

CPDLC, EFFECTS ON INCREASING EFFICIENCY AND SAFETY IN AIR TRAFFIC (SYSTEM SUBSTITUTE FOR GA)

CPDCL, VPLYV NA ZVÝŠENIE BEZPEČNOSTI A EFEKTIVITY V LETOVEJ PREVÁDZKE (OBDOBA SYSTÉMU PRE GA)

Matúš Pätoprstý
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
patoprsty1@stud.uniza.sk

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
Andrej.novak@fpredas.uniza.sk

Abstract

The paper focuses on the CPDLC. We aim to examine its effects on air traffic efficiency and safety, we also look through options of creating a substitute of the system for general aviation. CPDLC is datalink communication between controller and pilot, via text messages. Introduction is dedicated to principles of operating CPDLC system. In the next chapter we talk about the effects of the system on efficiency and safety of air traffic. We describe systems responsible for increasing efficiency and decreasing density of radio frequencies. We also examine effects on safety of air traffic and security of the system itself. Fifth chapter is an analysis of communication networks, suitable for creating a CPDLC substitute for general aviation. It encompasses dissection of different networks, which are essential when creating a new communication system. In the last chapter, we compare proposed options and evaluate their suitability for creation of a new communication system.

Keywords

CPDLC. SATCOM. GA. Security. DCL. Datalink.

1. Úvod

CPDLC je nový spôsob komunikácie v leteckej doprave, ktorého implementácia stále prebieha. Jedná sa o datalink systém a teda digitálnu komunikáciu, medzi pilotmi a riadiacim letovej prevádzky, formou textových správ. Slúži ako sekundárny systém hlasovej rádio komunikácie a ako náhrada HF rádiovkej komunikácie mimo dosahu VHF rádiostaníc. CPDLC má v leteckej doprave vplyv na zvýšenie efektivity a bezpečnosti letovej prevádzky. S novým systémom sú však spojené riziká, či už v oblasti jeho zabezpečenia, alebo nových prevádzkových postupov. Napriek veľkému potenciálu na zvýšenie efektivity letovej prevádzky a zníženie zaťaženia rádiových frekvencií, nemá tento systém finančne dostupnú alternatívu pre pilotov v kategórii všeobecného letectva.

Naším cieľom je preskúmať, akým spôsobom vplýva CPDLC na efektivitu a bezpečnosť letovej prevádzky a zhodnotiť zabezpečenie systému a jeho ochranu voči protiprávnemu zasahovaniu. Cieľom práce je aj analyzovať dostupné alternatívy komunikačných sietí, ktoré sú finančne dostupné pre implementáciu vo všeobecnom letectve a následným porovnaním vyhodnotiť vhodné riešenie pre vytvorenie obdobného systému.

Letecká doprava sa neustále rozrastá a dochádza aj k zhusťovaniu letovej prevádzky. Preto si myslíme, že je nevyhnutné skúmať a vyvíjať nové systémy, ktoré zabezpečia jej udržateľnosť a bezpečnosť. Všeobecné letectvo predstavuje významnú, stále sa zväčšujúcu, časť leteckej dopravy a preto

zavedenie obdobného systému, môže mať významný vplyv na udržateľnosť letovej prevádzky.

2. Systém CPDLC

Datalink je všeobecný názov, ktorý zahŕňa rôzne typy datalink systémov a podsietí [1]. Slúži ako sekundárny spôsob komunikácie a nahrádza hlasovú rádiovú komunikáciu, v rôznych etapách letu. V súčasnosti sa využívajú dve rôzne obdoby tohto systému. Európsky systém ATNB1 a FANS 1/A využívaný v USA. Ten je výsledkom programu FANS.

CPDLC využíva na prenos dát VDL siete. Pozemné stanice sú vybavené VHF rádioprijímačmi a zariadeniami schopnými spracovávať VDL protokol. Pracuje na frekvenciách VHF 118,00 až 136,975 MHz a dosahuje rýchlosť prenosu dát 32 kb/s [6]. Na prenos VHF signálu je potrebná priama viditeľnosť medzi vysielateľom a prijímačom, z toho dôvodu je dosah obmedzený [24].

Mimo dosahu VDL, sa využíva satelitná sieť spoločností Inmarsat a Iridium.. Inmarsat je britská telekomunikačná spoločnosť založená v roku 1979. Disponuje 14. satelitmi na geostacionárnej orbite vo výške 35 786 km. Iridium je americká telekomunikačná spoločnosť ktorá využíva 66 satelitov umiestnených na nízkej obežnej dráhe Zeme.

Palubné vybavenie lietadla muselo byť prispôbené pre datalink systémy [25]. Niektoré existujúce zariadenia umožňovali update pre datalink služby, iné museli byť nahradené. Prvou súčasťou palubného vybavenia je WAAS/LPV

FMS, je viacúčelový počítač na palube lietadla, ktorý slúži na navigačné a výkonnostné účely. Pomocou neho posádka prostredníctvom CDU (Control Display Unit) prijíma a posíla textové správy. CMU (Control Management Unit) zabezpečuje dátový prenos medzi lietadlom a zemou. FMS zabezpečuje prepojenie medzi posádkou lietadla a CMU. To následne využíva VHF vysielateľ-prijímač alebo SDCS na odosielanie alebo prijímanie dát. Taktiež ako hlasová aj datalink komunikácia musí byť zaznamenávaná.

3. Súčasný stav riešenej problematiky

3.1. Vplyv CPDLC na bezpečnosť a efektivitu letovej prevádzky

CPDLC má veľký vplyv a potenciál na zvýšenie bezpečnosti v leteckej doprave. Pri prenose pomocou textových správ eliminujeme množstvo rizík, ktoré vznikajú pri hlasovej komunikácii. Jedným z hlavných faktorov, je zníženie pracovnej záťaže riadiacich letovej prevádzky, ako aj pilotov a teda zároveň aj zníženie pracovného stresu. To je dosiahnuté hlavne vďaka možnosti komunikovať s viacerými lietadlami súčasne. Pri hlasovom prenose je na danej frekvencii umožnené v danom čase vysielateľ len jednému subjektu. To vyvoláva množstvo stresových situácií, obzvlášť v oblastiach s hustou letovou prevádzkou.

