

# POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

## 04 POKROČILÉ TECHNIKY GNSS

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Precise Point Positioning (PPP)
- Síťové řešení nad dvojité-diferencovanými observacemi

# Precise Point Positioning (PPP)

- Technika GNSS využívající nediferencované observace z 1 přijímače = nevyžaduje druhý přijímač ani síť stanic!
- nahrazuje palubní produkty vysílané družicemi tzv. přesnými produkty (efemeridy a korekce chyb hodin družic)
- pro aplikace v reálném čase, blízkém reálném čase i post-processing
- statická x kinematická řešení
- obvyklé je využití dvou-frekvenčních měření, ale existují řešení založená na jedno-frekvenčních observacích
- dosažitelná přesnost určení souřadnic se pohybuje mezi 1-2 centimetry a jedním metrem v závislosti na délce observace a komplexnosti řešení

# Precise Point Positioning (PPP)

- vhodná metoda pro aplikace, kde je použití diferenčního měření vyloučeno (velká vzdálenost k referenčním stanicím) či komplikované
- na výstupu je kromě souřadnic místa měření možno získat i parametry troposféry (ZTD), korekce chyb hodin přijímače
- při zpracování měření z velkého množství stanic (stovky, tisíce) umožňuje zpracování paralelizovat na více jader/počítačů = každá stanice se zpracovává samostatně!
- vyžaduje určitý čas po zahájení měření k dosažení vysoké přesnosti = tzv. doba konvergence

# Princip PPP

- obdoba klasické jednoduché autonomní techniky Single Point Positioning (SPP), která však cílí na dosažení výrazně vyšší kvality určování polohy
- chyby v poloze družic a chyby hodin družic do značné míry eliminovány použitím přesných produktů
- vliv ionosféry je eliminován použitím lineární kombinace signálů či při měření na 1 frekvenci obvykle ionosférickými mapami
- vliv troposféry – hydrostatická složka obvykle modelována, nehydrostatická určována jako neznámý parametr při zpracování (případně celý vliv troposféry modelován či stanovován)
- chybu hodin přijímače je potřeba určovat jako neznámý parametr při zpracování

# Princip PPP

- obvyklé je modelování či eliminování dalších vlivů působících na měření (fázová centra antén přijímačů, phase wind-up, slapové síly, hardwarové biasy, apod.)
- vyřešení ambiguit není přímočaré, PPP řešení je proto často postaveno nad float ambiguitami - pro jejich fixování jsou nutné externí produkty korigující nekalibrované fázové biasy (UPD produkty)

# Princip PPP - shrnutí

## Eliminováno

chyby efemerid družic, chyby hodin na družicích, vliv ionosféry prvního řádu (při 2 frekv. měření)

## Modelováno

vliv ionosféry prvního řádu (při 1 frekv. měření), hydrostatická složka troposféry, fázová centra přijímače, slapové síly, další vlivy

## Určováno při zpracování

souřadnice místa měření, chyby hodin přijímače, nehydrostatická složka troposféry, případně ambiguity

# Srovnání diferenčních technik a PPP

Výhody PPP	Výhody DD
nevyžaduje měření z více přijímačů – nenáročné na infrastrukturu, řešení korekcí atd.	eliminace chyb hodin družic (chyby skutečně fyzicky odstraníme z měření, u PPP jen použijeme korekce chyb)
velmi rychlá metoda pro post-processing	eliminace chyb hodin přijímačů
	ambiguity mají celočíselný charakter a je relativně snadné je vyřešit
	nevyžaduje dlouhý čas pro dosažení vysoké přesnosti výstupů



- Zejména v oblastech, kde není k dispozici infrastruktura pro diferenční měření (referenční stanice GNSS, mobilní internet či jiná technologie pro šíření korekcí)
- velmi často pro letecké a námořní aplikace:
  - letecká, námořní navigace
  - snímkování zemského povrchu (bezpilotní letadla)
  - přesné zemědělství
- pro monitorovací aplikace – zemětřesení, vulkanická aktivita, atd.
- v aplikacích, kde je potřebné zpracovávat najednou data ze stovek přijímačů (snadná paralelizace)

# Postup PPP

- Metoda nevyžaduje předchozí znalost souřadnic místa měření
- prvním krokem je určení přibližných souřadnic z kódových měření a stanovení a priori (počátečních) hodnot dalších určovaných parametrů
- Dva přístupy k určování neznámých parametrů:
  - dávkové zpracování všech observací – iterativně jsou zpracovávány všechny dostupné observace a v každé iteraci zpřesňován odhad neznámých parametrů; běžné je využití metody nejmenších čtverců; přístup běžný pro post-processing
  - sekvenční zpracování – neznámé parametry nejsou v každé epoše určovány od začátku, ale vychází se z jejich poslední hodnoty a výpočtu jejich změny za daný časový interval – postupně se zpřesňuje jejich určení = řešení tzv. konverguje; běžné je využití Kalmanova filtru; přístup běžný pro post-processing i real-time řešení

