

Síť laserových družicových radarů vyvinutých na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské (FJFI) ČVUT pod vedením prof. Karla Hamala

Antonín Novotný

1. Úvod

V roce 1957 byla vypuštěna první umělá družice Země, v roce 1960 byl realizován první laser (aktivní materiál, rubínový krystal), v roce 1962 byl uskutečněn J. Kukurinem experiment s detekcí laserového světla odraženého od povrchu Měsíce a v roce 1964 byla vypuštěna první družice s laserovými odražeči (koutové optické hranoly) BEACON-B. Tím byly vytvořeny předpoklady pro přímé měření kosmických vzdáleností laserovým dálkoměrem (radarem). Astronomové a geodeti získali dálkoměr k přímému měření vzdáleností několika tisíc kilometrů (později i několika set tisíc kilometrů - přímé měření vzdálenosti odražečů umístěných na Měsíci). Při měření se využívá dosud nejpřesněji měřitelná fyzikální veličina – frekvence.

V roce 1964 byl na FJFI ČVUT spuštěn první rubínový laser (rubínový krystal byl vyroben ve spolupráci se Spolkem pro chemickou a hutní výrobu Ústí nad Labem a Monokrystaly Turnov). Do roku 1970 pokračoval vývoj impulsních rubínových laserů, měřicích detekčních metod a opticko-mechanických dílů na FJFI tak, že v roce 1970 byl na observatoři Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického (VÚGTK) uskutečněn experiment s laserovým měřením vzdálenosti družice.

Rychlý rozvoj laserového měření v Československu byl umožněn dobrým stavem technické, vědecké a výrobní základny.

- Na FJFI se rychle rozvíjel nový obor „kvantová elektronika“. V prvním období se vědecká práce zaměřila na problematiku pevnolátkových laserů. Paralelně byly na FJFI vyvíjeny detekční a měřicí metody a přístroje pro laserovou techniku. Výzkumné a vývojové práce na FJFI byly zahajovány s malým zpožděním vůči světovým laboratorům. Prakticky neexistovaly průmyslově vyráběné produkty k laserové technice. Bylo to období hledání optimálních řešení.
- VÚGTK se po vypuštění první družice s laserovými koutovými odražeči v roce 1965 začal zabývat možnostmi využití těchto měření pro geodézii. P. Navara kontaktoval K. Hamala v roce 1967 a v rámci plenárního zasedání COSPAR «Committee on Space Research» v Praze se uskutečnila jednání s M.R. Pearlmanem, pracovníkem NASA, o účasti Československa ve vznikající vědní specializaci „měření vzdáleností družic pomocí laserových družicových dálkoměrů“.
- V Astronomickém ústavu ČSAV dosáhli L. Sehnal a P. Lála významných vědeckých výsledků v oboru Dynamika družic.
- Monokrystaly Turnov a Dioptra Turnov (J. a J. Kvapilovi) měly k dispozici technologie a významné odborníky v optice a v optických technologiích, což umožnilo rychlou realizaci nezbytných optických dílů pro rozvoj laserových

technologií založených na československých součástkách. Obě pracoviště patřila ke světovým špičkám v tomto oboru. Po celou dobu používání rubínových laserů Spolek pro chemickou a hutní výrobu Ústí nad Labem (F. Kment) zajišťoval pěstování monokrystalů rubínu. Vývoj a výroba aktivních krystalů typu YAG:Nd byla významným výrobním programem v Monokrystalech Turnov.

2. Princip činnosti laserového družicového radaru (LDR)

SLR (Satellite Laser Ranging) používá krátké laserové impulsy a rychlé optické detektory k měření vzdálenosti z pozemních stanic k satelitům s koutovými odražeči laserového světla. Měří časový interval mezi vyslaným impulsem a přijatým impulsem. Ze znalosti rychlosti světla v prostředích, v nichž dochází k šíření optického signálu, z průběhu dráhy, kterým se optický signál v nehomogenním prostředí šíří, a z dalších jevů (např. vlastnosti odražečů na družici, zpoždění optického signálu v elektronice) se vypočítává vzdálenost družice od LDR (definuje se jako vzdálenost od průsečíku os montáže k těžišti družice) v okamžiku měření. Nedílnou součástí kromě údaje o vzdálenosti (měřeném časovém intervalu) je též údaj o okamžiku vyslání laserového impulsu k družici s přesností lepší než 100 ns UTC (Universal Time Coordinated).

Výsledkem měření je určení malého segmentu trajektorie družice. Pro využití výsledků je nezbytné měřit a dopočítávat celou trajektorii družice. Pro tento účel jsou analyzována naměřená data shromážděná z co největšího počtu LDR umístěných podél trajektorie a z několika oběhů družice. Do principu činnosti je proto nutno zahrnout koordinovanou činnost globální sítě LDR.

Laserové družicové radary a využívají tyto základní subsystémy:

- *Laserový vysílač*: zdroj světelných impulsů, jejichž délka je srovnatelná nebo kratší než předpokládaná přesnost měření časového intervalu (v současné době menší než 10 ps); vlnová délka vysílaného laserového záření pokud možno v oblasti maximální spektrální účinnosti detektoru optického záření; velký jas na výstupu z vysílacího teleskopu (úhlová šíře svazku výstupního laserového impulsu je ale dána především nutností „zasáhnout“ laserovým svazkem družici pro danou nepřesnost navádění montáže LDR na družici). Laserový svazek je v mnoha případech vysílán teleskopem, který současně slouží k přijímání signálu odraženého od družice (Měsíce). Rozdíl v intenzitě vyslaného a přijatého laserového signálu může být až 20 řádů. Je nutno respektovat odolnost optických dílů vůči velké intenzitě vysílaného světla (elektromagnetického záření).
- *Laserový přijímač*: soubor opticko-mechanických dílů a elektronických přístrojů ke zpracování přijatého signálu. Hlavní části tvoří:
 - přijímací teleskop a optický systém (může být společný s vysílacím teleskopem);
 - detektor slabých optických impulsů (až do jednofotoelektronové detekční hladiny);
 - elektronické přizpůsobení vysílaného a přijímaného světelného impulsu systému pro měření časového intervalu mezi vyslaným a přijatým impulsem (v současné době s přesností lepší než 10 ps).

- *Naváděcí montáž*: automatické sledování družice s přesností od několika úhlových sekund do jedné úhlové minuty za současného splnění požadavku rychlého pohybu (1 až 10 deg/s). Na naváděcí montáži jsou umístěny vysílače a přijímací teleskopy. Dále na ní mohou být umístěny hledáčky a sledovací televizní kamery; plně automatizované systémy budou vyžadovat umístění speciálních kvadrantových detektorů.
- *Řídící a měřicí elektronika, softwarové vybavení*: zabezpečení kompletní činnosti LDR:
 - výpočet drah družic,
 - navádění montáže po vypočtené dráze družice s přesností desítek úhlových vteřin,
 - řízení měření časových intervalů a přiřazování absolutního času k měření,
 - analýza a editace naměřených dat,
 - testování a kalibrace LDR (testování nastavení montáže pomocí hvězd, nastavování optiky vysílače a přijímače, kalibrace měření časových intervalů).
- *Frekvenční a časový standard*: základní systém pro zajištění vysoké přesnosti měření časových intervalů (10^{-9} – 10^{-11}) a přiřazení světového času k měření s přesností 50 ns vzhledem k UTC.
- *Internetový komunikační kanál*: nezbytný pro vzájemnou komunikaci s datovými a řídicími centry, přijímání potřebných dat (několikrát denně) a předávání výsledků (nejpozději do 24 hodin po měření).

