

POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

03 OBSERVAČNÍ A PODPŮRNÁ DATA GNSS, PŘEDZPRACOVÁNÍ OBSERVACÍ, ŘEŠENÍ AMBIGUIT

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Datové formáty
 - Observace – RINEX
 - Přesné produkty (efemeridy družic, korekce chyb hodin družic, parametry rotace a orientace Země)
 - Parametry ionosféry, troposféry
 - Fázová centra antén přijímačů
 - Diferenční kódové bias
- Předzpracování observací, fázový skok
- Řešení ambiguit

Observace měření

- On-line observace distribuovány v reálném čase (RT) s využitím NTRIP a obvykle RTCM protokolu
- Off-line observace ukládány v nativních formátech výrobců přijímačů nebo ve výměnném formátu RINEX, standardně dostupné skrz https, ftp (viz např. <https://igs.bkg.bund.de/>)
- observační data z řady GNSS referenčních stanic jsou zdarma volně dostupné (sítě EUREF EPN, IGS)

- **Receiver Independent Exchange Format**
- nezávislý výměnný formát pro GNSS měření podporovaný faktickou většinou (geodetických) přijímačů
- textový ASCII formát
- vznik 1989
- 3 typy RINEX souborů:
 - **observační** (observace kódových, fázových, dopplerovských měření)
 - **navigační** (navigační zprávy družic)
 - meteorologický (meteorologická měření v místě referenční stanice)

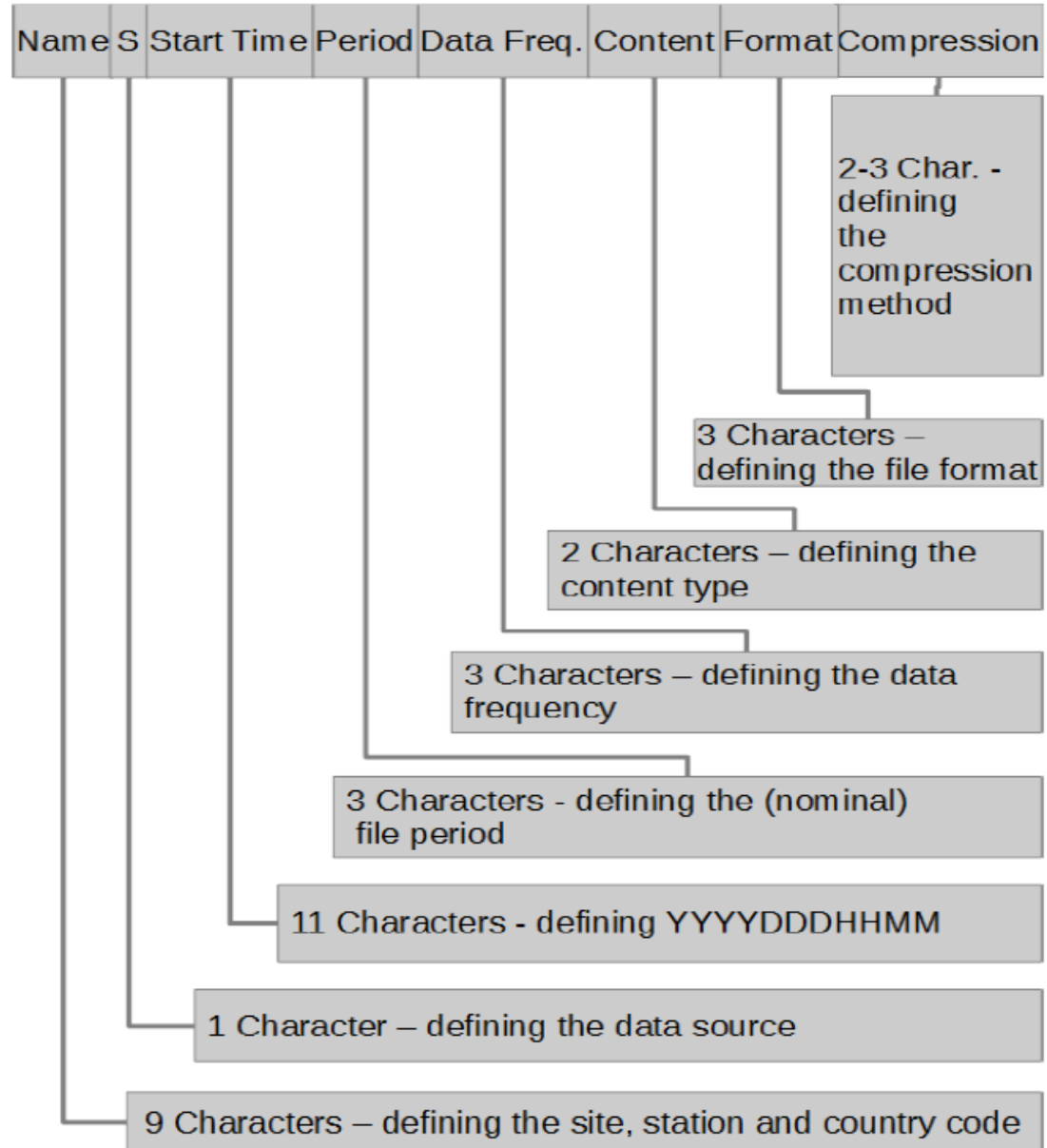
Verze	Popis
RINEX 2.10	GPS a GLONASS
RINEX 2.11	GPS a GLONASS, podpora GPS C2, L2/L5 signálů a Galilea
RINEX 3.01	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (Compass), QZSS a SBAS
RINEX 3.02	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (Compass), QZSS a SBAS – změněna struktura hlavičky pro GLONASS měření
RINEX 3.03	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (Compass), QZSS, IRNSS a SBAS
RINEX 3.04	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (Compass), QZSS, IRNSS a SBAS, oproti 3.03 podpora GLONASS CDMA a nových signálů BeiDou 3 a QZSS 3
RINEX 3.05	vydán 2020, přidání nových signálů pro plnou podporu BeiDou 2 a BeiDou 3
RINEX 4.00	vydán 2021, změny zejména na úrovni navigačních souborů pro podporu všech současných systémů
RINEX 4.01	vydán 7/2023, drobnější změny oproti 4.00

ssssdddf.yyt

- **ssss** = identifikátor referenční stanice (přijímače)
- **ddd** = den roku prvního záznamu v souboru (001 – 365)
- **f** = označení hodiny daného dne, pro kterou obsahuje soubor data; písmena a-x (a = 0-1 hodin, b = 1-2, x = 23-24), pokud soubor obsahuje data pro celý den, či větší část dne, f = 0
- **yy** = kalendářní rok (2014 -> 14)
- **t** = typ souboru:
 - O = observační
 - N = navigační pro systém GPS
 - G = navigační pro systém GLONASS
 - L = navigační pro systém Galileo
 - P = mixovaný navigační pro GNSS
 - M = meteorologický

hodina/den – všechny časové údaje jsou v UTC! Je potřeba si dávat pozor na časový posun (na území ČR jsme UTC+1 v případě zimního času a UTC+2 v případě letního času)

RINEX – název souboru verze 3.x a 4.x



File Name	Comments
ALGO00CAN_R_20121601000_01H_01S_MO.rnx	Mixed RINEX GNSS observation file containing 1 hour of data, with an observation every second
ALGO00CAN_R_20121601000_15M_01S_GO.rnx	GPS RINEX observation file containing 15 minutes of data, with an observation every second
ALGO00CAN_R_20121601000_01H_05Z_MO.rnx	Mixed RINEX GNSS observation file containing 1 hour of data, with 5 observations per second
ALGO00CAN_R_20121601000_01D_30S_GO.rnx	GPS RINEX observation file containing 1 day of data, with an observation every 30 seconds
ALGO00CAN_R_20121601000_01D_30S_MO.rnx	Mixed RINEX GNSS observation file containing 1 day of data, with an observation every 30 seconds
ALGO00CAN_R_20121600000_01D_GN.rnx	RINEX GPS navigation file, containing one day's data
ALGO00CAN_R_20121600000_01D_RN.rnx	RINEX GLONASS navigation file, containing one day's data
ALGO00CAN_R_20121600000_01D_MN.rnx	RINEX mixed navigation file, containing one day's data

- Tvoří jej dvě části:
 - **hlavička** = obsahuje informace o místě, času a typu pořízených observací
 - **tělo** = obsahuje samotné observace v určitém pravidelném intervalu (obvykle 1 nebo 30 s)
- Hatanaka komprese
 - používaná obvykle u dlouhodobě uložených (archivovaných) souborů
 - název souboru:
 - verze 2.x – poslední písmeno = **d**
 - verze 3.x a 4.x – koncovka **crx**
 - pro použití souboru je potřeba provést jeho dekompresi – volně dostupný nástroj *crx2rnx.exe* (<https://terras.gsi.go.jp/ja/crx2rnx.html>)

Observační RINEX – hlavička souboru

```

3.03 OBSERVATION DATA M RINEX VERSION / TYPE
ALLOY 5.45&OBSRINEX RIGTC, GO PECNY 20230715 001503 UTC PGM / RUN BY / DATE
GNSS DATA FROM STATION GOPE (RIGTC, GO PECNY) COMMENT
GOPE MARKER NAME
11502M002 MARKER NUMBER
GEODETTIC MARKER TYPE
GOP OC STAFF RIGTC, GO PECNY OBSERVER / AGENCY
40016 TRIMBLE ALLOY 5.45 REC # / TYPE / VERS
30161 TPSCR.G3 TPSH ANT # / TYPE
3979316.4389 1050312.2534 4857066.9036 APPROX POSITION XYZ
0.1114 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 12 C1C L1C S1C C2W L2W S2W C2X L2X S2X C5X L5X S5X SYS / # / OBS TYPES
R 15 C1C L1C S1C C1P L1P S1P C2C L2C S2C C2P L2P S2P C3X SYS / # / OBS TYPES
L3X S3X SYS / # / OBS TYPES
S 3 C1C L1C S1C SYS / # / OBS TYPES
E 15 C1X L1X S1X C5X L5X S5X C7X L7X S7X C8X L8X S8X C6X SYS / # / OBS TYPES
L6X S6X SYS / # / OBS TYPES
J 15 C1C L1C S1C C1X L1X S1X C12 L12 S12 C2X L2X S2X C5X SYS / # / OBS TYPES
L5X S5X SYS / # / OBS TYPES
C 12 C5X L5X S5X C2I L2I S2I C7I L7I S7I C6I L6I S6I SYS / # / OBS TYPES
I 3 C5A L5A S5A SYS / # / OBS TYPES
30.000 INTERVAL
2023 7 14 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
G L2X -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
R L1P 0.25000 SYS / PHASE SHIFT
R L2C -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
J L2X -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
DBHZ SIGNAL STRENGTH UNIT
10 R01 1 R07 5 R08 6 R09 -2 R10 -7 R11 0 R16 -1 R18 -3 GLONASS COD/PHS/BIS
R19 3 R20 2 GLONASS SLOT / FRQ #
GLONASS SLOT / FRQ #
END OF HEADER
> 2023 07 14 00 00 0.0000000 0 45 -.000356178000
C60 .000 .000 .000 40809020.39805 212503294.40705
C 5 .000 .000 .000 39721143.80505 206838348.05605
R10 19509489.51608 103996695.94008 48.100 19509487.35507 103996837.93207