# Postup PPP

- Souřadnice místa měření mohou být v čase neměnné (statické měření), či proměnlivé (kinematické měření = i desítky m/s u pohybujícího se vozidla)
- časové změny chyb hodin přijímače závisí na kvalitě těchto hodin
- nehydrostatická složka zpoždění vlivem troposféry (ZWD) se bude v čase měnit typicky o několik mm až málo cm za hodinu
- ambiguita zůstává konstantní dokud nedojde k cycle-slip

# Postup PPP

- jelikož z počátku není možné vůbec určit ambiguity, řešení je postaveno pouze na kódových měřeních a jejich kvalitě
- s postupem času jsou přidávána fázová měření, float ambiguity a souřadnice (v případě statických měření) konvergují na konstantní hodnoty a s časem se primárně mění pouze korekce chyby hodin přijímače a ZWD
- neznámé parametry jsou určovány buďto Kalmanovou filtrací (pro real-time i post-processing), nebo metodou nejmenších čtverců (pouze pro post-processing) – záleží na software
- kvalitu celého řešení samozřejmě ovlivňuje i počet viditelných družic, jejich rozmístění na obloze a kvalita observací (šum, multipath, apod.)

# Doba konvergence

- **doba konvergence** = čas potřebný od zahájení (inicializace) měření realizovaného sekvenčním přístupem k dosažení požadované přesnosti určení polohy (čas k dosažení odhadu chyby měření menší než je požadováno)
- závisí na aktuální konstelaci družic, kvalitě observací a zejména na používaném intervalu observací (1 s, 30 s, 5 min apod.) – je potřeba mít produkt s korekcemi chyb hodin družic s odpovídajícím intervalem
- typická doba potřebná k dosažení 10cm přesnosti určení souřadnic při float řešení nad 2 frekvenčním měřením s intervalem 30 s je 20-30 minut (rychleji pro horizontální složku souřadnic než vertikální)
- při použití kombinace vícero systémů (multi-GNSS) se tato doba může výrazně zkrátit
- doba konvergence u float řešení je delší než u fixed řešení s vyřešenými ambiguitami
- po dosažení konvergence je již přesnost výstupů poměrně stabilní

# PPP - řešení ambiguit

- Problematické z důvodu nekalibrovaných fázových zpoždění ze strany družic a přijímače = hardwarová zpoždění
- nekalibrovaná fázová zpoždění (uncalibrated phase delays, UPD) = přijímače a vysílače na družici jsou vybaveny oscilátory pracujícími na základní frekvenci (10.23 MHz v případě GPS), z níž se následně skládají jednotlivé signály  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_x$  a jejich modulace (kódy) – při kombinování jednotlivých částí signálů dochází k různým zpožděním v HW
- nekalibrovaná fázová zpoždění jsou v případě použití dvojitých diferencí zcela eliminovány, v případě nediferencovaných observací však v observacích přetrvávají
- kvůli UPD nemají ambiguity nediferencovaných observací podobu celého čísla
- klasická PPP technika byla (je) postavena na nevyřešených ambiguitách = float řešení

# PPP - řešení ambiguit

- kolem roku 2010 začala vznikat řešení jak UPD stanovovat, což umožňuje ambiguitu vyřešit klasickými postupy používanými při technice DD a získat tak přesnější fixed řešení
- v současnosti globální UPD produkt poskytují například analytická centra CNES, CODE, Wuhan University
- dostupnost fixed řešení má pozitivní dopad nejen na přesnost měření (projevující se nejvíce v zeměpisné délce), ale zejména také na potřebnou dobu konvergence, kterou zkracuje přibližně o 30 %

# Jedno-frekvenční PPP řešení

- Zásadním problémem jedno-frekvenčních měření obecně je nemožnost použití lineární kombinace signálů pro odstranění vlivu ionosféry
- typickým řešením této situace je použití výstupu z globálního či lokálního modelu ionosféry či jiného zdroje informací o ionosférické refrakci
- přesnost (PPP) řešení je díky tomu značně závislá na kvalitě korekcí vlivu ionosféry, obecně nižší je v rovníkových oblastech Země a celkově při zvýšené aktivitě ionosféry
- případným dalším řešením je ionosféru určovat při samotném zpracování