3. Vývoj laserového družicového radaru na KFE FJFI ČVUT

3.1. Přípravné období 1965 – 1969

V roce 1964 neměla Katedra fyzikální elektroniky FJFI jakékoli vybavení z optiky a v podstatě ani ne z elektroniky použitelné pro nový obor „kvantová elektronika“, který se na katedře díky iniciativě K. Hamala a V. Sochora začal rozvíjet. Odpovídající materiálová součástková a přístrojová základna nebyla komerčně dostupná. První etapy prací, spočívaly ve vývoji a výrobě všech nezbytných prvků (provizorní napájecí zdroje, spínací prvky, čerpací dutiny, výbojky, držadla zrcadel apod.). Ve spolupráci s odborníky v Monokrystalech Turnov, Dioptře Turnov a Meoptě Přerov byla vyvíjena dielektrická zrcadla napařovaná nejprve přímo na aktivní rubínové krystaly, optické součástky apod. V té době nebyly k dispozici žádné impulsní detektory laserového světla, které bylo nutno vyvinout. Originálním řešením čerpací hlavice, vyvinutým celou výzkumnou skupinou, byla kulová dutina, jejíž hlavní výhodou byla malá čerpací energie. První pevnolátkový rubínový laser byl na katedře spuštěn v roce 1964.

V letech 1966 až 1967 intenzivně pokračoval výzkum a vývoj komplexní problematiky pevnolátkových laserů, v té době rubínových laserů¹. V roce 1967 až

¹ DAŘÍČEK, T. – HAMAL, K. – NOVOTNÝ, A. – SOCHOR, V.: *Ruby Laser Using Rotating Mirror and Liquid Bleacher between Quartz Plates Ruby Laser*. Czech. J. Phys., B15, 1965, No. 12. s. 933. HAMAL, K. – SOCHOR, V. – DAŘÍČEK, T. – NOVOTNÝ, A.: *Comparison of Rotating Mirror and Liquid Bleacher as a Q-Switch for a Ruby Laser*. J. Sci. Instrum., 1967, Vol. 44, s. 548.

1968 byl K. Hamal na dlouhodobé stáži v NRL Ottawa, Kanada, A. Novotný byl na počátku roku 1968 na několikaměsíční stáži ve FIAN v Moskvě v laserové laboratoři nositele Nobelovy ceny za fyziku akademika Basova a akademika Prochorova. Oba tyto pobyty přispěly k urychlení vývoje nových laserů mimo jiné proto, že nebylo nutno pokračovat v práci metodou pokusů a omylů.

Z hlediska možností rychlých vývojových prací na laserových systémech bylo významným opatřením umožnění vedlejší hospodářské činnosti vysokým školám v roce 1966. Této možnosti jsme okamžitě využili, výsledky naší činnosti jsme začali nabízet jako aplikace podnikům a ústavům. V roce 1967 jsme vystavovali laserový systém na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně.

V roce 1967 se v Praze konal kongres COSPAR. Pro toto zasedání byl připraven experiment využívající montáže protiletického kanónu jako naváděcí montáže pro laserové měření vzdálenosti družic. Experimentální zařízení bylo předvedeno M.R. Pearlmanovi z NASA. M. R. Pearlman se seznámil s našimi výsledky v oblasti rozvoje laserové techniky a předběžně byly projednány možnosti zapojení Československa do této oblasti vědeckého výzkumu.

NASA v roce 1964 vypustila první družici s laserovými odražeči BEACON B a v roce 1965 družice BEACON C a GEOS 1. První výsledky z laserových měření, která se uskutečnila na observatoři NASA, prokázala, že měření vzdálenosti družic pomocí impulsních laserů je perspektivní vědeckou metodou, ale že úspěch této metody je podmíněn vybudováním sítě LDR v celosvětovém měřítku.

V roce 1969 byly realizovány stabilizované vysokonapěťové impulsní zdroje pro lasery s výkonovým elektronickým tyristorovým řízením z ČKD Polovodiče (v roce 1969 evropská novinka). Na vývoji kondenzátorů pro lasery jsme v té době spolupracovali se ZEZ Žamberk a Teslou Lanškroun. Vyvinutý typ kondenzátoru byl později používán mimo jiné také ve Fyzikálním ústavu ČSAV při výzkumu plazmatu a pro další technické aplikace.

3.2. Experiment na observatoři VÚGTK Skalka 1970

V roce 1970 se pro měření poloh umělých družic Země (UDZ) používala fotografická metoda (fotografování na pozadí hvězdné oblohy s následným vyhodnocením trajektorie). Přesnost určení směru k UDZ byla u nejpřesnějších fotografických družicových komor několik obloukových vteřin. Měření vyžadovalo časově dlouhé a technicky náročné zpracování. Další pronikavé zlepšení této metody je vyloučeno jednak vlivem atmosférického zkreslení, jednak technickými vlastnostmi citlivých fotografických vrstev a jejich podložek. Na observatoři VÚGTK byla k dispozici velká fotografická družicová kamera SBG od firmy Karl Zeiss Jena. Naváděcí montáž této kamery se ukázala jako vhodná pro realizaci experimentu s laserovým měřením vzdálenosti družic².

² HAMAL, K. – DAŘÍČEK, T. – NAVARA, P. – NOVOTNÝ, A.: *Experimental Satellite Laser Radar at Ondřejov Observatory*. Czech. J. Phys., B21, 1971, s. 1118.

DAŘÍČEK, T. – HAMAL, K. – NAVARA, P. – NOVOTNÝ, A.: *Laser Ranging on Ondřejov Observatory*. Bull. Astronom. Inst. Czech., Vol. 22, 1971, No. 3, s. 124.

DAŘÍČEK, T. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – KUBEČEK, V. – NOVOTNÝ, A.: *Exfokální čerpání v dvoueliptické dutině*. In: Sborník Lasery ve vědě a technice. Praha, ČVTS 1971.

Laserové měření vzdálenosti k UDZ nabízelo v porovnání s fotografickou metodou kromě získání výsledku v reálném čase zlepšení přesnosti měření poloh UDZ o jeden až dva řády s technickými prostředky dostupnými v roce 1970. Ve srovnání s radiovými lokátory přinášelo použití laseru kromě extrémní přesnosti 10^{-6} - 10^{-8} hlavně podstatné zmenšení rozměrů, váhy a příkonu zařízení, snížení celkového potřebného vysílaného výkonu při stejném dosahu, možnost zvýšení odrazu od cíle o několik řádů pomocí koutových odražečů na družicích a v neposlední řadě získání krátkého světelného impulsu bez složitých tvarovacích elektronických obvodů, směrovost vysílače bez velikých anténních systémů a možnost účinné filtrace přijatého signálu.

Z hlediska výkonu potřebného k získání dobře detekovatelného odraženého signálu je snahou experimentátora volit minimální divergenci vysílaného svazku a minimální délku světelného pulsu. Obtížnost přesného nasměrování laserového vysílače na pohybující se družici a jiná technická omezení v přijímacím řetězci nutí ke kompromisu. Rozbíhavost odraženého svazku od družice je omezena tzv. rychlostní aberací. Laserový světelný svazek přechází z pevného systému souřadnic vůči Zemi do pohyblivého systému souřadnic družice a zpět, čímž dochází k jeho odklonu ve směru tangenciální rychlosti družice, které lze spočítat dvojnásobnou Lorentzovou transformací. Divergence odraženého svazku musí být tak velká, aby jeho stopa na Zemi pokryla místo přijímače, a to i když je družice v kulminacním bodě, kde je odklon odraženého svazku, způsobený rychlostní aberací, největší. V opačném případě je třeba pro detekci odraženého signálu použít přijímač na zvláštní montáži umístěné ve směru průmětu pohybu družice. V době experimentu některé družice na základě zkušeností získaných z první družice BEACON B již takto upravené odražeče měly.

Později bylo prokázáno, že při dostatečném vysílacím výkonu a dostatečně citlivém přijímači je měření možné. Stopa odraženého impulsu má na Zemi přibližně gaussovské rozložení; měření v tomto případě probíhá na úrovni signálu z okrajů této stopy.

