

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Ing. Róbert Šošovička

**METODIKA MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ
LETOVÝCH VÝKONŮ LETOUNU**

METHODOLOGY FOR AIRCRAFT PERFORMANCE
MEASUREMENTS AND EVALUATIONS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Vladimír Daněk, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Karol Fil'akovský, CSc.
Prof. Ing. Jaroslav Salga, CSc.

Datum obhajoby: 20. 8. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

letová měření, metodiky letových měření, mechanika letu, letové výkony, GPS

KEYWORDS

aircraft flight testing, flight measurement methods, flight mechanics, aircraft performance, GPS

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu
Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 OBSAH PRÁCE.....	6
3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	8
6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	9
6.1 Metody měření letových výkonů	9
6.2 Měření trajektorie letu.....	9
6.3 Systémy družicové navigace.....	11
6.3.1 NAVSTAR GPS.....	11
6.4 Ověření Charakteristik systému GPS.....	12
6.4.1 GPS přijímač Garmin GPSmap 76S.....	13
6.4.2 Statické testy.....	14
6.4.3 Kinematické testy	15
6.5 Vyhodnocení rychlosti letu z údajů GPS	17
6.6 Přímý odečet	17
6.7 Výpočet ze záznamu	17
7 PROVEDENÉ LETOVÉ EXPERIMENTY	18
7.1 Polohová oprava pitot-statického systému letounu.....	18
7.1.1 Použité metody.....	18
7.1.2 Vyhodnocení měření.....	21
7.1.3 Srovnání jednotlivých metodik vyhodnocení.....	21
7.2 GPS při měření vzletů a přistání	22
7.2.1 Metodika měření délek vzletů a přistání s využitím GPS.....	22
8 ZÁVĚR.....	24
9 SUMMARY.....	25
LITERATURA	26
PUBLIKACE AUTORA	28
AUTOROVO CV	30

1 ÚVOD

Letová měření jsou nedílnou součástí vývoje letounu. Nejenom že prokazují splnění požadavků zadavatele, bezpečnosti letu, ale zejména poskytují údaje nutné pro další analýzu konstrukce, letových výkonů a vlastností, pilotážních postupů atd. Jejich význam je i v současné době nenahraditelný, protože stále není možné teoreticky popsat a prakticky vyřešit všechny jevy provázející pohyb letounu v prostoru. Velmi důležité jsou zkoušky v oblasti aerodynamiky a mechaniky letu, kde se musí uvažovat s letounem jako celkem, na kterém se všechny části vzájemně ovlivňují a teorie nepodává uspokojivé výsledky.

V mechanice letu se zkoušky zaměřují na letové výkony a vlastnosti.

Měření letových vlastností umožňuje prokázat bezpečnost letounu a naladit letoun tak, aby byl příjemný na pilotáž a nevykazoval „záluďné“ chování v žádném režimu letu.

Měření letových výkonů se zaměřuje na kvantifikaci veličin potřebných pro efektivní a bezpečné provozní využití letounu. Jeho náplní je stanovení (ověření) základních veličin pohybu letadla. Jedná se o charakteristické rychlosti, výšky letu, stoupavosti, spotřeby paliva atd., jejich kombinace a extrémní hodnoty. Velmi důležitou částí je stanovení aerodynamické poláry letadla, která je důležitým podkladem pro další analýzy. K hlavním úkolům měření letových výkonů patří stanovení polohové opravy pitot-statického systému, který je zdrojem informace pro základní letové přístroje (rychloměr, výškoměr, váriometr, Machmetr), bez jejichž správné funkce je let nebezpečný a neefektivní.

Při měření letových výkonů je nutná znalost mnoha dalších aspektů jako např. stav atmosféry (tlak, teplota, ...), centráž a aktuální hmotnost letadla, výkon pohonné jednotky atd., jako nástrojů nutných pro nepřímé měření a také jako faktorů ovlivňujících obdrženy výsledek, o který se tento musí pro další účely opravit.

Letové výkony se vždy vztahují na standardní podmínky (MSA a max. vzletová hmotnost), příp. je uvedeno za jakých podmínek platí.

První a základní otázkou při jakémkoli měření je účel provádění zkoušek a očekávané výsledky. Je zřejmé, že pro zkoušky porovnávací bude vhodná jiná metoda a zejména vybavení, než např. pro zkoušky vývojové.

Při všech typech zkoušek je ale zapotřebí zkušeného pilota, který je schopen udržet požadované režimy a posoudit vlastnosti letounu a tím zabezpečit opakovatelnost měření (aspoň omezenou). Rovněž nároky na další personál bývají vysoké.

Každý druh zkoušek je specifický svým rozsahem provádění, vybavením, požadovanými výsledky (co do počtu výstupů i přesností). Toto se samozřejmě

projeví na ceně experimentů. Proto je nutné od počátku vědět, co má být výsledkem měření a podle toho zvolit optimální metodiku a vybavení.

2 OBSAH PRÁCE

Tato disertační práce přibližuje základní druhy zkoušek letových výkonů a metodiky jejich provádění. Zaměřuje se především na metody vhodné pro malé letouny s pístovým pohonem. Jejím cílem je zavedení moderních technologií, umožňující provádět letové zkoušky mnohem efektivněji, než uvádí literatura, která je v České republice v tomto oboru velice zastaralá.

Pokrok zejména v elektronice umožnil miniaturizovat potřebné vybavení a hlavně automatizovat proces měření, záznamu a vyhodnocování dat. Autor se zaměřil na vyšetření možností použití GPS (Global Positioning System), který po roce 2000 prochází velkým rozmachem. Tento navigační systém poskytuje data o poloze jeho přijímače v čase. Lze ním tedy zaznamenávat dráhu letu, která je základním prvkem měření letových výkonů. Pozornost byla zaměřena na běžně dostupné ruční přijímače, které sice dosahují přesnosti pouze kolem 10 až 15 m, ale při vhodném způsobu použití, mohou poskytovat data splňující nároky na měření letových výkonů. Byly provedeny kontrolní srovnávací měření s aparaturou geodetické přesnosti, pro vymezení oblasti použitelnosti tohoto systému v aplikaci na letové měření.

V praktických letových aplikacích byl autorem systém použit pro monitorování dráhy letounu při měření hluku letadel, jako velmi přínosný se ukázal při měření polohové opravy pitot-statického systému letounu, nebo při měření délek vzletů a přistání. Ve všech případech značně zjednodušuje proces měření a zvyšuje bezpečnost provádění letových měření. Každá situace však vyžaduje správně zvolenou metodiku měření a vyhodnocování. Základní návody, zkušenosti a doporučení jsou obsahem této práce.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Zkoušení letadel za letu je velice specializovaným oborem. Většina veličin je měřena nepřímo pomocí speciálních přístrojů a vyhodnocovacích metod. Zřejmě jsou omezení prostorem, hmotností, napájením aparatury atd. Náročnost oboru je zdůrazněna nemožností vytvoření laboratorních podmínek pro měření. Každé měření probíhá za reálných atmosférických podmínek. Vliv nestálosti atmosféry představuje jeden z největších problémů měření letových výkonů. Je nutné jej eliminovat vhodnou metodikou měření nebo přepočtem.

Každý výrobce provádí zkoušky svých letadel v průběhu vývoje a prokazuje jimi jejich letovou způsobilost, případně s jejich využitím řeší úpravy svého produktu. Metodiky a zkušenosti ale obvykle zůstávají tajemstvím firmy. Je to způsobeno technickou, personální, ale hlavně finanční náročností zkoušek. Umění efektivního testování za letu rozhoduje o celkové efektivnosti vývoje letadla a projeví se v ceně a rychlosti přivedení výrobku na trh.

Z dostupných zdrojů je možné získat pouze obecné postupy a zákonitosti pro letové zkoušky. Tyto informace bývají obvykle určeny pro letouny vyšší hmotnostní a rychlostní kategorie. Jejich adaptace na lehčí a pomalejší letouny je mnohdy dosti obtížná. Rovněž uváděné vybavení letounu a pozemní skupiny bývá pro malé letouny nevhodné a často i nedostupné (různé speciální a vojenské přístroje...). Častokrát je literatura staršího vydání, ve které absentují moderní metodiky měření a zpracování výsledků.

4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Protože v ČR jsou poslední originální publikace z tohoto oboru datovány do 60-tých let a přístup k nim je velice omezený, jsou v první části stručně uvedeny základní metody měření letových výkonů lehkých letadel.

V dalším bude pozornost zaměřena na inovaci některých metodik měření a vyhodnocování, s využitím moderní měřicí techniky. Omezení na lehká letadla s sebou nese výraznou snahu o využívání technologií nenáročných na prostor, hmotnost, zdroj energie a obsluhu. Samozřejmostí je minimalizace nákladů na pořízování a provoz potřebného vybavení. Dalším důležitým faktorem je nezasahovat do konstrukce letounu, což kromě „neporušenosti“ letadla, umožní provádět zkoušky i za provozu letounu bez nutnosti povolení dohlédacího úřadu.

Vzhledem k tomu, že základním prvkem měření letových výkonů je měření trajektorie letu a její částí, ze kterých lze určit další potřebné veličiny, byla pozornost zaměřena tímto směrem. Jedná se o velmi problematickou oblast, kde je obvykle nutné drahé vybavení, náročná metodika měření a zpracování výsledků ale hlavně omezení letového prostoru (a výšky). V současnosti se v různých oborech silně rozmáhá využívání družicových navigačních systémů, které poskytují údaje o poloze antény přijímače v prostoru a čase. Významným mezníkem byl pro tento systém květen roku 2000, kdy vypnutím umělého znepřesňování amerického systému GPS, vzrostla přesnost v určování polohy pro běžného uživatele z původních 100 až 200 m na 15 m. To vedlo k myšlence využít tuto moderní technologii v letových měřeních.

Protože se jedná o principiálně nový systém, který poskytuje doposud jen obtížně měřitelné údaje, lze očekávat, že jeho využití přinese pokrok i v používaných metodikách. K tomu je však nutné ověřit jeho charakteristiky a vymezit oblast použitelnosti. Dalším úkolem se pak stává navržení metodik měření a vyhodnocování, které by mohly být úspěšně aplikovány v žádané oblasti, případně vhodným způsobem zpracování dat ještě zvýšily přesnost měření.

Hlavním cílem této práce bylo právě prošetření možnosti využití tohoto systému při měření letových výkonů a návrh metodiky zpracování dat. Autor se zaměřil na běžně dostupné ruční přijímače, které mohou i přes svoji „jednoduchost“ a omezenou přesnost, poskytnout velmi kvalitní údaje pro letová měření. Je ale nutné dodržet určité pravidla použití.

Dalším cílem bylo stanovení zásad a doporučení pro provádění letových zkoušek obecně i s využitím GPS. Tyto informace obvykle nejsou v literatuře uváděny, takže si každý musí projít svojí dávkou omylů a chyb. Tato práce by měla alespoň částečně ulehčit první kroky nováčkům v oboru letových měření.

5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Na základě studia dostupné literatury a informací z výrobních podniků, ve kterých se autor zúčastnil odborných stáží, byla vypracována první část disertační práce, přibližující metody měření letových výkonů lehkých letadel.

V dalším byla pozornost zaměřena na využití GPS v oboru letových měření. Tento systém umožňuje záznam trajektorie letu v čase, bez nutnosti zaměřování ze země, nebo používání drahého a náročného vybavení, které je nutné při klasických způsobech měření dráhy letu (příp. pohybu po zemi). Rovněž odpadá jinak potřebné pozemní zabezpečení a tak je možné využívat pro měření vhodnější prostory a letové výšky.

V dostupné literatuře se sice objevují zmínky o možnostech aplikace GPS na letová měření, ale většinou je situace řešena jen povrchně. Uvádějí se různé metodiky měření, avšak způsob zpracování dat a separaci potřebných veličin nevyšetřují. Obvykle využívají přímý odečet, např. rychlosti z GPS přístroje (za letu), podle kterého má být proveden výpočet např. polohové opravy pitot-statického systému. Možnosti záznamu dat a způsobům jeho zpracování není věnována přílišná pozornost. A právě tu se skýtají možnosti dalšího zefektivnění letových měření.

Autor se zaměřil na možnosti, způsob a oblasti použitelnosti obecně dostupných GPS přijímačů pracujících v autonomním režimu, při měření letových výkonů a umožnit prakticky všem zájemcům jednoduchým způsobem změřit výkony svého letadla. V době, kdy si mnoho leteckých nadšenců staví svoje létající aparáty, může vytvoření vhodných metodik měření zvýšit bezpečnost jejich provozu a zároveň dohlédacím úřadům poskytnout jednoduchý nástroj pro jejich ověřování. Rovněž pro výrobní podniky je toto cesta pro zlevnění a zefektivnění letových zkoušek.

Hlavní myšlenkou při úvahách o vhodnosti použití ručních přijímačů GPS, kterých přesnost je omezená bylo, že pro měření letových výkonů je absolutní přesnost určení polohy nepodstatná. Obvykle se totiž jedná o měření krátkých dráhových úseků a v případě, že systém bude vykazovat dostatečně pomalé změny absolutní přesnosti za relativně malých oscilací kolem střední hodnoty, lze jej úspěšně pro daný účel použít. K ověření této vlastnosti bylo provedeno několik testů s využitím přesné geodetické aparatury (za pohybu měří s přesností na centimetry). Bylo prokázáno, že vhodnou metodikou měření lze i s relativně levným vybavením (cena vhodných ručních GPS přijímačů se pohybuje kolem 20 000 Kč), dosahovat

výborných výsledků měření, které mohou být v mnohých případech dokonce přesnější, než u standardně používaných postupů.

V praktických letových experimentech byl GPS na záznam trajektorie letu při měření hluku letadla, kde se požaduje průlet přesně definovanou oblastí nad mikrofonem. Velice přínosným se jeví využití GPS při kalibraci pitot-statického systému letadel, kde značně zjednodušuje proces měření a snižuje nároky nejen na nutné zabezpečení ale i na počasí. Velkou měrou může být zjednodušeno i měření délek vzletů a přistání.

Z provedených experimentů a letových měření vyplynuly některé zásady, kterých dodržení zvyšuje pravděpodobnost úspěšného měření a ulehčuje vyhodnocení. Tyto zásady a další doporučení k využití GPS i letovým měřením obecně, jsou shrnuty v závěrečných kapitolách disertační práce.

6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Disertační práci lze rozdělit na několik tématických částí. První přibližuje základní metody pro měření letových výkonů lehkých letadel. Následující je věnována popisu a principu práce použitého GPS, se zaměřením na způsob zpracování naměřených dat. Uvádí se zde výsledky experimentů zaměřených na ověření systému a vymezení oblastí použitelnosti. V dalších kapitolách jsou popsány autorem provedené letové experimenty s využitím GPS pro měření letových výkonů. V závěru práce jsou shrnuty základní pravidla a doporučení pro měření a vyhodnocování letových výkonů s využitím GPS.

6.1 METODY MĚŘENÍ LETOVÝCH VÝKONŮ

Jsou předloženy metody, pro měření charakteristik horizontálního letu, stoupání, aerodynamické poláry letounu, délek vzletu a přistání a měření spotřeb paliva. Protože měření letových výkonů, ale hlavně bezpečný provoz letadla je závislý na správné funkci indikátoru rychlosti a výšky, je pozornost věnována i problematice snímání tlaků pro tyto přístroje a metodám opravy polohové chyby pitot-statického systému. Letová hmotnost spolu se stavem okolní atmosféry tvoří základními prvky ovlivňujícími letové výkony letadla. Naměřené výkony se vždy vztahují na standardní podmínky (MSA a max. vzletová hmotnost), příp. je uvedeno za jakých podmínek platí. Práce popisuje postupy redukce na tyto standardní podmínky. Samotné metodiky měření a vyhodnocování nebyly podrobně uváděny, protože jsou závislé na vybavení konkrétní zkušebny.

6.2 MĚŘENÍ TRAJEKTORIE LETU

Vyhodnocení trajektorie letu poskytuje informace, na základě kterých lze určovat další důležité veličiny, potřebné pro měření letových výkonů, nebo v některých případech je přímo výstupem měření (např. délky vzletů a přistání).

Pro měření trajektorie letu je možno použít několika způsobů. Liší se přesností, náročností, cenou, atd. Ne všechny jsou ale vhodné pro zkoumanou kategorii lehkých letadel.

Měření trajektorie letu fotogrammetrickou metodou

Využívá systému vhodně umístěných kamer na zemi nebo v letadle. Vyhodnocením jejich záznamu obrazu se ze známých rozměrů letounu, vzdáleností pozemních objektů, geometrie rozmístění a orientace kamer určuje trajektorie letounu v prostoru. S výhodou jí lze použít pro měření délek vzletů a přistání, kde je pohyb letounu předem definován vzletovou a přistávací drahou. Pro obecné určení polohy letadla v prostoru se metoda stává náročnější na vyhodnocení i provedení samotného měření. Obvykle je vhodná pro bodové určování polohy letounu (např. při létání kolem věže, na bázi...).

Měření trajektorie letu pozemními radionavigačními prostředky

Jednou z možností sledování trajektorie letu je využití radionavigačních prostředků. Tyto jsou původně určeny pro vedení letadla na trati. Jsou tvořeny systémem rádiových vysílačů a přijímačů umístěných v přesně definovaných bodech na Zemi. V mnohých případech je nutné umístit vysílače i do letounu. Pro experimenty v kategorii lehkých letadel, lze uvažovat pouze s využitím stávajících obecně dostupných prostředků. Vývoj speciálních nebo použití vojenských zaměřovacích systémů nelze předpokládat. Protože ale systém určený k traťové navigaci nevyžaduje tak výraznou přesnost jaká je potřebná pro letová měření, je jeho použití pro tento účel velmi omezené. Obvyklé přesnosti se pohybují v řádu stovek metrů. Rovněž komplikovanost získávání výsledků, které by vyžadovalo spolupráci se službami ŘLP je velkou nevýhodou pro použití této metody při měření výkonů lehkých letadel.

Měření trajektorie letu pomocí systému družicové navigace

Systém družicové navigace je určen pro přesné určování polohy na celé Zemi. Postačujícím vybavením letounu je relativně malý a cenově nenáročný přijímač, který je schopen v reálném čase vyhodnocovat aktuální polohu. Jeho přesnost je v řádu metrů (pro navigaci). Poskytuje rychlou a přehlednou informaci o průběhu letu a zároveň poskytuje údaje důležité pro vyhodnocení letových výkonů. Jeho omezením je nutnost nepřetržitého „výhledu na oblohu“. Z toho plyne omezení na režimy letu bez náklonu a prudkého manévrování. Z hlediska měření letových výkonů se jedná o velmi účinný prostředek pro kvalitní měření, významně rozšiřující možnosti oboru. Je možné vytvářet nové metodiky za současného zjednodušení celého procesu měření.

6.3 SYSTÉMY DRUŽICOVÉ NAVIGACE

V současnosti ve světě existuje, nebo je v pokročilém stadiu vývoje, několik globálních družicových navigačních systémů.

Jedná se o americký NAVSTAR GPS (zkráceně GPS), který je jediný plně funkční systém družicové navigace, bezplatně dostupný na celém světě.

Ruský GLONASS (*GLO*bal *NA*avigation *S*atellite *S*ystem) ještě nedosahuje plné provozuschopnosti. Několik družic na oběžné dráze už ale poskytuje navigační informace (první družice vypuštěna v r. 1982).

Evropský Galileo, je teprve vyvíjený systém družicové navigace. Vypuštění první družice se plánuje na rok 2005 a uvedení do provozu na rok 2008. Na rozdíl od GPS a GLONASS je od počátku koncipován jako civilní. S oběma těmito systémy má ale spolupracovat a využívat jejich signálu k zpřesnění měřených poloh.

Pro všechny tři systémy platí, že se jedná o satelitní radionavigační systémy, poskytující neomezenému počtu uživatelů, za všech meteorologických podmínek informaci o jeho poloze, rychlosti a čase v kterémkoliv místě na Zemi a v její „blízkosti“. Pro určení polohy v prostoru je nutné přijat signál minimálně ze čtyř družic současně. Pracují na principu určování vzdálenosti k družicím kterých polohy jsou známe. Vzdálenost se určuje z časového zpoždění mezi vysláním signálu z družice a jeho přijetím i přijímači.

6.3.1 NAVSTAR GPS

(NAVigation System Timing And Ranging, Global Positioning System)

Je to nejstarší (první družice vypuštěna v r. 1978) a v současnosti jediný plně funkční systém družicové navigace. Jedná se o pasivní (přijímač nic nevysílá) dálkoměrný systém, provozovaný Ministerstvem obrany USA. Je vytvořen pro poskytování navigačních informací jednotkám americké armády kdekoliv na světě a za jakéhokoliv počasí. Původně čistě vojenský systém byl v roce 1981 částečně uvolněn i pro civilní využití. Využití systému pro civilní uživatele je možné operativně omezit úmyslnou degradací některých poskytovaných informací pro neautorizované uživatele, resp. kódováním vysílaných signálů, čímž se pro ně sníží přesnost určování polohy. Do 1. května roku 2000, byl signál záměrně znepřesňován (tzv. S/A kód - Selective Availability). I v současnosti může být signál kdykoliv zakódován.

Plně funkční systém je tvořen minimálně 24 aktivními družicemi, které obíhají Zemi na 6 oběžných drahách vzájemně posunutých o 60°, vždy čtyři družice na každé dráze. Sklon drah vůči rovníku je 55°. Některé dráhy jsou obsazeny i pátou záložní, ale aktivní družicí. Družice se pohybují po přibližně kruhových drahách o poloměru zhruba 26 600 km, tj. asi 20 200 km nad zemským povrchem. Oběžná doba družic je 12 hodin hvězdného času. Uspořádání družic zajišťuje

v každém okamžiku a na kterémkoliv místě na Zemi „viditelnost“ minimálně 4 družic nad „horizontem“ 15° .

Družicový segment je monitorován a řízen z pěti pozemních středisek rozmístěných po celé Zemi. z nichž hlavní je v Colorado Springs, USA. Tato střediska monitorují dráhu letu, přesnost hodin a stav jednotlivých satelitů a vysílají příslušné korekce, které jsou pak uváděny v navigační zprávě.

Jsou známé rovněž informace o jeho činnosti, přesnosti, vývoji, zkušenostech z provozu v různých podmínkách, apod., proto je pozornost zaměřena na tento systém. Rovněž veškeré experimenty a průvodní teoretické úvahy obsaženy v tomto díle, byly orientovány na tento systém. Protože však ostatní GNSS pracují na podobném principu, lze poznatky aplikovat i na ně.

Princip činnosti GPS

Základním principem GPS je určování vzdálenosti k jednotlivým družicím, ze kterých lze vypočítat polohu přijímače. Aktuální poloha družic se určí z dráhových elementů, které jsou součástí navigační zprávy a tvoří tzv. vysílané efemeridy (Broadcast ephemerides). Přibližné hodnoty dráhových elementů všech družic systému tvoří tzv. almanach. Měření vzdálenosti k satelitům se provádí pomocí signálu vysílaného družicí, který je přijat v přijímači a porovnán s jeho replikou generovanou přijímačem. Při vzájemném posunu signálů se hledá jejich nejlepší shoda (korelace), kterou lze převést na časový posun. Tento posun je využit k výpočtu tzv. pseudovzdálenosti mezi družicí a přijímačem. Termín pseudovzdálenost je použit proto, že se nejedná o přesnou vzdálenost, neboť nejsou synchronizovány časové normály družice a přijímače (není známý přesný chod hodin přijímače) a signál je zneřádněn např. průchodem atmosférou. Pro určení polohy přijímače na povrchu Země je proto zapotřebí měřit vzdálenosti minimálně ke třem družicím, pro určení obecné prostorové polohy ke čtyřem družicím (tři rovnice pro polohu a jedna pro čas).

6.4 OVĚŘENÍ CHARAKTERISTIK SYSTÉMU GPS

Aby bylo možné vypracovat metodiky měření letových výkonů, založených na využívání technologie družicové navigace, bylo nutné prověřit jeho provozní charakteristiky a ověřit reálnou přesnost přístrojů uvažovaných pro další použití. K ověření přesnosti přístrojů je nutno použít přístrojů přesnějších, nebo v případě statických testů alespoň geodeticky změřené polohy testovacího bodu. K vyřešení tohoto úkolu, byla navázána spolupráce s Ústavem geodézie FAST VUT v Brně, která se zabývá využitím GPS v geodézii, je vybavená vysoce kvalitními přístroji a disponuje cennými praktickými zkušenostmi v tomto oboru. Na základě našich požadavků bylo provedeno několik pozemních i letových experimentů. Tyto se staly základem pro další vývoj měřících metodik. Velký význam měla i podpora v oblasti geodézie, která je potřebná pro úspěšné a hlavně korektní vyhodnocení dat z GPS.

Při experimentech bylo využíváno geodeticky zaměřených bodů na střeše budovy B, Ústavu geodézie FAST VUT v Brně. Je zde zřízena i referenční stanice státní družicové sítě s označením DOPNUL a reprezentuje bod s označením TUBO, který je zároveň jedním z tzv. permanentních bodů GPS sítě EPN (EUREF Permanent Network). Poloha bodu TUBO je kontrolována sítí dalších bodů umístěných na pilířích v jeho blízkosti. Právě tyto body, jejichž poloha je rovněž známa s vysokou přesností, byly použity pro testování přijímačů Garmin GPSmap 76S.

Protože se zejména kinematické zkoušky neobejdou bez určení přesné polohy antény přijímače, byly k těmto zkouškám použity přesné geodetické přístroje GPS, vzhledem ke kterým byla poloha vztahována. Jedná se dvoufrekvenční přístroje švýcarské firmy Leica, které umožňují pracovat jak ve statickém, tak i kinematickém režimu. Přístroje mohou pracovat jako autonomní, ale častější je jejich použití v diferenčním režimu, tj. pro určování souřadnic nových bodů až v rámci následného zpracování dat z dvojice takovýchto přístrojů (postprocesing). Firma udává pro tuto relativní metodu přesnost v délce měřeného vektoru hodnotou $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ ($1 \text{ ppm} = 1 \text{ mm}$ na 1 km délky). Při kinematickém režimu se přesnost podle údajů výrobce zhoršuje přibližně na dvojnásobek. Dva nejnovější přístroje GPS s označením System 500 byly použity pro uvedené testy. Zpracování dat bylo prováděno firemním softwarem SKI Pro.

Testy probíhaly na dvou přístrojích Garmin GPSmap 76S současně. Při experimentech bylo využíváno ručních GPS přijímačů pracujících v autonomním režimu, bez příjmu jakýchkoliv korekčních signálů.

6.4.1 GPS přijímač Garmin GPSmap 76S

Praktické experimenty byly prováděny převážně s přístroji Garmin GPSmap 76S. Pro účely letových měření byly na Letecký ústav FSI VUT v Brně zakoupeny dva takovéto přijímače.

Jedná se o dvanácti kanálový paralelní ruční GPS přijímač s možností zobrazování podrobných map nahraných v paměti přístroje. Je vybaven barometrickým výškoměrem a magnetickým kompasem. Pracuje na frekvenci L1 a využívá pouze kódová měření. Umožňuje příjem diferenčních korekcí a signálu WAAS (EGNOS).

Anténa je vestavěna v pouzdru přístroje, ale je možné připojit i externí. Napájení je zajištěno dvěma tužkovými bateriemi po 1,5 V. Napětí připojitelného externího zdroje je 8 až 35 V.

Přístroj je schopen zaznamenávat souřadnice polohy a nadmořské výšky v závislosti na čase. Frekvenci ukládání záznamu je možné volit podle vzdálenosti, času nebo automaticky. Největší frekvence záznamu je 1 Hz (časový záznam). Paměť je schopna pojmout 10 000 záznamů. Vypočtená data je možné

zaznamenávat i do připojeného počítače, přes rozhraní RS-232. Lze volit z několika standardizovaných formátů záznamu.

Základní technické parametry přijímače:

Rozměry	6,9 x 15,7 x 3,6 cm
Hmotnost	454 g s bateriemi
Rozsah operačních teplot	-15 až +70 °C
Frekvence výpočtu polohy	1 Hz

Přesnost výpočtu polohy:

Autonomní režim	do 15 m (95 % všech měření)
Diferenční režim	3 – 5 m (95 % všech měření)
Přesnost výpočtu rychlosti:	0,05 m/s



Obr.1: GPS přijímač Garmin GPSmap 76S

Při měřeních byl přístroj vždy vybaven externí anténou umístěnou tak, aby byl zabezpečen co nejkvalitnější příjem satelitního signálu. Ukládání záznamu se provádělo v letových experimentech přímo do paměti přístroje s frekvencí 1 Hz, která umožňuje pohodlnou synchronizaci dat s jinými přístroji a zároveň je to nejhustější získatelný záznam. 10 000 bodů záznamu při této frekvenci zajistilo 2 hod 46 min měření, což bylo pro prováděné letové zkoušky postačující. Jako zdroj energie bylo používáno tužkových baterií.

Dlouhodobé pozemní experimenty vyžadovaly ukládání dat do připojeného PC a napájení z externího zdroje. Rovněž formát a frekvence záznamu byly podle potřeby upraveny.

6.4.2 Statické testy

Cílem statických testů bylo stanovení reálné přesnosti přístrojů Garmin GPSmap 76S a vyšetření charakteristik systému GPS, zejména časový průběh chyb. Proto byl proveden 26 hodin trvající experiment, pokrývající celodenní cyklus stavu atmosféry (zejména ionosféry) a dva průlety každé družice nad měřícím místem.

Protože při statických měřeních dochází k nepříznivému ovlivnění výpočtu polohy vlivem vícecestného šíření signálu (multipath), ke kterému dochází vlivem odrazu signálu od země, okolních budov apod., byl proveden i experiment s jednoduchou krycí deskou pro jeho potlačení. Na základě rozboru časového průběhu odchylek polohy, které mají pro obě aparatury stejný trend, byl ověřen jednoduchý způsob zavádění korekcí na základě měření jedné aparatury do měření druhé aparatury, nacházející se v její blízkosti.

Praktickými experimenty bylo prokázáno, že reálná přesnost ručních GPS přijímačů Garmin GPSmap 76S je mnohem lepší než deklaruje výrobce (15 m v autonomním režimu). A to dokonce i v nejnepříznivějším statickém režimu s vlivem vícecestného šíření signálu (multipath). Při dlouhodobém testu bylo aparaturou G1 dosaženo přesnosti DRMS (95%) = 5,50 m. Aparatura G2 měřila s přesností 4,87 m. Tento rozdíl je způsoben pravděpodobně vhodnou polohou ČR, kde je průměrný počet viditelných družic 7 až 8 ve vhodné konstelaci (DOP obvykle nepřevyšuje hodnotu 2,5), viz. lit. [21].

Při statických měřeních lze účinně snížit rozptyl měření použitím krycí desky pro potlačení vlivu vícecestného šíření signálu.

6.4.3 Kinematické testy

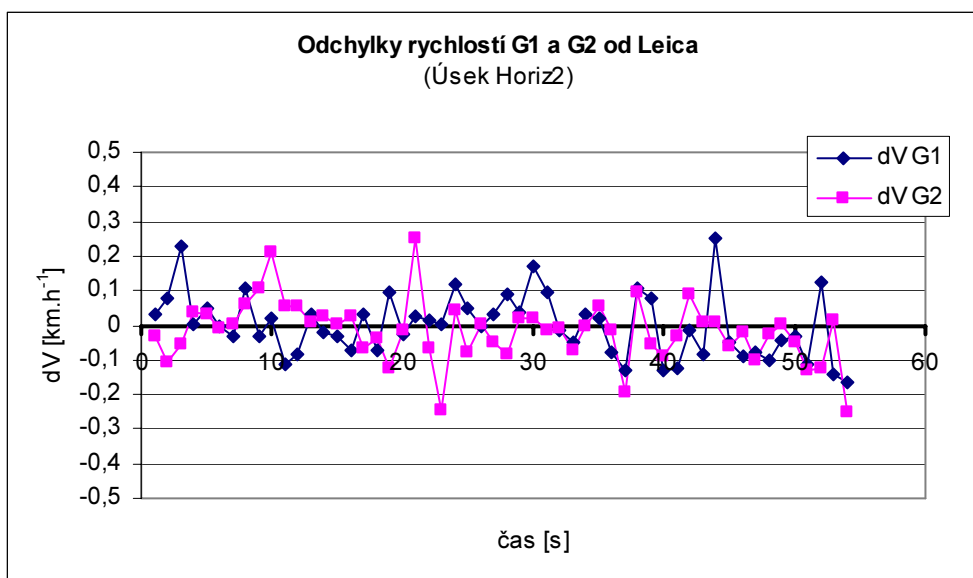
Základním úkolem při těchto testech bylo určit pro stejný časový okamžik polohu testované aparatury GPS (aparatura G1 případně G2) a kontrolní aparatury, jejíž polohu lze pro daný okamžik určit s mnohem vyšší přesností (aparatura Leica). Testovaná i kontrolní aparatura byly umístěny blízko sebe na pohybujícím se vozidle či letounu. Při testech se vyhodnocovala nejen přesnost určování absolutní polohy, ale i relativní přesnost měření vzhledem k předcházejícímu bodu měření kdy se očekávaly lepší výsledky.

První kontrolní měření proběhlo na automobilu, na který byly instalovány všechny tři aparatury. Potom následoval letový test.

Aparatura Leica a jedna aparatura Garmin byly instalovány pod překryt kabiny motorového kluzáku L-13 SE Vivat, druhá aparatura Garmin byla umístěna na motorovém krytu, před kabinou. Interval záznamu byl u všech aparatur nastaven na 1 sekundu. Měřicí lety měla prověřit funkci systému v ustálených režimech i manévrech.

Při testovacích letech se potvrdila nutnost ustáleného režimu letu, ve kterém je umožněn nerušený příjem signálu ze satelitů. Lze prohlásit, že systém v tomto provedení je vhodný pouze pro přímočaré lety (horizontální, stoupavé a klesavé), případně pro mírné zatáčky. Ostré zatáčky a prudké přechody např. ze stoupání do klesání způsobují problémy v příjmu signálu a skokové změny konfigurace družic, což nepříznivě se projevuje v přesnosti výpočtu polohy. Při plynulé ztrátě signálu z jedné, nebo dvou družic je situace mň kritická.

V ustálených režimech se odchylky polohy od kontrolní aparatury pohybovaly do 3 m (RMS 95%). Odchylky rychlosti kmitají kolem nulové střední hodnoty s malým rozptylem a lze tedy předpokládat vysokou přesnost výpočtu rychlosti i z ručních přijímačů. Přesnost měření rychlosti v horizontálním letu dosahovala hodnot RMS (95%) pod $0,118 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V zatáčkách se oproti přímočarým letům zvyšuje rozptyl vlivem zhoršeného výhledu na družice. V tomto případě jsou ale ovlivněny všechny aparatury na palubě letounu, tj. i kontrolní Leica.



Obr.2: Odchylky rychlostí aparatur G1 a G2 od rychlosti měřené aparaturou Leica, v přímočarém úseku Horiz2

Je známo a našimi experimenty potvrzeno, že přesnost měření výšky je u GPS horší než určování polohy v horizontální rovině. Proto byla vyšetřována změna výšky za epochu, pro každou aparaturu samostatně. Z naměřených dat je patrné, že všechny tři aparatury mají stejný průběh změny výšky za epochu, tj. postihují změny v režimu letu. Z toho plyne, že ruční přístroje Garmin jsou schopny zaznamenat výškový průběh letu. Tento je ale od skutečné absolutní polohy odchýlený. Odchylka při prováděných testech dosahovala hodnot kolem 25 m. V relativních souřadnicích vztažených např. k počátku měřeného úseku však poskytují plnohodnotná data.

Lze konstatovat, že ruční GPS přístroje jsou použitelné pro měření letových výkonů. Doporučuje se však vyhnout práci v absolutních souřadnicích a zejména k výšce je potřeba přistupovat velice obezřetně.

6.5 VYHODNOCENÍ RYCHLOSTI LETU Z ÚDAJŮ GPS

GPS přijímače obvykle nezaznamenávají rychlost pohybu. Tuto je nutno dopočítat ze záznamu poloh. Některé softwary toto provádí, ale výpočet je relativně hrubě zaokrouhlen.

Výpočet rychlosti ze dvou poloh, když každá má přiřazen údaj o čase, je jednoduchou úlohou fyziky. Podle potřeby může být počítaná jako dvoj nebo třírozměrný vektor (vliv změny výšky mezi danými body).

6.6 PŘÍMÝ ODEČET

Nejjednodušším způsobem získání potřebných veličin je jejich přímý odečet z displeje GPS přijímače. Tato metoda má ale ze všech možných variant nejnižší přesnost. V průběhu 1 – 2 minuty trvajícího průletu lze odečíst hodnoty 3 – 5 krát. Navíc údaje nejsou nikdy dokonale ustálené, proto je nutné počítat se schopnostmi člověka posoudit okamžik odečtu.

6.7 VÝPOČET ZE ZÁZNAMU

Vhodně nastavený záznam dat je velmi bohatým zdrojem informací pro vyhodnocení letových výkonů. Ruční GPS přijímače umožňují záznam nejrychleji po jedné sekundě. Tato frekvence je dostatečná pro vyhodnocení letových výkonů pomalých letadel v ustálených režimech letu.

Ze sekundového záznamu polohy a výšky v čase, lze získat rychlosti a kurzy letu mnohem přesněji, než je to dosažitelné pouhým odečtem z přístroje. Je zaznamenáno mnohem více dat, které jsou vzájemně synchronizovány. Je možné použít několika způsobů zpracování.

Výpočet z celé délky úseku

V případě určování rychlostí z délek celých měřených úseků, je nutno uvážit, že poloha bodů zaznamenaná přijímačem GPS, je v každém okamžiku náhodně odchýlena od svojí střední hodnoty, která reprezentuje žádaný údaj.

Je zřejmé, že zvýšení přesnosti lze dosáhnout zvětšením délky úseku. Není však vhodné ji zvětšovat příliš, protože s délkou úseku roste i časový interval mezi měřeními za který může dojít k významné odchylce v absolutní poloze. Tato je při krátkých časových intervalech zanedbatelná. Významnou odchylku může způsobit i výpočet z chybně spočteného bodu (např. vlivem změny konfigurace družic...), který nebyl předem identifikován.

Výpočet z krátkých segmentů trati

Jiným přístupem může být zkrácení časového intervalu (délka úseku) na minimum (jedna sekunda) a rychlost vypočítaná pro každý segment trati zvlášť. Tím je zcela eliminována změna měření absolutní polohy. Jednotlivé náhodné odchylky oscilují kolem nulové střední hodnoty. Průměrná rychlost daného úseku určená jako

střední hodnota rychlostí všech segmentů je zatížena minimální chybou, s možností stanovení rozptylu a směrodatné odchylky. Toto má velký význam při hodnocení výsledků měření. Dosud stanovování rozptylů a směrodatných odchylek bylo při měření letových výkonů velmi omezené a nebylo možné posoudit kvalitu měření.

7 PROVEDENÉ LETOVÉ EXPERIMENTY

Pro výzkum využití GPS pro měření letových výkonů byla pozornost zaměřena na ustálené lety. Nejvíce pozornosti bylo věnováno stanovení polohové opravy pitot-statického systému letadla, pro které se jeví GPS jako vhodný nástroj pro zvýšení přesnosti, průkaznosti a zjednodušení celého postupu této náročné procedury. Využívalo se létání na bázi, které je pro kategorii lehkých letadel jednou z nejrozšířenějších metod. Tento postup umožňoval srovnání více metodik vyhodnocení, na základě jednoho měřícího letu.

Kromě měření letových výkonů bylo GPS využito i pro monitorování dráhy letu při měření hluku letadel.

Jako další velice perspektivní aplikace se jeví použít tento systém při měření délek vzletů a přistání. Jedná se o zrychlený (zpomalený) pohyb, ale výhled na družice je vzhledem k trajektorii pohybu dostatečný (v případě že stoupání/klesání není příliš strmé).

7.1 POLOHOVÁ OPRAVA PITOT-STATICKEHO SYSTÉMU LETOUNU

Protože na letounech KP-2U Sova a L-13 SE Vivat měly být prováděny další letové experimenty, zejména v oblasti mechaniky letu, bylo nutné stanovit polohové opravy jejich pitot-statických systémů. Polohová oprava je důležitá nejen pro bezpečný provoz letounu, ale taky pro správné vyhodnocení všech letových experimentů, které závisí na rychlosti a výšce letu.

Pro získání praktických zkušeností s různými metodami, bylo rozhodnuto provést měření několika metodami současně. Tím bylo kromě úspory času a financí docíleno lepší možnosti porovnání použitých metod z důvodu stejného provedení měřícího letu, který byl pro všechny metody zpracování zatížen stejnou chybou pilotáže a vlivu atmosféry.

Pozornost byla zaměřena na polohovou chybu statické větve. Chyby ve snímání celkového tlaku a přístrojové chyby rychloměru a výškoměru byly zanedbány, protože obvykle jsou v porovnání s polohovou chybou velmi malé.

7.1.1 Použité metody

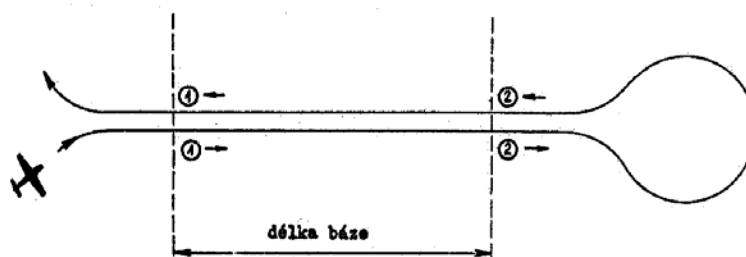
V souladu s cílem disertační práce bylo snahou používat metody nevyžadující speciální vybavení ani významné zásahy do konstrukce letounu (např. zástavbou speciálních sond). Toto bylo mírně porušeno při kalibraci L-13 SE, kdy byla pod pravé křídlo namontována experimentální pitot-statická sonda s korouhvičkami pro měření úhlů náběhu a vybočení. Tato sonda má být používána pro další měření

letových vlastností a výkonů. Protože nebylo možné zkalibrovat celý měřicí systém (sonda, tlakové převodníky, měřicí ústředna, kabeláž,...) jiným způsobem, byla kalibrace provedena za letu, metodou létání na bázi. Tím byla obdržena aerodynamická oprava celé její zástavby.

Základní metodou byla metoda létání na bázi. Tato metoda byla zvolena proto, že je v České republice nejrozšířenější pro pomalá letadla, je dobře propracována metodika měření a vyhodnocení a její výsledky jsou všeobecně akceptované. Zároveň poskytuje nezávislý údaj o rychlosti letu vůči zemi, která měla být v dalším stadiu testování srovnávána s údaji GPS. Ostatní metody byly dalším produktem využívajícím ustáleného horizontálního letu v malé výšce. Tím byly prošetřeny jak metody určující opravu pitot-statického systému letounu na základě určení pravé vzdušné rychlosti výpočtem z rychlosti vůči zemi, tak i metody využívající určení tlaku nerozrušeného proudu v letové výšce.

Létání na bázi

Polohová chyba (vzniklá umístěním snímačů statického tlaku) je určena z rozdílu pravé vzdušné rychlosti a rychlosti indikované (v tomto případě rovné údaji rychloměru). Pravá vzdušná rychlost se zjišťuje ze změřené rychlosti vůči zemi a rychlosti větru v letové hladině. Rychlost vůči zemi se určuje měřením časového intervalu potřebného na průlet známé vzdálenosti (báze), při konstantní indikované rychlosti a výšce letu. Rychlost větru se v případě, že ji nelze změřit, eliminuje prolétáváním báze v opačných směrech (bylo použito). Směr a rychlost větru by měl být konstantní, pro nejlepší výsledky je však vhodné absolutní bezvětří.



Obr.3: Kalibrace létáním na bázi

Metoda pozemní kamery

Při ustálených horizontálních průletech se pozemní kamerou sleduje výška průletů nad kontrolním stanovištěm. Tlak v dané výšce se počítá podle podmínek MSA, ze změřených podmínek na zemi (tlak, teplota). Tato hodnota se porovnává s tlakem snímaným systémem letounu. Aby nerostla chyba nedodržením standardních podmínek atmosféry, je nutné provádět měření v malých výškách nad pozemními snímači (do 150 m).

Prakticky byl experiment proveden za pomoci videokamery na stativu, která snímala prostor v okolí jedné časové kontroly přes zaměřovací síť, kolmo na osu báze. Protože průlety neprobíhaly přesně nad železnicí tvořící pomyslnou osu báze, bylo nutné určovat vzdálenost letadla od kamery. K tomuto účelu bylo využito záznamu GPS. Ze známé geometrie pak byla vypočítaná výška průletu.

Využití GPS

Při experimentech byly používány dva ruční GPS přijímače Garmin GPSmap 76S. Před měřením byl systém využit pro vyměření poloh všech pozemních stanovišť. Při vyměřování se vždy využívalo funkce „průměrování polohy“ v trvání 15 až 30 minut.

V průběhu měření byla jedna GPS aparatura na palubě letounu, kde kontinuálně zaznamenávala trajektorii letu, ze které se vyhodnocovaly požadované letové parametry. Její externí anténa byla umístěna na překrytu kabiny za hlavami posádky letounu (na obou letadlech).

Druhá aparatura byla umístěna na stativu v blízkosti stanoviště s kamerou a její záznam sloužil k vyloučení případných hrubých chyb systému, které by se mohly projevit i na aparatuře v letadle.

Frekvence záznamu obou přijímačů byla nastavena na 1 Hz.

Záznam GPS je velmi účinnou pomocí i při posuzování správnosti provedení letu, ustálení režimu a pomáhá odstraňovat metodické chyby, které by jinak zůstaly neodhaleny.

Polohová oprava byla určována stejným postupem jako v „klasické“ metodě na bázi, pouze s tím rozdílem, že TAS byla určována na základě měření GPS. Vyhodnocení probíhalo postupem výpočtu rychlosti z celého úseku báze (GPSs) i postupem výpočtu z jednotlivých sekundových segmentů (GPSv).

Z celého úseku byla rychlost určována velmi podobně jako u „klasické“ metody na bázi, tj. byla určena jako podíl vzdálenosti dvou koncových bodů báze (úseku měření) a času, za který letadlo tuto dráhu proletělo. Úseky je možné vybírat ze záznamu podle různých kritérií. Zde bylo využito záznamů pozemních časoměřičů, ze kterých bylo možné určit interval ve kterém se letoun nacházel v kontrolním úseku báze a tudíž by jeho režim měl být ustálený. Pro čas zaokrouhlený na celé sekundy byla dopočítaná požadovaná vzdálenost.

U této metodiky vyhodnocení je možné použít i postup definující požadovaný letový úsek z polohových souřadnic trajektorie letu. Výpočet proběhne pro body nejbližší k známé poloze konců báze.

Druhým, přesnějším přístupem, je využití sekundového záznamu GPS. Hledaná rychlost vůči zemi, byla určována jako střední hodnota (medián), jednotlivých rychlostí dílčích úseků v měřeném prostoru báze. Při každém průletu bylo podle rychlosti letu 50 až 150 segmentů.

Dalším, spíše orientačním využitím GPS, bylo jeho využití při měření výšky pro metodu pozemní kamery. Výpočet výšky průletu na základě fotogrammetrie byl nahrazen určením výšky systémem GPS. Tato byla určována jako střední hodnota z výšek několika bodů blízkých konci báze, na kterém byla umístěna kamera. Tím bylo možné srovnat tyto metody. V tomto případě se neočekávaly výsledky poskytující uspokojivé údaje pro polohovou opravu pitot-statického systému, protože GPS je v měření absolutní výšky pro tuto metodu dost nepřesný.

7.1.2 Vyhodnocení měření

Byly stanoveny polohové opravy pitot-statického systému letounů KP-2U Sova (OK-HUU 42) a L-13 SE Vivat (OK-8130) v rozsahu cestovních rychlostí letu a oprava systému experimentální pitot-statické sondy s měřicí ústřednou DAS 12, na letounu L-13 SE.

7.1.3 Srovnání jednotlivých metodik vyhodnocení

Měření pozemní kamerou potvrdilo velkou citlivost této metody na přesnost určení výšky průletu. Protože výška byla měřena poměrně nepřesně jsou výsledky pouze orientační. Aby bylo možné této metody plnohodnotně využít, je nutné měřit výšku mnohem přesněji než bylo pokusně provedeno.

Při „klasickém“ měření na bázi je problematické vyměřování báze a vytyčování časových branek. Na těchto silně závisí přesnost metody. Je zřejmé, že i malá odchylka v rovině měření času může významně ovlivnit výsledek měření. Nepřesnost se zvyšující se vzdálenosti od časové branky roste. Při měření času člověkem a stopkami, lit. [2] uvádí, že zkušený a svědomitý pracovník je schopen letadlo zachytit s přesností ± 5 až 15 m.

GPS nahrazuje poměrně nepřesnou a na organizaci náročnou pozemní část. Na základě těchto rozborů charakteristik GPS je za nejpřesnější metodiku vyhodnocení považována GPSv, která vzhledem k tomu, že vyhodnocuje rychlost jako střední hodnotu z více měření (podle rychlosti letu a délky báze 50 až 150), potlačuje náhodnou chybu jednotlivých měření a nezávisí na přesnosti vytyčení báze. Proto byly výsledky vztahovány k této metodice.

Metodika GPSs, ve které se jedná o jediné měření vzdálenosti, je zatížena přesností určení konkrétních dvou bodů. Náhodná chyba se projevuje v plné výši a hrozí i možnost výpočtu z chybně vypočteného bodu. Tomu je potřeba věnovat pozornost při vyhodnocování výsledků. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativní měření v krátkém časovém intervalu a na malou vzdálenost (~ 2 km), je její přesnost jen o málo horší, než u GPSv.

Další výhodou metodiky GPSv je to, že poskytuje možnost statistického zpracování dat. Tím, že je v každé sekundě počítaná rychlost vůči zemi, je získán poměrně rozsáhlý statistický soubor, který je schopen poskytnout informaci

o ustálenosti režimu zkoumaného průletu. Toto je nemožné u metodik Báže a GPSs, které jsou schopny určit pouze střední hodnotu rychlosti, na základě podílu vzdálenosti a času. Už samotný GPS záznam ukazuje na přesnost provedeného průletu a dodržení požadovaných podmínek. Výpočet jeho směrodatné odchylky jej kvantifikuje.

7.2 GPS PŘI MĚŘENÍ VZLETŮ A PŘISTÁNÍ

Protože měření délek vzletů a přistání je založeno přímo na monitorování dráhy letu v čase, nabízí se možnost zjednodušení stávajících postupů využitím GPS. Pro tento systém je přirozené zaznamenávat polohu přijímače v čase. Velkým přínosem je i autonomnost systému, tj. nevyžaduje žádné pozemní zabezpečení (pozorovatele, délkové značky, kamery, atd.) a rovněž zpracování výsledků je poměrně jednoduché. Instalace do letounu nevyžaduje žádné speciální úkony ani vybavení a nezasahuje do konstrukce letounu.

Na základě provedených experimentů a ověřených charakteristik GPS, byla navržena metodika využívající relativního měření polohy (např. vzhledem k počátku měření).

7.2.1 Metodika měření délek vzletů a přistání s využitím GPS

Stanovení délky vzletu do 15 m (příp. jiné předpisem definované výšky) se provede jednoduchým odečtem vzdálenosti od počátku rozjezdu do bodu, ve kterém je dosaženo žádané převýšení nad vztažným bodem. Jedná se o relativní měření vzhledem k počátku rozjezdu, tudíž převýšení je určeno s vysokou přesností.

Aby však bylo možné rozlišit jednotlivé fáze vzletu (přistání), zejména bod odpoutání (dosednutí), je nutné zaměřit profil vzletové a přistávací dráhy (RWY). Toto lze provést i ručním GPS a vyjádřením profilu vhodnou matematickou funkcí. Je nutné zahajovat vzlet z přesně definovaného místa (např. práh RWY). Do tohoto bodu se při vyhodnocování „posune“ stejný bod předem změřeného výškového profilu RWY. Celé měření je vlastně relativní, vztaženo k počátku rozjezdu (prahu RWY).

U přistání se délka dojezdu stanoví jako rozdíl vzdáleností bodu dotyku a zastavení od počátku měření. Aby bylo možné zesynchronizovat profil RWY s přijímačem v letadle, je vhodné po krátkém zastavení (nutném pro definování bodu zastavení) dorolovat na práh RWY.

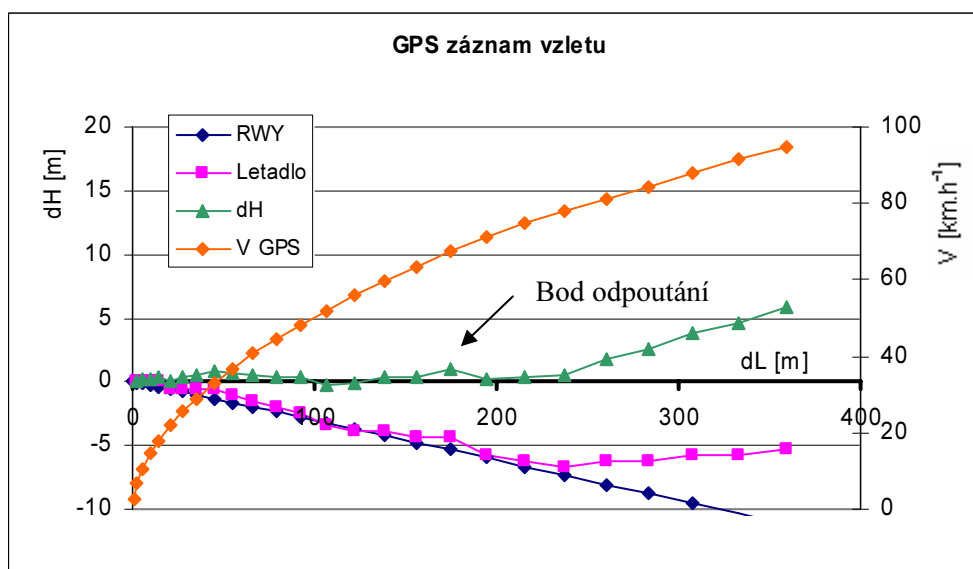
I když letové zkoušky se provádějí na RWY bez výrazných výškových rozdílů, lze tuto metodu použít na obecně tvarovaných plochách. Navržena metodika byla použita pro RWY letiště Brno-Medlánky, která má výrazné výškové převýšení prahů dráhy (kolem 20 m) a její průběh je „zvlněný“. Profil byl určen zaměřením aparaturou Garmin GPSmap 76S. Profil je vyjádřen v závislosti na vzdálenosti od prahu RWY 15. Do tohoto bodu je vhodné při měření umístit počátek lokálního souřadnicového systému, ve kterém se bude provádět vyhodnocení.

Na tak složitém povrchu, jako je na letišti Brno-Medlánky (plocha je nerovnoměrně skloněna i příčně) nemusí dojít k přesnému kopírování matematického profilu dráhy přijímačem letounu. I tak je ale možné relativně přesně definovat významné body definující jednotlivé fáze vzletu (přistání).

K jednoznačnějšímu definování charakteristických bodů vzletu (přistání) je vhodné na palubě zaznamenat čas odpoutání (dosednutí). Konkrétní bod lze pak rychle vyhledat. Rovněž lze využít i vynesení průběh rychlosti do grafu vzdáleností.

Při vybavení letounu akcelerometrem dojde při odpoutání (dosednutí) od země ke změně spektra šumu vlivem rozdílného tlumení (buzení) vibrací. Takto lze jednoznačně definovat bod odpoutání (dosednutí). Byl pozorován rozdílný charakter záznamu akcelerometru na zpevněné a nezpevněné RWY. Zpevněný povrch tlumí vibrace způsobené pohonnou jednotkou a naopak, nezpevněný povrch působí při pohybu letadla jako budič a vibrace jsou výraznější, rostoucí s rychlostí. V obou případech je ale možné přechod mezi letovou a pozemní fází jednoznačně identifikovat. Podobně se chovají všechny osy akcelerometrů.

Drobným nedostatkem je pouze relativně řídký záznam. Při frekvenci záznamu 1 Hz, ujede (proletí) letadlo kolem 15-30 metrů za jeden záznam. Vždy je však možné rozdělit jednotlivé segmenty záznamu na menší a tím upřesnit měřenou vzdálenost, např. na základě přesného určení času odpoutání (dosednutí).



Obr.4: GPS záznam vzletu letadla L-13 SE z letiště Brno-Medlánky

Poznámka: Bod odpoutání na obr. 4 byl upřesněn na základě měření času rozjezdu technikem v letounu.

8 ZÁVĚR

Disertační práce předkládá základní myšlenky pro využití GPS při měření letových výkonů. Využití této rozvíjející se technologie, která získává své místo v mnohých oborech lidské činnosti, může významně zjednodušit a zefektivnit provádění letových experimentů a v mnohých případech dokonce podat kvalitnější výsledky, než doposud používané metodiky.

Provedené experimenty prokázaly vhodnost použití ručních GPS přijímačů při měření letových výkonů. Běžně dostupné ruční GPS přijímače jsou levným a v případě vhodného použití i výkonným prvkem letových měření. Jejich instalace nezasahuje do konstrukce letounu a jsou zcela nezávislé i na ostatních palubních systémech. Jejich obsluha nevyžaduje zvláštní schopnosti nebo kvalifikaci. Proto lze předpokládat, že GPS najde svoje místo v oboru letových měření a na základě zde předložených zásad použití budou vytvořeny metodiky pro další aplikace, čím se zkvalitní a zároveň zjednoduší provádění letových experimentů.

Kromě využití GPS poskytuje disertační práce i ucelený přehled základních metod používaných pro měření letových výkonů. Samotné metodiky měření a vyhodnocování nebyly v této části detailně uváděny, protože jsou závislé na vybavení zkušebny. Literatura je v České republice v tomto oboru téměř nedostupná a hlavně zastaralá, proto autor považoval za vhodné alespoň ve stručné formě provést průřez celou problematikou oboru a případným zájemcům o letové zkoušky poskytnout základní informace, na kterých by mohli dále stavět.

V závěru práce jsou uvedeny zásady a doporučení pro provádění letových zkoušek zaměřených na měření letových výkonů a na využívání systému GPS při letových zkouškách. Je to soubor zkušeností nabytých při provádění a vyhodnocování praktických letových experimentů. Má sloužit jako úvodní instruktáž do praxe letových měření a ušetřit případnému zájemci mnoho času, nervů a financí. Rovněž využití GPS má svá specifika a pro úspěšné měření je nutné dodržet určité předpoklady, na které je zde upozorněno.

9 SUMMARY

This dissertation approaches the basic types of aircraft's performance tests and ways to implement these methods. It is focused on methods suitable for light airplanes equipped with piston engines. The aim is to introduce modern technologies, which allow carrying out the flight-testing more efficiently compared to methods generally used in the Czech Republic.

Advancements, mainly in microelectronics, allowed miniaturizing the necessary equipment and automating the measuring, recording and evaluation process. The author focused on the possible utilization of GPS (Global Positioning System), which went through a major boom since the year 2000. This navigation system provides the data related to the position of the receiver in time. Thus, it is possible to record the flight trajectory, which is the basic element for flight performance measurements. Attention was focused on routinely available handheld receivers with the precision of about 10 – 15 meters. However, by using them properly, data satisfying flight test requirements could be obtained. A verification run, with equipment of geodetic precision, has been performed in order to define the area of the system's future use in the flight performance measurements.

The author applied the system to perform the practical flight measurement regarding the aircraft noise monitoring. The system proved to be beneficial during measurements of the aircraft's pitot-static system position correction, or while performing take-off and landing run distance measurements. It substantially simplifies the measuring process and increases the safety of the flight measurements. Every case requires a suitably chosen method for measuring and evaluation. Basic guides, experiences and recommendations are the subject of this dissertation work.

LITERATURA

- [1] DANĚK, M.: Zkoušení letadel za letu, skripta VA AZ Brno, 1962
- [2] KINTR, O.: Revize provozní metodiky měření letových výkonů letounů, VZLÚ Praha, 1966
- [3] Provozní metodika měření letových výkonů a vlastností letounů, VZLÚ Praha, 1967
- [4] JOSEFÍK, M.: Metodiky měření letových výkonů, CLKV Brno, 2000
- [5] GRACEY, W.: Measurement of Aircraft Speed and Altitude, NASA RP 1046, 1980
- [6] HEARING, E.Jr.: Airdata Measurement and Calibration, NASA TM 104316, 1995
- [7] ŠOCH, P., VRÁTNÝ, J.: Experimentální metody v mechanice tekutin I., skripta ČVUT Praha, 1987
- [8] Předpis letové způsobilosti FAR 23, FAA, 1998
- [9] Poradní oběžník k FAR 23, AC 23-8A, FAA, 1989
- [10] DANĚK, V.: Mechanika letu I – Letové výkony, skripta VUT Brno, 1994
- [11] DANĚK, M.: Aerodynamika a mechanika letu, VVLŠ SNP Košice, 1990
- [12] TORENBEEK, E.: Synthesis of subsonic airplane design, Delft University Press, 1976, (ruský překlad 1983)
- [13] McCORMICK, B. W.: Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1979
- [14] KOTIK, M. G., RAŠKOVSKI, I. M., ŠITAEV, N. G.: Letnyje ispytaniya samoletov, Mašinstrojenije Moskva, 1968
- [15] ASUKE, V.: Flight Testing Homebuilt Aircraft, Iowa State University Press, 1992
- [16] STINTON, D.: Flying Qualities and Flight Testing of the Aeroplane, Blackwell Science Ltd., Oxford, 1996
- [17] ESHELBY, M.E.: Aircraft Performance: Theory and Practice, AIAA, Inc., Reston, 2000
- [18] SMITH, H., C.: Understanding Performane Flight Testing, Kitplanes and Production Aircraft, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2002
- [19] KULČÁK, L.: Klasické prostriedky zabezpečovacej leteckej techniky, skripta ŽU, Žilina, 1998
- [20] KULČÁK, L., BLAŠKO, P., DENDIS, T., PALIČKA, L.: Zabezpečovací letecká technika, EDIS, Žilina, 1999
- [21] HRDINA, Z., PÁNEK, P., VEJRAŽKA, F.: Rádiové určování polohy (Družicový systém GPS), skripta ČVUT Praha, 1995
- [22] ZARCHAN, P. et al.: Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. I, II, AIAA, Washington, 1996
- [23] World Geodetic System – (WGS-84) Manual, ICAO, 2002
- [24] ŠVÁBENSKÝ, O., FIXEL, J., WEIGEL, J.: Základy GPS a jeho praktické aplikace, skripta FAST VUT, Brno, 1995

- [25] CIMBÁLNÍK, M., MERVART, L.: Vyšší geodézie 1, ČVUT, Praha, 1997
- [26] KOSTELECKÝ, J., KOSTELECKÝ, J., jr., PEŠEK, J., ŠIMEK, J., ŠVABENSKÝ, O., WEIGEL, J., ZEMAN, A.: Quasigeoids for the Territory of the Czech Republic and Their Testing, Warsaw, Proceedings of the EGS G10 Symposium, Nice, 2002
- [27] WEIGEL, J.: Testy přesnosti přístrojů GPSmap 76S, CLKV, Brno, 2003
- [28] VĚK, V.: Měřicí technika, skripta ČVUT, Praha, 1990
- [29] JENČÍK, J., VOLF, J.: Technická měření, skripta ČVUT, Praha, 2003
- [30] KROPÁČ, O.: Metody experimentálního výzkumu, skripta ČVUT, Praha, 1981
- [31] KARPÍŠEK, Z., ŠIKULOVÁ, M.: Matematika IV, Pravděpodobnost a matematická statistika, VUT, Brno, 1990
- [32] MELOUN, M, MILITKÝ. J.: Statistické zpracování experimentálních dat, East Publishing, a.s., Praha, 1998
- [33] BARTSCH, H., J.: Matematické vzorce, SNTL, Praha, 1983
- [34] Letová příručka pro motorový kluzák L-13 SE Vivat, OK-8130, Aerotechnik CZ, s.r.o., Kunovice, 1999
- [35] Letová a provozní příručka pro letoun KP-2U Sova, OK-HUU 42, Kappa 77, a.s., Jihlava, 2001
- [36] Uživatelská příručka pro ovládání přístrojů GPS 76, GPSmap 76/76S, Picodas Praha, spol s r.o., Praha, 2003
- [37] FOX, D.: Is Your Speed True?, Kitplanes, February, 1995

PUBLIKACE AUTORA

- [A1] ŠOŠOVIČKA, R.: Vliv vychýlení klapky na aerodynamické charakteristiky nadkritického profilu, 4.uživatelská konference FLUENT 1998, Praha 1998
- [A2] POPELA, R., ŠOŠOVIČKA, R., FILÁKOVSKÝ, K.: Řešení neustálených případů obtékání těles a zobrazení výsledků, VUT Brno, 1998, Grant FV 380019/98
- [A3] JEBÁČEK, I., KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R.: Letová měření pevnostních veličin, letových výkonů a vlastností malých letadel, VUT Brno, 1998, Grant FV 380009/98
- [A4] POPELA, R., ŠOŠOVIČKA, R.: Předběžná zpráva k aerodynamickému výpočtu vztlakové klapky Ae270 , č.z. LU 3V/99, VUT v Brně, Letecký ústav, 1999
- [A5] POPELA, R., ŠOŠOVIČKA, R.: Předběžná zpráva k aerodynamickému výpočtu modifikace křídélka Ae270, č.z. LU 4V/99, VUT v Brně, Letecký ústav, 1999
- [A6] POPELA, R., ŠOŠOVIČKA, R.: Aerodynamický výpočet modifikace křídélka letounu Ae270, č.z. LU 8V/99, VUT v Brně, Letecký ústav, 1999
- [A7] DANĚK V., KOUŘIL M., ŠOŠOVIČKA, R.: Design of the flying airfoil testbed, Proceedings of the international conference on Development of Aeronautical Science and Technology, Košice, Slovenská republika, 1999
- [A8] ŠOŠOVIČKA, R., KOUŘIL, M.: Předběžný návrh metodiky letových měření stranových derivací na letounu KP – 2U Sova, VUT v Brně, Letecký ústav, 1999
- [A9] ŠOŠOVIČKA, R., KOUŘIL M.: Návrh metodiky letových měření stranových a podélných vlastností, konference AM 2000, Liberec, 2000
- [A10] ŠOŠOVIČKA, R., KOUŘIL M.: Konstrukční návrh nosné konstrukce kablo-modelu pro létající laboratoř L-13 SE, výzkumný záměr MSM 262 100005, VUT v Brně, Letecký ústav, 2000
- [A11] POPELA, R., KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R.: Aerodynamická studie VUT 100, Projekt výzkumu a vývoje programu MPO ČR, Rozvoj center špičkových průmyslových výrobků a technologií, CVVL, Brno, 2000
- [A12] ŠOŠOVIČKA, R.: Létající laboratoř L-13 SE s kablo-modelem profilu MS-0313, výzkumný záměr MSM 262 100005, VUT v Brně, Letecký ústav, 2002
- [A13] ŠOŠOVIČKA, R., FORETNÍK, P.: Využití GPS při měření hluku letadel, Letecký zpravodaj 3/2002, VZLU Praha, 2002, ISSN 1211 – 877X
- [A14] ŠOŠOVIČKA, R., KOUŘIL, M.: Kalibrace pitot-statického systému letounu různými metodami, Brno 2002, Grant Fondu vědy FSI VUT v Brně, FP320054

- [A15] KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R.: Studie letounu VUT 300 Zlín, Aerodynamický výpočet – Letové vlastnosti, Projekt výzkumu a vývoje programu MPO ČR, Rozvoj center špičkových průmyslových výrobků a technologií, CVVL, Brno, 2002
- [A16] ŠOŠOVIČKA, R.: Polohová oprava pitot-statického systému motorového kluzáku L-13 SE Vivat, OK-8130, metodou létání na bázi, výzkumný záměr MSM 262 100005, VUT v Brně, Letecký ústav, 2003
- [A17] FORETNÍK, P., ŠOŠOVIČKA, R.: Verification of GPS Under Various Conditions Used for Aeronautical Applications, Letecký zpravodaj 3/2002, VZLU Praha, 2003, ISSN 1211 – 877X
- [A18] KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R., DANĚK, V., JEBÁČEK, I.: The Dynamic Measurement Unit Application for The Measurement of Light Aircraft Flight Characteristics, International conference Transport means 2003, ISBN 9955-09-511-3, Kaunas Lithuania 2003
- [A19] KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R.: Optické gyro v aplikaci pro měření dynamické stability letounu, konference PhD 2003, ISBN 80-7043-246-2, Srní 2003
- [A20] KOUŘIL, M., ŠOŠOVIČKA, R.: Experimentální určování polohových úhlů letounu v prostoru, grant Fondu vědy FSI, FP 330056, Brno 2003

AUTOROVO CV

Jméno:

Róbert Šošovička

Osobní data:

Stav: svobodný

Státní příslušnost: Česká republika, Slovenská republika

Národnost: slovenská

Datum a místo narození: 26. 7. 1974, Ilava, okr. Ilava, Slovenská republika

Zaměstnání:

2000- Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Letecký ústav, Odbor letových aplikací
Technický pracovník,

1997-2000 student PGS, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního
inženýrství, Letecký ústav

Vzdělání:

1997- Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Letecký ústav
Doktorské studium
Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: Stavba letadel

1992–1997 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Letecký ústav
Magisterské studium
Obor: Letadlová technika
Specializace: Stavba letadel

Jazykové znalosti: Anglicky, Rusky

Vědecko-výzkumná činnost:

2004 řešitel grantového úkolu č. BD 134 3068, Měření stoupacích
rychlostí lehkého letounu

2003 spoluřešitel grantového úkolu č. FP 330056, Experimentální
určování polohových úhlů letounu v prostoru

2002 řešitel grantového úkolu č. FP 320054, Kalibrace pitot-statického
systému letounu různými metodami

- 2000 účast na projektu „ Podpora vývoje letounu nové generace“, studie letounu VUT 100, Projekt výzkumu a vývoje programu MPO ČR, Rozvoj center špičkových průmyslových výrobků a technologií, CVVL
- 1999- účast na výzkumném záměru „Experimentální výzkum aerodynamických charakteristik na létajících laboratořích“, č. MSM 262 100005
- 1998 spoluřešitel grantového úkolu č. FV 380019/98, Řešení neustálených případů obtékání těles a zobrazení výsledků
- 1998 spoluřešitel grantového úkolu č. FV 380009/98, Letová měření pevnostních veličin, letových výkonů a vlastností malých letadel