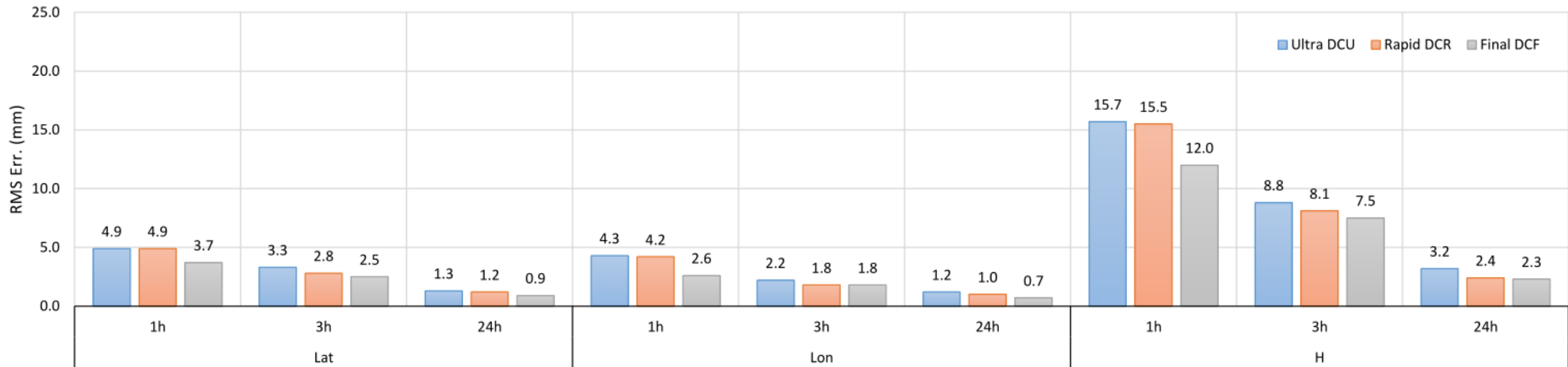


# PPP – dosažitelné přesnosti

- Závislé na:
  - **doba měření** (nutná doba konvergence) + interval měření
  - typu měření = při statických měřeních řádově centimetry, při kinematických řádově decimetry
  - při použití jedno-frekvenčních měření s eliminací ionosféry pomocí IGS globálních map ionosféry je možné dosáhnout o něco nižší přesnosti určení souřadnic při statických i kinematických měřeních – řádově 10 až 20 cm v horizontálním směru a 20 až 40 cm ve výšce
  - při post-processingu 24h měření technikou PPP v některém z pokročilých SW (RTKLIB, Bernese GPS SW apod.) je standardní získání souřadnic s 1 až 2 centimetrovou přesností

# PPP – dosažitelné přesnosti

RMS souřadnic získaných PPP zpracováním v on-line nástroji CSRS-PPP (statické řešení, GPS+GLONASS) v porovnání s oficiálními IGS souřadnicemi pro tři verze produktů (ultra-rapid, rapid, final) a tři různé doby observací (1 h, 3 h, 24 h)



Průměrná doba konvergence PPP řešení na 10cm přesnost při použití různých konstelací GNSS systémů (CODE a GFZ – zdroje přesných produktů)

Processing mode	Convergence Time (min)	
	CODE	GFZ
G	35.30	34.40
R	139.30	127.07
GR	28.32	27.08
GE	27.27	27.52
GC	31.63	29.91
RE	95.00	88.01
RC	134.28	117.19
GRE	26.42	25.20
GRC	26.83	26.39
GEC	26.39	25.43
REC	83.76	78.58
GREC	25.71	24.71

- existují služby zdarma poskytující online PPP řešení v post-processing režimu
- po uživateli je požadováno pouze nahrání RINEX souboru s observacemi, výstupní souřadnice získává do několika minut emailem
- některé služby poskytují i řešení pro kinematická měření
- řešení postavená nad různými softwary, zdroji přesných produktů
- příklady existujících služeb:
  - **APPS**: NASA Jet Propulsion Laboratory, <https://pppx.gdgps.net//>
  - **CSRS-PPP**: Canadian Spatial Reference System, Natural Resources Canada, <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>
  - **OPUS**: National Geodetic Survey's Online Positioning User Service, <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>
  - **AUSPOS**: Geoscience Australia, <https://gnss.ga.gov.au/auspos>
  - **GAPS**: University of New Brunswick, <http://gaps.gge.unb.ca/>

# PPP řešení v reálném čase

- Pro (PPP) měření v reálném čase je možno využít predikované efemeridy a korekce chyb hodin družic s 15min intervalem (verze produktu ultra-rapid)
- korekce chyb hodin by neměly být interpolovány, proto potřebujeme pro zpracování dat s kratším časovým intervalem i produkt s korekcemi chyb hodin s kratším časovým intervalem – například pro observace s intervalem 30 s potřebujeme korekce chyb hodin s intervalem 30 s, který je však dostupný jen ve verzích produktů pro post-processing (rapid, final)
- IGS od konce roku 2013 poskytuje v operačním režimu **globální přesné produkty v reálném čase** – efemeridy družic s intervalem 5 – 60 s, korekce chyb hodin s intervalem 5 – 10 s (**IGS RT produkty**, angl. RTS products)
- <https://igs.org/rt/products/>