Vysielané správy musia byť často opakované z dôvodu prerušenia vysielania treťou stranou, slabej kvality prenosu, či problémov spôsobených jazykovou bariérou. Pri CPDLC je umožnená riadiacemu letovej prevádzky komunikácia s viacerými subjektami súčasne a zároveň posielateľ správy ktoré obsahujú až 7 prvkov. Výrazne teda znižuje čas potrebný na odovzdanie väčšieho množstva informácií a zjednodušuje ich príjem. Forma textových správ ponúka ľahšie spracovanie väčšieho množstva údajov a odstraňuje potrebu postupu read back, ktorý pri nesprávnom prevedení spôsobuje predĺžovanie komunikácie a zvýšenie pracovnej záťaže. Taktiež eliminuje problém rušenia a nízkej kvality hlasového prenosu. Jedným z hlavných prínosov pre zvýšenie bezpečnosti je však odstránenie problému jazykovej bariéry.

3.2. Obdoba systému pre všeobecné letectvo

V súčasnosti sa systém CPDLC využíva vo všeobecnom letectve prevažne u lietadiel typu Business Jet. Hlavným dôvodom je práve cena palubného vybavenia, potrebného na využívanie datalink služieb. Napriek tomu, že sa jedná o relatívne jednoduchý systém, ktorý nedisponuje žiadnym špeciálnym zabezpečením, jeho cena a cena palubného vybavenia, neumožňuje implementáciu pre menšie lietadlá.

Datalink systém pre menšie jednomotorové, dvojmotorové vrtuľové lietadlá neexistuje. V [2] je vyjadrená potreba zavedenia datalink systémov pre všeobecné letectvo z dôvodu zvýšenia bezpečnosti letovej prevádzky. Experiment je vykonaný vo Švédsku kde podľa štatistiky vzniklo za tri a pol ročné obdobie 720 incidentom v riadenom letovom priestore a 133 incidentom na dráhe. Väčšina z nich spôsobená účastníkmi letovej prevádzky v kategórii všeobecné letectvo.

Vytvorenie obdoby systému pre všeobecné letectvo, môže mať veľký vplyv na zvýšenie bezpečnosti letovej prevádzky. Taktiež

zabezpečí ďalšie uvoľňovanie rádiových frekvencií a udržateľnosť letovej prevádzky.

4. Metodika a metodológia.

4.1. Vplyv CPDLC na zvýšenie efektivity letovej prevádzky

Implementácia systému CPDLC má za úlohu zvýšiť bezpečnosť letovej prevádzky. Jeho úlohou je však aj zvýšiť efektivitu a udržateľnosť letovej prevádzky. Podľa štatistík, má počet prepravených osôb predpoklad stúpať ročne o 4% [3]. To znamená väčší nárast letov a zhusťovanie letovej prevádzky. Neberieme do úvahy momentálnu pandemickú situáciu, hoci jej vplyv vývoj leteckej dopravy značne spomalí, poskytuje však možnosť vývoju nových systémov.

Postupnou implementáciou sa neustále zvyšuje využiteľnosť datalink služieb nad európskym vzdušným priestorom. Podľa uznesenia 29/2009 bude nad európskym priestorom, od 5 februára 2022, vybavenie lietadla možnosťou komunikácie prostredníctvom CPDLC, podmienkou pre let nad letovú hladinu 285. Od roku 2018 sa zvýšil počet lietadiel vybavených možnosťou CPDLC z 27 na 70 % [4].

Eurocontrol DPFM zabezpečuje monitoring výkonnosti datalink systémov v Európe. DPFM publikuje pravidelné mesačné správy od roku 2018. Správy obsahujú komplexné informácie, ktoré zahŕňajú stav implementácie systémov v daných letových priestoroch, počtu lietadiel využívajúcich CPDLC. Taktiež sa zaoberá výkonnosťou systému, percentu úspešne odoslaných správ a počtu vyskytnutých chýb počas prevádzky systému.

Podľa štatistík americkej spoločnosti L3Harris technologies, je v Spojených štátoch Amerických viac ako 5900 lietadiel vybavených možnosťou datalink komunikácie. Bolo vykonaných viac ako 9,9 milióna letov za použitia systému CPDLC vďaka čomu bolo ušetrených viac ako 1,75 milióna minút letového času [5].

Jedným z hlavných vplyvov na zvýšenie efektivity letovej prevádzky má systém CPDLC-DCL. Lietadlá používajúce CMU vybavené FANS 1/A môžu využívať CPDLC-DCL (Controller-Pilot Data Link Communications Departure Clearances). Tento systém umožňuje pilotom žiadať, a zároveň prijímať počiatočné a revidované povolenia, prostredníctvom VHF Data link módu 0/A alebo módu 2. Tieto služby sú momentálne poskytované v Spojených štátoch Amerických na viac ako 60 medzinárodných letiskách [6].

Počiatočný logon posádka uskutočňuje 30 minút pred ETD. Po nadviazaní spojenia piloti obdržia CPDLC-DCL správu obsahujúcu potrebné informácie. Po kontrole oboma pilotmi potvrdia prijatie správou *ROGER*. Následne je komunikácia automaticky ukončená približne 5 minút po odlete [7].

4.2. Bezpečnostné riziká pri postupoch

1. Rozdelenie úloh medzi plánovacím riadiacim letovej prevádzky a výkonným riadiacim letovej prevádzky. CPDLC umožňuje plánovaciemu ATC vykonávať niektoré úlohy. Môže nastať bezpečnostný problém keď dôjde k miskomunikácii medzi dvoma riadiacimi, z dôvodu vysokej pracovnej záťaže. Plánovač vykoná úkony o ktorých nie je hlavný riadiaci

oboznámený a následne vykonáva rozhodnutia na základe nepravdivých uvážení.

Príklad: Plánovač odošle CPDLC správu s povolením lietadlu aby pomohol hlavnému k vyriešeniu konfliktu v rušnej letovej prevádzke. Hlavný riadiaci si však daného konfliktu všimol a rozhodol sa ho riešiť. Medzi oboma riešeniami nastane nehoda a musia byť vykonané nápravné opatrenia. Obdoba tohto prípadu môže nastať keď plánovač priskoro nariadi zmenu frekvencie pri prelietavaní do nového riadeného priestoru. Hlavný riadiaci nemá možnosť vydať povolenie a môže dôjsť k porušeniu minimálnych rozstupov medzi lietadlami na hranici riadených priestorov.

Riešenie: Presné rozdelenie úloh v ATC manual of operations. Plánovač by mal komunikovať s hlavným ATC pred odoslaním správy prípadne ho informovať hneď ako tak vykoná.

4.3. Možné útoky voči CPDLC

Komunikačné systému sa môžu stať terčom protiprávneho konania, ako pri hlasovej rádio komunikácii aj pri CPDLC existuje riziko napadnutia systému treťou osobou.

