



## VYUŽITIE SATELITNEJ NAVIGÁCIE BEZPILOTNÝMI PROSTRIEDKAMI

**Jakub Rychvalský**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Branislav Kandra**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*This thesis investigates the application of satellite navigation in unmanned aerial vehicles (UAVs), with a focus on the influence of urban environments on navigation accuracy. The research analyzes the effects of signal obstruction caused by buildings and other structures, leading to positioning deviations. The experimental part involves real-world drone flights in urban areas, comparing the performance of UAVs equipped with standard and advanced GNSS receivers. Results demonstrated significant signal degradation in both cases, adversely affecting navigation precision. The thesis concludes by proposing mitigation strategies, including the integration of multiple GNSS constellations, pre-flight monitoring of satellite availability and geomagnetic conditions, the use of multipath-resistant antennas, and the adoption of AI-enhanced navigation systems.*

### Keywords

*Satellite navigation, Unmanned aerial vehicles, Navigation accuracy, Global Navigation Satellite Systems*

### 1. Úvod

Článok sa zaoberá využitím satelitnej navigácie v bezpilotných prostriedkoch (UAV) a vplyvom zastavaného prostredia na jej presnosť. Satelitné systémy ako GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou umožňujú autonómne operácie dronov, no v mestách dochádza k strate signálu a pozičným chybám. Praktická časť práce experimentálne overuje, ako budovy ovplyvňujú navigáciu dronov. Výsledky poukazujú na potrebu spoľahlivejších riešení pre bezpečnú prevádzku UAV v mestských podmienkach a navrhujú opatrenia na zlepšenie navigácie.

### 2. Teoretický úvod riešenej problematiky

Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS - Global Navigation Satellite System) tvoria základ pre navigáciu založenú na výkonnosti (PBN - Performance-based Navigation). Tieto systémy zabezpečujú bezproblémové, a efektívne riadenie nie len lietadla od momentu odletu až po priblíženie [1].

Globálny satelitný navigačný systém predstavuje súbor satelitných systémov, ktoré vysielať signály z vesmíru na určenie polohy v priestore a čase. Tento systém je nevyhnutný pre modernú navigáciu a lokalizáciu a zahŕňa rôzne národné systémy, medzi ktoré patrí:

- GPS (Global Positioning System) – USA
- Galileo - Európska únia
- GLONASS – Rusko
- BeiDou – Čína [1][2]

#### 2.1. Globálny polohový systém - GPS

Globálny polohový systém, známy pod skratkou GPS (Global Positioning System), je sofistikovaný navigačný systém, ktorý umožňuje určiť polohu na Zemi aj vo vesmíre. Tento systém bol

vyvinutý americkou armádou a jeho primárnym cieľom je poskytovať presné údaje o polohe, rýchlosti a čase [3].

#### Segmenty globálneho polohového systému - GPS

**Kozmická zložka - družice:** Systém GPS sa skladá z 24 družíc, z ktorých 21 je aktívnych a 3 slúžia ako záložné. Tieto družice sú umiestnené na šiestich obežných dráhach vo výške približne 20 200 km nad zemským povrchom a obiehajú našu planétu každých približne 12 hodín. Vysielať signály, ktoré obsahujú presný čas a ich polohu, čo je kľúčové pre určenie polohy prijímača na Zemi [9][10].

**Riadiaca zložka - monitorovacie stanice:** Tento segment zahŕňa hlavnú riadiacu stanicu a štyri monitorovacie pozemné stanice rozmiestnené po celom svete. Hlavná riadiaca stanica sa nachádza v Colorade, USA. Jej úlohou je sledovať a riadiť činnosť družíc, aktualizovať navigačné informácie a zabezpečiť presnosť časových údajov v družiciach [9][10].

**Užívateľská zložka - GPS prijímače:** Tieto zariadenia prijímajú signály z družíc a vykonávajú výpočty na určenie polohy, rýchlosti a času. Na presné určenie polohy je potrebné prijímať signály minimálne zo štyroch družíc súčasne aby určili presnú polohu používateľa v trojrozmernom priestore (X, Y, Z). Prijímače môžu byť jednokanálové alebo viackanálové [9][10].

#### 2.2. Galileo

Galileo je celosvetový navigačný systém, ktorý bol vyvinutý Európskou úniou s cieľom ponúknuť presnejšie a spoľahlivejšie navigačné služby v porovnaní s existujúcimi systémami, ako sú americké GPS a ruské GLONASS. Tento systém je určený na civilné využitie a je riadený civilnými autoritami, čo zabezpečuje jeho nezávislosť od vojenských aplikácií. Galileo je pod civilnou kontrolou a jeho služby sú dostupné od roku 2016 [12].

## Segmenty navigačného systému Galileo

Vesmírny segment – družice: Systém Galileo sa skladá z 30 družíc, ktoré sú rozmiestnené na troch obehových dráhach vo výške približne 23222 km nad zemou. Každá dráha obsahuje 10 družíc, pričom jedna z nich funguje ako záložná. Družice majú sklon dráhy 56° voči rovníku a sú navrhnuté tak, aby zabezpečili optimálne pokrytie signálom, predovšetkým v severných oblastiach Európy [16][17].

Pozemný segment – monitorovacie stanice: Tento segment pozostáva z monitorovacích staníc, ktoré sledujú a kontrolujú družice, a z kontrolných centier, ktoré riadia operácie systému. Hlavné riadiace centrum sa nachádza v Taliansku, zatiaľ čo administratívne centrum bolo presunuté do Prahy [16][17].

Užívateľský segment – prijímače: Užívateľský segment zahŕňa zariadenia a prijímače, ktoré sú schopné komunikovať so systémom Galileo. Tieto zariadenia budú schopné prijímať signály nielen z Galilea, ale aj z iných navigačných systémov, ako sú GPS a GLONASS [16][17].

## 2.3. GLONASS

Predstavuje ruský satelitný navigačný systém, ktorý funguje ako alternatíva k americkému GPS. Jeho vývoj sa začal v 70. rokoch 20. storočia, pričom prvý testovací satelit bol vypustený v roku 1982. Po rozpade Sovietskeho zväzu sa systém stretol s rôznymi problémami a jeho obnova sa začala v roku 2001. Plná operačná schopnosť bola dosiahnutá v októbri 2011 [20].

## Segmenty navigačného systému Glonass

Vesmírny segment – družice: Pozostáva z družíc, ktoré obiehajú okolo Zeme. V prípade systému GLONASS sa využíva 24 satelitov rozmiestnených na troch orbitálnych rovinách. Každá z týchto rovín je naklonená pod uhlom 64,8 stupňa a nachádza sa približne 19 100 kilometrov nad povrchom Zeme. V rámci každej orbitálnej roviny je umiestnených osem satelitov, ktoré sú symetricky rozložené v intervaloch po 45 stupňoch, čím sa zabezpečuje nepretržité pokrytie. Satelity dokončujú obežnú dráhu za približne 11 hodín a 15 minút, čo je kratší čas v porovnaní so satelitmi GPS, kvôli ich nižšej nadmorskej výške. Systém poskytuje presnosť určovania polohy v rozmedzí od 4,5 do 7 metrov [21].

Riadiaci segment – monitorovacie stanice: Zodpovednosť za monitorovanie a správu satelitov majú monitorovacie stanice. Skladajú sa zo siete pozemných monitorovacích staníc, ktoré sú prevažne umiestnené v Rusku, pričom centrálna kontrolná stanica sa nachádza v Krasnoznamenisku neďaleko Moskvy [21].