Výsledky a závěry z provedeného experimentu

- Nejvýznamnějším výsledkem experimentu bylo změření vzdálenosti družice GEOS B.
- Měření odrazu od mraků; předběžný výsledek pro vývoj lidarů.
- Nečekaným výsledkem při fotografování laserového impulsu ze vzdálenosti 5 km od montáže bylo reprodukovatelné vypaření emulze na filmu i při zaclození fotoaparátu clonou 22. Experiment upozornil na nebezpečnost výkonných laserových impulsů i na relativně velkou vzdálenost z hlediska poškození zraku.
- Nejdůležitějším výsledkem experimentu bylo potvrzení postupu prací na vývoji laserového radaru. Prokázali jsme schopnost zapojit se do mezinárodní spolupráce při vývoji LDR.

Základní principy podrobně popsané v této části byly používány v modifikovaných podobách i v budoucích LDR vyvinutých na FJFI. V době úspěšného experimentu na Skalce byly laserovou metodou měřeny vzdálenosti družic pouze v USA a ve Francii.

3.3. Vývoj a realizace sítě LDR Interkosmos první generace

Experiment na Skalce prokázal, že problematika LDR je příliš široká a nákladná na to, aby jedno vědecké pracoviště bylo schopno v tomto úkolu úspěšně obstát. V daném okamžiku nebyla k dispozici vhodná naváděcí montáž, specializovaný čítač pro měření časových intervalů, přístrojové vybavení pro časovou službu a fotonásobič. Uvedená zařízení, pokud byla vůbec dostupná, byla k dispozici pouze z dovozu z devizových zemí.

V roce 1969 sekce „Pozorování umělých družic pro účely geofyziky a geodézie a kosmické fyziky“ Interkosmos ustanovila pracovní skupinu Laserový radar. Tato skupina hledala v členských státech vědecké a realizační možnosti v příslušných oborech, aby bylo možné v co nejkratším termínu vyvinout LDR. Na základě získaných zkušeností a výsledků předběžného experimentu se FJFI přihlásila svou nabídkou spolupráce. V květnu 1971 se v Rize uskutečnilo pod vedením A. G. Masevičové z Astronomického sovětu AV SSSR pracovní zasedání skupiny Laserový radar, na kterém byl vypracován technický projekt laserové družicové observatoře Interkosmos.

Prototyp LDR Interkosmos byl uveden do provozu na observatoři Astronomického ústavu ČSAV v Ondřejově v únoru 1972. Pro urychlení další etapy prací jsme převzali iniciativu a byli jsme pověřeni vedením systémové práce a kompletací LDR, včetně zkušebního a testovacího provozu radarů na jednotlivých observatořích; (K. Hamal byl zvolen koordinátorem pracovní skupiny Laserový radar Interkosmos).

Při své práci jsme využívali postupy, které v té době byly u nás nezvyklé. Mezinárodní koordinace prací jsme uskutečňovali nejen prostřednictvím telefonů a telexů, ale i přímým operativním kontaktem, včetně jednodenních zahraničních pracovních cest. Pro dílčí konstrukční práce, výrobu vzorků a využívání speciálních technologií jsme zapojili tým expertů Domu techniky ČVTS Praha, který jsme pro tento účel v průběhu několika let vytvořili. Koordinace rozsáhlého týmu spolupracovníků v různých ústavech a závodech v českých zemích vyžadovala často přímý operativní styk. Účastnické státy se podílely na vývoji LDR některými přístroji. Výsledkem společného mezinárodního úsilí bylo následující tempo prací:

- 1971 květen: vypracování technického projektu;
- 1972 únor: uvedení prototypu LDR Interkosmos I do zkušebního provozu na observatoři Astronomického ústavu ČSAV v Ondřejově;
- 1972 březen: ověřovací měření vyvinutého prototypu mobilního LDR kontejnerového typu na stadionu Strahov; tato mobilní laboratoř byla v dalších letech použita pro experimenty s měřením znečištění ovzduší (RAMAN lidar);
- 1973 duben: uvedení LDR Interkosmos II³ kontejnerového typu do provozu na observatoři v Rize, Lotyšsko; byly získány první vědecky využitelné výsledky z měření družic, což bylo prokázáno vyhodnocením v CNES, Paříž;
- 1974 srpen: kompletace LDR Interkosmos III na FJFI za účasti odborníků ze zúčastněných států;

³ Na základě získaných zkušeností s prototypem mobilního LDR kontejnerového typu byla na základě našich požadavků vyvinuta v Orličanu Chocen laboratoř LDR umístěná do rámu mezinárodního šestimetrového kontejneru. Skládal se ze dvou oddělených laboratoří. První laboratoř byla osazena hydraulicky zvedaným pilířem pro naváděcí montáž Interkosmos. Druhá laboratoř byla vybavena měřicími přístroji, počítačem, zdroji, náhradními díly a ledničkou. Kontejner byl vybaven zařízením LDR za účasti zahraničních spolupracovníků. V době realizace byla tato koncepce umístění LDR světovým unikátem.

- 1974 září: LDR Interkosmos II po přemístění z Rigy uveden do provozu na observatoři NRIAG v Helwanu v Egyptě⁴;
- 1975 květen: LDR Interkosmos I přemístěn z Ondřejova na observatoř v Borowieci, Polsko;
- 1975 květen: letecky transportovatelný LDR Interkosmos III uveden do provozu na observatoři u La Pazu v Bolívii.

Do budování a výzkumu LDR se postupně zapojovali H. Jelínková, M. Čech, P. Hiršl, V. Kubeček, I. Procházka. Koncem roku 1973 byly práce na jistou dobu zpomaleny v důsledku tragického úmrtí spoluřešitele T. Daříčka na jedné z pracovních cest.

V roce 1974 byl vybudován experimentální LDR na Lidové hvězdárně v Hradci Králové (F. Hovorka).

Prototyp LDR kontejnerového typu jsme se snažili uplatnit jako pojezdovou laboratoř pro dálkové měření znečištění ovzduší na principu měření Rayleighova a Ramanova rozptylu v atmosféře (M. Jelínek)⁵. Experimenty uskutečněné v roce 1975 prokázaly vhodnost této metody pro měření vyšších koncentrací nečistot běžných u zplodin vypouštěných do ovzduší průmyslovými závody. Naše nabídka ale zůstala v té době bez odezvy.

LDR Interkosmos II se v dalších letech na observatoři National Research Institute of Astronomy and Geophysics Helwan (NRIAG), Egypt, stal vědeckým experimentálním pracovištěm našeho týmu v oboru laserové lokace. Tento LDR byl v aktivním provozu do konce roku 1980, kdy byl nahrazen LDR druhé generace.

Přemístěním LDR do Egypta, do PLR a vyvinutím letecky transportovatelného LDR byla zahájena etapa budování sítě LDR, která doplňovala síť NASA na území USA, LDR Smithsonian Astrophysical Observatory Cambridge, Mass., USA, umístěné v Řecku a v Peru a francouzské LDR ve Francii a ve Španělsku.

