



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta Dopravní



Ústav letecké dopravy

# Přiblížení SBAS, jeho avionika a porovnání s ostatními systémy

SBAS approach, its avionics  
and comparison with other systems

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích  
Studijní obor: Letecká doprava

Vedoucí práce: Ing. Jakub Kraus, Ph.D.

*Jakub Machuta*

Praha 2016



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta dopravní  
d ě k a n**

Konviktská 20, 110 00 Praha 1

**K621..... Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Jakub Machuta**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **SBAS přiblížení, jeho avionika a porovnání  
s ostatními systémy**

Název tématu (anglicky): SBAS Approach, its Avionics and Comparison with Other  
Systems

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Obecně SBAS, jeho aplikace EGNOS, WAAS
- Infrastruktura SBAS
- Avionika pro přiblížení systémem SBAS
- Porovnání s avionikou systémů GNSS, ILS/MLS, GBAS, Baro-VNAV
- Shrnutí problematiky a další vývoj systému

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Doc 9613, Performance-based Navigation (PBN) Manual, ISBN 978-92-9231-198-8  
User guide for EGNOS application developers, ED. 1.1, 07/30/2009  
EGNOS Service Definition Document Open Service, Ref: EGN-SDD OS V1.1

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jakub Kraus**

Datum zadání bakalářské práce:

**24. října 2014**

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

**25. srpna 2016**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jakub Machuta  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. prosince 2015

---

## ABSTRAKT

---

Předložená bakalářská práce pojednává o systému SBAS pro přiblížení na přistání založeném na GNSS s cílem porovnat tento systém se systémy ostatními. V první části vysvětluje princip jeho fungování jako celku, aby se poté bylo možné v části druhé zabývat avionikou SBAS a popsat její funkčnost. V poslední části je systém SBAS porovnán s ostatními současnými systémy pro přiblížení. Cíleně byly vybrány systémy s přibližně srovnatelnou výkonností, se snahou vystihnout jednotlivé výhody a nevýhody a to především z hlediska palubního vybavení, tedy avioniky letadla.

This bachelor thesis deals with SBAS approach based on GNSS with aim to compare it with other systems. The first part explains the principle of its operation as a whole, in order to be able to deal with SBAS avionics and describe its functionality in second part. In the last part SBAS system is compared with other current systems for approach. Systems with approximately comparable performance were specially selected with an effort to capture the individual advantages and disadvantages, especially in terms of onboard equipment - aircraft avionics.

*Věnováno Zuzaně Kubátové.*

---

## PODĚKOVÁNÍ

---

Rád bych poděkoval všem, kteří mi jakýmkoli způsobem poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji vedoucímu mého projektu *Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D.* za odborné vedení, rady a konzultování mé bakalářské práce po celou dobu její tvorby. Dále bych rád poděkoval technické podpoře systému EGNOS, která mi poskytla některé důležité informace, a v neposlední řadě svým rodičům a blízkým, od kterých se mi dostalo morální podpory po celou dobu studia.

---

## PROHLÁŠENÍ

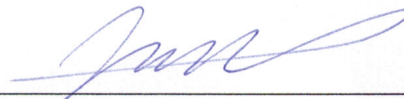
---

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

19. 8. 2016

Datum



Jakub Machuta

---

## OBSAH

---

ZKRATKY POUŽITÉ V TEXTU	12
1 ÚVOD	15
1.1 Charakteristika SBAS	15
1.2 Implementace	16
1.2.1 WAAS	16
1.2.2 EGNOS	16
1.2.3 Ostatní	16
1.3 GPS	17
2 INFRASTRUKTURA SYSTÉMU SBAS	20
2.1 Korekční data	20
2.2 Architektura EGNOS	21
2.2.1 Krok 1 – Sběr naměřených dat	22
2.2.2 Krok 2 – Výpočet	22
2.2.3 Krok 3 – Přenos	24
3 AVIONIKA SYSTÉMU SBAS	26
3.1 Obecné standardy avioniky SBAS	26
3.1.1 Klasifikace MOPS RTCA avioniky SBAS	28
3.2 Zprávy SBAS	28
3.2.1 Struktura	29
3.2.2 MTo a MTo/2	30
3.3 Funkce avioniky	31
3.3.1 Využití masky PRN	31
3.3.2 Využití diferenciálních korekcí	31
3.3.3 Ionosférické korekce	32
3.3.4 Dlouhodobé korekce	36
3.3.5 Rychlé korekce	36
3.3.6 Výpočet elevace geostacionárního satelitu	36
3.3.7 Využití informací o integritě	38
3.4 Přijímače	39
3.4.1 Typy rozhraní a protokoly	40
3.4.2 Výrobci avioniky SBAS	41
4 POROVNÁNÍ S JINÝMI SYSTÉMY	44
4.1 Úvod do problematiky	44
4.2 Přesnost GPS a EGNOS	45
4.3 APV Baro ve srovnání s APV SBAS	46
4.4 ILS ve srovnání s APV SBAS	49
4.4.1 Avionika ILS	51
4.4.2 Testování přesnosti EGNOS a ILS	55
4.5 GBAS jako nástupce ILS ve srovnání s APV SBAS	55



4.5.1	Avionika GBAS . . . . .	59
5	ZÁVĚR	62

---

## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obrázek 1	Dopad geometrického rozložení satelitů. [33] . . . . .	18
Obrázek 2	Rozložení pozemních stanic EGNOS. [7] . . . . .	23
Obrázek 3	Proces zpracování dat v CPF. [9] . . . . .	24
Obrázek 4	Architektura EGNOS. [7] . . . . .	24
Obrázek 5	Struktura zprávy EGNOS. [autor] . . . . .	30
Obrázek 6	Princip platnosti zpráv. [autor] . . . . .	30
Obrázek 7	Rastr ionosférických bodů (IGP). [29] . . . . .	33
Obrázek 8	Princip bodů průniku ionosférou IPP. [autor] . . . . .	34
Obrázek 9	Princip interpolace IPP. [9] [autor] . . . . .	35
Obrázek 10	Schéma k výpočtu elevačního úhlu. [autor] . . . . .	37
Obrázek 11	Klasifikace druhů přiblížení podle ICAO. . . . .	44
Obrázek 12	Korekce VPA pro APV Baro. [autor] . . . . .	48
Obrázek 13	Porovnání OCS. . . . .	49
Obrázek 14	Zjednodušené blokové schéma přijímače směrového majáku LLZ. [6] . . . . .	52
Obrázek 15	Umístění přijímacích antén letounu Boeing 737NG. [6]	53
Obrázek 16	Přiblížení ILS (Gulfstream G450). [5] . . . . .	54
Obrázek 17	Přiblížení LPV (Gulfstream G450). [5] . . . . .	54
Obrázek 18	Srovnání přesnosti EGNOS a ILS. [26] . . . . .	55
Obrázek 19	Ochranná zóna ILS. [23] . . . . .	56
Obrázek 20	GBAS nevyžaduje ochranné zóny. [23] . . . . .	57
Obrázek 21	Pozemní stanice GBAS. [27] . . . . .	57
Obrázek 22	Schéma zpracování dat avionikou GBAS. [autor] [20]	60
Obrázek 23	Přijímač GLU-925. [4] . . . . .	61

---

## SEZNAM TABULEK

---

Tabulka 1	Geostacionární satelity EGNOS. [3] [11] . . . . .	21
Tabulka 2	Úrovně výkonosti přiblížení SBAS. [34] . . . . .	27
Tabulka 3	Výkonnostní třídy avioniky SBAS dle RTCA. . . . .	28
Tabulka 4	Typy zpráv EGNOS. [9] . . . . .	29
Tabulka 5	Věty NMEA. [33] . . . . .	42
Tabulka 6	Přijímače SBAS pro letecké využití. [2] . . . . .	43
Tabulka 7	Srovnání přesnosti GPS a EGNOS. [7] . . . . .	45
Tabulka 8	Hodnoty výkonosti EGNOS SoL. [7] . . . . .	46
Tabulka 9	Odchyly od VPA pro výšku MSL. [15] . . . . .	47
Tabulka 10	Celková vertikální chyba (TSE). [15] . . . . .	48
Tabulka 11	Požadavky na výkonost přiblížení LPV a ILS CAT I dle ICAO Annex 10/I. [13] . . . . .	51
Tabulka 12	Palubní vybavení pro přiblížení pro Boeing 737. [26] .	52
Tabulka 13	Zprávy VHF GBAS. . . . .	58

---

## ZKRATKY POUŽITÉ V TEXTU

---

<b>SBAS</b>	Satellite Based Augmentation System / Systém s družicovým rozšířením
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System / Globální družicový polohový systém
<b>WAAS</b>	Wide Area Augmentation System
<b>EGNOS</b>	European Geostationary Navigation Overlay Service
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration / Federální letecká správa
<b>GPS</b>	Global Positioning System / Globální polohovací systém
<b>ESA</b>	European Space Agency / Evropská kosmická agentura
<b>EDAS</b>	EGNOS Data Access Service / EGNOS Služba pro distribuci dat
<b>RNP</b>	Required navigation performance / Požadovaná navigační výkonnost
<b>LPV</b>	Localizer performance with vertical guidance / Výkonnost směrového majáku s vertikálním vedením
<b>PBN</b>	Performance Based Navigation / Navigace založená na výkonnosti
<b>RNAV</b>	Area navigation / Prostorová navigace
<b>GAGAN</b>	GPS aided geo augmented navigation
<b>MSAS</b>	Multi-functional Satellite Augmentation System
<b>PVT</b>	Position, velocity, time / poloha, rychlost, čas
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984 / Světový geodetický systém 1984
<b>DOP</b>	Dilution of Precision / Rozptyl přesnosti
<b>UERE</b>	User equivalent range error
<b>NANU</b>	Notice Advisory to NAVSTAR Users / Oznámení pro uživatele NAVSTAR
<b>RIMS</b>	Ranging Integrity Monitoring Stations
<b>MCC</b>	Mission Control Centres
<b>NLES</b>	Navigation Land Earth Stations
<b>EWAN</b>	Wide Area Network
<b>PACF</b>	Performance Assessment and Checkout Facility
<b>ASQF</b>	Application Specific Qualification Facility
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise
<b>CPF</b>	Central Processing Facility / Výpočetní centrum
<b>UDRE</b>	User Differential Range Error
<b>GIVE</b>	Grid Ionospheric Vertical Error
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>RTCA</b>	Radio Technical Commission for Aeronautics / Radiotechnická Komise pro letectví
<b>LNAV</b>	Lateral navigation / Boční navigace
<b>APV</b>	Approach with Vertical Guidance / Přiblížení s vertikálním vedením
<b>HAL</b>	Horizontal alert limit / Mez horizontální výstrahy
<b>VAL</b>	Vertical alert limit / Mez vertikální výstrahy
<b>ILS</b>	Instrument Landing System / Přístrojový přistávací systém
<b>HPL</b>	Horizontal protection level / Horizontální úroveň ochrany
<b>VPL</b>	Vertical protection level / Vertikální úroveň ochrany

<b>MAPt</b>	Missed approach point / Bod nezdařeného přiblížení
<b>FSD</b>	Full-scale deflection / Plná výchylka ukazatele
<b>NPA</b>	Non-precision approach / Nepřesné přístrojové přiblížení
<b>MOPS</b>	Minimum Operational Performance Standards / Standardy minimální provozní výkonnosti
<b>MSB</b>	Most significant bit / Nejvýznamnější bit
<b>SoL</b>	Safety of Life
<b>SARPs</b>	Standards and Recommended Practices
<b>ESSP</b>	European Satellite Services Provider / Evropský poskytovatel satelitních služeb
<b>IPP</b>	Ionospheric Pierce Points / Body průniku ionosféry
<b>IGP</b>	Ionospheric Grid Points / Rastr ionosférických bodů
<b>GIVD</b>	Grid Ionospheric Vertical Delay
<b>IODP</b>	Issue of Data PRN
<b>DU</b>	Do not use
<b>NM</b>	Not monitored
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>TTL</b>	Transistor-transistor logic
<b>RS-232</b>	Recommended Standard 232
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association
<b>RINEX</b>	Receiver Independent Exchange
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>GSA</b>	European GNSS Agency
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange / Americký standardní kód pro výměnu inf.
<b>GBAS</b>	Ground-based augmentation system
<b>SREW</b>	Satellite Residual Error for the Worst User Location
<b>INS</b>	Inertial navigation system / Inerciální navigační systém
<b>VPA</b>	Vertical path angle / Úhel sestupové dráhy
<b>DA/H</b>	Decision altitude/height / Nadmořská výška rozhodnutí/výška rozhodnutí
<b>MOC</b>	Minimum obstacle clearance / Minimální výška nad překážkami
<b>FAS</b>	Final approach segment / Úsek konečného přiblížení
<b>THR</b>	Threshold / Práh dráhy
<b>NSE</b>	Navigation system error / Chyba navigačního systému
<b>FTE</b>	Flight technical error
<b>TSE</b>	Total system error
<b>FDE</b>	Fault detection and exclusion
<b>LLZ</b>	Localizer
<b>GP</b>	Glide slope
<b>TTA</b>	Time to Alert
<b>DME</b>	Distance Measuring Equipment
<b>IRS</b>	Inertial reference system
<b>EADI</b>	Electronic Attitude Director Indicator
<b>EHSI</b>	Electronic Horizontal Situation Indicator

<b>FMS</b>	Flight Management System
<b>DFGC</b>	Digital Flight Guidance Computer
<b>EFIS</b>	Electronic flight instrument system
<b>DERA</b>	Defence Evaluation and Research Agency
<b>VDB</b>	VHF Data Broadcast
<b>FAS</b>	(Final approach segment / Úsek konečného přiblížení
<b>GAST</b>	GBAS Approach Service Types
<b>MMR</b>	Multi Mode Receiver / Víceúčelový přijímač
<b>VOR</b>	VHF Omnidirectional Radio Range / VKV všesměrový radiomaják
<b>INR</b>	Integrated Navigation Receiver
<b>CFIT</b>	Controlled flight into terrain / Řízený let do terénu

---

## ÚVOD

---

Jednou z nejvýznamnějších leteckých disciplín je bezpochyby letecká navigace, jejímž úkolem je určovat polohu letadla a vést jej po zamýšlené dráze. Z důvodu rozvíjející se letecké dopravy se stávají konvenční navigační prostředky pro zvyšující se provoz zastaralými a nepříjemnými a je nutno je nahrazovat navigačními prostředky novými. Vývoj nových navigačních systémů se v posledních letech soustředí hlavně na oblast družicové navigace se snahou splnit velmi specifické požadavky letových postupů. Protože základní systémy GNSS jako je GPS nejsou pro leteckou navigaci v kritických fázích letu dostatečně přesné, jsou tyto systémy k dosažení vyšší přesnosti rozšiřovány. Jedním z takových rozšíření je právě SBAS. Nekonvenční navigační systém SBAS je středem této bakalářské práce, která se snaží přispět k porozumění tomuto relativně novému systému.

### 1.1 CHARAKTERISTIKA SBAS

Satellite-based augmentation system neboli Systém s družicovým rozšířením (dále jen *SBAS*) je systém, který rozšiřuje Globální navigační satelitní systém *GNSS* tím, že poskytuje přesnější a spolehlivější navigační služby, než *GNSS* samotné. Zajišťuje vysokou úroveň integrity potřebnou pro většinu leteckých navigačních operací.

Počátky *SBAS* jsou spojené s implementací *Wide Area Augmentation System WAAS* v USA. V důsledku výhod, které *SBAS* poskytuje, byl realizován i v jiných částech světa, například Evropa je pokrytá službou *EGNOS* (*The European Geostationary Navigation Overlay Service*), viz dále.

## 1.2 IMPLEMENTACE

### 1.2.1 WAAS

Wide Area Augmentation System je první schválený SBAS pro použití v letectví, který byl vyvinut americkým FAA (Federal Aviation Administration) k rozšíření GPS. Do provozu byl uveden v červenci 2003. Pokrývá severní Ameriku, dochází k rozšiřování do střední, jižní Ameriky a do Pacifiku.

### 1.2.2 EGNOS

European Geostationary Navigation Overlay Service je evropskou obdobou amerického WAAS. Byl vyvinut Evropskou kosmickou agenturou ESA, Evropskou komisí a organizací EUROCONTROL. Pokrývá oblast Evropy a severní Afriky. Systém lze také považovat za předstupeň projektu GALILEO. Část družic systému EGNOS je v testovacím provozu a nelze u nich tedy zaručit dostupnost (viz *tabulka 1*). EGNOS poskytuje tři typy služeb pro určování polohy. Jsou jimi:

1. Volně dostupná služba Open Service
2. Služba pro komerční distribuci dat EDAS
3. Služba „kritická“ z hlediska bezpečnosti – tato služba je používána v letecké navigaci a je podmínkou pro konstrukci a použití přiblížení RNP APCH s minimy LPV.