Používateľský segment – prijímače: Zahŕňa prijímače, ktoré zachytávajú signály zo satelitov GLONASS. Na rozdiel od GPS prijímačov, ktoré obvykle fungujú na jednej frekvencii, sú prijímače GLONASS navrhnuté na spracovanie viacerých frekvencií, čo umožňuje efektívne rozlišovanie medzi satelitmi. Táto komplexnosť prispieva k vyššej presnosti pri určovaní polohy [21].

## 2.4. BeiDou

Systém BeiDou (BDS) bol vyvinutý Čínou ako reakcia na americký systém GPS, pričom jeho história sa začala v polovici 90. rokov

20. storočia. Práce na systéme sa začali v roku 1994 a prvá družica BeiDou-1A bola vypustená v decembri 2000, pričom poskytovala služby iba v rámci Číny [24][25].

## Segmenty navigačného systému BeiDou

Vesmírny segment - Družice: BeiDou systém používa kombináciu družíc na strednom zemskom orbite, geosynchronnej orbite a geostacionárnej orbite. Celkovo systém pozostáva z 35 družíc, z čoho 27 je na MEO, 5 na GEO a 3 na IGSO [28].

Riadiaci segment - Master Control Station: Zodpovedná za riadenie konštelácie družíc a spracovanie meraní od Monitor Stations, aby sa vygenerovala navigačná správa [28].

Používateľský segment - Toto zahŕňa rôzne typy prijímačov a zariadení, ktoré môžu prijímať a spracovávať signály od družíc BeiDou. Užívateľské zariadenia môžu byť použité v rôznych aplikáciách, ako sú mobilné telefóny, automobilové navigácie, letecká navigácia a mnoho ďalších [28].

## 2.5. Rozširujúce systémy globálneho navigačného satelitného systému

Okrem základných globálnych navigačných systémov existujú aj rozširujúce navigačné satelitné systémy, ktoré zlepšujú presnosť a spoľahlivosť týchto základných systémov. Tieto systémy poskytujú korekčné signály a sú mimoriadne užitočné v aplikáciách, ktoré si vyžadujú vysokú presnosť, ako sú letectvo, geodézia, poľnohospodárstvo a ďalšie iné [29].

### 2.5.1. Systém s palubným rozšírením – ABAS

ABAS, čo je skratka pre Augmented Board-based Navigation System, predstavuje pokročilý navigačný systém, ktorý sa najčastejšie využíva v letectve. Tento systém rozširuje funkcie globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) prostredníctvom integrácie dodatočných palubných monitorovacích obvodov a využívania ďalších navigačných senzorov na palube. Takáto integrácia prispieva k zlepšeniu navigačného výkonu, najmä v oblasti monitorovania integrity [30].

### 2.5.2. Systém s družicovým rozšírením – SBAS

Satelitný systém (SBAS) je technologický systém, ktorý zlepšuje presnosť a spoľahlivosť globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). SBAS poskytuje dodatočné korekčné údaje, ktoré prispievajú k presnejšiemu určeniu polohy a zvyšujú integritu navigačných signálov [33].

### 2.5.3. Systém s pozemným rozšírením – GBAS

Systém pozemného rozšírenia (GBAS, Ground Based Augmentation System), je technológia, ktorá poskytuje diferenciálne korekcie a monitorovanie integrity signálov globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). Jeho hlavnou úlohou je podporovať presné prístupové operácie v civilnom letectve, pričom zvyšuje presnosť a spoľahlivosť navigačných informácií pre lietadlá v okolí letiska [34][35].

### 3. Súčasný stav riešenej problematiky

Táto časť je zameraná na popis súčasného stavu satelitnej navigácie pri bezpilotných prostriedkoch.

#### 3.1. Družicová navigácia pri bezpilotných prostriedkoch

Bezpilotné prostriedky a drony sú vybavené družicovou navigáciou, známe aj ako GPS drony. Využívajú globálny polohový systém (GPS) na určenie svojej polohy a navigáciu. Táto technológia umožňuje dronom okrem iného automaticky sa vracieť na miesto vzletu, stabilizovať let, sledovať ciele a mnoho ďalších funkcií.

#### Kvalita signálu GNSS pri UAV

**Presnosť:** Presnosť sa definuje ako miera zhody medzi predpokladanou alebo zmeranou polohou, časom alebo rýchlosťou prijímača GNSS a jeho skutočnými hodnotami. Chyba polohy GNSS predstavuje rozdiel medzi vypočítanou a aktuálnou polohou. Pre akúkoľvek vypočítanú polohu na konkrétnom mieste by mala byť pravdepodobnosť, že chyba polohy sa nachádza v rámci stanovených požiadaviek na presnosť, minimálne 95 %. Chyby polohy sú spôsobené obehmi družíc a chybovými charakteristikami GNSS, ktoré sa môžu v priebehu času meniť [33][34].

**Integrita:** Miera dôvery v informácie poskytované celým systémom je kľúčová pre ich považovanie za správne. Integrita systému zahŕňa jeho schopnosť poskytovať užívateľom včasné a presné varovania (výstrahy) v situáciách, keď by systém nemal byť použitý na konkrétnu činnosť alebo fázu letu. GNSS prijímač využíva RAIM (alebo AAIM) na overenie integrity prijatých signálov a na zistenie, či niektorý zo satelitov neposkytuje nepresné údaje. RAIM generuje varovanie, ktoré naznačuje možnosť výskytu neprijateľnej chyby. Pred každým letom na určené letisko je potrebné funkciu RAIM overiť. V prípade predpokladanej nedostupnosti RAIM, ak sa odhaduje, že signál nebude dostupný dlhšie ako 15 minút, budú vydané informácie prostredníctvom NOTAM [33][34].

**Kontinuita:** Schopnosť systému vykonávať svoju funkciu bez neplánovaných výpadkov počas predpokladanej prevádzky. Pravdepodobnosť straty dostupnosti signálu GPS v rámci nominálnej 24-slotovej konštelácie v dôsledku neplánovaného prerušenia nesmie presiahnuť  $2 \times 10^{-4}$  za hodinu [33][34].

**Dostupnosť:** Dostupnosť GNSS predstavuje percento času, počas ktorého je systém využívaný na navigáciu a poskytuje posádke, autopilotovi alebo iným riadiacim systémom spoľahlivé navigačné údaje [33][34].

#### 3.2. Rušenie GNSS signálu pri bezpilotných prostriedkoch

Rušenie signálu GNSS aj pri dronoch predstavuje problém, ktorý môže mať dopad na presnosť a dostupnosť globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS), ako sú GPS, GLONASS a Galileo. Toto rušenie sa delí do dvoch hlavných skupín: neúmyselné a zámerne rušenie.

##### 3.2.1. Neúmyselné rušenie GNSS signálu

Vzniká v dôsledku neúmyselného prenosu signálu v rámci frekvencií GNSS alebo v ich blízkosti, pričom zdrojom sú

vonkajšie faktory. Môže ísť o rôzne emisie z rôznych vysielateľov, ako sú televízne vysielanie, radar a iné.

#### Odraz GNSS signálu od budov

Rušenie signálu GNSS odrazom od budov nie je priamo spôsobom rušenia, avšak môže prispieť k problému s presnosťou určenia polohy. Odraz signálu GNSS od budov je jedným z kľúčových faktorov, ktoré ovplyvňujú presnosť navigácie v mestských oblastiach. Tento jav sa označuje ako multipath alebo viaccestné šírenie signálu. Keď signál GNSS (napríklad GPS alebo GLONASS) dorazí k prijímaču, môže byť odrazený od rôznych objektov v okolí, ako sú fasády budov alebo kovové strechy. Tieto odrazené signály môžu následne viesť k chybám v určení polohy a času letu od pôvodného signálu [35][36].