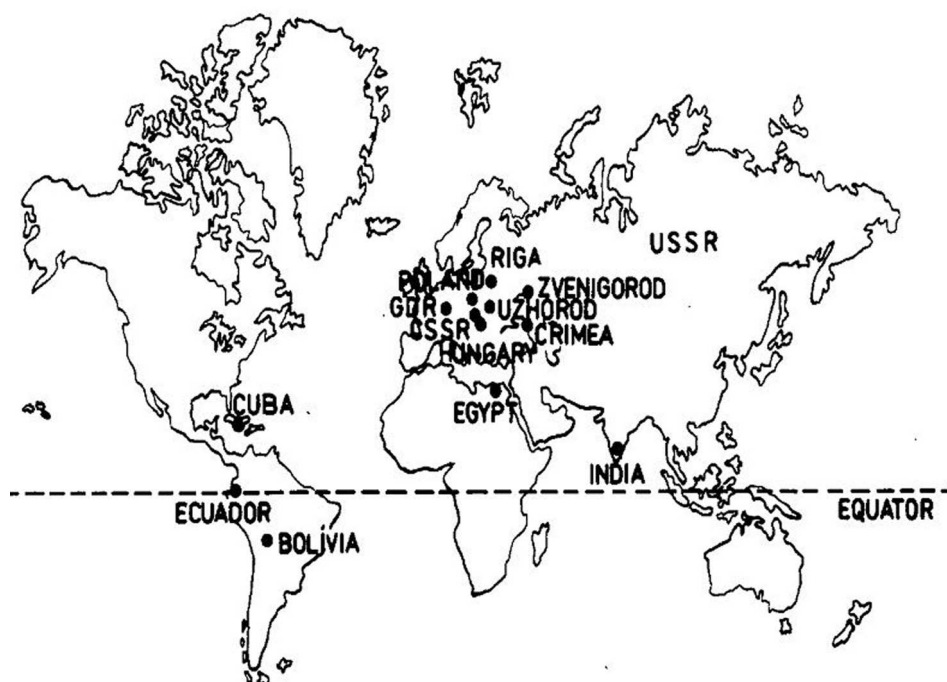
Na budování této sítě jsme se podíleli jako autoři projektu a jeho realizátoři. Tyto stanice jsme vybavovali laserovými vysílači, které jsme vyvinuli, částí řídicí elektroniky a mechanickými optickými částmi laserového přijímače. Kromě stanic v zemích, které se účastnily na realizaci projektu (Bulharsko, Československo, Maďarsko, Německo, Polsko, SSSR), byly vybudovány LDR první generace v těchto mimoevropských státech:

- 1976: Kavalur, Indie;
- 1977: Santiago de Cuba, Kuba;
- 1980: Quito, Ecuador;
- 1984: Nha Trang, Vietnam.⁶

⁴ Kontejner s laboratořemi LDR byl téměř jeden rok skladován v námořním přístavu. Ke zpoždění došlo v důsledku izraelsko-arabské války v roce 1973.

⁵ KVASIL, B. – HAMAL, K. – NOVOTNÝ, A. – JELÍNKOVÁ, H. – SCHMIEDBERGER, P. – JELÍNEK, M. – KUBEČEK, V.: *Dálková detekce atmosférických nečistot pomocí laseru I.* [Výzkumná zpráva.] Praha, 1974.

⁶ NOVOTNÝ, A. – ČECH, M. – LÁLA, P. – NGUYEN NGAN – SCHILLAK, S. – MAKHALOV, I. Y.: *Satellite Laser Radar in Vietnam Socialist Republic.* In: Proceedings of Int. Conf. of the 6th Section Cosmic Physics Interkosmos. Karlovy Vary 1984.



Obr. 1. Mapa sítě LDR Interkosmos první generace

LDR první generace byly určeny pro měření těch družic, které bylo možno vizuálně sledovat. Kromě amerických družic GEOS A, BEACON C, GEOS B a SEASAT tyto LDR též měřily několik družic Interkosmos. Měření družic bylo především určeno pro plnění vědeckých cílů, které stanovily mezinárodní organizace COSPAR a IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Význam LDR první generace se postupně zmenšoval. Vývoj vědy a technologie umožnil dosahovat větší přesnosti měření a měřit vzdálenosti družic bez vizuálního navádění.

Nezanedbatelným výsledkem bylo, že se v uvedených zemích vytvořily vědecké týmy, pracovníci se podrobně seznámili s problematikou LDR. Během kompletací a pracovních pobytů na FJFI ČVUT se autor podílel na přípravě a zajištění kursů pro specialisty ze zúčastněných zemí. Řádné vědecké aspirantury (Jorge R. del Pino, Kuba, R.C.R. Moya, Ekvador) na FJFI byly též zaměřeny na problematiku LDR. Získané znalosti a zkušenosti byly v některých zemích (Kuba, Lotyšsko, NDR, Polsko, Rusko, Ukrajina, Uzbekistán) uplatněny při realizaci LDR třetí generace.⁷

⁷ DAŘÍČEK, T. – HAMAL, K. – KVASIL, B. – NAVARA, P. – NOVOTNÝ, A.: *Mobilnaja lasernaja observatorija s programirovannym mehanizmom navedenija*. In: Sborník vědecké konference Kosmické fyziky Interkosmos. Ulan-Bator, Mongolsko, 1972.
DAŘÍČEK, T. – HAMAL, K. – NAVARA, P. – NOVOTNÝ, A. – MASEVITCH, A.G. – ABELLE, M. – KIELEK, V.: *Interkosmos Mobil Satellite Laser Ranging Observatory on Helwan Observatory*

3.4. LDR Interkosmos Helwan 1

V září 1974 jsme uvedli LDR Interkosmos II Helwan 1 do provozu. Během dlouhodobého provozu byla mimo jiné prokázána provozuschopnost LDR Interkosmos v pouštních subtropických klimatických podmínkách. Byla též potvrzena správnost koncepce LDR Interkosmos, které byly vyvíjeny pro činnost v rozvojových zemích jako plně autonomní systémy (v případě LDR Helwan 1 včetně počítače) s výjimkou připojení na přívod elektrické energie.

V roce 1972 přepracoval A. Novotný programy pro předpověď dráhy družic (metodika P. Lály) a nastavování montáže ze sálového počítače do stolního kalkulátoru HP 9820. Tento počítač s programy na předpověď a předběžnou analýzu výsledků jsme použili během našeho pobytu v Rize. V roce 1973 programy přepracoval A. Novotný pro stolní počítač HP 9830A, který jsme použili při měření na observatoři Helwan v roce 1974.⁸

Dosažená interní přesnost RMS měření družic 50 cm (vyhodnoceno v CNES, Paříž) a spolehlivost systému zařadily v roce 1974 náš mobilní systém LDR mezi několik málo plně funkčních LDR na světě. V roce 1976 na základě jednání mezi K. Hamalem, M.R. Pearlmanem ze SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) a M. Fáhímem, ředitelem NRIAG (National Institute of Astronomy and Geophysics), byla uzavřena dohoda o společném provozování LDR v Helwanu (Egypt). SAO se zavázalo vybavit LDR některými přístroji, telexem a dodat kompletní časovou bázi založenou na systému LORAN-C. SAO do roku 1980 podporovalo LDR Helwan každoročními granty (20 000 USD/rok).⁹

Pod vedením P. Hiršla byla vyvinuta elektronika LDR, která byla řízena stolním počítačem HP 9830 A. K. Hamal a H. Jelínková vyvinuli nový typ laserového vysílače.¹⁰ A. Novotný vyvinul programové vybavení pro LDR Helwan.

(Egypt). In: Proceedings - Conference Interkosmos. Budapešť, Maďarsko, 1974.

NOVOTNÝ, A. – HAMAL, K.: *Laserový radar Interkosmos první generace*. In: Acta Polytechnica, Praha 1975.

⁸ NOVOTNÝ, A. – NOVOTNÁ, J.: *Aplikace HP 9820 a HP 9830 v družicovém laserovém radaru*. In: Sborník přednášek z celostátní schůzky uživatelů kalkulátorů Hewlett-Packard. Ostrava, ČVTS 1975.

⁹ NOVOTNÝ, A.: *A Desk Top Calculator Control System for Laser Ranging*. In: Proceedings of the Third Workshop on Laser Tracking Instrumentation. Lagonissi, Řecko, 1978.

ČECH, M. – HAMAL, K. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – SOBEK, P.: *Minicomputer Control for the Interkosmos System*. In: Proceedings of the Third Workshop on Laser Radar Instrumentation. Lagonissi, Řecko, 1978.

ASAAD, A. – BAGHOS, B. – FAHIM, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – HAMAL, K. – TATJEVJAN, S. K. – RUBANS, A. – MASSEVITCH, A. G. – LATIMER, J. – GAPOSCHKIN, E. M. – PEARLMAN, M. R.: *A Joint Interkosmos - SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) - HIAG (Helwan Institute of Astronomy and Geophysics) Laser Ranging Project*. In: Proceedings of the Second Int. Symp. The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics. Atény, Řecko, 1978.