Označení RNP APCH vychází ze specifikací PBN<sup>1</sup> podle ICAO Doc 9613 PBN Manual. Mapy pro tyto přístrojová přiblížení jsou označovány RNAV(GNSS) RWY XY a obsahují tři druhy přiblížení, kterým se budeme blíže věnovat dále. Systém EGNOS často využijeme při konkretizaci některých funkcí SBAS.[34]

### 1.2.3 Ostatní

- GPS aided geo augmented navigation (GAGAN) - regionální SBAS provozovaný Indickou vládou.

<sup>1</sup> PBN - Performance Based Navigation.



- Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS) - oblast Japonska, schválen r. 2007 pro letecký provoz.

### 1.3 GPS

Protože systém SBAS vychází z GPS, věnujme v úvodu krátký text o principu funkčnosti tohoto polohovacího zařízení.

Systém GPS je založen na 3 částech. Vesmírný segment obsahuje rozmístěné satelity na oběžné dráze, které vysílají navigační signál. Pozemní (řídící) část monitoruje vesmírný segment a poskytuje satelity s jejich parametry uživateli. Část uživatelů zahrnuje veškeré GPS přijímače, které využívají přijatého signálu a počítají svou polohu, rychlost a čas – *PVT*<sup>2</sup>.

K určení aktuální polohy přijímač počítá tzv. *pseudovzdálenosti*, což jsou vzdálenosti mezi přijímačem a viditelnými družicemi (nad obzorem). Výpočet pseudovzdálenosti vychází ze znalosti rychlosti šíření družicového signálu a rozdílu času mezi vysláním a příjmem signálu. Termín pseudovzdálenost se zavádí proto, že je nutné zavádět další doplňující výpočty, které určení výsledné polohy dále zpřesňují. Pro určení dvojrozměrné polohy (nejčasněji zeměpisná délka a šířka) postačí příjem signálu z min. tří družic (výpočet tří pseudovzdáleností), pro určení trojrozměrné polohy (navíc výška) minimálně ze čtyř družic. Příjem menšího počtu družic znemožňuje výpočet polohy, vyšší počet družic naopak určení polohy dále zpřesňuje.[1] Přijímač je tedy schopen vypočítat polohu vyjádřenou v zeměpisné šířce, délce a výšce podle Světového geodetického standardu 1984 (*WGS84*).

Satelity musí být geometricky vhodně rozložené, jak je znázorněno na *obrázku 1*, aby se minimalizovaly polohové chyby. Za velmi výhodnou konfiguraci považujeme 5 – 6 viditelných družic s elevací vyšší než 15°. Dostatek družic ale nízko nad obzorem nevede k přesným výsledkům.[25]

Abychom mohli stanovit, jaký vliv bude mít konfigurace družic na konečný stav, zavádí se ukazatel *DOP* (Dilution of Precision, rozptyl přesnosti). Rozlišujeme několik typů *DOP*:

- HDOP = Horizontal Dilution of Precision (zeměpisná šířka, délka)
- VDOP = Vertical Dilution of Precision (výška)
- PDOP = Position Dilution of Precision (3-D)

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (1)$$

<sup>2</sup> PVT – position, velocity, time.

- TDOP = Time Dilution of Precision
- GDOP = Geometric Dilution Of Precision

$$GDOP = \sqrt{TDOP^2 + HDOP^2 + VDOP^2} \quad (2)$$

Hodnota DOP je nepřímo úměrná přesnosti určení polohy. Předpokládáme-li, že chyba měření  $\sigma_{UERE}$ <sup>3</sup> je společná pro všechny satelity, pro polohovou chybu  $\psi$  dostáváme

$$\psi = \sigma_{UERE} \cdot XDOP(X = G, P, H, V) \quad (3)$$



Obrázek 1: Dopad geometrického rozložení satelitů. [33]

Řídící část monitoruje periody, kdy jeden nebo více satelitů nejsou dostupné. Každá z těchto period vede ke zprávě *NANU* (Notice Advisory to NAVSTAR Users), kterou vydává Pobřežní stráž USA<sup>4</sup>. V posledních 10 letech se vyskytovaly tyto periody přibližně jednou až dvakrát za rok pro 1 satelit. Byla zaznamenána řada neočekávaných poruch systému GPS včetně následujících[9]:

- Problém se satelitními hodinami, kdy v roce 2001 a v roce 2004 selhání atomových hodin na satelitu *PRN23* vedlo k polohové chybě 285 m.
- Chyby v modulaci signálu v roce 1994, kdy zkreslení vedlo k nárůstu vertikální chyby o 2 až 8 m.

<sup>3</sup> User Equivalent Range Error – indikátor přesnosti měření pseudovzdálenosti mezi uživatelem a satelity.

<sup>4</sup> Zprávy lze nalézt na <http://www.navcen.uscg.gov/GPS/nanu.htm>

- Nesprávné modelování (predikce) satelitních orbit - od 12. do 22. března 1993, chyba vzdálenosti větší než 40 m.
- Nehlášené manévry na orbitě v roce 1995, kde důsledkem ionosférické bouře satelit chybně přepnul do režimu detekce jaderného výbuchu a odchýlil se od nominální oběžné dráhy.

SBAS tyto poruchy v reálném čase detekuje a opraví (s diferenciální korekcí) nebo upozorní výstrahou „*Do Not Use*“.

---

## INFRASTRUKTURA SYSTÉMU SBAS

---

Infrastruktura systému SBAS zahrnuje velkoplošnou síť pozemních stanic poskytujících uživatelům korekční data, dále geostacionární družice<sup>5</sup> přenášející SBAS zprávy přímo k uživateli a systém GNSS (přesněji GPS). Pozemní infrastruktura shromažďuje data potřebná k výpočtu a vyhodnocuje pseudovzdálenost v reálném čase, a tím poskytuje efemeridické, časové a ionosférické korekce. Takto upravené údaje pak zvyšují přesnost polohy a integritu.

K pochopení funkce systému SBAS je třeba se věnovat jeho infrastruktuře podrobněji, k tomu slouží následující podkapitoly. Architekturu SBAS popíšeme na konkrétním příkladu, a sice na systému EGNOS. Jednotlivé aplikace SBAS (EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS) se od sebe liší minimálně a dále popsáný princip je pro všechny stejný.

### 2.1 KOREKČNÍ DATA

V úvodu je třeba čtenáře stručně seznámit s konkrétními korekcemi, které zajišťuje právě SBAS. Principy jsou podrobněji popsány v kapitole Funkce avioniky.

Vlivem pohybu družic kolem Země dochází k odchylkám mezi časem na konkrétní družici a systémovým časem. Klasická Newtonovská mechanika zde přestává být dostačující a je třeba počítat s dilatací času podle Speciální teorie relativity. Časovou odchylku SBAS opravuje *vykompenzováním chyby hodin* na satelitu.

Při predikci trajektorií satelitů rovněž dochází k odchylkám, ty jsou řešeny korekcí polohy souřadnic ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) neboli *efemeridickou korekcí*. Tyto data jsou vysílána satelitem v navigační zprávě. SBAS speciálně využívá

---

<sup>5</sup> Družice na geostacionární dráze. Z hlediska pozorovatele ze Země jsou tyto družice stále nad stejným místem a vždy sledují stejné území na Zemi.

Tabulka 1: Geostacionární satelity EGNOS. [3] [11]

Jméno družice	PRN <sup>6</sup>	Status
Inmarsat 3-F2	120	aktivní
ARTEMIS	124	neaktivní
Inmarsat 4-F2	126	neaktivní
Inmarsat 3-F1	131	neaktivní
SES-5 (a.k.a. Sirius 5 or Astra 4B)	136	aktivní
Astra 5B	123	v testování

metodu oddělení chyby hodin od efemeriditické chyby navrženou z důvodu operativnosti systému na relativně velkém území.

Je obecně známo, že se signál při průchodu atmosférou láme a ohýbá na rozhraní vrstev. Proto jsou data posílána pro určitou mřížku definovanou zeměpisnou šířkou a délkou. Takové opravy nazýváme *ionosférické korekce*. [9]

## 2.2 ARCHITEKTURA EGNOS

V případě systému EGNOS pozemní část zahrnuje síť stanic *RIMS* (Ranging Integrity Monitoring Stations), čtyři *MCC* (Mission Control Centres), šest stanic *NLES* (Navigation Land Earth Stations) a síť *EWAN* (Wide Area Network), která zajišťuje komunikaci celé pozemní části. Dále je ještě třeba zmínit dvě zařízení sloužící k podpoře systémových operací a poskytování služeb, jsou jimi *PACF* (Performance Assessment and Checkout Facility) a *ASQF* (Application Specific Qualification Facility).

Geostacionární satelity vysílající opravy a informace o integritě pro GPS satelity na frekvenčním pásmu  $L1$  (1575,42 MHz) pak tvoří vesmírnou část systému. Aktuální seznam družic EGNOS je uveden v *tabulce 1*.

Taková konfigurace poskytuje vysokou redundanci v případě poruchy některého satelitu. Systém je navržen tak, aby v jakémkoli čase alespoň dva ze tří satelitů vysílaly provozní signál, přičemž nezbytný je pouze jeden. Tak je docíleno možnosti přepínání signálu například v případě přerušení jednoho z nich.

Přesné orbitální pozice satelitů a jejich *PRN* kódy se v budoucnu mohou lišit, to však nebude mít vliv na koncového uživatele. Všechny uživatelské přijímače SBAS jsou navrženy tak, aby automaticky detekovaly a

<sup>6</sup> Pseudo Random Noise (viz kapitola 3.3.1).

použily libovolný kód v předem přiděleném setu vyhrazeného pro SBAS. Není tedy vyžadován žádný zásah člověka nebo změna přijímače.

Jak jsou tyto části systému SBAS propojené je vhodné popsat ve třech krocích, na kterých je demonstrována i základní funkce systému.

### 2.2.1 Krok 1 – Sběr naměřených dat

K zajištění optimálního nepřetržitého shromažďování dat z různě viditelných GPS satelitů se používá síť referenčních stanic RIMS. Ty shromažďují data a posílají je do výpočetních center - tzv. Central Processing Facilities (CPF) - k využití. RIMS lze dělit na 3 typy:

- *A RIMS* dodávají data z viditelných GPS/EGNOS satelitů. Tyto údaje jsou použity pro výpočet korekcí a odhad prahové hodnoty spolehlivosti v CPF.
- *B RIMS* také dodávají data z viditelných GPS/EGNOS satelitů. Data jsou v CPF použity pro ověření vysílacích zpráv a zaručení integrity EGNOS.
- *C RIMS* se používají pro detekci specifických poruch známých jako „*Evil Waveforms*“ (anomálie na GPS satelitu).

EGNOS se skládá ze 40 stanic RIMS hlavně uvnitř a kolem operační oblasti. Několik jich je v Kanadě, Francouzské Guianě a jižní Africe k zlepšení výkonnosti. Rozložení stanic je znázorněno na *obrázku 2*.

### 2.2.2 Krok 2 – Výpočet

V tomto kroku dochází ke konsolidaci dat, výpočtu diferenciálních oprav a odhadu residuálních chyb pomocí stanic CPF a MCC. Data shromažďovaná RIMS jsou zpracovávána v CPF, které odhadují diferenční korekci a integritu informací a vytvářejí EGNOS zprávy. Proces je znázorněn na *obrázku 3*.

Stanice CPF zpracovávají korekce hodin pro každý GPS satelit viditelný sítí RIMS, tyto opravy jsou platné v celé vysílací oblasti, tj. všude, kde je přijímán SBAS signál. Taktéž efemeridické korekce jsou v zásadě platné v celé oblasti vysílání signálu, nicméně přesnost těchto oprav klesne, pokud se budeme nacházet v krajních oblastech daleko od centra sítě vzhledem ke geografickému rozmístění stanic RIMS. Funkce opravy ionosférických chyb

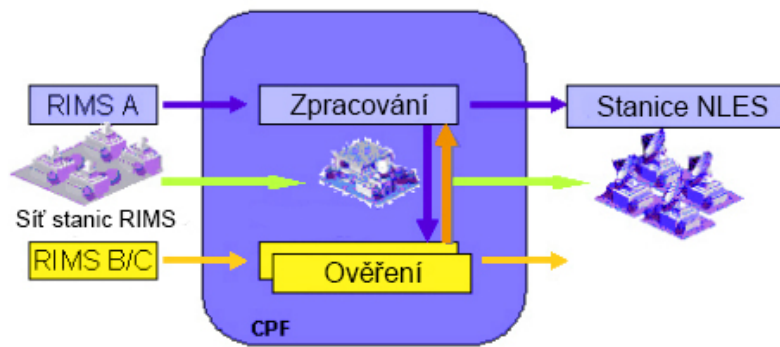


Obrázek 2: Rozložení pozemních stanic EGNOS. [7]

vyžaduje hustou síť monitorovacích stanic, z toho důvodu není tato oprava dostupná po celé geostacionární vysílací oblasti a je dostupná pouze pro region, pro který byl daný SBAS navržen, v případě systému EGNOS jde o region s centrem nad Evropou.

Kromě těchto parametrů stanice CPF ještě odhaduje tzv. zbytkové chyby, které lze očekávat, jakmile se použije sada oprav vysílaných SBAS signálem. Ty jsou charakterizovány dvěma parametry. *UDRE* (User Differential Range Error) je odhad zbytkové chyby vzdálenosti po aplikaci efemeridické opravy a opravy hodin pro daný GPS satelit. *GIVE* (Grid Ionospheric Vertical Error) odhaduje zbytkovou vertikální chybu po použití ionosférických oprav pro určitý geografický bod. Tyto informace mají zvláštní význam pro uživatele signálu *Safety of Life*, mohou být však přínosem i pro jiné skupiny, které z jakýchkoli důvodů potřebují znát nejistotu polohy určenou přijímačem.

CPF také disponují velkým množstvím kontrolních funkcí určených k detekci anomálií jak v GPS tak SBAS systému a jsou schopné varovat uživatele v krátkém časovém intervalu (méně než 6 sekund) v případě výskytu chyby přesahující určitý práh.

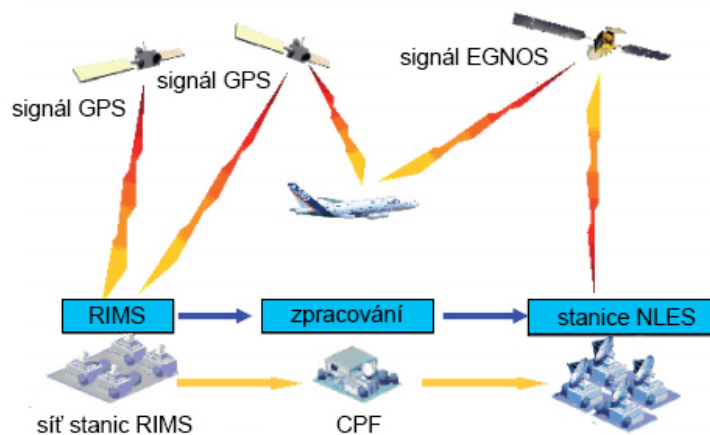


Obrázek 3: Proces zpracování dat v CPF. [9]

Pro redundanci a účely údržby je v provozu 5 CPF rozmístěných na čtyřech místech zvaných Mission Control Centres *MCC*. Dva z CPF jsou v Langenu (Německo), jeden v Torrejón (Španělsko), další ve Swanwicku (UK) a pátý v Ciampinu (Itálie).

### 2.2.3 Krok 3 – Přenos

Pomocí geostacionárních družic se data přenášejí k cílovému uživateli. Navigation Land Earth Stations (NLES) přijímají EGNOS zprávy od CPF a přenášejí je ke geostacionárním satelitům, které data vysílají k uživateli. Procesu se také říká *Satelitní uplink*. Zprávy EGNOS přijaté geostacionárními satelity jsou přenášeny přímo k uživateli. Sekvence zpráv se liší mezi třemi satelity.



Obrázek 4: Architektura EGNOS. [7]



Dvě NLES (1 aktivní a 1 zajišťující redundanci) jsou rozmístěny pro každou geostacionární družici. To je v případě EGNOS 6 stanic NLES. Na *obrázku 4* je znázorněna celá architektura systému. [9]

---

## AVIONIKA SYSTÉMU SBAS

---

Zařízení, které bude podporovat, přijímat a správně vyhodnocovat signál SBAS můžeme do letadla implementovat různými způsoby. Pomocí *čipu* či jiných komponentů instalovaných na desku již používaného GNSS přijímače, dojde k rozšíření jeho funkcí o podporu SBAS. Pro vestavěný přijímač je vhodné použít tzv. *piggyback* nebo *OEM* (Original Equipment Manufacturer), který obsahuje v podstatě celý přijímač integrovaný na kartě. Ta se pak implementuje do celkového systému avioniky letadla. Nejpoužívanější je však *stand-alone* přenosný přijímač, který je hojně využíván v obecném letectví.

Je vyvíjena snaha prostřednictvím ICAO zajistit funkčnost avioniky SBAS v oblasti pokrytí jakéhokoli SBAS (WAAS, EGNOS. . .) a zároveň postupně zajišťovat souvislé nepřerušované celosvětové pokrytí. Jestliže nějaký stát neschválí použití některého nebo všech signálů SBAS pro traťový nebo koncový provoz a SBAS přiblížení, měli by piloti vyloučit GNSS úplně, vzhledem k tomu, že standardy přijímače nedovolí vyloučení jednotlivého SBAS pro tyto činnosti. [31]

Klíčem k bezpečnému a přesnému přiblížení vysoké integrity se systémem SBAS je korekce zpoždění signálů způsobené ionosférou (viz dále).

### 3.1 OBECNÉ STANDARDY AVIONIKY SBAS

Požadavky na certifikaci avioniky SBAS vycházejí z *RTCA DO 229D* a předpisu *L10*.

Pro odlety GNSS RNAV mohou být podle stávajících postupů použity všechny třídy avioniky SBAS, protože SBAS splňuje nebo překračuje požadavky na přesnost, integritu a dostupnost základního GNSS. Postupy pro odlet jsou voleny z palubní letové databáze, do které není pilot oprávněn zasahovat. Pokud nejsou splněny požadavky integrity k bezpečnému odletu v souladu s SBAS, přijímač oznámí, že postup není k dispozici. Poža-

navky výkonnosti pro SBAS ve fázi přiletu jsou pro základní GNSS stejné. [32]

Standardy avioniky SBAS poskytují tři úrovně výkonnosti pro přiblížení: *LPV*, *LNAV/VNAV* a *LNAV*. Přiblížení *LPV* jsou schopny zajistit pouze přijímače III. a IV. třídy dle RTCA DO 229D.

Tabulka 2: Úrovně výkonosti přiblížení SBAS. [34]

Označení minim OCA/OCH <sup>7</sup>	Popis
LNAV	Nepřesné přístrojové přiblížení.
LNAV/VNAV	Přiblížení s výškovým vedením APV Baro (také označováno jako Baro-VNAV).
LPV	Přiblížení s výškovým vedením APV SBAS (EGNOS, WAAS).

Každé z těchto typů přiblížení má definovanou nezbytnou úroveň integrity pomocí mezí horizontální a vertikální výstrahy *HAL* a *VAL*, které jsou analogické k monitorovacím mezím pro ILS. Meze tvoří oblast maximální chyby, kterou nelze překročit pro splnění požadavků integrity pro daný typ přiblížení. Odhadem horizontální a vertikální úrovně ochrany v dané poloze (*HPL* a *VPL*) a jejich nepřetržitým porovnáváním s *HAL* a *VAL* avionika zajišťuje integritu. Pokud jedna z úrovní ochrany překračuje přesně stanovené meze varování *HAL* a *VAL*, pilot je upozorněn a vyzván k přerušení aktuální činnosti, tedy přerušení daného přiblížení. [31]

SBAS rovněž zajišťuje vedení v úseku nezdařeného přiblížení. Standardy avioniky SBAS výrazně zlepšily propojení pilot/avionika pro aktivaci vedení nezdařeného přiblížení, v porovnání se standardy avioniky základního GNSS, protože k aktivaci dochází obvykle během vysokého zatížení pilota. Ten by měl s touto standardizací být schopen snadněji provést posloupnost úkonů do úseku nezdařeného přiblížení. Pro nezdařené přiblížení disponuje avionika SBAS nejméně třemi funkcemi s ohledem na to, kdy je vykonána posloupnost úkonů při nezdařeném přiblížení. Funkce jsou: [31]

1. přechod vedení na vedení při nezdařeném přiblížení pro vybraný postup přiblížení poté, co je *MAPt* překročen;

<sup>7</sup> OCA/OCH - Obstacle Clearance Altitude/Height (Bezpečná nadmořská výška / výška nad překážkami)

2. přechod příčného *FSD* buď na 0,3 NM nebo 1,0 NM v závislosti na typu počátečního úseku a usazení v úseku v postupu nezdařeného přiblížení;
3. přechod módu integrity (HAL) buď na *NPA* nebo na koncový, v závislosti na typu počátečního úseku a usazení v úseku v postupu nezdařeného přiblížení.

### 3.1.1 Klasifikace MOPS RTCA avioniky SBAS

Standardy SBAS byly vytvořeny tak, aby splňovaly výkonnostní požadavky civilního letectví pro fáze přiblížení a přistání. Podobně byly vytvořeny standardy pro letecké přijímače. Tyto normy se nazývají SBAS MOPS<sup>8</sup>, jsou zveřejňovány Radiotechnickou Komisí pro letectví (RTCA) a jsou striktně navrženy pro odvětví letecké dopravy, kde je mimo horizontální navigace kladen důraz i na vertikální vedení a integritu informací.

Přijímače jsou dle RTCA DO 229D rozděleny do čtyř samostatných výkonnostních tříd dle fáze letu a typu přiblížení, pro které jsou určeny. Jednotlivé třídy jsou uvedeny v *tabulce 3*.

Tabulka 3: Výkonnostní třídy avioniky SBAS dle RTCA.

Třída	Letová fáze
I	traťové vedení + koncové přiblížení + činnost přiblížení LNAV
II	třída I + činnosti přiblížení LNAV/VNAV
III	třída II + činnosti přiblížení LPV
IV	pouze pro koncové přiblížení

## 3.2 ZPRÁVY SBAS

Popis zpráv je výhodné zkonkretizovat a využít některý z aktivních SBAS implementací. K popisu využijeme systém EGNOS.

Systém EGNOS přenáší zprávy na pásmu *L1* (tj. 1575.42 MHz) rychlostí 250 bitů za sekundu. Dále využívá totožnou modulaci jako GPS s rozdílem přenosové rychlosti 5x vyšší. Velikost každé zprávy je 250 bitů. Z toho vyplývá, že každou zprávu je možno přenést za 1 sekundu. Sys-

8 Minimum Operational Performance Standards

témem je možno přenést několik typů zpráv. Standardizované typy zpráv jsou uvedeny v *tabulce 4*.

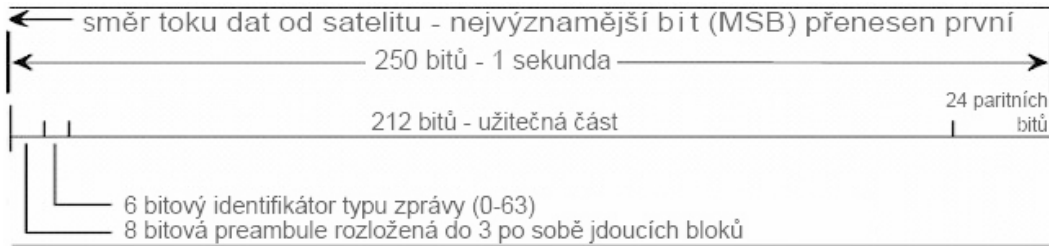
Tabulka 4: Typy zpráv EGNOS. [9]

Typ	Obsah
0	SBAS testovací mód (nepoužívat pro bezpečnostní aplikace)
1	Maska PRN
2-5	Rychlé opravy
6	Informace o integritě
7	Degradační faktor rychlých oprav
9	Navigační zprávy GEO
10	Degradační parametry
12	Síťový čas SBAS / kompenzace UTC parametrů
17	GEO satelitní kalendář (tzv. Almanach)
18	Masky ionosférické mřížky (Grid Point Masks)
24	Smíšené rychlé korekce, dlouhodobé opravy satelitních chyb
25	Dlouhodobé opravy satelitních chyb
26	Ionosférické opravy zpoždění signálu
27	SBAS zpráva
62	Interní textová zpráva
63	Nulová zpráva
ostatní	rezervováno

### 3.2.1 Struktura

Všechny EGNOS zprávy podléhají následující pevné struktuře. Prvních 8 bitů zprávy tvoří tzv. *preambuli*. Preambule je unikátní 24 bitové slovo, které je rozloženo do průběhu tří po sobě jdoucích zpráv a spouští počáteční část dat, které mají být synchronizovány. Dalších 6 bitů určuje typ zprávy (0 až 63). Následujících 212 bitů patří užitečným částem zprávy, které se liší podle typu zprávy. Posledních 24 bitů se označuje jako *paritní bity*, které potvrzují, že data nebyla při přenosu poškozena.

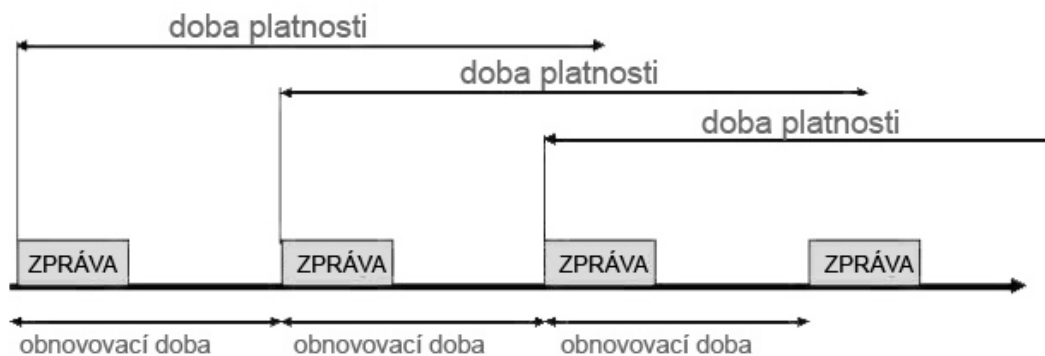
EGNOS je sestaven tak, aby poskytoval co možná nejvíce aktualizované parametry integrity a diferenciální korekce. Nicméně počítá i s případy, kdy uživatel není schopen přijmout všechny zprávy například z důvodu poškozeného bitu. V takovém případě pro zaručení spolehlivosti systému musí někteří příjemci využít tzv. *degradační model* (například letadlo ve fázi přesného přiblížení). Pro každý typ přenesené zprávy je definovaná



Obrázek 5: Struktura zprávy EGNOS. [autor]

její maximální obnovovací doba (refresh period). Rovněž je dána její doba platnosti, kterou určuje avionika - přijímač.

Pilot by měl použít degradační modely k zajištění určitých korekcí mezi dvěma obnovovacími stavy při platnosti dané zprávy (viz obrázek 6). Degradací faktory jsou poskytovány zprávou typu 10 pro dlouho trvající ionosférické korekce a zprávou typu 7 pro rychlé korekce.



Obrázek 6: Princip platnosti zpráv. [autor]

### 3.2.2 $M_{To}$ a $M_{To/2}$

Zprávy typu nula  $M_{To}$  jsou přenášeny, pokud systém není certifikován pro použití signálu *Safety of Life (SoL)*. Obsah  $M_{To}$  je v podstatě identický s  $M_{To/2}$  a může být použit stejným způsobem.  $M_{To}$  může být také vysílána, když nastane zásadní problém a celý systém se stane nedostupný. Většina přijímačů je schopna přijímat typ  $M_{To/2}$ , pokud je tento typ procesu aktivován (základně nebo uživatelem).

Zpráva typu 0 se používá při zkouškách SBAS. Existence této zprávy znamená, že integrita systému není ještě plně zajištěna, jak tomu bylo v

době brzkého vývoje systému EGNOS. Během testování SBAS může být obsah zprávy typu 2 zahrnut ve zprávě typu 0. V takovém případě není nutné vysílat zprávu o rychlých korekcích *MT2* a zpráva *MTo* nese obsah *MT2* a je označována *MTo/2*.

V případě použití systému EGNOS (nebo SBAS obecně) pro operace SoL v letectví je interpretace zpráv vysílaných systémem SBAS normalizována dle *RTCA MOPS DO 229* a k záměně nemůže dojít. V případě otevřené služby (*Open Service*) žádná taková standardizace neexistuje a běžné OS přijímače mohou používat pouze podmnožinu zpráv vysílaných systémem EGNOS nebo zcela nesplňují standardy ICAO SARP pro SBAS.

Signál SoL systému EGNOS byl 2. března 2011 oficiálně prohlášen evropským poskytovatelem satelitních služeb *ESSP* (European Satellite Services Provider) za certifikovaný pro použití v civilním letectví. V tu chvíli byla zpráva *MTo*, která před certifikací nesla stejný obsah jako *MT2*, odstraněna.

### 3.3 FUNKCE AVIONIKY

#### 3.3.1 Využití masky PRN

Každý GPS satelit popřípadě EGNOS nebo obecně SBAS satelit disponuje unikátním *PRN* kódem (Pseudo-random Noise), pomocí kterého se identifikuje. Zprávy typu 1 (*MT1*) obsahují tzv. *PRN Mask data*. Maska obsahuje 51 bitů. *N*-tý bit v *MT1* ukazuje, že *n*-tý satelit je monitorován.

Jednotlivé kódy si lze představit jako pevně danou (značně komplikovanou – odtud název pseudo-náhodný kód) posloupnost jedniček a nul, které jsou generovány na družici a vysílány k Zemi. Díky tomu je možno z přijatého kódu určit, která družice jej vysílala, její polohu (i méně přesnou polohu ostatních družic z tzv. almanachu), stáří zprávy (tj. čas, kdy byla vyslána) a další údaje. [33]

#### 3.3.2 Využití diferenciálních korekcí

V případě ionosférických korekcí si musí pilot vybrat, zda použít klasické GPS - Klobucharovy ionosférické parametry nebo aplikovat parametry z ionosférické sítě EGNOS (které jsou přesnější). Koeficienty pro Klobucharův model jsou zpracovávány systémem GPS a posílány klasickými GPS zprávami k přijímači, kde jsou tyto koeficienty použity pro odhad

zpoždění signálu v ionosféře. V okamžiku kdy pilot na svém přijímači přepne na signál EGNOS a nachází se v oblasti jeho signálu, je využito ionosférických oprav na bázi systému SBAS přenášených zprávou typu 26. Takové zprávy nesou koeficienty získané z měření zpoždění v reálném čase, více v následující kapitole.

Pro ostatní parametry (korekce drah, korekce hodin) musí být nejdříve aplikovány GPS korekce a až následně korekce SBAS.

### 3.3.3 Ionosférické korekce

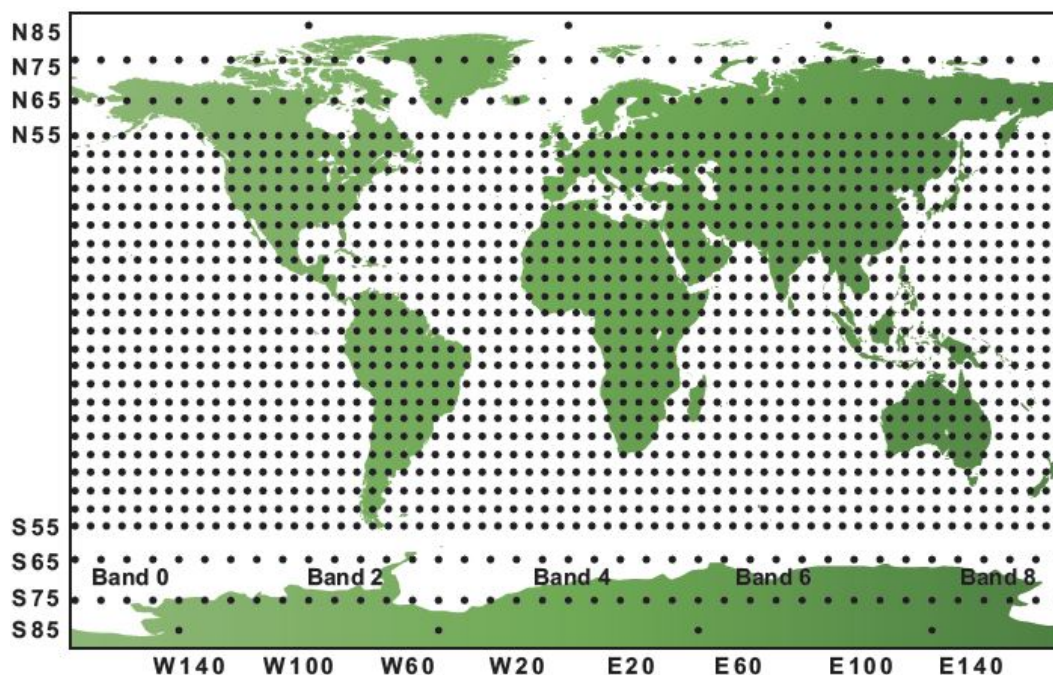
Pro odhad ionosférické chyby musí každý přijímač identifikovat tzv. polohu bodu průniku ionosféry IPP (Ionospheric Pierce Points). Poloha bodu průniku ionosféry IPP je definována jako průsečík rovné úsečky mezi přijímačem a družicí a elipsoidem s konstantní výškou 350 km nad elipsoidem WGS84<sup>9</sup>. Tato poloha je definována zeměpisnou šířkou  $\phi_{PP}$  a zeměpisnou délkou  $\lambda_{PP}$  v souřadnicích WGS84.

Korekce jsou vysílány pro každý z bodů na virtuální mřížce nacházející se v nadmořské výšce 350 km. Této mřížce říkáme *Rastr ionosférických bodů* nebo také Ionospheric Grid Points (IGP). Výsledná korekce pro daný IPP je pak výsledkem interpolace jednotlivých IGP. Přijímač zná postavení těchto konkrétních bodů (IGP) s odhadovaným zpožděním pro každý z nich, a je tedy schopen odhadnout ionosférické zpoždění pro každý IPP a tedy i pro každou pseudovzdálenost. Je nutné, aby přijímač provedl interpolaci mezi hodnotami předpokladu pro IGP v blízkosti každého IPP. Přijímač také musí zohledňovat *inklinační faktor* (úhel pohybu signálu ionosférou).

Mřížka IGP se skládá z 11 pásů číslovaných od 0 do 10 (Mercatorova projekce). Pásky 0-8 jsou svislé, a skupiny 9 a 10 jsou definovány vodorovně kolem pólů. V pásech 0-8 se nachází 1808 bodů IGP, umístění bodů je hustější v nižších zeměpisných šířkách, protože vzdálenost mezi poledníky je delší. Zároveň je z důvodu sluneční aktivity kolísání ve zpoždění signálu větší. Pro pásy 9 a 10 připadá 384 IGP. Mřížka má 5° rozteč u rovníku, 10° kolem N55° a S55° a nakonec 90° na N85° a S85° kolem pólů. *Obrázek 7* ukazuje pásy 0-8. c

<sup>9</sup> World Geodetic System 1984 (WGS84), Světový geodetický systém 1984. Standard vydaný ministerstvem obrany USA roku 1984, definuje souřadnicový systém a referenční elipsoid pro geodézii a navigaci.





Obrázek 7: Rastr ionosférických bodů (IGP). [29]

Přenos ionosférických korekcí k přijímači umožní výpočet odhadu ionosférických chyb pro daný IPP. Tyto korekce jsou vysílány pro každý bod mřížky IGP.

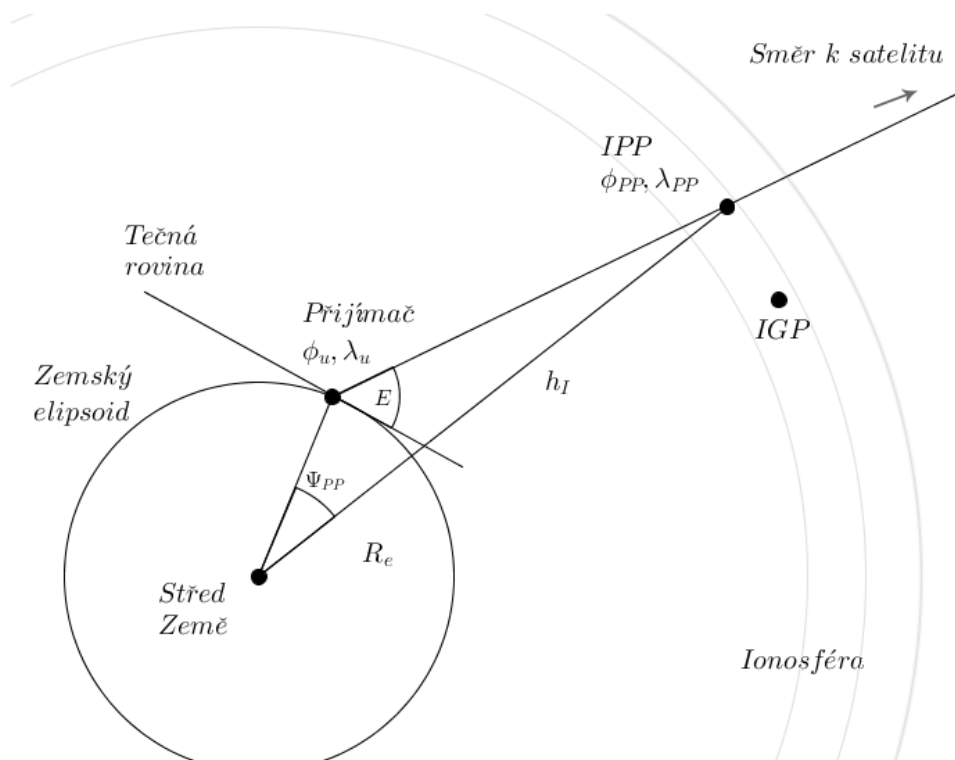
Z Obrázku 8 geometrickou úvahou dostáváme postupně zeměpisnou šířku  $\phi_{PP}$  a délku  $\lambda_{PP}$  pro daný IPP. Následující relace z této úvahy vycházejí.

$$\phi_{PP} = \sin^{-1}(\sin \phi_u \cos \Psi_{PP} + \cos \phi_u \sin \Psi_{PP} \cos A) \quad (4)$$

kde

$$\Psi_{PP} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1} \left( \frac{R_e}{R_e + h_I} \cos E \right) \quad (5)$$

Výsledky jsou vyjádřeny v radiánech.  $\Psi_{PP}$  odpovídá úhlu s vrcholem ve středu Zemského elipsoidu, který svírá poloha přijímače a přímka procházející IPP. Úhel  $A$  odpovídá azimutu satelitu vztaheného k poloze přijímače  $(\phi_u, \lambda_u)$ .  $E$  odpovídá elevačnímu úhlu satelitu, tedy úhlu který svírá tečná rovina a přímka procházející přijímačem a satelitem.  $R_e$  je přibližný poloměr Země (6 378 km) a  $h_I$  je výška s maximální koncentrací volných elektronů (350 km).



Obrázek 8: Princip bodů průniku ionosférou IPP. [autor]

Po vyjádření zeměpisné šířky  $\phi_{PP}$  IPP jsme schopni dopočítat jeho zeměpisnou délku  $\lambda_{PP}$ , která je dána vztahy

$$\lambda_{PP} = \lambda_u + \pi - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \psi_{PP} \sin A}{\cos \phi_{PP}} \right) \quad (6)$$

pro

$$\phi_u > 70^\circ \wedge \tan \psi_{PP} \cos A > \tan \left( \frac{\pi}{2} - \phi_u \right) \quad (7)$$

a

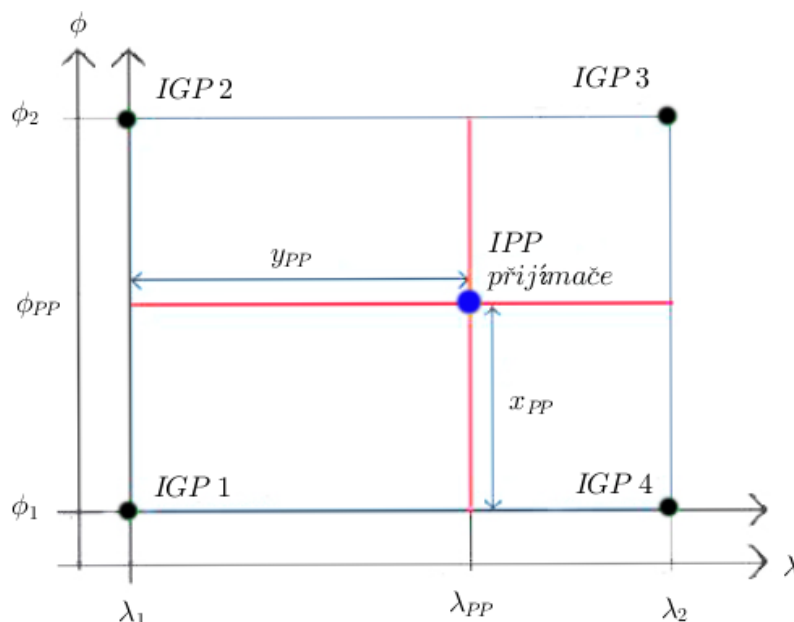
$$\lambda_{PP} = \lambda_u + \pi + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \psi_{PP} \sin A}{\cos \phi_{PP}} \right) \quad (8)$$

pro

$$\phi_u < -70^\circ \wedge \tan \psi_{PP} \cos(A + \pi) > \tan \left( \frac{\pi}{2} - \phi_u \right). \quad (9)$$

Po zjištění polohy IPP se volí, které body IGP použít k interpolaci ionosférické korekce. Tato operace se musí provádět s přihlédnutím k možnosti, že nějaký IGP nebude monitorován. V takové situaci se interpolace

provede v rámci trojúhelníku, který obsahuje IPP. Pokud by nebyly monitorovány dva body IGP, interpolační oblast se rozšíří, tím samozřejmě ztrácí korekce přesnost.



Obrázek 9: Princip interpolace IPP. [9] [autor]

K dostání ionosférické korekce  $IC$  (a její přidání do měření pseudo-vzdálenosti) se musí vertikální chyba daného IPP vynásobit tzv. inklináčním faktorem  $F_{PP}$ .

$$IC = F_{PP} \tau_{vpp}(\phi_{PP}, \lambda_{PP}) \quad (10)$$

kde  $F_{PP}$  definujeme jako

$$F_{PP} = \left[ 1 - \left( \frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Data pro výpočet těchto korekcí přijímačem obsahuje zpráva typu 26. Jsou jimi dva základní parametry Grid Ionospheric Vertical Delay ( $GIVD$ ) a parametr pro odhad přesnosti oprav ( $\sigma_{GIVE}^2$ ) tzv. GIVE indicator ( $GIVEi$ ). Tato informace může být poskytnuta nejvýše pro 15 IGP na zprávu. Vzhledem k tomu, že ionosférické pásy mohou obsahovat až 201 IGP, jsou přítomné IGP v masce seskupeny do bloků po 15. Blok o obsahuje data pro prvních 15 IGP aktivovaných v masce a tak dále.

Na základě GIVD a  $\sigma_{GIVE}^2$  údajů poskytnutých pro každou družici GPS v dohledu a uplatněním inkлинаčního faktoru vypočítaného z nadmořské výšky odpovídajícího satelitu přijímač vypočítá opravu sklonu a standardní odchylku hodnoty residuální (zbytkové) ionosférické chyby  $\sigma_{UIRE}^2$  [9]

$$\sigma_{UIRE}^2 = F_{PP}^2 \cdot \sigma_{UIVE}^2. \quad (12)$$

#### 3.3.4 Dlouhodobé korekce

Dlouhodobé korekce vysílá EGNOS k nápravě dlouhodobých efemeridických chyb (parametry orbit  $\delta x, \delta y, \delta z$ ) a chyb hodin GPS satelitů  $\delta a_{f0}$ . Tyto opravy jsou uvedeny v typu zpráv 25.

#### 3.3.5 Rychlé korekce

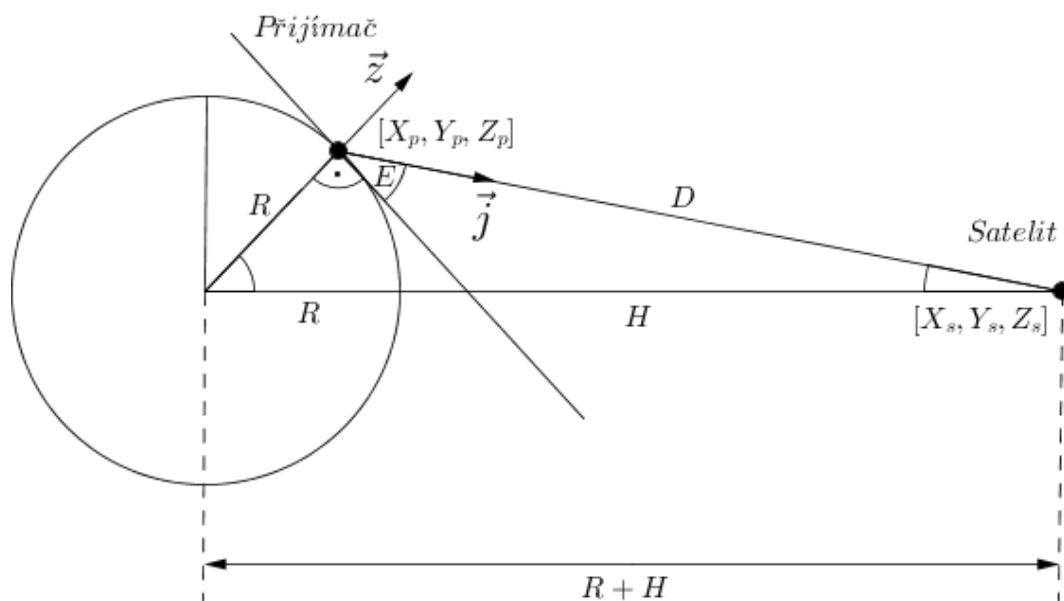
Rychlé opravy vysílá EGNOS k opravě rychlé změny efemeridických chyb a hodin GPS satelitů. Tyto opravy jsou uvedeny v typu zpráv 2 až 5. Zpráva typu 2 obsahuje údaje pro prvních 13 družic, které mají stejnou hodnotu IODP<sup>10</sup>. Zpráva typu 3 obsahuje údaje o satelitech 14-26 se stejnou hodnotu IODP atd. Je-li počet satelitů v masce (nebo ve zbývajících částí masky) menší než 6, zpráva typu 2 až 5 může být nahrazen zprávou 24.

#### 3.3.6 Výpočet elevace geostacionárního satelitu

Je třeba poznamenat, že geostacionární družice jsou umístěny na rovníkové rovině. Čím dál od rovníku se bude pilot nacházet, tím více se družice bude blížit k horizontu. Je-li satelit příliš blízko horizontu, nelze jej již použít. Co se týče systému EGNOS, nad 75° zeměpisné šířky se stává služba stěží použitelná.

V určitých případech je nutné vypočítat elevaci SBAS geostacionárních satelitů vztaženou na aktuální pozici letadla k určení, zda budou tyto satelity viditelné v prostorách určených pro použití. SBAS avionika využívá ke kalkulaci svou aktuální polohu.

<sup>10</sup> IODP (Issue of Data PRN) - identifikuje aktuální masku PRN.



Obrázek 10: Schéma k výpočtu elevačního úhlu. [autor]

Souřadnice  $X_p, Y_p, Z_p$  přijímače jsou počítány v Greenwichském referenčním čase rovnostmi<sup>11</sup>

$$X_p = R \cdot \cos(ZS_p) \cdot \cos(ZD_p) \quad (13)$$

$$Y_p = R \cdot \cos(ZS_p) \cdot \sin(ZD_p) \quad (14)$$

$$Z_p = R \cdot \sin(ZS_p) \quad (15)$$

kde  $R = 6\,378\text{ km}$  je poloměr Země,  $ZS_p$  zeměpisná šířka přijímače a  $ZD_p$  zeměpisná délka přijímače. Souřadnice satelitu  $X_s, Y_s, Z_s$  odpovídají zápisu

$$X_s = (R + H) \cdot \cos(ZD_s) \quad (16)$$

$$Y_s = (R + H) \cdot \sin(ZD_s) \quad (17)$$

$$Z_s = 0 \quad (18)$$

<sup>11</sup> Všechny hodnoty jsou vyjádřené v radiánech.

kde  $H = 35\,785\text{ km}$  je nejvzdálenější část orbity satelitu od Země. Vzdálenost  $D$  přijímače od satelitu vypočteme ze vztahu

$$D = \sqrt{(X_s - X_p)^2 + (Y_s - Y_p)^2 + (Z_s - Z_p)^2}. \quad (19)$$

Jednotkový vektor  $\vec{j}$  ve směru od přijímače k satelitu vypočteme z

$$j_x = \frac{(X_s - X_p)}{D} \quad (20)$$

$$j_y = \frac{(Y_s - Y_p)}{D} \quad (21)$$

$$j_z = \frac{(Z_s - Z_p)}{D} \quad (22)$$

Vektor  $\vec{z}$  (zenit), opačný k vektoru směřujícímu od přijímače do středu Země, spočteme jako

$$z_x = \cos(ZS_p) \cdot \cos(ZD_p) \quad (23)$$

$$z_y = \cos(ZS_p) \cdot \sin(ZD_p) \quad (24)$$

$$z_z = \sin(ZS_p) \quad (25)$$

a poté elevaci satelitu určíme jako

$$E = \arcsin [(j_x z_x) + (j_y z_y) + (j_z z_z)]. \quad (26)$$

### 3.3.7 Využití informací o integritě

EGNOS přenáší pro každý GPS satelit, který je monitorován, tzv. *signál integrity*, který se skládá ze 3 hodnot (stavů) a to:

- Stav satelitu je v souladu s využitím a aplikace SoL (OK).
- Anomálie byla zjištěna u satelitu (Do not use - DU).
- Data z družice jsou pro sledování nedostatečné (Not monitored - NM).

System má 6 sekund k informování pilota o jakékoliv poruše integrity. Jinak řečeno - nesmí uběhnout více jak 6 sekund mezi dobou dopadu

problému na uživatele a dobou, kdy systém vyslal varovný signál. Upozornění se opakuje 4 po sobě jdoucí sekundy, aby se vyloučily jakékoli ztráty zprávy.

Dále je pro každý sledovaný IGP vyslán signál integrity s 3 hodnotami a určuje stav systému. Pilot je opět informován, pokud je zjištěna anomálie nebo nejsou k dispozici dostačující data. V tomto případě je výstraha *Do not use* generována prostřednictvím maximální hodnoty GIVD, nikoliv konkrétní hodnotou parametru GIVE (viz Ionosférické korekce). Stejně jako u satelitních výstrah má systém 6 sekund na informování pilota o případné chybě integrity. Výstraha se opět opakuje 4krát.

Předávané parametry k odhadnutí přesnosti oprav (GIVE a GIVD) zároveň umožňují přijímači výpočet horizontální a vertikální úroveň ochrany HAL a VAL. Obecně platí, že pouze přijímače používané pro letecké účely počítají a automaticky generují úroveň ochrany.

### 3.4 PŘIJÍMAČE

Volba přijímače závisí na cílovém využití, funkcích SBAS, které mají být využity, a v neposlední řadě také na integračních omezeních. Při výběru vhodné avioniky je nejdříve třeba zjistit, zda přijímač správně přijímá SBAS signál, poté vybrat typ rozhraní (interface) a konečně zkontrolovat, zda protokoly podporované přijímačem umožňují příjem dat pro cílové využití. Existuje několik možností jak přijímač SBAS integrovat do stávajícího zařízení:

- *Čipset* se skládá z jedné nebo dvou součástí, které jsou instalovány na plošné spoje, jde o kompaktní a nejlevnější řešení (zhruba 5 USD).
- *Hybridní komponent* se skládá z jedné složky spojující RF část a části zpracovávající signál, která se instaluje na plošné spoje. Směrování<sup>12</sup> je jednodušší, ale cena je vyšší než u čipsetového řešení (10 USD).
- *Auxiliary card (piggyback)*: Celý přijímač a periferní komponenty jsou integrovány na kartě připravené k použití, která musí být připojena k hlavní desce (motherboardu) konečného výrobku. Je to ideální řešení pro vestavěné aplikace. Cena se pohybuje mezi 10 až 100 USD v závislosti na modelu.

<sup>12</sup> Z ang. routing – technika sloužící k propojení jednotlivých elektrických sítí (obvodů).

- *OEM (Original Equipment Manufacturer)* verze se skládá ze samotného přijímače bez pouzdra. Přijímač je pak umístěn do krytu. Toto řešení je vhodné pro rychle vyráběné prototypy. Cena je ve stejném rozsahu jako u piggybacku.
- *Stand-alone* se skládá z kompletního přijímače, který může být proveden v mnoho formách (přenosná, přípojná...). Ceny se liší od několika desítek dolarů až k několika tisícům dolarů za profesionální přijímače.

#### 3.4.1 Typy rozhraní a protokoly

Výrobci přijímačů nabízejí několik typů rozhraní. Mezi nejčastější patří asynchronní sériová rozhraní, která splňují *TTL* a *RS-232*. Přijímače, které se specializují zejména na čas, využívají *TCP/IP* nebo *1PPS* (1 Pulse Per Second) rozhraní.

S ohledem na komunikační protokoly výrobci obecně používají proprietární protokoly, které poskytují přístup k (téměř) všem datům (pseudovzdálenosti, satelitní navigace, zprávy SBAS atd.) spojených se standardizovaným protokolem *NMEA 0183*. Některé přijímače také generují data v *RINEX* (Receiver Independent Exchange) formátu.

##### 3.4.1.1 RINEX

*RINEX* je výměnný formát, který je nezávislý na přijímači. Byl vyvinut v Astronomickém ústavu univerzity v Bernu s cílem poskytnout data v jednotném formátu, který vychází z proprietárních formátů od různých značek přijímačů. Tento formát je obecně podporován profesionálními přijímači. Také je používán *IGS* servery pro dodávání GNSS dat. V tomto formátu jsou GNSS data poskytovány jako textové soubory. K dispozici je 6 rozdílných souborů, které obsahují:

- údaje o pozorování
- GPS navigační zprávy
- meteorologická data
- GLONASS navigační zprávy
- navigační zprávy z geostacionárních družic
- informace na satelitních hodinách a hodinách na přijímači



### 3.4.1.2 NMEA

NMEA (National Marine Electronics Association) je organizace, jejímž cílem je standardizovat rozhraní elektronického vybavení používaného na lodích. Mezi zavedené standardy patří i protokol *NMEA 0183*, který se vztahuje k GPS/SBAS přijímačům a pro svou jednoduchost byl přijat většinou výrobci těchto zařízení i v letectví.

*NMEA 0183* standard popisuje jak protokol, tak fyzické spojení mezi přijímačem a hostitelským zařízením (satelitem) a specifikuje typ spojení. Data z přijímače jsou odesílány jako datové pakety obsahující maximálně 80 znaků. Přijímač vzhledem k přenosové rychlosti může poslat maximálně 6 paket za sekundu. Data jsou přímo kódována čitelnými znaky ASCII. Tyto pakety nazýváme věty. Protokol NMEA je obousměrný, tedy data mohou být nejenom přijata, ale i odeslána k přijímači. Je standardizován určitý počet vět, které vždy začínají označením \$GP. Někteří výrobci navíc přidávají do svých výrobků další věty s označením \$PXXX, kde XXX je kód výrobce přidělený organizací NMEA (např. SRF pro SirF, SSN pro Septentrio). Seznam kódů je k dispozici na stránkách NMEA.

Většinou výrobci zařízení GPS/SBAS nepoužívají všechny věty, nicméně přijímače vysílají šest hlavních vět, které shrnuje *tabulka 5*.

### 3.4.2 Výrobci avioniky SBAS

Systém SBAS se využívá mimo letectví v mnoha odvětvích jako zemědělství, mapování, telematika, námořnictví, ale i například v outdoorové rekreaci, kde je zapotřebí precizních navigačních služeb.

U leteckých přijímačů se můžeme setkat hlavně s výrobci značky Garmin, Honeywell nebo Thales. Někteří výrobci jasně specifikují, že jejich přijímače podporují EGNOS, jiní uvádějí v popisu svého výrobku například *WAAS Capable* nebo *WAAS Enabled*. V praxi *WAAS Capable* znamená, že přijímač je schopen využívat služby SBAS, ale je třeba ji aktivovat buď jednorázově, nebo při každém spuštění. *WAAS Enabled* obvykle znamená, že přijímač aktivuje SBAS ve výchozím nastavení.

Je třeba mít na paměti, že pro přijímače s označením *WAAS Capable* a *WAAS Enabled* není žádná záruka, že přijímač bude podporovat EGNOS. Je to především způsobeno chybnou interpretací zpráv MTo/2, které jsou někdy zaměňovány za MTo (viz *kapitola 3.2.2*).

Tabulka 5: Věty NMEA. [33]

Název zprávy	Popis
\$GPGGA	GPS fixní data. Obsahuje zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku, nadmořskou výšku, čas, HDOP a počet viditelných satelitů.
\$GPGLL	Geografická poloha - zeměpisná délka/šířka. Tato zpráva udává zeměpisnou šířku, délku a čas.
\$GPGSA	GNSS DOP (Dilution Of Precision) a aktivní satelity. Tato zpráva obsahuje seznam satelitů používaných k výpočtu PVT a informace o geometrii těchto satelitů.
\$GPGSV	GNSS satelity v dohledu. Tato zpráva udává výšku, azimut a poměr signálu k šumu ze satelitů použitých přijímačem.
\$GPRMC	Doporučené minimální množství specifických dat GNSS. Tato zpráva poskytuje čas, zeměpisnou délku, zeměpisnou šířku, rychlost a směr.
\$GPVTG	Kurz a GS (Ground Speed). Tato zpráva obsahuje informace o rychlosti a kurzu.

Přijímače SBAS lze také rozdělit do kategorie 1 a 2 v závislosti na úrovni zpracování SBAS signálu<sup>13</sup>. Přijímač kategorie 1 je schopen zcela využít všech korekcí. Do kategorie 2 spadají přijímače, které dokáží přijímat SBAS signál, ale nemusí využít všech dostupných korekcí. V letectví se setkáváme výlučně s kategorií 1. Přijímač kategorie 3 má sice čipset, který dokáže přijmout SBAS signál, ale již není schopen tento signál zpracovat. Takový přijímač by vyžadoval rozsáhlejší aktualizaci firmwaru. [2]

V *tabulce 6* jsou uvedeny přijímače SBAS vyrobené a uzpůsobené přímo pro využití v letectví. Trh s avionikou SBAS se velmi rychle vyvíjí (jde relativně o novou službu), a proto seznam není vyčerpávající a není podmínkou, že všechny uvedené přijímače jsou kompatibilní se systémem EGNOS. Pouze výrobce přijímače může poskytnout přesnou specifikaci přístroje.

V případě avioniky pro obecné letectví se hojně využívá bazarového prodeje (již vyřazených výrobků) z důvodu dlouhé životnosti přijímače a značné cenové nákladnosti nových výrobků.

<sup>13</sup> Dělení dle GSA (European GNSS Agency).

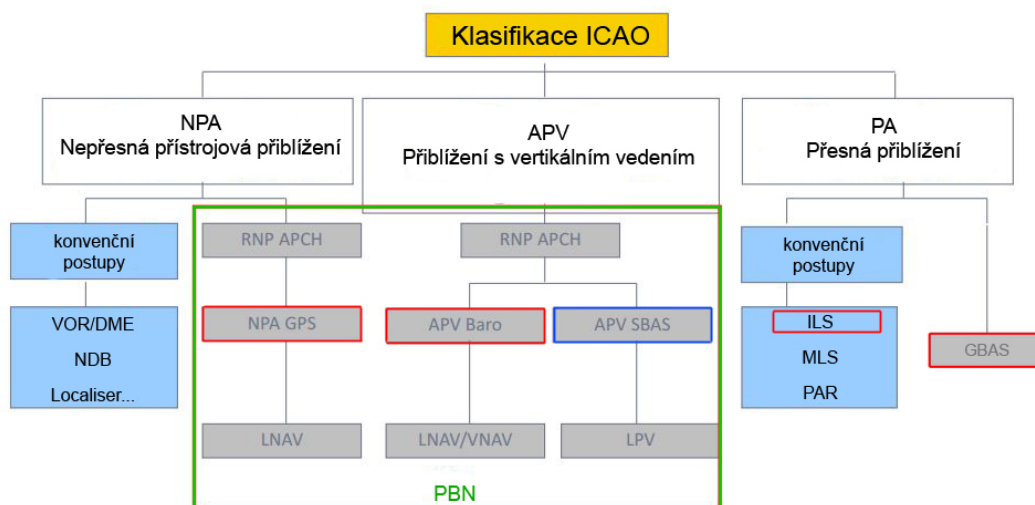
Tabulka 6: Přijímače SBAS pro letecké využití. [2]

Výrobce	Název přijímače	V prodeji	Přibližná cena
Avmap	EKP IV Pro	A	\$1,670
Garmin	Aera range	A	\$600
Garmin	G1000 (with GIA63W unit)	A	\$40,000
Garmin	G600 (with 430W/530W units)	A	\$28,000
Garmin	G900X (with GIA63W unit)	A	\$50,000
Garmin	GNC 420W	N	-
Garmin	GNS 430W	N	-
Garmin	GNS 530W	N	-
Garmin	GPS 400W	A	\$6,000
Garmin	GPS 500W	N	-
Garmin	GPSMAP 196	N	-
Garmin	GPSMAP 296	N	-
Garmin	GPSMAP 396	N	-
Garmin	GPSMAP 495	N	-
Garmin	GPSMAP 496	N	-
Garmin	GPSMAP 695/696	A	\$1,500
Garmin	GPSMap 96	N	-
Garmin	GPSMap 96c	N	-
Garmin	GTN 625	A	\$9,500
Garmin	GTN 635	A	\$10,400
Garmin	GTN 650	A	\$11,400
Garmin	GTN 725	A	\$13,000
Garmin	GTN 750	A	\$14,500
Honeywell	AV80R range	A	\$760
Honeywell	KI 825	A	\$12,500
Honeywell	KSN 770	A	\$12,000
Honeywell	EASy II	A	na vyžádání
Honeywell	Primus Apex Avionics System	A	na vyžádání
Rockwell Collins	GPS-4000S	A	na vyžádání
Septentrio	AiRx OEM	A	na vyžádání
Thales	Multi-Mode Receiver - MMR	A	na vyžádání
Thales	TopDeck LPV	A	na vyžádání
Thales	TopStar 200 GPS	A	na vyžádání

## POROVNÁNÍ S JINÝMI SYSTÉMY

### 4.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Jak již bylo řečeno, pomocí systému SBAS lze provést přiblížení LPV, tj. letový postup přiblížení s výkonností směrového majáku a s vertikálním vedením (Localizer performance with vertical guidance), který má dnes SBAS při nejvyšší dosažené výkonnosti zabezpečit a o který se také budeme nejvíce zajímat. Dále je podrobněji popsáno, že tento postup je z hlediska přesnosti srovnatelný s přesným přiblížením ILS kategorie I.



Obrázek 11: Klasifikace druhů přiblížení podle ICAO.

V dalším textu je porovnáno přiblížení SBAS (*APV SBAS*) s vybranými druhy přístrojového přiblížení, které dosahují srovnatelné nebo podobné výkonnosti. K porovnání bylo vybráno přiblížení *APV BARO*, *ILS* a *GBAS*. Výjimku tvoří krátké srovnání z hlediska dosahované přesnosti s přiblížením pomocí základního GNSS (*NPA GPS*). Nebudeme srovnávat přiblížení *LPV* s *MLS* (Microwave landing system), který je velmi disku-

tovaným druhem přiblížení, jehož implementace byla prozatím zastavena. Na evropských letištích se s ním setkáme jen zřídka a v České a Slovenské republice vůbec.

Na *Obrázku 11* je znázorněna klasifikace druhů přiblížení podle ICAO. Červeně jsou vyznačeny druhy přiblížení, s kterými budeme SBAS porovnávat. Zelená skupina *PBN* (Performance Based Navigation) zahrnuje druhy přiblížení s navigací založenou na výkonnosti (nikoli na specifikaci senzoru), která musí být definována z hlediska přesnosti, integrity, dostupnosti, kontinuity a funkčnosti, které jsou nutné k návrhu letových postupů.

Důležité je si uvědomit, že ač přiblížení LPV dosahuje zhruba výkonnosti ILS CAT I a velmi se podobá svým palubním provedením, nesplňuje některé požadavky stanovené pro přesné přiblížení a tak se mezi ně neřadí. [12]

#### 4.2 PŘESNOST GPS A EGNOS

*Tabulka 7* udává rozsah chyby, který je definován jako statistický rozdíl mezi hodnotou vzdálenosti naměřenou přijímačem a teoretickou vzdáleností od skutečné polohy satelitu k přijímači. Jde o porovnání chyb v pseudovzdálenosti při použití GPS bez rozšíření a systému EGNOS. Rozsah chyby je charakterizován 2 parametry. Parametr *SREW* - Satelitní residuální chyba pro nejhorsí polohu přijímače v relevantní oblasti<sup>14</sup> (Satellite Residual Error for the Worst User Location) zahrnuje chybu dráhy (efemeridu) a chybu hodin satelitu. Parametr *UIVD* (User Ionospheric vertical Delay) náleží ionosférickému vertikálnímu zpoždění a je relevantní pro danou dvojici přijímač – satelit. Jedná se o zpoždění v bodě, kde signál ze satelitu prochází ionosférickou vrstvou. Toto zpoždění je počítáno interpolací, jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách. [7]

Tabulka 7: Srovnání přesnosti GPS a EGNOS. [7]

Zdroj chyb	Velikost chyby – GPS (m)	Velikost chyby – EGNOS (m)
GPS SREW	$4 \cdot 10^{15}$	2.3
Ionosféra (chyba UIVD)	2.0 až $5 \cdot 10^{16}$	0.5

<sup>14</sup> Relevantní oblast obsahuje zeměpisné šířky od 20° do 70° a zeměpisné délky od -40° do 40°.

<sup>15</sup> Dle GPS Standard Positioning Service Performance Standard [RD-3].

<sup>16</sup> Typický rozsah ionosférických zbytkových chyb po aplikaci základního Klobucharova modelu vysílaného systémem GPS.

Další zdroje chyb jako vícecestné šíření signálu, šum přijímače nebo průchod signálu troposférou jsou vždy závislé na typu a kvalitě přijímače. Proto nelze jednoznačně říci, jaká je horizontální a vertikální přesnost určení polohy za použití daného systému. Obecně se udává horizontální přesnost GPS  $\pm 15m^{95\%}$ , vertikální přesnost je vždy horší, konkrétně 1,5 násobek té horizontální ( $\sim \pm 23m^{95\%}$ ). U systému EGNOS jsou udávány hodnoty horizontální přesnosti  $\pm 3m^{95\%}$  a vertikální  $\pm 4m^{95\%}$ . [19]

Výkonnost systému EGNOS SoL a požadavky ICAO pro přiblížení APV-I shrnuje následující *tabulka 8*. Již z v rámci přesnosti je patrné, že pro přiblížení APV/LPV základní GNSS stačit nebude.

Tabulka 8: Hodnoty výkonnosti EGNOS SoL. [7]

	Přesnost		Integrita		Dostupnost
	Horizontální (95%)	Vertikální (95%)	Risk	Čas výstrahy TTA	
Výkonnost EGNOS	3 m	4 m	$1-2 \cdot 10^{-7}$ / přiblížení	méně než 6 s	0.99 pro APV-I <sup>17</sup>
APV-I požadavky	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1-2 \cdot 10^{-7}$ / v každém přiblížení	10 s	0.99 až 0.99999

#### 4.3 APV BARO VE SROVNÁNÍ S APV SBAS

Přiblížení s vertikálním vedením APV je charakterizováno směrovým i výškovým vedením letadla po sestupové dráze a je definováno předpisem *L 8168* jako: „Postup přiblížení podle přístrojů s využitím směrového a vertikálního vedení, který ale nesplňuje požadavky stanovené pro přesné přiblížení a přistání“. [31] Jak APV Baro tak APV SBAS patří pod PBN systémy a vztahují se na ně totožné APV požadavky ICAO uvedené v *tabulce 8*.

U systému *APV/Baro-VNAV* je sestupová dráha barometrické vertikální navigace generována palubním výpočetním systémem na základě informací dodaných z výškoměru. Příčné vedení je pak vypočítáno na základě informací ze systému GNSS pro přiblížení nebo více sensorovým systémem (např. *RNAV INS/GNSS*<sup>18</sup>). [10] Pro takovou vertikální navigaci jsou charakteristická teplotní omezení v rozsahu odpovídajícím certifikaci konkrétní navigační soustavy. Tyto omezení mohou být částečně kompenzována posádkou (manuálně) nebo automaticky. Obecně platí, že při nízké

17 Ve většině relevantní oblasti.

18 INS - Inerciální navigační systém, založen na soustavě gyroskopů.

teplotě je indikovaná výška vyšší než skutečná výška, hrozí tedy nebezpečí střetu s překážkou. [21] Korekce se provádí pro:

- minimální nadmořské výšky/výšky počátečního, středního a nezdařeného přiblížení
- *VPA* - Úhel sestupové dráhy (Vertical path angle)
- *DA/H* - Nadmořská výška rozhodnutí/výška rozhodnutí (Decision altitude/height)

Pro *VPA* platí, že při nejnižších teplotách musí být úhel vyšší nebo roven  $2,5^\circ$ , zároveň nesmí být vyšší než  $3,5^\circ$  při nejvyšších teplotách. Optimálním sestupovým úhlem jsou  $3^\circ$ . [15]

$$VPA \in \langle 2,5^\circ; 3,5^\circ \rangle \quad (27)$$

Tabulka 9: Odchyly od *VPA* pro výšku MSL. [15]

Teplota letiště ( $^\circ\text{C}$ )	+30	+15	0	-15	-31
Skutečný <i>VPA</i> ( $^\circ$ )	3,2	3,0	2,8	2,7	2,5

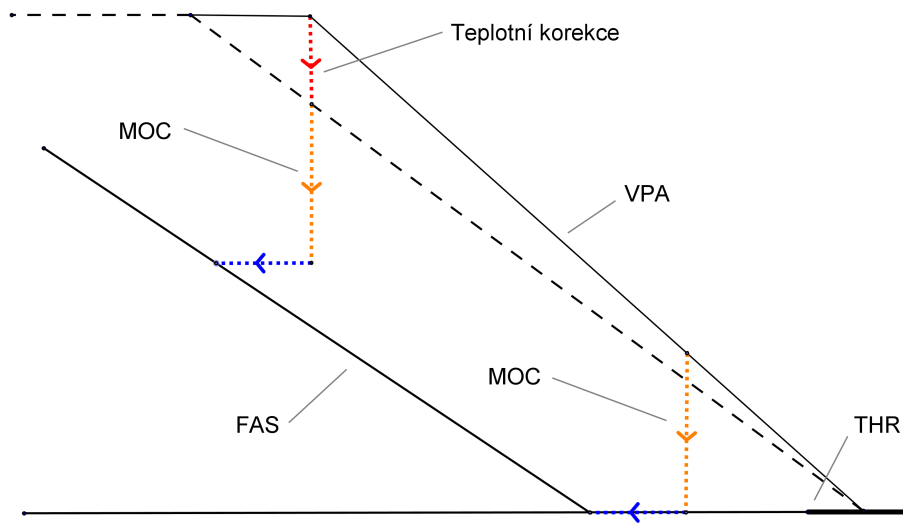
Korekci *VPA* znázorňuje *obrázek 12*, kde

- *MOC* - Minimální výška nad překážkami (Minimum obstacle clearance)
- *FAS* - Úsek konečného přiblížení (Final approach segment)
- *THR* - Práh dráhy (Threshold)

Celkový palubní systém APV Baro zároveň nesmí vykazovat podle *AMC 20-27A* větší vertikální chybu než 100 ft a pro výškoměr 80 ft s pravděpodobností 99,7% ve výškách pod 5000 ft. U systémů s barometrickou vertikální navigací je také nutno uvažovat tzv. chybu propojení více systémů (Horizontal coupling error), která vychází z podélné chyby *NSE*<sup>19</sup>. Chyba propojení systémů je rovna 24 ft. Jako poslední je třeba započítat technickou chybu letu *FTE*<sup>20</sup>, tedy schopnost naváděcího systému letadla

<sup>19</sup> Chyba navigačního systému (Navigation system error).

<sup>20</sup> Flight technical error.



Obrázek 12: Korekce VPA pro APV Baro. [autor]

držet se určené letové dráhy. FTE nesmí být vyšší než 150 ft. Výsledná vertikální navigační chyba  $TSE^{21}$  pro 5000 ft a nižší (MSL) je dána kvadratickým součtem těchto dílčích chyb. [15]

$$TSE_{baro-VNAV} = \sqrt{100^2 + 80^2 + 24^2 + 150^2} \cong 199 ft (99,7\%) \quad (28)$$

Tabulka 10: Celková vertikální chyba (TSE). [15]

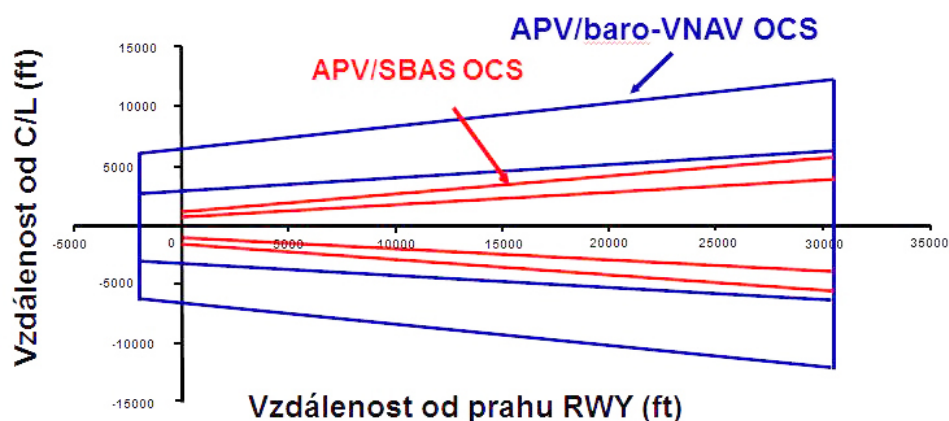
	Chyba vybavení (avioniky)	Chyba barometru	Chyby propojení systémů	Technická chyba letu FTE	Výsledná chyba TSE
Pro výšku nižší nebo rovnou 5000 ft (MSL)	80 ft	100 ft	24 ft	150 ft	199 ft

Další nevýhodou systému APV Baro je, že pro každé letiště musí být vyhlášena minimální teplota, pod jejíž hodnotou nelze bez kompenzace použít barometrickou vertikální navigaci. Charakter přiblížení v horizontální rovině je konstruován podobně jako u NPA přiblížení, tím se zhoršuje (zvyšuje) výška rozhodnutí DA/H. [14]

<sup>21</sup> Total system error.



Naproti tomu konečné přiblížení APV SBAS je zcela definováno geometrickým vedením FAS, které je uloženo v databázi avioniky letadla. Při používání odpadá riziko teplotní kompenzace a ochranný segment konečného přiblížení odpovídá výkonnosti směrového majáku přesného přiblížení. Přírodním důsledkem těchto výhod je zmenšení rovin pro zajištění bezpečné výšky nad překážkami OCS a snížení provozních minim DA/DH pro APV SBAS. [15]



Obrázek 13: Porovnání OCS.

Systém SBAS tedy na rozdíl od APV Baro umožňuje snížit omezení dané překážkovými rovinami. Jeho avionika umožní nastavení volitelné hodnoty sestupového úhlu VPA v závislosti na postupu přiblížení, zároveň disponuje včasnou výstrahou vertikální výkonnosti a jejím odhadem v reálném čase a zabezpečuje navigaci celého letu od vzletu až po přistání jako primární navigační systém. Oproti Baro-VNAV dokáže SBAS zajistit nahrazení ztráty dostupnosti vertikálního vedení algoritmy FDE<sup>22</sup>.

Nespornou výhodou systému SBAS jako celku je zvýšení dostupnosti regionálních letišť pro všeobecné letectví a zejména zvýšení bezpečnosti postupů přiblížení jak pro letouny, tak pro vrtulníky. [21]

#### 4.4 ILS VE SROVNÁNÍ S APV SBAS

ILS je pozemní povelové zařízení určené pro přesné přístrojové přiblížení na přistání. Poskytuje pilotovi velmi přesnou vertikální i horizontální informaci o poloze letadla v prostoru. Na základě těchto informací pilot

<sup>22</sup> FDE - Fault detection and exclusion. Funkce avioniky SBAS, která dokáže detekovat přítomnost chybného satelitního signálu a automaticky ho vyloučit z výpočtu polohy.

provádí korekce kurzu a udržuje letoun na sestupové dráze. Součástí systému bývá výkonná světelná soustava, která zlepšuje vizuální kontakt s RWY.

Systém se skládá z kursového majáku *LLZ* umístěného ve vzdálenosti 300 m až 400 m za prahem dráhy ve směru přiblížení na přistání, sestupového majáku *GP* nacházejícího se asi 300 m od prahu dráhy, zhruba 120 m od její osy. Dalšími částmi jsou polohová návěstidla (*markery*), které pomáhají určit polohu a vzdálenost vůči přistávací dráze. Nejčastěji se používá společně vnější a střední marker, mohou být však doplněny vnitřním markerem a markerem zadního paprsku. Bližší technický popis těchto prvků by přesahoval obsah práce a nebudeme se mu tedy věnovat. Součástí systému je také monitoring správné činnosti systému a samozřejmě palubní vybavení ILS. [27]

Přiblížení ILS je klasifikováno jako přesné přístrojové přiblížení (*PA*). Směrové a vertikální vedení letadla je poskytováno informacemi z pozemního navigačního zařízení umístěného na letišti. V případě APV SBAS či obecně v případě APV přiblížení je jak horizontální tak vertikální poloha vyhodnocována avionikou na palubě letadla (GNSS, SBAS nebo barometrickým senzorem). Kterýkoli z těchto senzorů je zdrojem dalších chyb, o kterých bylo psáno v předchozích kapitolách.

*Tabulka 11* shrnuje požadavky na výkonnost jednotlivých typů přiblížení až do kategorie *CAT I*. Výkonnost signálu SBAS vychází z požadavků na celkovou chybu polohy a pravděpodobnosti vztažené k důsledkům ohlášených a neohlášených poruch navigačních funkcí pro daný letový postup a hustotě letového provozu. Tyto provozní limity však neuvažují například chybu danou palubním přijímačem a jeho umístěním, vliv vícecestného šíření, interference signálu a chyby vlastního přijímače. Z toho důvodu koncept signálu v prostoru uvažuje tzv. bezchybný přijímač a v praxi je proto důležité vždy určit zda systém splňuje navigační výkonnost i s uvážením těchto jevů. Při posuzování kvality je nezbytné určit, zda je zdrojem chyb či poruch systém SBAS nebo lokální vliv. [27]

Horizontální limit výstrahy HAL je definován jako: „Poloměr kruhu v horizontální rovině (lokální tangenciální rovina k elipsoidu WGS-84) se středem ve skutečné poloze letadla, který popisuje oblast, ve které se má nacházet indikovaná horizontální poloha s pravděpodobností odpovídající navigačnímu postupu“. Pokud dojde ke ztrátě dostupnosti služby SBAS, je využito algoritmů autonomní detekce a vyloučení chyb FDE.

Vertikální limit výstrahy VAL je definován jako: „Polovina délky segmentu na vertikální ose (kolmé k horizontální rovině elipsoidu WGS-84) se

Tabulka 11: Požadavky na výkonnost přiblížení LPV a ILS CAT I dle ICAO Annex 10/I. [13]

Postup přiblížení	Přesnost 95%		Integrita			Pravděpodobnost poruchy		Dostupnost
	Horizontální (m)	Vertikální (m)	HAL (m)	VAL (m)	TTA (s)	Neohlášená	Ohlášená	
						Integrita	Kontinuita	
APV I (LPV)	16	20	40	50	10	$2 \cdot 10^{-7}$ / APP	$8 \cdot 10^{-6}$ / 15s	0,99 až 0,99999
APV II (LPV)	16	8	40	20	6	$2 \cdot 10^{-7}$ / APP	$8 \cdot 10^{-6}$ / 15s	0,99 až 0,99999
APV (LPV 200)	16	4	40	35	6	$2 \cdot 10^{-7}$ / APP	$8 \cdot 10^{-6}$ / 15s	0,99 až 0,99999
CAT I	16	4	40	35-10	6	$2 \cdot 10^{-7}$ / APP	$8 \cdot 10^{-6}$ / 15s	0,99 až 0,99999

středem ve skutečné poloze letadla, který popisuje oblast, ve které se má nacházet indikovaná vertikální poloha s pravděpodobností odpovídající navigačnímu postupu.“

Čas do výstrahy TTA je definován jako maximální možný čas, který uběhne mezi vznikem polohové chyby a vydáním výstrahy uživatelským zařízením. [24]

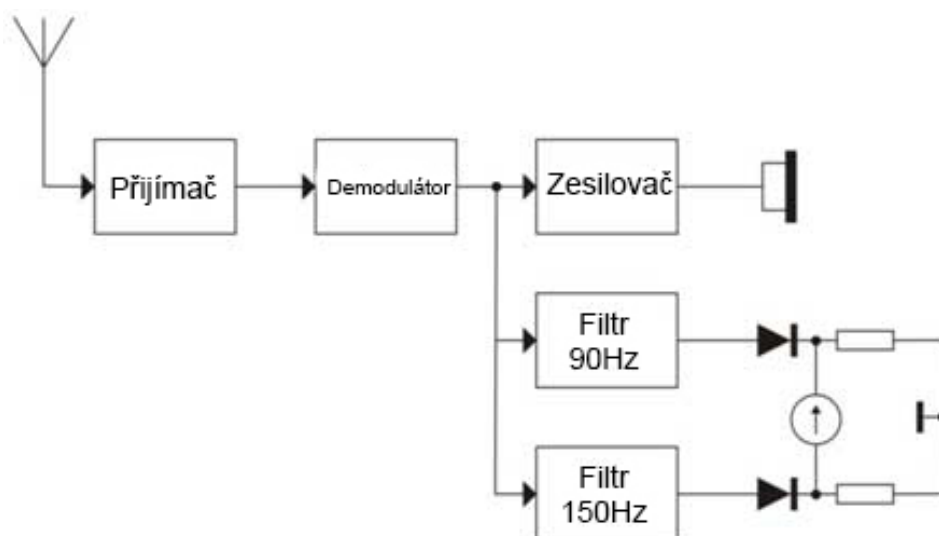
V tabulce 11 vidíme, že požadavky na výkonnost jsou pro APV SBAS a ILS CAT I velmi podobné a u přiblížení LPV 200<sup>23</sup> dokonce zcela totožné. Přiblížení LPV 200 tedy splňuje požadavky ICAO Annex 10 pro CAT I, avšak bez nutnosti nákladné pozemní infrastruktury potřebné pro ILS.

#### 4.4.1 Avionika ILS

Avionika ILS se skládá ze sestupového, směrového a popřípadě markerového přijímače. Po naladění příslušné frekvence je zachycený signál v přijímačích veden k palubním přístrojům. Pilot si tedy naladí na přijímači ILS příslušnou publikovanou frekvenci směrového majáku LLZ. Sestupový maják GP, DME nebo markery se poté naladí automaticky, pokud jsou na daném letišti instalovány. Jde o párování frekvencí, které ICAO přijalo jako mezinárodní standard.

Přijímač zpracovává signál z antén, které jsou u většiny letounů umístěny v předové části letounu. U velkých letadel nebo u letadel, která mají při přistání vysoko položenou přední část trupu, se anténa GP umísťuje na podvozek. [27]

<sup>23</sup> Číslo 200 značí výšku rozhodnutí DA(H) v jednotkách ft (60m).

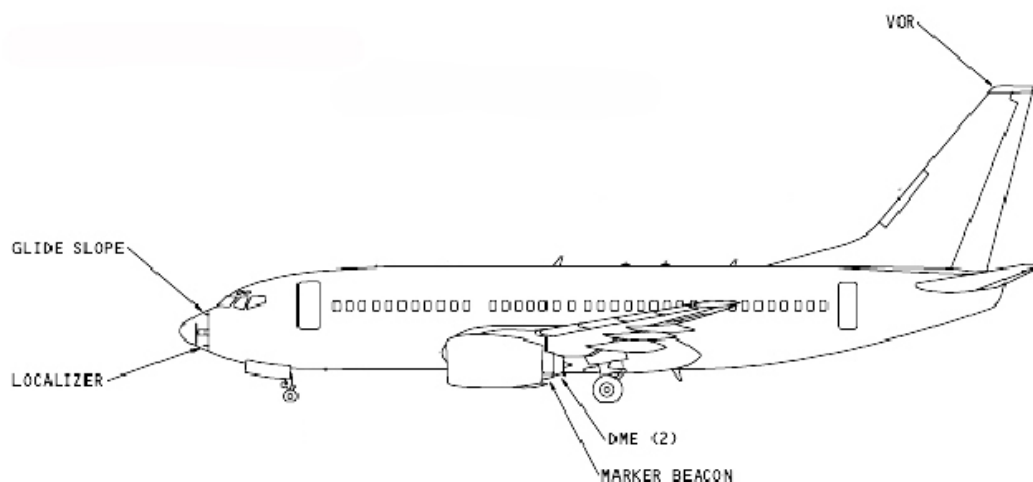


Obrázek 14: Zjednodušené blokové schéma přijímače směrového majáku LLZ. [6]

K certifikaci pro provoz CAT I, II nebo III se požaduje, aby bylo letadlo vybaveno dalšími zařízeními, která podporují činnost systému ILS. V *tabulce 12* je vypsáno potřebné vybavení pro letoun Boeing 737. Jednotlivé kategorie přiblížení mají odlišné požadavky a obecně platí, že vyšší kategorie přiblížení vyžaduje rozsáhlejší výbavu na palubě letadla. [26]

Tabulka 12: Palubní vybavení pro přiblížení pro Boeing 737. [26]

Zařízení	Cat I	CAT II ruční LDG	CAT II aut. LDG	CAT III aut. LDG
Autopilot	0	1	2	2
Flight director	0	2	2	2
FD Bars	0	2	2	2
IRS <sup>24</sup>	1	2	2	2
Umělý horizont	2	3	3	3
ILS	1	2	2	2
Radiovýškoměr	1	2	2	2
Autoland	ne	ne	ano	ano
Air data comp.	0	2	2	2
EADI <sup>25</sup>	1	2	2	2
EHSI <sup>26</sup>	0	1	2	2



Obrázek 15: Umístění přijímacích antén letounu Boeing 737NG. [6]

Přiblížení LPV je navrženo jako *ILS look-like approach*. Pro pilota to znamená téměř identické zobrazení palubním systémem *FMS* na umělý horizont. Tedy v případě LPV využije systém *FMS* k výpočtu navigačního řešení signál SBAS (z přijímače GPS/SBAS) a během přiblížení vygeneruje pseudo ILS signály, které jsou poté použity místo konvenčních ILS vstupů do *DFGC*<sup>27</sup> a *EFIS*. Takový postup přiblížení je pak veden, jako postup ILS. Indikátory svislé a boční odchylky jsou zobrazeny na stávajících displejích *EFIS*, které jsou hlavními přístroji během těchto operací.

Na obrázku 16 je znázorněno přiblížení ILS ve fázi, kdy je zachycen signál Localiseru. GS je zatím ve stavu *armed* a čeká se na jeho signál. Jakmile se letadlo dostane do dosahu signálu GS, ikonka GS také zezelená a přeskóčí do režimu *captured*.

Obrázek 17 znázorňuje přiblížení LPV. Zelená ikonka LPV znamená, že kritéria pro zachycení LPV jsou splněny a *FMS* využívá dat přímo z přijímače GPS/SBAS.

24 Inertial reference system – novější verze INS, používá namísto mechanických gyroskopů lasery.

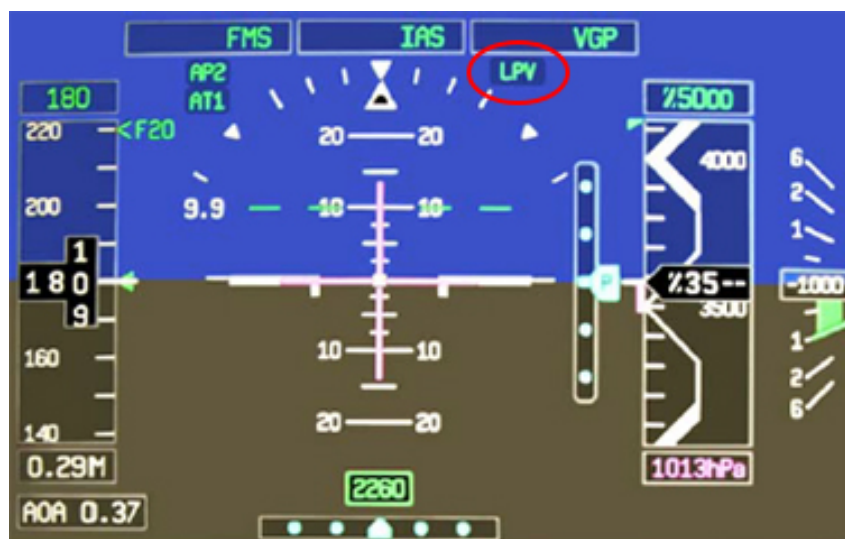
25 Electronic Attitude Director Indicator.

26 Electronic Horizontal Situation Indicator.

27 Digital Flight Guidance Computer.



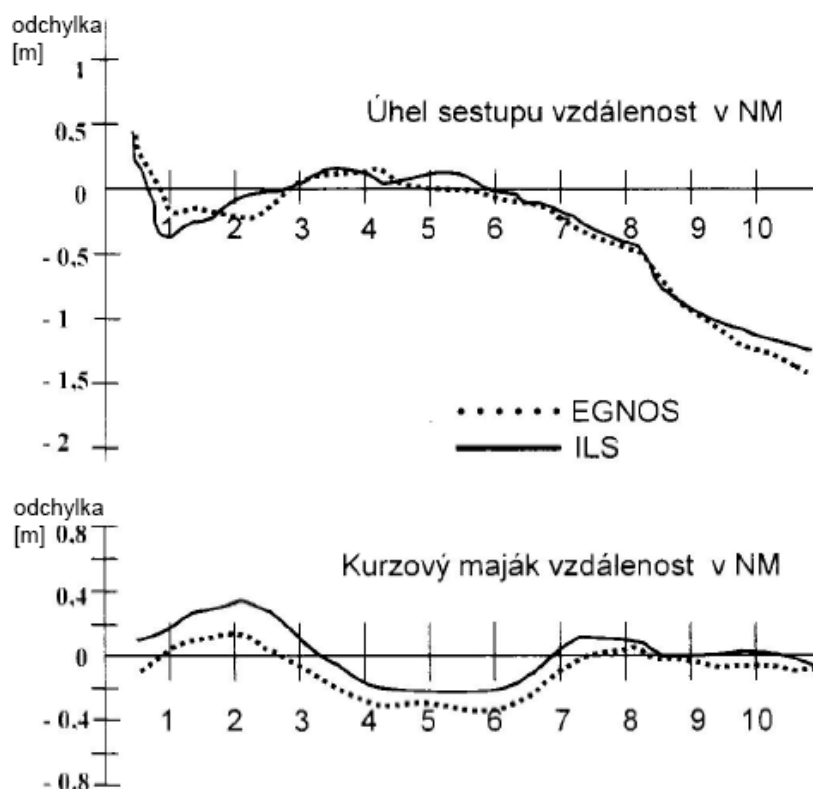
Obrázek 16: Přiblížení ILS (Gulfstream G450). [5]



Obrázek 17: Přiblížení LPV (Gulfstream G450). [5]

## 4.4.2 Testování přesnosti EGNOS a ILS

První testy zpracovala agentura DERA<sup>28</sup>. Bylo provedeno měření během několika přiblížení pomocí 2 geodetických stanic (jedna umístěna na palubě letadla zpracovávající signál ze stejné antény jako celý systém, druhá na letišti) a výsledky porovnány s přesností ILS. Vyhodnocením se zjistila přesnost určení polohy menší než  $\pm 1$  m a zároveň z měření vyplynulo, že přiblížení pomocí systému EGNOS je přibližně stejně přesné (provozně ekvivalentní) jako přiblížení ILS. [26]



Obrázek 18: Srovnání přesnosti EGNOS a ILS. [26]

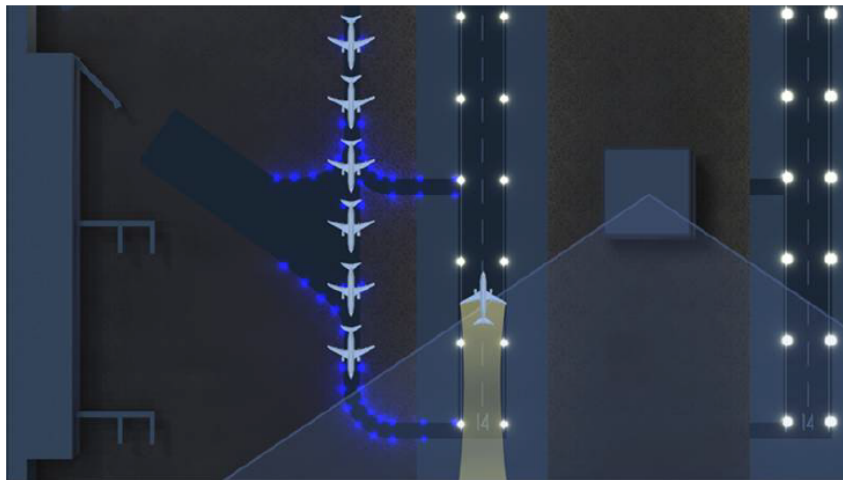
## 4.5 GBAS JAKO NÁSTUPCE ILS VE SROVNÁNÍ S APV SBAS

GBAS (Ground Based Augmentation System) je přibližovací GNSS systém s pozemním rozšířením v oblasti letiště. Palubní avionika monitoruje integritu a uplatňuje korekce prostřednictvím dat získaných z pozemní

<sup>28</sup> Defence Evaluation and Research Agency.

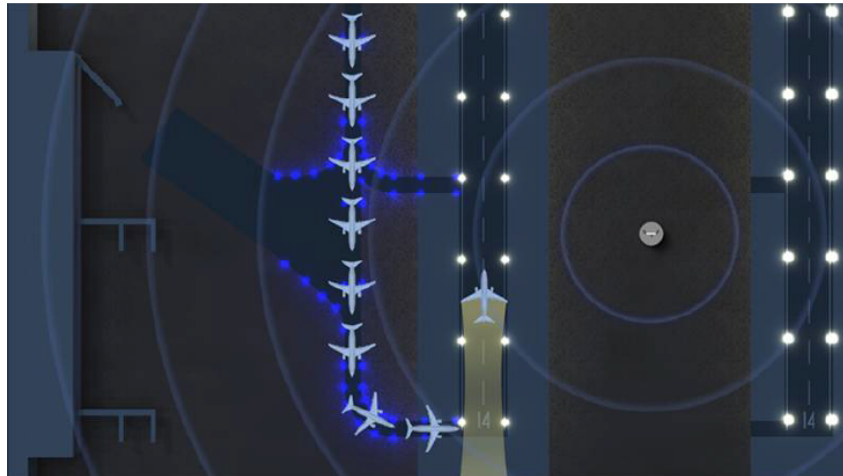
stanice umístěné na letišti. Takové pozemní rozšíření výrazně zvýšilo přesnost navigačních dat satelitního systému a umožnilo aplikovat GNSS ve fázi přesného přiblížení na přistání. GBAS patří mezi tzv. nekonvenční přesná přiblížení PA a v současné době poskytuje navigační výkonnost pro provoz v *CAT I*. Díky nadcházející modernizaci bude schopen podporovat provoz v *CAT II* a *III*. Z toho důvodu GBAS představuje budoucnost v oblasti přesného přístrojového přiblížení na mezinárodních letištích a měl by jím být postupně nahrazován konvenční ILS. V Evropě je již GBAS instalován na letištích v Brémách, ve Frankfurtu, v Palermu, v Braunschweigu, v Toulouse nebo v Malaze. Přiblížení *LPV 200* lze brát jako možnou alternativu pro GBAS, nicméně pouze pro *CAT I*. [27] [22]

Systém ILS má několik provozních omezení, která s postupným růstem letecké dopravy přestávají být přijatelná. Pro využívání ILS je potřeba na letišti zavést ochranné zóny z důvodu rušení *FM* vysíláním nebo objekty pohybující se po letišti. Mezi největší nedostatky ILS patří jeho vysoké provozní náklady a nutnost instalace systému pro každou přistávací dráhu zvlášť. Naproti tomu jeden GBAS systém lze použít pro více přistávacích drah a zároveň pro blízka regionální letiště přibližně do 20 NM.



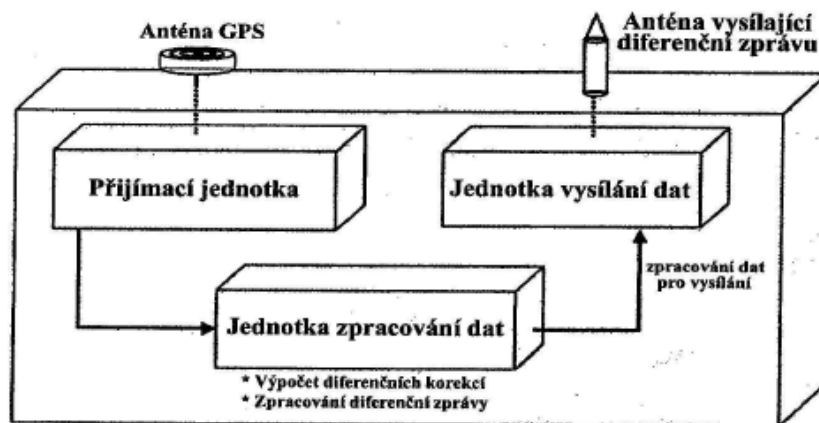
Obrázek 19: Ochranná zóna ILS. [23]





Obrázek 20: GBAS nevyžaduje ochranné zóny. [23]

GBAS je tvořen 3 *elementy*: satelitní konstelací, pozemní stanicí a letadlovou avionikou. Pozemní stanice se skládá z jednoho nebo více vysílačů VDB<sup>29</sup>, vysílacích antén, několika referenčních přijímačů a zpracovávajících jednotek (obrázek 20). Povšimněte si podobnosti s pozemním segmentem systému SBAS.



Obrázek 21: Pozemní stanice GBAS. [27]

Pomocí referenčních přijímačů se získávají navigační data z družic, následně se zpracují a jsou odeslány VDB vysílačem avionice letadla, z které posádka získává informace o přiblížení. Vysílač VDB vysílá tyto údaje v pásmu VHF 108 až 117,975 MHz do nominální vzdálenosti 37 km (20 NM),

<sup>29</sup> VHF Data Broadcast.

zatímco systém EGNOS vysílá navigační zprávy pomocí geostacionárních družic na pásmu  $L1$  (tj. 1575.42 MHz). GBAS poskytuje korekce pro více vzletových a přistávacích drah na jednom letišti a ve výjimečných případech pro blízká letiště a heliporty. Jediná stanice GBAS je schopna poskytnout navigační data až pro 49 přesných přiblížení v oblasti pokrytí VDB antény. Zároveň pokud je v dané lokalitě dostupný signál SBAS, systém GBAS je schopen využít korekčních dat z geostacionárních družic SBAS. [8] [17] Pro zjednodušení si lze GBAS představit jako regionální SBAS.

Navigační data GBAS obsahují, podobně jak je tomu u systému SBAS, informace o korekci pseudovzdálenosti, referenčním čase, integritě, dat týkající se GBAS, informace o předpovídané dostupnosti zdrojů určování vzdálenosti a navíc data pro konečné přiblížení FAS (dráha segmentu konečného přiblížení, bod podrovnání, výška přeletu prahu dráhy, úhel sestupové dráhy). Typy zpráv, které mohou být přenášeny systémem GBAS jsou uvedeny v *tabulce 13*. [16]

Tabulka 13: Zprávy VHF GBAS.

Typ zprávy	Název zprávy
0	volné
1	korekce pseudovzdálenosti
2	data týkající se GBAS
3	rezervováno pro pozemní zdroje určování polohy
4	data pro konečné přiblížení FAS
5	předpovídání dostupnosti zdrojů určování vzdálenosti
6	rezervováno
7	rezervováno pro národní využití
8	rezervováno pro testovací účely
9 až 100	volné
101	korekce pseudovzdálenosti GRAS <sup>30</sup>
102 až 255	volné

Za zmínku stojí zpráva typu 4, která u systému SBAS chybí. Obsahuje jednu nebo více datových sad pro konečné přiblížení FAS, každá definující jedno přesné přiblížení. Ve zprávě typu 4 najdeme tzv. datový blok FAS, který obsahuje soubor parametrů k identifikaci přesného přiblížení a defi-

<sup>30</sup> GRAS - Systém s pozemním regionálním rozšířením. Z hlediska uživatele se pozemní podsystém GRAS skládá z jednoho nebo více pozemních podsystémů GBAS. Použitím více vysílacích stanic GBAS a vysíláním zpráv typu 101 je GRAS schopen zabezpečovat traťový provoz ve větší oblasti pokrytí, než které typicky poskytuje GBAS. [13]

nuje příslušnou přibližovací sestupovou dráhu. Postupy APV SBAS mohou být navoleny prostřednictvím čísla kanálu. Toto pětimístné číslo je zařazeno do datového bloku úseku konečného přiblížení (FAS) v databázi postupu a musí být publikováno. Nebo může být postup navolen metodou výběru s využitím menu. [30]

#### 4.5.1 Avionika GBAS

Palubní vybavení GBAS se skládá z GNSS a VDB přijímače. Zatímco GNSS přijímač přijímá a dekoduje signály z družic, VDB přijímač slouží k příjmu a dekódování navigačních zpráv vysílaných z pozemního systému GBAS. Na základě přijatých informací palubní subsystém vyhodnocuje dostupnost služby a určuje polohu a integritu.

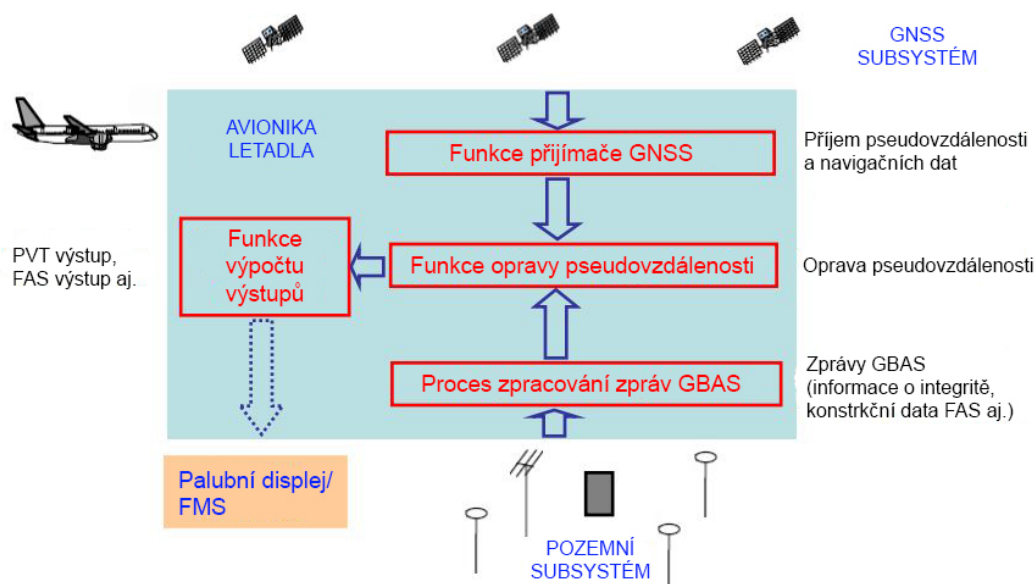
Požadavky na avioniku GBAS jsou (stejně jako u SBAS) standardizovány v ICAO *Annex 10/I* a ve standardu MOPS (*MOPS RTCA/DO-253C*). Protože v současné době dochází k vývoji GBAS pro CAT II a CAT III, bude potřeba k dosažení požadované přesnosti a integrity i adekvátně změnit standardy avioniky GBAS<sup>31</sup>. Půjde zejména o přísnější ověřování geometrie družic, nové požadavky na dodatečné informace z pozemního systému, nové požadavky týkající se vysílacích protokolů, požadavky pro sledování ionosférického gradientu pozemním systémem a v neposlední řadě dodatečné požadavky sledování poruch referenčního přijímače.

V základním režimu palubní přijímač GBAS vybírá nejvyšší službu podporovanou jak pozemním, tak palubním systémem. Pokud tato služba na daném letišti není k dispozici, přijímač automaticky vybere nižší dostupnou službu. Obdobně jako u přiblížení SBAS nebo ILS, avionika GBAS poskytuje jak horizontální, tak vertikální vedení k definovanému kurzu konečného přiblížení a sestupovou rovinu konečného přiblížení.

Přijímač GBAS obdrží pseudovzdálenost a navigační data z GNSS satelitů, zároveň přijme opravy vysílané z pozemního vysílače a na základě těchto informací vypočítá polohu, rychlost a čas (PVT), určí hranice chyb a monitoruje možné hrozby v prostoru. Tyto informace jsou poté přeneseny z přijímače na grafický palubní displej přes TCP/IP. Opět jde o stejný princip jako v případě SBAS s rozdílem, že korekce pro SBAS jsou vysílány

<sup>31</sup> Služba přiblížení GBAS se dále dělí do více typů označované jako GAST (GBAS Approach Service Types). GAST je definována jako sada porovnaných palubních a pozemních výkonnostních a funkčních požadavků, které jsou určeny k poskytnutí přesného přiblížení s určitou výkonností. Jsou zavedeny čtyři typy služeb přiblížení: *GAST A*, *GAST B*, *GAST C* a *GAST D*, který je v současné době ve fázi návrhu. [22]

pomocí GEO satelitů. Pro provoz v GAST D, tedy do CAT III, jsou výše uvedené základní výstupní údaje však nedostačující a je třeba implementovat dodatečné monitorovací systémy a nové palubní algoritmy pro sledování integrity. [22]



Obrázek 22: Schéma zpracování dat avionikou GBAS. [autor] [20]

Nejčastěji jsou přijímače GBAS vyráběny jako víceúčelové, tzv. MMR (Multi Mode Receiver). Takové zařízení je zpravidla schopno přijmout více signálů z různých zařízení jako je například ILS, VOR, SBAS popř. MLS. V současné době již probíhají zkušební lety s MMR přijímači splňující podmínky GBAS v CAT II až III. V obchodní letecké dopravě se přijímač MMR stal preferovaným zařízením pro integraci systému GBAS a to hlavně z důvodu snadné instalace GBAS komponentů na stávající avioniku ILS. Navíc lze použít stávající anténu ILS nebo VOR pro příjem dat z VDB vysílače. Tím se elegantně odstraňuje potřeba instalace další antény.

Jedním z takových přijímačů je například přístroj *GLU-925* od společnosti Rockwell Collins (obrázek 23) či přijímač *INR* (Integrated Navigation Receiver) od společnosti Honeywell, který kromě GBAS podporuje také VOR navigaci a přistání s ILS a je jím standardně vybaven letoun Boeing 787. Přijímač *INR* tvoří základ pro *MMR-755*, který by měl podporovat GBAS v CAT II a III a je v současné době ve fázi provozních zkoušek. Vojenským *MLR 2000* podporujícím GBAS od společnosti BAE jsou vybaveny stíhací letouny *F-15* a *F-16*. Na rozdíl od přijímačů SBAS jde o velmi

nákladné systémy, a proto jsou v civilním letectví využívány hlavně na vysokokapacitních dopravních letounech. [27] [17] [28] [18]



Obrázek 23: Přijímač GLU-925. [4]

Nevýhody systému GBAS jsou do jisté míry podobné jako u systému SBAS: problém s vícecestným šířením, požadovaná dostupnost signálu, dostatečně zajištěný monitoring a zejména zajištění dostatečné integrity a včasné výstrahy pilota o špatné funkci systému. [27]

---

## ZÁVĚR

---

Přiblížení za pomoci SBAS nabízí navigační výkonnost umožňující přesné vedení letadla na přistání, nicméně *pouze* do CAT I. Přiblížení GBAS bude schopno dosáhnout požadavků pro CAT II a CAT III a dle mého názoru se stane hlavním nástupcem již zastaralého ILS. Pokud SBAS v budoucnu dosáhne výkonnosti CAT III (*LPV 50*), může se stát vhodnou alternativou i pro velká dopravní letadla přistávající na mezinárodních letištích.

Má prognóza vyplývající z práce je taková, že systém ILS bude na velkých letištích postupně nahrazován systémem GBAS, který byl přijat mezinárodními organizacemi jako primární systém pro přesné vedení letadla na přistání za pomoci GNSS. Tato úvaha plyne z nesporných výhod, které GBAS nabízí oproti ILS, který se postupně stává pro zvyšující letecký provoz nepřijatelný. GBAS odstraňuje všechna provozní omezení systému ILS, navíc zvýší efektivnost provozu, sníží dopad na životní prostředí a je finančně mnohem méně náročný. Díky efektivnosti, kterou GBAS přináší, se sníží zpoždění letů, spotřeba paliva a hluk v okolí letiště. Pracovníci *ŘLP* uvedli, že pořizovací náklady na systém ILS pro jeden směr na přistání se pohybují mezi 30 až 40 mil. korun. Pro jednu referenční stanici GBAS jsou náklady o jeden řád nižší, tedy 3 až 4 mil. korun.

Naproti tomu zavádění systému SBAS pro přiblížení se bude zatím týkat menších regionálních letišť, tak jak je tomu již v USA, kde jsou poskytovány služby WAAS a relativně nově v Evropě díky službě EGNOS. Jednou z největších předností SBAS je právě skutečnost, že nevyžaduje pozemní přibližovací zařízení na území či v okolí letiště. Z toho důvodu je na menších letištích značně nevýhodné zavádění systému GBAS. Původně hlavním motivem zavádění postupů APV je snížení počtu událostí *CFIT* a postupné rušení radionavigačních prostředků pro NPA. IATA uvádí, že mezi lety 2010 – 2014 došlo celkem k 31 smrtelným nehodám klasifikovaných jako *CFIT* (řízený let do terénu), které vedly k 707 obětem. Zaváděním postupů APV se rovněž sníží počet zrušených letů a zvýší se dostupnost

letišť za špatného počasí nebo letišť, kde nelze instalovat pozemní přibližovací zařízení.

Cílem výrobců avioniky GBAS je zajistit co nejsnadnější instalaci na stávající zařízení ILS. Protože GBAS je zpravidla zaváděn na velkých letištích, i jeho avionika se soustředí na velká dopravní letadla - převážně flotily Boeing a Airbus. Výrobci avioniky SBAS se zaměřují zejména na regionální či business letadla a také na soukromé letouny všeobecného letectví formou stand-alone přijímačů. Jak avionika SBAS, tak GBAS je konstruována tak, aby se její *interface* co nejvíce podobal již zažitému ILS, a to hlavně z důvodu snadného výcviku pilotů pro přechod na systémy GNSS.

---

## LITERATURA

---

- [1] Gps: Stránka o satelitní navigaci. <http://gps.slansko.cz/>, December 2011. online, 2016-02-16.
- [2] Receiver list - egnos portal. <http://egnos-portal.gsa.europa.eu/developer-platform/developer-toolkit/receiver-list>, 2011. online, 2016-02-07.
- [3] The almanac. <http://gpsworld.com/the-almanac/>, 2015. online, 2016-02-16.
- [4] Glu-925. rockwell collins. <https://www.rockwellcollins.com/>, 2015. online, 2016-07-06.
- [5] G450 lpv approach. [http://code7700.com/g450\\_lpv.html](http://code7700.com/g450_lpv.html), 2016. online, 2016-07-06.
- [6] Instrument landing system - ils. <http://instrument.landingssystem.com>, 2016. online, 2016-07-05.
- [7] European GNSS Agency. *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document*. ISBN 978-92-9206-021-3, Luxembourg, 2015.
- [8] Pacific Aviation. *Performance-based Navigation, Ground Based Augmentation System*. Honeywell, 2012.
- [9] K. Priselow J. Legenne J. Marechal M. Jeannot C. Taillandier, C. Capo. *User guide for EGNOS application developers*. EGNOS, 2011.
- [10] Operations circular. *Aircraft and Operators Approval For Approach Operations With Vertical Guidance/Barometric Vertical Navigation (APV/baro-VNAV)*. DIRECTOR GENERAL OF CIVIL AVIATION, 2014.
- [11] ESSP-SAS. Egnos user support. [https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new\\_egno\\_ops/?q=egnos\\_system\\_realtime](https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egno_ops/?q=egnos_system_realtime), 2016. online, 2016-02-16.
- [12] MAD Group. *Analýza využití SBAS přiblížení pro malá mezinárodní letiště: Závěrečná zpráva SGS12*. MAD Group, 2014.



- [13] ICAO. *Annex 10: Aeronautical Telecommunications. Volume I – Radio navigation Aids*. ICAO, 2006.
- [14] ICAO. *Doc 8168 OPS/611 Aircraft Operations: Procedures for Air Navigation Services - Volume II Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. ICAO, 2006.
- [15] ICAO. *Annex VI: AMC 20-27A Airworthiness Approval and Operational Criteria for RNP APPROACH (RNP APCH) Operations Including APV BARO-VNAV Operations*. ICAO, 2013.
- [16] ICAO. *Guide for ground based augmentation system implementation*. ICAO, 2013.
- [17] ICAO. *Doc 9849 AN/457 Global navigation satellite system (GNSS) manual*. ICAO, 2015.
- [18] Dave Jensen. *GBAS and GLS Avionics*. Honeywell, 2010.
- [19] Sam Penrod Allory Deiss Joe Mehaffey, Jack Yeazel. Altitude accuracy: Gps receiver information. <http://gpsinformation.net/main/altitude.htm>, 2015. online, 2016-03-28.
- [20] Andreas Lipp. *Ground Based Augmentation Systems - Technical and Operational Overview*. Eurocontrol, 2010. GBAS Implementation Workshop, ICAO EUR/NAT Paris.
- [21] P. Ptáček. *Výkonnost služby GNSS pro aplikace prostorové navigace civilního letectví v ČR*. Vedoucí práce prof. Ing. Dušan Kevický, CSc, 2014.
- [22] Bach Quoc. *Přesné přiblížení na přistání GNSS CAT II/III*. -, Brno, 2013. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ptáček.
- [23] Pat Reines. *Ground Based Augmentation System (GBAS) A New Era in Precision Navigation*. Honeywell, 2015.
- [24] RTCA. *RTCA DO-229D Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*. Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington, D.C, 2006.
- [25] Trimble's Planning Software. *Analýza četnosti výskytu družic GPS a GLONASS*. -, 2008.

- [26] Vladimír Soldán. *Letové postupy a provoz letadel*. ISBN 978-80-239-8595-5, Praha, 2007.
- [27] Stanislav Synchrona. *Analýza řízení přiblížení a přistání letadel podle GNSS. Diplomová práce. Vedoucí práce Doc. Ing. SLAVOMÍR VOSECKÝ, CSc, Brno, 2009.*
- [28] Thomas Imrich Tim Murphy. *Implementation and Operational Use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs) - A Component of the Future Air Traffic Management System*. IEEE, 2009. ISSN 0018-9219.
- [29] Paul Verhoef. *Service Definition Document Open Service*. EGNOS, 2009.
- [30] Úřad pro civilní letectví. *PŘEDPIS L 8168: Svazek I, ČÁST II – DÍL 4 – HLAVA 2*. ÚCL, 2007. 946/2006-220-SP/1.
- [31] Úřad pro civilní letectví. *PŘEDPIS L 8168, 946/2006-220-SP/1*. ÚCL, 2014.
- [32] Úřad pro civilní letectví. *PŘEDPIS L 8168: Svazek I, Část II, Díl 3, Hlava 1*. 946/2006-220-SP/1, Navigační 787 252 61 Jeneč, 2014.
- [33] Miroslav Čábelka. *Úvod do GPS*. CITT Praha Akademie kosmických technologií oblast Galileo, 2008.
- [34] s.p. Řízení letového provozu ČR. *Letecká informační služba: AIC A 9/13 Systém EGNOS*. ŘLP - DPLR, Navigační 787 252 61 Jeneč, 2013.