Odpočúvanie je základným typom útoku. Vykonáva sa keď neoprávnené osoby odpočúvajú, alebo monitorujú komunikáciu medzi jej účastníkmi bez ich oprávnenia. Je to najjednoduchší typ útoku keďže nie je vyžadovaný žiadny druh aktivity od útočníka. Potrebné je len zaobstaranie zariadenia určeného pre odpočúvanie a dekódovanie správ. V prípade CPDLC sa jedná o zariadenie schopné zachytávať signál a software určený na jeho zobrazovanie. Keďže zasielané správy nie sú šifrované je tento proces uľahčený. Tento útok priamo neovplyvňuje zasielané dáta ale môže slúžiť ako nástroj na pozorovanie a získavanie informácií na vykonanie ďalších útokov [3].

Pri CPDLC je možné odpočúvanie správ, vďaka ľahko dostupným SDR prijímačom ktoré zachytávajú signál a voľne dostupnému softwaru určeného pre zobrazovanie textových správ.

Rušenie je útok vykonávaný s úmyslom zabránenia prístupu k danej službe [8]. S rušením príjemcu má útočník snahu zablokovať jeho prístup službe tým že zníži kapacitu kanálu. To je dosiahnuté pomocou zahltenia kanálu dostatočne veľkými rušivými prvkami tak aby sa k príjemcovi nedostali žiadne použiteľné dáta. Zrušením daného uzla je útočník schopný zablokovať všetkých pripojených účastníkov. Príkladom môže byť frekvencia využívaná v koncovej oblasti letiska kde je rušením danej frekvencie ovplyvňované veľké množstvo účastníkov. Preto sú tieto vyťažované uzly zraniteľné a bez ochrany vystavované riziku. Avšak rušenie signálu je ľahko vystopovateľné za využitia smerového prijímača na získanie polohy vysielaného rušivého signálu. [3]

Útoky voči CPDLC boli demonštrované vo viacerých štádiách na rôznych úrovniach. Ukážeme si príklad dvoch rôznych demonštrácií, v prvej sa jedná o útok odpočúvania, v druhej komplexnejšie je pokus zašifrovania správy.

V prvej demonštrácii [9] bol vykonaný prvý typ útoku, odpočúvanie.

Použitie zariadenie: Pre zachytávanie VHF signálu bol použitý RTL-SDR prijímač model R820T2 RTL2832U pripojený na anténu. Toto zariadenie je voľne dostupný SDR prijímač schopný

zachytávať rádiové signály. Cena zariadenia sa pohybuje v rozmedzí 30 až 50 EUR za jednotku.

Použitý Software: Na dekódovanie správ bol využívaný software dumpvdl2. Je to voľne dostupný, komunitou vytvorený software, ktorý je určený na dekódovanie VDL2 dát zachytávaných na VHF rádio prijímač. Tento software je schopný dekódovať CPDLC protokol.

Miesto vykonania experimentu: Zachytávanie správ bolo vykonané vo Švédsku, v meste Štokholm v blízkosti medzinárodného letiska Štokholm-Arlanda (ESSA).

Priebeh experimentu: experiment bol vykonaný vo vzdialenosti približne jeden kilometer od stanovišťa riadenia letovej prevádzky. Za využitia softwaru boli zachytávané a dekódované správy na rádiových frekvenciách. Test trval jednu hodinu a zachytávané dáta boli ukladané do súborov vo forme textu.

Výsledky experimentu: Výsledkami testu sú dekódované CPDLC správy uložené v súboroch vo forme textu. V týchto správach je zachytená CPDLC komunikácia medzi lietadlom a ATC od počiatkovej fázy LOGON ako aj odovzdanie komunikácie medzi dvoma ATSU. Správy ďalej obsahujú rôzne informácie o frekvenciách, či uplink správy o zmene kurzu ako aj potvrdzovacie správy od pilotov.

Zhrnutie: Z výsledku testu môžeme usúdiť že prostriedky na vykonanie útoku odpočúvania sú ľahko dosiahnuteľné. Prijímač určený na zachytávanie VHF signálu je finančne dostupný a software určený na jeho dekódovanie je voľne dostupný verejnosti. Taktiež vykonanie samotného útoku a využívanie týchto prostriedkov nevyžaduje významné technologické zdatnosti útočníka.

Druhá demonštrácia [18], sa zameriava na odosielanie CPDLC správy v bezpečnom prostredí. Pre test boli použité dva počítače s pripojenými SDR. Prvý počítač, ktorý slúžil na zakódovanie a odoslanie správy, bol napojený na HackRF SDR. Je to zariadenie schopné prijímať, ale aj vysielat rádiový signál. Druhý slúžil na zachytenie odosielaného signálu pomocou rovnakého RTL-SDR ako v predošlom experimente.

Priebeh testu: Počas testu bola zakódovaná a odoslaná free text CPDLC správa ktorá bola následne úspešne zachytená a dekódovaná na druhom zariadení.

Výsledky testu: V teste sa úspešne podarilo odoslať a zachytiť správu vo formáte FANS 1/A CPDLC správy. Jednalo sa o free text správu s textom *TEST TEST TEST*. Počas testu však vykonávatelia narazili na problém so softwarom na zakódovanie správy.

Zhrnutie: Zatiaľ, čo odpočúvanie CPDLC komunikácie je finančne aj technologicky dostupné, zakódovanie a odosielanie správ je náročnejšie. Zariadenie určené na odosielanie správ, je 10 až 15krát drahšie, ako zariadenie určené na jej zachytávanie. Zároveň nie je voľne dostupný software na zakódovanie CPDLC správ. Hoci sa podarilo správu odoslať, systém CPDLC pri prijatí signálu, ktorý obsahuje nesprávnu formu alebo chybné informácie takýto signál ignoruje. Pri experimente je signál odosielaný na vzdialenosť 1m v uzavretom priestore, napriek tomu jeho zachytenie nebolo vždy úspešné. Zariadenia, potrebné na odoslanie signálu na veľké vzdialenosti, sú finančne nákladné a preto je riziko vykonania takéhoto útoku nižšie.

Podľa typu útoku rozdeľujeme aj potencionálnych útočníkov do dvoch základných skupín. Pasívny útočník je taký, ktorý neprichádza do priameho kontaktu s „obeťou“. Vykonať teda prvý útok, odpočúvanie. Ten je možné uskutočniť bez významných technických znalostí, pomocou lacno dostupných SDR a voľne dostupného softwaru. Aj keď takýto typ útoku nie je veľkou hrozbou, získavanie a šírenie dôverných informácií môže byť nápomocné pre útočníkov spadajúcich do druhej skupiny. Aktívny útočník, priamo zasahuje do fungovania daného systému. Využíva SDR schopné prijímať aj vysielat signál, zosilňovače a antény. So softwarom schopným dekódovať aj kódovať CPDLC správy môže vykonávať pokročilejšie útoky, priamo zasahovať do letovej prevádzky a ohrozovať jej bezpečnosť.

5. Analýza

5.1. Obdoba systému CPDLC pre všeobecné letectvo

Systém CPDLC je veľkým prínosom pre zvýšenie bezpečnosti a efektivity v leteckej doprave. Napriek tomu že jeho vývoj začal v 90. rokoch, jeho implementácia stále prebieha. Pri uvádzaní nového komunikačného systému do prevádzky, nastáva viacero problémov. Prvým je zabezpečenie fyzickej vrstvy teda telekomunikačnej siete. Dôležitým faktorom je aj inštalácia hardwaru do samotných lietadiel.

Honeywell CMU MKIII sa využívajú v lietadlách typu Business Jet, ktorých činnosti často patria do kategórie všeobecného letectva. Napriek tomu je však toto zariadenie stále cenovo nedostupné, pre väčšinu účastníkov letovej prevádzky, ktorých radíme do všeobecného letectva. Cena zariadení, ktoré umožňujú využívať systém CPDLC, je jedným z hlavných dôvodov prečo tento typ komunikácie nie je využívaný vo všeobecnom letectve.

Pojem všeobecné letectvo zahŕňa rôzne aktivity ako sú rekreačné lietanie, záchranné služby ale aj letecké práce. Podľa [19] je po celom svete viac ako 350 000 lietadiel a 700 000 pilotov spadajúcich do tejto kategórie.

Podľa údajov FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION) je v Spojených štátoch Amerických registrovaných 167 000 jednomotorových lietadiel s pevným krídlom, 13 000 helikoptér a ďalších 23 000 ultraľahkých lietadiel čo predstavuje 90% zo všetkých civilne registrovaných lietadiel v USA. Viac ako 80% z 609 000 registrovaných pilotov vykonáva aktivity všeobecného letectva. Tí, vykonávajú viac ako 25 miliónov letových hodín ročne [10].

So stále sa zväčšujúcou hustotou letovej prevádzky, je nevyhnutné vyvíjať nové systémy ktoré budú prostriedkom k zvýšeniu bezpečnosti a udržateľnosti leteckej dopravy.

5.2. Návrhy vhodných sietí pre obdoba systému CPDLC

1. Medzi prvé možnosti siete pre nový komunikačný systém zaradujeme Starlink. Starlink je satelitná konštelácia, ktorej implementácia stále prebieha a je zabezpečovaná firmou SpaceX.

SpaceX, je americká súkromná spoločnosť založená v roku 2002 v USA, štát Kalifornia. Jej zakladateľom je Elon Musk, CEO, CTO spoločnosti SpaceX a CEO výrobcu automobilov Tesla. Táto spoločnosť sa zaoberá dizajnom, výrobou a prevádzkou

kozmickej lodí, ako aj vykonávaním vesmírnych misií. SpaceX v súčasnosti pracuje na viacero projektoch. Väčšina z nich sa uskutočňuje za spolupráce s NASA. Medzi tie patrí preprava nákladu a osôb na medzinárodnú vesmírnu stanicu, vývoj rakety slúžiacej pre medziplanetárnu prepravu. Jedným z projektov, je aj vytvorenie satelitnej konštelácie, ktorá bude poskytovať internetové pripojenie.

Špecifikácie systému:

Satelity konštelácie Starlink sa radia medzi kategóriu malých satelitov s hmotnosťou približne 227kg. Sú vybavené slnečnou clonou na zníženie odrazov od slnka čím znížili mieru „znečistenia oblohy“. Satelity sú umiestnené vo výške 550km nad zemským povrchom s inklináciou 53 stupňov. Na kontrolu polohy sú satelity vybavené motorom s Hallonovým efektom využívajúci kryptónový plyn ako palivo. Tieto motory slúžia aj na nasmerovanie satelitov späť do zemskej atmosféry po ukončení služby [11].

V súčasnosti spoločnosť SpaceX nasadila 1378 satelitov. Konečný počet satelitov schválených americkou FCC je 12 000. SpaceX však prostredníctvom FCC podala žiadosť na povolenie umiestniť ďalších 30 000 satelitov [11].

Rýchlosť prenosu dát sa v beta verzii pohybuje od 50 do 150 Mb/s. s oneskorením od 20 do 40 ms. Výkon siete sa však bude uvádzaním ďalších satelitov do prevádzky postupne zvyšovať [12].

Výzvy: Hlavnou výzvou pri voľbe tohto systému, je zachytávanie signálu. Fázová anténa ponúkaná spoločnosťou SpaceX má veľké rozmery a montáž na lietadlo nie je vhodná. Pozitívom je však jej schopnosť zachytávania signálu aj po umiestnení na rýchlo sa pohybujúce objekty.

Pri využití tohto systému, je však výhoda možnosti využitia rôznych zariadení schopných pripojenia na internet ako zobrazovacieho média. Tieto zariadenia sú cenovo veľmi dostupné.

Výzvou je však vytvorenie programu, v respektíve aplikácie, určenej na vykonávanie danej komunikácie. Problematickou časťou nie je samotný dizajn a spustenie aplikácie, ale skôr zabezpečenie integrity a zabezpečenia celého systému.

2. Druhou uvažovanou možnosťou je využitie satelitných podsietí, ktoré ponúkajú zariadenia určené na prijímanie/odosielanie správ. Medzi takýchto poskytovateľov patria konštelácie Iridium, Inmarsat a Thuraya. Jedná sa o konštelácie so satelitmi umiestnenými na geostacionárnej orbite zeme.

Iridium a Inmarsat. Sú to satelitné konštelácie so satelitmi na geostacionárnej orbite zeme. Na rozdiel od spoločnosti SpaceX a ich konceptu Starlink sa teda satelity nachádzajú v pomerne veľkej vzdialenosti od zemského povrchu. Na komunikáciu používajú menšie množstvo satelitov ktorých počet sa pohybuje okolo 80 funkčných satelitov. Výhodou týchto systémov je teda pokrytie a dostupnosť služby, ktorá zahŕňa celú zem. Nevýhodou je práve väčšie oneskorenie prijímaného signálu spôsobené veľkou vzdialenosťou satelitov od zemského povrchu. Takéto oneskorenie je však problematické prevažne pri vykonávaní hlasovej komunikácie, pri posielaní textových správ je menej znateľné.

Prijímacie zariadenie: Spoločnosti Inmarsat a Iridium ponúkajú datalink riešenia pre leteckú dopravu. Tieto zariadenia sú však pre vlastníkov menších jednomotorových lietadiel cenovo nedostupné. Ponúkajú aj možnosť využitia satelitných telefónov. Satelitné telefóny sú zariadenia schopné prijímať signál z geostacionárnych družíc a teda umožňujú hlasovú aj dátovú komunikáciu kdekoľvek na zemi.

Výhoda satelitných telefónov je ich cenová dostupnosť a pomerne nízke mesačné náklady za služby. Medzi základné funkcie pri satelitných telefónoch patrí automatické odosielanie správ s informáciou o súčasnej polohe používateľa. Využitie týchto služieb môže mať významný vplyv, pre zvýšenie bezpečnosti v oblasti všeobecného letectva. Pravidelné odosielanie polohy je vhodné prevažne v oblastiach, mimo dosah VHF rádio staníc.

Ponúka teda pilotom malých jednomotorových lietadiel, ktorý vykonávajú lety v odľahlých oblastiach, kde je VHF rádio komunikácia nedostupná, náhradný spôsob komunikácie. Vďaka nej môžu piloti zdieľať informácie o povahe daného letu, zvyšovať tým bezpečnosť letovej prevádzky, taktiež majú lepšiu možnosť komunikácie v prípade výskytu mimoriadnej situácie za letu.

Využitie satelitných telefónov poskytuje aj potrebné zabezpečenie. Keďže využívanie týchto zariadení pridáva používateľovi špecifické číslo, existuje teda transparentný spôsob overenia príjemcu a odosielateľa daných správ.

Medzi ich nevýhody však patrí práve spôsob komunikácie prostredníctvom jednotlivých správ. Komunikačný systém pre všeobecné letectvo za využitia datalink siete by mal slúžiť aj na zvýšenie bezpečnosti. Preto by s jednou funkciou daného systému mal byť systém ktorý pilotom umožňuje zdieľať zámery vykonávaného letu. Tým by sa dosiahlo zvýšenie bezpečnosti vďaka jednoduchšiemu prístupu k informáciám o využití konkrétneho letového priestoru.

Príklad využívania aplikácií na podobné účely môžeme pozorovať v prevádzke bezpilotných prostriedkov. Aplikácie, vytvorené na zvýšenie bezpečnosti ako aj vyššiu efektívnosť využitia letových priestorov. Ponúkajú možnosti na zdieľanie polohy a trate vykonávaného letu s bezpilotným prostriedkom ako aj komunikáciu medzi operátormi navzájom. Niektoré aplikácie spolupracujú aj s letovou prevádzkovou službou v danej krajine a umožňujú rýchlu a efektívnu komunikáciu v prípade potreby pre vykonanie plánovaného letu.

Platformou vhodnou pre využívanie práve takýchto služieb, je satelitná sieť spoločnosti Thruaya. Je to poskytovateľ mobilno-satelitných služieb sídliači v Spojených arabských emirátoch.

Medzi hlavné nevýhody tejto konštelácie patrí práve jej vesmírny segment. Služby sú poskytované dvoma satelitmi na geo-synchronnej orbite Zeme. Satelity sa teda nachádzajú vo vzdialenosti viac ako 35 000 kilometrov od zemského povrchu. To má za dôsledok oneskorenie pri prenose signálu, to však nemusí nevyhnutne znamenať problém pri komunikácii formou textových správ. Najväčším problémom je však pokrytie územia, kde sú služby poskytované. Spoločnosť nezabezpečuje pokrytie nad územím severnej a južnej Ameriky. Je teda potrebné zvážiť využitie tohto systému keďže severná Amerika predstavuje jeden z najväčších trhov pre všeobecné letectvo.

Jedným z hlavných dôvodov prečo sme si zvolili práve poskytovateľa služieb Thuraya sú práve prijímacie a komunikačné zariadenia, ktoré ponúka. Táto spoločnosť, je jedným z prvých predajcov satelitných telefónov, s dotykovým displejom a operačným systémom android od spoločnosti Google. Práve dotykové prevedenie displeju je zásadným prvkom, ktorý poskytuje jednoduchosť ovládania a vysokú prehľadnosť daného systému čo je pri používaní za letu veľkou výhodou.

Vhodné prijímacie zariadenie pre náš systém je Thuraya Satsleeve plus. Jedná sa o zariadenie, ktoré dokáže ktorýkoľvek smartphone premeniť na satelitný telefón. Vďaka tomu je systém univerzálny a ľahko finančne dostupný, tým by sa zjednodušilo jeho uvádzanie do prevádzky a celková implementácia. Ďalšou výhodou systému, je jeho podpora komerčných komunikačných aplikácií a možnosť využívania týchto aplikácií aj v satelitnom móde. Taktiež ponúka možnosť súčasného pripojenia na mobilnej a satelitnej sieti a v prípade potreby, automatického prepájania medzi nimi. To predstavuje vysokú spoľahlivosť pripojenia a taktiež znížené náklady na prevádzku celého systému. Ako aj predošlé zariadenie, obsahuje funkciu SOS volania v prípade výnimočnej situácie [23].

Zhrnutie: Využitie satelitných podsietí je vhodným prvkom pre vytvorenie novej formy komunikácie pre všeobecné letectvo. Výhodou je vybudovaná infraštruktúra a fyzická vrstva, tá je základom pri tvorbe každého nového komunikačnej formy. Znamená to že pokrytie územia, v ktorom sú služby ponúkané zahŕňa väčšinu zemského povrchu. Väčšina poskytovateľov satelitného pripojenia, už v súčasnosti spolupracuje s leteckými spoločnosťami a výrobcami lietadiel. Ich skúsenosti a znalosti v oblasti leteckej dopravy sú teda veľkou výhodou, pri budovaní nového spôsobu komunikácie, v respektíve pri vytváraní jeho lacnejšej obdoby. Prijímacie zariadenia určené na komunikáciu sú cenovo dostupné, no vyžadujú pravidelné platby za poskytované služby. Vhodné sú práve zariadenia od spoločnosti Thuraya, ktorá poskytuje moderné dotykové zariadenie schopné súčasne udržiavať mobilné aj satelitné spojenie. Za najvhodnejšie považujeme práve zariadenie Satsleeve, ktoré umožňuje premenu bežného smartphone-u na satelitný telefón. Taktiež ako aj spomínaný Thuraya X5 touch disponuje možnosťou súčasného prepojenia. Možnosť používania komerčných aplikácií aj v satelitnom móde je ideálnou pre tvorbu novej formy komunikácie.

Výzvy: Výhodou satelitných podsietí je ich pokrytie. To však neplatí pri spoločnosti Thuraya, ktorá svoje služby neposkytuje nad územím Južnej a Severnej Ameriky. Výzvou do budúcnosti je preto zabezpečenie pokrytie nad týmto územím, keďže predstavuje väčšinu kategórie všeobecné letectvo. Medzi hlavné výzvy patrí výroba vhodného prijímacieho zariadenia a softvérové riešenie samotnej komunikačnej platformy. Spomínané zariadenie Satsleeve, je veľmi vhodné a potrebuje minimálne úpravy pre jednoduchšiu inštaláciu a osadenie na palubnej doske lietadla. Hlavný dôraz pri vývoji nového systému, kde platforma na komunikáciu je vo forme aplikácie, musí byť na zabezpečenie a ochranu pred protiprávnymi zásahmi.

3. EAN (European Aviation Network) je sieť, ktorá ponúka riešenia integrovaného spojenia. Sieť pozostáva z kombinácie satelitnej siete a pozemnej 4G LTE. Táto kombinovaná sieť ponúka širokopásmové pokrytie nad územím

27 štátov Európskej Únie, Švajčiarska, Spojeného Kráľovstva a Nórska. Pokrytie zabezpečuje s-band satelit a približne 300 pozemných veží.

European Aviation Network vznikla za spolupráce viacerých spoločností. Dvaja hlavný partneri sú spoločnosti Immarsat a Deutsche Telekom AG. Immarsat je spoločnosť ktorá má skúsenosti s riešeniami pre leteckú dopravu a zabezpečuje satelitné pripojenie tejto siete, so satelitom Ariane 5, vyneseným na orbitu v roku 2017. Spoločnosť Deutsche Telekom AG zabezpečuje sieť pozemných veží. EAN umožňuje nadviazanie nepretržitého spojenia aj pri rýchlosti pohybu prijímacieho zariadenia do 1200Km/h vo výškach 35 000ft. Vďaka kombinovanej forme siete, je neustále vyhodnocovaná kvalita pripojenia. Automatické prepínanie medzi satelitným a 4G LTE prepojením zabezpečuje nepretržité pripojenie s optimálnym výkonom. Vďaka technológii siete sa dosahujú dátové prenosy až do 100 Mb/s pre download a 20 Mb/s upload s kapacitou 90 Gb/s [13].

Inštalácia systému pre užívateľa trvá približne 7hodín čo ponúka rýchlu implementáciu do praxe. Na lietadle sú umiestnené dve antény, na vrchnej a spodnej strane trupu lietadla. Vrchná anténa slúži na pripojenie k satelitu a spodná na prijímanie signálu od pozemných veží. [13].

4. Pri tvorbe nového komunikačného systému patrí medzi najkritickejšie časti fyzická vrstva [16]. Sieť 5G je novým stupňom evolúcie mobilnej komunikácie. Nasadenie siete začalo v roku 2019 a jeho rozvoj rýchlo pokračuje. Viac ako 38 krajín už nasadilo 5G technológiu a v mnohých ďalších sú plánované investície do tejto siete. [14] Podľa odhadov a predošlých skúseností s implementáciou 4G siete, bude do roku 2023, prevládajúcou sieťou vo väčšine krajín sveta.

Užívateľská rýchlosť je predpokladaná na 100Mb/s pre download a 50Mb/s upload. 5G ponúka vysokú hustotu pripojenia približne milión pripojených zariadení na kilometer štvorcový. Pripojenie za pohybu by malo byť možné pri rýchlostiach od 1 až po 500km/h. V porovnaní s LTE sieťou je to rozhodne obmedzujúci faktor [15].

Medzi hlavné nevýhody tejto siete však patrí samotný dosah signálu. Jedná o vysoko frekvenčné pásmo s nízkym výkonom prijímaného signálu. Útlmy trasy limitujú dosiahnuteľnú komunikačnú vzdialenosť a pokrytie priestoru pozemnými stanicami. Riešením toho problému je husto vybudovaná infraštruktúra, ktorú pri 5G sieti pozorujeme. Nie je však riešením pre dosah signálu vo vertikálnej rovine a teda jedná sa o zásadne obmedzujúci faktor. [16]

5.3. Porovnanie skúmaných návrhov

Ako sme uviedli v predošlej kapitole, pri vytváraní nového komunikačného systému je jedným z najdôležitejších faktorov fyzická vrstva danej siete. Preto sme pri voľbe vhodných riešení vybrali siete, ktorých infraštruktúra je už vybudovaná alebo v procese implementácie.

Navrhované možnosti môžeme podľa typu siete rozdeliť do troch kategórií:

- Mobilné
- Satelitné

- Kombinované

Pri analyzovaní a porovnávaní jednotlivých možností, je potrebné sledovať viacero faktorov: cenovú dostupnosť, jednoduchosť implementácie, spoľahlivosť a výkonnosť siete, vhodnosť pre využitie v leteckej doprave.

Keďže vyberáme vhodný systém pre všeobecné letectvo, je dôležité dbať na cenovú dostupnosť. A to ponúkaných služieb, ale aj palubného vybavenia. Keď sa pozeráme na jednoduchosť implementácie a cenu palubného vybavenia, jednoznačne prevažujú mobilné siete ako 5G alebo 4G LTE, ktoré aj dnes využívame v každodennom živote. Mobilné zariadenia sú dnes súčasťou životov väčšiny ľudí a to znamená aj uľahčenie celého procesu a zníženie nákladov konečného spotrebiteľa. Ekonomickým riešením je aj Thuraya Satsleeve, pri ktorom je taktiež možnosť využitia mobilných zariadení a združuje mobilné a satelitné siete čo ponúka lepšie pokrytie aj spoľahlivosť.

Ponúkané riešenia predstavujú siete, ktoré už implementáciou prebehli alebo ich implementácia prebieha. Z tohto hľadiska sú práve zaujímavé riešenia 5G a Starlink, ktoré predstavujú budúcnosť komunikačných sietí. Uskutočňované investície do ich realizácie sú dôležitým faktorom, ktorý implikuje ich priaznivý vývoj v budúcnosti.

Vo výkonnosti opäť vynikajú spomínané siete, ktoré predstavujú riešenia do budúcnosti a to Starlink a 5G. Keďže sa jedná o nové technológie môže problémy spôsobovať práve spoľahlivosť, ktorá je u zavedených sietí EAN a Thuraya na vysokej úrovni. Satelitné siete taktiež ponúkajú významné pokrytie, ktoré je tiež nevyhnutné pre vývoj komunikačného systému v leteckej doprave.

6. Záver

Po preskúmaní dostupných prameňov a vyhodnotení získaných poznatkov sme dospeli k finálnym záverom. CPDLC slúži ako sekundárny komunikačný systém ku hlasovej komunikácii. Jeho využívanie je momentálne obmedzené na získavanie odletových povolení (CPDLC-DCL) alebo na komunikáciu pri lete po letových cestách. Narušenie fungovania tohto systému, z dôvodu jeho poruchy alebo protiprávnemu zásahu, nemá priamy vplyv na ohrozenie bezpečnosti letovej prevádzky. Je však známe, že letecké nehody, zväčša nie sú spôsobené zlyhaním jediného systému, ale sériou faktorov vedúcich ku katastrofe. Je preto nevyhnutné maximalizovať bezpečnosť a spoľahlivosť každého systému. Počas analýzy vplyvov CPDLC na bezpečnosť letovej prevádzky sme narazili na problémy s jeho zabezpečením. CPDLC disponuje nedostatočným zabezpečením pred protiprávnymi zásahmi. S postupom vývoju technológií a dostupnými vysokovýkonnými zariadeniami (SDR) je možné zachytávať signál a dekodovať ho na textovú podobu [18]. Vykonalé pokusy [9] ukazujú aj na schopnosť týchto zariadení obdobnú správu zakódovať a následne odvyselať. Keďže kľúčové slúžiace na overovanie príjemcu/odosielateľa sú voľne dostupné, vzniká riziko narušenia dôveryhodnosti odosielaných správ.

Ďalšie faktory znižujúce bezpečnosť využívania systému, spočívajú v postupoch a jeho dizajne. Keďže sa jedná o komunikáciu formou textu výhradne medzi pilotom a riadiacim, znižuje sa všeobecný rozhľad pilotov o situácii v danom priestore. Nebezpečné situácie ktoré sa môžu vyskytnúť popisuje portál Skybrary, ktorý vznikol z iniciatívy

spoločnosti Eurocontrol a partnerstvom s ICAO. Jedná sa o portál zameraný na vzdelávanie v oblasti bezpečnosti v leteckej doprave. Systém môže znamenať aj riziko pri využívaní v časovo kritických situáciách [17]. Problém spočíva v nedostatočnom definovaní takýchto situácií a teda vytvorenie priestoru na pochybenie. Dôležité je aj správne využívanie viacprvkových správ. Textové správy neponúkajú voľnosť prejavu ako hlasová komunikácia a pri 5 prvkovej správe, nesúhlas s jediným prvok rezultuje v negatívnu odpoveď a nutnosť opakovania.

Pri skúmaní systému sme sa zamerali aj na jeho vplyv, na zvýšenie efektivity letovej prevádzky. Medzi hlavné prínosy patrí práve súčasť systému CPDLC-DCL. Tento systém slúži na získavanie odletových povolení pomocou textových správ. Momentálne je v USA implementovaný na viac ako 60 letiskách [6]. Jeho hlavným prínosom je skrátenie času potrebného na získanie odletových povolení, uvoľňovanie rádiových frekvencií a zjednodušenie príjmu veľkého množstva informácií. Považujeme za dôležité zabezpečiť celosvetovú implementáciu tohto systému.

CPDLC má významný vplyv na zmenšovanie rozstupov na letových cestách a umožňovania hustejšej letovej prevádzky. Pomáha aj ku znižovaniu emisií a výdavkov práve prostredníctvom lepšieho využitia najviac efektívnych letových ciest. Takmer 10 miliónov letov vykonaných s použitím systému CPDLC, dokázalo ušetriť viac ako 1,8 milióna letových hodín [5]. Je teda zrejme že tento systém má významné ekonomické aj ekologické prínosy pre leteckú dopravu a s jeho postupnou implementáciou sa budú stále zvyšovať.

Vytvorenie obdobného systému CPDLC pre všeobecné letectvo považujeme za významný krok, ku zvýšeniu efektivity a udržateľnosti leteckej dopravy. Pri skúmaní tejto témy sme narazili na obmedzené množstvo dostupných informácií. Veľká časť z malého množstva publikácií sú neaktuálne. Niektoré publikácie sa danej téme venujú, no prevažne so zameraním na komunikačnú sieť pre tento systém. Väčšina informácií pri spojení CPDLC a všeobecné letectvo popisuje dostupné systémy, ktoré sa využívajú v lietadlách typu Business Jet a teda nie sú cenovo dostupné pre náš zámer.

Všeobecné letectvo predstavuje významnú časť leteckej dopravy. Podľa FAA je len v Spojených štátoch Amerických je registrovaných viac ako 200 000 lietadiel a viac ako 450 000 pilotov vykonávajúci činnosti všeobecného letectva [10]. Tí vykonávajú približne 25 miliónov letových hodín ročne a 54 miliónov interakcií s riadením letovej prevádzky [19].

Stále sa rozrastajúce odvetvie všeobecné letectvo predstavuje významnú súčasť letovej prevádzky ako aj zaťaženie rádiových frekvencií, čo vyplýva z uvedených štatistík. Zavedenie obdoby systému CPDLC pre toto odvetvie leteckej dopravy, môže mať významný vplyv na udržateľnosť letovej prevádzky. Za zásadnú časť považujeme vytvorenie systému DCL. Ten považujeme za jeden zo zásadných prvkov pre zvýšenie efektivity. Veríme že DCL systém je vhodným vstupným bodom pre vytvorenie datalink komunikácie vo všeobecnom letectve.

V druhej časti, sme sa z dôvodu nedostatku odbornej literatúry, zamerali na výber vhodných možností komunikačných sietí, ich analýzu a porovnanie. V hlavnej časti práce sme rozobrali vhodnosť každej siete pre vytvorenie obdoby tohto systému.

Nasledujúca tabuľka ponúka výsledky a porovnanie parametrov jednotlivých sietí.

Tabuľka 1: Parametre jednotlivých komunikačných sietí. Zdroj: Autori na základe [12], [20], [21], [22], [23].

	STARLINK	SATCOM Iridium/In marsat	SATCO M Thuraya	EAN	5G
Cena/mesiac [EUR]	82	40-200	30-180	Neznáme	30-90
Cena/ prijímacie zariadenie [EUR]	410	500-1200	500	100-1000	100-1000
Pokrytie	Neznáme V budúcnosti globálne	Celosvetové	Európa/Ásia	Európa	Takmer celosvetové
Výkonnosť	50-150Mb/s	176-705Kb/s V budúcnosti 1400Kb/s	384-444Kb/s	100 Mb/s	400 Mb/s -1,8 Gb/s
Spoľahlivosť	Stredná	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Stav implementácie	Prebieha	Dokončená	Dokončená	Prebieha	Prebieha

Z porovnania základných parametrov jednotlivých sietí je zrejme že každá z nich je špecifická a ponúka rôzne výhody. Nie je preto možné jednoznačne vybrať sieť, vhodnú pre implementáciu nového systému. Pri väčšine predstretých možností, implementácia stále prebieha, ako aj investície do budovania infraštruktúry. Je to teda neznámy parameter. Z hľadiska perspektívy dostatočného pokrytia potenciálu sú najzaujímavejšie siete 5G a Starlink.

Veríme že vhodnou sieťou pre CPDLC systém je práve sieť 5G. Jedná sa o riešenie, ktoré ponúka vysoký výkon, rýchlosť prenosu a aj vysokú kapacitu používateľov na kilometer štvorcový. Je to dostupná sieť s dostačujúcou spoľahlivosťou, implementovaná v husto obývaných oblastiach a teda aj v oblasti veľkých medzinárodných letísk. Vhodnosť tejto siete spočíva aj v nákladoch na pripojenie. Podmienkou nového systému je cenová dostupnosť. Využitie 5G siete ponúka najnižšie mesačné cenové náklady. Možnosť pripojenia prostredníctvom mobilných telefónov znižuje náklady na kúpu prijímacieho zariadenia a zjednodušuje celkovú implementáciu systému do praxe.

Medzi zásadné nevýhody 5G siete patrí dosah signálu, ktorý je približne 300m. Práve z toho dôvodu vidíme využitie pre systém CPDLC-DCL. Ten sa využíva v čase keď sa lietadlo nachádza na letiskovej ploche a preto nie je dosah siete obmedzujúci faktor.

Myslíme si že vytvorenie cenovo dostupnej obdoby systému CPDLC je dôležitým krokom pre zvýšenie efektivity leteckej dopravy a zníženie pracovného zaťaženia radiacích letovej prevádzky. V budúcnosti je potrebné sa venovať hlbšiemu rozboru dostupných sietí ale aj celkovému dizajnu komunikačného systému. Ten spočíva v kombinácii výberu vhodnej siete, zobrazovacích zariadení a komunikačnej platformy napríklad vo forme aplikácie. Pri tvorbe tohto systému považujeme za dôležité vytvoriť aj dostatočné zabezpečenie pred protiprávnymi zásahmi.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie

manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov, kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] Doc 10037, ICAO Global Operational Data Link Document (GOLD), Second Edition-26 April 2013
- [2] A. Erzell - Roger Li, "Improving air navigation service for general aviation by using data-link," 2007 IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference, 2007, pp. 4.C.6-1-4. C.6-11, doi: 10.1109/DASC.2007.4391912.
- [3] Gurtov, A.-Polishchuk, T.- Wernberg, M. Controller–Pilot Data Link Communication Security. *Sensors* 2018, 18, 1636. <https://doi.org/10.3390/s18051636>
- [4] Eurocontrol, Data link Network Operational Status Report, February 21 Dostupné na: https://ext.eurocontrol.int/WikiLink/images/a/a3/2021-02_DL_Status_February_2021.pdf.
- [5] CPDLC departure Clearances, dostupné online na: <http://uasc.com/home/nextgentechologies/cpdlcdepartureclearance> (citované 2021-02-10)
- [6] FAA data communications user information, dostupné online na: <https://www.l3harris.com/datacomm>, (citované 2021-02-5)
- [7] Amanda Grizzard, 2018. Getting it Right -CPDLC Departure Clearances, Dostupné na: <https://www.uasc.com/home/hub/enews/enews/2018/02/15/getting-it-right---cpdlc-departure-clearances>, (citované 2020-02-20)
- [8] Grover K. - Lim, A.- Yang, Q. Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey. *Int. J.Ad Hoc Ubiquitous Comput.* 2014, 17, 197–215.
- [9] Sestorp, I. - Lehto, A. (2019). CPDLC in Practice: A Dissection of the Controller Pilot Data Link Communication Security (Dissertation). Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-159840>.
- [10] Air traffic by the numbers, 2020, dostupné online na: https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers/ (citované 2021-02-20)
- [11] Space News, Celeb Henry, (08/15/2019) dostupné na <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/> (citované 2021-04-03)
- [12] <https://www.starlink.com/> (citované 2021-03-12)
- [13] How we did it(08/06/2020) dostupné online na: <://www.europeanaviationnetwork.com/en/news/how-we-did-it--the-european-aviation-network-is-one-giant-step-c.html> (citované 2021-03-18)
- [14] Where 5G Technology Has Been Deployed, Katharina Buchholz, (14/08/2020) dostupné online na: <https://www.statista.com/chart/23194/5g-networks-deployment-world-map/> (citované 2021-04-04)
- [15] What is 5G, Christian De Looper (15/03/2021), dostupné online na: <https://www.digitaltrends.com/mobile/what-is-5g/> (citované 2021-04-02)
- [16] W. Wang et al., "Empowering Heterogeneous Communication Data Links in General Aviation through mmWave Signals," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 164-171, December 2019, doi: 10.1109/MWC.0001.1800593.
- [17] CPDLC general safety considerations, dostupné online na: https://www.skybrary.aero/index.php/CPDLC_General_Safety_Considerations (citované 2021-02-12)
- [18] S. Eskilsson- H. Gustafsson- S. Khan - A. Gurtov, "Demonstrating ADS-B AND CPDLC Attacks with Software-Defined Radio," 2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS), 2020, pp. 1B2-1-1B2-9, doi: 10.1109/ICNS50378.2020.9222945
- [19] Report on Gejeral Aviation Trends, 2019, dostupné online na: http://download.aopa.org/hr/Report_on_General_Aviation_Trends.pdf (citované 2021-03-11)
- [20] How much will we pay for 5G,GSMA Intelligence, (13/06/2019) <https://www.mobileworldlive.com/blog/intelligence-brief-how-much-will-we-pay-for-5g> (citované 2021-04-05)
- [21] <https://www.thuraya.com/> (citované 2021-04-15)
- [22] 5G speed tests, Jessica Dolcourt, (03/06/2019) dostupné online na: <https://www.cnet.com/features/we-ran-5g-speed-tests-on-verizon-at-t-ee-and-more-heres-what-we-found/> (citované 2021-03-27)
- [23] Thuraya satellite Satsleeve, dostupné online na: <https://www.amazon.com/Thuraya-satellite-Satsleeve-Smartphones-Android/dp/B015HS4O1K> (citované 2021-03/29)
- [24] Kandera, B. 2015. Letecké prístroje. Bratislava : DOLIS, 2015. - 204 s., ilustr. - ISBN 978-80-8181-017-6.
- [25] Novák, A., Novák Sedlačková, A., Janovec, M., 2020. Komunikačné systémy v letectve EDIS - Žilina, Žilinská univerzita v Žiline, 2020, ISBN 978-80-554-1737-0