Riešenie odrazov GNSS signálov od budov:

- Špeciálne antény: Nasadenie antén s pravotočivou kruhovou polarizáciou môže pomôcť znížiť vplyv odrazených signálov
- Kvalitné vybavenie: Používanie vyššej kvality prijímačov a antén môže prispieť k zmierneniu účinkov multipath efektu.
- Technologické postupy: Zavedenie pokročilých technológií, ako sú inerciálne meracie jednotky (IMU), môže taktiež zlepšiť stabilitu merania aj v prostrediach s rušením [35][36].

#### Rušenie GNSS signálov geomagnetickými búrkami

Rušenie GNSS signálu môže byť spôsobené geomagnetickými búrkami, ktoré sú spôsobené interakciou slnečného vetra s magnetosférou Zeme. Tieto búrky môžu ovplyvniť presnosť GPS signálu, pretože zvyšujú hustotu elektrónov v ionosfére, čo spomaľuje signály zo satelitov a znižuje presnosť polohy [35][36].

Silná geomagnetická búrka môže ovplyvniť GNSS signál v niekoľkých spôsoboch:

- Presnosť signálu: Zvýšenie hustoty elektrónov v ionosfére počas geomagnetických búrok môže ohýbať signály zo satelitov, čo spomaľuje ich dosiahnutie GPS zariadení a znižuje presnosť polohy.
- Rušenie komunikácií: Búrky môžu narušiť rádiovú komunikáciu, čo môže ovplyvniť funkčnosť satelitných systémov, vrátane GPS.
- Výpadky signálu: Menšie výpadky satelitných sietí, vrátane GPS, môžu nastávať pri slabších búrkach.
- Polárne žiary: Hoci polárne žiary sú vizuálnym javom, súvisiacim s geomagnetickými búrkami, môžu byť indikáciou aktivity, ktorá môže ovplyvniť satelitné systémy [35][36].

Silnejšie geomagnetické búrky môžu mať vážnejšie dôsledky, ako napríklad zlyhanie satelitov alebo rozsiahle výpadky elektrickej energie [35][36].

Geomagnetické búrky môžu mať najčastejšie nasledujúce následky pre satelitné systémy:

- Poškodenie satelitov: Geomagnetické búrky môžu zvýšiť počet nabitých častíc v blízkosti satelitov, čo môže interferovať s elektronikou a viesť k ich zlyhaniu. Silné búrky môžu dokonca spôsobiť stratu satelitov v dôsledku zvýšeného trenia v horných vrstvách atmosféry.
- Narušenie komunikácií: Búrky môžu narušiť komunikáciu so satelitmi, čo môže ovplyvniť funkčnosť systémov ako je GPS, ktoré závisia na presných signáloch od satelitov.
- Zvýšené žiarenie: Satelity sa stávajú menej spoľahlivými kvôli zvýšenému žiareniu, čo môže narušiť ich citlivé komponenty.
- Chyby v lokalizácii: Geomagnetické búrky môžu spôsobiť chyby v lokalizácii a navigácii, pretože zmenia dráhu signálu zo satelitov [35][36].

### **Rušenie GNSS signálu prostredníctvom elektromagnetických vln**

Tento typ rušenia môže byť neúmyselný, ale aj zámerný.

Neúmyselné rušenie: Toto rušenie môže vzniknúť z rôznych elektrických zariadení, ktoré operujú na frekvenciách blízkyh GNSS systémom, ako sú rádiové spoje, televízne vysielacie alebo poškodené bázové stanice mobilných operátorov [74].

Úmyselné rušenie: Toto rušenie sa realizuje prostredníctvom rušičiek, ktoré emitujú elektromagnetické vlny na frekvenciách využívaných GNSS systémami, ako je napríklad 1575,42 MHz pre pásmo L1 GPS. Tieto rušičky môžu prehlušiť legitímne signály, čím znemožňujú GPS prijímačom určiť presnú polohu. Úmyselné rušenie sa využíva v bezpečnostných aplikáciách, ako je ochrana pred sledovaním alebo narušenie nepriateľských systémov [74].

Princíp rušenia: Rušičky GNSS fungujú tak, že vysielajú silné elektromagnetické signály na rovnakej frekvencii ako GNSS systémy. Tieto signály prekonávajú slabšie signály zo satelitov, čo bráni GPS prijímačom v získavaní presných údajov o polohe. Rušičky môžu využívať nepretržité rušenie (CW) alebo pulzné rušenie, ktoré môže byť ťažšie detekovateľné [74].

#### 3.2.2. Zámerné rušenie GNSS signálu

Zámerné rušenie je rušenie, ktoré môže byť spôsobené vojenskými konfliktmi, teroristickými činmi alebo nelegálnymi aktivitami organizovaných skupín, alebo jednotlivcov, ktorí sa snažia obísť sledovacie systémy založené na určovaní polohy pomocou GNSS. Tento typ rušenia má za cieľ zabrániť prijímaču v prijímaní správnych informácií. Existujú tri hlavné formy zámerného rušenia: Jamming, Spoofing a Meaconing [37].

### **Zámerné rušenie: Jamming**

Je to najjednoduchšia forma rušenia, pri ktorej GNSS prijímač nie je schopný zachytiť slabšie signály zo satelitov, pretože silnejšie signály vysielané z iného zariadenia na rovnakej frekvencii prekrývajú požadovaný signál z družice. Dôsledkom toho je nedostupnosť systému. Hoci tento typ rušenia zaraďujeme medzi zámerné, v niektorých prípadoch môže byť spôsobený aj nesprávne fungujúcim zariadením [37] [40].

V mnohých situáciách je "jamming" spôsobený úmyselne, avšak bez zámeru spôsobiť škodu. Sem patrí aj používanie zariadení na rušenie elektronických rádiových alebo telekomunikačných zariadení, známych ako "rušičky" alebo PPD (Personal Privacy Devices) [37][40].

Na prvý pohľad sa môže zdať, že signály vysielané na frekvencii GNSS, alebo v jej blízkosti majú za cieľ poškodiť užívateľov GNSS, avšak v prevažnej väčšine prípadov je motiváciou zabrániť sledovaniu používateľa rušičky [37][40].

### **Zámerné rušenie: Meaconing**

Druhým spôsobom úmyselného rušenia je vysielanie signálu na rovnakej frekvencii s oneskorením, čo spôsobuje zmätok v navigačnom systéme a vedie k nepresnému určeniu polohy. Tento typ rušenia je zložitejší ako „jamming“, pretože si vyžaduje znalosť polohy rušeného prijímača [41].

Ako funguje „meaconing“ ?

- Zachytenie signálu: Útočník využíva anténu a prijímač na zachytenie legitímneho GNSS signálu zo satelitov.
- Úprava alebo oneskorenie: Signál môže byť jednoducho "replaynutý" s minimálnym oneskorením, alebo môže byť upravený (napríklad zosilnený alebo mierne posunutý v čase).
- Opätovné vysielanie: Upravený signál sa následne vysielá späť do okolia s vyššou intenzitou než originálny satelitný signál, ktorý je slabší, keďže prichádza z obežnej dráhy.
- Prijímač je oklamáný: Dron, lietadlo alebo iné zariadenie prijíma tento falošný, no na prvý pohľad „legitímny“ signál a vypočíta nesprávnu polohu [41].