```

Observační RINEX – tělo souboru

hlavička záznamu – datum,
čas, seznam observovaných
družic s jejich PRN kódy (G =
GPS, R = GLONASS)

skupina
observací k
jedné družici
platná pro čas
záznamu,
pořadí
observací je
dáno dle
pořadí typů
observací
uvedeného v
hlavičce
RINEXu

END OF HEADER

```

> 2023 07 14 00 00 0.0000000 0 45 -.000356178000
G17 22049778.25007 115872311.86907 46.600 22049785.80507 90290276.97907 45.700 22049786.37507 90290282.98707 43.600
C41 .000 .000 .000 25371402.92206 132115574.06106 41.900 .000 .000 .000
25371402.00406 107354731.04106 39.400
C14 .000 .000 .000 23967408.76607 124804637.81307 43.800 23967402.89507 96506860.31707 42.700
23967397.08606 101413960.08206 41.200
G15 22031631.11707 115777041.11607 47.600 22031639.21107 90215951.94207 45.700 22031639.25807 90215952.95707 44.000
R16 24275584.32006 129675912.32106 37.900 24275583.19106 129675901.32706 37.100 24275593.11705 100859114.49205 30.500
24275592.53505 100859115.47805 30.300
G13 23313063.10907 122511023.57207 43.700 23313072.30104 95463217.55904 24.600
R19 21656897.46906 115849856.64606 39.600 21656896.19106 115850002.66006 38.600 21656904.62106 90105445.69206 41.100
21656904.06306 90105461.70306 39.900
G14 24701861.83605 129809257.56605 32.400 24701872.27702 101150152.10702 15.600 24701871.62505 101150131.06305 35.100
24701872.89505 96935567.53205 35.000
C24 .000 .000 .000 21818829.84408 113616496.02408 51.300 .000 .000 .000
21818818.85208 92322710.93408 49.400
G19 21300780.53108 111936481.34608 49.600 21300786.56606 87223252.63706 38.200
C45 .000 .000 .000 26319028.35206 137050212.31806 36.400 .000 .000 .000
26319014.92605 111364525.01605 35.200
G12 21760992.22707 114354882.83307 47.700 21761000.78907 89107845.28207 47.200 21761001.00007 89107820.28807 44.500
C33 .000 .000 .000 23821640.20307 124045581.89107 45.700 .000 .000 .000
23821644.74607 100797232.23507 43.200
G23 24102506.30506 126659482.02806 39.800 24102515.62103 98695799.94103 22.800 24102516.03506 98695789.96106 38.700
24102517.47706 94583468.66806 41.300
R 9 19992902.84408 106761127.12108 52.800 19992902.43808 106761291.12608 50.900 19992908.76208 83036484.38508 49.100
19992908.64807 83036449.38807 47.900 19992899.65207 80162212.85807 42.700
C25 .000 .000 .000 25899754.17206 134866846.25706 39.200 .000 .000 .000
25899746.86705 109590337.87405 35.500
R18 22288859.31307 118979462.77107 44.100 22288858.09407 118979703.77407 43.100 22288866.31306 92539719.52506 41.000
22288867.10506 92539638.52506 40.900

```

následuje další záznam

Měření k družici systému GPS s PRN kódem 5 dne 17. 2. 2014 čase 0:00:00,
8 typů observací dle pořadí uvedeného výše v hlavičce (C1, P1, P2, C2, ...)

```

      8      C1      P1      P2      C2      L1      L2      S1      S2      # / TYPES OF OBSERV
      30.000
      2014      2      17      0      0      0.0000000      GPS      TIME OF FIRST OBS
      END OF HEADER
14  2  17  0  0  0.0000000  0  14G  2G  5G  12G  21G  25G  29G  31R  2R  3R  9R  10R  16  -.000470021
      R19R20
      24087216.549      24087215.3174      24087212.3094      126579212.676 6
      98633162.83442      41.000      20.000
      23526494.835      23526494.2514      23526495.5214      23526495.985      123632588.475 6
      96337084.42743      43.000      27.000
  
```

- kódová měření = pseudo-vzdálenost v metrech
- fázová měření = počet vlnových délek
- chybějící observace jsou vyplněny mezerami či hodnotou 0.000

- Pro každou observaci jsou vymezena 3 desetinná místa
- 4. pozice za desetinnou tečkou = indikátor ztráty signálu (Loss of Lock)
- 5. pozice za desetinnou tečkou = indikátor síly signálu v intervalu 1 – 9 (0 = neznámo; 1 = < 12 dBHz; 3 = 18 - 23 dBHz; 6 = 36 - 41 dBHz; 9 = >= 54 dBHz)

Navigační RINEX (N, G, L, P)

- Tvoří jej dvě části:
 - **hlavička** = obsahuje informace o místě, času pořízených observací
 - **tělo** = obsahuje samotné navigační zprávy pro jednotlivé družice systému
- při post-processingu měření obvykle místo originální navigační zprávy využíváme přesné produkty (efemeridy družic, korekce hodin, ...)

Navigační RINEX - struktura

```

3.03      N      G      RINEX VERSION / TYPE
Alloy 5.45 RIGTC, GO PECNY 20230715 001521 UTC PGM / RUN BY / DATE
GPSA .1676D-07 .2235D-07 -.1192D-06 -.5960D-07 IONOSPHERIC CORR
GPSB .1270D+06 .1638D+06 -.1966D+06 -.2621D+06 IONOSPHERIC CORR
GPUT -.4656612873D-08 -.177635684D-13 61440 2271 TIME SYSTEM CORR
GPGA .2910383046D-09 .177635684D-13 518400 2270 TIME SYSTEM CORR
18 18 2185 7 LEAP SECONDS
NAUSTAR NAVIGATION DATA FROM STATION GOPE (RIGTC, GO PECNY) COMMENT
END OF HEADER
G17 2023 07 13 23 59 44 .720894429833D-03 .682121026330D-12 .000000000000D+00
.500000000000D+01 .106156250000D+03 .391659171319D-08 .258395856418D+01
.550970435143D-05 .135963127250D-01 .344589352608D-05 .515355085182D+04
.431984000000D+06 .987201929092D-07 .512732481480D+00 .186264514923D-08
.973834553604D+00 .315812500000D+03 -.140881667400D+01 -.777996692399D-08
.147506144223D-09 .100000000000D+01 .227000000000D+04 .000000000000D+00
.200000000000D+01 .000000000000D+00 -.111758708954D-07 .500000000000D+01
.428706000000D+06 .400000000000D+01
G15 2023 07 14 00 00 00 .577690079808D-04 .352429196937D-11 .000000000000D+00
.610000000000D+02 -.111875000000D+02 .536486632536D-08 .167917151882D+01
-.739470124245D-06 .151042114012D-01 .846013426781D-05 .515375030708D+04
.432000000000D+06 -.290572643280D-06 -.283261574451D+01 -.376254320145D-06
.933066973688D+00 .205031250000D+03 .121359962631D+01 -.823891461244D-08
.557166065346D-09 .100000000000D+01 .227000000000D+04 .000000000000D+00
.200000000000D+01 .000000000000D+00 -.107102096081D-07 .610000000000D+02
.424818000000D+06 .400000000000D+01
G13 2023 07 13 23 59 44 .546746421605D-03 .500222085975D-11 .000000000000D+00
.270000000000D+02 .468750000000D+01 .458947688442D-08 .228248613958D+01
.175088644028D-06 .717462238390D-02 .743567943573D-05 .515366531372D+04
.431984000000D+06 -.782310962677D-07 -.255207243453D+01 -.180676579475D-06
.970101286144D+00 .241156250000D+03 .912134394882D+00 -.73496504948D-08
.437161066656D-09 .100000000000D+01 .227000000000D+04 .000000000000D+00
.200000000000D+01 .000000000000D+00 -.111758708954D-07 .270000000000D+02
.424818000000D+06 .400000000000D+01
G14 2023 07 14 00 00 00 .121423974633D-03 .120508047985D-10 .000000000000D+00
.750000000000D+02 .767187500000D+02 .445089968355D-08 -.950549883407D+00
.385753810406D-05 .339011522010D-02 .102743506432D-04 .515368200111D+04

```

Korekce ionosféry

časové parametry

efemeridy, korekce hodin a další parametry pro družici systému GPS s PRN kódem 15 platné 14. 7. 2023 pro čas 0:00

Interval záznamů pro jednotlivé družice je 2 hodiny (v celodenním souboru pro 1 družici nalezneme 13 záznamů – začíná a končí o půlnoci)

Meteorologický RINEX (M)

- Slouží pro uložení naměřených hodnot meteorologických veličin v místě referenční stanice
- při post-processingu jej používáme zřídka (pouze při detailnějším zájmu o parametry troposféry)
- obvykle měřené veličiny = atmosférický tlak vzduchu, teplota vzduchu, relativní vlhkost
- tvoří jej dvě části:
 - **hlavička** = obsahuje informace o místě, času a typu pořízených meteorologických měření
 - **tělo** = obsahuje samotná meteorologická měření

