

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jan Vondrák

Historie navigace – od kvadrantu k GNSS

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 58 (2013), No. 1, 11–20

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/143254>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2013

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Historie navigace – od kvadrantu k GNSS

Jan Vondrák, Praha

1. Úvod

Slovo navigace pochází z latinských slov *navis* (lodí) a *agere* (vést, hnát, konat). Navigace je tedy souhrnný název pro určování polohy a řízení pohybu plavidla (a přeneseně i letadla, vozidla, osoby a pod.) z jednoho místa na druhé. Při navigaci je podstatné čas od času určit přesnou polohu, a odtud odvodit směr dalšího pohybu. K tomu je možné využít pouze pozorování objektů, jejichž polohu již známe. Na souši ve zmapovaném terénu to nečiní žádné zvláštní problémy, podstatně složitější je situace při plavbě na moři daleko od pevniny či při cestování v nehostinné, dosud nezmapované krajině, kdy jedinými použitelnými objekty pozorování jsou nebeská tělesa. Proto byla v minulosti jediná možnost, využít při navigaci astronomická pozorování. V průběhu staletí se zcela přirozeně metody navigace měnily v závislosti na technickém pokroku. V následujícím textu se pokusíme nastínit historický vývoj používaných technických prostředků a metod navigace, až po nejnovější globální družicové navigační systémy např. GNSS (angl. Global Navigation Satellite System).

2. Navigace na základě astronomických pozorování

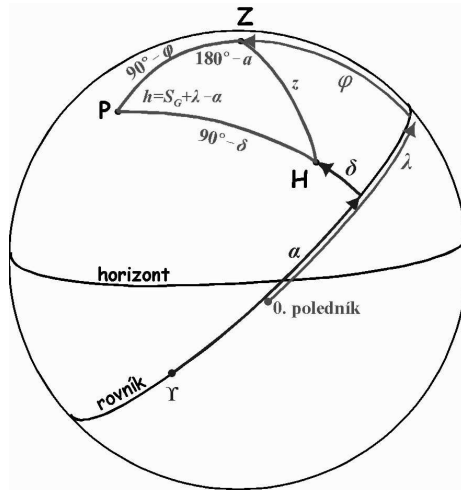
2.1. Základní vztahy

Protože při navigaci pomocí astronomických pozorování se vztažná měření konají z povrchu rotující Země, základem jsou transformační vztahy mezi pozemskou a nebeskou souřadnicovou soustavou (viz např. [1]). Situace je zřejmá z obr. 1, kde jsou znázorněny obě soustavy (tj. obzorníková, vázaná na místní zenit Z , a nebeská, vázaná na nebeský pól P). Zde α , δ značí rektascenzi a deklinaci (nebeské rovníkové souřadnice) pozorovaného tělesa, a , z jeho azimut a zenitovou vzdálenost (obzorníkové souřadnice), λ , φ délku a šířku (zeměpisné souřadnice) stanoviště a S_G greenwickský hvězdný čas (tj. úhel mezi jarním bodem Υ a 0. poledníkem); h pak značí hodinový úhel nebeského tělesa. Řešení sférického navigačního trojúhelníku PZH mezi světovým pólem, zenitem a nebeským objektem H (např. hvězdou) dává potřebné matematické transformační vztahy mezi oběma soustavami; pro výpočet obzorníkových souřadnic z nebeských platí vztahy

$$\begin{aligned}\cos z &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h, \\ \sin z \sin a &= \cos \delta \sin h, \\ \sin z \cos a &= -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos h.\end{aligned}\tag{1}$$

Nejjednodušší případ je pozorování v místním poledníku (tj. při kulminaci tělesa); potom je $a = 0^\circ$ nebo 180° (hvězda na jihu/severu od zenitu), $h = 0^\circ$ nebo 180°

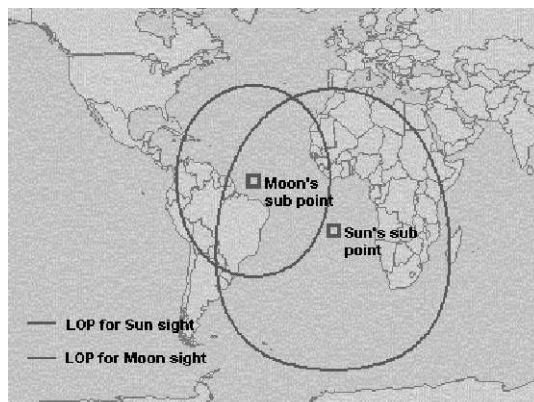
Ing. JAN VONDRÁK, DrSc., dr. h. c., Astronomický ústav AV ČR, v.v.i., Boční II 1401, 141 00 Praha 4, e-mail: vondrak@ig.cas.cz



Obr. 1. Obzorníková a nebeská rovníková soustava

(v horní/dolní kulminaci). Trojúhelník degraduje na oblouk, a tedy platí $z = \varphi - \delta$ nebo $\delta - \varphi$ (hvězda na jihu/severu), $S_G + \lambda - \alpha = 0$ h nebo 12 h (v horní/dolní kulminaci). Ze změřené zenitové vzdálenosti a předpokladu znalosti rovníkových souřadnic hvězdy (Slunce, Měsíce, planety ...) spočteme zeměpisnou šířku, a pokud známe i hvězdný čas okamžiku pozorování na 0. poledníku, spočteme též zeměpisnou délku.

Pokud pozorujeme objekt (Slunce, Měsíc, planety, jasnou hvězdu) v obecné poloze, změříme nejprve jeho zenitovou vzdálenost z a pro čas pozorování spočítáme zeměpisné souřadnice místa, které má pozorovaný objekt v zenitu [2]. Zeměpisná šířka takového místa se rovná deklinaci δ pozorovaného objektu, jeho délka se pak vypočte jako rozdíl $\alpha - S_G$. Pozorovatel se musí nacházet na tzv. poziční čáře, která je od tohoto místa vzdálena o úhel z . Pak opakujeme postup pro jiný objekt, a pozorovatel se nachází na průsečíku obou pozičních čar (viz obr. 2).



Obr. 2. Určení místa pozorovatele z pozorování Slunce a Měsíce

Pokud takových těles pozorujeme více, odstraní se dvojznačnost řešení a navíc se určení polohy zpřesní. Tato metoda se stále ještě používá, americké válečné letectvo a loďstvo vyžadovalo její znalost až do r. 1997 (je nezávislá na pozemní podpoře, má globální charakter, určená poloha nemůže být odhalena nepřitelem). Udávaná přesnost polohy je 5 km.

2.2. Souvislost mezi určováním času a zeměpisné délky

Přímý vztah mezi časem a zeměpisnou délkou je dán rotací Země – 15° délky odpovídá otočení Země za 1 hodinu. Zeměpisná délka je tedy rovna rozdílu mezi místním časem a časem na 0. poledníku v tomtéž okamžiku. Jinými slovy: známe-li v okamžiku pozorování světový čas (ten odpovídá 0. poledníku), můžeme určit zeměpisnou délku našeho stanoviště. Určení místního času z pozorování nebeských objektů je poměrně jednoduché (např. Slunce kulminuje v poledne místního času), problémem ale bylo v minulosti (bez přesného chronometru či rádiového spojení) zjistit, kolik je v době pozorování hodin na 0. poledníku. Nejistota v určení délky byla kritická zejména pro námořní navigaci [3]: chyby vedly ke zbytečnému prodlužování doby plavby či dokonce ztroskotání plavidel. Námořní velmoci proto v minulosti vypisovaly vysoké ceny na vyvinutí přesných metod určení zeměpisné délky: Španělsko 1567, Holandsko 1636, Velká Británie 1714, Francie 1715, ...

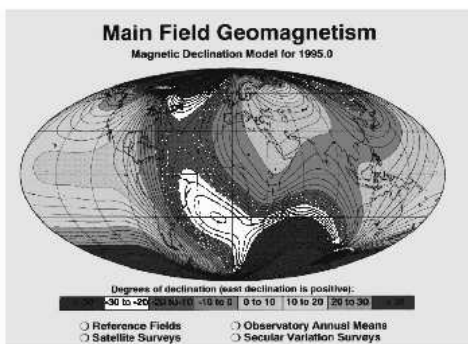
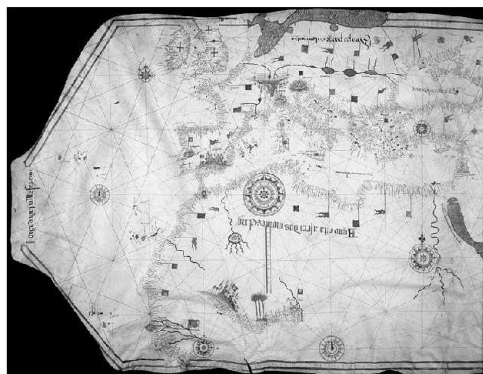
Zeměpisná délka se v minulosti měřila od různých, konvencionálně zvolených počátků; např. v době Hipparchově (cca 2. st. př. n. l.) od Rhodu, později od Ferry (nejzápadnější výběžek tehdy známého světa) nebo od Paříže, od r. 1884 (Washingtonská konference) byla mezinárodně přijata konvence počítat délky od Greenwiche (Francie k ní ovšem přistoupila mnohem později, až od r. 1911).

3. Historický vývoj metod astronomické navigace

Nejstarším navigačním přístrojem je člověk sám. Při pohybu v terénu vnímáme okolní krajinu a význačné body v ní, téměř nevědomky přitom odhadujeme vzdálenosti a úhly mezi nimi. Pokud krajinu již známe, máme uloženu její ‚mapu‘ v mozku (vnitřní paměť), v neznámém terénu používáme skutečnou mapu (vnější paměť). S touto mapou pak porovnáváme svá ‚měření‘ a řídíme podle toho své směřování k danému cíli.

Podobně se chovali i dávní mořeplavci (již od cca 3 500 př. n. l.); zpravidla cestovali jen ve dne, nevzdalovali se příliš od pevniny a řídili se orientačními body na pobřeží. Pokud se od pevniny vzdálili, byli schopni určit pouze zeměpisnou šířku z pozorování výšky Slunce ve dne a Polárky v noci. Polohu ve směru východ-západ odhadovali pouze z rychlosti a doby plavby. Čas přitom měřili pomocí přesýpacích hodin a rychlost z pozorování vzájemného pohybu lodí a různých předmětů, plovoucích na hladině. Přesto se později Vikingové (cca 900–1000 n. l.) odvažovali plout až na Island či do Grónska a dokonce i do Ameriky.

Od 13. století se začal pro navigaci používat magnetický kompas (princip je ale mnohem starší, vynalezen asi v Číně ve 2. stol.), zpočátku hlavně pro stanovení směru větru, později i pro určení směru plavby, a také olovnice k měření hloubky oceánu. Instrukce pro plavbu po známých trasách pak obsahovaly též informace o hloubce pobřežních vod. V té době se také objevují první námořní nákresey, tzv. portolánové mapy [4] (často drženy v tajnosti před konkurencí). Ty ještě neobsahovaly zeměpisnou síť, ale směry mezi jednotlivými přístavy. Příklad portugalské portolánové mapy je na obr. 3.

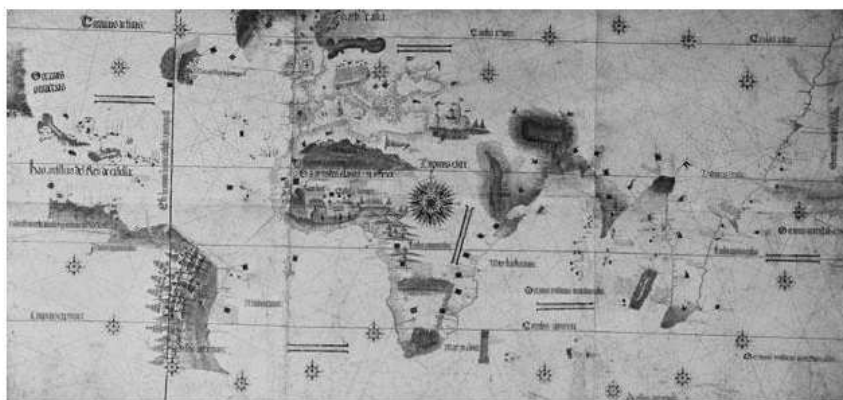


Obr. 4. Námořní magnetický kompas, magnetická deklinace

Námořní magnetický kompas má určité nevýhody: neukazuje přesně směr k severnímu pólu (magnetická deklinace) a je citlivý na okolní vlivy (viz obr. 4). Magnetická deklinace se navíc s časem mění. Proto byl později nahrazen gyrokompasem.

Po řadě pozemních expedic Evropanů do Asie v 13.–15. století (Mongolsko, Čína, Indie) nastává od 15. století věk objevů po moři: Portugalci a později Španělé se plaví dál od evropského kontinentu a objevují nová území (Madeiru 1419, Azory 1427, západní pobřeží Afriky 1434, Mys Dobré naděje 1487, Ameriku 1492, doplouvají do Indie 1498, Brazílie 1500). Současně se také objevují mapy světa (viz např. obr. 5), na kterých jsou zakresleny nově objevené země [5].

V 15. století se také vyskytují první astronomické přístroje pro měření úhlů na obloze nebo výšky nebeských těles nad obzorem: Jakubova hůl, námořní astroláb či kvadrant (obr. 6). Schéma kvadrantu je zde uvedeno ve dvou variantách – bez zrcadla a se zrcadlem. Na rozdíl od Jakubovy hole, kde se musel úhel α počítat z pevné délky ramene CD, posuvného podél směru záměry, a odečteného úseku AE na lineární škále, měl námořní astroláb i kvadrant již dělený kruh, na kterém se změřený úhel odečítal přímo.



Obr. 5. Cantino Planisphere (Portugalsko, 1502)

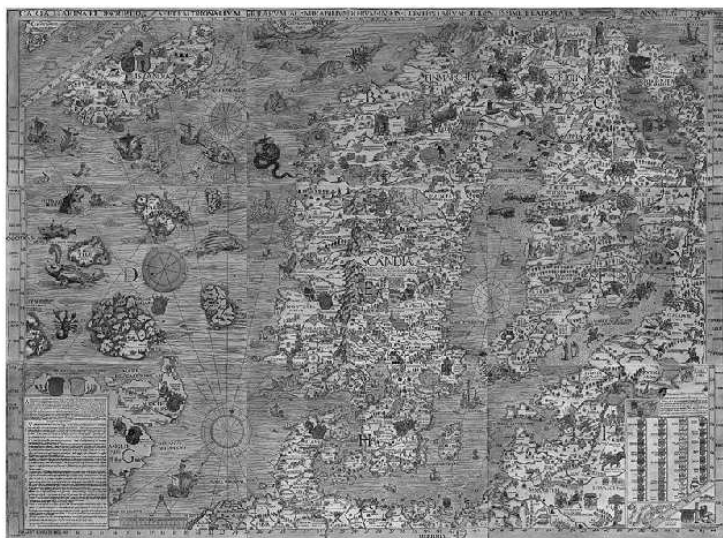


Obr. 6. Jakubova hůl, námořní astroláb, schéma kvadrantu

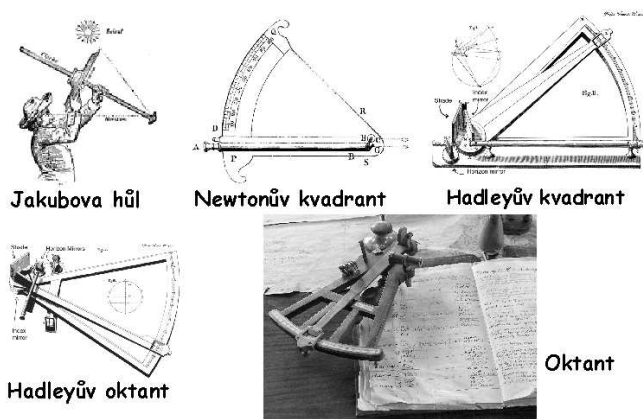
Od 16. století se již začínají objevovat skutečné námořní mapy, sloužící jako pomůcka pro přesnější navigaci, jako je např. mapa Skandinávie na obr. 7, pocházející ze Švédska.

Od 17. století se objevují první přístroje se zrcadlem. Ty poskytují možnost pozorování dvou objektů současně, a tak umožňují měřit úhlovou vzdálenost mezi nimi. Zde jsou některé příklady, mezi kterými se objevuje řada známých a slavných jmen:

- Joost van Breen 1660 – spiegelboog (Jakubova hůl se zrcadlem),
- Robert Hooke 1666 – přístroj s jedním zrcadlem,
- Edmond Halley 1692 – přístroj se zrcadlem a dvojitým dalekohledem,
- Isaac Newton 1699 – odrazný kvadrant,
- John Hadley 1731 – odrazný kvadrant,
- John Hadley, Thomas Godfrey 1731, Jean-Paul Fouchy 1732, Caleb Smith 1734 – oktant,
- oktant byl později (John Bird 1757) nahrazen úspěšnějším sextantem, schopným měřit úhly až do 120° .



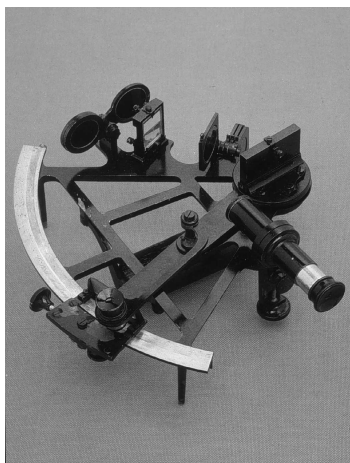
Obr. 7. Carta Marina (Švédsko, 1539)



Obr. 8. Ukázka přístrojů se zrcadlem

Některé z těchto přístrojů se zrcadlem jsou na obr. 8, nejúspěšnější z nich, sextant, pak na obr. 9. Ten se natolik osvědčil, že se používá až do dnešních dob.

Námořní chronometr udržuje čas výchozího bodu plavby, a spolu s astronomicky měřeným místním časem proto pomáhá určit rozdíl zeměpisných délek obou míst. Námořní chronometr vynalezl v Anglii John Harrison [6], svůj první model H1 vyzkoušel při plavbě do Lisabonu r. 1736. Skutečný úspěch měl až jeho model H4 (1759) při plavbách na Jamaicu a Barbados. Na obr. 10 je model H5, který testoval sám král George III v r. 1772 a shledal ho velice přesným (třetina sekundy za den). Námořní chronometry byly ve svých počátcích velice drahé (cena činila až 30% ceny lodi), standardně se proto začaly používat až od 19. století.



Obr. 9. Sextant



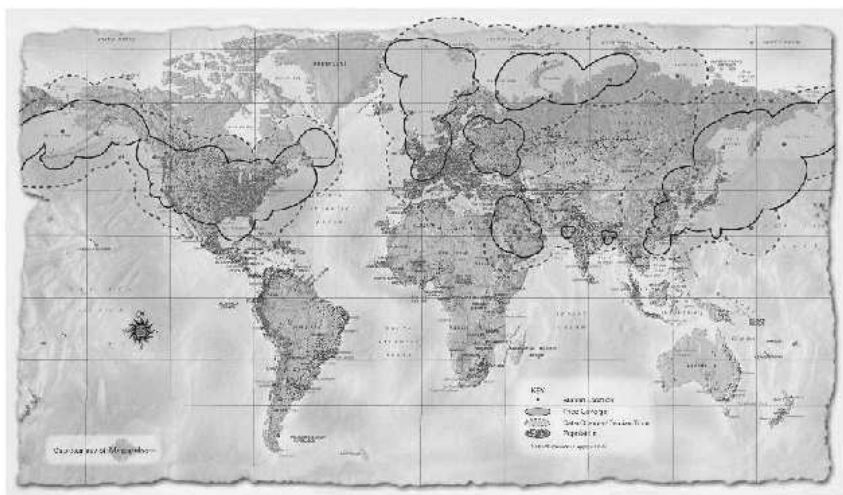
Obr. 10. Harrisonův námořní chronometr H5

Na další vývoj časoměrných zařízení, používaných pro navigaci, se čekalo až do počátku 20. století. Po vynálezu rádia a zavedení rádiových časových signálů bylo možné námořní chronometr pravidelně srovnávat s těmito signály a tak dále zpřesnit určení zeměpisné délky. Později byly chronometry nahrazeny daleko stabilnějšími křemennými hodinami.

4. Moderní metody navigace

Moderní metody navigace se začaly rozvíjet ve 20. století, zejména po druhé světové válce, v souvislosti s rozvojem elektrotechniky a elektroniky.

Radarová navigace využívá otočný radar, umístěný na lodi, který měří směry a vzdálenosti k okolním objektům. Za předpokladu znalosti polohy okolních objektů se pak tato informace využije k výpočtu polohy lodi jakožto průsečíku kružnic okolo



Obr. 11. Pokrytí Země systémem Loran-C

pozorovaných objektů. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že ji nelze použít na širém oceánu a že je nutná přesná identifikace pozorovaných objektů.

LORAN-C (LOng Range Aid to Navigation) [7] je pozemský rádiový navigační systém, využívající nízkofrekvenční (90–110 kHz) vysíláče na pobřeží. Systém vznikl za druhé světové války v USA (jakožto vylepšení britského GEE), jeho dosah byl v počátcích do 2000 km. Rusko používá téměř identický systém pod názvem Čajka. Princip systému je ten, že se měří rozdíl času dopadu signálu ze dvou různých stanic. Plavidlo pak musí ležet někde na hyperbole, která má konstantní rozdíl vzdáleností od obou stanic, odpovídající změřenému časovému rozdílu. Pozorování ze dvou dvojic stanic pak vede k určení polohy jakožto průsečíku obou hyperbol; přesnost určené polohy je desítky až stovky metrů. Mapa pokrytí Země systémem Loran-C je uvedena na obr. 11. Tento systém přestal být používán v r. 2010.

Globální navigační družicové systémy (GNSS) [8] využívají k navigaci umělé družice Země, jejichž polohy musejí být proto známy s vysokou přesností. Historicky první družicový navigační systém TRANSIT (NAVSAT) byl vyvinut v USA na konci 50. let (prototyp byl vyvinut v r. 1959, používán byl standardně od r. 1964). Využíval měření Dopplerova posuvu rádiového signálu UHF, přijímaného od nízko letících družic (1100 km, oběžná doba 106 min, systém zahrnoval až 10 družic). Přesnost určení polohy byla cca 50 m, ale byl využíván i pro geodetické účely, s přesností na několik decimetrů. Zde je třeba zmínit jméno geodeta Jana Kouby z Kanady (český emigrant původem z jižních Čech), který se proslavil svým výpočetním programem pro tyto účely GEODOP, používaným takřka na celém světě. Družice systému Transit je zobrazena na obr. 12.

GPS (Global Positioning System) je dnes nejznámějším moderním navigačním systémem, který od r. 1978 začal postupně nahrazovat TRANSIT. Původně byl vyvinut pro vojenské účely USA, později byl uvolněn i pro civilní sektor. Umělecké ztvárnění družice GPS je zobrazeno na obr. 13. Systém GPS sestává ze tří segmentů:



Obr. 12. Družice Transit-1A při montáži



Obr. 13. Družice GPS

- Kosmický segment, sestávající z 24 satelitů na dráhách v 6 rovinách, ve výšce cca 20 tisíc km, sklon jejich drah je 55° , oběžná doba 11 h 58 min, vypouštěny byly postupně v blocích I–IIF. Jsou vybaveny vysílačem, atomovými hodinami, procesory, slunečními panely, setrvačníky, raketovými motorky atd. Vysílají na více frekvenčních pásmech, podstatné jsou dvě sinusové nosné vlny (o frekvencích 1575 a 1228 MHz), které jsou modulované kódy o stavu hodin, dráhových parametrech družice atd.
- Řídicí segment je pozemský, monitoruje funkci družic a předává jim údaje o dráze, chodu jejich hodin atd. Hlavní stanice je v Colorado Springs, monitorovací stanice na Havaji, Ascensionu (jižní Atlantik), Diego Garcia (Indický oceán) a Kwajaleinu (Tichý oceán).
- Uživatelský segment zahrnuje všechny přijímače na Zemi.

Měřenou veličinou je čas hodin na družici, zachycený pozemským přijímačem. Z rozdílu obou časů a známé rychlosti světla se pak vypočítá tzv. pseudovzdálenost

$$\rho = c(t_s - t_d), \quad (2)$$

která je ale zatížena mnoha chybami. Chyba hodin přijímače je největší, řeší se jako neznámý parametr; šíření světla v ionosféře se odstraní použitím dvou různých frekvencí; pro výpočet šíření světla v troposféře se používají různé modely; relativistické efekty se započítávají podle standardních modelů atd. . . .

Při současném pozorování alespoň čtyř družic a znalosti jejich přesných poloh je možné vypočítat tři pravoúhlé geocentrické souřadnice stanice (jakožto průsečík tří kulových ploch) a chybu místních hodin. Pro běžnou navigaci o nižší přesnosti (metry) se používá kódové měření, zpravidla jen v jedné frekvenci v reálném čase, s využitím časových značek a údajů o dráze, přenášených z družice. Měření vyhodnocuje výpočetní program, uložený v paměti přijímače, který též převádí pravoúhlé geocentrické souřadnice na zeměpisné s použitím referenčního elipsoidu. Nadmořské výšky se získávají z výšek nad elipsoidem opravou o zvlnění geoidu.

Pro přesnější geodetické či geodynamické využití (s přesností až několika milimetrů) se používá fázové měření na dvou frekvencích. Měření se zpracovává dodatečně, speciálním výpočetním programem (Bernese, vyvinutým Astronomickým ústavem Univerzity v Bernu), ve kterém se musejí mj. řešit tzv. ambiguity (celé počty vln) a použít přesnější efemeridy, známé až se zpožděním. Tyto práce jsou koordinovány v IGS (International GNSS Service).

Dalším globálním navigačním družicovým systémem je ruský *GLONASS*, podobný GPS. Využívá družice na poněkud nižší dráze (19 tisíc km, doba oběhu 11h 15min) a zahrnuje 24 družic ve třech rovinách se sklonem 65° , které vysílají na několika frekvencích (v rozmezí cca 1200–1600 MHz). Tento systém je již funkční. Evropský systém *GALILEO* (s řídicím centrem v Praze) je založen na stejném principu a ještě není zcela funkční; družice jsou na vyšší dráze nežli GPS (23 tisíc km), kompletní systém počítá s 30 družicemi ve třech rovinách se sklonem 56° vysílajícími ve dvou frekvenčních pásmech (1164–1214, 1563–1591 MHz). Zatím byly vypuštěny dvě experimentální družice (2005, 2008) a čtyři operační družice (po dvou v říjnu 2011 a v říjnu 2012). Do r. 2015 má být na dráze 18 družic.

Čínský navigační družicový systém *BeiDou* (Velký vůz), anglicky zvaný též Compass, je systém původně limitovaný jen na území Číny a blízké okolí. Ve fázi I – demonstrační (2000–2003) fungoval pouze na regionální bázi a sestával ze tří geostacionárních družic (GEO). Fáze II (2012–2020) zahrnuje 5 geostacionárních družic (GEO), 5 na skloněných geostacionárních drahách (IGSO), 25 na středních skloněných drahách (MEO se sklonem dráhy 55° a výšce 22 tisíc km). Do září 2012 bylo vypuštěno již 15 družic (5 GEO, 5 IGSO, 5 MEO).

5. Závěr

Moderní družicové navigační systémy jsou velice přesné, spolehlivé a dnes již dobře dostupné všem kategoriím uživatelů. GPS, GLONASS a GALILEO se vzájemně dobře doplňují, jejich kombinace odstraňuje řadu nepříjemných problémů např. s rezonancemi mezi orbitálním oběhem a dalšími vlivy (tíhové pole Země, vlivy atmosféry apod.)

L i t e r a t u r a

- [1] HOLLAN, J., MÁNEK, J., POLECHOVÁ, P., ŠILHÁN, J., VANÝSEK, V., VONDRÁK, J., WOLF, M., ZNOJIL, V.: *Astronomická příručka*. Academia, Praha, 1992.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Celestial_navigation
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_longitude
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Portolan_chart
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Cantino_planisphere
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/John_Harrison
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/LORAN>
- [8] http://cs.wikipedia.org/wiki/Globální_družicový_polohový_systém