### **Zámerné rušenie: Spoofing**

Pri tomto type rušenia sú ciele vytvárané signály, ktoré sú neodlíšiteľné od pôvodných signálov zo satelitov. Prijímač spracováva tieto falošné signály rovnako ako skutočné, čo vedie k poskytnutiu nepravdivých informácií pre GNSS prijímač, a tým pádom k nesprávnej určenie polohy. Inteligentné „spoofery“ dokážu sledovať polohu cieľového prijímača a využiť tieto informácie na generovanie dostatočne silných GNSS signálov, ktoré sa pôvodne zhodovali so skutočnými (slabšími) signálmi v danom čase [42].

Tým získavajú úplnú kontrolu nad zariadením. S pomocou takýchto systémov je možné prevziať kontrolu nad autonómnymi bezpilotnými systémami a donútiť ich pristáť na vopred určenom mieste [42].

„Spoofing“ predstavuje väčšie nebezpečenstvo než rušenie typu „jamming“, pretože prijímač nie je schopný identifikovať takýto útok, a preto nemôže upozorniť používateľa na to, že jeho výpočty a poskytované navigačné údaje sú nesprávne. Tento typ útoku môže byť realizovaný z akéhokoľvek miesta, aj niekoľko kilometrov vzdialeného, pričom jediným obmedzením je zakrivenie Zeme. V letectve, ak dôjde k rušeniu, je možné porovnávať výsledky GNSS prijímača s inými systémami na palube lietadla. Zabezpečiť GNSS prijímač lietadla bez povšimnutia posádky je v súčasnosti takmer nemožné [42].

Pri "spoofingu" a "meaconingu" hrozí riziko ohrozenia bezpečnosti len v prípade, že piloti nevenujú dostatočnú pozornosť. V iných situáciách akékoľvek rušenie znamená, že GNSS aplikácie nie sú použiteľné, čo môže mať značné ekonomické a ekologické dôsledky. Napríklad, ak sa GNSS využíva na priblíženie k pristátiu a na letisku príchodu nie je k dispozícii konvenčná alternatíva, môže to viesť k nutnosti presmerovania na náhradné letisko [42][43].

### Nezamýšľané rušenie GNSS signálu

Vojnové konflikty: Vojna môže ovplyvniť signál GNSS viacerými spôsobmi, najmä v súvislosti s rušením a podvrhnutím signálu. Tieto aktivity sa stávajú častejším problémom, najmä v oblastiach postihnutých konfliktmi [44].

## 4. Metodika a metódy skúmania

V úvodnej časti sa popisujú základné princípy fungovania GNSS a ich využitie v rôznych oblastiach. Ďalej je analyzované súčasné využívanie GNSS v bezpilotných prostriedkoch, so zameraním na presnosť, spoľahlivosť a obmedzenia.

Hlavným cieľom práce je skúmať vplyv zastavaného prostredia na presnosť a spoľahlivosť satelitnej navigácie UAV, najmä v podmienkach s výškovými prekážkami a zdrojmi rušenia. Zároveň sa hodnotí miera degradácie signálu a riziká spojené s prevádzkou dronov v mestských oblastiach, pričom sú navrhnuté možné riešenia na minimalizáciu týchto vplyvov.

Praktická časť výskumu zahŕňala:

- Výber testovacích lokalít (Žilinská univerzita a letisko Dolný Hričov)
- Prípravu UAV (DJI Mavic 2 Pro a DJI Mini 4 Pro)
- Realizáciu stacionárnych letov na meranie vplyvu prostredia na GNSS signál
- Zber, archiváciu a spracovanie údajov o sile signálu, počte satelitov a presnosti polohy

Získané dáta boli analyzované pomocou vizualizácie rušenia, porovnania lokalít a kvalitatívneho zhodnotenia problémových oblastí. Výsledky slúžia ako základ pre návrh opatrení na zlepšenie navigácie UAV v zastavaných oblastiach.

## 5. Praktický výskum a výsledky

Praktický výskum vplyvu rušenia GNSS signálu v zastavaných oblastiach sme realizovali pomocou dvoch dronov s rozdielnou

navigačnou výbavou: DJI Mini 4 Pro a DJI Mavic 2 Pro. Tieto drony nám umožnili porovnať správanie pri rôznych úrovniach satelitnej dostupnosti a rušenia v zastavaných oblastiach, kde často dochádza k odrazom signálu, zníženej viditeľnosti družíc alebo ich krátkodobému výpadku.

### Dron: DJI Mini 4 Pro

DJI Mini 4 Pro je výkonný, ľahký dron s hmotnosťou len 249 g, ktorý v mnohých krajinách nevyžaduje registráciu ani pilotné školenie. Vyznačuje sa kompaktnými rozmermi, 48 Mpx kamerou so 4K HDR videom a trojosovým gimbalom pre plynulé zábery. Disponuje výdržou batérie do 34 minút, maximálnou rýchlosťou 57,6 km/h a dosahom ovládania až 10 km. Bezpečnosť zvyšuje všesmerové snímanie prekážok a systém APAS na ich aktívne obchádzanie. Prenos obrazu zabezpečuje moderný systém OcuSync 4. Dron podporuje viaceré inteligentné letové režimy vrátane ActiveTrack 360° a waypointov, a ovláda sa cez DJI RC-N2 alebo RC 2. Pre navigáciu využíva systémy GPS, Galileo a BeiDou, čo mu umožňuje stabilný let aj v náročných podmienkach, pričom dokáže zachytiť signály z viac ako 20–30 družíc súčasne [71].

### Dron: DJI Mavic 2 Pro

DJI Mavic 2 Pro je profesionálny dron vybavený 1-palcovým 20 Mpx CMOS senzorom od Hasselblad, nastaviteľnou clonou f/2.8–f/11 a schopnosťou nahrávať 4K video pri 100 Mbps. Kamera je stabilizovaná trojosovým gimbalom pre plynulé zábery. Dron dosahuje rýchlosť až 72 km/h, letí do 31 minút na jedno nabitie a zvládne výšku až 6000 metrov. Disponuje všesmerovým snímaním prekážok pre zvýšenú bezpečnosť. Aj napriek robustnej výbave je kompaktný a váži 907 g. Pre navigáciu využíva systémy GPS a GLONASS, ktoré mu umožňujú prijímať signály z 15–25 satelitov súčasne, čím zabezpečuje stabilný let a presné určenie polohy aj v náročných podmienkach [72].

### 5.1. Analýza rušenia GNSS signálu v zastavaných prostrediach

Cieľom praktického výskumu bolo analyzovať správanie GNSS signálu v zastavaných oblastiach pri použití bezpilotných lietajúcich prostriedkov. Hlavnou úlohou bolo zistiť, do akej miery je satelitná navigácia narušená v prostredí s stavebnými prekážkami a aké sú prejavy tohto rušenia pri statickej prevádzke UAV.

#### 5.1.1. Skúšobné meranie v areáli letiska Žilina

Prvé testovacie meranie sa uskutočnilo v areáli letiska Žilina, v blízkosti rozsiahlej plechovej konštrukcie – železného hangára s výškou približne 6 metrov a dĺžkou viac ako 20 metrov. Drony boli počas merania umiestnené staticky na zemi a fyzicky sa nepohybovali. Napriek tomu bol na displeji ovládacieho zariadenia pozorovaný zdanlivý pohyb UAV, čo naznačuje výskyt rušenia a odrazov satelitného signálu spôsobených blízkosťou hangára.

### **Priebeh merania s UAV DJI Mavic 2 Pro – letisko Žilina**

Testovanie s bezpilotným prostriedkom DJI Mavic 2 Pro prebiehalo v statickej konfigurácii po dobu 2 126 sekúnd. Počas tejto doby boli zaznamenávané polohové údaje s frekvenciou každé 4 milisekundy. Vizualizácia údajov na ovládacom zariadení odhalila zdanlivý pohyb UAV, hoci fyzicky zostával na jednom mieste. Tento jav potvrdil existenciu nepresností v určovaní polohy, spôsobených odrazmi a rušením GNSS signálu v danej lokalite. Detailné vyhodnotenie záznamu ukázalo, že dron vykazoval zmeny v polohe, aj keď sa počas merania nepohol.

### **Priebeh merania s UAV DJI Mini 4 Pro – letisko Žilina**

Vzhľadom na to, že prvý použitý dron nepodporoval všetky dostupné GNSS systémy, prešlo sa k meraniu s UAV schopným využívať širšie spektrum navigačných systémov. Meranie prebiehalo na rovnakom mieste a za rovnakých podmienok ako predchádzajúci test. Postup bol identický.

Počas merania trvajúceho 2 087 sekúnd sa polohové údaje zaznamenávali každé 4 milisekundy. Vizualizácia dát odhalila, že napriek využitiu širšieho spektra GNSS systémov bolo zaznamenané výrazné rušenie signálu. Tento jav potvrdil, že prítomnosť budov v blízkosti UAV má negatívny vplyv na kvalitu satelitného príjmu, čo predstavuje významné obmedzenie pri prevádzke v zastavaných oblastiach.

Detailný pohľad na trajektóriu ukázal falošné zobrazenie pohybu UAV, hoci dron sa nachádzal približne 10 metrov od kovového hangára a počas celého merania zotrval v statickej polohe. Tento výsledok ďalej potvrdzuje citlivosť GNSS prijímačov na viacnásobné odrazy signálov v prostredí so zvýšeným množstvom prekážok.

#### **5.1.2. Meranie v areáli Žilinskej Univerzity**

Aby sme jednoznačne potvrdili prítomnosť rušenia GNSS signálu a overili jeho intenzitu, vykonali sme merania v areáli Žilinskej univerzity. Vybrané miesto je obklopené budovami z troch strán, čo vytvára ideálne podmienky na testovanie účinkov zníženej dostupnosti satelitného signálu v mestskom prostredí.

Na testovanie vplyvu zastavaného prostredia na presnosť GNSS signálu boli použité rovnaké typy bezpilotných prostriedkov ako v areáli letiska Žilina. Drony boli nastavené s identickými prevádzkovými parametrami a umiestnené približne do stredu parkoviska v areáli Žilinskej univerzity. Počas celého merania zostali v statickej polohe. Cieľom bolo overiť, či aj v tejto lokalite dôjde k zobrazeniu chybných trajektórií letu, aj keď sa bezpilotné prostriedky fyzicky nepohybovali. Testovaná lokalita bola ohraničená budovami z troch strán, pričom ich odhadovaná výška sa pohybovala medzi 13 a 15 metrami, čo vytváralo podmienky pre možný výskyt väčšieho rušenia GNSS signálu.

### **Priebeh merania s UAV DJI Mavic 2 Pro – Žilinská Univerzita**

V rámci ďalšieho merania bol dron opäť nastavený do letovej konfigurácie s identickými parametrami ako pri predchádzajúcich pokusoch. UAV bol umiestnený do stredu parkoviska, kde zotrval v statickej polohe po dobu 4 470 sekúnd. Polohové údaje sa zaznamenávali každé 4 milisekundy s cieľom

detailne analyzovať prípadné odchýlky spôsobené rušením GNSS signálu.

Analýza zaznamenaných dát ukázala výrazné rušenie GNSS signálu, ktoré bolo ešte intenzívnejšie než počas predchádzajúcich meraní na letisku. Napriek tomu, že dron zostával v jednej statickej polohe, zaznamenaná trajektória vykazovala výrazné odchýlky, čo potvrdzuje značné narušenie presnosti satelitnej navigácie v zastavanom mestskom prostredí.

### **Priebeh merania s UAV DJI Mini 4 Pro – Žilinská Univerzita**

Na posledné meranie bol použitý dron DJI Mini 4 Pro, ktorý je vybavený širším spektrom GNSS prijímačov. Cieľom testu bolo zistiť, či širšia GNSS podpora dokáže zmierniť vplyv rušenia v mestskom prostredí. Konfigurácia zariadenia a miesto merania zostali rovnaké ako pri predchádzajúcich pokusoch. UAV zotrval v statickej polohe 3 316 sekúnd so záznamom polohy každé 4 milisekundy.

Analýza dát ukázala, že napriek širšiemu spektru GNSS prijímačov bolo rušenie signálu výrazné. Zaujímavým javom bolo, že hneď na začiatku merania systém predpokladal polohu dronu na streche budovy, aj keď sa fyzicky nachádzal v strede parkoviska.

Aby sme dosiahli úplné a presné výsledky, zohľadnili sme aj možný vplyv geomagnetických búrok. Skontrolovali sme, či počas merania neboli príliš intenzívne, pretože by to mohlo výrazne ovplyvniť naše výsledky.

Na základe analýzy dát z aplikácie Air Data a zobrazeného Keplerovho indexu na obrázku môžeme potvrdiť, že v čase merania bol tento index nízky. To naznačuje, že geomagnetické búrky nemali vplyv na GNSS signály. Môžeme teda s istotou povedať, že s rastúcim počtom budov a zastavaných oblastí sa zvyšuje aj rušenie GNSS signálov. Taktiež sme vylúčili možnosť, že by kvalitnejší dron s lepšími GNSS prijímačmi mohol významne znížiť rušenie. Použili sme dva drony – jeden s horšími prijímačmi a druhý s lepšími a výsledky sa ukázali ako prakticky rovnaké.

### **5.2. Výsledky a možnosť riešení**

Pri prevádzke bezpilotných prostriedkov v mestských oblastiach často dochádza k výraznému narušeniu signálu GNSS, najmä v dôsledku odrazov od budov, čo je známe ako „multipath efekt“. Tento jav bol opakovane zaznamenaný počas praktických meraní s rôznymi typmi dronov.

Na základe analýzy zozbieraných dát sme zistili, že ide o vážny problém, ktorý by mohol v budúcnosti negatívne ovplyvniť bezpečnú a spoľahlivú integráciu dronov do bežnej prevádzky, najmä v hustých mestských oblastiach s vysokými budovami.

V nasledujúcej časti práce sú preto predstavené vybrané riešenia, ktoré by mohli pomôcť zmierniť alebo úplne odstrániť tento problém:

#### **Využitie viacerých GNSS systémov súčasne**

Moderné GNSS prijímače, ktoré dokážu spracovávať signály z viacerých globálnych navigačných systémov, ako sú GPS,

Galileo, GLONASS a BeiDou, teoreticky zvyšujú spoľahlivosť určenia polohy. Využívajú totiž väčší počet dostupných satelitov z rôznych konštelácií, čo môže byť obzvlášť výhodné v mestských oblastiach.

V rámci praktického testovania bol nasadený dron vybavený prijímačom, ktorý podporuje viacero GNSS systémov. Avšak výsledky nepreukázali výrazné zlepšenie presnosti alebo stability signálu v porovnaní s bežnými prijímačmi. Napriek tomu nemožno túto možnosť úplne vylúčiť; predpokladá sa, že dron, ktorý by efektívne integroval všetky dostupné globálne navigačné systémy, by mohol v budúcnosti prispieť k zlepšeniu tejto situácie.

### **Monitorovanie dostupnosti satelitov a geomagnetických podmienok pred letom**

Jedným z efektívnych preventívnych opatrení na zníženie rizika výpadkov alebo rušenia GNSS signálu je sledovanie dostupnosti satelitov a aktuálnych geomagnetických podmienok pred samotným letom. Existuje množstvo aplikácií a nástrojov, ktoré umožňujú vizualizáciu počtu viditeľných satelitov pre konkrétnu lokalitu a čas. Medzi najznámejšie patrí GNSS View, GNSSToolbox a Trimble GNSS Planning Online. Na základe údajov z týchto nástrojov je možné naplánovať let tak, aby sa uskutočnil len vtedy, keď je zabezpečený dostatočný počet satelitov z rôznych GNSS konštelácií. Týmto spôsobom sa zvyšuje pravdepodobnosť kvalitného príjmu signálu a súčasne sa minimalizuje riziko rušenia alebo straty pozície počas letu.

Ďalším významným faktorom, ktorý môže ovplyvniť presnosť GNSS, je geomagnetická aktivita. Zvýšená solárna alebo geomagnetická aktivita môže viesť k výpadkom a chybám v lokalizácii. Preto je pred letom vhodné sledovať aktuálne predpovede geomagnetických podmienok. V rámci nášho praktického výskumu sme tieto údaje priebežne monitorovali a zaznamenali ich potenciálny vplyv na kvalitu signálu počas testovacích letov.

### **Použitie GNSS antén s potlačením multipath efektu**

Multipath efekt je jav, pri ktorom signál z GNSS satelitu nedosahuje prijímač priamo, ale je odrazený od okolitých objektov, ako sú budovy. Tento odrazený signál môže spôsobiť chyby v meraní polohy, pretože dochádza k oneskoreniam a fázovým posunom.

Na riešenie tohto problému sa používajú špecializované GNSS antény, ktoré sú navrhnuté tak, aby potláčali signály prichádzajúce z nízkych uhlov, teda tie, ktoré sú často odrazené od blízkych objektov. Tieto antény zvyčajne využívajú technológie, ako sú širokopásmové filtre, ktoré selektívne potláčajú signály prichádzajúce z nevhodných smerov, čím sa minimalizuje vplyv odrazov na merania polohy.

Existuje niekoľko typov antén, vrátane antén s uhlovým filtrovaním, ktoré sa zameriavajú na prísne filtrovanie signálov z horizontálneho uhla. Tieto antény zlepšujú kvalitu príjmu a minimalizujú chyby spôsobené multipath efektom. Sú obzvlášť užitočné v mestských oblastiach, kde sú odrazy signálov bežné a môžu negatívne ovplyvniť presnosť navigácie bezpilotných prostriedkov.

Použitie týchto antén vedie k výraznému zlepšeniu presnosti určovania polohy, čím sa znižuje riziko navigačných chýb a zvyšuje sa celková spoľahlivosť systému GNSS. To je kľúčové pre bezpečnú prevádzku dronov v náročných podmienkach.

### **Využitie vizuálnej odometry a lidarovej navigácie ako alternatíva ku GNSS**

V prostrediach s obmedzenou dostupnosťou, alebo spoľahlivosťou GNSS signálu je možné zvýšiť autonómiu a presnosť lokalizácie dronu pridaním sensorov, ktoré umožňujú vizuálnu odometriu alebo lidarovú navigáciu. Tieto technológie fungujú nezávisle od satelitného signálu a predstavujú efektívnu alternatívu v takzvaných „náročných GNSS prostrediach“.

Vizuálna odometria využíva kamery, buď mono, alebo stereo, ktoré neustále snímajú okolie dronu. Algoritmus analyzuje po sebe nasledujúce snímky, vyhodnocuje zmeny v perspektíve a vypočítava pohyb zariadenia voči okolitému prostrediu. Tento princíp umožňuje nepretržité určovanie pozície a orientácie dronu bez potreby externej navigačnej infraštruktúry.

Podobne lidarová navigácia, ktorá využíva laserový senzor na mapovanie okolia v reálnom čase, poskytuje spoľahlivé riešenie v oblastiach, kde je GNSS signál nedostatočný, alebo nedostupný, ako sú úzke ulice, priestory pod mostami či interiéry budov.

### **Navigácia podporená umelou inteligenciou**

Algoritmy umelej inteligencie (AI) majú schopnosť predpovedať a opravovať chyby v určení polohy na základe analýzy historických letových dát, správania signálu v konkrétnych podmienkach a kombinácie údajov z rôznych sensorov. Tieto systémy sú navrhnuté tak, aby sa neustále učili a zlepšovali svoju schopnosť identifikovať situácie, v ktorých dochádza k rušeniu signálov. Následne dokážu v reálnom čase upravovať spracovanie údajov. Cieľom je minimalizovať chyby pri určovaní polohy a zabezpečiť vyššiu presnosť a stabilitu navigácie, aj v náročných podmienkach.

### **Spolupráca s pozemnou infraštruktúrou**

V mestách sa čoraz častejšie uplatňuje technológia, ktorá umožňuje dronom komunikovať s inteligentnými zariadeniami na zemi, ako sú senzory umiestnené na budovách alebo špeciálne stanice poskytujúce presnejšie informácie o ich polohe. Tieto systémy zlepšujú orientáciu dronov a zvyšujú ich presnosť. Okrem toho môžu byť riadené centrálnou pomocou umelej inteligencie (AI), ktorá spracováva a analyzuje tieto dáta v reálnom čase.

## **6. Záver**

V teoretickej časti bol podrobne opísaný princíp fungovania globálnych navigačných systémov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), ich vývoj, rozdiely a faktory ovplyvňujúce kvalitu signálu, ako sú atmosférické podmienky či multipath efekt. Nasledovala časť zameraná na špecifiká využívania GNSS technológií v dronoch, vrátane ich výhod i limitácií v zložitom mestskom prostredí. Praktická časť práce sa zamerala na experimentálne merania v areáli letiska Žilina a v areáli

Žilinskej univerzity, ktoré potvrdili výrazné rušenie signálu v prítomnosti budov. Výsledky ukázali, že v mestských oblastiach môže dochádzať k výrazným odchýlkam v určovaní polohy, čo predstavuje riziko pre bezpečnú prevádzku dronov. V závere boli navrhnuté riešenia na zmiernenie týchto problémov, vrátane využitia viacerých GNSS systémov, monitorovania podmienok pred letom, použitia moderných antén a zapojenia umelej inteligencie. Práca podčiarkuje potrebu ďalšieho výskumu pre zvýšenie spoľahlivosti a bezpečnosti bezpilotných systémov v urbanizovanom prostredí.

## PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Inteligentné operačné a spracovateľské systémy pre UAV, s ITMS kódom projektu 313011V422, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Referencie

- [1] Support. Polar (2025) Online. Dostupné na: <https://support.polar.com/en/what-is-gnss> [citované 2024-11-03].
- [2] ABS. (2023) Online. Dostupné na: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/vyuzitie-gnss-technologie-pri-dopravných-stavbách> [citované 2025-01-03].
- [3] Elpool. (bez dáta) Online. Dostupné na: <https://www.elpool.sk/vyuzitie-gps-glonass-pri-zabezpečovacích-systemoch/> [citované 2024-11-11].
- [4] Techbox. (2016) Online. Dostupné na: <https://www.techbox.sk/co-je-gps-globalny-pozicny-system> [citované 2024-12-05].
- [5] Vladimír Sedlák (2020) GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: <https://unibook.upjs.sk/img/cms/2020/pf/globalne-navigacne-systemy.pdf> [citované 202-12-25].
- [6] EUSPA (bez dáta). Edas-maritime. Online. Dostupné na: <https://edas-maritime.gsc-europa.eu/european-gnss/what-gnss> [citované 2025-01-07].
- [7] UPJŠ (bez dáta). Online. Dostupné na: [https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/uge\\_web\\_fil/es/studium/ucebnice\\_skripta/2019\\_051\\_PF\\_GlobalneNavigacne\\_VNUTRO.pdf](https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/uge_web_fil/es/studium/ucebnice_skripta/2019_051_PF_GlobalneNavigacne_VNUTRO.pdf) [citované 2025-01-08].
- [8] Európska komisia (2021). Desiat rokov od spustenia projektu Galileo. Online. Dostupné na: [https://slovakia.representation.ec.europa.eu/news/desat-rokov-od-spustenia-projektu-galileo-2021-11-09\\_sk](https://slovakia.representation.ec.europa.eu/news/desat-rokov-od-spustenia-projektu-galileo-2021-11-09_sk) [citované 2025-01-10].
- [9] ČTK, SITA (2016). Pravda. Online. Dostupné na: <https://ekonomika.pravda.sk/ludia/clanok/413938-europsky-navigacny-system-galileo-je-pripraveny-na-start/> [citované 2025-01-12].
- [10] TASR (2019). Pravda. Online. Dostupné na: <https://ekonomika.pravda.sk/ludia/clanok/525282-navigacny-system-galileo-vyuziva-uz-miliarda-pouzivatelov-smartfonov/> [citované 2025-01-12].
- [11] Publi (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://publi.cz/books/231/05.html> [citované 2025-01-13].
- [12] Techbox (2017). Čo je to GLONASS? Ruská odpoveď na GPS. Online. Dostupné na: <https://www.techbox.sk/214594> [citované 2025-01-15].
- [13] Elpool (bez dáta). Využitie gps glonass pri zabezpečovacích systémoch. Online. Dostupné na: <https://www.elpool.sk/vyuzitie-gps-glonass-pri-zabezpečovacích-systemoch/> [citované 2025-01-15].
- [14] Fodor (bez dáta). Online. Dostupné na: [http://www.fodor.sk/spectrum/druzicove\\_rns.htm](http://www.fodor.sk/spectrum/druzicove_rns.htm) [citované 2025-01-16].
- [15] UPJŠ (bez dáta). Online. Dostupné na: [https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS\\_2023/GNSS\\_5.pdf](https://ugeshare.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS_2023/GNSS_5.pdf) [citované 2025-01-18].
- [16] Peter Spolnik (2024). Riziko používania čínskeho satelitného navigačného systému BeiDou. Online. Dostupné na: [https://www.epochtimes.sk/riziko-pouzivania-cinskeho-satelitneho-navigacneho-systemu-beidou-ako-zistit-ci-vas-telefon-prijima-jeho-signaly\\_12328.html](https://www.epochtimes.sk/riziko-pouzivania-cinskeho-satelitneho-navigacneho-systemu-beidou-ako-zistit-ci-vas-telefon-prijima-jeho-signaly_12328.html) [citované 2025-01-19].
- [17] Pravda (2023) Online. Dostupné na: <https://stan021.blog.pravda.sk/2023/05/18/navigacne-satelity-beidou-po-3-rokoch-vitaju-noveho-silnejšieho-clena/> [citované 2025-01-20].
- [18] Michaela Mikulášiková (bez dáta). NAVIGAČNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: <https://drepo.uniza.sk/server/api/core/bitstreams/30d1bbd9-61df-44c7-b8a6-e2bf5688cb55/content> [citované 2025-01-22].
- [19] Technická univerzita v Košiciach (bez dáta). Regionálne centrum leteckej dopravy SR. Online. Dostupné na: [https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Zaverecna\\_sprava\\_Aktivita\\_1.5.pdf](https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Zaverecna_sprava_Aktivita_1.5.pdf) [citované 2025-01-24].
- [20] P.B. Ober (bez dáta). Online. Dostupné na: <http://www.integricom.nl/documents/ION%20GPS%201996%20New%20Metrics%20for%20RAIM%20performance%20.pdf> [citované 2025-01-24].
- [21] GMV (2011). Online. Dostupné na: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Aviation\\_Applications](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Aviation_Applications) [citované 2025-01-25].
- [22]
- [23] Jakub Machuta (2016). Priblížení SBAS, jeho avionika a porovnaní s ostatnými systémy. Online. Dostupné na: <https://core.ac.uk/download/pdf/47184753.pdf> [citované 2025-01-26].

- [24] Aim.rlp (2023). Online. Dostupné na: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10i/data/effective/dodD.pdf> [citované 2025-01-28].
- [25] Skybrary (bez dáta). Ground Based Augmentation System (GBAS). Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/ground-based-augmentation-system-gbas> [citované 2025-01-28].
- [26] GMV (2011). Online. Dostupné na: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based-Augmentation-System-\(GBAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based-Augmentation-System-(GBAS)) [citované 2025-01-30].
- [27] Vladimír SEDLÁK (2019). GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY pre geoinformatiku. Online. Dostupné na: [https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/uge\\_web\\_files/studium/ucebnice\\_skripta/2019\\_051\\_PF\\_GlobalneNavigacne\\_VN\\_UTRO.pdf](https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/uge_web_files/studium/ucebnice_skripta/2019_051_PF_GlobalneNavigacne_VN_UTRO.pdf) [citované 2025-02-02].
- [28] Ing. PISCA Peter, PhD. (2005). GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SYSTÉMY. Online. Dostupné na: [https://svf.uniza.sk/kgd/subory/skripta/GNSS/Globalne\\_navigacne\\_systemy.pdf](https://svf.uniza.sk/kgd/subory/skripta/GNSS/Globalne_navigacne_systemy.pdf) [citované 2025-02-02].
- [29] Mingyu Kim, Jeongrae Kim (2021). Online. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/1/151> [citované 2025-02-03].
- [30] Chris Shieff (2021) What's the deal with GLS approaches?. Online. Dostupné na: <https://ops.group/blog/whats-the-deal-with-gls-approaches/> [citované 2025-02-04].
- [31] Skybrary (bez dáta). GBAS Landing System (GLS). Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/gbas-landing-system-gls> [citované 2025-02-04].
- [32] Engineeringpilot. (2022). Online. Dostupné na: <https://www.engineeringpilot.com/post/gls-a-landing-system-struggling-to-take-off> [citované 2025-02-06].
- [33] J. Sanz Subirana, JM. Juan Zornoza, M. Hernandez-Pajares (2011). GNSS signal. Online. Dostupné na: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_signal](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal) [citované 2025-02-07].
- [34] VUT v Brne. (2011). Online. Dostupné na: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/42738.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42738.pdf) [citované 2025-02-10].
- [35] Monika Tináková (2017). Online. Dostupné na: <https://vedanadosah.cvtisr.sk/technika/informacne-a-komunikacne-technologie/gps-global-positioning-system/> [citované 2025-02-10].
- [36] NÚKIB (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://nukib.gov.cz/cs/galileo-prs/program-galileo/> [citované 2025-02-12].
- [37] BC. Ivana Stolárová (2016). TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI VÝŠEK MĚŘENÝCH TECHNOLOGIÍ GNSS. Online. Dostupné na: <https://theses.cz/id/oy5dxn/32347.pdf> [citované 2025-02-13].
- [38] The Economist (bez dáta). No jam tomorrow. Online. Dostupné na: <https://www.economist.com/news/technology-quarterly/18304246-navigation-usessatellite-> [citované 2025-02-14].
- [39] Ján Veľčický (2023). DETEKCIA RUŠENIA SIGNÁLU GNSS NA LETISKÁCH. Online. Dostupné na: <https://drepo.uniza.sk/server/api/core/bitstreams/7a28341e-ab96-4c0c-8a16-1e588b10f01d/content> [citované 2025-02-15].
- [40] Spionsvet (bez dáta). RUŠIČKY SIGNÁLU. Online. Dostupné na: <https://www.spionsvet.sk/rusicky.k125.html> [citované 2025-02-15].
- [41] Alex Carter (bez dáta). GNSS Jamming. Online. Dostupné na: <https://www.szmidjammer.com/cs/blog/gnss-jamming/> [citované 2025-02-20].
- [42] Silvio Semanjski, Ivana Semanjski, Wim De Wilde, Alain Muls (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7070933/> [citované 2025-02-20].
- [43] Hexagon (bez dáta). Spoofing. Online. Dostupné na: <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss-threats/spoofing> [citované 2025-02-25].
- [44]
- [45] Travis Turgeon (2024). GNSS Spoofing. Online. Dostupné na: <https://www.gnssjamming.com/post/gnss-spoofing> [citované 2025-02-27].
- [46] Peter Vnuk (2024). Rušenie navigačných signálov ovplyvňuje aj bežných ľudí. Online. Dostupné na: <https://www.trend.sk/technologie/gps-vojna-rusenie-navigacnych-signalov-ovplyvnuje-aj-beznych-ludi> [citované 2025-03-02].
- [47] Haijun Huang, Kewen Sun (bez dáta). Online. Dostupné na: [https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS\\_2023/GNSS\\_3\\_4.pdf](https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/Vyucba/GNSS/GNSS_2023/GNSS_3_4.pdf) [citované 2025-03-02].
- [48] GPS.GOV (2012). Online. Dostupné na: <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2012/03/WSTS/> [citované 2025-03-04].
- [49] Magdaléna Kohoutová (2024). Online. Dostupné na: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/svet/polsko-zasahly-vypadky-gps-signalu-spekuluje-se-ze-je-za-nimi-rusko-345114> [citované 2025-03-06].

- [50] Filip Maxa (2024). Tajomné výpadky GPS. Online. Dostupné na: <https://zive.aktuality.sk/clanok/ZgyFUjs/tajomne-vypadky-gps-signaluzaznamenali-vo-viacerych-krajinach-ako-je-to-na-slovensku/> [citované 2025-03-10].
- [51] doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D. (bez dáta). POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE A JEVI A FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU GNSS MĚŘENÍ. Online. Dostupné na: [https://geoinformatika-1.vsb.cz/pmln/prednasky/02\\_vlivy\\_na\\_mereni.pdf](https://geoinformatika-1.vsb.cz/pmln/prednasky/02_vlivy_na_mereni.pdf) [citované 2025-03-12].
- [52] Robert MINAŘÍK (2013). HODNOCENÍ PŘESNOSTI GNSS PŘÍSTROJŮ V ZÁVISLOSTI NA JEJICH KONFIGURACI. Online. Dostupné na: <https://theses.cz/id/vcz63a/00179005-878098105.pdf> [citované 2025-03-20].
- [53] Vladimír Sedlák (2017). GNSS. Online. Dostupné na: <https://unibook.upjs.sk/img/cms/2017/pf/gnss-web.pdf> [citované 2025-03-25].
- [54] Alex Carter (bez dáta). Rušička a blokátor signálu GPS. Online. Dostupné na: <https://www.szmidjammer.com/sk/blog/1575-mhz-gps-jammer/> [citované 2025-03-29].
- [55] NEWS (2024). Online. Dostupné na: <https://sk.txjammer.com/news-show-1042999.html> [citované 2025-03-26].
- [56] ICAO (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2024/NACCWG9/NACCWG9-D01-GPSJAM.pdf> [citované 2025-03-28].
- [57] Flightradar24 (bez dáta). GPS jamming map. Online. Dostupné na: <https://www.flightradar24.com/blog/inside-flightradar24/gps-jamming-map/> [citované 2025-04-05].
- [58] Peter Hupka (2020). Online. Dostupné na: <https://touchit.sk/cina-konecne-vyniesla-posledny-satelit-navigacneho-systemu-beidou/296840> [citované 2025-04-06].
- [59] Pavel Krupka (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.svetoutdooru.cz/galerie/gps-ma-konkurenci-satelitni-navigacni-systemy-se-rozrustaji-2/obrazek/53378/> [citované 2025-04-08].
- [60] Iotallknow (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.iotallknow.com/su/beidou-satellite-navigation-system/> [citované 2025-04-08].
- [61] GSSC (bez dáta). Online. Dostupné na: [https://gssc.esa.int/navipedia/images/6/60/SBAS\\_Service\\_Areas\\_2021.PNG](https://gssc.esa.int/navipedia/images/6/60/SBAS_Service_Areas_2021.PNG)
- [62] José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani (bez dáta). Online. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/figure/Ground-Based-Augmentation-System-GBAS-space-segment-satellites-airborne-segment-and\\_fig1\\_312304001](https://www.researchgate.net/figure/Ground-Based-Augmentation-System-GBAS-space-segment-satellites-airborne-segment-and_fig1_312304001) [citované 2025-04-08].
- [63] Chris Rizos (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.unsw.edu.au/engineering/sage> [citované 2025-04-11].
- [64] PennState (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1874> [citované 2025-04-11].
- [65] Rudolf Katona (2019). Online. Dostupné na: <https://slideplayer.com/slide/14025302/> [citované 2025-04-12].
- [66] The economist (2011). Online. Dostupné na: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2011/03/12/no-jam-tomorrow> [citované 2025-04-12].
- [67] Wahyudin Syam (2022). Online. Dostupné na: <https://www.wasyresearch.com/meaconing-the-most-common-type-of-gnss-spoofing-interference-attacks/> [citované 2025-04-13].
- [68] Kaspersky (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.kaspersky.com/resource-center/definitions/spoofing> [citované 2025-04-15].
- [69] Drone republic (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mini-4-pro--dji-rc-2/> [citované 2025-04-17].
- [70] RCprofi (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.rcprofi.sk/rc-dron-dji-mavic-2-pro> [citované 2025-04-17].
- [71] GPSjam (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://gpsjam.org/> [citované 2025-04-18].
- [72] Flightradar24 (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.flightradar24.com/data/gps-jamming> [citované 2025-04-17].
- [73] Dronerepublic (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mini-4-pro/> [citované 2025-04-18].
- [74] Dronerepublic (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.dronerepublic.sk/dji-mavic-2-pro/> [citované 2025-04-18].
- [75] Solactive (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.solactive.com/Indices/?index=DE000SLOBQ78> [citované 2025-04-19].
- [76] SZMID (bez dáta). Online. Dostupné na: <https://www.szmidjammer.com/sk/blog/jam-gps/> [citované 2025-04-21].