# Přesné produkty v reálném čase

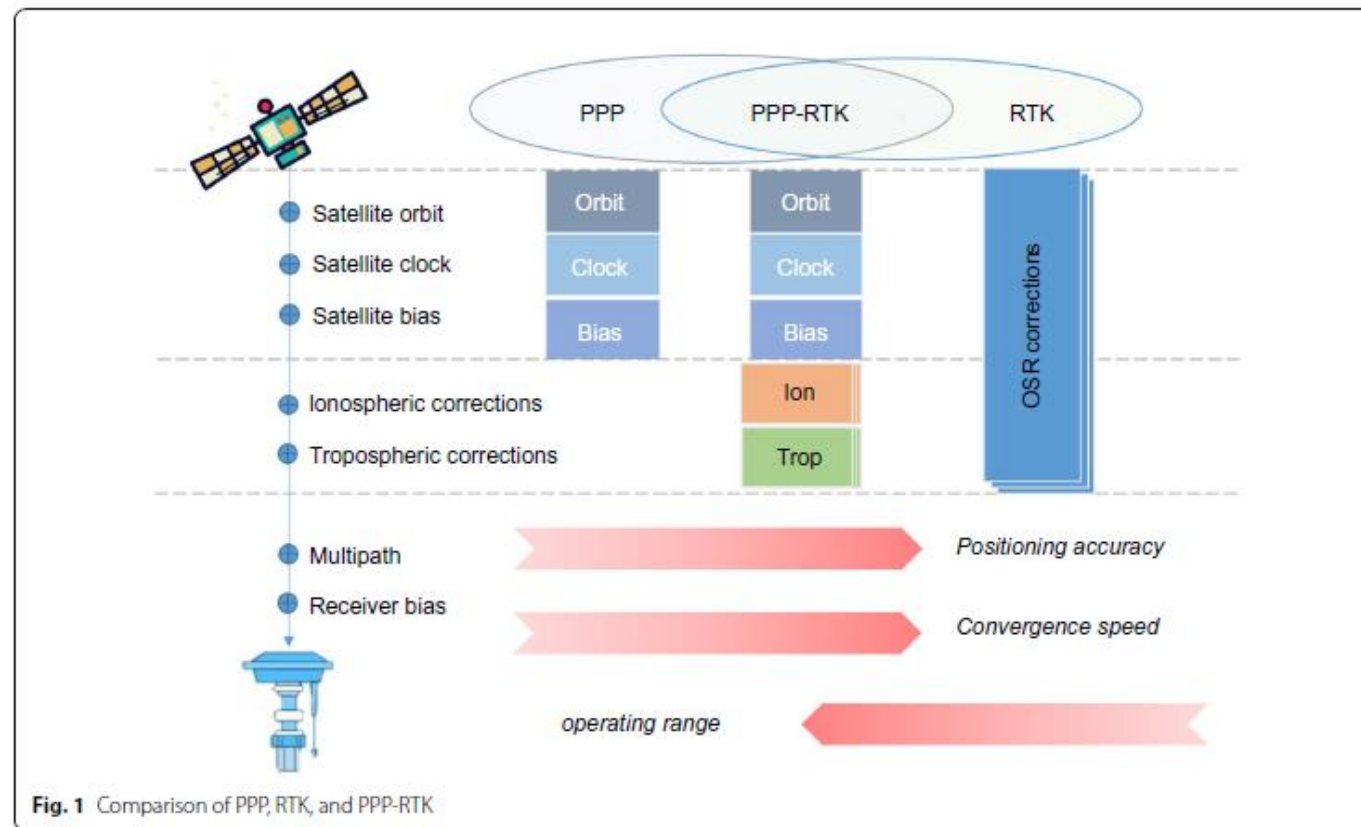
- nejedná se přímo o samotné přesné produkty, ale o korekce chyb efemerid a hodin družic vysílaných družicemi v navigačních zprávách
- výsledná přesnost korigovaných efemerid družic je  $\leq 5$  cm a korekcí chyb hodin  $\leq 150$  ps (srovnatelná či vyšší přesnost než u predikované části produktu ultra-rapid)
- produkty jsou publikovány pomocí NTRIP protokolu ve formátu RTCM zdarma uživatelům po zaregistrování
- produkty publikované IGS jsou vytvářeny jako kombinace produktů jednotlivých analytických center (ta obvykle publikují i své vlastní samostatné produkty)
- zpoždění dodání produktů je přibližně 25 s

- aktuálně existují 3 verze produktů:
  - *SSRA01IGS1/SSRC01IGS1* (dříve IGS01) = korekce efemerid/chyb hodin družic systému GPS v intervalu 5/5 s vypočtená pouze z měření v dané epoše
  - *SSRA02IGS1/SSRC02IGS1* (dříve IGS02) = korekce efemerid/chyb hodin družic systému GPS v intervalu 60/10 s získávané Kalmanovou filtrací z řady epoch
  - *SSRA03IGS1/SSRC03IGS1* (dříve IGS03) = korekce efemerid/chyb hodin družic systémů GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou v intervalu 60/10 s získávané Kalmanovou filtrací z řady epoch. Aktuálně experimentální produkt
- čtvrté písmeno v názvu produktu označuje, k čemu jsou korekce referencovány: A = referenční centrum antény družice (APC = Antenna Phase Center), C = těžiště družice (CoM = Center of Mass)