NOVOTNÝ, A.: *Computer Control of the Interkosmos Laser Station at Helwan*. In: Proceedings of the Interkosmos Symp. on Geodetic Uses of Artificial Satellites and Upper Atmosphere Research. Olsztyn, Polsko, 1978.

HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PEARLMAN, M. R. – SHEDEED, M. – TROYAN, V. I. *Upgrading the Interkosmos Laser Station at Helwan*. In: Proceedings of the Interkosmos Symp. on Geodetic Uses of Artificial Satellites and Upper Atmosphere Research. Olsztyn, Polsko, 1978.

¹⁰ JELÍNKOVÁ, H. – HAMAL, K. – NOVOTNÝ, A. – VRBOVÁ, M.: *Passive Mode Locker and Q-Switch for Ruby Laser*. Optical and Quantum Electronics, 7, 1975, s. 420.

Uvedený projekt (dohoda) se realizoval v roce 1977. Výsledkem této výrazné inovace byla částečná automatizace činnosti LDR. Plně byl zautomatizován postupný přenos dat při činnosti radaru (jak při kalibraci, tak i při měření). Manuálně se pouze vstupovaly základní elementy dráhy družice. Vypočtené parametry přeletu družice byly uschovávány na magnetické pásce. Po vstoupení základního časového údaje byla všechna nezbytná data pro měření družice generována během přeletu počítačem a výsledky uschovávány do paměti na magnetickou pásku. Po přeletu byla provedena analýza vyhodnocení. Výsledky vyděrované na pásku byly stejný den telexovány do SAO, Cambridge, USA.

Kromě měření družic jsme na observatoři v Helwanu prováděli ověřování nových laserových vysílačů a jednotlivých částí LDR. Ověřování v podmínkách - subtropy, písečné bouře, velké změny teplot a vlhkosti - nás v mnoha případech donutilo ke změnám v konstrukci. Získali jsme zkušenosti, které jsme uplatnili při vývoji a konstrukci LDR první generace pro země s obtížnými klimatickými podmínkami.

Na získávání výsledků a dílčích zlepšení LDR v Helwanu se podíleli vědečtí pracovníci z Francie, Lotyšska, Polska, Ruska a Ukrajiny.

V té době se již ale pozornost vědecké komunity začala zaměřovat na měření družice LAGEOS (vypuštěna v roce 1976). Pro měření této družice LDR první generace nevyhovují. V laboratoři jsme zahájili výzkumné práce na LDR druhé generace.

Poloaupomatizovaný LDR první generace měřil v Helwanu vzdálenosti družic do konce roku 1980. V únoru 1981 byly získány první výsledky z počítačem řízeného LDR Helwan 2.

3.5. Počítačem řízený LDR Helwan 2

Již v období výstavby sítě LDR první generace bylo jasné, že z hlediska perspektivy tohoto oboru bude nutné v krátké době u LDR zvýšit přesnost a výtěžnost měření a především mít možnost měřit družice nové generace (např. LAGEOS), které jsou určeny výhradně pro laserovou lokaci.

V roce 1977 K. Hamal a V. Utěkal (Geodetický ústav Dobruška) navrhli montáž, jejíž pohyby bylo možno řídit počítačem.¹¹ V té době jsme již měli k dispozici řídicí minipočítač HP 2100S s 5MB diskem a operačním systémem RTE2. I. Procházka pro tento počítač a novou montáž jako součást diplomové práce vyvinul program pro výpočty drah družic a části řídicího programu. A. Novotný vyvinul připojení počítače a experimentálního LDR. Byl zahájen vývoj programového vybavení a řídicí elektroniky. V roce 1978 a 1979 probíhaly ověřovací experimenty na střešní terase budovy fakulty v Praze 1, Břehová 7.

Projednávání projektu LDR druhé a třetí generace, které probíhalo od roku 1977 v pracovní skupině Laserový radar Interkosmos, nebylo úspěšné, zúčastněné státy nebyly schopny v rozumném časovém horizontu v důsledku technického zaostávání nabídnout do projektu jednotlivé části projektovaného LDR. Další spolupráce se orientovala na dokončení sítě LDR první generace. Rozhodli jsme, že

¹¹ PROCHÁZKA, I. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – UTĚKAL, J.? *Computer Controlled Experimental Laser Radar Station in Prague*. In: Proceedings of the Int. Scientific Conf. of 6th Section Cosmic Physics Interkosmos. Varna, Bulharsko, 1980.

pro projektovaný LDR druhé generace vyvineme i úplně novou naváděcí montáž (V. Utěkal) a její výkonové řízení. V polovině roku 1980 byl připraven kompletní LDR druhé generace včetně laserového vysílače.

V říjnu 1980 jsme celý radar a kompletní počítač HP 2100S přemístili na observatoř do Helwanu. Po dokončení výstavby observačního pavilonu v listopadu 1980 bylo zahájeno ožívování plně automatizovaného LDR. Nová naváděcí montáž se poprvé začala pohybovat podle počítačových programů teprve na této observatoři. Práce se v první etapě soustředila především na řízení pohybu montáže a postupně byly připojovány laser a měřicí přístroje do celého komplexu, který byl řízen počítačem. Po oživení celého systému LDR a ověřovacích zkouškách byla v únoru 1981 naměřena první družice. Zdůrazňuji význam tohoto kroku. Počítačem řízený LDR byl konstruován tak, že neumožňoval vizuální kontrolu pozice družice – vizuální navádění. Koncepce byla přijata i proto, že většina přeletů nízkých družic je v Helwanu vzhledem k zeměpisné šířce ve stínu Země, tzn. že družice nejsou osvětleny Sluncem. Významné družice LAGEOS a STARLETT je vzhledem k jejich hvězdné velikosti možné vizuálně sledovat pouze teleskopy o průměru desítek centimetrů. LDR Helwan 2 se stal v únoru 1981 prvním LDR na světě s „úplným slepým naváděním“ (full blind tracking)¹².

LDR Helwan 2 jsme během svých pobytů využívali jako experimentální pracoviště pro výzkum a vývoj v oboru LDR. Na základě získávaných zkušeností, vědeckého a technologického vývoje byly v průběhu dalších let inovovány nebo vyměňovány jednotlivé uzly radaru, doplňovalo a zdokonalovalo se programové vybavení, byly odstraňovány chyby v řídicích programech. Některé z chyb se projevovaly pouze náhodně, jiné se objevily až po delší době. Řídicí program obsahuje množství variant pokračování běhu programu podle typu družice, souřadnic družice, pozice družice, času měření apod.

V roce 1982 byl místo rubínového laseru instalován Nd:YAG laser se sledem pikosekundových impulsů vyvinutý H. Jelínkovou a K. Hamalem. Speciální analýza výsledků byla prováděna systémem programů I. Procházky. A. Novotný se podílel na přepracování řídicích programů a na výrazné modifikaci přijímací elektroniky.¹³

¹² NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I.: *Software Package for Station No. 7831 (Helwan, Egypt)*. In: Proceedings of the Fourth Int. Workshop Laser Ranging Instrumentation. Austin, USA, 1981. HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – ČECH, M.: *INTERKOSMOS Second Generation Satellite Laser Radar*. In: The Fourth International Workshop on Laser Radar Instrumentation, Austin, USA, 1981.

PROCHÁZKA, I. – NOVOTNÝ, A.: *Simple Method for On-Site Satellite Position Prediction Improvement*. In: Proceedings of the Fourth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Austin, USA, 1981.

NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – SOBEK, P.: *Programmable Step Motor Control Unit*. In: Acta Polytechnica. Praha 1982. (Předneseno na mezinárodní konferenci Ispolzovaniye lazernykh nabljudenij sputnikov v geodeziji i geodinamike. Baku, SSSR 1981.)

KVASIL, B. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – ČECH, M. – ASSAD, A. – FAHIM, M. – MASEVITCH, A. G. – TATEVIAN, S. K. – PEARLMAN, M. R.: *Interkosmos Second Generation Satellite Laser Radar in Helwan July-August 1981*. In: Acta Polytechnica. Praha 1982. (Předneseno na mezinárodní konferenci Ispolzovaniye lazernykh nabljudenij sputnikov v geodeziji i geodinamike. Baku, SSSR, 1981).

¹³ KVASIL, B. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – ČECH, M. – KUBEČEK, V. – ASAAD, A. – FAHIM, M. – MASEVITCH, A. G. – TATEVIAN, S. K.: *Interkosmos Laser Radar, Version Mode Locked Train*. In: Proceedings of Naučnaja konferencija Ispolzovaniye lazernykh nabljudenij v geodeziji a geodinamike. Suzdal, 1982.

V dalších letech se používal jako vysílač laser se selekcí jednoho impulsu¹⁴, k polovičnímu sledu impulsů z laseru (první polovina sledu elektronicky odstraněna) jsme se vrátili v roce 1989 po výměně řídicího počítače a řídicí elektroniky LDR. Průběžně pokračoval výzkum v přijímací části s cílem zlepšit přesnost měření vzdálenosti. Postupně byly odstraňovány drobné nedostatky v přijímací cestě a detekční elektronice.¹⁵

V roce 1987 byl vyměněn subsystém laserového vysílače (H. Jelínková, I. Procházka, K. Hamal vyvinuli úplně nový laserový vysílač). Laserový vysílač (bez zdrojů) byl umístěn na optický stůl. Pro vysílání laserového svazku bylo použito Coude ohnisko. Provedené rekonstrukce výrazně zvýšily výtěžnost LDR a spolehlivost společně se zvýšením přesnosti měření vzdálenosti.¹⁶

Na observatoři Helwan jsme v roce 1987 začali používat počítač PC-AT jako obrazkový terminál počítače HP 2100S. Byly přepracovány programy pro předpověď dráhy družic a analýzu výsledků.¹⁷ V roce 1988 byl v LDR počítač HP 2100S používán pouze pro řízení montáže, sběr dat a kalibrační měření. Předpovědi dráhy družic a zpracování výsledků měření a kalibrací bylo plně převedeno na počítač

¹⁴ HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I.: *Interkosmos Laser Radar, Version Mode Locked Train*. In: Proceedings of the Fifth Int. Workshop on Laser Tracking Instrumentation. Greenwich Observatory, Velká Británie, 1984. In: Proceedings of Int. Conf. of the 6th Section Cosmic Physics Interkosmos. Karlovy Vary 1984.

Jelínková, H. – Valach, P. – Procházka, I. – Novotný, A. – Čech, M.: *The Spatial Structure and Divergence of the Nd:YAG Laser Beam*. In: Proceedings of the fifth Int. Conf. on Lasers and their Applications. Dresden, Německo, 1985.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. – TAWADROS, M. – HELALI, I.: *Interkosmos Laser Radar, Version Mode Locked Train*. In: Proceedings of the Sixth int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Antibes, Francie, 1986.

¹⁵ NOVOTNÝ, A. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – PROCHÁZKA, I. – ČECH, M.: *Three Years of SLR in Helwan Using Mode Locked Nd:YAG Laser*. In: Interkosmos Scientific Seminar. Sofia, 1986.

¹⁶ BAGHOS, B. B. – TAWADROS, M. Y. – HELALI, Y. E. – HAMAL, K. – ČECH, M. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I.: *Interkosmos Laser Station in Helwan, Version Single Pulse 20 psec*. In: Abstracts of Second Scientific Meeting of the NRIAG. Káhira, 1988.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. B. – TAWADROS, M. Y. – HELALI, Y. E.: *Satellite Laser Ranging in Helwan-Egypt*. In: Proceedings Geodetic Satellites. Poznaň, 1989.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. B. – TAWADROS, M. Y. – HELALI, Y. E.: *Satellite Laser Ranging in Helwan-Egypt Upgrading and Results 1987–88*. In: Proceedings of 7th Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Matera, Itálie, 1989.

NOVOTNÝ, A. – HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – PROCHÁZKA, I.: *Research and Development Activities Related to Helwan SLR*. In: Proceedings of Interkosmos - Eurolas Meeting. Riga, SSSR, 1990.

¹⁷ HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. – TAWADROS, M. – HELALI, Y.: *Satellite Laser Ranging in Helwan, Egypt – Upgrading and Results 1987–1988*. In: Proceedings of the 18 Interkosmos Symposium. Use of Artificial Satellite Observations for Geodesy and Geophysics. Krakov, Polsko, 1989.

ČECH, M. – PROCHÁZKA, I. – NOVOTNÝ, A.: *Compact System for Satellite Laser Radar – Satellite Position, Prediction, Radar Control, Ranging Data Analysis*. In: Proceedings of the 18 Interkosmos Symposium. Use of Artificial Satellite Observations for Geodesy and Geophysics. Krakov, Polsko, 1989.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. – HELALI, I. – TAWADROS, M.: *Interkosmos Satellite Laser Station Helwan. Version Single Pulse/Semitrain*. In: Proceedings of the Seventh Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Matera, Itálie, 1989.

typu PC-AT. V porovnání s původním počítačem se doba předpovědi dráhy družic zrychlila asi dvacetkrát.

V roce 1986 M. Čech zahájil vývoj elektroniky LRE III, řízené mikroprocesory, pro LDR třetí generace. V srpnu 1989 po dvouměsíčním provozu LDR a po dokončení vývojových prací jak na vlastní řídicí elektronice, tak i na softwaru A. Novotný a M. Čech během dvou dnů bez přerušení měření definitivně vyřadili počítač HP 2100S a nahradili počítačem PC-AT a řídicí elektronikou LRE III. LDR byl do konce listopadu 1989 provozován bez jediné větší závady v řízení. Dokončovali jsme už pouze „uživatelský komfort“ systému. Výsledky měření v roce 1989 a informace o novém řídicím systému byly prezentovány v říjnu 1989 na „7th Workshop on Satellite Laser Ranging Instrumentation“, Matera, Itálie. LDR Helwan 2 se stal prvním LDR systémem na světě, který byl plně řízen počítačem typu PC.¹⁸

Jednou z nezbytných částí komplexu LDR je časová služba. Výsledky měření se získávají v časoprostorových souřadnicích. Údaj o absolutním čase, kdy došlo k odrazu laserového impulsu od družice, je nedílnou součástí výsledku. Současná a předpokládaná přesnost měření časového intervalu vyžaduje, aby absolutní čas byl přiřazován s 100 ns přesností k UTC. U LDR první generace byla v první etapě postačující přesnost 1 ms; požadavek nebylo obtížné splnit. V další etapě bylo nutno zvýšit přesnost na 100 μ s. Tento požadavek byl již ale na zámořských LDR obtížně dosažitelný. Ještě kolem roku 1985 platilo, že každé řádové zvýšení přesnosti časové báze zvyšovalo provozní náklady na její udržování o jeden řád. Problém časové služby jsme řešili transportem cesiového časového standardu v zapnutém stavu. I přes vysokou frekvenční stabilitu (10^{-12}) je tento standard bez korekcí použitelný na LDR relativně po krátkou dobu (denní časová změna je 200 ns).

Na observatoři Helwan byla k dispozici pouze „historická“ časová služba, která byla v té době běžná na astronomických observatořích (milisekundová přesnost). V roce 1977 poskytl SAO pro potřeby LDR a observatoře Helwan časovou ústřednu pracující s navigačním systémem LORAN C. Do tohoto systému jsme integrovali naše cesiové hodiny. Využitím řídicí a měřicí elektroniky LDR jsme zautomatizovali nastavování a korekce časové ústředny. Časová ústředna na bázi navigačního systému LORAN C byla provozována do června 1990.

Od vypuštění prvních družic NAVSTAR navigačního systému GPS se A. Novotný zabýval možností implementování časové služby, která by byla odvozena z GPS systému. Vzhledem ke strategickému významu nebylo možno do roku 1989 získat dovozní licenci ani pro NRIAG. V roce 1990 NRIAG zakoupil tento přístroj a problém časové služby byl na 10 let vyřešen. Po upřesnění geometrických souřadnic antény přijímače GPS, které byly získány jako průměr z opakovaných měření během jednoho měsíce, je přesnost přiřazení absolutního času 50 ns. Výměna systému absolutního časového standardu a další zlepšení v přijímacích optických a elektronických obvodech přispěly k dalšímu zvětšení přesnosti LDR. Střední kvadratická odchylka naměřených vzdáleností v roce 1990 pro družici LAGEOS (asi 7000 km, tj. $7 \cdot 10^9$ mm) byla 24 mm.

¹⁸ ČECH, M. – NOVOTNÝ, A.: *Satellite Laser Radar Electronics Based on IBM PC Computer*. In: Proceedings of the Seventh Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Matera, Itálie, 1989.

Dalším důležitým problémem LDR je komunikace s řídicími a datovými centry. Na některých našich LDR (např. Vietnam) nebyl tento problém uspokojivě vyřešen. Efektivnost činnosti těchto stanic byla menší. V Helwanu již v roce 1978 byla z prostředků SAO vybudována telexová komunikace do SAO. Výsledky měření byly telexovány do USA ihned po měření a analýze výsledků na stanici v Helwanu. Efemeridy družic, posílané ze SAO telexem, byly proti chybám zajišťovány tím, že byly posílány třikrát.

V roce 1987 A. Novotný ověřil možnost dálkového přenosu výsledků měření prostřednictvím PC počítačů, modemů a komutované telefonní linky mezi IKI (Institut kosmičeských issledovanij) Moskva a Prahou při řešení projektu Phobos. Od roku 1988 byla modemová spojení z LDR Helwan na FJFI Praha používána pro záložní přenos dat. V roce 1991 byla vzájemná komunikace mezi LDR Helwan a datovými centry vyřešena prostřednictvím počítačové sítě EARN/BITNET, která byla později převedena na Internet.

Do roku 1997 byl provoz LDR Helwan 2 zajišťován výhradně pracovníky FJFI ČVUT¹⁹ s dílčí asistencí pracovníků NRIAG každoročně po dobu čtyř až šesti měsíců, dle požadavků koordinátorů mezinárodních projektů. Jedním z důvodů bylo, že tento plně automatizovaný systém sice automaticky měřil vzdálenost družic a dodával kvalitní výsledky, ale vyžadoval vysoce kvalifikovanou obsluhu vzhledem k tomu, že nebyl dokončen vývoj a zapojení zabezpečovacích algoritmů. Hrozilo velké nebezpečí, že nepozorností nebo nepochopením funkce při obsluze by mohlo dojít k závažnému poškození systému.

3.6. LDR Helwan v síti EUROLAS

Od počátku devadesátých let bylo realizováno několik družicových projektů, které vyžadují výsledky měření z globální sítě LDR. V prosinci 1991 ESA vypustila družici ERS1 a v roce 1992 NASA/CNES družici Topex. Obě družice byly určeny především pro altimetrii zemského povrchu, oceánu, ledem pokrytého povrchu a měření rozličných fyzikálních parametrů Země. Vzhledem k dlouhodobým kvalitním výsledkům byl LDR Helwan požádán po vypuštění družice ERS 1 o aktivní účast na obou projektech. Od roku 1992 se LDR Helwan 2 podílel na měření ERS 1 a Topex. V dalších letech bylo laserové měření vzdálenosti družice ERS 1 klíčové pro zdar celého projektu, protože po selhání PRARE systému na ERS 1 po jejím vypuštění byla altimetrie povrchu Země z ERS 1 plně závislá na přesném

¹⁹ ČECH, M. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – BAGHOS, B. B. – HELALI, Y. E. – TAWADROUS, M. Y.: *Satellite Laser Station Helwan – Status 1992*. In: Proceedings of the Eighth Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Annapolis, MD USA, 1992.

PROCHÁZKA, I. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – ČECH, M.: *New Technologies for Satellite Laser Ranging*. In: Proceedings of the NRIAG Scientific Conference. Helwan, Egypt, 1992.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – TAWADROS, M. Y. – HELALI, Y. E.: *Seventeen Years of Satellite Laser Ranging in Helwan*. In: Proceedings of the NRIAG Scientific Conference. Helwan, Egypt, 1992.

HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I. – TAWADROS, M. Y. – MIKHAIL, J. S. – ATIA, G. F.: *Satellite Laser Ranging Station (7831) in Helwan 1992–1994*. Poster Session of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Canberra, Austrálie, November 1994.

laserovém měření vzdálenosti družice ERS 1, tj. přesném určení orbitu družice z laserových družicových měření. LDR Helwan každým rokem několik měsíců dodával výsledky. V roce 1996 byla po úspěšném provozu družice ERS 1 vypuštěna družice ERS 2, která je identická s družicí ERS 1. V roce 1998 byla obnovena laserová měření družice ERS 1 a tato měření se předpokládala do konce její technologické životnosti. V roce 1992 byla stanice Helwan 2 zařazena do sítě EUROLAS²⁰. V září 1998 vznikla International Laser Radar Service (ILRS) se sídlem v NASA. LDR Helwan byl na základě výběrového řízení přijat mezi organizace podílející se na projektech koordinovaných ILRS.

3.7. Faktory ovlivňující budování LDR na KFE FJFI ČVUT

Vývojové práce byly podřízeny finančním možnostem. Při řešení se hledalo vhodné kompromisní řešení, tj. takové, při kterém by byly pokud možno splněny požadavky kladené na LDR v dané etapě a přitom vystačily přidělené finanční prostředky.

Tato řešení byla v několika případech unikátní, osvědčila se a byla později použita na dalších LDR celosvětové sítě. Příkladem může být používání výpočetní techniky, kdy jsme se na rozdíl od ostatních vyvíjených stanic orientovali na použití minipočítačů a později počítačů typu PC. Při vývoji a použití laseru jsme měli výhodu dostupnosti tuzemské součástkové základny a hlavně přístup k moderním optickým technologiím v průmyslových závodech a výzkumných ústavech.

Laserové družicové dálkoměry se vyvíjely paralelně s vývojem laserové techniky, mikroelektroniky, počítačů a informačních technologií, které v nich byly využívány.

- Impulsní lasery používané jako vysílače pro LDR byly v počátečním období předmětem vědeckého a technologického výzkumu. Teprve v posledních několika letech se v nových LDR používají komerčně vyráběné laserové subsystémy.
- Naváděcí montáže, teleskopy a optika byly vyvíjeny individuálně pro každou LDR stanici. I v současné době se tyto systémy konstruují a vyrábějí podle požadavků zadávajících organizací.
- Měření časových intervalů během vývojového období prošlo několika generačními změnami v důsledku velmi rychlého rozvoje elektroniky a mikroelektroniky. První čítače měly rozlišovací schopnost desítky nanosekund. Současné měřicí metody umožňují měřit vzdálenost s přesností jednoho milimetru.
- Časová služba – přiřazování světového času k měřením – prošla jedním z nejzajímavějších vývojů od milisekundové časové základny běžné na astronomických observatořích před třiceti lety (zajišťované astronomickými metodami) přes navigační systémy LORAN C, synchronizaci času televizními synchronizačními impulsy, cesiové nebo rubidiové hodiny transportované pravidelně

²⁰ NOVOTNÝ, A. – ČECH, M. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – PROCHÁZKA, I.: *Satellite Laser Ranging Activities at Eurolas Consortium*. In: Proceedings of the Workshop 93 Czech Technical University in Prague. ČVUT Praha, 1993.

MIKHAIL, J. S. – TAWADROS, M. J. – HAMAL, K. – ČECH, M. – JELÍNKOVÁ, H. – NOVOTNÝ, A. – PROCHÁZKA, I.: *Satellite Laser Ranging in Helwan – 20 Years of Operation, Current Status and Future Plans*. In: 4th UNIESA Workshop on Basic Space Science, June 1994. Káhira, Egypt, 1994.

NOVOTNÝ, A. – ČECH, M. – HAMAL, K. – JELÍNKOVÁ, H. – PROCHÁZKA, I. – TAWADROS, M. Y. – DEEBES, H.: *The Satellite Laser Rangefinder for Remote Sensing of the Earth*. In: Proceedings of CTU Workshop, Brno 1996, January 1996.

letadly po celém světě, až po využití kosmických technologií (Global Positioning System, GPS). Plně automatizovaný přístroj o hmotnosti 2 kg udržuje absolutní čas s přesností 50 ns a frekvenci s dlouhodobou přesností 10^{-12} .

- Přesnost měření časových intervalů je určena přesností referenční frekvence, která je použita k měření časového intervalu mezi vyslaným a přijatým laserovým impulsem. Požadovaná přesnost je o řád větší než je přesnost nejlepších křemenných oscilátorů. Pro tento účel se ve stanicích LDR používal rubidiový frekvenční subnormál. Životnost rubidiové trubice je pouze několik let. V současné době je nahrazován systémem GPS.
- První minipočítače, které byly použitelné v laserových družicových dálkoměrech, byly komerčně nabízeny po roce 1970. Každá počítačová firma vyráběla počítače s jinou koncepcí, operační systémy a programové vybavení byly vzájemně nekompatibilní. Na LDR se v rámci pravidelných inovací vyměňovala zejména počítačová technika. V současné době NASA připravuje nové projekty automatických kompaktních LDR výhradně na bázi počítačů typu PC.
- Při měření vzdálenosti umělých družic musí být datová zpětná vazba s řídicím centrem. Požadovaná doba pro vzájemné vyměňování informací (přenos dat) se průběžně zkracuje. V současné době datová centra několikrát denně distribuují na LDR korekce k výpočtu efemerid. Uživatelé výsledků analyzují data téměř okamžitě. Výsledky z měření by měly být odesílány nejpozději do 24 hodin. Datová analyzační centra sice pracují pouze v základní pracovní době, ale vzhledem ke geografickému rozložení těchto center a LDR dochází k nepřetržitě výměně a je žádoucí, aby výsledek byl odeslán bezprostředně po naměření a předběžné analýze.
- Telexové spojení v první etapě laserových měření vzdálenosti družic bylo jediným datovým komunikačním kanálem, a to ne na všech LDR. Po rozšíření výpočetní techniky a terminálového připojení pomocí modemů bylo teoreticky možné se připojovat telefonním dial up připojením počítače k datovému centru. Kvalita telekomunikační sítě zejména na observatořích, které bývají umístěny v odlehlých místech, byla nízká. Výrazný obrat nastal po roce 1989, kdy se v akademické oblasti začalo s budováním počítačových sítí. Teprve masový nástup Internetu a jeho služeb pomohl vyřešit problém komunikace a přístupu k informačním zdrojům a technologiím.

Důsledkem výše vyjmenovaných faktorů je, že celá síť LDR je v nepřetržitém vývoji, jehož důsledkem je zvyšování výtěžnosti a kvality měření. Zvyšování přesnosti měření naopak umožňuje navrhovat nové vědecké projekty, k jejichž řešení jsou laserová družicová měření nezbytná.

3.8. Charakteristika LDR Helwan 2 jako součásti celosvětové sítě na konci roku 1999

- Dosahovaná přesnost měření počítaná pro jednotlivé odrazy byla 20-30 mm
- Přesnost výpočtu normálových bodů z měření 10 mm.
- Počítačem řízené navádění bez nutnosti vizuální kontroly umožňuje měření družic, které jsou ve stínu Země (blind tracking).

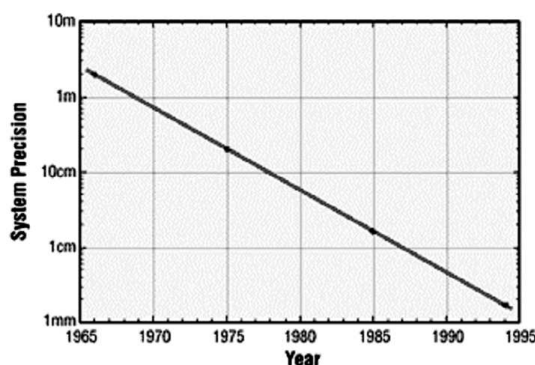
4. Současnost a budoucnost laserových měření vzdálenosti družic

Laserové družicové radary se staly důležitou vědeckou metodou jak pro kosmický výzkum, tak i pro výzkum Země. Měření vzdálenosti družic se provádí též těmito metodami:

- VLBI (Very Long Base Interferometry) – v současné době je tato metoda používána pouze na několika stanicích, vyžaduje použití rádiových teleskopů o průměru šesti metrů a více. Pro měření je jako časová základna vyžadován vodíkový maser.
- GPS (Global Positioning System) – velmi efektivní metoda. Měřicí systém může pracovat automaticky. Je nenáročný na provozní náklady, jeho provoz je nezávislý na oblačnosti. Celosvětová síť je koordinována GPS Services, která pracuje od roku 1994. Byla vzorem při vzniku ILRS (International Laser Ranging System). Některé GPS stanice pracují na stejném místě jako LDR. Na observatoři v Helwanu se GPS připravuje od roku 1997.

Vývoj měření vzdálenosti družic prošel několika etapami od upřednostňování měření pomocí LDR až po výhradní měření pomocí GPS (po dobudování sítě GPS družic v roce 1993). Dlouhodobé vyhodnocování výsledků prokázalo, že LDR mají i přes podstatně větší provozní náklady nezastupitelnou roli, protože se jedná o nezprostředkované měření vzdálenosti měřením časových intervalů – využitím nejpřesnější fyzikální metody, tj. měření frekvence. Výrazně se zvyšovala přesnost měření vzdálenosti družic (2 m v roce 1965, 1 cm v roce 1987). Milimetrových přesností se dosahuje u experimentálních systémů.

Obr. 2 udává v logaritmickém měřítku zvyšování přesnosti měření vzdálenosti LDR za období 1965 – 1995.



Vzrůstající význam laserových družicových měření dokládají mimo jiné mezinárodní vědecké projekty, které jsou nebo budou realizovány na existující a plánovaných družicích.

5. Příspěvek laserových měření vzdálenosti družic k vědám o Zemi

Výsledky laserových družicových měření se uplatňují ve většině vědeckých disciplín souvisejících s vědami o Zemi. Dlouhodobá laserová měření vzdálenosti družic přinesla do těchto věd významné nové poznatky.

Během posledních tří desetiletí se globální síť LDR stala mocným zdrojem dat pro studium pevnin, oceánů a atmosférických systémů, které zahrnují:

- detekci a měření pohybů kontinentálních desek, deformací povrchu, rotace Země a pohybu pólů,
- modelování prostorových a časových změn zemského gravitačního pole,
- určování vertikálního rozložení povrchu oceánu,
- monitorování milimetrových změn pohybu těžiště systému Země (pevniny-atmosféra-oceány)
- definování a údržba mezinárodního zemského referenčního systému,
- detekce a měření vlastností ledovců,
- přesné měření orbitových drah družic pro družicové radarové altimetry mapující povrch oceánů a změny mas ledovců a pro kontinentální topografii,
- speciální testy k teorii obecné relativity.

Podrobnější informace o dosažených výsledcích jsou mimo jiné na <http://ilrs.gsfc.nasa.gov> a na internetových stránkách příslušných vědeckých organizací.