Efemeridy družic

- zásadní vstupní datový zdroj, využíváme přesných produktů (pro post-processing, ale možnost i pro real-time)
- poskytovány IGS, nebo jednotlivými analytickými centry (viz prezentace č. 2)
- formát **SP3** (Standard Product 3):
 - aktuálně verze d (běžně rozšířená je však stále verze c)
 - textový
 - interval záznamu 5 - 15 minut dle řešení (navigační zpráva = 120 minut)
 - kromě efemerid družic obsahuje korekce chyb hodin družic ve stejném časovém intervalu
 - indikátory přesnosti efemerid

produkty IGS: ***IGS00PSFIN_yyyyddd0000_01D_15M_ORB.SP3****

IGSOPS = zdroj řešení

FIN = označuje typ řešení: FIN = final, RAP = rapid, ULT = ultra rapid

yyyy = rok

ddd = den v roce (tzv. DOY, day of year)

0000 = označuje hodinu prvního záznamu v souboru (u FIN a RAP vždy 0, u ULT 0, 6, 12, 18)

01D = časové období, pro které obsahuje soubory záznamy (01D = 24 h)

15M = interval záznamu (15M = 15 minut)

*** tyto dlouhé názvy souborů s přesnými produkty jsou používány od 26. 11. 2022 (GPS týden 2238)**

produkty CODE: ***COD0OPSPRD_yyyyddd0000_05D_05M_ORB.SP3****

CODOPS = zdroj řešení

RAP = označuje typ řešení: FIN = final, RAP = rapid, ULT = ultra rapid, PRD = predicted

yyyy = rok

ddd = den v roce (tzv. DOY, day of year)

0000 = označuje hodinu prvního záznamu v souboru (u FIN a RAP vždy 0, u ULT 0, 6, 12, 18)

01D = časové období, pro které obsahuje soubory záznamy (01D = 24 h)

15M = interval záznamu (15M = 15 minut)

***CODE doposud (červenec 2023) nabízí na svém uložišti přesné produkty s krátkými i dlouhými názvy**

Formát SP3 – hlavička

datum/čas
prvního záznamu

počet záznamů (epoch), způsob určení efemerid,
souřadnicový systém, typ efemeridy, název instituce,
která soubor vytvořila

časové údaje platnosti efemerid – GPS týden,
počet sekund od začátku GPS týdne, interval
záznamu v s, Modifikovaný Juliánský den (MJD),
určení části dne pro první záznam v souboru

seznam družic obsažených v souboru dle
jejich PRN kódu (G = GPS, R = GLONASS)

exponenty celkové přesnosti určení efemerid
pro jednotlivé družice vyjádřené v mm,
příklad: pokud exponent = např. 5, výsledná
přesnost určení efemerid => $2^5 = 32$ mm

informace o typu produktu a
způsobu jeho vytvoření

```
#cP2023 5 14 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS20 HLM IGS
## 2262 0.00000000 900.00000000 60078 0.0000000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2
++ 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%f 0.00000000 0.000000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod esa gfz grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCU:IGS20_2233 OL/AL:FES2014b NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2023 5 14 0 0 0.00000000
PG01 -9636.465777 19373.201148 -15489.151891 185.553943 9 6 6 36
PG02 -21923.774306 6307.397218 14058.397039 -596.491038 11 7 4 97
PG03 850.975097 16005.835697 -21331.195340 -304.074487 11 6 8 66
PG04 -600.765927 26207.967657 -3858.257308 40.769759 3 5 4 69
```

Formát SP3 – tělo

```

* 2023 5 14 0 0 0.00000000
PG01 -9636.465777 19373.201148 -15489.151891 185.553943 9 6 6 36
PG02 -21923.774306 6307.397218 14058.397039 -596.491038 11 7 4 97
PG03 850.975097 16005.835697 -21331.195340 -304.074487 11 6 8 66
PG04 -600.765927 26207.967657 -3858.257308 40.769759 3 5 4 69
PG05 16194.073094 -8108.315750 19294.985445 -127.089794 7 8 6 93
PG06 20465.073821 -1152.295748 -16886.202913 588.067385 6 7 5 95
PG07 5834.099506 14880.977375 21614.808460 178.900097 8 8 6 90
PG08 -7648.170062 20382.272323 14867.734941 -122.286305 2 6 5 92
PG09 7659.087091 24674.397289 5990.723171 -159.454241 6 5 5 33
PG10 -24157.323696 -11387.779509 1317.172311 -36.810742 5 6 5 75
PG11 23310.323208 -11943.633497 -4283.666357 -195.896823 9 6 8 79
PG12 3248.321972 -15277.250865 -21770.940420 -375.692030 9 3 5 84
PG13 12979.643056 -13688.910184 18436.363920 519.552630 5 4 4 89
PG14 22595.919426 13613.316401 3734.602595 55.971300 6 6 7 80
PG15 4982.283968 -21689.673576 13843.633382 39.289514 7 3 9 107
PG16 -19498.761778 3301.006524 17636.711079 -501.244329 8 9 5 90
PG17 12833.482420 14432.496301 -17759.720227 714.681450 7 6 5 82
PG18 -8377.713559 -12357.255776 21963.910297 -265.127707 6 7 8 56
PG19 14778.965380 5446.470377 -21653.552123 316.524743 6 6 7 79
PG20 22681.866398 -4071.192029 13071.475120 433.732122 10 7 6 48
PG21 -15756.408894 19690.956823 -6206.598593 153.835249 9 6 7 50
PG22 -14988.984409 -1388.466548 -21439.236661 480.845703 8 8 6 94
PG23 -17364.121191 -15977.559040 12347.080834 23.988803 8 4 6 68
PG24 11621.402599 -21147.714129 -10964.332518 -187.697705 10 5 7 48
PG25 -9643.264883 -17699.769412 -17745.086803 442.618070 8 7 9 106
PG26 -25458.567727 -3273.496418 7363.761566 240.826379 11 10 11 91
PG27 -13152.485678 9674.672501 20609.267357 38.089053 5 5 7 108
PG28 -19640.636212 -317.955395 -17898.152545 77.271577 7 11 10 96
PG29 -3271.042231 -26088.580423 3361.682707 -599.310790 11 9 9 79
PG30 16021.769629 6792.844034 20240.669694 -517.341032 6 6 5 78
PG31 -23578.723682 7872.501730 -10139.622401 -216.052180 7 5 9 76
PG32 -14737.320853 -11315.962470 -18873.882067 -475.821737 9 8 6 91
* 2023 5 14 0 15 0.00000000
PG01 -10994.761818 20231.821022 -13248.360019 185.551458 9 6 7 67

```

jeden řádek = údaje pro jednu družici platné pro datum/čas v hlavičce záznamu

PRN kód družice; X, Y, Z souřadnice družice v metrech; korekce chyby hodin družice vůči systémovému času v mikrosekundách

exponenty pro určení směrodatné odchylky přesnosti polohy družice v ose x, y, z a korekce chyby hodin

- formát SP3 poskytuje efemeridy družic a korekce chyb hodin na družicích v 5ti nebo 15ti minutovém intervale
- pro některá velmi přesná zpracování GNSS měření (zejména ta založená na nediferencovaných observacích) je však vhodné použití korekcí chyb hodin s kratším intervalem => formát **CLK**
- formát **CLK** (Clock RINEX):
 - poskytuje korekce chyb hodin na družicích a korekce chyb hodin přijímačů použitých pro vytvoření produktu
 - textový
 - interval záznamu 5 s - 5 min
 - aktuálně verze 3.04
- CLK soubory jsou dostupné pouze ve verzích produktů rapid a final, tedy jen pro post-processing měření!

produkty IGS: ***IGS00PSRAP_yyyyddd0000_01D_05M_CLK.CLK***

IGS00PS= zdroj řešení

RAP = označuje typ řešení: FIN = final, RAP = rapid

yyyy = rok

ddd = den v roce (tzv. DOY, day of year)

0000 = označuje hodinu prvního záznamu v souboru

01D = časové období, pro které obsahuje soubory záznamy (01D = 24 h)

05M = interval záznamu (05M = 5 minut)

```

3.00          C                                RINEX VERSION / TYPE
CCLOCK          IGSACC @ GA MIT              PGM / RUN BY / DATE
GPS week: 2262   Day: 0   MJD: 60078        COMMENT
THE COMBINED CLOCKS ARE A WEIGHTED AVERAGE OF:  COMMENT
    esa gfz grg                             COMMENT
THE FOLLOWING REFERENCE CLOCKS WERE USED BY ACs:  COMMENT
    CHPI                                     COMMENT
THE COMBINED CLOCKS ARE ALIGNED TO GPS TIME     COMMENT
USING THE SATELLITE BROADCAST EPHEMERIDES      COMMENT
All clocks have been re-aligned to the IGS time scale: IGST COMMENT
    18                                        LEAP SECONDS
    2     AR     AS                          # / TYPES OF DATA
IGS  IGSACC @ GA MIT                        ANALYSIS CENTER
    113    IGS20 : IGS REALIZATION of THE ITRF2020    # OF SOLN STA / TRF
ALIC 50137M001      -4052052864  4212835957 -2545104404SOLN STA NAME / NUM
AREQ 42202M005      1942826313 -5804070359 -1796894079SOLN STA NAME / NUM
ASCG 30602M004      6121151570 -1563978984  -872615277SOLN STA NAME / NUM
BAKE 40152M001      -289834355  -2756501181  5725162399SOLN STA NAME / NUM
BJFS 21601M001      -2148744667  4426641151  4044655781SOLN STA NAME / NUM
BOGT 41901M001      1744398869  -6116036979   512731948SOLN STA NAME / NUM
BRAZ 41606M001      4115014060 -4550641655 -1741443736SOLN STA NAME / NUM

```

Obsahuje informace o způsobu vytvoření souboru, seznam referenčních stanic a družic GNSS, pro které jsou v souboru uvedeny korekce chyb hodin

Formát CLK – tělo

AR	YELL	2023	05	14	00	00	0.000000	2	1.453045634548e-04	2.902487861580e-11
AR	ZAMB	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-1.064423816785e-08	3.313492567850e-11
AS	G01	2023	05	14	00	00	0.000000	2	1.855539430488e-04	1.962992108660e-11
AS	G02	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-5.964910383472e-04	8.335933752820e-12
AS	G03	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-3.040744870332e-04	2.395761691430e-11
AS	G04	2023	05	14	00	00	0.000000	2	4.076975913392e-05	2.181017563180e-11
AS	G05	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-1.270897941252e-04	2.478757735500e-12
AS	G06	2023	05	14	00	00	0.000000	2	5.880673850318e-04	2.949490976240e-11
AS	G07	2023	05	14	00	00	0.000000	2	1.789000973888e-04	1.862553407480e-11
AS	G08	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-1.222863048332e-04	1.935760347470e-11
AS	G09	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-1.594542410122e-04	1.844945678040e-11
AS	G10	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-3.681074171338e-05	1.642555674960e-11
AS	G11	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-1.958968232132e-04	2.550053079000e-11
AS	G12	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-3.756920302692e-04	2.605691390780e-11
AS	G13	2023	05	14	00	00	0.000000	2	5.195526296948e-04	1.302801212210e-11
AS	G14	2023	05	14	00	00	0.000000	2	5.597130022042e-05	2.289575871380e-11
AS	G15	2023	05	14	00	00	0.000000	2	3.928951380462e-05	1.495399421010e-11
AS	G16	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-5.012443288352e-04	1.633640466090e-11
AS	G17	2023	05	14	00	00	0.000000	2	7.146814500138e-04	2.595750526910e-11
AS	G18	2023	05	14	00	00	0.000000	2	-2.651277073142e-04	1.520170954220e-11
AS	G19	2023	05	14	00	00	0.000000	2	3.165247427818e-04	2.629247101250e-11
AS	G20	2023	05	14	00	00	0.000000	2	4.337321215598e-04	1.969664628240e-11
AS	G21	2023	05	14	00	00	0.000000	2	1.538352492258e-04	1.598958841680e-11

Řádek se záznamem pro přijímač s těmito informacemi dle pořadí na řádku:

- typ korekce hodin
- ID referenční stanice (4 znaky)
- datum a čas
- počet údajů, které následují (v tomto případě 2)
- korekce hodin přijímače v s
- směrodatná odchylka korekce v s

řádek se záznamem pro družici – struktura záznamu je stejná, jen identifikátor družice má 3 znaky

Parametry rotace a orientace Země

- parametry nutné pro transformaci mezi terestrickým a celestickým prostorovým referenčním systémem, pro eliminaci vlivu pohybu zemských pólů na změnu souřadnic
- formát **ERP** (Earth Rotation Parameters):
 - poskytuje aktuální údaje o souřadnicích pólu, korekci délky dne, rozdílu mezi UT1 a UTC
 - textový
 - řešení platné pro určitý časový interval (final a rapid produkty 1xden, ultra rapid 4xden = cca 6 h)

produkty CODE: ***CODOOPSRAP_2023204000_01D_01D_ERP.ERP***

CODOOPS= zdroj řešení

RAP = označuje typ řešení: FIN = final, RAP = rapid, ULT = ultra rapid, PRD = predicted

yyyy = rok

ddd = den v roce (tzv. DOY, day of year)

0000 = označuje hodinu prvního záznamu v souboru (u FIN a RAP vždy 0, u ULT 0, 6, 12, 18)

01D = časové období, pro které obsahuje soubory záznamy (01D = 24 h)

01D = interval záznamu

Formát ERP

VERSION 2
CODE RAPID GNSS ERP INFORMATION FOR DAY 204, 2023 24-JUL-23 12:31

NUTATION MODEL		SUBDAILY POLE MODEL: DESAI2016																				
MJD	X-P	Y-P	UT1UTC	LOD	S-X	S-Y	S-UT	S-LD	NR	NF	NT	X-RT	Y-RT	S-XR	S-YR	C-XY	C-XT	C-YT	DPSI	DEPS	S-DP	S-DE
	E-6"	E-6"	E-7S E-7S/D	E-7S/D	E-6"	E-6"	E-7S E-7S/D	E-7S/D				E-6"/D	E-6"/D	E-6"/D	E-2	E-2	E-2	E-6"	E-6"	E-6"	E-6"	
60148.50	241539	487903	-196365	-2153	5	5	6	8	123	85	79	2326	-1569	11	11	0	0	1	0	0	0	0

↑
MJD =
Modifikovaný
Juliánský den
(Modified
Julian Date)

↖
korekce polohy
zemského pólu
(X, Y)

↖
rozdíl v čase
UT1-UTC

↖
korekce délky
dne

CODE rapid řešení pro 1 den

- ve většině případů je primárním cílem eliminace vlivu ionosféry (korekcemi v navigační zprávě, lineární kombinací signálů na dvou frekvencích, globálních ionosférických map, apod.)
- opačná situace -> primárně chceme určit parametry ionosféry, vědecko-výzkumné aplikace
- formát **IONEX** (Ionosphere Map Exchange Format):
 - nezávislý výměnný formát pro mapy ionosféry obsahující hodnoty celkového počtu elektricky nabitých částic (TEC – Total Electron Content) v pravidelné síti buněk nad celou Zemí
 - hodnoty jsou poskytovány pro průsečíky buněk sítě (obvykle $5^\circ \times 2.5^\circ$), pro konkrétní polohu jsou při zpracování interpolovány
 - textový
 - uveřejňován primárně poskytovateli přesných produktů = IGS, CODE (opět různé verze včetně predikovaných)
- CODE distribuuje parametry ionosféry také ve vlastním formátu **ION** použitelném v Bernese GNSS SW

produkty IGS: ***IGS00PSFIN_yyyyddd0000_01D_02H_GIM.INX***

IGS00PS= zdroj řešení

FIN = označuje typ řešení: FIN = final, RAP = rapid, ULT = ultra rapid

yyyy = rok

ddd = den v roce (tzv. DOY, day of year)

0000 = označuje hodinu prvního záznamu v souboru

01D = časové období, pro které obsahuje soubory záznamy (01D = 24 h)

02H = interval záznamu (02H = dvě hodiny)

Formát IONEX - hlavička

```

1.0 IONOSPHERE MAPS GNSS IONEX VERSION / TYPE
IONINX U5.5 AIUB 24-JUL-23 12:15 PGM / RUN BY / DATE
CODE'S 1-DAY PREDICTED IONOSPHERE MAPS FOR DAY 205, 2023 COMMENT
Global ionosphere maps (GIM) are generated on a daily basis DESCRIPTION
at CODE using data from about 120 GNSS sites of the IGS and DESCRIPTION
other institutions. The vertical total electron content DESCRIPTION
(UTECH) is modeled in a solar-geomagnetic reference frame DESCRIPTION
using a spherical harmonics expansion up to degree and DESCRIPTION
order 15. Piece-wise linear functions are used for DESCRIPTION
representation in the time domain. The time spacing of DESCRIPTION
their vertices is 1 hour, conforming with the epochs of the DESCRIPTION
UTECH maps. DESCRIPTION
Data archive: ftp.aiub.unibe.ch/CODE/ DESCRIPTION
www.aiub.unibe.ch/download/CODE/ DESCRIPTION
2023 7 24 0 0 0 EPOCH OF FIRST MAP
2023 7 25 0 0 0 EPOCH OF LAST MAP
3600 INTERVAL
25 # OF MAPS IN FILE
NONE MAPPING FUNCTION
10.0 ELEVATION CUTOFF
One-way carrier phase leveled to code OBSERVABLES USED
6371.0 BASE RADIUS
2 MAP DIMENSION
450.0 450.0 0.0 HGT1 / HGT2 / DHGT
87.5 -87.5 -2.5 LAT1 / LAT2 / DLAT
-180.0 180.0 5.0 LON1 / LON2 / DLON
-1 EXPONENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available COMMENT
1 END OF HEADER
START OF TEC MAP

```

interval tvorby ion. map je
1 hodina, proto jich
celodenní soubor
obsahuje 25

definice globální sítě buněk a
jejich velikosti – v tomto
případě 1 buňka = 2.5° ve
směru zem. šířky a 5° ve
směru zem. délky (typické
hodnoty)

Formát IONEX - tělo

```

1
2023 7 24 0 0 0
87.5-180.0 180.0 5.0 450.0
195 197 199 200 202 204 206 207 208 210 211 212 212 213 213 213
213 213 213 212 211 210 209 208 206 205 203 201 199 197 195 193
191 189 187 185 183 182 180 178 177 176 174 173 173 172 171 171
171 171 171 171 171 171 172 172 173 173 174 175 176 177 178 180
181 182 184 186 187 189 191 193 195
85.0-180.0 180.0 5.0 450.0
195 199 203 207 211 215 218 221 224 226 228 230 231 232 233 233
233 232 232 231 229 228 226 223 221 218 214 211 207 203 199 195
191 186 182 178 175 171 168 165 163 161 159 158 157 157 156 156
157 157 158 158 159 160 161 161 162 163 163 164 165 166 167 169
171 173 175 178 181 184 188 191 195
82.5-180.0 180.0 5.0 450.0
192 199 205 211 217 223 228 232 236 239 241 243 244 244 244 244
244 244 243 242 241 239 237 235 231 228 224 219 214 208 202 196
190 183 177 172 166 162 157 154 151 149 147 146 146 147 148 149
151 152 154 156 158 159 160 161 161 161 161 161 160 160 160 161
161 163 165 168 172 176 181 186 192
80.0-180.0 180.0 5.0 450.0
188 197 205 214 222 229 235 240 244 246 248 248 248 247 246 245
244 244 243 243 243 242 241 239 237 233 229 224 218 211 204 196
189 181 174 167 161 155 150 146 143 141 140 140 141 143 145 148
152 156 160 163 166 169 170 171 171 170 168 166 164 161 159 157
156 156 157 159 163 167 173 180 188
77.5-180.0 180.0 5.0 450.0

```

identifikace buňky sítě a způsobu řazení hodnot v záznamu:

číslo na první pozici představuje zem. šířku všech hodnot záznamu, mění se zem. délka v rozsahu hodnot na pozici 2 a 3 o inkrement daný na pozici 4 – jelikož je inkrement 5° , je v záznamu 72 hodnot TECU ($360^\circ/5^\circ = 72$)

Parametry troposféry

- troposféra ovlivňuje GNSS měření
- pokud provádíme post-processing pro data referenčních stanic zahrnutých do sítě EUREF EPN či IGS, můžeme využít parametry troposféry vypočtené z řešení poskytovanými analytickými centry -> primárně chceme eliminovat vliv troposféry
- opačná situace -> primárně chceme určit parametry troposféry pro zpracovávané stanice
- formát **TRO** (Tropo SINEX):
 - nezávislý výměnný formát pro uložení parametrů troposféry (celkové zpoždění signálu vlivem troposféry v zenitovém směru nad stanicí = ZTD, Zenith Total Delay; horizontální gradienty troposféry; šikmá zpoždění signálu, atd.)
 - textový
 - aktuální verze 2.00
 - může být výstupem zpracování vlastních GNSS měření

Kalibrace fázových center antén přijímačů

- problematika fázových center antén přijímačů – viz prezentace č. 2
- formát **ANTEX** (Antenna Exchange Format):
 - nezávislý výměnný formát poskytující data pro korekce vlivu fázových center antén přijímačů a antén družic GNSS
 - obsahuje kalibrace pro faktickou většinu antén geodetických přijímačů (pro některé antény jsou k dispozici korekce jen pro klasické frekvence systémů GPS a GLONASS, pro jiné antény jsou již k dispozici korekce pro všechny frekvence všech GNSS systémů)
 - textový
 - aktuální verze 1.4
 - poskytován IGS (<https://files.igs.org/pub/station/general/>)
 - aktualizace souboru jsou pravidelně prováděny

igsxx_www.atx

- **xx** = verze ITRF, se kterou je daný atx soubor v souladu (aktuálně 20, předtím 14)
- **_www** = GPS týden, kdy byl daný soubor uveřejněn
- používaný název pro aktuálně platný soubor = igs20.atx

Formát ANTEX - tělo

```
350.0 +0.00 -0.16 -0.68 -1.44 -2.38 -3.40 -4.44 -5.42 -6.23 -6.77
355.0 +0.00 -0.16 -0.67 -1.44 -2.37 -3.40 -4.43 -5.39 -6.21 -6.75
360.0 +0.00 -0.16 -0.67 -1.44 -2.37 -3.39 -4.42 -5.38 -6.20 -6.75
R02
```

END OF FREQUENCY

END OF ANTENNA

START OF ANTENNA

TYPE / SERIAL NO

METH / BY / # / DATE

DAZI

ZEN1 / ZEN2 / DZEN

OF FREQUENCIES

Informace o přijímači/anténě a
procesu stanovení kalibrace

TPSCR.G5

TPSH

ROBOT

Geo++ GmbH

29

09-JUN-19

5.0

0.0 90.0 5.0

25

IGS20_2272

SINEX CODE

```
PCV #a 029 #c 059 #s 114 | G01 E01 J01 S01 C01 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 059 | G02 J02 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 114 | G05 E05 J05 C05 S05 I05 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 059 | R01 R04 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 058 | R02 R06 COMMENT
PCV #a 027 #c 059 #s 055 | E06 J06 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 110 | E07 C07 COMMENT
PCV #a 006 #c 059 #s 012 | E08 C08 COMMENT
PCV #a 029 #c 059 #s 057 | C02 COMMENT
PCV #a 028 #c 059 #s 055 | C06 COMMENT
a: #antennas, c: #calibrations, s: #sets for frequency COMMENT
```

G01 START OF FREQUENCY

NORTH / EAST / UP

```
0.18 0.33 91.23
NOAZI 0.00 -0.35 -1.35 -2.84 -4.62 -6.43 -8.06 -9.31 -10.06 -10.25
0.0 0.00 -0.35 -1.33 -2.81 -4.57 -6.36 -7.95 -9.16 -9.85 -9.96
5.0 0.00 -0.35 -1.34 -2.82 -4.58 -6.38 -7.98 -9.20 -9.91 -10.03
10.0 0.00 -0.35 -1.34 -2.83 -4.59 -6.40 -8.01 -9.25 -9.97 -10.11
15.0 0.00 -0.35 -1.35 -2.84 -4.61 -6.42 -8.05 -9.30 -10.04 -10.20
```

Samotné kalibrační hodnoty pro jednotlivé frekvence (zde L1 pro GPS = G01). Druhý řádek představuje PCO v mm vůči referenčnímu bodu antény ARP ve směru NORTH, EAST, UP. Následují řádky s úpravnými korekcemi v mm vlivem azimutu/elevace observace - řádek NOAZI obsahuje korekce bez zahrnutí vlivu azimutu observace, následující řádky jsou pak pro jednotlivé azimuty observací – hodnoty na řádku jsou pro jednotlivé kroky vzrůstajícího elevačního úhlu observace (0 – 90 °, inkrement 5 ° - viz řádek ZEN1 / ZEN2 / DZEN v hlavičce záznamu)

!tato ukázka souboru není pro zajištění čitelnosti kompletní = neobsahuje celé řádky záznamů!

Diferenční kódové bias

- problematika diferenčních kódových bias probrána v prezentaci č. 2
- formát **DCB** (Differential Code Biases):
 - textový formát poskytující korekce rozdílů mezi HW zpožděními různých kódových měření v nanosekundách
 - poskytován analytickými centry, např. CODE
 - aktualizace souboru jsou prováděny denně – soubor obsahuje korekce platné vždy pro předcházejících 30 dní
 - korekce jsou uvedeny pro jednotlivé družice systémů GPS (označení G + PRN kód družice) a GLONASS (označení R + PRN)
- název souboru (dle typu obsažených korekcí):

P1C1.DCB

P1P2.DCB

P2C2.DCB

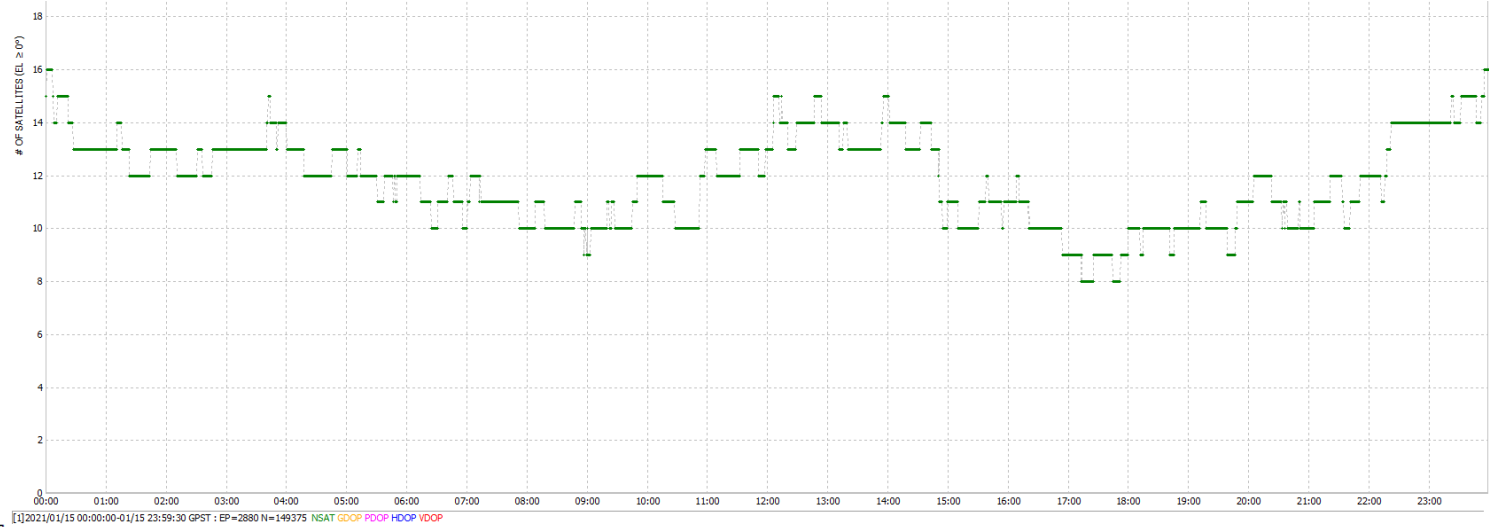
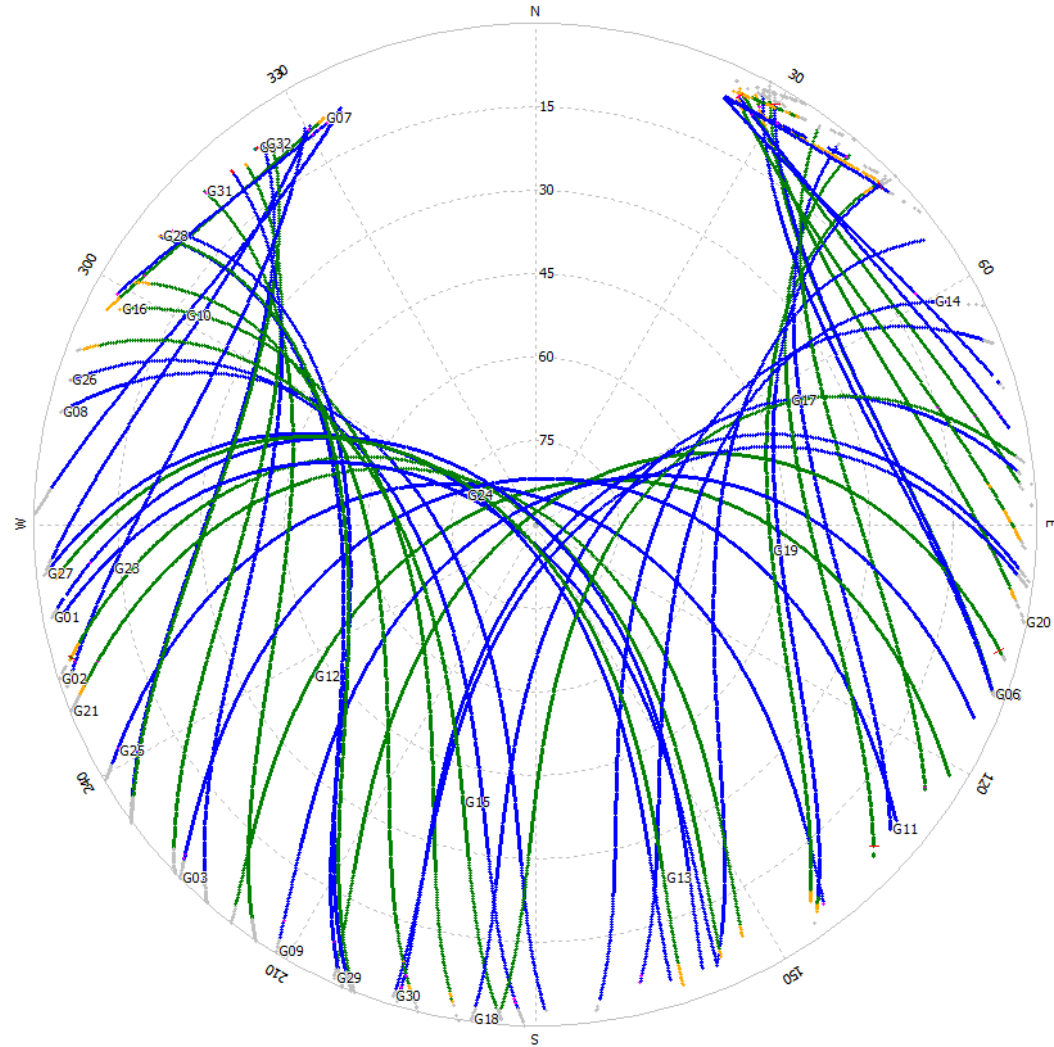
Typ dat	Formát	Zdroj	Potřeba pro zpracování
observace	RINEX	vlastní měření x referenční stanice	nutné
efemeridy, korekce chyb hodin družic s 5-15 min. intervalem	SP3	IGS, analytická centra (CODE)	potřebné
korekce chyb hodin družic s kratším intervalem (např. 30 s)	CLK	IGS, analytická centra (CODE)	vhodné/volitelné
parametry rotace Země	ERP	IGS, analytická centra (CODE)	potřebné/vhodné
parametry ionosféry	IONEX	IGS, analytická centra (CODE)	potřebné/vhodné
parametry troposféry	TRO	IGS, CODE, EUREF	volitelné
kalibrace fázových center antén přijímačů	ANTEX	IGS	potřebné
korekce HW zpoždění kódových měření	DCB	CODE, další analytická centra	potřebné/vhodné

Předzpracování observací

Import RINEX, statistiky observací

- Některé software pro post-processing GNSS měření vyžadují import observací (z formátu RINEX) do jimi nativně používaného formátu, často binárního
- import obvykle doprovází volba výběru observací, které se mají importovat (frekvence, časový interval, atd.) a kontrola údajů hlavičky RINEX souboru (důležitý je zejména typ přijímače a antény)
- po načtení/importu observací máme většinou možnost zobrazit si tabelizované či grafické statistiky o provedených observacích

Statistiky observací – RTKLIB (RTKPLOT)



počet observovaných družic

Identifikace a označení problematických observací

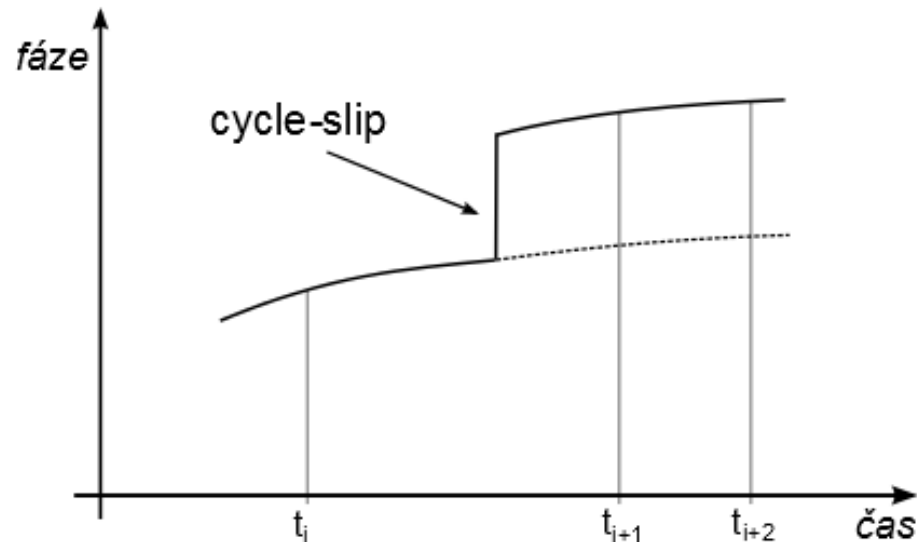
- observace nejsou ze souborů odstraněny, jen označeny a dále případně vynechány ze zpracování
- typicky se jedná o tyto typy observací:
 - odlehlé observace (detekovány na základě výpočtu rozdílu observací mezi po sobě následujícími epochami a stanovené prahové hodnoty rozdílu)
 - observace ke družicím, jejichž signály byly pro určitý časový interval označeny za problematické (Satellite Problem File, CRX)
 - observace pod stanoveným mezním elevačním úhlem
 - nepárové observace na dvou frekvencích (např. pro danou epochu je k dispozici observace na frekvenci L1, ale není na L2 a opačně)
 - observace pokrývající kratší časový interval než je stanovený práh
 - observace mezi 2 ambiguitami pokrývající kratší časový interval než je práh

Fázový skok

- angl. cycle-slip
- po zapnutí přijímače GNSS dochází k určení zbytkové části vlnové délky signálu (porovnáním přijaté vlny s replikou signálu generovanou přijímačem) a vynulování počítadla přírůstku počtu celých vln
- vždy když zbytková část vlny přesáhne 2π , počítadlo přičte či odečte 1 vlnu a zbytková část přechází na aktuální hodnotu v rozsahu 0 až 2π
- v určité epoše je tedy geometrická vzdálenost mezi družicí a přijímačem dána součtem počátečního celočíselného počtu vln (ambiguity), stavu počítadla celých vln a aktuální hodnotou zbytkové části vlny

Fázový skok

- ambiguita zůstává konstantní dokud nedojde k (dočasné) ztrátě kontinuálního příjmu signálu => v tom případě je počítadlo celých vln vynulováno a dochází ke skoku mezi jeho poslední platnou hodnotou a hodnotou platnou pro aktuální observaci po zahájení opětovného příjmu signálu
- cycle-slip se týká pouze fázových měření!



Co způsobuje fázový skok

- Překážky v přímé viditelnosti mezi anténou přijímače a družicí (zeleň, budova, apod.) – nejčastější důvod, objevuje se zejména u kinematických řešení, kdy se přijímač pohybuje
- nízká síla signálu (poměr síly signálu k šumu) vlivem výrazné aktuální aktivity ionosféry, multipath, nízkého elevačního úhlu družice
- chyba ve zpracovávajícím software přijímače

Detekce fázového skoku

- v závislosti na typu přijímače, metodě měření, popřípadě metodě post-processingu měření -> různé algoritmy realizované v různých přijímačích/softwarech pro zpracování
- používají se surová fázová měření a hlavně kombinace signálů (kombinace fázových měření, kombinace fázových a kódových měření, kombinace fázových a dopplerovských měření) – existují algoritmy pro jedno i dvou frekvenční měření
- v případě přístupu k měřením z více přijímačů jsou k detekci cycle-slip používány difference observací (jednoduché, dvojité i trojitě)

Detekování cycle-slip: 1 frekvence

- Algoritmy pro detekci cycle-slip při jedno-frekvenčních měřeních jsou obvykle založené na výpočtu **rozdílu mezi kombinovanými observacemi ze dvou po sobě následujících epoch a výpočtu predikce tohoto rozdílu**
- pokud rozdíl mezi skutečnou a predikovanou dvojicí přesáhne určitou hraniční hodnotu, je druhá observace dvojice observace označena jako zdroj cycle-slip
- predikce může být vypočítávána proložením polynomické funkce z N observací v časově plovoucím okně či na základě průměru rozdílů v obdobném plovoucím okně – cílem je vyhlazení šumu měření
- N = řádově několik málo stovek observací při 1 s intervalu měření
- konkrétní realizace algoritmu mohou dosahovat různé míry komplexnosti

Detekování cycle-slip: 2 frekvence

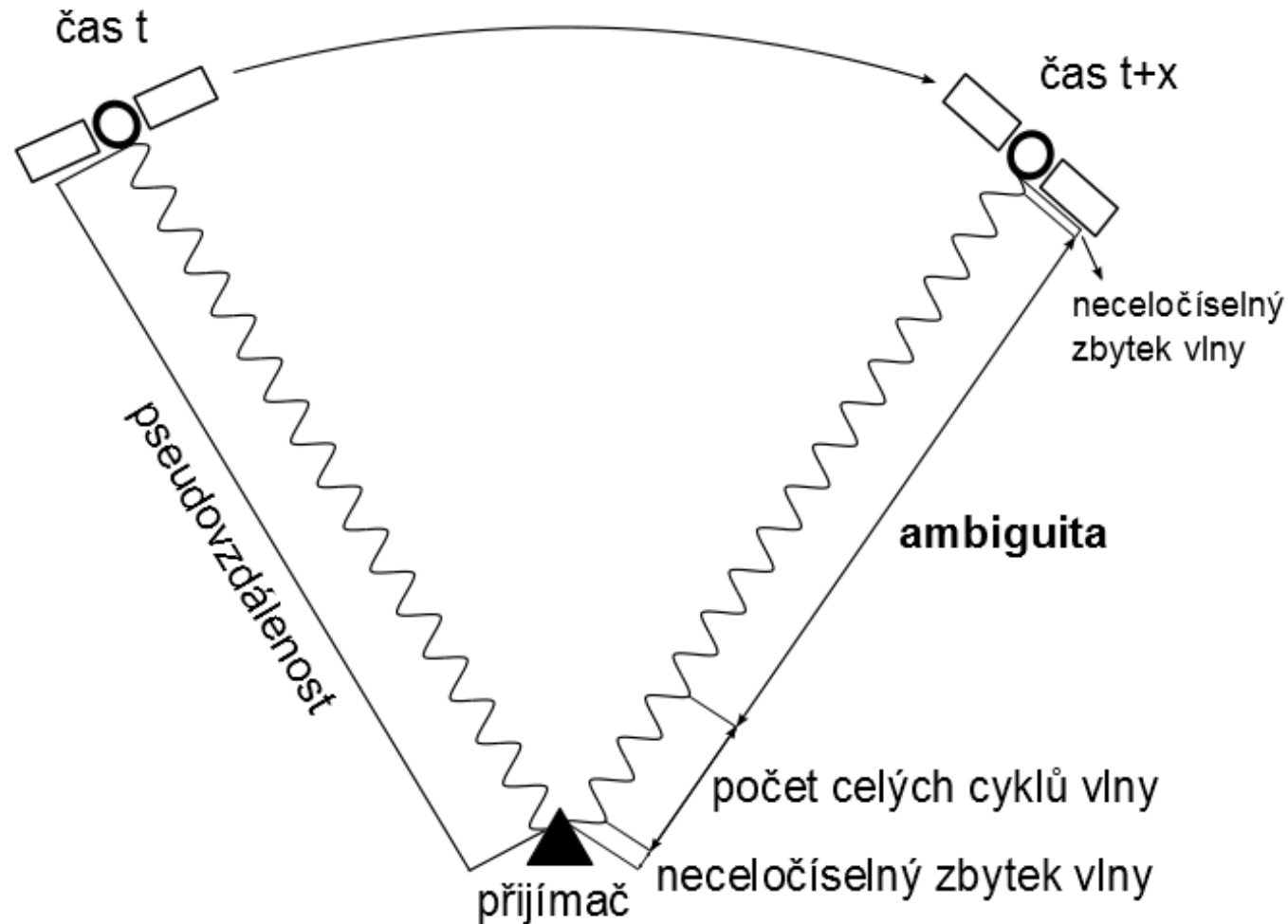
- Použití 2 či více frekvencí zvyšuje spolehlivost korektní detekce cycle-slip
- využívají se lineární kombinace signálu, které odstraňují vliv geometrie a další nedisperzivní vlivy (chyby hodin, troposféra, apod.) a případně i vliv ionosféry (ten může být modelován)
- jelikož cycle-slip se může objevit na každé frekvenci zvlášť, je potřeba používat dvě nezávislé lineární kombinace
- typicky se využívá lineární kombinace prostá geometrie (geometry-free) či kombinace fázových a kódových měření v podobě Melbourne-Wübbena lin. kombinace

Řešení cycle-slip

- oprava cycle-slip = vyžaduje znalost velikosti cycle-slip (počtu celých vln skoku), je možné ji do měření zanést okamžitě
- re-inicializace ambiguity = jistější řešení, vyžaduje však určení nově zavedené ambiguity => časově i výpočetně náročné
- při opravách cycle-slip při měření v reálném čase mohou výrazně pomoci i data z externích zdrojů, například z inerciálního navigačního systému

Ambiguita

- Celočíselný násobek počtu nosných vln mezi družicí a přijímačem (typicky označován N)



Ambiguity a jejich řešení

- vyřešení ambiguity = fixování ambiguity = určení celočíselného počtu vln je zásadní pro dosažení vysoké přesnosti měření (cm)
- provádí se numerickými metodami
- chyba v určení ambiguity o velikosti 1 cyklu vlny může vyústit v chybu určení polohy přijímače v řádu několika dm (GPS L1 = 19 cm, GPS L2 = 24.5 cm)
- hodnota ambiguity zůstává neměnná dokud je družice kontinuálně observována = dokud nedojde k cycle-slip => posléze je nutné ji znovu určit

Ambiguity a dvojité diference

- pro vyřešení ambiguit se standardně používají dvojité-diferenciované (DD) observace, jelikož v jejich případě si ambiguity zachovávají svůj celočíselný charakter
- ambiguity nediferenciovaných observací jsou zatíženy nekalibrovanými fázovými zpožděními (UPD) a tudíž nemají celočíselný charakter a bez opravy těchto zpoždění nemohou být fixovány (více prezentace č. 4)
- pokud jsou UPD stanoveny, mohou být ambiguity pro nediferenciované observace vyřešeny stejnými technikami používanými pro vyřešení ambiguit DD observací

Ambiguity a délka základny

- délka základny (angl. baseline) mezi 2 přijímači pro vytvoření DD observací hraje významnou roli při řešení ambiguit
- v případě krátkých základen (< 20 km) formováním DD observací z měření kromě chyb hodin obvykle výrazně eliminujeme i vliv ionosféry a troposféry, čímž se zjednodušuje observační model a zvyšuje pravděpodobnost korektního určení ambiguit
- se vzrůstající délkou základny je potřeba z měření eliminovat i vlivy ionosféry a troposféry například jejich modelováním => případné chyby v kvantifikování těchto vlivů se přenesou do určení ambiguit a výsledných souřadnic místa měření
- z tohoto důvodu je délka základny hlavním omezením klasických diferenčních technik GNSS (RTK, PPK, atd.)

Ambiguity a konstelace družic + délka observací

- platí obecné pravidlo = čím vyšší počet viditelných družic, tím nižší hodnoty DOP, tím lepší výchozí situace pro řešení ambiguit
- pro vyřešení ambiguit je potřeba observování po určitou dobu – informace obsažená ve fázových měřeních je funkcí času a je tudíž pevně spjata s pohybem družice
- příklad 2 měření:
 - observace sbírány v 15s intervalu po dobu 1 hod (240 obs.)
 - observace sbírány v 1s intervalu po dobu 4 minut (240 obs.)
- data z prvního příkladu mají vyšší šanci na vyřešení ambiguit

Ambiguity a délka observací

- Při řešení ambiguit přijímáme jednu družici jako referenční a vůči ní konstruueme jednou diferencované (SD – 1 přijímač, 2 družice) a následně DD observace
- při kratších dobách observace/kratší délce základny jsou k dispozici družice, které byly observovány po celou dobu = jednu z nich využijeme jako referenční
- se vzrůstající dobou observace a délkou základny bude pravděpodobnost výskytu takovéto družice v datech klesat => jako referenční se typicky použije ta, pro níž je k dispozici nejvíce observací
- při velmi dlouhých základnách (tisíce km) se mohou vyskytovat periody, kdy byly na obou přijímačích observovány pouze jedna či dvě společné družice

Řešení ambiguit

- Samotnému stanovení celočíselných ambiguit předchází určení ambiguit v podobě reálných čísel, které slouží jako výchozí bod pro určení jejich celočíselných hodnot
- toto určení je provedeno při společném odhadu neznámých parametrů z observací (souřadnice, atd.)
- řešení založené na ambiguitách v podobě reálných čísel je označováno pojmem **float** a poskytuje v danou chvíli nejpřesněji dosažitelné souřadnice místa měření
- pokud bude délka základny malá (např. 5 km) a doba observace dlouhá (např. 1 h), budou float ambiguita velmi blízké celým číslům a souřadnice místa měření se fixováním ambiguit pravděpodobně příliš nezmění
- se zkracující se dobou observace bude mít vyřešení ambiguit mnohem větší vliv na přesnost určení souřadnic, ale zároveň se bude stávat obtížnějším

Řešení ambiguit

- Obecně se sestává ze tří kroků:
 1. vygenerování potencionálních kombinací řešení ambiguit z dostupných observací na základě zvolené velikosti okolí (kombinace = obsahuje ambiguitu pro každou DD observaci)
 2. identifikace korektní kombinace řešení ambiguit
 3. verifikace vybrané kombinace řešení – nejlepší kombinace by měla mít výrazně lepší hodnocení než kombinace následující v pořadí
- toto obecné řešení popisuje jednoduchý způsob řešení ambiguit, který není z mnoha důvodů ideální – řada existujících algoritmů pro řešení ambiguit z něj však vychází a snaží se odstraňovat jeho nedostatky (časová náročnost, potřebná doba observace, validace řešení, atd.)

1. Určení potencionálních kombinací

- Stanovujeme vyhledávací oblast
- její velikost je dána nejistotou určení souřadnic místa měření, které máme před řešením ambiguit k dispozici* => skutečná poloha antény přijímače musí být uvnitř vyhledávací oblasti
- větší vyhledávací oblast znamená větší jistotu pro nalezení skutečně správné kombinace ambiguit, ale také znamená větší počet kombinací vstupujících do řešení a tudíž delší čas potřebný pro celé řešení
- problematické zejména u kinematických měření, kdy potřebujeme rychle vyřešit ambiguitu a přitom většinou máme nepřesné vstupní souřadnice

* souřadnice získané ze známých přesných souřadnic nebo z float ambiguity řešení či pouze na základě kódových měření

Stanovení vyhledávací oblasti

- Přímočarým postupem pro určení vyhledávací oblasti je použití float ambiguit
- například pokud byla float ambiguita odhadnuta na 87 457 341.88 cyklů se směrodatnou odchylkou SDEV = 0.3 cyklu, můžeme využít statistického pravidla $\bar{\pm} 3 \text{ SDEV}$, což povede k možným integer hodnotám ambiguity v rozsahu 87 457 340 až 87 457 343 cyklů
- tento proces je zopakován pro každou DD observaci a výsledkem je soustava všech potencionálních kombinací
- počet potencionálních kombinací je dán počtem observovaných družic a velikostí oblasti, kterou chceme využít, abychom statisticky zvýšili jistotu, že v ní bude korektní integer ambiguita ($\bar{\pm} 3 \text{ SDEV}$, $\bar{\pm} 5 \text{ SDEV}$, apod.)
- příklad:
 - je observováno 6 družic, musíme při použití DD určit 5 ambiguit
 - pokud bude rozsah pro vyhledávání roven 3 cyklům, bude celkový počet kombinací $3^5 = 243$
 - pokud bude rozsah pro vyhledávání roven 5 cyklům, bude celkový počet kombinací $5^5 = 3125$

2. Identifikace korektní kombinace řešení ambiguit

- Kritériem výběru je u řady technik pro řešení ambiguit minimalizace sumy druhé mocniny post-fit residuí
- post-fit residuum reprezentuje rozdíl mezi observací změřenou (observace např. v RINEXu) a observací adjustovanou (opravenou o vlivy na měření)
- získáváme jej pro všechny observace vstupující do řešení (typicky metodou nejmenších čtverců), které slouží pro stanovení neznámých parametrů z měření (souřadnice, atd.)
- poté, co jsou v 1. kroku řešení ambiguit stanoveny všechny potencionální kombinace, provádíme pro všechny kombinace určení neznámých parametrů z observací, přičemž ambiguit v daných kombinacích fixujeme na jejich odhadnuté hodnoty