- IGS RTS produkty jsou podporovány několika veřejně dostupnými open-source nástroji pro GNSS měření technikou PPP, např.:
  - RTKLIB (<https://rtklib.com/>)
  - PPP-Wizard (<http://www.ppp-wizard.net/index.html>)
  - BKG NTRIP Client (<https://igs.bkg.bund.de/ntrip/bnc>)



- Moderní technika kombinující přístupy PPP a klasického RTK
- zjednodušeně řečeno: PPP technika v real-time módu s fixováním ambiguit, kdy korekce palubních produktů a dalších vlivů jsou počítány z (regionální) sítě referenčních stanic a distribuovány uživateli prostřednictvím internetu či geostacionární družice
- snaha o minimalizaci doby konvergence



## 2 komponenty PPP-RTK

### 1. Server – výpočet korekcí ze sítě referenčních stanic GNSS a jejich distribuce prostřednictvím NTRIP:

- korekce chyb efemerid a hodin družic
- nekalibrovaná fázová zpoždění (UPD)
- vliv ionosféry
- vliv troposféry








### 2. Přijímač GNSS

- použití vlastních observací (obvykle dvou či více frekvenčních fázových observací) a získaných korekcí pro určení polohy
- díky dodání UPD a korekcí atmosféry možnost rychlého vyřešení ambiguit

# Implementace PPP-RTK

- **CLAS (Centimeter Level Augmentation Service):**  
Japonsko, služba realizovaná prostřednictvím družic systému QZSS, horizontální (vertikální) přesnost statických měření  $\leq 6$  cm (12 cm) v 95% případů, v případě kinematických měření  $\leq 12$  cm (24 cm)
- **Galileo HAS (High Accuracy Service):**  
globální služba úrovně SL1 spuštěna v lednu 2023, úroveň SL2 pro Evropu má být spuštěna v roce 2024; korekce distribuovány prostřednictvím družic na frekvenci E6-B a internetem; ZDARMA
- **BeiDou PPP Service**

Cílové parametry služby Galileo HAS

	Service Level 1 (SL1)	Service Level 2 (SL2)
 Coverage	Global	European Coverage Area (ECA)
 Corrections	Orbit, clock, biases (code and phase)	Orbit, clock, biases (code and phase) + atmospheric corrections
 Horizontal Accuracy (95%)	<20cm	<20cm
 Vertical Accuracy (95%)	<40cm	<40cm
 Converge Time	<300s	<100s
 Availability	99%	99%
 User HelpDesk	24/7	24/7

- Trimble CenterPoint-RTX Fast <https://positioningservices.trimble.com/en/rtx>
- NovAtel TerraStar-X <https://terrastar.net/services/terrastar-service-options>
- Ublox PointPerfect <https://www.u-blox.com/en/product/pointperfect>
- Qianxun Xstar <https://www.qxwz.com/products/xingji>
- GMV magicGNSS <https://magicgnss.gmv.com/#>

**Table 5** Commercial PPP-RTK service and performance (G, R, E, C represent GPS, GLONASS, Galileo, BDS respectively)

PPP-RTK service	Positioning error (RMS)		Convergence time (s)	System	Coverage
	Horizontal (cm)	Vertical (cm)			
CenterPoint-RTX	2	5	< 60	GR	North America and Europe
TerraStar-X	2	5	< 60	GRECJ	North America
PointPerfect	3–6	–	< 30	GRE	Europe and contiguous United States
XStar	2	–	< 50	GRECJ	Asia-Pacific
Atlas	4	–	–	–	Selected areas in China
Hi-RTP	3	5	< 60	GREC	Selected areas in China

- navigace vozidel
  - navigace pěších, cyklistů
  - lokalizace a navigace autonomních robotů a zařízení
  - lokalizace a navigace dronů
  - trasování pohybu objektů a osob
- 
- RAPIDNĚ SE ROZŠIŘUJE VYUŽÍVÁNÍ NÍZKONÁKLADOVÝCH ZAŘÍZENÍ

# Sítové řešení s využitím DD

- **Technika zpracování GNSS měření využívající dvojité-diferenciovaných observací z více než 2 přijímačů**
- pro aplikace v blízkém reálném čase a post-processing
- statická x kinematická řešení
- obvyklé je využití dvou-frekvenčních měření, ale je možné i řešení založené jedno-frekvenčních měřeních
- **dosažitelná přesnost určení souřadnic se pohybuje mezi  $\leq 1$  cm a přibližně 20 cm v závislosti na délce observace a dalších faktorech**

# Klasická diferenční řešení

- klasické diferenční techniky využívají 2 přijímače, kdy je formována 1 základna
- typicky je poloha přijímače 1 známá a polohu přijímače 2 určíme relativně k poloze přijímače 1 s využitím stanovení vektoru základny, nebo při absolutních diferenčních technikách vnesením korekcí určených pro přijímač 1
- se vzrůstající délkou základny bude obecně klesat kvalita řešení
- tomuto přístupu odpovídají techniky PP DGPS, single-base RTK apod.

- Při využití  $n$  přijímačů formujeme typicky  $n - 1$  základen
- odhadování neznámých parametrů probíhá kombinovaným řešením ze všech dostupných observací v rámci sítě – obvykle metodou nejmenších čtverců
- potenciaální chyby způsobené konkrétní základnou, přijímačem, družicí apod. jsou rozprostřeny do celé sítě, což zvyšuje celkovou kvalitu řešení
- také je výrazně jednodušší identifikovat problematické observace (určité časové periody či celá měření z jednoho přijímače) a z řešení je případně vyloučit
- síťové řešení = nejpřesnější možný způsob zpracování dat (kombinace diferencí a vyvážení v rámci sítě)



Existují dva přístupy, jak síťové řešení zpracovat:

## 1. Zpracování po základnách

- stanovení řešení pro jednotlivé základny (souřadnice a potenciálně jiné požadované parametry)
- kombinace řešení pro jednotlivé základny do finálního řešení
- jednodušší na implementaci, jednodušší detekce a označení problematických observací

## 2. Multi-bodové zpracování

- stanovení finálního řešení najednou ze všech dostupných observací ze všech vytvořených základen (všechny parametry jsou určovány najednou v jednom kroku)
- jednodušší detekce a oprava cycle-slip, bere v potaz korelaci mezi DD observacemi (což v případě zpracování po základnách nemusí platit)

- Při využití  $n$  přijímačů můžeme celkem formovat  $x$  základen, přičemž:

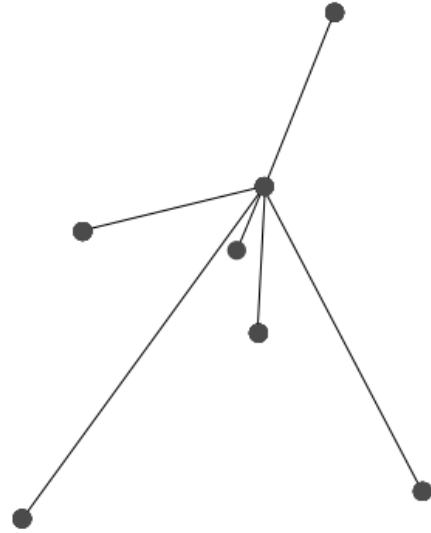
$$x = n * (n - 1) / 2$$

- pouze  $n-1$  základen však bude teoreticky nezávislých, proto stanovujeme tento počet základen
- existují dvě základní strategie, jak vybrat základny v síti:
  - **minimalizace délky základen** – jelikož úspěšnost řešení ambiguit je spojená s délkou základny, je vhodné vybrat základny v síti tak, aby byly pokud možno co nejkratší
  - **maximalizace počtu observací** – základny jsou vybírány tak, aby počet observací uskutečněných na obou přijímačích k totožným družicím v totožné epochy (= počet SD observací) byl co nejvyšší; často nejlepší varianta

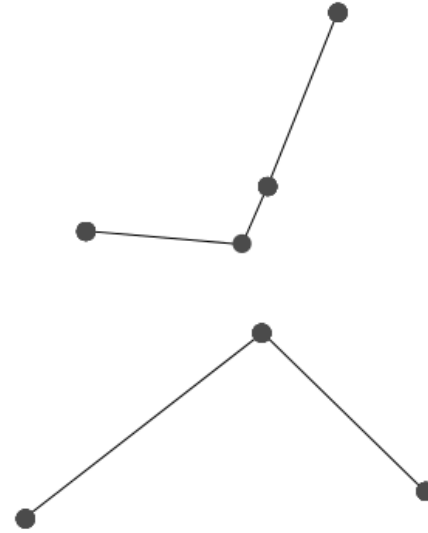
# Výběr základen v síti

- při použití stejné sítě přijímačů a dat z různých časových období strategie minimalizace délky základen vede vždy ke stejné sadě základen, strategie maximalizace počtu observací však ne!
- variantou strategie minimalizace délky základen je výběr základen způsobem, kdy jeden přijímač v síti považujeme za referenční a spojíme s ním všechny ostatní přijímače – vytvořená síť má tvar hvězdy
  - referenční stanici je možno volit manuálně, ale obvykle je vybírána tak, aby součet délek základen byl co nejnižší (referenční přijímač pak bude ležet obvykle v blízkosti středu sítě)

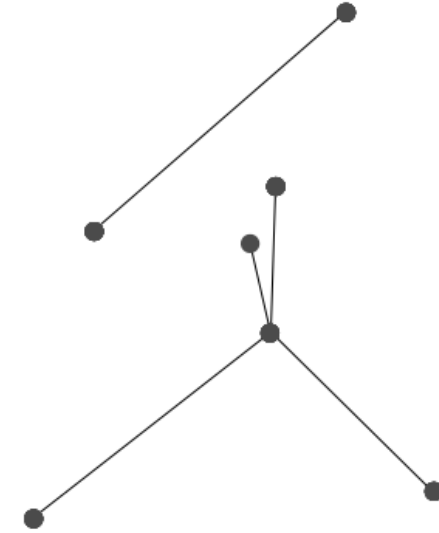
# Výběr základen v síti



Hvězda



Minimalizace délky



Maximalizace  
observací

Ukázka výsledku výběru základen v síti přijímačů při použití různých strategií optimalizace výběru

- Jelikož GNSS je obecně diferenční technika, kdy určujeme pouze absolutní vzdálenosti mezi přijímačem a družicí, je potřeba geodetické datum stanovit z externího zdroje
- využitím jedné či více stanic sítě, jejichž souřadnice máme určeny v požadovaném referenčním rámci (tzv. referenční stanice sítě), můžeme souřadnice ostatních stanic sítě navázat na tento referenční rámec → tento proces označujeme jako definici geodetického data
- jako referenční stanice sítě je vhodné vybírat ty, jejichž kvalita a zejména stabilita měření je dlouhodobě prokázána – ideálně stanice zahrnuté do IGS (či EPN) sítě -> pokud zpracováváme data v lokální síti, je vhodné do ní zahrnout i IGS stanice nacházející se v dané oblasti či jejím okolí

- pokud nemáme k dispozici žádné přesné vstupní souřadnice přijímačů, bude geodetické datum a tudíž i určené souřadnice definováno **referenčním rámcem efemerid družic** použitých pro zpracování dat
- je potřeba zachovat **konzistenci** mezi referenčním rámcem efemerid družic a tím, ve kterém určujeme souřadnice přijímačů (případně je potřeba provést transformaci souřadnic přijímačů do konzistentního referenčního systému před samotným zpracováním)

- Řešení obvykle implementované ve vědeckých software:
  - Volná síť (Free Network Solution)
  - Řešení s nejmenšími omezeními (Minimum Constraint Solution)
  - Omezení souřadnic referenčních přijímačů (Constraining Reference Coordinates)
  - Fixování souřadnic referenčních přijímačů (Fixing Reference Coordinates)

- geodetické datum je definováno pouze efemeridami družic
- geometrie sítě je stanovena pouze na základě observací (tím nemůže být ovlivněna potenciaálně špatnými souřadnicemi určitého referenčního přijímače či přijímačů)
- pokud budeme zpracovávat data ze stejné sítě přijímačů pro různé dny, bude mezi jednotlivými dny docházet ke změnám v geometrii sítě a tím i ke změnám určených souřadnic přijímačů
- pokud chceme následně svázat souřadnice přijímačů s určitým referenčním systémem, je potřeba provést transformaci souřadnic s využitím identických bodů, u nichž známe souřadnice i v cílovém referenčním systému (např. využitím Helmertovy transformace)
- tento způsob určení souřadnic využívá technika PPP



# Řešení s nejmenšími omezeními

- vychází z předpokladu, že pracujeme se dvěma referenčními rámci:
  - prvotní referenční rámec určený vstupními souřadnicemi vybrané referenční stanice či sady referenčních stanic
  - referenční rámec, ve kterém jsou určeny finální souřadnice
- transformace mezi oběma těmito rámci může být realizována s využitím sedmi-prvkové Helmertovy transformace, kde:
  - tři parametry jsou vymezeny pro posun počátku sítě (každý pro posun ve směru jedné z os –  $x$ ,  $y$ ,  $z$ )
  - tři parametry pro rotaci sítě (každý pro rotaci jedné z os)
  - jeden parametr pro změnu měřítka sítě
- řešení s nejmenšími omezeními vychází z předpokladu, že některá sada parametrů transformace je rovna nule
- obecně = neomezujeme souřadnice jednotlivých stanic sítě, ale parametry transformace celé sítě

- pokud parametry pro posun počátku = 0, nedochází k žádnému posunu počátku souřadnicových os referenčního systému:
  - usuzujeme, že barycentrum sítě stanic určené v prvotním referenčním rámci se shoduje s barycentrem finálního referenčního rámce
  - výhodou je, že potencionální chyby v prvotních souřadnicích některé z referenčních stanic nevedou k distorzi geometrie celé sítě ani výrazněji nedegradují samotné geodetické datum
  - optimální varianta pro stanovení finálních souřadnic v lokální či regionální síti
- pokud parametry pro rotaci = 0, nedochází k žádné rotaci souřadnicových os referenčního systému (využíváno pro globální sítě při stanovení efemerid družic a parametrů změn rotace Země)
- parametr změny měřítka sítě omezujeme jen výjimečně

- Vycházíme ze souřadnic jedné či několika referenčních stanic sítě, které jsou známé v požadovaném referenčním systému
- tyto referenční stanice v rámci sítě vybíráme typicky manuálně
- při určování souřadnic v síti stanic definujeme omezení na vstupní souřadnice referenčních stanic, které určuje nakolik se souřadnice určené z observací mohou lišit od těch vstupních
- velikost omezení by měla být spjata s kvalitou vstupních souřadnic
- pokud jsou omezení velmi volná (např. v řádu dm), je řešení obdobou volné sítě
- pokud jsou omezení naopak velmi striktní (např. v řádu mm), je řešení obdobou fixování souřadnic

- v závislosti na kvalitě vstupních souřadnic -> příliš striktní omezení na několika stanicích sítě může vést k deformacím geometrie celé sítě
- pokud používáme omezení pouze nad jedním přijímačem v síti, je řešení obdobou řešení s nejmenšími omezeními, chyby v souřadnicích vybraného přijímače se však přenesou na všechny ostatní přijímače sítě

# Fixování souřadnic referenčních přijímačů

- Stejně jako při řešení omezujícím vstupní souřadnice vycházíme ze souřadnic jedné či sady referenčních stanic sítě, které jsou známé v požadovaném referenčním systému
- při určování souřadnic v síti stanic fixujeme souřadnice referenčních přijímačů na jejich vstupní hodnoty -> jejich hodnoty dále nepovažujeme za neznámé parametry a neurčujeme je
- možné nevýhody řešení:
  - vstupní souřadnice mohou být nižší přesnosti, než je přesnost dosažitelná na základě observací
  - některý přijímač, jehož souřadnice fixujeme, může mít po dobu observací problémy s kvalitou měření
  - oba případy povedou k distorzi geometrie celé sítě a snížení kvality určení všech neznámých parametrů

# Fixování souřadnic referenčních přijímačů

- pokud však máme velmi přesné vstupní souřadnice referenčních stanic a aktuální řešení nad observacemi nižší kvality (např. omezená doba observace), síťové řešení může být vylepšeno právě fixováním vstupních souřadnic
- obecně je však doporučeno raději použít striktní omezení souřadnic vybraných referenčních přijímačů než jejich přímé fixování

- k odhadu standardních parametrů v podobě souřadnic a troposféry je možné použít PPP i DD
- ke stanovení následujících parametrů je však možné využít pouze síťové řešení:
  - efemeridy družic, korekce chyb hodin družic a parametry rotace Země (použití globální sítě)
  - ionosférické mapy pro korekci vlivu ionosféry
  - HW diferenčních biasů mezi kódy, frekvencemi, systémy
- využívají se síťová řešení optimalizovaná přímo na daný typ úlohy

1. Získání a příprava potřebných vstupních dat (observace, přesné produkty, vstupní souřadnice, apod.)
2. založení a nastavení kampaně
3. konverze observačních RINEX souborů do nativního binárního formátu Bernese
4. konverze a úpravy souborů s efemeridami družic, hodin družic a údaji o zemských pólech
5. předzpracování s využitím kódových a fázových měření
6. formování základen (výběr vhodných dvojic stanic) a vytvoření dvojitě-diferenciovaných observací
7. prvotní síťové řešení s využitím DD observací
8. řešení ambiguit (různé strategie)
9. finální síťové řešení (typicky stanovení souřadnic polohy přijímačů sítě a parametrů troposféry)
10. tvorba výstupů



- Alkan, R. M. a Öcalan, T. *Usability of the GPS Precise Point Positioning Technique in Marine Applications*, The Journal of Navigation, 2013.
- Bahadur, B. a Nohutcu, M. *Comparative analysis of MGEX products for post-processing multi-GNSS PPP*. Measurement, 2019.
- Banville, S. et al., *Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution*, ION NTM, USA, 2008.
- Dach, R. et al. *Bernese GNSS Software, Version 5.2*, Astronomický institut univerzity v Bernu, Švýcarsko, 2015.
- Gackstatter, E. *A Comparison of Free GPS Online Post-Processing Services*, GPS World, 2013.
- Ge, M. et al., *A Novel Real-time Precise Positioning Service System: Global Precise Point Positioning With Regional Augmentation*, Journal of Global Positioning Systems, 2012.
- Ge, M. et al., *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*, Journal of Geodesy, 2008.
- Kouba, J. and Héroux, P. *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products*, GPS Solutions, 2001.
- Le, A. Q and Tiberius, Ch. *Single-frequency precise point positioning with optimal filtering*, GPS Solutions, 2007.
- Li, X. et al. *A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning*, Journal of Geodesy, 2013.

- Li, X. et al. *Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities*. Satellite Navigation, 2022.
- Subinara, J.S. et al. *GNSS Data Processing, Volume 1: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency, ESA TM-23/1, 2013.
- Teunissen, P. J.G., Montenbruck, O. (ed.). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer, 2017.
- <https://igs.org/rts/products/>
- <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>

## Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík,  
e-mail: [michal.kacmarik@vsb.cz](mailto:michal.kacmarik@vsb.cz)  
<https://www.hgf.vsb.cz/548/cs/>



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy

MSMT  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY