenost 27 km. Kdybychom použili k pozorování zmíněné svíčky náš dvometr, který soustředí 100 000 krát více světla než lidské oko, byl by vidět na vzdálenost 8500 km, přičemž bychom mohli přístroji z příslušenství dalekohledu určit chemické složení vosku a knotu svíčky a zjistit, zda hoří klidně nebo bliká-li.

Dalekohled je uložen na pilíři, který prochází všemi patry kopule. V přízemí jsou v něm vybudovány dvě coudé laboratoře, přičemž v jedné je instalován coudé spektrograf a druhá je volná pro experimenty. Od obvodového zdiva je pilíř oddělen 10 cm širokou spárou. Ze stavebního hlediska je zajímavé, že pilíř i kopule jsou založeny na 30 cm tlusté vrstvě hrubozrnného suchého dusaného písku. Tímto uložením se tlumí případné vibrace, které by se mohly skalnatým podložím přenést na dalekohled při klasičtém uspořádání. Hlavním zdrojem vibrací je dvěstětunová kopule, jejíž pohyb, jak bylo experimentálně dokázáno, ovlivňuje nepříznivě přesnost měření na komparátoru. Již odtud je zřejmé, že pečlivostí a prozíravostí při konstrukci lze zabránit pozdějším velkým trampotám, neboť na výkrese se provádějí změny mnohem snadněji než v zatvrdlém železobetonu.

Obvyklým příslušenstvím velkého dalekohledu je pokovovací aparatura, umožňující znovupokovení hlavního i ostatních zrcadel. Pokovovací aparatura je komplikované a choulostivé zařízení, vysoce náročné na údržbu, které je nutno trvale udržovat pod vakuem. Vzhledem k tomu, že se předpokládalo její velice řídké používání - cca 1x za 4 roky - bylo od její koupě upuštěno a pokovování se provádí u firmy Carl Zeiss Jena.

Aby se zabránilo velké výměně vzduchu při otevření šterbiny kopule, bylo nutno kopuli konstruovat tak, aby se v ní přes den udržela noční teplota. O velmi dobrých izolačních schopnostech celého pláště kopule svědčí 10x menší kolísání vnitřní teploty v porovnání se změnami teploty vnější. To podstatnou měrou přispívá k rychlému vyrovnání teploty při zahájení pozorování. Doba k tomu potřebná je asi jedna hodina.

Dodatečně byla zdokonalena tepelná izolace stropů v laboratořích v přízemí kopule, protože v zimních měsících, kdy byl rozdíl teplot v laboratořích a v pozorovacím podlaží velký, zprostředkovaly přenos tepla do pozorovacího podlaží.

Dalekohled je vybaven systémem automatické pointace, přičemž pointační hlava pro primární a Cassegrainův systém je namontována na jednom ze dvou pointérů s objektivem o \varnothing 300 mm a ohniskovou vzdáleností 7,5 m. Mimořádně účinné dalekohledy zde užité jako pomocné přístroje jsou zároveň největšími refraktory u nás. Pointace coudé ohniska se provádí přímo v tomto

ohnisku, protože poměr ohniskových vzdáleností coudé systému a pointeru je příliš velký na to, aby systém pracoval s potřebnou přesností.

Uvážíme-li všechny kombinace dané příslušenstvím přístroje a třemi ohniskovými systémy, dostáváme celkem devět optických uspořádání, což dokazuje mnohostrannou použitelnost. To lze doložit poněkud suchopárným výčtem technických parametrů jednotlivých optických kombinací.

Primární systém s ohniskovou vzdáleností 9 m a relativním otvorem $l : 4,5$ je vybaven jednak spektrografem a dále držákem kazety, který umožňuje jak prostou přímou fotografii, tak i fotografii s použitím šrafovacího mechanismu, kteréžto techniky se dříve používalo při fotografické fotometrii hvězd. Před deskou formátu 59 x 59 mm se dají umístit filtry. Fotografický systém může pracovat s korekčním systémem, kterým je korigována vada, vznikající zpracováním mimoosových svazků hlavním parabolickým zrcadlem. Zorné pole dosažitelné v primárním systému je $21'45'' \times 21'45''$.

Primární spektrograf je vybaven dvěma reflexními mřížkami, přičemž obě mají rozměr ryté plochy 80 x 110 mm a 650 čar na milimetr. Jedna se používá v prvním a druhá ve druhém a třetím řádu. Exponování spekter na formát 11×50 mm lze provádět celkem ve třech Schmidtových kamerách, které se odlišují ohniskovými vzdálenostmi a mají shodný průměr vstupní pupily 125 mm.

První kamera je celoskleněná s ohniskovou vzdáleností 65 mm s relativním otvorem $l : 0,5$. K odstranění vzduchové mezery mezi fotografickou emulzí desky a dosedací plochou vyrovnávací čočky kamery se používá olejová imerze. Další dvě kamery mají ohniskové vzdálenosti 110 a 175 mm, což dává relativní otvory $l : 0,9$ a $l : 1,4$. Podle použité kamery a mřížky se může pracovat s dispersemi od 232 do 29 Å/mm. Konstrukce kamery neumožňuje exponování fotometrického klínu, exponuje se pouze srovnávací spektrum železa nebo neonu.

Primární systém není prakticky vůbec používán, a to proto, že přímá fotografie vyžaduje velmi malý nekolid ovzduší. Tak klidný obraz je však v Ondřejově zpravidla výjimkou. V současné době uvažujeme o přizpůsobení mřížek geometrii spektrografu a o konstrukčních úpravách, jejichž výsledkem bude dálkové ovládání tohoto přístroje. Dále bude potřeba zařízení pro oddělenou expozici fotometrického klínu. Realizace uvedených zlepšení zvýší podstatně použitelnost spektrografu a přispěje jistě k jeho častějšímu používání.

Cassegrainovo ohnisko je vybaveno nejrozsáhlejším příslušenstvím. Lze na něj umístit držák kazety pro přímou fotografii, Meinelovy-Schmidtovy kamery též pro přímou fotografii, spektrograf a fotometr.

Formát desek i kazety pro přímou fotografii v Cassegrainově ohnisku jsou shodné s ohniskem primárním, takže v důsledku větší efektivní ohniskové vzdálenosti, která činí 29,16 m, je zorné pole menší a to $6'44'' \times 6'44''$. S ohledem na tento malý úhel se pracuje bez korekčního systému.

Meinelovy-Schmidtovy kamery se nasazují na kolimátorový nástavec, který z rozbíhavého svazku paprsků za ohniskem vytvoří svazek rovnoběžný, do něhož se umísťuje jedna z obou kamer. Optické parametry jsou uvedeny v tabulce:

ohnisková vzdálenost (mm)	relativní otvor	formát filmu (mm)	průměr zorného pole v mm	průměr zorného pole v minutách
50	1 : 1	15 x 15	11	18,6
100	1 : 2	25 x 25	22	18,6

Cassegrainův spektrograf umístěný na spodku tubusu má mimoosový parabolický kolimátor o relativním otvoru 1 : 14,1 a dvě reflexní mřížky s rytou plochou 139 x 150 mm, z nichž jedna se používá v prvním a druhá ve druhém a třetím řádu. Dvě pevně montované kamery Schmidtova typu s tepelnou kompenzací a čočkami pro vyrovnání sklenutí pole mají parametry uvedené v tabulce:

ohnisková vzdálenost (mm)	relativní otvor	formát desek (mm)	volný průměr zrcadla (mm)	volný průměr kor. desky (mm)
220	1 : 1,375	12,5x60	234	160
540	1 : 3,38	19,5x126	366	160

Jelikož jsou kamery pevně montovány, je stůl mřížek konstruován tak, že při přechodu z jedné kamery na druhou vykonají mřížky sférický pohyb, čímž se dosáhne správného geometrického uspořádání os kamery a kolimátoru s normálami mřížky a vrypů.

Spektrograf umožňuje kromě samozřejmé expozice železných či neonových čar expozici šestistupňového fotometrického klínu. Jako zdroj světla slouží buď vláknová žárovka anebo vysokotlaká rtuťová výbojka. V Cassegrainově spektrografu se používají disperse od 75 do 10 A/mm.

Nejtruchlivější historií ze všech doplňkových přístrojů má fotoelektrický fotometr, který se zatím nepodařilo uvést do operačního stavu. Je to typický prototyp, který by potřeboval ještě dlouhý vývoj k tomu, aby byl prakticky použitelný po zapnutí hlavního spínače. V současné době se občas používá jako expozimetr u coudé spektrografu.

V rámci spolupráce s belgickou observatoří v Liège konají se u dvometru pokusná fotoelektrická pozorování se zapůjčeným šestikanálovým fotometrem. Jedná se však o složitě a choulostivě zařízení, takže jeho uvedení do operačního stavu není také snadné. Fotometr byl navíc původně zkonstruován pro jiný dalekohled, a tak jsou potíže s rozměry přístroje a délkou propojovacích kabelů. Tím je při vysokých hodnotách deklinace znemožněn průchod dalekohledu meridiánem, což použitelnost liěgského fotometru omezuje.

Nejčastěji používaným optickým uspořádáním je systém coudé, který napájí světlem velký spektrograf, umístěný v přízemí. Spektrograf má mimoosový kolimátor tvořený parabolickým zrcadlem o ohniskové vzdálenosti 4,64 m a relativním otvoru 1 : 32 a tři kamery Schmidtova typu. Parametry kamer jsou v tabulce:

ohnisková vzdálenost (mm)	relativní otvor	formát desek (mm)	poloměr prohnutí desky (mm)	volný průměr zrcadla (mm)	volný průměr kor. desky (mm)
350	1 : 1,55	9 x 120	-	352	226,6
700	1 : 2,6	13,3x226	700	550	268,9

ohnisková vzdálenost(mm)	relativní formát otvor	desek(mm)	poloměr prohnutí desky(mm)	volný průměr(mm) zrcadla kor.desky
1400	1 : 6,2	18,5x385	1400	800 226

Kamera s ohniskovou vzdáleností 350 mm je vybavena vyrovnávací čočkou, která není u dalších dvou. Sklenutí pole je u nich tudíž zachováno a desky se v kazetách prohýbají na potřebný poloměr. Kamera s ohniskovou vzdáleností 1400 mm je konstruována jako mimosová. To umožňuje zaměnit držák kazety nosičem vozíku s fotonásobičem, takže zařízení pak pracuje jako fotoelektrický spektrometr. Příslušný nosič byl vyroben v ústavní dílně a zkouší se.

Ve spektrografu se exponuje grovnávací spektrum železných nebo neonových čar a šestistupňový fotometrický klín. Jako zdroj světla se používá vláknová žárovka nebo vysokotlaká rtuťová výbojka.

Rychlost spektrografu se zvýšila nejméně dvakrát po nahrazení původní mřížky mřížkou od firmy Bausch & Lomb v r.1972. Její parametry - 830,77 čar/mm, rytá plocha 206 x 154 mm a úhel vrypu $20^{\circ}34'$ - lépe vyhovují geometrii spektrografu než mřížka původní. Rozsah disperse je od 4,3 do 34,4 Å/mm.

Všechny spektrografy našeho dvoumetru jsou vybaveny zařízením pro rozšiřování spektra, které je nutné pro spolehlivé proměření spektrogramu na mikrofotometru. Rozšiřování se docílí pohybem převracejícího hranolu ve směru šterbiny.

Při pohybu dalekohledu za hvězdou rotuje obraz hvězdy v coudé ohnisku kolem optické osy a tedy s ním i souřadnicový systém. Proto je nutné předřadit před hlavu automatické pointace derotátor, což je v podstatě hranol stejného tvaru jako hranol pro rozšiřování. Je však uložen v objímce otočně kolem optické osy, přičemž toto otáčení se děje synchronním motorkem rychlostí 1 ot. za 48 hodin. Otáčením se kompenzuje rotace souřadnicového systému a souřadnice mají s ohledem na pevné části dalekohledu stálý směr. Pak je možno automaticky pointovat pevnou hlavou.

Přejdeme nyní k technické historii dvoumetru. Je samozřejmé, že zařízení tohoto druhu nikdy nemůže být sériovým výrobkem, i když v našem případě byly vyráběny dva stejné dalekohledy. Z tohoto hlediska a dále proto, že se jedná o přístroj velmi složitý (pro ilustraci: je zde cca 14 000 součástí mimo šroubků a elektroniky), se nedalo očekávat, že by se uvedení do chodu obešlo bez nějakých poruch. Při provozu dalekohledu se však vyskytly nejen drobné "mouchy", ale i závady, které byly vážné, a které daly vzniknout pověstem o demontáži dalekohledu.

K těmto závadám patřila porucha hlavního ložiska, která se navenek projevila zvýšeným výtokem oleje na jednom místě podpůrného polštáře. Nejprve se zdálo, že vrstva ložiskové kompozice, která je nalita na dosedací plochy polštářů, byla špatně spojena s podkladem, ale při opravě se přišlo kromě toho na závadu daleko hlubší. Olejový systém byl totiž řešen tak, že jeho součástí byl tlakový rezervoár. Ten měl být za klidového stavu plný vzduchem. Po zapnutí čerpadla se vzduch s přibývajícím množstvím oleje komprimoval a vytvářel tak tlakovou rezervu použitelnou samočinně v případě náhlého přerušování dodávky

elektrického proudu. V tomto případě mělo být množství stlačeného vzduchu takové, aby až do zastavení setrvačností se pohybujícího dalekohledu se vytlačovalo do ložiska dostatečné množství oleje. Skutečnost však byla bohužel jiná, a to proto, že po několika desítkách hodin provozu vzduch z láhve difundoval do oleje, takže v láhvi pak žádný nebyl. Po zapnutí byl sice okamžitě k dispozici potřebný tlak, ale v případě vypnutí nebo výpadku elektrického proudu bylo ložisko okamžitě suché. Když nastal tento stav při pohybu dalekohledu maximální rychlostí, povolila kompozicová vrstva v místě nejhoršího spojení a objevila se popsaná závada.

Její oprava nebyla jednoduchá, protože bylo nutno odlehčit ložisko, které, jak už víme, nese váhu přibližně jedné parní lokomotivy. S ohledem na konstrukci jižního konce hodinové osy bylo možno zvednout dalekohled jen o 20 mm a v tomto značně omezeném prostoru byla vykonána oprava, spočívající v odstranění poškozené části kompozice, nalití vrstvy nové a v jejím přizpůsobení povrchu ložiskové koule zaškrábáním. Přes velice omezený pracovní prostor se oprava podařila na první pokus. Její definitivní dokončení spočívalo v nahrazení původní tlakové láhve tlakovým rezervoárem, který má sice objem jen 10 litrů, ale je gumovou blánou rozdělen na dvě části, z nichž ježna je za klidového stavu naplněna dusíkem o tlaku 35 kp/cm². Při spuštění čerpadla je olej tláčen do části druhé a deformuje membránu až do dosažení rovnovážného stavu při tlaku 70 kp/cm². Za tohoto stavu je pak v jedné části olej a v druhé části dusík, přičemž obě média mají stejný tlak a gumová membrána půlí uvedený objem. V případě výpadku proudu je pak k dispozici 5 litrů oleje s tlakem postupně klesajícím ze 75 na 35 kp/cm², přičemž tlak potřebný pro provoz ložiska je 30 kp/cm². Těchto 5 litrů stačí na provoz po dobu minimálně 20 s, přičemž maximální doba doběhu při největší rychlosti je 8 s. Máme tedy systém s koeficientem bezpečnosti 2,5 až 3. Tento systém se plně osvědčil a spolu s úpravami ložiskových polštářů, umožňujících jejich demontáž bez rozebrání dalekohledu, bude použit i u dalších přístrojů dodavatelské firmy.

Druhou záhadou, která se u dvoumetru vyskytla, bylo to, že během pozorování docházelo k dejustáži optických os dalekohledu a pointeru. Tento jev byl způsoben dvěma skutečnostmi. Jednak je nutno počítat s chybovými deformacemi tubusu vlastní vahou a jednak pohybem zrcadla na zmíněných 18 úložných bodech. Závadu se podařilo odstranit tak, že bylo změněno působitě reakcí úložných bodů. Zrcadlo při pohybu tubusu vykonává pohyb, který dosti dobře kompenzuje průhyb tubusu. Dále byla provedena úprava tlačných tyčí, které působením na zrcadlo kompenzaci napomáhají a definují velikost kompenzačních pohybů. Konečně byly upraveny poměry ve spojovacích přírubách tubusu vložením podložek, takže nyní se jedná o předpjatá spojení, zaručující vyšší tuhost tubusu. Výsledkem popsaných úprav je možnost docílit expozic o délce až jedné hodiny a pointovat přitom primární systém pointerem, aniž dojde k neshodě mezi směrem os pointeru a hlavního zrcadla větší než 1". Popsané opravy provedli pracovníci firmy Carl Zeiss Jena v rámci záruční lhůty, kterou jsme na tento přístroj měli.

Nyní však dosti o věcech daných a již minulých a obraťme svou pozornost na nové nápady, jejichž smyslem je

udržovat dvoumetr na úrovni současné techniky, a ne na úrovni roku 1967. Smyslem všech úprav, které byly a budou na 2m dalekohledu provedeny, je dosáhnout v první řadě větší rychlosti spektrografů, použitím nových pozorovacích metod zvýšit použitelnost přístroje a zvýšit provozní spolehlivost automatiky.

Rychlost spektrografů lze zvýšit zejména zvětšením množství světelné energie dopadající na vstupní štěrbinu spektrografu. Je překvapující, že zde jsou skutečně velké rezervy. Kupříkladu hranol, kterým se rozšiřuje stopa hvězdy, má ztráty cca 30 % a to je již hodnota, která stojí za přemýšlení. Zejména u coudé spektrografu, kde podobné hranoly jsou dva a kde tudíž ztráta dosahuje cca 50 %, je zlepšení energetické bilance nejvýše potřebné. Proto jsem již učinili pokusy, při nichž bylo vyzkoušeno zařízení, které je schopno zajistit rozšiřování spektra i derotaci a navíc ještě kontroluje zaostření, k čemuž využije nepozorovanou spektrální oblast a nepůsobí tedy vůbec žádné ztráty. Dichroické zrcátko rozdělí přicházející světlo tak, že do spektrografu odrazí pouze světlo v pozorované spektrální oblasti a propustí původním směrem ostatní světlo, použitelné pro popsané účely.

Dalším pokrokem by byla realizace děliče obrazu, jehož funkcí je dopravit do spektrografu světlo, které za normálních okolností dopadne mimo vstupní štěrbinu. Diplomní práce s tímto tématem byla zdárně obhájena a výpočty provedené v poslední době ukazují, že přístroj bude snad použitelný i u nás, a nejen v místě jeho prvního praktického použití na hvězdárně ve Victorii v Kanadě. Jeho aplikace si však vyžádá poměrně rozsáhlé změny v optice celého dalekohledu, které jsou nyní předmětem výpočtů.

V poslední době našla zejména ve Francii uplatnění spektrometrická metoda, která odstraňuje hlavní nedostatek pozorování spektrofotometrem. V klasickém uspořádání totiž fotonásobič zpracovává pouze světlo, vstupující do něj štěrbinou, a všechna ostatní tak těžko získaná energie se ztrácí bez užitku. Přednost spektrografu vůči spektrofotometru je v tom, že fotografická deska zpracovává současně světlo všech vlnových délek, takže z tohoto hlediska nic nepřichází nazmar. Proti použití fotografické spektrometrie mluví pouze malá dosažitelná přesnost, daná vlastnostmi fotografických materiálů.

Nedostatky obou zmíněných metod odstraňuje tzv. Fourierovská spektrometrie. Její podstata spočívá v tom, že světlo z dalekohledu vstupuje na Michelsonův interferometr, kde dochází k interferenci jednotlivých vlnových délek světelného záření, přičemž příslušné změny intenzity jsou měřeny fotonásobičem a registrovány. Takto vzniklá funkce změny intenzity na posuvu pohyblivého zrcadla Michelsonova interferometru je podrobena Fourierově transformaci, kterou zpravidla provádí počítač, a výsledkem je závislost intenzity na vlnové délce, tedy vlastně to, co obvykle dostáváme po proměření spektrogramu na mikrofotometru a následné redukci na počítači. Tato cesta je velice perspektivní, protože nese spolu se zvýšením přesnosti i využití všeho světla soustředěného dalekohledem.

Předpokládáme, že v nejbližších letech dojde k výměně stávající elektroniky za novou. Protože u nové elektroniky bude použito mnoha totožných elektronických okruhů jakož i odečítání souřadnic digitálním způsobem, lze očekávat, že spolehlivost a opravitelnost bude lepší než nyní. K zajištění všech potřebných funkcí celého systému, tvořeného kopulí a dalekohledem a k zajištění potřebných korekcí bude součástí elektroniky malý jednoúčelový počítač.

Uvedené tři projekty patří k tzv. velkým. Nejsou nikterak fantastické, ale vyžadují velké množství experimentální práce, která je zdlouhavá. Připočítáme-li k tomu ještě nutný vývoj dalších přístrojů, které tvoří jakési zázemí dvoumetru, jako například mikrofotometr a pod., zjistíme, že nás čeká velké množství práce a starostí, a že budeme velice spokojeni, když při dalším kulatém výročí si budeme moci některé ze zde uvedených položek "odfajfkovat".

J.Vondrák

K problému laserové lokace Mésíce

1. Úvod

S rozvojem kosmonautiky a laserové techniky se v posledních letech objevila možnost zpřesnit parametry pohybu naší přirozené družice - Mésíce. Kromě směru spojnice Země - Mésíc je nyní technicky velice dobře možné určit i její délku, a to s přesností nebývale vysokou. Uvážíme-li, že za dnešního stavu techniky lze tuto vzdálenost určit s přesností až 15 cm, je to relativní přesnost řádově 10^{-9} , zatímco pro úhlová měření z povrchu Země je s největší pravděpodobností hodnota 10^{-7} (v příčném směru) vzhledem k přesnosti přístrojů i rušivému vlivu zemské atmosféry nepřekonatelnou hranicí. Na tomto místě je třeba poznamenat, že laserová lokace Mésíce je přínosem nejenom pro zpřesnění jeho pohybových rovnic, ale i pro určení fyzické librace Mésíce, vzájemných pohybů zemských kontinentů, změn v rotaci Země, pohybu zemských pólů a dokonce se (po delší řadě pozorování) očekává i případné určení sekulární změny gravitační konstanty.

K tomuto účelu jsou na Mésíci již nyní instalovány čtyři speciální laserové odražeče. Tři z nich jsou americké výroby a byly na povrch Mésíce vyneseny posádkami lodí Apollo 11, 14 a 15. Čtvrtý odražeč francouzské výroby je umístěn na palubě sovětského Lunochodu. Od roku 1969 byla již vzdálenost Země - Mésíc mnohokrát laserem úspěšně změřena. Lze právem očekávat, že ani československá věda nebude chtít zůstat v tomto směru pozadu za světovým vývojem a v nejbližších letech se pokusí o laserové spojení s Mésícem. Navzděčuje tomu zajisté i ta okolnost, že reálný základ již v ČSSR existuje. Československo bylo první ze socialistických zemí, kde se podařilo zasáhnout laserem umělo družici Země (již v r. 1970), a jistě nikoliv náhodou byl Astronomický ústav ČSAV pověřen kompletací společného laserového radaru států, podílejících se na mezinárodním programu Interkosmos. Nicméně zde existuje ještě nemálo problémů, které bude nutno pro úspěšnou laserovou lokaci Mésíce vyřešit. K jednomu

z nich by chtěl přispět i tento článek.

2. Podmínky pro úspěšnou laserovou lokaci

Pokud se týká ryze geometrických podmínek úspěšné laserové lokace Měsíce, lze mluvit o dvou.

a) Je nutné docílit, aby vyslaný světelný impuls zasáhl odražeč na povrchu Měsíce. Přesnost, s jakou je toho třeba dosáhnout, lze určit z úhlu rozbíhavosti laserového paprsku, který je možno v jistém rozmezí vhodným optickým systémem měnit. Na druhé straně je však nutné mít na paměti, že poměr energie přijaté a vyslané je pro tutéž aparaturu při správném zacílení nepřímě úměrné čtvrté mocnině určené vzdálenosti a druhé mocnině úhlu rozbíhavosti paprsku. Dolní hranicí úhlu rozbíhavosti (která je dána hlavně vlastnostmi atmosféry) je hodnota zhruba 5", a i při této hodnotě lze pro dané odražeče dosáhnout poměru jen asi 10^{-19} , což je velmi málo. Znamená to, že při energii 5 joulu vyzářené během 5 nanosekund (což jsou charakteristické hodnoty pro současné lunární experimenty) se v detekčním systému vybudí průměrně pouhý jeden fotoelektron. Se zřetelem k existenci šumu je tedy i při těchto hodnotách nutné registrovat takové vzácné impulsy větší množství a výsledek vyhodnotit statisticky. Vezmeme-li v úvahu, že rubínové lasery jsou schopny vysílat pulsy o tak velkém výkonu zhruba tři za minutu, neodmyslné pak pouze jeden za patnáct minut, je zjevně nutné udržet zacílení s přesností několika málo vteřin po dobu jedné až dvou hodin.

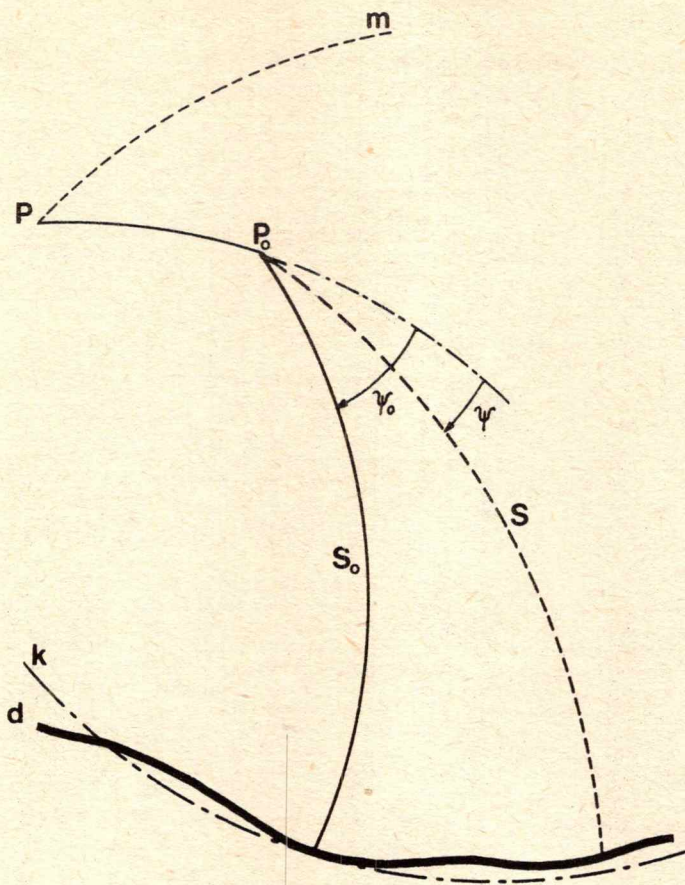
b) Je zapotřebí alespoň přibližně předem odhadnout okamžik, ve kterém se odražený světelný impuls vrátí zpět k pozorovateli. Obecně je možno říci, že čím přesněji tento okamžik odhadneme, tím menší počet čítačů nutných k registraci času návratu impulsu je zapotřebí. Přesnost odhadu je pak dána přesností použitých efemerid Měsíce. Vzájemná vzdálenost těžišť Země a Měsíce, jak ji udávají dnes běžně dostupné efemeridy (ve značení Mezinárodní astronomické unie $j = 2$) je dána s přesností zhruba 0,8 - 1 km. V Jet Propulsion Laboratory již vyvinuli efemeridy (značené LEL6), dávající přesnost 0,2 - 0,3 km, které však bohužel nejsou zatím běžně dostupné.

Dále se zabýváme pouze prvním z uvedených problémů.

3. Zacílení laseru.

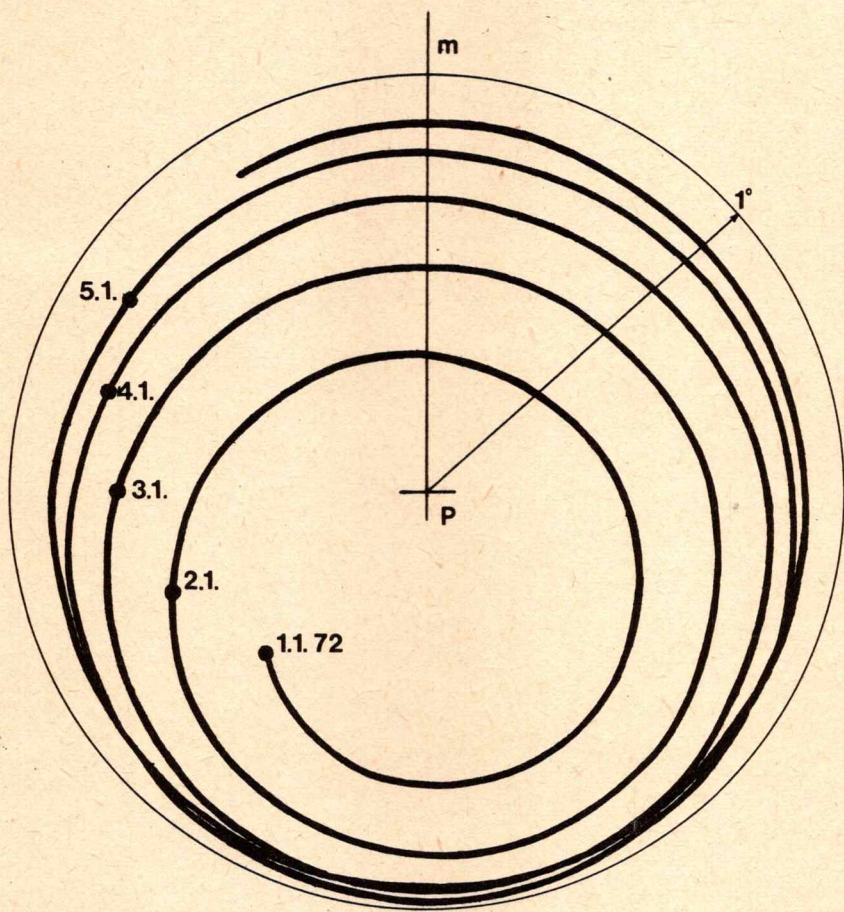
Je pochopitelné, že zacílit optickou osu laseru na Měsíc je možné obecně jakoukoliv dvouosou montáží (ať již azimutální nebo paralaktickou). Takové řešení však vyžaduje nelineární pohyb kolem obou os současně, což by zřejmě nebyl jednoduchý úkol. Jistě by k tomuto účelu mohl být využit již existující dalekohled na vhodné montáži s pohonem obou os, montáž laseru na takovém dalekohledu by jej však na delší dobu vyřadila z provozu pro jiné účely. Naskýtá se tedy možnost sestrojít jednocelovou montáž nesoucí vlastní laser a postavit ji poblíž některého velkého dalekohledu. Ten by se pak mohl bez podstatných úprav použít jako optický systém pro příjem odražených impulsů.

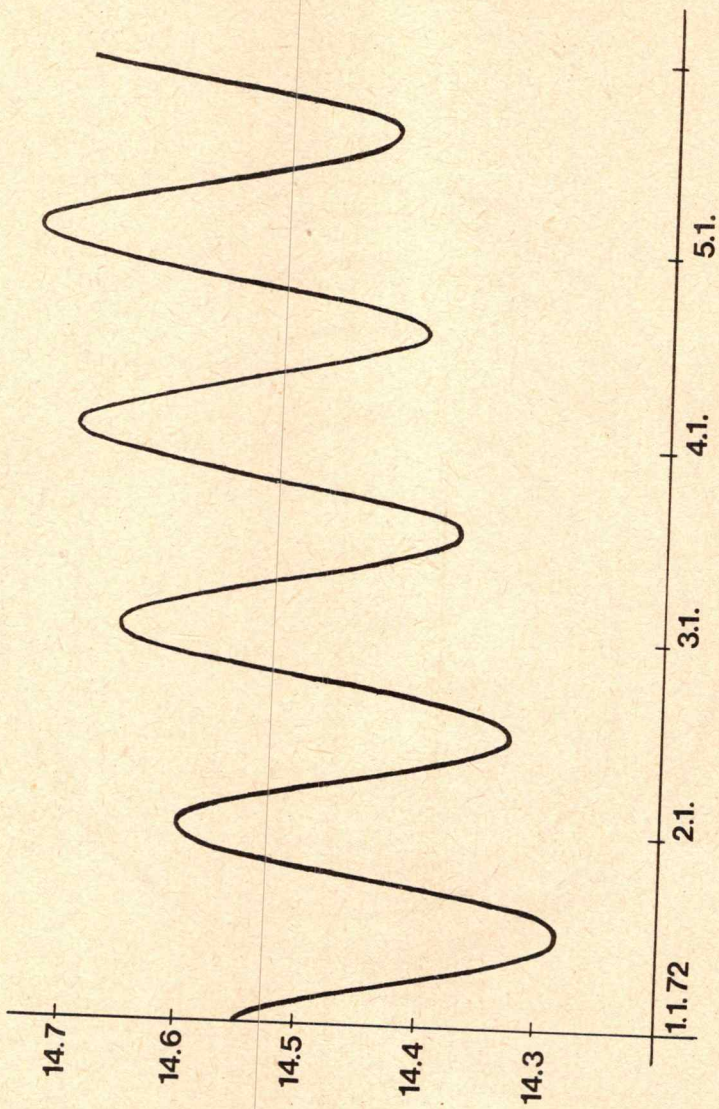
Z praxe při navádění fotografických komor či laserů na umělé družice Země víme, že jistou část jejich dráhy lze aproximovat vedlejší kružnicí na nebeské sféře. Je zde ovšem jistý rozdíl v tom, že požadovaná přesnost navedení je u dru-



Žice podstatně nižší (u fotografických komor řádově stupěň, u laserů minuta) a není třeba tak dlouhý interval sledování, na druhé straně je však zdánlivý pohyb družice na obloze podstatně rychlejší. Pokušme se tedy nejprve zjistit prvky vedlejší kružnice oskulující zdánlivou dráhu Měsíce po nebeské sféře. Je přitom třeba si uvědomit, že vzájemný pohyb pozorovatele a odražeče je dán jako výslednice tří pohybů:

- a) rotace Země kolem její osy
- b) oběhu Měsíce kolem Země





c) rotace Měsíce kolem jeho osy

Převládající složkou v tomto případě je první ze jmenovaných pohybů, třetí složka je velice malá.

Vedlejší kružnice je dána jednak polohou jejího pólu, jednak úhlovou vzdáleností kružnice od tohoto pólu. Na obr. 1 je P světový pól, P_0 pól oskulační kružnice k ke zdánlivé dráze Měsíce d . Poloha Měsíce ve dráze je dána úhlem ψ a obloukem S , které jsou obě funkcemi času T , v okamžiku T_0 (ve kterém hledáme oskulační prvky) nabývají tyto veličiny hodnot ψ_0 a S_0 . Místní poledník je označen m . Polohu pólu P_0 a velikost úhlu S_0 je třeba zvolit tak, aby křivky k a d vzájemně oskulovaly, t.zn. aby byly splněny podmínky

$$S(T_0) = S_0, \quad \frac{\partial S}{\partial T}/T=T_0 = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial T^2}/T=T_0 = 0,$$

poněvadž rovnice vedlejší kružnice k je $S=S_0$. Kromě těchto veličin, nás bude ještě zajímat i rychlost pohybu Měsíce kolem pólu P_0 . Malá ukázka pohybu pólu P_0 a rychlosti $\partial\psi/\partial T$ s časem pro stanici o souřadnicích $\varphi = 50^\circ N$, $\lambda = 15^\circ E$ a těžiště Měsíce je znázorněna na obr. 2 a 3. Z obrázků je patrné, že jak pohyb pólu oskulační kružnice, tak rychlost pohybu Měsíce kolem něho má výrazně periodický charakter o periodě cca 25 hodin. Z rozboru změn všech tří veličin za delší období bychom zjistili, že kromě toho existuje ještě perioda jednoměsíční se značně menší amplitudou. Vzdálenost pólu oskulační kružnice od světového pólu nepřestoupí však 1° (obr. 2), rychlost se pohybuje v intervalu $\pm 2\%$ od hodnoty $14^\circ,5/\text{hod.}$ (obr. 3). Tyto skutečnosti naznačují způsob navádění laseru na Měsíc. Jak poloha pólu P_0 , tak i rychlost pohybu Měsíce kolem tohoto pólu se totiž mění s časem poměrně pomalu. Lze tedy právem očekávat, že při vhodné zvoleném pólu a rychlosti bude možné udržet optický systém laseru zaměřen s požadovanou přesností na zvolený cíl i po další časové období. Polohu pólu i rychlost zvolíme např. tak, aby pozorovaný bod a optická osa laseru pohybující se po vedlejší kružnici splývaly ve třech časových okamžicích vzájemně od sebe vzdálených jednu hodinu. Toho lze docílit, zvolíme-li rychlost jako lineární funkci času. Grafické znázornění poloh pólu vedlejší kružnice a rychlosti pro první dva dny již dříve diskutovaného období podávají obr. 4 a 5. Na obr. 6 vidíme rozdíly mezi takto aproximovanou a skutečnou polohou Měsíce na nebeské sféře v obou souřadnicích S a ψ . Z obrázku vyplývá, že námi předem daná podmínka (aby zacílení bylo provedeno s přesností několika málo vteřin) je dobře splněna; rozdíl nepřesáhne v absolutní hodnotě $3''$. Při zkrácení intervalu by se rozdíly ještě snížily.

4. Závěr

Z obsahu předchozí kapitoly vyplývá, že zdánlivou dráhu pozorovaného bodu měsíčního povrchu na nebeské sféře lze s dostatečnou přesností aproximovat po dobu až dvou hodin vedlejší kružnicí, přičemž rychlost pohybu téhož bodu lze s toutéž přesností aproximovat lineární funkcí času. Během dvou hodin relativní změna rychlosti nepřestoupí několik promile, v žádném případě se však neliší od hodnoty $14^\circ,5/\text{hod.}$ o více než 2 procenta. Poloha pólu vedlejší aproximační kružnice se nachází vždy uvnitř kružnice o poloměru 10° opsané kolem světového pólu. Z toho všeho plyne následující