2. Identifikace korektní kombinace řešení ambiguit

- výsledkem jsou odhadnuté neznámé parametry (v tomto kroku typicky pouze souřadnice) a post-fit residua pro jednotlivé observace
- kombinace řešení s nejnižší sumou druhé mocniny všech post-fit residuí je ta kombinace, která nejvíce odpovídá získaným datům a tudíž je považována za tu správnou
- tato hypotéza je však problematická pokud je k dispozici malý počet družic (DD observace totiž nejsou nezávislé, ale jsou mezi sebou korelované)
- jsou dostupné techniky, které neprovádějí časově náročný odhad neznámých parametrů pro každou kombinaci ambiguit, ale stanovují vliv této kombinace na změnu post-fit residuí oproti residuím z float ambiguity řešení (residua z float ambiguity řešení budou vždy menší než residua z fixovaného řešení)
- dalším potenciálním problémem využití minimalizace sumy druhých mocnin post-fit residuí je, že v procesu stanovení parametrů metodou nejmenších čtverců předpokládáme, že post-residua mají normální rozdělení, což nemusí být reálně splněno

3. Verifikace vybrané kombinace řešení ambiguit

- Pro jednotlivé navržené kombinace získáváme sumu mocnin post-fit residuí a řešení s nejnižší sumou považujeme za to korektní
- rozdíl mezi sumou nejlepší kombinace a druhou nejlepší kombinací však musí být statisticky významný, abychom první kombinaci mohli považovat za skutečně správnou
- typicky se využívá tzv. ratio testu = výpočtu poměru mezi výsledkem druhé a první kombinace a stanovení mezní hodnoty pro tento poměr, která určuje, zdali je možno považovat nejlepší kombinaci za tu skutečně správnou
- mezní hodnota bývá v závislosti na korektním algoritmu typicky 2 – 3, suma mocnin residuí nejlepší kombinace tak musí být 2x až 3x menší než suma mocnin residuí druhé nejlepší kombinace
- pokud tato podmínka není splněna, fixování ambiguit nemůže být provedeno a využíváme prvotního float řešení

1. příklad řešení ambiguit

- Délka základny = 720 m, 6 družic bylo observováno po 10 minut
- využití DD, družice s PRN kódem 19 určena jako referenční
- s použitím metody nejmenších čtverců byly vypočteny float ambiguity:

DD - PRN družic	Float ambiguity (cykly)
2 - 19	17 329 426.278
6 - 19	14 178 677.032
11 - 19	11 027 757.713
16 - 19	-1 575 518.876
18 - 19	-15 754 175.795

- se zavedením pravidla ∓ 2 cykly pro vyhledávání od nejbližší celé hodnoty získáváme pro každou ambiguitu 5 možností, což celkem vede u 6 družic ke 3 125 možným kombinacím (5^5)

1. příklad řešení ambiguit

- po vyřešení všech kombinací získáváme tři nejlepší řešení s nejnižší sumou mocnin residuů (SMR)

DD - PRN družic	1. řešení (SMR = 0.044)	2. řešení (SMR = 0.386)	3. řešení (SMR = 0.453)
2 - 19	17 329 426	17 329 426	17 329 426
6 - 19	14 178 677	14 178 676	14 178 678
11 - 19	11 027 758	11 027 757	11 027 759
16 - 19	-1 575 519	-1 575 518	-1 575 520
18 - 19	-15 754 176	-15 754 176	-15 754 176

- poměr SMR 1. a 2. řešení = $0.386/0.044 = 8.77 >$ prahová hodnota 3 \Rightarrow 1. řešení považujeme za korektní a přijímáme jej

2. příklad řešení ambiguit

- Uvažujeme stejné měření = základna 720 m, 6 družic, ale tentokrát s délkou observace pouze 5 minut (původně 10 minut)
- float ambiguity:

DD - PRN družic	Float ambiguity (cykly)
2 - 19	17 329 426.455
6 - 19	14 178 677.192
11 - 19	11 027 757.762
16 - 19	-1 575 518.471
18 - 19	-15 754 175.411

- totožné pravidlo ∓ 2 cykly \Rightarrow opět 3 125 možných kombinací ambiguit

2. příklad řešení ambiguit

- po vyřešení všech kombinací získáváme opět tři nejlepší řešení s nejnižší sumou mocnin residuů (SMR)

DD - PRN družic	1. řešení (SMR = 0.137)	2. řešení (SMR = 0.155)	3. řešení (SMR = 0.230)
2 - 19	17 329 425	17 329 426	17 329 426
6 - 19	14 178 675	14 178 677	14 178 675
11 - 19	11 027 757	11 027 758	11 027 756
16 - 19	-1 575 516	-1 575 519	-1 575 518
18 - 19	-15 754 175	-15 754 176	-15 754 175

- poměr SMR 1. a 2. řešení = $0.155/0.137 = 1.1 <$ prahová hodnota 3 \Rightarrow 1. řešení nemůžeme považovat za správné a nepřijímáme jej
- 2. řešení z tohoto příkladu je totožné jako nejlepší řešení z prvního příkladu, které v něm bylo přijato jako správné \Rightarrow ukázka toho, že jednoduchá technika založená na poměru dvou nejlepších sum residuů není ideálním řešením

- Nej přímočařejší postup:
 - observace jsou modelovány, linearizovány a vstupují do procesu odhadu neznámých parametrů
 - při prvním stanovení neznámých parametrů jsou ambiguity ponechány jako reálná čísla (do odhadovaných parametrů se promítnou chyby ze všech nemodelovaných vlivů)
 - ambiguita, jejíž reálné číslo se nejvíce blíží celočíselné hodnotě a jejíž standardizovaná chyba je nejnižší je zaokrouhlena na celé číslo a tím označena za vyřešenou
 - iterativně jsou opět určovány všechny neznámé parametry (tentokrát je již vždy o jeden neznámý parametr méně = určená ambiguita) a ambiguity jsou postupně fixovány
- tato technika poměrně spolehlivě funguje pro krátké základny
- nejkritičtějším faktorem je vliv ionosféry a míra jeho eliminování DD observacemi – může zamezit vyřešení ambiguit pro všechny observace

Řešení ambiguit – 2 frekvenční měření

- Oproti 1 frekvenčním měřením se situace výrazně zlepšuje, jelikož můžeme využívat lineární kombinace signálů
- využití Wide-line a Narrow-Line kombinací
 - v případě L1 a L2 GPS má lineární kombinace Wide-Line vlnovou délku 86 cm, což výrazně napomáhá při práci s vyhledávací oblastí = zmenšením oblasti se snižuje počet potencionálních kombinací
 - nevýhoda Wide-Line = značný nárůst šumu měření (6 x oproti samotné L_1 frekvenci u GPS)
 - lineární kombinace Narrow-line má naopak výrazně kratší vlnovou délku (v případě L1 a L2 GPS 10 cm), po vyřešení ambiguit dokáže poskytnout velmi přesnou polohu
- při řešení ambiguit se uplatní taktéž lineární kombinace Melbourne-Wübbena kombinující dvou-frekvenční fázová a přesná kódová měření

Řešení ambiguit – kinematická měření

- Označováno jako on-the-fly (OTF) či on-the-run (OTR) řešení = řešení ambiguit pro pohybující se rover přímo během měření
- kódová měření jsou použita pro určení souřadnic a vyhledávací oblasti, jejich kvalita je proto kritická
- příklad (6 observovaných družic, 5 DD observací):
 - souřadnice jsou známy s přesností 2 m, což určuje velikost vyhledávací oblasti na krychli o délce strany 4 m
 - $4 \text{ m} / 20 \text{ cm}$ (přibližná vlnová délka) = 20 cyklů
 - $20^5 = 3.2 \text{ mil. kombinací}$
 - souřadnice jsou známy s přesností 1 m, což určuje velikost vyhledávací oblasti na krychli o délce strany 2 m
 - $2 \text{ m} / 20 \text{ cm}$ (přibližná vlnová délka) = 10 cyklů
 - $10^5 = 100 \text{ 000 kombinací}$

- Z důvodu využívání FDMA je řešení ambiguit oproti jiným systémům složitější
- FDMA = jednotlivé družice využívají mírně odlišnou frekvenci pro L_1 i L_2 , tudíž jejich signály mají mírně odlišné vlnové délky
- díky tomu formováním DD observací vyjádřených v cyklech vlnové délky z observací zcela neodstraníme chyby hodin (formováním DD vyjádřených v metrech ztrácejí ambiguitu svůj celočíselný charakter)
- v současnosti existuje několik řešení, například:
 - určení SD ambiguity pro referenční družici na základě kombinace fázových a kódových měření (potřeba znalosti mezifrekvenčních kódových bias pro GLONASS)
 - převedení měření uskutečněné na rozdílných frekvencích na jednu jednotnou frekvenci

- kombinace signálů ze systémů GPS, Galileo a BeiDou (potažmo GLONASS využívajícího CDMA) vede ke zlepšení situace při řešení ambiguit
- kombinace systémů dokáže pomoci s:
 - řešením ambiguit při dlouhých základnách
 - dosažení řešení ambiguit za kratší čas = potřeba menšího množství epoch
 - vyšší spolehlivost řešení ambiguit
 - zvýšení šance na používání RTK v zastavěném území, kde aktuálně může docházet k výpadkům řešení z důvodu stínění signálu překážkami (malý počet dostupných družic)

Algoritmy pro řešení ambiguit

- Vývoj technik pro řešení ambiguit a jejich optimalizace je dlouhodobou oblastí zájmu kosmické geodézie a družicové navigace
- konkrétních algoritmů pro řešení ambiguit existuje celá řada
- často vychází z metod vyvinutých již během 90. let 20. století:
 - LSAST, FARA, LAMBDA, FASF, OMEGA, apod.
- aktuálně se vývoj zaměřuje na řešení ambiguit pro multi-GNSS řešení, pro nediferencované observace, pro určování polohy kombinující GNSS s jinými technologiemi (inerciální navigační jednotky, odometrie, atd.)

- Dach, R. et al. *Bernese GNSS Software, Version 5.2*, Astronomický institut univerzity v Bernu, Švýcarsko, 2015
- Romero, I. (ed.). *The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00*. IGS/RTCM RINEX WG, 2021.
- 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.
- Verhagen, S. *Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution – Recent Results and Open Issues*, Kolloquium Satellitennavigation, Mnichov, Německo, 2010
- <https://igs.org/products/#>
- <https://igs.org/formats-and-standards>
- <http://www.bernese.unibe.ch/download/>
- <http://gpsworld.com/innovation-cycle-slips/>

Děkuji za pozornost

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



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY