



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

SOUČASNÝ STAV A SMĚRY ROZVOJE METOD A TECHNICKÉHO ZABEZPEČENÍ NAVIGACE CIVILNÍCH LETADEL PO PLOŠE LETIŠTĚ

EXISTING STATE-OF-THE ART AND DEVELOPMENT TENDENCIES OF METHODS AND TECHNOLOGIES
IN THE FIELD OF AIRCRAFT MOVEMENT CONTROL ALONG AERODROME SURFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Zubrvalčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Jan Zubrvalčík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Letecký provoz
Vedoucí práce:	doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Současný stav a směry rozvoje metod a technického zabezpečení navigace civilních letadel po ploše letiště

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zvyšování kapacity letišť stále více závisí na organizaci a řízení pohybu letadel po ploše letiště. Do procesu tohoto řízení vstoupila a jsou rozvíjena nová a technologicky vyspělá zařízení CNS umožňující zvyšovat úroveň automatizace. Požadavek na diplomovou práci je utřídit, klasifikovat a nastínit tendence rozvoje tohoto druhu zařízení ŘLP.

Cíle diplomové práce:

Vytvořit účelnou, monotematickou a srozumitelnou studijní pomůcku objasňující metody řízení pohybu po letišti s důrazem na rychle se rozvíjející potřeby ŘLP.

Seznam doporučené literatury:

Doporučení ICAO k řízení provozu letišť.

Pravidla řízení provozu na civilním letišti - dokumentace letiště.

Sekundární radar - <https://www.radartutorial.eu/>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o navigaci po ploše letiště. V práci jsou popsány hlavní přehledové systémy, které se používají při navigaci po ploše letiště a systémy pro predikci a zabránění kolizím. U všech systémů je uveden princip činnosti, jejich použití, výhody a nevýhody a informace, které nám tyto systémy poskytují. V poslední kapitole jsou porovnány vlastnosti základních přehledových systémů.

Klíčová slova

ADS-B, Družice, Frekvence, Kolize, Letiště, Letadlo, Multilaterace, Navigace, Pilot, Přehled, Radar, Ranvej, Signál, Světla, Systém, Značení, Znak

Abstract

This diploma thesis deals with navigation on airport surface. In thesis there are described main surveillance systems, which are used for navigation on airport surface and systems for prediction and avoiding collisions. For all systems is listed principle of action, their usage, advantages and disadvantages and informations, which are provided by these systems. In last chapter there are compared properties of main surveillance systems.

Key words

ADS-B, Satellite, Frequency, Collision, Airport, Airplane, Multilateration, Navigation, Pilot, Surveillance, Radar, Runway, Signal, Lights, System, Marking, Sign

Bibliografická citace

ZUBRVALČÍK, Jan. *Současný stav a směry rozvoje metod a technického zabezpečení navigace civilních letadel po ploše letiště*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133187>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Současný stav a směry rozvoje metod a technického zabezpečení navigace civilních letadel po ploše letiště vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu zdrojů a pod odborným dohledem doc. Ing. Slavomíra Voseckého, CSc..

V Brně dne:.....

.....

Bc. Jan Zubrvalčík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Slavomíru Voseckému za vedení mé práce a za všechny rady a připomínky, které mi pomohly při tvoření práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu nejen při tvorbě této práce, ale při celém studiu na VŠ.

Obsah

1. Úvod	11
2. Vizuální navigační prostředky.....	12
2.1 Značení a světla na RWY	12
2.2 Značení a světla na TWY a odbavovací ploše	14
2.3 Znaky a značky.....	15
3. Způsoby sledování letištní plochy.....	18
3.1 Vývoj v oblasti sledování letištní plochy	18
3.2 SMR	19
2.3 SSR.....	22
3.4 Multilaterace.....	28
3.5 GNSS.....	32
3.6 ADS-B.....	39
3.7 A-SMGCS	44
4. Metody pro predikci pohybu a zabránění kolizím	50
4.1 Nehody na letištní ploše	50
4.2 Požadavky na antikolizní systémy	54
4.3 Predikce srážek pomocí A-SMGCS	55
4.4 ASDE-X	58
4.5 TCAS/ACAS	60
4.6 Budoucnost antikolizních systémů.....	62
5. Porovnání přehledových systémů	64
5.1 Potřebné vybavení a poskytované informace.....	64
5.2 Výkon.....	65
5.3 Pořizovací a provozní náklady	67
6. Závěr	68
Seznam zdrojů.....	69
Seznam zkratk	76
Seznam obrázků a tabulek.....	80

1. Úvod

V současné době představuje řízení provozu na letištní ploše složitou operaci. Oproti vzdušnému prostoru se všechna letadla sdružují na malém prostoru, navíc se na ploše letiště pohybuje velké množství vozidel, která se starají o technické odbavení letadel. Vzhledem k tomu, že letadla na zemi nevydělávají, je důležité, aby pozemní operace probíhaly co nejrychleji. Aby mohli řidiči zvládnout takový úkol potřebují mít dokonalý přehled o situaci na letišti.

Cílem této práce je vytvořit srozumitelnou monotématickou studijní pomůcku, ve které jsou zahrnuty hlavní navigační prostředky a přehledové systémy, které slouží k navigaci letadel po ploše letiště. V práci jsou v jednotlivých kapitolách postupně uvedeny vizuální navigační prostředky, systémy pro sledování letištní plochy a systémy, které se používají k predikci možných kolizí na letištní ploše. U každého popisu systému je brán zřetel na to jak funguje, co poskytuje za informace, jeho výhody a nevýhody a jeho použití v provozu. Dále je nastíněno jaká má být jeho role v budoucnu. Pro dokreslení důležitosti všech systémů a prostředků jsou v práci uvedeny nehody, ke kterým došlo z důvodu nedostatečného přehledu o situaci na letišti. V poslední kapitole jsou porovnány systémy, které se využívají k získávání přehledových dat.

Práce je primárně určena jako studijní pomůcka pro budoucí piloty, proto je zaměřena na stručný a výstižný popis všech důležitých informací tak, aby byla srozumitelná i pro člověka, který dosud s touto problematikou nepřišel do styku. Využití může najít i při výcviku pozemního personálu letiště nebo při plánování instalace nových přehledových systémů na letiště.

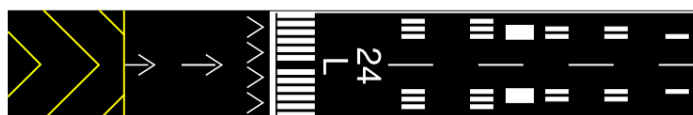
2. Vizuální navigační prostředky

Tato kapitola je zaměřena na vizuální navigační prostředky, které slouží pro navigaci po letištní ploše. Letištní plocha se skládá z ranvejí (RWY), pojezdových drah (TWY) a odbavovacích ploch. Běžný pohyb letadel po ploše letiště je, že nejdříve přistane na RWY a poté pokračuje po TWY na odbavovací plochu, kde dojde k nástupu a výstupu cestujících, popřípadě k naložení a vyložení nákladu. Následuje opět pohyb po TWY až na RWY a odlet letadla. Mimo letadel se provozu na ploše účastní také velké množství vozidel, která slouží pro zajištění služeb pro letadla, přepravu cestujících a nákladu po ploše nebo pro zajištění bezpečnosti provozu.

Existují čtyři základní druhy vizuálních navigačních prostředků: znaky, značky, značení a návěstidla. Využívají se pro vyznačení drah a důležitých míst na letišti a k vedení letadel a vozidel při pohybech po ploše letiště. Kromě navigace po ploše lze tyto prostředky použít také pro označení letiště, navedení letadel na přistání nebo předávání různých informací pilotům letadel a řidičům vozidel. Ačkoliv se jedná o poměrně jednoduché systémy, jsou důležitou součástí navigace po letištní ploše. Jejich nesmírnou výhodou je, že pro předání informací není potřeba žádné komunikace s řídicím letového provozu.

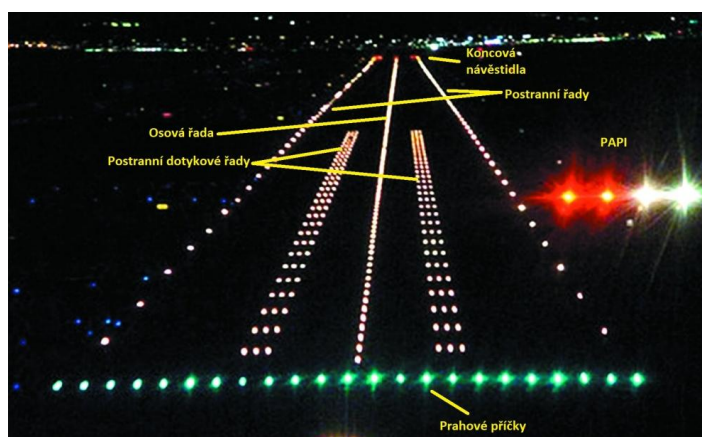
2.1 Značení a světla na RWY

Značení RWY se provádí bílou barvou. Na RWY se nachází poznávací, osové, prahové a postranní značení. Dále se ještě vyznačuje zaměřovací bod a dotykové pásmo. Poznávací značení udává číslo dráhy, které představuje magnetický směr dráhy zaokrouhlený na desítky (magnetický směr $263^\circ = \text{RWY } 26$). V případě, že se na letišti nachází paralelní RWY jsou k číslu přidána písmena L (left), R (right), C (center). Pokud je paralelních RWY ještě více, posune se magnetický směr o 10° (z RWY 26 se stane RWY 27).^[23] Osové značení představují přerušované pruhy ve středu dráhy, postranní značení souvislý pruh podél celé RWY a prahové značení pruhy umístěné souměrně k ose dráhy. Zaměřovací bod je značen dvěma výraznými pásy, které jsou z obou směrů obklopeny několika páry značení dotykového pásma. Počet párů závisí na použitelné délce přistání.



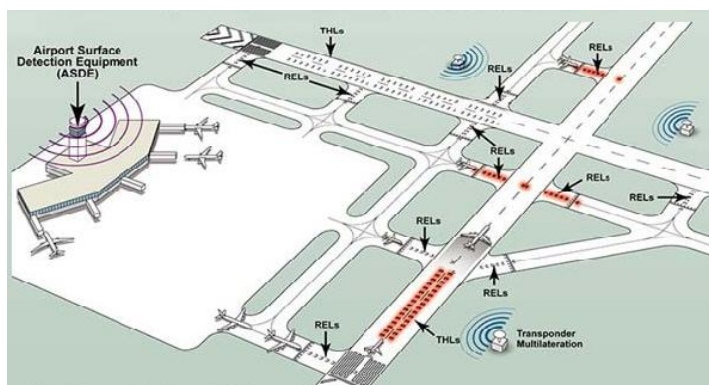
Obr. 2.1 Značení RWY. Žluté šipky na začátku RWY znamenají, že se tato část RWY nevyužívá.^[65]

Světelná návěstidla na RWY slouží zejména při provozu v noci a při zhoršené viditelnosti. Mezi osvětlení RWY patří postranní, osová a dotykové řady, prahové příčky a koncová návěstidla. Jako výstražný systém proti narušení RWY slouží návěstidla stavu RWY. Postranní dráhové řady jsou umístěny po celé délce RWY, tvoří je bílá světla, posledních 600 m jsou světla žlutá. Osová řady jsou na ose RWY, která jsou zpočátku bílá, 900-300 m od konce RWY střídavě červená a bílá a posledních 300 m RWY červená. Postranní dotykové řady jsou stálá bílá světla, která navazují na přibližovací soustavu. Prahové příčky jsou stálá zelená světla umístěná na prahu RWY. Rozmístění a případné umístění polopříček závisí pro jakou kategorii přiblížení je RWY určena. Koncová návěstidla svítí červeně, opačným směrem než prahové příčky a jsou umístěna na opačném konci RWY.



Obr. 2.2 Světla na RWY^[35]

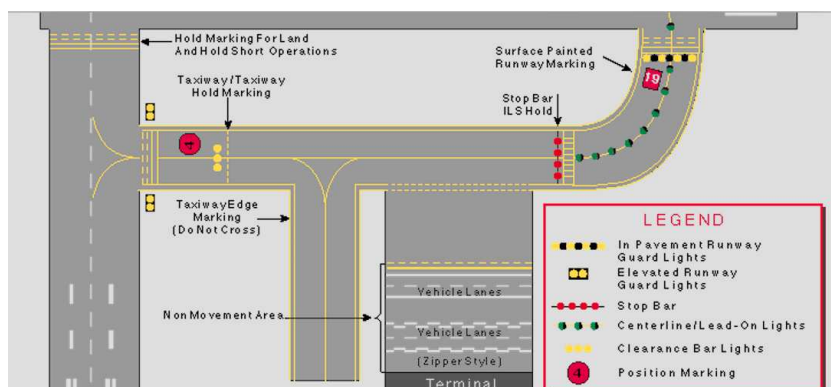
Návěstidla stavu RWY (RWSL) mají dvě základní součásti, a to návěstidla vstupu na dráhu (REL) a vyčkávací návěstidla pro vzlet (THL). Návěstidla jsou plně automatická a poskytují pilotovi nebo řidiči informaci zda je bezpečné vstoupit na dráhu. REL jsou tvořena jednou řadou světél červené barvy, která svítí ve směru příjezdu na RWY. Řada je tvořena minimálně pěti světly a je umístěna u vstupu na RWY. THL jsou tvořena dvěma řadami červených světél, která svítí směrem k vzlétajícímu letadlu. Jsou umístěna podél osy RWY, 115 m od začátku RWY a jejich minimální délka musí být 450 m.^[39]



Obr. 2.3 Návěstidla stavu RWY^[39]

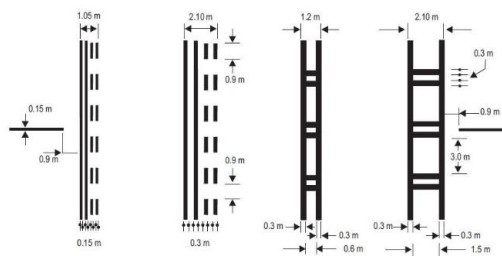
2.2 Značení a světla na TWY a odbavovací ploše

Značení na TWY a odbavovacích plochách se provádí žlutou barvou. Na TWY se nachází osové značení, značení vyčkávacího místa a značení pro zkoušku zařízení VOR. Pokud nelze umístit v blízkosti TWY znaky nebo je vhodné je doplnit značením, zřizuje se na vozovkách také příkazové a informační značení. Platí pro něj stejné požadavky jako pro znaky. V případě, že je na letišti zřízeno obratiště, provádí se také značení obratiště. Na odbavovací ploše jsou značena stání letadel.^[59]



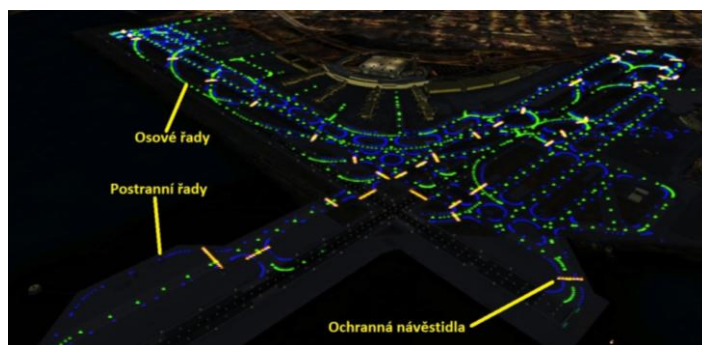
Obr. 2.4 Značení pojezdové dráhy^[67]

Osové značení tvoří souvislý pruh po celé délce TWY. Pokud TWY ústí na RWY, osové značení TWY kopíruje osové značení RWY do určité vzdálenosti od tečného bodu v závislosti na kategorii RWY. Vyčkávací místa se značí několika obrazci (viz. obrázek 2.5). Vyčkávací místo blíže RWY se značí obrazcem A, pokud je více vyčkávacích míst použije se pro ta další obrazec B. Mezilehlá vyčkávací místa se značí přerušovanou čarou umístěnou před křižovatkou. Stání letadla je vyznačeno žlutým pruhem, na něm jsou umístěny červené příčky pro zastavení a šipky, které udávají začátek otáčení.



Obr. 2.5 Značení vyčkávacího místa. Zleva obrazce A1, A2, B1 a B2. Od roku 2026 již nebudou obrazce A1 a B1 platné.^[23]

Světelná návěstidla na TWY jsou osová a postranní řady, stop příčky a ochranná návěstidla. Osová řada je tvořena zelenými směrovými světly, při vjezdu na RWY jsou za vyčkávacím místem střídavě zelená a žlutá. Postranní řady tvoří modrá všesměrová světla po celé délce TWY, v místě zatáček jsou zhuštěná. Stop příčky se umísťují na vyčkávacím místě nebo v místě křižovatky a tvoří je červená světla. Pro upozornění na vyčkávací místo slouží žlutá záblesková ochranná návěstidla.^[9]



Obr. 2.6 Světla na TWY^[66]

Odbavovací plochy jsou osvětleny světly, která nemění barvy značení (nejčastěji bílá světla), a jsou umístěna na stožárech tak, aby nevrhala stín. Používají se při snížené viditelnosti nebo nočním provozu. Na odbavovací ploše jsou světla pro navádění na stání, která odpovídají značení stání letadla, tedy žlutý pruh světel a červená příčka v místě zastavení.

2.3 Znaky a značky

Letištní znaky představují analogii dopravních značek. Slouží k předávání příkazů nebo informací o určitých místech, směrech nebo cílech na letištní ploše. Mohou buď obsahovat jednu zprávu nebo na nich lze elektronicky přepínat více zpráv.

Znaky se umísťujú v blízkosti pojezdových drah. Jsou pravoúhlého tvaru a jejich vodorovný rozměr musí být větší než rozměr svislý. Aby došlo k zajištění prostoru bez překážek, musí být dostatečně nízké. Pro případ, že by došlo ke kolizi s letadlem, jsou znaky křehké, takže nedojde k poškození letadla. Rozlišujeme dva základní druhy znaků: příkazové a informační. Dále ještě existuje znak místa pro kontrolu zařízení VOR a letištní poznávací znak, který slouží k identifikaci letiště, pokud letiště nemá jiné prostředky pro identifikaci.

Příkazové znaky slouží k označení míst, do kterých má letadlo bez povolení řídicího provozu zakázáno vstoupit. V případě neřízeného letiště musí pilot nejprve vykonat všechna preventivní opatření, než vstoupí do oblasti za znak. Příkazový znak je tvořen bílým nápisem na červeném pozadí. Pro zvýraznění se někdy používá černý okraj. Umísťují se po obou stranách vyčkávacího místa, v případě znaku NO ENTRY (zákaz vstupu) na začátku plochy, na kterou je vstup zakázán.^[60] Mezi příkazové znaky patří:

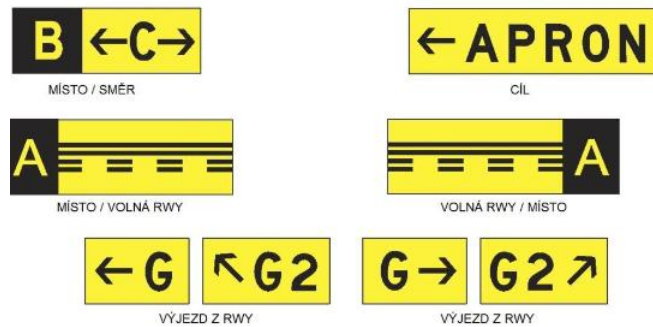
- poznávací znak RWY
- znak vyčkávacího místa kategorie I, II nebo III
- znak vyčkávacího místa RWY
- znak vyčkávacího místa na komunikaci
- znak NO ENTRY



Obr. 2.7 Příklady příkazových znaků^[23]

Informační znaky slouží k identifikaci konkrétního místa na letišti nebo k poskytnutí informace o směru a cíli. Informační znak tvoří černý nápis na žlutém pozadí. Výjimkou je znak místa, který je tvořen žlutým nápisem na černém pozadí. Umisťují se až na výjimky uvedené v přepisu L14^[23] po levé straně pojezdové dráhy. Mezi informační znaky patří:

- směrový znak
- znak místa
- cílový znak
- znak výjezdu z RWY
- znak uvolněné RWY
- znak zbývající délky rozjezdu pro vzlet z křižovatky



Obr. 2.8 Příklady informačních znaků^[23]

Značky slouží pro vyznačení překážky nebo vymezení hranice. Umisťují se na úrovni země, nejčastěji v případech, kdy nelze rozlišit dráhu od okolního terénu. Rozlišujeme:

- postranní značky dojezdových drah
- postranní značky zasněžených RWY
- osově značky TWY
- pomezí značky (slouží k vymezení hranic letiště, pokud není oploceno)
- značky posunutého prahu nezpevněné dráhy
- značka přistání kluzáků

3. Způsoby sledování letištní plochy

V této kapitole jsou popsána zařízení sloužící pro sledování pohybu po letištní ploše. Tato zařízení se začala používat s rozvojem letecké dopravy pro zvýšení bezpečnosti a kapacity provozu. Pro řízení pohybů letadel ve všech fázích letu byla zřízena služba řízení letového provozu (ATC). Stanoviště ATC se nachází ve věži, která je nejvyšší stavbou na letišti. Informace získané z radionavigačních a satelitních zařízení jsou zobrazeny na obrazovkách řídicímu letového provozu, ten je vyhodnotí a na jejich základě vydává pokyny pilotům a řidičům mobilních prostředků.

3.1 Vývoj v oblasti sledování letištní plochy

Potřeba sledovat provoz po letištní ploše pochází už od počátku letectví. Provoz na letištní ploše nezahrnuje pouze letadla, ale také veškerá vozidla pro technické odbavení letadel a pro zajištění bezpečnosti provozu na ploše. V dobách, kdy byl letecký provoz malý a létalo se za dobrých povětrnostních podmínek stačilo, aby pilot vizuálně kontroloval, zda nedojde ke kolizi s jiným letadlem na ploše letiště. S rostoucím provozem, zejména za zhoršených meteorologických podmínek, však tato metoda přestala stačit.

Už od první světové války se v letectví začaly využívat radiostanice ke komunikaci mezi piloty a zemí. První let, kdy piloti mezi sebou komunikovali vysílačkou, proběhl 2. září 1916.^[36] Před druhou světovou válkou se objevily první radary, které využívaly odraz radiových vln k lokalizování letadel. To znamenalo průlom ve sledování pohybů letadel ve vzduchu i na zemi, protože řídící ze země měli možnost získat přehled o provozu bez nutnosti vizuálního kontaktu nebo komunikace s piloty. Během války se objevily také sekundární radary, které byly schopné letadla identifikovat a získat o nich další informace a byly vytvořeny první multilaterační systémy.

Poté, co byla v roce 1957 vypuštěna první družice Sputnik 1 na oběžnou dráhu Země, se naskytl možnost navigace pomocí satelitů. V 70. letech 20. století se objevily první globální satelitní navigační systémy GPS (USA) a GLONASS (SSSR), které byly určeny primárně pro vojenské účely. Od roku 1983 byl systém GPS zpřístupněn i pro civilní účely a roku 1995 byl plně dobudován. V letectví byl pro přenos informací zís-

kaných pomocí satelitů vyvinut systém ADS-B. Letadla a vozidla vybavená přístroji spolupracujícími s tímto systémem vysílají obdržené informace pozemním stanicím. V budoucnu se počítá s ADS-B jako s hlavním zdrojem přehledových informací. Přejít na ADS-B představuje náročnou a drahou záležitost, proto od jeho spuštění v roce 2005 stále nedošlo k plnému přechodu z radarů na ADS-B.

Za účelem zefektivnění letecké dopravy se budou v následujících letech implementovat programy společného evropského nebe (SESAR) nebo NextGen z USA. V těchto programech se počítá s postupným zaváděním ADS-B jako hlavního navigačního prostředku a jako záložní systémy mají sloužit radary a multilaterace. Dle průzkumu z roku 2018 bylo pouze 20% zkoumaných letadel vybaveno odpovídáčem schopným spolupracovat s ADS-B. U některých letadel jako A320 (21%) nebo A330/340 (31%) je toto číslo vyšší, avšak není dostatečné, aby bylo možno využívat ADS-B jako hlavní prostředek.^[7] V následujících letech je plánován rozvoj ADS-B, který by mohl od roku 2025 a dále sloužit jako hlavní navigační prostředek.

3.2 SMR

Radar jako první začali využívat Britové za druhé světové války při bitvě o Británii pro odhalení nepřátelských letadel a včasnému varování před útokem. Primary surveillance radar (PSR) vysílá vysokofrekvenční signál, který se odrazí od cíle a odražený signál je zaznamenán zpátky na zemi.^[1] Na základě směru ze kterého odraz přijde a zpoždění od vyslání signálu se určí poloha cíle. Surface Movement Radar (SMR) je druh PSR a je nejrozšířenějším přehledovým systémem pro kontrolu pohybu po letištní ploše.^[29] Byl první přehledovým systémem, který se začal využívat k řízení pohybu po ploše letiště. V současné době se využívá k detekování všech cílů, které se účastní provozu na letištní ploše, buď samotný, nebo jako základ přehledových systémů.



Obr. 3.1 Anténa SMR^[63]

Princip činnosti

SMR pracuje na stejném principu jako primární radar (PSR), tedy vysílá signál, který se odrazí od cíle a na základě přijatého odrazu určí vzdálenost a azimut cíle. Oproti PSR pracuje na vyšších frekvencích nejčastěji v pásmech X a K_u, SMR s vysokým rozlišením v pásmu V. Anténa SMR je obvykle umístěna na střeše ATC věže z důvodu dobrého přehledu nad celým prostorem letiště. Oproti PSR má anténa SMR menší rozměry a větší rychlost otáčení. Umožňuje to skutečnost, že SMR pracuje ve vyšších kmitočtových pásmech.

Tab 3.1 Pásmo radarů^[6]

Kmitočet	Střední vlnová délka	Označení pásma
100 GHz	0,3 cm	O
60 GHz	0,5 cm	V
37,5 GHz	0,8 cm	Q
24 GHz	1,25 cm	K
10GHz	3 cm	X
6 GHz	5 cm	C
3,75 GHz	8 cm	SW
3,0 GHz	10 cm	S
1,2 GHz	25 cm	L

Poskytované informace

- poloha cíle
- vypočítaný vektor rychlosti cíle
- azimut k cíli

Hlavními požadavky na SMR je vysoká přesnost měření vzdálenosti a azimutu po celé letištní ploše, vysoká rozlišovací schopnost, nutná pro rozpoznávání malých cílů a jeho dosah, který musí přesahovat rozměry letiště. SMR musí být schopen sledovat až 400 objektů, včetně malých objektů, které by mohly ohrozit bezpečnost provozu jako například zapomenutý kufr na ploše letiště. Zpoždění informace musí být menší než 100

ms a obnova informací musí nastat maximálně za 1 s. Chyba zaměření musí být menší než 20 m^[28] a chyba měření rychlosti menší než 2,5 km/h pro objekty pohybující se rychlostí 5-100 km/h.^[21] SMR musí být kompatibilní s ostatními systémy, které se používají na daném letišti.

Výhody

- poskytuje odraz také od nespolupracujících cílů
- rychlá obnova informací
- nevyžaduje speciální avioniku
- poskytuje i meteorologické informace

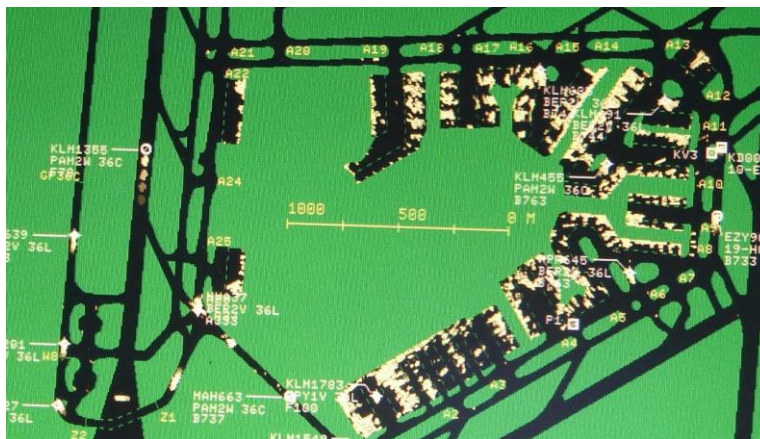
Nevýhody

- neidentifikuje cíle a neposkytuje informace o výšce letu
- nelze rozeznat falešné odrazy
- splývání cílů, které jsou blízko u sebe
- stínění vzdáleného cíle bližším cílem
- rušení silným deštěm, okolním povrchem a vysokým porostem
- vysoké pořizovací a provozní náklady

Tab. 3.2 Charakteristiky SMR^[2]

	Pásmo V	Pásmo X1	Pásmo X2	Pásmo K _u
Kmitočet [GHz]	95	9,375 9,410 9,170 9,438 9,490	9,34-9,52	15,7-16,7
Šířka pulzu [ns]	20	40	40	40
Azimut [°]	0,2	0,37	0,45	0,33
Velikost vertikální vyzařovací charakteristiky [°]	-	11	18	23
Výkon [kW]	1,5	17	25	20
PRF [Hz]	4096	800-8000 (Programovatelná)	10000	8192
Rychlost otáčení antény [RPM]	60	60	60	60
Zisk Antény [dB]	52	38	37	42
Dosah [km]	3 2 (mlha) 1,5 (déšť)	5,5	6 5,7 (déšť)	5,5 4,5 (déšť)

SMR se využívá například pro určení zda je RWY volná pro vzlet či přistání, jestli se letadlo nachází na správné RWY nebo pojezdové ploše, jestli letadlo započalo vzlet nebo jestli se letadla a vozidla řídí pokyny věže a jsou na místě, kde se ohlásila. SMR by nikdy neměl být využíván řídicím provozu k poskytování hlavních instrukcí pro po-
jíždění. Obecně platí, že instrukce na základě SMR by měly být stejné, jako by mohl ATC dát na základě vizuálního řízení.



Obr. 3.2 Obrazovka A-SMGCS. Lze na ni vidět odrazy cílů zachycených pomocí SMR.^[62]

Milimetrové radary

Milimetrové radary pracující v pásmu V mají výhodu ve svých malých rozměrech, jednoduché instalaci na již existujícím letišti, nízkou energetickou náročnost a doplnění informací v kritických uzlech letiště nebo slepých místech SMR. Po letišti je většinou rozmístěno několik těchto radarů na tyčích vysokých 2 m.

3.3 SSR

Secondary Surveillance Radar (SSR) byl původně vyvinut pro vojenské účely již během 2. světové války. Cílem bylo odlišit vlastní letadla od letadel nepřítele. K tomu se používaly speciální odpovídače nainstalované na palubě letadel. Ze země byl vyslán dotaz, na který odpověděla pouze vlastní letadla a ta, která neodpověděla, byla považována za nepřátelská. V současné době sekundární radar stále patří mezi nejrozšířenější navigační prostředky, v posledních letech stále dochází k výstavbě nových stanovišť. V budoucnu se s ním počítá jako s jedním ze záložních systémů ADS-B.

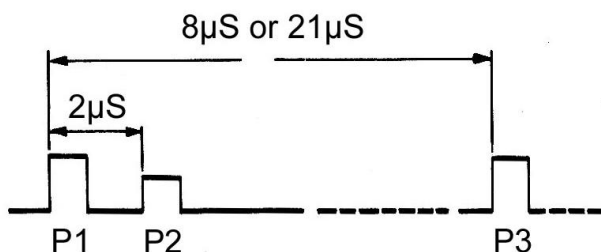
Princip činnosti

SSR ke své činnosti využívá pozemní dotazovač a palubní odpovídač. Ze země je vyslán dotaz, který může být určen pro všechna letadla, nebo adresován pouze vybranému letadlu. Na palubě letadla je dotaz zachycen a palubním odpovídačem je vyslána odpověď zahrnující informace o letadle. Pokud letadlo není vybaveno odpovídačem, nemůže být pomocí SSR detekováno. Dotazy jsou vysílány na frekvenci 1030 MHz a odpovědi na frekvenci 1090 MHz.



Obr. 3.3 Anténa PSR (dole) a SSR (nahore) Sky Search-3000^[64]

Na zemi jsou nad sebou umístěny dvě antény. Horní anténa je všesměrová a její vyzařovací charakteristika je stejná do všech směrů. Spodní anténa je dlouhá rotující a je rozdělena do dvou částí podle osy otáčení. Výstup z každé její části jde do hybridního prstence, kde jsou generovány pulzy P1 a P3. Tyto dva pulzy jsou vysílány společně se třetím pulzem P2, který slouží k potlačení nežádoucích odpovědí vyvolaných postranními laloky vyzařovací charakteristiky. Šířka všech pulzů je $0,8 \mu\text{s}$. Pulz P2 je vyslán se zpožděním $2 \mu\text{s}$ za P1. Jestliže je amplituda P2 menší než P1, je dotaz vyslán hlavním lalokem vyzařovací charakteristiky. Pokud je amplituda P2 větší nebo rovna amplitudě P1 je tento dotaz vyslán postranním lalokem a odpověď na něj je potlačena.



Obr. 3.4 Vysílání pulzů P1, P2 a P3 v módu A/C^[71]

Mód A/C

Původní SSR měl definované čtyři civilní módy označené písmeny A-D a tři vojenské módy označené písmeny 1-3. Jednotlivé módy se od sebe liší vzdáleností mezi pulzy P1 a P3. V současné době se z civilních módů využívá pouze mód A se vzdáleností 8 μs mezi P1 a P3 a mód C s 21 μs .^[33]

Odpověď módu A/C je tvořena 15 pulzy. Krajní pulzy jsou označeny písmeny F1 a F2, mezi kterými je vzdálenost 20,25 μs . Postupně jsou vysílány pulz F1, který následuje šest pulzů se vzájemnou vzdáleností 1 μs , poté je jedna volná pozice a dalších 6 pulzů. Vysílání je ukončeno pulzem F2. Šířka jednotlivých pulzů je 0,45 μs . První a poslední pulz označené F1 a F2 odpovídají 1, prostřední pulz označený X odpovídá 0 a ve zbylých 12 pulzech je umístěna informace. Na žádost ATC může pilot stisknout tlačítko SQUAWK IDENT, kterým vyše odpověď bez nutnosti dotazu a řídicí pozná se kterým letadlem zrovna komunikuje. V tomto případě je k odpovědi přidán pulz SPI, který je umístěn 4,35 μs za F2.^[12]

Ve vysílání módu A je pomocí Grayova kódu zašifrováno čtyřmístné ID letadla, které může mít 4096 různých kombinací. V módu C je vysílána barometrická výška letadla redukována na střední hladinu moře, tedy k hodnotě 1013,25 hPa. Výška je indikována v násobcích 100 ft s chybou maximálně 50 ft až do hodnoty 126 750 ft.

Šikmá vzdálenost k letadlu se určuje stejně jako u PSR měření času od vyslání dotazu po příchod odpovědi. Ve výpočtu se ovšem musí zohlednit doba pro vygenerování odpovědi po přijetí pulzu P3, která je asi 3 μs s chybou maximálně 0,5 μs . Pomocí úhlu natočení antény se určuje azimut k cíli s přesností okolo 0,15°. Dotazy v tomto módu nelze adresovat jednotlivým letadlům, vždy na ně odpoví všechna letadla v oblasti vybavená odpovídačem módu A/C.

Z důvodu, že dotazy módu A/C nemohou být adresné, nastává u něj několik nedostatků. Prvním je Garbling. Jedná se o synchronní rušení, které je vyvoláno překrýváním se odpovědí vyvolaných jedním SSR. Garbling vzniká v případě, kdy dva nebo více odpovídačů má podobný azimut a vzdálenost od radaru. Lze jej odstranit upravením konstrukce dotazovače (co nejužší horizontální šířka svazku), použitím pokročilejších metod úpravy signálu nebo vysíláním adresných dotazů v módu S.

Dalším nedostatkem je nesynchronní rušení Fruiting. Dochází k němu z důvodu, že odpovídač na palubě letadla vysílá všesměrově a jeho odpověď tak mohou zachytit i pozemní stanice, které nevyslaly dotaz. Na každé stanici jsou přijímány odpovědi, které nebyly vyvolány vlastním dotazovačem. S rostoucím provozem roste vliv Fruitingu. Na odstranění Fruitingu se využívají zvláštní detekční obvody. Posledním nedostatkem je Multipath. Jedná se o vícecestné šíření signálu mezi letadlem a pozemní stanicí.^[12]

K výhodám módu A/C patří:

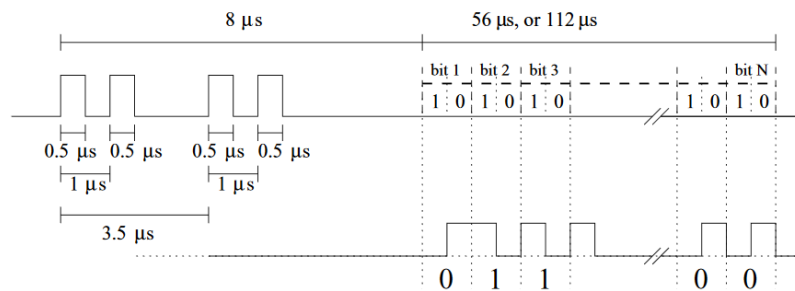
- poskytuje ID letadla a výšku letu
- umožňuje komunikaci v případě vzniku nebezpečného stavu
- odolný povětrnostním vlivům

Mezi nevýhody módu A/C patří:

- nelze odlišit falešné informace
- pořizovací a provozní náklady
- ke své činnosti potřebuje odpovídač na palubě letadla
- nedostatečná přesnost a dlouhá doba obnovy informací pro řízení pohybů po ploše letiště

Mód S

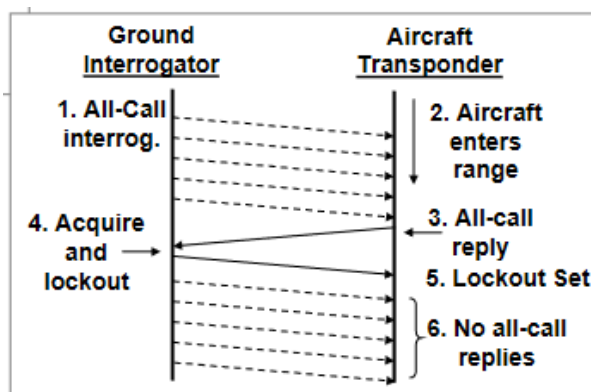
Z důvodu rostoucího objemu letecké dopravy mód A/C dosáhl své maximální kapacity, došlo tak k přetížení frekvencí SSR. Proto byl vyvinut nový mód S, který umožňuje ATC vysílat adresné dotazy jednotlivým letadlům. Každému letadlu je za tímto účelem přidělena 24-bitová adresa, lze tak vytvořit 16 777 216 různých kódů. Odpověď módu S se skládá z preamble tvořené dva impulzy P1 a P2 o délce 0,5 μ s k potlačení odpovědí odpovídačů módu A/C. Po vstupní části, která je dlouhá 3,5 μ s, následuje 56 nebo 112-bitový blok dat P6 s délkou 16,25 nebo 30,25 μ s. Blok dat P6 tvoří 5 bitů, které indikují druh dotazu, 56-bitová zpráva a na závěr 24-bitová adresa letadla.^[73] Vysílané zprávy je možné skládat do bloků, lze takto odeslat zprávu dlouhou až 1280 bitů.



Obr. 3.5 Formát odpovědi módu S^[12]

Aby bylo možné efektivně spolupracovat s letadly vybavenými buď odpovídačem módu A/C nebo módu S, je vysílání dotazů rozděleno do dvou období. Tato období se nazývají All-Call periods a Roll-Call periods. V období All-Call period je vysílání zaměřeno na dotazy všem letadlům s odpovídačem módu A/C a S. Letadla, která jsou v oblasti působnosti dotazovače vyšlou svou 24-bitovou adresu a kód odpovídače. Dotazovač odpověď dekóduje a určí tak jeho pozici.

V období Roll-Call Period jsou vysílány adresné dotazy letadlům s odpovídačem módu S. V dotazech je obsažena informace, aby odpovídač nereagoval na všechny All-Call dotazy. Dotazovač může využít funkce lockout, která odpovídači umožní nereagovat na All-Call dotaz s daným kódem po dobu 18 s, čehož se využívá u všech získaných cílů s odpovídačem módu S. Období Roll-Call period se někdy označuje jako Mode S period. Jednotlivá období se střídají s frekvencí 40-150 Hz.^[13] Tato frekvence závisí na maximálním dosahu radaru, šířce vyzařovací charakteristiky a rychlosti otáčení antény. Dotazy All-Call jsou vysílány několikrát za jednu otáčku antény, dotazy Roll-Call pouze jednou.^[72]



Obr. 3.6 Střídání All-Call period (1-3) a Roll-Call Period (4-6)^[13]

Odpovídač, který pracuje v Mode S ELS (Elementary Surveillance) podává informace o:

- identifikaci letadla
- letové hladině v intervalech 25 ft
- zprávy o schopnosti odpovídače
- datové linky a status letu (jestli je letoun na trati nebo na zemi)

Pokud odpovídač pracuje v Mode S EHS (Enhanced Surveillance) poskytuje všechny informace jako Mode S ELS a navíc přidává informace o:

- zvolené výšce letu
- příčném a podélném náklonu
- Ground Speed (GS)
- magnetickém kurzu
- indikované rychlosti (IAS)
- Machově čísle
- rychlosti stoupání/klesání^[34]

Mezi výhody módu S oproti módu A/C patří:

- dostupnost téměř 17 milionů adres
- lepší rozlišovací schopnost
- poskytuje dokonalejší přehled o vzdušné situaci

Nevýhodou módu S je:

- potřeba spolupracujícího odpovídače (letadla, která nejsou vybavena odpovídačem nelze pomocí SSR zachytit)
- multipath
- dlouhá doba obnovy informací

S rostoucím objemem letecké dopravy se předpokládá, že i SSR nebude stačit na spolupráci se všemi letadly zároveň.

3.4 Multilaterace

Multilaterace je metoda přesného zachycení cíle na základě metody TDOA (Time Difference of Arrival). Multilaterační systém využívá signály vysílané letadly pro výpočet jejich přesné pozice. Tato technologie, která se využívá již několik dekad, byla původně vytvořena pro vojenské účely k přesnému lokalizování letadel. Jejimi předchůdci byli britský systém Gee nebo později systém LORAN. Multilateraci lze použít k řízení pohybu po letištní ploše, v TMA i na trati letu.

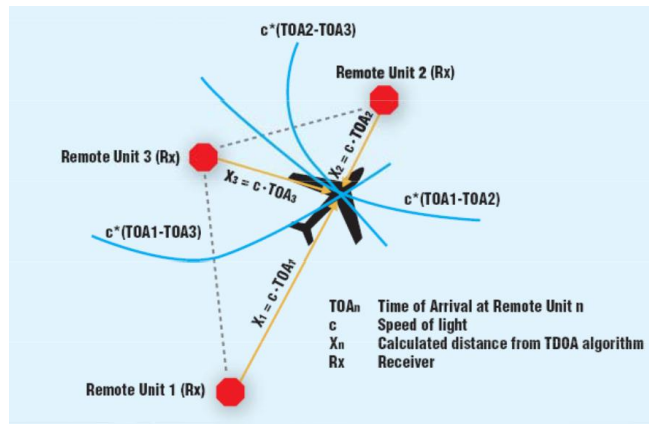
Multilaterační (MLAT) systém se skládá z několika pozemních stanic, které jsou rozmístěny v okolí letiště, pro pokrytí větší oblasti se umísťují i do TMA a širšího okruhu letiště. Systém může být buď aktivní, nebo pasivní. Pasivní systém nemá vysílač a pouze přijímá okolní signály, zatímco aktivní dokáže sám vyvolat odpověď od SSR odpovídače. Každá MLAT jednotka se tak skládá z vysílacího subsystému, který generuje dotaz a vysílá jej. Dále ji tvoří přijímač, která přijímá vysílání od cíle a centrální procesor pro výpočet vzdálenosti cíle. Systém spolupracuje s odpovídači módu A/C a módu S sekundárního radaru a vysílačem ADS-B. Přijímač pracuje na frekvenci 1030 MHz v módech A/C/S/1090ES ADS-B a vysílač na frekvenci 1090 MHz v módech A/C/S.^[5]

Princip činnosti

MLAT systém je založen na výpočtu vzdálenosti na základě rozdílného času přijetí signálu z letadla na různých anténách (TDOA). Pro výpočet TDOA se u multilaterace prostřednictvím SSR používá TOA (Time of Advance). Nejdříve jej systém převede do základního signálu a digitalizuje jej. Po digitalizaci TOA systém spočítá čas přijetí signálu a extrahuje informace z SSR. Vypočítané TOA z jednotlivých přijímačů systém spočítá a vzájemně porovná.^[19]

Na základě dvou TOA se vypočte hyperboloid, který představuje vzdálenost od pozemní jednotky, ve které se pohybuje cíl. Pokud má systém čtyři antény, tak je schopen zaměřit přesnou polohu cíle. Systém může pracovat i se třemi anténami. V tomto případě je schopen určit pouze 2D polohu cíle v rovině, není možné určit jeho nadmořskou výšku. Informaci o výšce lze získat například z odpovídače módu C, přesnost zaměření ale nebude tak vysoká, jako u zaměření čtyřmi anténami, protože barometrická výška vysílaná módem C se může v jednotlivých místech lišit. Jeho poloha je následně

vypočítána na základě známé výšky letu a 2D pozice. U pohybu po letištní ploše tento problém odpadá, protože výška je jasně daná nadmořskou výškou letiště. Při použití více než 4 antén lze dosáhnout přesnějšího zaměření. Zaměření cíle pomocí hyperboloidů nemusí být jednoznačné, protože se mohou navzájem protnout ve více místech a vytvořit tak falešnou polohu cíle.^[4]



Obr. 3.7 Princip metody TDOA^[31]

Přesnost multilaterace závisí na DOP (Dilution of Precision), tedy na zhoršení činitele přesnosti. Tento činitel závisí na rozmístění stanic po letišti a aktuální poloze cíle vůči nim. Čím je DOP vyšší, tím je horší geometrie stanic a menší přesnost zaměření. Kontrola přesnosti multilateračního systému na letišti probíhá pomocí vozidla popřípadě letadla, které je vybaveno odpovídačem. Vozidlo se pohybuje po letištní ploše přes místa, kde nás zajímá přesnost systému. Pomocí MLAT je zaznamenána dráha, po které se vozidlo pohybovalo. Odchylka zaznamenané dráhy od skutečné dráhy vozidla nám určí velikost chyby v daném místě letiště.^[31] Pro správný výpočet TOA je zapotřebí synchronizace času, protože digitalizačním procesem signálu vzniká zpoždění. Aby bylo zaměření přesné je potřeba znát toto zpoždění a počítat s ním.



Obr. 3.8 Zobrazení velikosti chyby MLAT v jednotlivých částech letiště. Měření proběhlo pomocí vozidla^[31]

Tab. 3.3 Výkony multilateračního systému

Vlastnost	Výkon systému
Frekvence obnovy	1 Hz
Pokrytí	Obvykle celá TMA (záleží na rozmístění přijímačů)
Přesnost	< 7,5 m na ranveji a pojezdové dráze
Množství cílů	Až 500 za 1 min
Identifikace	24-bitová adresa módu S 12-bitová adresa módu A/C
Pravděpodobnost falešného zaměření	10^{-6}
Zahájení sledování	5 s po zapnutí odpovídače nebo vstupu do pokryté oblasti
Spouštěcí čas	< 5 min
Přepnutí na záložní systém	< 1 s

Výhody

Multilaterace dokáže monitorovat prostory, které jsou mimo dosah radaru. Nejčastěji je to z důvodu, že jsou stíněny překážkami, jako jsou například letištní budovy nebo hangáry. ATC tak může monitorovat celou oblast letiště s vyšší přesností bez ohledu na překážky a povětrnostní podmínky na letišti. Další výhodou je, že dokáže od všech letadel získat i identifikaci z odpovídače a rozlišit dva navzájem blízké cíle. Odpovídačem navíc mohou být vybavena letištní vozidla a mohou být integrována do A-SMGCS systému. MLAT systém dokáže při nízkých finančních nákladech efektivně rozšířit oblast pokrytou přehledovými systémy a zvýší bezpečnost na daném letišti. Oproti radarům je MLAT systém statický, tím pádem je jednodušší jeho údržba, má menší energetickou náročnost a je šetrnější k životnímu prostředí.

Nevýhody

Nevýhodou MLAT systému je, že s rozšiřováním leteckého provozu zároveň rostou požadavky na rozšíření systému. To vyžaduje další zdroje napájení a další komunikační cesty. Z toho důvodu rostou požadavky na údržbu systému a nastává také problém s vlastnictvím pozemků pro instalaci MLAT zařízení. Tento problém nastává hlavně u zařízení, která se nacházejí v odlehlých prostorech. Dalším problémem jsou rozdílné certifikační požadavky a rozdílné náklady na instalaci systémů pro spolupráci s MLAT u různých letadel. Je potřeba vzít v úvahu problémy týkající se systémů SSR, ADS-B a GNSS. Hlavně jde o integraci a kompatibilitu s těmito systémy a problém s ovládáním a zobrazením v kokpitu. MLAT také klade vysoké požadavky na zpracování a distribuci

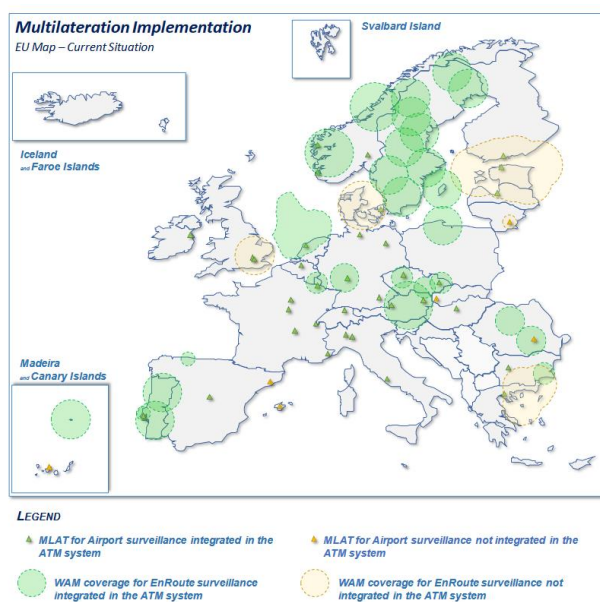
dat systémem pro řízení pohybu po letišti. Jedná se o velké množství dat, jejichž zpracování vyžaduje určitý výkon systému, dostupnost energie a kapacitu datového úložiště. Složitější multilaterační systémy jsou náchylné na rušení signálu, například velké množství letištních vozidel může systémem přehltit.^[8]

Poskytované informace

- pozice
- letová hladina
- ID a 24 bitový kód letadla
- azimut cíle
- traťový úhel
- magnetický kurz
- vektor rychlosti

Jak již bylo zmíněno, MLAT se využívá ve všech fázích letu. Monitorování pohybů po letištní ploše bylo prvním využitím MLAT systému v civilním letectví a i v současnosti tvoří důležitou součást systému A-SMGCS. Při řízení pohybu na letišti se využívá k monitorování letadel a vozidel, aby nedošlo ke srážkám. Operace se podle MLAT řídí i při snížené viditelnosti, a to až do kategorie ILS CATIIIB. Používá se také pro operace na rovnoběžných drahách a pro získání informací o využití letiště, které slouží k vyúčtování letištních poplatků. Pomocí multilaterace se také monitoruje překročení hlukových limitů v jednotlivých místech dráhy letadla.

V TMA se multilaterace využívá pro řízení operací v nízké výšce na letištích, kde okolní terén způsobuje rušení radarového signálu. Tento problém mají například letiště v Ostravě nebo v rakouském Innsbrucku. V okolí letiště by byla potřeba pro optimální pokrytí instalovat jeden nebo více SSR navíc. Díky multilateraci lze dosáhnout ještě přesnějšího pokrytí za použití menších finančních prostředků na koupi, instalaci a provoz systému. Pro let na trati se používá WAM (Wide Area Multilateration), jejíž stanice jsou rozprostřeny v mnohem větších vzdálenostech od sebe, obvykle kolem 100 km. Takový způsob instalace se využívá například v Tasmánii, v Coloradu, v East Midlands, na Tchajwanu, nebo pro pokrytí Severního moře.^[30] V těchto oblastech je pokrytí pomocí Multilaterace přesnější než pokrytí SSR, má větší dosah a navíc je méně nákladné.



Obr. 3.9 Rozmístění pozemních stanic systému MLAT a WAM v Evropě^[7]

3.5 GNSS

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, první satelitní systémy se objevily v 70. letech a do roku 1995 byly plně dobudovány první globální systémy. Původně byly vyvinuty pro vojenské účely, ale postupně se začaly využívat i pro civilní účely. V současné době je satelitní navigace dostupná i v chytrých telefonech, takže ji může využívat prakticky každý. V letectví se využívá zejména pro získávání informací pro systém ADS-B. Mezi hlavní globální satelitní navigační systémy patří GPS (USA) a GLONASS (Rusko). V současnosti se zavádí do provozu třetí navigační systém Galileo (EU). Ten je zároveň první civilním GNSS (Global Navigation Satellite System).^[24] V této práci je popis zaměřen na systém GPS, který je nejrozšířenější.

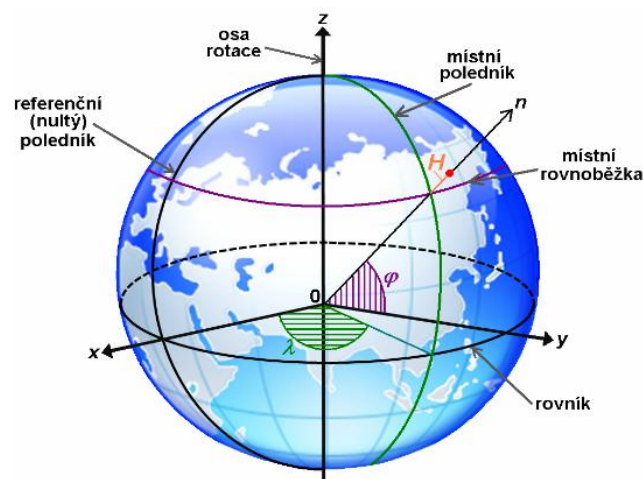
Referenční plocha a souřadnicový systém GNSS

Planeta Země nemá tvar dokonalé koule. Povrch Země je tvořen horami a mořskými příkopy. Samotný průměr Země má přes rovník jinou hodnotu než přes póly. Z důvodu obtížného matematického popisu takového tělesa byly vytvořeny modely Země. Jako nejpřesnější model Země je považován geoid. Geoid je definován jako plocha, která je ve všech bodech kolmá k tíhovému zrychlení Země.

Každý GNSS vyžaduje pro správné fungování jediný model Země. Z důvodu malých rozdílů (několik desítek metrů) je pro potřeby mapování místo geoidu používán referenční elipsoid, na kterém jsou zachovány zeměpisné souřadnice, avšak neodpovídá nerovnostem povrchu. Skutečná nadmořská výška nad geoidem se tak musí z eliptické výšky přepočítat. GPS využívá elipsoid WGS-84 a GLONASS využívá elipsoid PZ90.

Geodetický souřadnicový systém GNSS vychází ze zeměpisných kartézských souřadnic. Satelitní navigační systém tak nejprve změří polohu podle kartézských souřadnic a do geodetických souřadnic ji následně přepočítá podle použitého referenčního elipsoidu. Střed souřadnicového systému se nachází ve středu Země, osa z je vedena směrem k severnímu pólu, osa x směrem k průsečíku rovníku a nultého poledníku a osa y k průsečíku rovníku a poledníku 90° východní délky. V geodetickém souřadnicovém systému určujeme:

- geodetickou šířku φ = úhel mezi rovinou rovníku a normálou k ploše elipsoidu
- geodetickou délku λ = úhel mezi rovinou místního poledníku a rovinou nultého poledníku
- elipsoidickou výšku H = vzdálenost od referenčního elipsoidu měřená po normále [42]



Obr 3.10 Geodetický souřadnicový systém^[25]

Princip činnosti

GNSS využívá pro svou činnost družice umístěné na oběžné dráze Země. Každá družice vysílá signál a navigační zprávu. V navigační zprávě jsou ve formě efemerid vysílány predikované polohy jednotlivých družic na oběžných drahách. Při měření polohy přijímače systém využívá tyto metody:

- úhломěrné
- dopplerovské
- interferometrické
- měření změn fáze nosného signálu
- dálkoměrné

Úhломěrná metoda je založena na měření elevačního úhlu z místa určování polohy k družici. Množinou bodů se stejným elevačním úhlem je kužel s vrcholem v místě polohy družice. Při dalším měření v jiném čase nebo měření u jiné družice dostaneme další kužel. Oba kužely se navzájem protnou v měřeném místě. Aktuální polohu tak určíme pomocí naměřených elevačních úhlů a znalosti aktuálních pozic jednotlivých družic.

Dopplerovská metoda využívá Dopplerova jevu. Každá družice vysílá signály se stabilním kmitočtem. Vlivem Dopplerova jevu je signál v místě měření přijímán s jiným kmitočtem. Pokud provedeme měření v nejméně třech periodách a budeme znát souřadnice družice v každé době měření, dostaneme soustavu tří rovnic o třech neznámých, jejíž vyřešením dostaneme souřadnice x , y a z místa měření.

Interferometrická metoda využívá dvě antény, které jsou umístěny na společné základně. Od obou antén se měří zdánlivá vzdálenost k družici. Z naměřených zdánlivých vzdáleností a známé vzdálenosti obou antén lze určit elevační úhel k družici. K určení polohy pak lze použít úhломěrnou metodu. Měření změn fáze nosného signálu funguje na stejném principu, avšak místo měření zdánlivé vzdálenosti se měří fáze signálu.

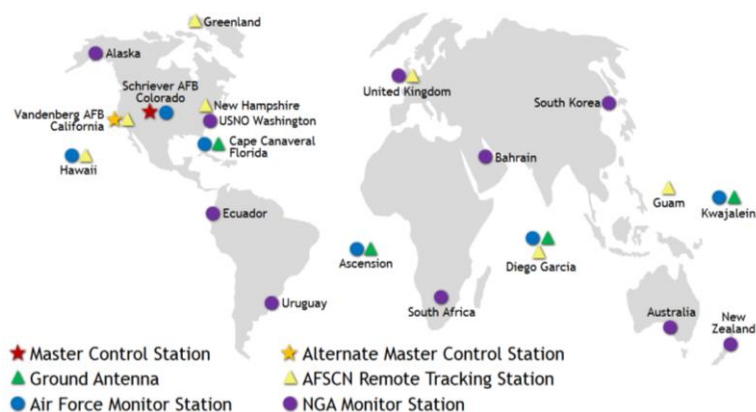
V současné době je využívána dálkoměrná metoda. Ta využívá měření času zpoždění signálu na trase družice-přijímač. Pokud známe souřadnice okamžité polohy družic

a ze zpoždění signálu určíme vzdálenosti od jednotlivých družic, dostaneme polohu uživatele vypočtením průsečíku tří kulových ploch (tři rovnice o třech neznámých). Pro přesné zaměření 3D polohy z důvodu nesynchronní činnosti časových generátorů družic nestačí signál ze tří družic. Chyba měření polohy by z tohoto důvodu postupně narůstala, proto je potřeba ji vyloučit. K tomu se využívá měření ze čtvrté družice. Všechny družice musí být vzájemně synchronizovány pomocí časové základny systému.^[25]

Segmenty GPS

Každý GNSS se skládá ze tří segmentů - kosmického, řídicího a uživatelského. Kosmický segment je standardně tvořen 24 družicemi, z nichž 3 jsou záložní a jsou umístěny na 6 orbitech ve výšce přibližně 20 200 km nad povrchem Země. Doba oběhu každé družice je 12 hodin a jejich inklinace je 55°.

Řídicí segment slouží pro sledování drah jednotlivých družic. Na každé stanici je měřena skutečná poloha družice a každých 12 hodin jsou opravovány údaje. Je to z důvodu, že dochází k poruchám pohybu družic po vypočítané dráze z důvodu gravitačních vlivů ostatních kosmických těles (Slunce, Měsíc, ...). Opravené údaje jsou poté posílány do uploadovacích stanic a z nich se alespoň jednou denně vysílají k družicím. Řídicí systém je tvořen hlavním řídicím střediskem MCS, čtyřmi nahrávacími stanicemi a 17 monitorovacími stanicemi rozmístěnými po celém světě (viz obrázek 3.11)



Obr. 3.11 Rozmístění stanic řídicího segmentu GPS^[58]

Uživatelský segment je vybaven přijímačem GPS signálu. Ten zachycuje signál z viditelných družic. V případě, že je jich dostupných více než 4, vybere ty, u kterých je nejmenší DOP. Kromě antény a přijímače jej tvoří také navigační počítač a displej pro

zobrazení informací. Tento segment poskytuje svému uživateli informace o okamžité 3D poloze antény přijímače a slouží také pro přenos navigační zprávy.^[55]

Signály a kódy GPS

GPS využívá celkem pět nosných kmitočtů, které jsou odvozeny od základního kmitočtu atomového normálu 10,23 MHz. Pásmo, na kterých GPS pracuje jsou označena L1 až L5. Pásmo L1 je 154násobek základního kmitočtu a pásmo L2 120násobek.^[24]

Tab. 3.4 Kmitočtová pásma GPS

Pásmo GPS	Kmitočet [MHz]
L1	1575,42
L2	1227,60
L3	1381,05
L4	1841,40
L5	1176,45

Každá z družic vysílá vlastní signál ve tvaru pseudonáhodných kódů. K hlavním vysílaným kódům patří kód C/A, kód P a nový vojenský kód M. Signál kódu C/A (Coarse/Acquisition), vysílaný v pásmu L1, má bitovou frekvenci 1,023 MHz, délka kódu je 1023 bitů a má opakovací periodu 1 ms. Tento signál je využíván mimo jiné pro civilní účely, oproti kódu P má menší přesnost. Aby nedošlo k zvyšování přesnosti ze strany civilních uživatelů a možnému zneužití nepřáteli USA, aplikovala americká armáda Selective Availability, což představovalo umělé chyby, které snižovaly přesnost měření. Později od Selective Availability armáda upustila a GPS pro civilní účely tak může dosáhnout vysoké přesnosti měření.

Kód P (Precision) je vysílán v pásmech L1 i L2, má bitovou frekvenci 10,23 MHz a jeho opakovací perioda je 267 dnů, aby nemohlo dojít ke snadnému rozkódování nepřitelem. Oproti C/A lze u kódu P vyloučit vliv ionosféry a tím pádem dosáhnout vyšší přesnosti měření polohy. Kód P spolu se šifrovacím kódem, který je dostupný pouze vybraným uživatelům, tvoří signál Y. Toto opatření poskytuje tzv. antispoofing ochranu, aby nedošlo k používání družic protivníkem.

System GPS poskytuje dvě základní služby SPS (Standard Positioning Service), která vysílá kód C/A a pracuje v pásmu L1 a PPS (Precise Positioning Service), která vysílá kód P a pracuje v pásmech L1 a L2.

Navigační zpráva

Aby bylo možné správné fungování určení polohy uživatelského zařízení, je potřeba, aby kromě kódu družice vysílala tzv. navigační zprávu, ve které jsou uživateli poskytovány informace pro přesné měření. Tato zpráva je namodulována s frekvencí 50 Hz. Každá navigační zpráva obsahuje 25 rámců, každý o 1500 bitech, jejichž vysílání trvá 12,5 minuty. Každý rámec je tvořen z 5 podrámců o 300 bitech. Podrámece 1, 2 a 3 jsou vysílány opakovaně a podrámece 4 a 5 na pokračování.

Tab. 3.5 Podrámece navigační zprávy GPS

podrámec	obsah
1	systemový čas GPS, stav družice, přesnost a korekce
2 a 3	informace o parametrech orbity a případné změny
4 a 5	almanach, informace o ionosferickém modelu, poloha ostatních družic

Chyby měření

- chyba času
 - může nastat na straně satelitu i přijímače, vzniká v případě, když čas vysílání a příjmu nejsou v jednom rámci
- chyba efemerid
 - způsobena gravitačním působením Slunce, Měsíce a dalších vesmírných objektů, vzniká perturbace
- atmosférické jevy
 - Chyba troposféry - vzniká změnou klimatických podmínek
 - Chyba ionosféry - v ionosféře dochází ke změně rychlosti a směru šíření elektromagnetických vln, což vytváří nejvýznamnější chybu měření GNSS
- chyba geometrie orbit
 - při pohybu družic se mění jejich vzájemné rozmístění, což má vliv na přesnost určování polohy, tzv. DOP

- DOP je souhrnem chyb TDOP (chyba měření času), HDOP (chyba měření v horizontální rovině, VDOP (chyba měření ve vertikální rovině, chyba geometrie GDOP (TDOP + VDOP + HDOP) a chyba měření 3D pozice PDOP (VDOP + HDOP)^[58]
- vícecestné šíření
 - vzniká vlivem odrazům vln od povrchu Země
- vliv šumů a rozlišení přijímače

Rozšiřování systému

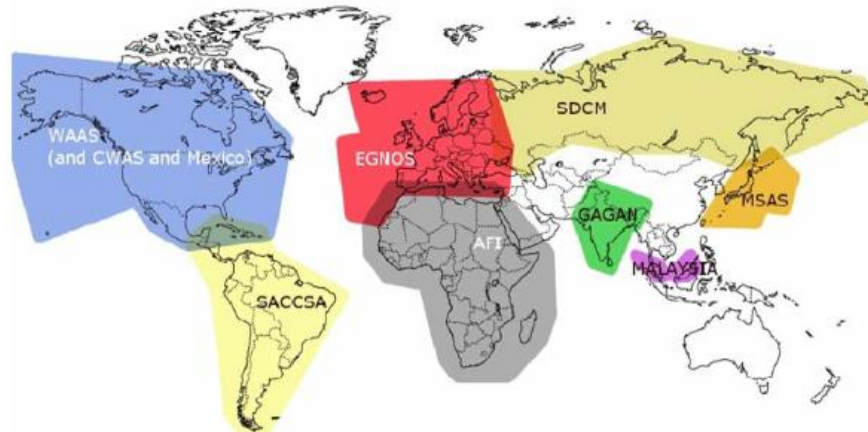
Služba GPS se svými základními parametry nedosahuje požadavků podle ICAO Annex 10, proto je potřeba systém doplnit, aby byla zajištěna potřebná bezpečnost a to jak na lokální úrovni pro určitou oblast, tak celosvětově. Způsoby, kterými se systém doplňuje, se označuje jako augmentace GNSS.

První možností rozšíření je ABAS (Airborne Based Augmentation System). Již podle názvu vyplývá, že o doplnění GNSS dojde na uživatelském segmentu, tedy na palubě letadla. Jsou dva způsoby rozšíření a to AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring), které porovnává informace získané pomocí GNSS s informacemi z ostatních radionavigačních zařízení jako IRS, VOR nebo DME. Druhou funkcí je RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), která monitoruje obvody přijímače, sleduje stav družic a vybírá nejvhodnější družice pro příjem signálu k minimalizaci DOP.

Další možností rozšíření je GBAS (Ground Based Augmentation System). GBAS využívá pozemní stanici umístěnou v blízkosti letiště. Stanice přijímá signál z družic a porovnává je se skutečnou polohou a vyhodnocuje chybu v určení pseudovzdálenosti. Tuto korekci poté vysílá společně s informacemi o integritě letadlům v pásmu VHF.

Poslední možností je SBAS (Satellite Based Augmentation System). Ten využívá referenční síť pozemních stanic (WRS), které porovnávají signál družic se svou skutečnou polohou. Na základě měření se stanovují chyby měření a určí se korekce pro oblast stanice. Korekce jsou následně nahrány na komunikační družici a ta je vysílá uživatelům. Prvním systémem SBAS zavedeným do provozu byl americký WAAS, v Evropě vznikl systém EGNOS. V současnosti jsou již funkční také systémy MSAS a GAGAN. Význam SBAS spočívá hlavně ve fázi přiblížení letadel na přistání. Radionavigační

systemy používané na letištích jsou ovlivnitelné nepříznivými povětrnostními podmínkami, při kterých roste jejich chyba. V těchto případech potom lze využít GPS spolu s SBAS, který je certifikovaný jako náhrada CAT I přiblížení podle ILS.^[56]



Obr. 3.12 Budoucí pokrytí SBAS^[25]

3.6 ADS-B

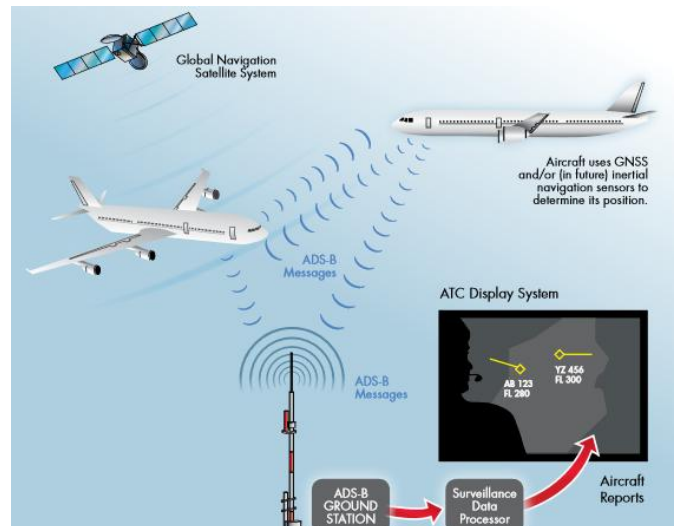
Automatic Dependent Surveillance-Broadcast je automatický přehledový systém, který je závislý na informacích získaných pomocí satelitní navigace. Roku 2005 byl Federálním úřadem pro letectví (FAA) založen program, který měl za cíl sledování letadel prostřednictvím GNSS na základě jimi vysílaných informací o sobě. Velkým impulsem pro zavádění ADS-B bylo dosud nevysvětlené zmizení letu MH370. V příštích letech se plánuje postupný přechod z radarových navigačních prostředků na satelitní. Jedná se o strategie SESAR z EU a NextGen z USA. Od satelitní navigace se zejména očekává, že pokryje pro radar obtížně dostupné oblasti, jako například vnitrozemí Austrálie nebo oblast Hudsonova zálivu v Kanadě. Systém ADS-B dokáže pilotům přímo poskytnout stejné informace jako řídicí, což u předchozích systému není možné.

V současnosti je celý program ve fázi postupného přechodu z radarové navigace na ADS-B a jeho širší využití se předpokládá až v letech 2020-2025. Dlouhý přechod na ADS-B je způsoben zejména tím, že oproti radaru využívá odlišnou technologii a vybavení všech letadel zařízením pro ADS-B je nákladná operace.

Princip činnosti

Princip funkce ADS-B je jednoduchý. Letadlo vybavené ADS-B získává informace o své poloze z GNSS a všesměrově je vysílá jedenkrát za sekundu. Jako zdroj infor-

mací mohou pro ADS-B posloužit také inerciální systémy IRS a INS. Vysílání z letadla může obdržet jak středisko ATC, tak okolní letadla. Na palubě letadla je potřeba mít přijímač ADS-B signálu a zobrazení dat ADS-B, které pilotovi zobrazuje jeho polohu, okolní provoz, kurz a výšku letu. Pozemní část ADS-B se skládá z několika přijímačů, které zachycují informace z letadla a okamžitě je předají přímo na obrazovku ATC. Pomocí pozemního vysílače může opačným směrem ATC vysílat informace o počasí a další data pro provedení letu.^[32]



Obr. 3.13 Princip funkce ADS-B^[8]

ADS-B využívá celkem tři datové protokoly:

- 1090 Extended Squitter (1090ES)
- Universal Access Transceiver (UAT)
- VDL mode 4

Nejrozšířenější je 1090ES, který pracuje na stejném principu jako odpovídač módu S u SSR, na rozdíl od něj však nevyžaduje k odeslání informace dotaz. Jak již vyplývá z názvu, pracuje na frekvenci 1090 MHz. Počet vysílaných bitů u 1090ES je 112 a slouží pro letové hladiny nad FL180.

Druhým protokolem je UAT, který pracuje na frekvenci 978 MHz a využívá se pro letové hladiny pod FL180. Posledním je VHF datalink (VDL mode 4) pracující na kmitočtu 108-117 MHz na kanálech rozdělených po 25 kHz. V případě, že letadla komunikují na jiném datalinku, například jedno na 1090ES a druhé UAT, existuje služba

ADS-R (Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast). ADS-R obdrží informaci z letadla na jedné frekvenci, převede ji na druhou frekvenci a odvysílá ji.^[11]

Poskytované informace

- poloha
- letová hladina
- rychlost
- kategorie letadla
- ID a 24 bitový kód letadla

ADS-B lze použít ke vzdušné i pozemní aplikaci, systém pokryje i místa bez radarového signálu. Pro ATC poskytuje detailní přehled o situaci na letištní ploše. Pro monitorování pohybu vozidel musí být na každém vozidle umístěn ADS-B Squitter Beacon, který vysílá informace o vozidle na frekvenci 1090 MHz. V TMA a na trati letu lze pomocí ADS-B udávat rozestupy mezi jednotlivými letadly a vytváří se celkový přehled o vzdušné situaci.



Obr. 3.14 Zobrazení informací z ADS-B na displeji Garmin GDL 88^[61]

System ADS-B se skládá ze dvou částí:

- ADS-B OUT
- ADS-B IN.

ADS-B OUT vysílá okolním letadlům a stanovištím ATC aktuální informace o letadle. Využívá družice GNSS, pomocí kterých je určena poloha letadla. Prostřednictvím

odpovědače údaje rozesílá. Informace jsou nejčastěji vysílány v módu 1090ES, v USA se využívá i UAT. Vysílání ADS-B OUT musí mít přesný formát. Tento formát se nazývá ASTERIX. Pomocí něj je přesně definována struktura vysílaných dat, každá informace je zakódována a následně uspořádána do bloku dat. ASTERIX představuje standard EUROCONTROLu pro přenášení kódovaných přehledových informací.

ADS-B IN přijímá informace z automatických přehledových systémů nebo ADS-B OUT. Systém rozšiřuje množství informací poskytovaných ADS-B, pilotovi zobrazí vzdušnou situaci stejně jako řídicímu. ADS-B IN poskytuje služby Traffic Information Service-Broadcast (TIS-B) a Flight Information Service-Broadcast (FIS-B). TIS-B podává letadlům informace o okolním provozu a včetně letadel, která nejsou vybavena avionikou ADS-B. Systém nejčastěji získává informace od SSR, převádí je do formy použitelné ADS-B a vysílá je. Pracuje na protokolech 1090ES a UAT. FIS-B pracující na protokolu UAT rozesílá zprávy NOTAM a ATIS, informace o počasí (METAR, TAR, AIRMET) a mnohé další.^[10]

Výhody ADS-B

- nízké pořizovací a provozní náklady
- minimální požadavky na pozemní infrastrukturu
- malá latence
- vysoká rychlost obnovy informací
- přesné informace o okolním provozu a počasí v reálném čase
- není náchylné na povětrnostní podmínky

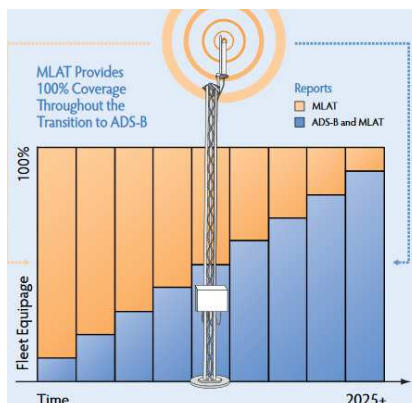
Nevýhody ADS-B

- náklady na vybavení všech letadel odpovídačem módu S 1090ES
- systém se opírá pouze o informace poskytované GNSS
- informace nelze na palubě ověřit pomocí jiného systému
- v okolí rovníku je signál GNSS rušen jevy v ionosféře^[8]

ADS-B a Multilaterace

V budoucnu se s multilaterací počítá jako se záložním systémem pro ADS-B. Výhodou Multilaterace oproti jiným systémům jako SSR je, že bez předchozích úprav dokáže zachytit vysílání 1090ES. Systém tak stejně efektivně dokáže sledovat letadla vy-

bavená avionikou ADS-B i SSR. Již instalované multilaterační systémy dokážou fungovat jako plnohodnotné pozemní přijímače ADS-B. V případě výpadku systému ADS-B, což může způsobit například nadměrná sluneční aktivita, je multilaterace schopna plně nahradit jeho funkci.



Obr. 3.15 Schéma postupného přechodu na ADS-B a jeho doplnění multilaterací^[30]

Během přechodu na ADS-B bude možné pomocí multilaterace sledovat letadla, která ještě nejsou vybavena potřebnou avionikou. Multilaterace je také schopna odlišit falešné cíle vytvářené ADS-B tzv. antispoofing. V poslední řadě může být pomocí MLAT systému kontrolována přesnost polohy určená ADS-B.^[30]

ADS-C

Automatic Dependet Surveillance - Contract (ADS-C) vychází z požadavku ATC na pravidelné dodávání informací letadlem v požadovaných intervalech. Dojde k uzavření "dohody" (contract) mezi řídicím a vybavením letadla. To znamená, že údaje, které letadlo získá prostřednictvím GNSS, vysílá přímo jen danému ATC. Kromě pozice letadlo vysílá svou rychlost, meteorologická data a očekávanou trajektorii letu. Meteorologická data vysílaná ADS-C, jako je teplota vzduchu, rychlost a směr větru jsou přesnější než z jiných zdrojů. Smyslem ADS-C je monitorování oblastí, které nejsou pokryty radarem. Pro řízení provozu na letištní ploše i kvůli zpoždění informací nemá význam.

Výhodou ADS-C je, že dokáže pokrýt rozsáhlé, jinak obtížně monitorovatelné oblasti jako jsou pouště a oceány. Další výhodou je, že poskytuje datalink mezi palubou a zemí. Problémem ADS-C je, že vyžaduje další vybavení v letadle, informace nejsou poskytovány ostatním letadlům, má delší intervaly obnovy informací a nepodporuje standardní rozestupy 3 a 5 NM.

3.7 A-SMGCS

A-SMGCS (Advanced Surface Movement and Guidance Control System) je systé-
m, který slouží k vytvoření přehledu o situaci na ploše letiště. Samotný A-SMGCS
žádné údaje neměří, informace získává z jiných zařízení jako ADS-B, Multilaterace,
SSR nebo SMR. Oproti původnímu SMGCS, který je založen na vizuálním získávání
informací, poskytuje všechny potřebné informace, dokáže pracovat i při zhoršených
povětrnostních podmínkách a větším provozu na letišti. Každý A-SMGCS poskytuje
funkce přehled, směrování, vedení a kontrola.^[14]

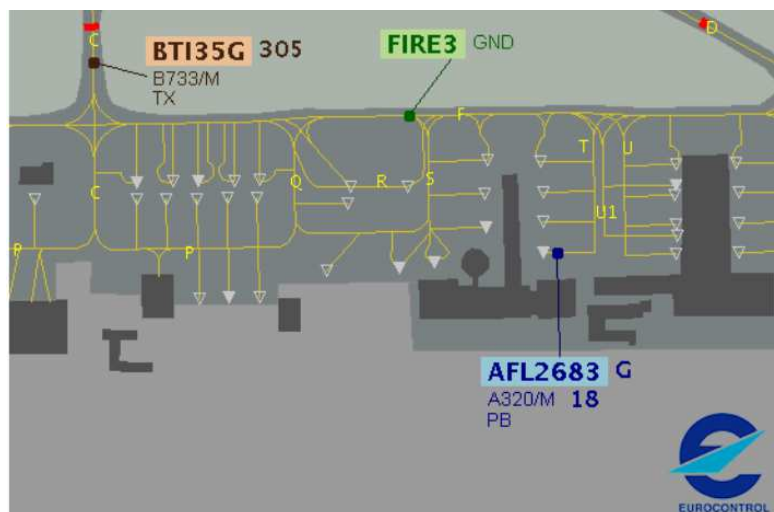
Konfigurace systému A-SMGCS závisí na rozložení letiště, proto je nutné, aby se
systém dokázal přizpůsobit potřebám každého letiště. Každý A-SMGCS musí mít svou
databázi informací, pracovní místa pro řídicího provozu a systém nahrávání a zpětného
přehrávání situací, pro případ následného vyšetřování nehod na ploše letiště.

Pracovní místo řídicího letového provozu

Controller Working Position (CWP) je místo, které slouží pro interakci řídicího
provozu s přehledovými systémy na letišti. Každé CWP je vybaveno jedním nebo něko-
lika Human-Machine Interface (HMI). Na displeji HMI jsou řídicímu na mapě letiště
zobrazovány informace o všech aktivitách na ploše letiště. HMI poskytuje řídicímu po-
pisky a vypočítanou polohu všech letadel a vozidel. Podle popisku lze rozlišit přilétající
letadla, odlétající letadla a vozidla.

Přilétající letadla jsou označena hnědou barvou (viz obr. 3.16). Na prvním řádku
popisku je uvedeno ID letadla (BTI35G) a přidělené parkovací místo (305). Na druhém
řádku je uveden typ letadla (B733 = Boeing 737-300) a kategorie letadla podle turbu-
lence v úplavu (M). Na třetím řádku je uveden současný status (TX = taxiing).

Odlétající letadla jsou označena modrou barvou. Jediný rozdíl v popisku je, že na
prvním řádku je uvedeno přidělené vyčkávací místo (G). Vozidla jsou označena zelenou
barvou a v popisku je uvedeno ID vozidla (FIRE 3) a řídicí odpovědný za vozidlo
(GND = řídicí pozemního provozu).



Obr. 3.16 Popisky letadel a vozidel^[15]

Pro zadávání příkazů do systému A-SMGCS slouží Electronic Clearance Input (ECI). Veškerá povolení, která řídicí zadá, jsou automaticky porovnávána s polohou mobilního prostředku a letovým plánem, aby nedošlo k nejasnostem v případě udání špatného povolení. Řídicí může do systému zadávat také podmíněná povolení. To znamená, že prostředek bude moc zahájit pohyb až po provedení pohybu jiným prostředkem. To usnadní řídicímu práci, jelikož nebude muset stále sledovat situaci a bude se moct věnovat dalším úkonům.

Databáze A-SMGCS

Pro potřeby systému A-SMGCS existují dvě hlavní databáze a to Mobile Information Database a Airport Operation Status Database. Mobile Information Database obsahuje informace vztahené k jednotlivým mobilním prostředkům na ploše letiště. Zdrojem informací jsou poskytovatelé letových dat, služby A-SMGCS nebo uživatel letového prostoru. Databáze poskytuje tyto informace:

- pro letadla: ID, typ letadla, letový plán, kódy SSR, číslo stání, povolení, plánované trasy, přidělené RWY, status letadla, informace o odmrazování, informace o načasování
- pro vozidla: ID, typ vozidla, druh pohybu, povolení, plánované trasy, informace o načasování

Airport Operation Status Database obsahuje informace o prostředí letiště. Zdrojem informací jsou letištní operátoři a poskytovatelé navigačních služeb. V databázi je možné najít tyto informace:

- Mapa letiště včetně budov a uzavřených oblastí
- Referenční body (vyčkávací místa, stop příčky, osvětlení, práh RWY,...)
- Informace o používání RWY
- Plánované uzavírky RWY a dočasně uzavřené oblasti
- TWY s váhovými a rozměrovými omezeními
- Status A-SMGCS
- Pravidla ATC

Přehled

Funkce Přehled dává řídicímu přehled o situaci na ploše letiště. Je základním kamenem A-SMGCS a slouží pro rozšiřování o ostatní funkce. Pro svou spolehlivou činnost potřebuje alespoň jeden spolupracující přehledový systém pro získávání informací o cílech a jeden nespolečný systém, který slouží pro detekci ostatních cílů, jako například vozidel. A-SMGCS svým pokrytím umožňuje sledovat i provoz ve vzduchu v okolí letiště. Řídicí tak může na stejné obrazovce kontrolovat i přistávající a prolétající letadla, aby nedošlo ke konfliktům s pozemním provozem. Obnova informací probíhá každou sekundu, aby měl řídicí dostatek času pro reakci na vzniklou situaci.

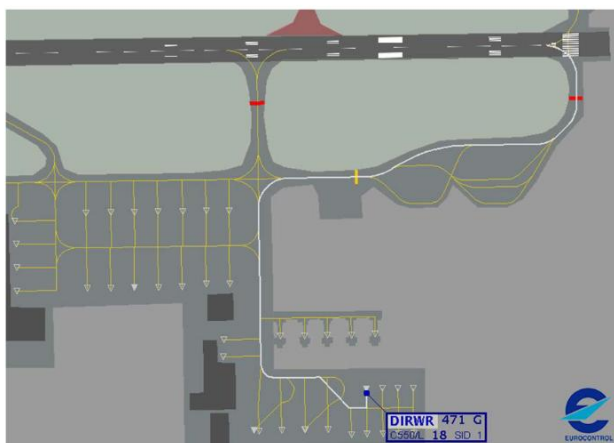
Požadavkem na systém A-SMGCS je, aby chyba měření nebyla větší než 20 m, což poskytne dostatečnou dobu pro reakci na hrozící kolizi. Pro ochranu před narušením RWY se vyčkávací místo volí ve vzdálenosti 75 m od osy RWY. Na odbavovací ploše musí být mezi jednotlivými letadly nebo letadlem a budovou minimální vzdálenost 3 m. K obnově informací musí docházet každou sekundu. ^[15]

Funkce Přehled řídicímu umožňuje:

- identifikovat všechny mobilní prostředky na letišti
- možnost předpovědět kolizi a zabránit jí
- přidělit cílům volací znak
- detekovat případné narušitele

Směrování

Směrování umožňuje řídicímu vytvořit trasu jednotlivému prostředku po letištní ploše. Typicky tato funkce slouží letadlům pro navedení z odbavovací plochy na RWY. Řídicímu se přehledně zobrazí, odkud se mobilní prostředek začal pohybovat a do jakého bodu má povolení dorazit. Systém nejdříve vygeneruje nejvhodnější trasu s ohledem na aktuální provoz a situaci na letišti. Aby to mohl provést, potřebuje znát pouze počáteční a koncový bod pohybu. V potaz jsou brány i aktuální změny na letišti jako uzavření některé z TWY nebo RWY. Požadavkem je, aby generování a vysílání cesty pilotovi trvalo každé maximálně 1 s. Tím pádem pilot dostane informaci o přidělené trase během pár sekund, nelze však vytvářet větší množství tras současně.



Obr. 3.17 Trať vytvořená pomocí služby Směrování v systému A-SMGCS^[15]

Na monitoru se řídicímu trasa zobrazí bíle, dokud nedá povolení k pohybu po ploše letiště. Poté co řídicí udělí povolení, se status změní na "cleared" a na monitoru dráha svítí zeleně. Pro prostředky, které nemají trasu vygenerovanou systémem, může řídicí vytvořit trasu přes HMI. Řídicí může také trasu upravovat v závislosti na aktuálních operačních postupech. Trasu lze upravovat před startem pohybu i během pohybu mobilního prostředku. V budoucnosti se počítá s plně automatizovaným systémem, který přeneše odpovědnost za řízení provozu na počítač.

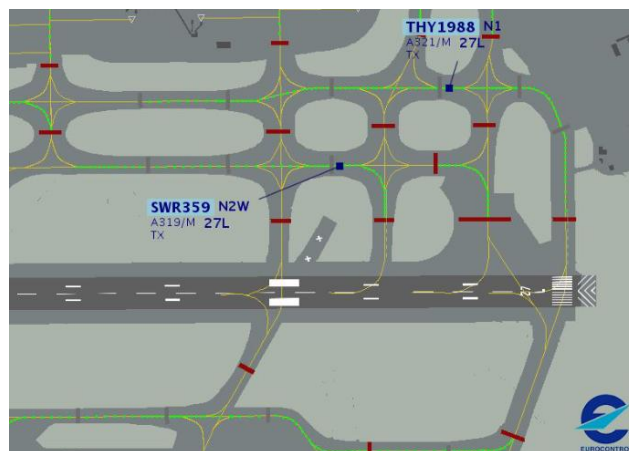
Vedení

Tato funkce slouží k poskytnutí instrukcí pilotům a řidičům mobilních prostředků k provedení pohybu po přiřazené trase. Pilotovi funkce vedení vyznačí pomocí osvětlení pojezdových drah a stop příček trasu, po které se má pohybovat a situace na letišti je mu

zobrazována na letištní mapě. To umožňuje snížení potřeby komunikace s řídicím letového provozu, informace jsou předávány datalinkem. Pokud dojde k poruše systému A-SMGCS, tak se automaticky zapnou všechny stop příčky a vypne se veškeré osové osvětlení pojezdových drah. Do funkce vedení patří automatické přepínání osových světel pojezdové dráhy, automatické přepínání stop příček a systém A-VDGS (Advanced - Visual Docking Guidance System).

Automatické přepínání osových světel TWY slouží pro každý mobilní prostředek, jehož trasa má ve funkci Směrování status "cleared". Pomocí osových světel TWY se takovému prostředku vyznačí dráha, po které se může pohybovat. Za udržování rozestupů při tomto pohybu je odpovědný pilot nebo řidič vozidla. Informace pomocí světel TWY mohou být předávány různými způsoby v závislosti na operačních postupech a povětrnostních podmínkách na letišti. Existují tři základní způsoby přepínání osových světel TWY:

- Přepínání jednotlivých světel - každé světlo může být zapnuto/vypnuto individuálně.
- Přepínání skupiny světel - je aktivována společně skupina světel před nebo za letadlem. Je vhodné, aby skupinu tvořilo co nejméně světel z důvodu snížení rizika srážek.
- Přepínání bloku světel - jsou přepínány jen specifické části osvětlení, zbytek osových světel je stále zapnut. Jednotlivé bloky mohou spolupracovat s automatickým přepínáním stop příček. To umožní mít trasu stále osvětlenou a zároveň udržet rozestupy mezi letadly.



Obr. 3.18 Blokované přepínání osových světel TWY. Osová světla TWY jsou zelené, červené stop příčky.^[15]

Automatické přepínání stop příček umožňuje zapínat a vypínat stop příčky umístěné na vyčkávacích místech před křižovatkami a RWY. A-VDGS poskytuje letadlům navádění na parkovací místo a řídicímu informace o typu letadla.

Kontrola

Funkce kontrola slouží pro zabránění srážek na letištní ploše. Systém se stará o odstranění lidského faktoru, protože řídicí nebo posádka mohou kdykoliv udělat chybu, nebo se odchýlit od plánované trasy pohybu. Celý systém je založen na minimálně jednom nebo více ze systémů Runway Monitoring and Conflict Alert (RMCA), Conflicting ATC Clearances (CATC) a Conformance Monitoring Alerts for Controlers (CMAC).

Zatímco systém RMCA slouží k okamžitému varování před hrozící srážkou, zbylé dva systémy slouží jako prevence konfliktů na pojezdových plochách. Tuto schopnost systémy CATC a CMAC získají, protože jsou do nich vložena povolení, které udělil řídicí mobilním prostředkům. Výstraha před možnou srážkou je vyobrazena na obrazovce řídicího a je doprovázena zvukovým signálem. Detailně je funkce Kontrola rozebrána v podkapitole 4.3.

4. Metody pro predikci pohybu a zabránění kolizím

Letištní plocha je v současné době sledována spolehlivými přehledovými systémy, které umožňují ATC pružně reagovat na situace, které vzniknou na letištní ploše. Co však žádný přehledový systém nedokáže odstranit je lidský faktor. Chyba může být na obou stranách. Řídící si i přesto, že má nejmodernější přehledové systémy, nemusí včas všimnout hrozícího konfliktu nebo může chybně zadat instrukce pilotovi. V takovém případě pilot vůbec nemusí vědět o hrozbě srážky s jiným letadlem nebo mobilním prostředkem. Chybu může udělat také pilot. Může být neúmyslná jako například, že vede letadlo na špatnou pojezdovou dráhu, ale také může dojít ze strany pilota k neuposlechnutí instrukcí. Z těchto důvodů je potřeba mít na systémy, které upozorní řídicí provozu i piloty před hrozící srážkou.

4.1 Nehody na letištní ploše

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, na letištní ploše dochází k řadě konfliktních situací. Každoročně se odehraje v průměru 27 tisíc konfliktů na RWY, při kterých dojde ke zranění 243 tisíc osob a škodách ve výši 10 miliard dolarů.^[43] K nehodám dochází mezi letadly, ale také mezi vozidly a letadly nebo letadly a budovami. Většina těchto nehod tak naštěstí končí pouze škodou na majetku, v horších případech zraněním osob. Na druhou stranu se na letištní ploše odehrálo několik velmi tragických nehod, které si vyžádaly lidské životy, včetně té nejtragičtější v dějinách letectví. Příčinou těchto nehod nemusí být jen chyby zúčastněných, ale také nedostatečný přehled o situaci. Ne vždy měli řídicí a piloti k dispozici systémy, které jim poskytlí informace o situaci na letišti. Když se k této skutečnosti přidají zhoršené povětrnostní podmínky, zejména špatná viditelnost, vznikne velmi nebezpečná situace.



Obr. 4.1 Kolize mezi dvěma letadly,^[69] mezi letadlem a vozidlem^[68] a mezi letadlem a budovou.^[70]

Tenerife 1977

K nehodě došlo na letišti Los Rodeos na ostrově Tenerife 27. 3. 1977. Srazilily se dva letouny typu Boeing 747 společností KLM a Pan Am. B747 společnosti Pan Am pojížděl po RWY a měl ji opustit výjezdem C3, kde by musel zatačet o 135°. Proto se posádka rozhodla použít výjezd C4, kde by stačila zatačka o 35°. Posádka o tom informovala řídícího. Na RWY čekal B747 společnosti KLM, kterému měl letoun Pan Amu uvolnit RWY pro vzlet. Přestože letoun obdržel pouze povolení k odletu, posádka zahájila vzlet, bez toho aniž měla potvrzeno, že druhý B747 opustil RWY. Mezi výjezdy C3 a C4 došlo ke srážce obou letadel. Nehoda si vyžádala celkem 583 životů a stala se nejtragičtější nehodou v dějinách letectví.^[41]

Nehodě předcházely teroristické útoky na letišti Las Palmas, kvůli kterým byla doprava odkloněna na malé letiště na vedlejším ostrově. Letiště Los Rodeos v té době nebylo vybaveno žádným přehledovým systémem, takže jediný způsob predikce konfliktů byla rádiová komunikace a vizuální kontrola. Na letišti v tento den byla v tento den hustá mlha, čtyři minuty před nehodou byla dohlednost pouze 300 m. Jediná RWY na letišti navíc neměla v provozu osová světla. Hlavní příčinou nehody byla chyba posádky B747 KLM, která zahájila vzlet, aniž by k tomu dostala povolení (povolení k odletu ≠ povolení ke vzletu).^[42] K nehodě ovšem velkou měrou přispěla skutečnost, že letiště nebylo vybaveno ani základním přehledovým systémem jako je SMR. Řídící tak musel spoléhat pouze na rádiovou komunikaci a neměl dokonalý přehled o tom, co se děje na letišti.

Madrid 1983

Tato nehoda mezi letouny Boeing 727-200 společnosti Iberia a Douglas DC-9-30 společnosti Aviaco, se odehrála 7. 12. 1983 na letišti Barajas v Madridu. Na letišti toho dne panovala hustá mlha, dohlednost byla mezi 250-300 m. DC-9 pojížděl po letištní ploše. Piloti měli odbočit na první křižovatce o 90° na TWY Oscar a poté pokračovat na vyčkávací místo RWY 01 označené O5, kde se měli nahlásit a vyčkat na povolení ke vzletu. Piloti ovšem na první křižovatce chybně odbočili pouze o 45° na TWY Juliet, po které se dostali na křížení RWY 01/19 s RWY 15/33 a následovali osové značení na RWY 01/19, na které zrovna startoval B727. Piloti DC-9 se pokusili o úhybný manévr,

bylo již však pozdě. Došlo ke kolizi obou letounů a vzniku požáru. Nehoda si vyžádala 93 obětí a 42 zraněných.^[44]

Hlavní příčinou nehody byla závažná chyba pilotů DC-9 při pojíždění. Na letišti byla velmi špatná viditelnost a piloti nebyli schopni přečíst znaky s označením pojezdové dráhy. Piloti navíc nevynaložili veškeré úsilí na to, aby si ověřili, že pojíždí po špatné TWY. Všechna vina ovšem nebyla pouze na pilotech. Letiště opět nemělo jakýkoliv přehledový systém a ani žádné postupy pro pojíždění za nízké viditelnosti. Řídící tak byl odkázán pouze na rádiovou komunikaci a neměl přehled o tom, že se DC-9 odklonilo od plánované trasy.

Los Angeles 1991

Dne 1. 2. 1991 v nočních hodinách přistával na letišti v Los Angeles Boeing 737-200 společnosti USAir. Těsně před dosednutím piloti zahlédli na RWY druhé letadlo Fairchild Metroliner společnosti Skywest. Došlo ke kolizi letadel, Fairchild byl zničen a B737 nekontrolovaně pokračoval po RWY, dokud nenarazil do hasičské stanice.^[45] Nehoda si vyžádala celkem 34 obětí a 67 zraněných.

Během vyšetřování vyplynulo, že obě letadla měla povolení se v prostoru nehody nacházet. B737 dostal povolení k přistání a Metroliner dostal povolení vjet na dráhu a vyčkávat na povolení k vzletu. Obě tato povolení letadla obdržela s odstupem jedné minuty. Jednalo se tak o chybu ATC. V době nehody na řídicí působily další souběžné události, jedno letadlo neodpovídalo a u druhého letadla ztratila štítek, který obsahoval údaje pro povolení ke vzletu. Na letišti nebyl v tu dobu v provozu SMR, a tak v nastálém zmatku došlo k tomu, že řídicí zapoměla na Metroliner. Na to, že došlo ke srážce dvou letadel, vyšetřovatelé přišli jen díky kusům vrtule, které se našli u proudového Boeingu. Nějakou dobu se na začátku vyšetřování zjišťovalo, které letadlo vlastně chybí.^[50] Na fakt, že SMR nefunguje správně, byla několikrát upozorněna FAA, avšak nepodnikla patřičné kroky. Na letišti došlo po nehodě také k úpravě osových světél RWY, protože s původními splynula poznávací světla Metrolineru a piloti B737 nemohli vidět, že RWY není volná.

Milán, Linate 2001

Nehoda se stala 8. 10. 2001 na letišti Linate v Miláně, kde byla toho dne dráhová dohlednost okolo 100 m. Došlo ke kolizi letounů McDonnell Douglas MD-87 a Cessna Citation 525. Piloti Cessny měli pojíždět po TWY Romeo 5, ovšem místo toho odbočili na TWY Romeo 6, po které dorazili na RWY 18/36, kde zrovna startoval MD-87. Pilotům se nepovedlo po srážce odlepit MD-87 od země a ve vysoké rychlosti narazili do blízké budovy. Nehoda si vyžádala 114 životů na palubě obou letadel a 4 životy pozemního personálu.^[46]

Zásadní chybu udělali piloti Cessny, když zaměnili TWY a následně pokračovali na RWY i přes červeně rozsvícenou stop příčku. Na nehodě se podepsal také fakt, že na letišti nebylo dostatečné značení a piloti při snížené viditelnosti zaměnili TWY R5 a R6. V době nehody nebyl na letišti funkční SMR, proto si řídicí provozu nemohli ověřit, zda Cessna pojíždí po správné TWY.^[47]

Luxembourg 2010

Nehoda na letišti Luxembourg, která se stala 21. 1. 2010, se odehrála mezi vozidlem údržby a Boeingem 747-400F společnosti Cargolux. Letoun přistával za velmi husté mlhy, přiblížení bylo v kategorii ILS 3B. Piloti před dosednutím zahlédli vozidlo, které provádělo údržbu osových světel RWY.^[48] Letoun následně o vozidlo zavadil jedním kolem na pravé noze hlavního podvozku. Jediné poškození B747 byla proražená pneumatika. Vozidlo bylo zničeno, ale jeho posádce se podařilo utéct ještě před srážkou, když zaslechli hluk přistávajícího letadla.

Letiště v Luxembourgu nebylo vybaveno ani základním přehledovým systémem jako je SMR, což spolu s dráhovou dohledností okolo 350 m v den nehody způsobilo, že věž neměla dokonalý přehled o situaci. Operace, která probíhala nestandardně za zhoršených povětrnostních podmínek, neprobíhala za přiměřené koordinace mezi věží a elektrikáři. Věž komunikovala s vozidlem na jiné frekvenci, která nebyla uvedena ani v AIPu ani v letištní příručce. Poslední komunikace mezi věží a vozidlem navíc proběhla 20 minut před nehodou a řídicí v ten den nevyužívali systém, ve kterém si mohli RWY označit jako obsazenou. Rozhodnutí použít tento systém bylo na letišti ponecháno na vedoucím směny.

Moskva, Vnukovo 2014

Dne 20. 10. 2014 došlo na letišti Vnukovo v Moskvě ke kolizi letounu Dassault Falcon 50EX se sněžným pluhem. Letoun dostal povolení ke startu a zahájil rozjezd. V okolí RWY v tu dobu pracovali tři sněžné pluhy, přičemž jeden přejížděl přes RWY bez povolení řídicího provozu. Na letišti v ten den panovala mlha, ale dohlednost byla dostatečná, aby piloti včas viděli překážku. Piloti se pokusili letadlo odlepit od země, ale zasáhli pluh pravým křídlem. Letadlo dopadlo na zem a vypukl požár. Nehoda si vyžádala životy všech čtyř členů posádky letadla.^[49]

Během vyšetřování bylo zjištěno, že ačkoliv bylo letiště vybaveno systémem A-SMGCS, systém nebyl správně nastaven a řídicí nebyl dostatečně proškolen pro práci se systémem. Systém tak řídicímu neposkytl varování, že přes dráhu přejíždí sněžný pluh. Piloti pluh včas viděli, avšak předpokládali, že má povolení přejet RWY a následně ji opustí. Řidič ovšem pluh zastavil na RWY a piloti již neměli možnost přerušit vzlet. Následně bylo odhaleno, že řidič požil před nehodou alkohol, což vysvětlilo jeho chování při přejíždění RWY.

4.2 Požadavky na antikolizní systémy

Z předchozí podkapitoly 4.1 vyplývá, že je důležité, aby mělo každé letiště systémy, které poskytnou řídicímu dokonalý přehled o situaci na letišti a varují ho před hrozící nehodou. K nehodám na letištní ploše nejčastěji dochází v odbavovacím prostoru, časté je také narušení RWY. Na letištích s velkou hustotou provozu letadel a vozidel je důležité, aby systém dokázal predikovat pohyb všech prostředků a upozornil řídicího na hrozící konflikt s dostatečným předstihem. Všechny pohyby po ploše vyžadují spolupráci posádek, pozemních pracovníků a řídicích provozu. Za pohyby letadla odpovídá pilot, pouze v případě pushbacku za něj odpovídá řidič vozidla a při parkování za asistence pozemního navigátora za něj odpovídá navigátor.

K navigaci letadla se obvykle používá rádiové komunikace, ručních signálů nebo světelných návěstidel. S rostoucími rozměry letadel se snižuje prostor pro manévrování, navíc se většina letadel ihned po přistání chystá k dalšímu letu, proto celý pohyb po letištní ploše trvá jen co nejkratší možnou dobu. To samo o sobě vytváří tlak na posádky

a řídicí provozu, což zvyšuje riziko chyby a vzniku kolize. Každý systém určený pro predikci a řešení konfliktů vzniklých během provozu musí splnit zásadní tři požadavky:

- musí poskytovat dvojnásobné varování před srážkou, tedy nejdříve varuje před možností srážky a až poté před bezprostředně hrozící srážkou
- musí zajistit všem účastníkům provozu dostatečný čas na danou situaci reagovat
- nesmí vytvářet falešné varování, která mohou zpomalit tok dopravy a řešení jednoho konfliktu nesmí vytvořit konflikt nový^[17]

4.3 Predikce srážek pomocí A-SMGCS

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole A-SMGCS je nejpokročilejší přehledový systém pro řízení pohybu na ploše letiště. Detekce a řešení konfliktů představují jednu z hlavních funkcí systému. Už v roce 2000 přišla FAA s Runway Incursion Reduction Programme (RIRP), tedy systémem pro redukci narušení ranveje. Tento systém sbírá přehledové informace a letové plány ze všech možných zdrojů a vytváří z nich ucelenou informaci, která je promítána na displej uživatelského zařízení. Informace jsou přenášeny pomocí lokální sítě. Systém poskytne varování před narušením ranveje, na které probíhá vzlet nebo přistání, pilotům, ATC i řidičům mobilních prostředků.

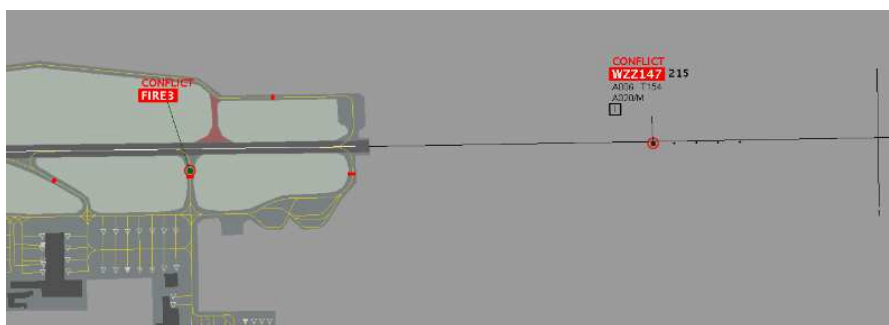
Při pohybu po pojezdových drahách systém A-SMGCS predikuje na několik sekund dopředu polohu letounů. Poloha je předpovídána pomocí plánované trasy pohybu a rychlosti pohybu letadla. Nevýhodou predikce pomocí A-SMGCS je, že se informace o srážce objeví řídicímu letového provozu, ale ne pilotovi. Proto nemusí vždy systém poskytnout dostatečný čas pro reakci na hrozící srážku.

Od systému A-SMGCS může řídicí obdržet dva druhy varování. První INFORMATION upozorní řídicího na možnost vzniku konfliktu mezi dvěma letadly a řídicí může předejít vzniku nebezpečné situace. Druhé varování ALARM informuje o bezprostředním nebezpečí vzniku kolize a vyžaduje okamžitou reakci, aby ke kolizi nedošlo. Celková informace, kterou řídicí obdrží je, zda se jedná o INFORMATION nebo ALARM, druh narušení (RMCA, CATC, CMAC) a letadla nebo vozidla, která se na vzniklé situaci podílí.

RMCA

Výstražný systém RMCA monitoruje prostor a okolí ranvejí, aby nedošlo k jeho narušení a případné srážce přistávajícího nebo odlétávajícího letadla s pojíždějícím letadlem nebo vozidlem. Systém kromě druhu zúčastněných prostředků bere ohled také na počet a konfiguraci ranvejí a aktuální meteorologické podmínky.

V případě, že hrozí konflikt mezi přistávajícím letadlem a letadlem nebo vozidlem na zemi, obdrží ATC varování INFORMATION v okamžiku, kdy bude přistávající letadlo 30 s letu od prahu ranveje. V případě, že přistávající letadlo bude 15 s letu od prahu ranveje, obdrží ATC varování ALARM. Pokud hrozí konflikt mezi vzlétajícím letadlem a pojíždějícím letadlem nebo vozidlem obdrží ATC varování INFORMATION v případě, že se vzlétající letadlo pohybuje rychlostí menší než 50 kts a varování ALARM pokud je rychlost vzlétajícího letadla vyšší jak 50 kts.^[15] V případě, že se na letišti nachází křížení ranvejí, systém monitoruje také, aby nedošlo ke srážce v místě křížení. Pro varování INFORMATION a ALARM v tomto případě platí stejné podmínky jako u jedné ranveje.



Obr. 4.2 Příklad varování ALARM před konfliktem mezi přistávajícím letadlem a vozidlem^[15]

CATC

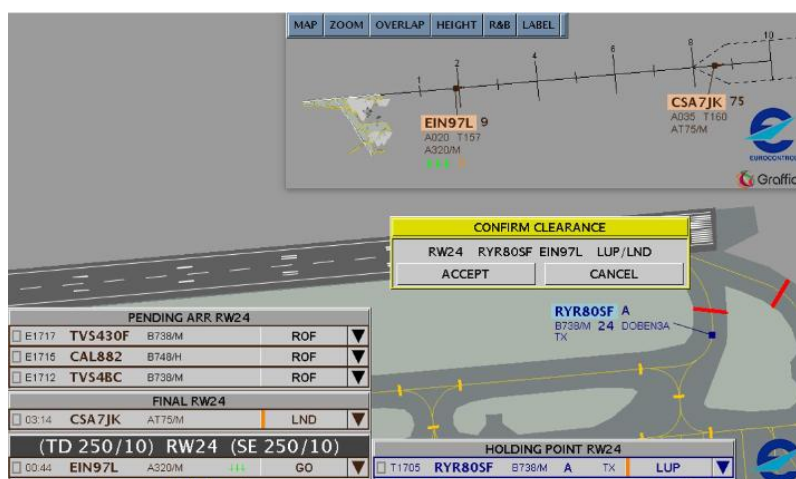
Systém CATC neřeší vzniklé konflikty, ale pomáhá předjít tomu, aby vznikly z důvodu nesprávného vedení ze strany ATC. Obecně lze říct, že systém kontroluje, zda jsou pokyny vydané věží v souladu s obvyklými postupy na letišti. V systému A-SMGCS řídicí zadává elektronické povolení do HMI. Pokud zadané povolení nebude v souladu s bezpečnostními pravidly na daném letišti, na monitoru vyskočí řídicímu upozornění. Systém také upozorní řídicího pokud jsou dvě různé povolení mezi sebou v rozporu. To funguje tak, že řídicí nejprve zadá první povolení a následně když zadá

druhé, které je v rozporu s prvním, opět dostane upozornění na monitoru. V tabulce lze vidět, která povolení si mohou odporovat.

Tab. 3.1 Druhy povolení, která mohou vyvolat upozornění systémem CATC^[15]

První povolení	Druhé povolení
PUSH-BACK	PUSH-BACK, TAXI
TAXI	PUSHBACK, TAXI, CROSS
CROSS	TAXI
LINE-UP	LINE-UP, CROSS, ENTER, TAKE-OFF, LAND
CROSS nebo ENTER	
TAKE-OFF	
LAND	

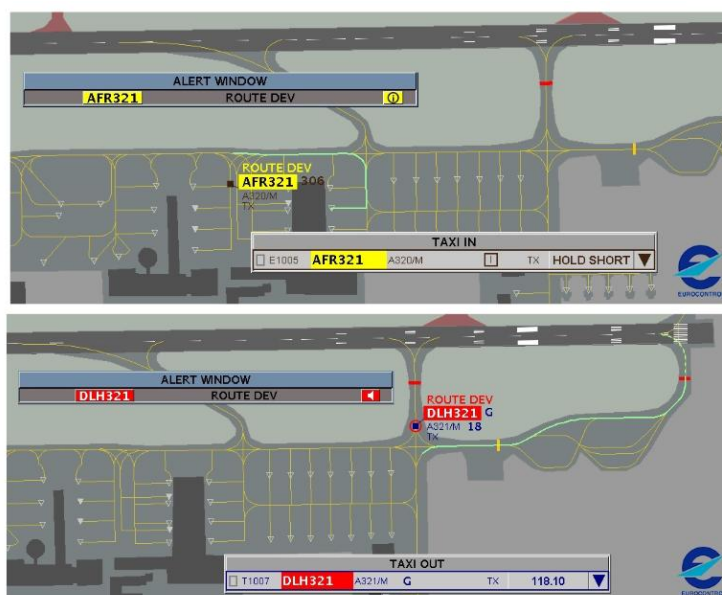
Upozornění od CATC může řídicí dostat třemi možnými způsoby. První způsob je, že systém při zadávání povolení ukáže, která mohou způsobit konflikt. Tato povolení jsou označena oranžovým proužkem. Druhý způsob je, že na monitoru vyskočí žlutá tabulka, která po řídicím vyžaduje potvrzení povolení s tlačítka ACCEPT a CANCEL. Pokud zvolí ACCEPT, povolení vstoupí v platnost, pokud CANCEL, povolení bude zrušeno. Třetí způsob je kombinací předchozích dvou. Nejprve má řídicí označena povolení, která mohou vyvolat konflikt a pokud některé z nich zvolí zobrazí se mu žlutá tabulka.



Obr. 4.3 Výstražná tabulka na monitoru řídicího. V boční a spodní liště jde vidět, že jsou zvolena povolení vyznačená oranžovou čarou^[15]

CMAC

Tento systém vyše upozornění řídicímu provozu v případě, že některý z pilotů nebo řidičů mobilních prostředků nedodrží povolení nebo obvyklý postup. V závislosti na závažnosti porušeného povolení se objeví ve žluté barvě pro méně závažné nebo v červené pro závažné. Mezi výstrahy žlutou barvou patří například odklon od plánované trasy na pojezdové dráze, letadlo je naváděno na dráhu, která je pro něj nevhodná, nebo překročení určité rychlosti. Mezi červené výstrahy patří například odklon od dráhy v blízkosti ranveje, přejetí stop příčky, narušení ranveje nebo vyšší překročení rychlosti. Systém umožní včas odhalit chybu, ať už na straně řídicího, pilota, nebo řidiče a poskytne dostatečný čas pro nápravu. Jako funkce posledního varování po CMAC slouží systém RMCA.



Obr. 4.4 Příklad varování systémem CMAC. Nahoře odklon od trasy (ROUTE DEV) na pojezdové dráze (žluté varování) a dole odklon od trasy v blízkosti ranveje (červené varování) ^[15]

4.4 ASDE-X

Airport Surface Detection Equipment Model X (ASDE-X) je přehledový systém, který byl vyvinut zejména jako ochrana proti narušení RWY ostatními letadly a vozidly. S vývojem ochrany proti narušení RWY započala FAA v roce 1991. Jako impulsem bylo téměř 50% navýšení počtu narušení RWY v roce 1990 oproti předchozím letům. V roce 1993 bylo 38 nejvytíženějších letišť v USA vybaveny systémem ASDE-3, což byl

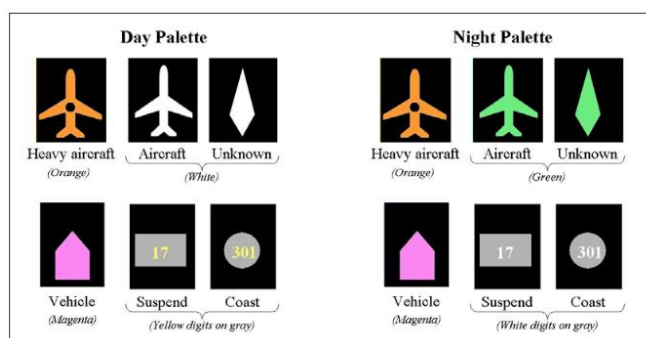
druh SMR pracující v pásmu K_u.^[51] Tento radar sloužil k vytvoření přehledové situace zejména za zhoršené viditelnosti. S ASDE-X přišla FAA poprvé v roce 1999 v rámci programu pro zvýšení bezpečnosti na RWY. V současné době je systém ASDE-X využíván na 35 nejvytíženějších letištích v USA.



Obr. 4.5 Zobrazení informací ASDE-X v denní a noční verzi. Na horní straně displeje lze vidět DCB^[20]

Princip činnosti

Obrazovka ASDE-X je rozdělena do dvou částí. První je mapa celého letiště se všemi RWY, TWY a odbavovacími plochami. V druhé části je podle potřeby přiblíženo určité místo na letišti s vysokým provozem. Zobrazení na displeji má denní a noční verzi. Cíle zobrazené na obrazovce mají různé tvary, velikosti a barvy, aby je bylo možné lépe odlišit (viz obr. 4.6).



Obr. 4.6 Ikony cílů na obrazovce ASDE-X^[20]

Pro získávání informací ASDE-X využívá PSR, SMR, Multilateraci a ADS-B. Díky datům získaných ze všech těchto prostředků je schopen sledovat veškerý letištní provoz včetně nespolupracujících prostředků. Kromě letištní plochy monitoruje také blízké okolí letiště a řídicímu zobrazí přilétávající letadla. V případě hrozícího incidentu systém varuje ATC na obrazovce vizuálním alarmem, který je doprovázen také zvuko-

vým upozorněním . Systém je výhodný zejména během nočního provozu a při provozu za snížené viditelnosti.^[37]

ASDE-X poskytuje pro ATC velké množství funkcí. Řídicí si může upravovat charakteristiky displeje, ukládat a načítat předvolby, označovat cíle nebo upravovat datové bloky. Do systému lze nahrát 32 různých předvoleb letištních operací a nastavení displeje. Pro označení neznámých cílů lze použít seznam až 176 letadel nebo vozidel. Pro přístup a ovládání těchto funkcí slouží Display Control Bar (DCB). Ten může být umístěn nahoře, dole nebo po stranách displeje.^[20]

4.5 TCAS/ACAS

Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) je palubní protisrážkový systém. Informace o hrozící kolizi poskytuje přímo pilotovi a dodává k nim i radu, jak se kolizi vyhnout. Potřeba vyvinout antikolizní systém pochází již z 50. let 20. století, kdy došlo k první velké srážce dvou dopravních letadel. První systémy se objevily v 70. a 80. letech, systém TCAS byl uveden do provozu roku 1990.^[26] Na stejném principu jako TCAS pracuje také systém Airborne Collision Avoidance System (ACAS).

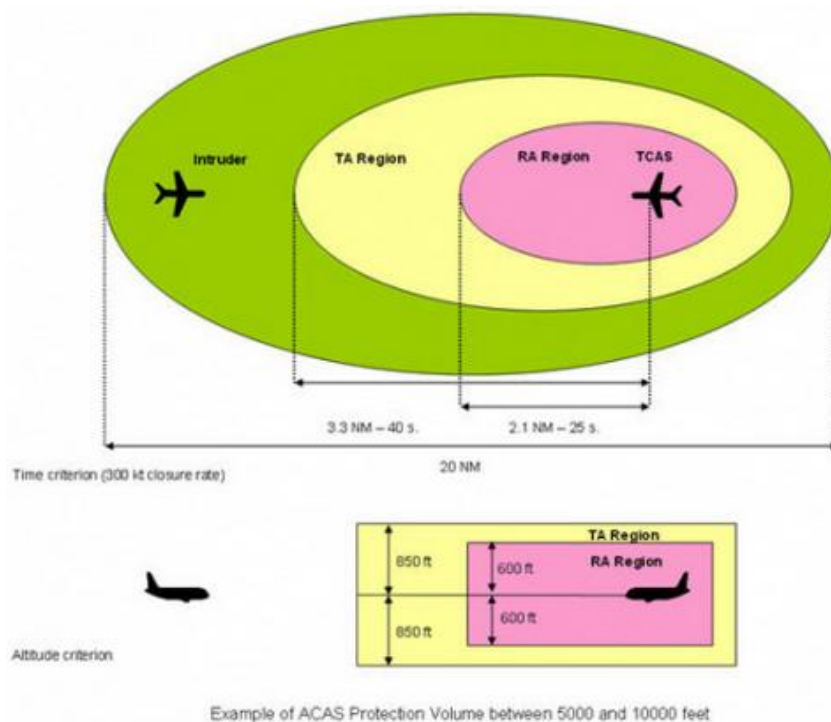
Systém poskytuje varování pouze při operacích ve vzduchu, na letištní ploše je vypnut. Je to z důvodu, že pracuje na stejném kmitočtu jako další přehledové systémy (1030 a 1090 MHz), a způsoboval by tak rušení těchto systémů. TCAS je aktivován až před vzletem, aby mohl varovat před kolizí hrozící ihned po startu. Obrazovka TCAS zobrazuje okolní letadla i při pohybu po zemi, a proto může být využita při vstupu na RWY nebo křížení RWY pro podávání informací o přehledové situaci.^[53] Toho se využívá hlavně na letištích při špatné viditelnosti, nebo pokud není letiště vybaveno SMR.

Princip činnosti

Jako zdroj informací systémy TCAS/ACAS využívá odpovídače SSR. U odpovídačů módů C a S letadel, která jsou v blízkosti, vyvolají odpověď, ze které získají informaci o jejich výšce a vzájemné vzdálenosti. Pokud hrozí kolize mezi letadly systém poskytne varování.

Varování jsou dvojího druhu. Prvním varováním před hrozcí kolizí je Traffic Advisory (TA). Toto varování by mělo přijít s dostatečným předstihem, aby mohli piloti vizuálně zahlédnout letadlo, se kterým by mohlo dojít k potencionální srážce. Zároveň má toto varování připravit piloty na varování Resolution Advisory (RA). RA pilota informuje na displeji o vertikální rychlosti, kterou by měl stoupat nebo klesat, aby se vyhnul srážce. Varování je doprovázeno zvukovým signálem. Funguje to tak, že pokud hrozí srážka dvou letadel, jedno dostane RA "climb" (stoupej) a druhé "descend" (klesej). U tohoto druhu RA je pak předepsáno, že letadla musí stoupat nebo klesat rychlostí 1 500 ft/min. V okamžiku, kdy se letadla vyhnou, systém ohlásí "Clear of Conflict".

Doba, ve které jsou TA a RA generovány, závisí na výšce, ve které se letadla pohybují a na manévrech, které letadla provádí a na kurzu, se kterým letadla pohybují. Obvyklý čas varování je u TA 48 s před hrozcí kolizí a u RA 35 s.^[52] V malých výškách je manévrování obtížnější, proto jsou tato varování generována dříve, aby měli piloti více času na reakci. To samé platí v případě, že některé z letadel provádí ostrý manévr. Pokud je nebezpečí bezprostřední je generováno varování RA bez předchozího varování TA. Piloti musí varování systému TCAS uposlechnout i v případě, že je v rozporu s povolením nebo příkazem, který byl letadlu udělen řídicím letového provozu.



Obr. 4.7 Vzdálenost, při které se aktivuje varování před kolizí systémem TCAS/ACAS^[52]

4.6 Budoucnost antikolizních systémů

V současné době již existuje několik antikolizních systémů, které varují pilota nebo řídicího před hrozícím nebezpečím srážky. Při letu je pilot na nebezpečí kolize varován přímo systémem TCAS a za úhybný manévr plně zodpovídá. Při pohybu po letištní ploše je ovšem systém TCAS neaktivní. Varování před hrozící kolizí poskytuje systém A-SMGCS, který ovšem upozorní pouze řídicího provozu. Ten poté musí komunikovat s piloty, aby hrozící konflikt vyřešil. Někdy tak poskytnutý čas na zabránění kolize není dostatečný.

K nejvíce srážkám dochází v odbavovacím prostoru, kde do hry vstupují ještě řídicí vozidel, kteří mají odpovědnost za vytlačování letadel. Při těchto nehodách obvykle nedochází ke zranění nebo smrti osob na palubě letadel. Jsou však poškozena letadla, což leteckým společnostem způsobuje velké ztráty v řádech miliard amerických dolarů. V budoucnu je cílem mít systém, který poskytne dostatečné varování přímo pilotovy a přenést tak na něj odpovědnost za veškeré pozemní operace letadla. V této podkapitole je uvedeno, jak by měl budoucí systém mohl vypadat.

Palubní antikolizní systém

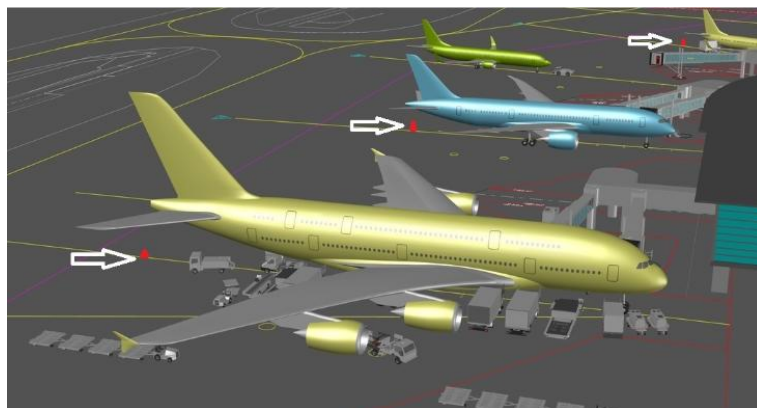
Při pohybu po ploše letiště pilot nemá přímé varování před hrozící srážkou, spoléhat musí buď na vlastní pozorování okolního provozu nebo na pokyny ATC. Jak již bylo zmíněno v úvodu podkapitoly, cílem budoucích systémů by mělo být varovat pilota před hrozící srážkou přímo na palubě letadla bez nutnosti komunikace s ATC. Takový systém by měl být aktivní pouze při pohybu po TWY a na odbavovacích plochách a měl by být deaktivován při vjezdu na RWY, kdy se aktivuje systém TCAS. Hlavním požadavkem na takový systém by byla skutečnost, aby byl schopen pracovat i za velmi špatných povětrnostních podmínek, kdy je riziko kolize největší. V ideálním případě by měl být schopen spolupracovat s již existujícími systémy, tak aby byly náklady na jeho instalaci do letadel minimální.

Systém by mohl pracovat na podobném principu jako TCAS, tedy poskytovat dva stupně varování před hrozící kolizí. Oproti TCAS bude potřebovat jiný zdroj informací, protože kvůli rušení ostatních přehledových systémů nemůže využít informace z odpovídačů, které vysílají na frekvenci 1090 MHz. Systém by se měl aktivovat pouze v pří-

padě hrozící kolize, aby zbytečně nerušil piloty řízení letadla po ploše letiště.^[18] Oproti systému TCAS by měl varovat při mnohem menších vzdálenostech mezi letadly. Na letištní ploše se na malém prostoru pohybuje v jednu chvíli velké množství letadel a při nastavených vzdálenostech jako u TCAS by před hrozící kolizí varoval téměř po většinu času.

AsCAD

Pro varování před kolizí při vytlačování letadel vytvořila Mezinárodní asociace leteckých dopravců (IATA) návrh systému, který byl nazván Airside Collision Avoidance Device (AsCAD). Systém se má skládat s detektorů s dosahem 200 m, které budou umístěny na stáních za letadlem. Detektory budou schopny rozeznat směr pohybu letadel. Systém tak bude varovat pouze v případě nebezpečí kolize a eliminuje tak falešné varování. AsCAD má pracovat v pásmu infračervených vln a nebude tak způsobovat rušení ostatních radionavigačních prostředků. Varovný signál dostane řídicí provozu, který před hrozící kolizí varuje piloty.^[21] Zůstává však otázka, zda bude čas poskytnutý na reakci dostatečný.



Obr. 4.8 Umístění systému AsCAD^[21]

5. Porovnání přehledových systémů

Tato kapitola slouží k porovnání systémů, které se v současnosti využívají k vytvoření přehledové situace. Jedná se o SMR, SSR, Multilateraci a ADS-B. Důraz je kladen nejen na výkony systémů, ale také na pořizovací a provozní náklady, potřebu dalšího vybavení a vnější vlivy, které ovlivňují výkony systémů. Všechny tyto faktory jsou důležité pro výběr vhodného přehledového systému pro jednotlivá letiště.

Volba vhodného systému pro instalaci na letišti závisí na mnoha faktorech. Nejdůležitější je objem provozu na letišti a vybavení letadel, která budou letiště využívat. Neméně důležitými vlivy jsou povětrnostní podmínky a okolní terén. Tyto vlivy mohou snižovat výkony některých přehledových systémů a proto je důležité vybrat systém, který jimi nebude ovlivněn. Veškeré důležité vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách v této kapitole.

5.1 Potřebné vybavení a poskytované informace

Všechny přehledové systémy kromě ADS-B měří informace nezávisle na jiném systému. Systém ADS-B je závislý na GNSS, a proto dokáže pracovat pouze v případě, že je dostupný signál z GNSS. V dnešní době je signál z GNSS dostupný téměř na celé Zemi, proto to nepředstavuje problém. Výpadky systému mohou nastat pouze v případě poruchy satelitů nebo některým vlivům z vesmíru, jako například silná aktivita Slunce.

Kromě SMR všechny systémy pro svou činnost potřebují vybavení na palubě letadla. V dnešní době jsou téměř všechna letadla vybavena odpovídači SSR. Při použití sekundárních radarů a multilaterace tak nenastává problém, že by letadla nespolečně pracovala. Avionikou ADS-B je v současné době vybaveno okolo 20% letadel, proto nelze používat ADS-B jako jediný zdroj přehledových informací.

Nejvíce informací o cíli získáme pomocí módu S sekundárního radaru a ADS-B. U multilaterace počet informací závisí na druhu odpovídače, se kterým komunikuje. Podává nám vždy ty informace, co vysílá daný odpovídač. Nejméně informací nám podává SMR, který pouze zaměření polohu jednotlivých cílů. Mód A/C nám navíc poskytuje alespoň ID letadla a informaci o jeho výšce letu.

Tab 5.1 Srovnání potřebného vybavení a poskytovaných informací^[22]

	SMR	SSR mód A/C	SSR mód S	MLAT	ADS-B
Závislý/ nezávislý na jiné zdroje	nezávislý	nezávislý	nezávislý	nezávislý	závislý
Závislý/ nezávislý na jiné systémy	nezávislý	nezávislý	nezávislý	závislý	závislý
Kmitočty	9-17 GHz	1030 a 1090 MHz	1030 a 1090 MHz	1030 a 1090 MHz	1090, 978 a 108-117 MHz
Palubní vybavení	-	odpovídač módu A/C	odpovídač módu S	odpovídač módu A/C, S nebo 1090 ES	1090 Extended Squitter
Základní poskytované informace	pozice, vypočítaný vektor rychlosti	pozice, IDENT, FL, vypočítaný vektor rychlosti	pozice, IDENT, FL, vypočítaný vektor rychlosti, 24 bitový kód, status letu, zvolená FL, úhel natočení, úhel sledování, GS, kurz, IAS, Machovo číslo, vertikální rychlost	závisí na druhu spolupracujícího odpovídače	pozice, FL, rychlost, kategorie letadla, IDENT, 24 bitový kód, vertikální rychlost, GPS výšku, integrita informací

5.2 Výkon

Nejdůležitější faktor pro volbu přehledového systému je jeho výkon. Hlavní požadavky na přehledové systémy jsou:

- pokrytí vzdušného prostoru
- dostupnost
- nepřetržitost
- spolehlivost

- přesnost měření
- doba obnovy informací^[22]

Pro řízení pohybů po letištní ploše mají všechny systémy dostatečný dosah. Jediný problém představují překážky na letišti (například budovy), které stíní některé oblasti na letišti. Dostupnost, nepřetržitost a spolehlivost je u všech systémů velmi dobrá, dostupnost přehledových systémů na letištích je ve více než 99% případů a jejich spolehlivost se udává na více než 20 000 hodin provozu.^[22] V přesnosti měření a rychlosti obnovy informací se jednotlivé systémy liší. Jestli budou tyto vlastnosti dostatečné závisí na provozu na letišti. Když se na ploše pohybuje velké množství letadel je potřeba znát co nejpřesněji jejich polohu a mít co nejaktuálnější informace. Zároveň musí být přehledový systém schopen pojmout velké množství cílů, protože kromě letadel se na ploše pohybuje i velké množství vozidel technické obsluhy.

Tab 5.2 Porovnání výkonů přehledových systémů

	SMR	SSR mód A/C	SSR mód S	MLAT	ADS-B
Dosah [NM]	0,8-3,2	200-250	200-250	závisí na velikosti systému	200-250
Doba obnovy informací [s]	1	4-15	4-15	1 (mód S) 2,5-5 (mód A/C)	0,5-1
Přesnost měření polohy [m]	20	13	7 ^[38]	7,5	závisí na palubním vybavení letadla
Přesnost měření azimutu [°]	0,15-0,5	0,07-0,14	0,07-0,14	závisí na geometrii pozemních stanic	
Schopnost rozlišení cílů [°]	0,5	0,5-1	dokonalá, 1° při spolupráci s módem A/C	dokonalá	dokonalá
Max. počet cílů v jednu chvíli	400	800	800	500	neomezeně
Vlivy snižující výkon	počasí, velký provoz, multipath, překážky	garbling, fruiting, multipath, chyby v datech	multipath	DOP, spolupracující systémy, přehlcení	data získává pouze z GNSS, přejímá její chyby (str. 37)

5.3 Provozní a pořizovací náklady

Důležitým faktorem při výběru přehledového systému je i jeho cena, která je poměrně vysoká. Nezahrnuje pouze cenu elektronického vybavení, ale také náklady na jeho údržbu a instalaci. Pro malá letiště se nevyplatí instalovat drahé systémy, u velkých letišť je obvykle potřeba instalace více přehledových systémů, aby byly schopny pojmout objem provozu.

Nejlevnější možností je systém ADS-B. Problém u něj představuje fakt, že velké množství letadel dosud není vybaveno potřebnou avionikou. Samotná instalace ADS-B do letadla a jeho certifikace vyjde okolo 5K-13K \$, celkové náklady a ztráty spojené s jeho instalací na palubě letadla vyjdou okolo 0,5M \$.^[27] Nejdražšími systémy jsou radary, které ovšem dokážou spolupracovat téměř se všemi letadly. Odpovědačem SSR jsou v dnešní době vybavena téměř všechna letadla a SMR nevyžaduje žádné vybavení na palubě letadla. Relativně levnou možností je i Multilaterace, jejíž cena závisí na počtu pozemních stanic. Při větším počtu stanic rostou náklady na údržbu a pronájem pozemků. Ceny uvedené v tabulce jsou pouze orientační a u jednotlivých výrobců se mohou lišit.

Tab 5.3 Srovnání nákladů na přehledové systémy

	SMR	SSR mód A/C	SSR mód S	MLAT	ADS-B
Pořizovací náklady na pozemní zařízení [\\$]	4,5M	3M	3M	1.2M*	300K
Pořizovací náklady na avioniku^[54] [\\$]	0	1.7K	2.7K	1.7K-3.65K	3,65K
Náklady na roční provoz [\\$]	400K	325K	325K	60K	130K ^[27]

*Cena za 9 jednotek MLAT

6. Závěr

V diplomové práci jsem zpracoval přehled základních navigačních prostředků, které se používají pro navigaci letadel po ploše letiště. Dále jsou v práci uvedeny také hlavní používané antikolizní systémy a na závěr jsou porovnány základní systémy pro získávání přehledových informací. U každého systému jsou shrnuty nejdůležitější informace o něm tak, aby mohl čtenář získat dobrý přehled o celé problematice a zároveň byla celá problematika srozumitelná i bez předchozích zkušeností.

Hlavní část mé práce představuje popis radionavigačních a satelitních navigačních prostředků. V současné době v této oblasti dochází k postupnému přechodu z radarových systémů na systém ADS-B, který vysílá informace obdržené ze satelitní navigace. Počet letadel vybavených avionikou pro ADS-B není ještě dostatečný, aby systém mohl pracovat samostatně, proto se plný přechod na ADS-B předpokládá během této dekády. V poslední kapitole jsou tyto prostředky porovnány jak z hlediska jejich výkonů, tak z hlediska ekonomického.

Nedílnou součástí práce je i popis antikolizních systémů. V současné době stále chybí systém, který by varoval přímo piloty před kolizemi na pojezdových drahách a odbavovacích plochách. Pilot varování obdrží od řídicího provozu, což nemusí ve všech případech stačit. Každoročně se stane množství kolizí na letištní ploše, což má za následek přinejmenším poškození letadel. V budoucnu očekávám, že se takový systém objeví a v jedné podkapitole popisují jaké by měl mít přibližně vlastnosti.

Očekávám, že má práce bude přínosem pro budoucí piloty a provozní inženýry při jejich studiu jako přehledný zdroj důležitých informací, které jsou v práci shrnuty a utříděny. Práce odpovídá zadání a věřím, že velmi usnadní studium této problematiky. Informace pouze o navigaci po ploše letiště jsou uvedeny ve velkém množství různých zdrojů, což pro studium není úplně přehledné. Vzhledem k rozsahu problematiky nejsou v práci uvedeny veškeré detaily o jednotlivých systémech. Věřím, že pro jejich hlubší studium, práce a uvedené zdroje poslouží jako dobrý základ.

Seznam zdrojů

Internetové publikace

- [1] ICAO. *Air Traffic Services Planning Manual* [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: https://www.icao.int/EURNAT/Other Meetings Seminars and Workshops/Global ATFM Manual Coordination Team/1st Meeting at ATC Global 2012 and EUROCONTROL CFMU/ICAO Doc 9426_cons_en.pdf
- [2] LUKIN, K.A., Anatolij MOGYLA, Gaspare GALATI a Gabriele PAVAN. *Novel concepts for Surface Movement Radar design* [online]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2008 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224338501_Novel_concepts_for_Surface_Movement_Radar_design
- [3] DRÁPAL, Stanislav. *Využití SSR módu S pro řízení pohybů letadel a vozidel po ploše letiště* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103872. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojínského inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.
- [4] NEVEN, W.H.L, T.J. QUILTER a R.A. HOGENDOORN. Wide Area Multilateration Report. In: *Eurocontrol.int* [online]. 2005 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf>
- [5] Multilateration (MLAT) Concept of Use. In: *Multilateration.com* [online]. 2007 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf
- [6] ŠÍBLOVÁ, Kamila. *Možnosti využití ADS-B pro řízení provozu v CTR a po ploše* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102963. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.
- [7] ADS-B and other means of surveillance implementation status. In: *Ec.europa.eu* [online]. 2018 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/20180515-sesar-ads-b-report.pdf>
- [8] A guide to global surveillance. In: *Icao.int* [online]. 2014 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ADSBIMP/ADSBIMPP12.pdf>
- [9] Aeronautical Information Manual. In: *Faa.gov* [online]. 2017 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/media/aim.pdf

- [10] LUCKE, JR., Edward W. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Flight Inspection. In: *Faa.gov* [online]. 2014 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/order/8200_45_ADS-B.pdf
- [11] Manual for the Universal Access Transceiver (UAT). In: *Icao.int* [online]. 2003 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.icao.int/safety/acp/Inactive%20working%20groups%20library/ACP-WG-C-UAT-2/UAT-SWG02-WP04-%20Draft%20Tech%20Manual%20V0-1%20.pdf>
- [12] PETROCHILLOS, Nicolas Laurent Regis. Algorithms for Separation of Secondary Surveillance Radar Replies. In: *Cas.tudelft.nl* [online]. 2002 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://cas.tudelft.nl/pubs/petrochillos_phdthesis.pdf
- [13] Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes. In: *Eurocontrol.int* [online]. 2003 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>
- [14] Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. In: *Icao.int* [online]. 2004 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: [https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9830_cons_en\[1\].pdf](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9830_cons_en[1].pdf)
- [15] EUROCONTROL Specification for Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) Services. In: *Eurocontrol.int* [online]. 2020 [cit. 2020-12-22]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-specification-a-smgcs-v-2-0.pdf>
- [16] Global Air Navigation Plan. In: *Icao.int* [online]. 2016 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://www.icao.int/airnavigation/documents/ganp-2016-interactive.pdf>
- [17] XINPING, Zhu, Tang XINMIN a Han SONGCHEN. Aircraft intersection collision conflict detection and resolution under the control of A-SMGCS. In: *Researchgate.net* [online]. 2012 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261381618_Aircraft_intersection_collision_conflict_detection_and_resolution_under_the_control_of_A-SMGCS
- [18] CAHILL, Joan, Sofiane YOUS, Gerard LACEY a Peter REDMOND. The design of a collision avoidance system for use by Pilots operating on the airport ramp and in taxiway areas. In: *Researchgate.net* [online]. 2012 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257480274_The_design_of_a_collision_avoidance_system_for_use_by_Pilots_operating_on_the_airport_ramp_and_in_taxiway_areas
- [19] VOJTEK, David. Globální Navigační a Polohové Systémy. In: *Geoinformatika-1.vsb.cz* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: https://geoinformatika-1.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_source/Ucebni-texty-GNPS-distancni.pdf

- [20] MCANULTY, Michael, Anton KOROS a Alan POSTON. Airport Surface Detection Equipment – Model X Early User Involvement Event. In: *Faa.gov* [online]. 2001 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/asde-x-v1.pdf>
- [21] SHINGAI, George. Airside Collision Avoidance Device. In: *Iata.org* [online]. 2018 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/3ffbfefb489074675b43404340a29bdaf/airside-collision-avoidance-device-ascad.pdf>
- [22] Guidance Material on Comparison of Surveillance Technologies (GMST). In: *Icao.int* [online]. 2007 [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/cns/gmst_technology.pdf
- [23] *Letecký předpis L14 - Letiště* [online]. In: . [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [24] STRAŇÁK, Filip. *Přehled a porovnání principů činnosti současných druhů GNSS ve světě* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84668. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.
- [25] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy* [online]. In: . 2012 [cit. 2021-02-12]. ISBN 978-80-214-4500-0. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf
- [26] *TCAS jako prostředek pro zvýšení bezpečnosti letového provozu* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70469/F6-DP-2017-Pesout-Martin-DP_Pesout.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy. Vedoucí práce Ing. Petr Mrázek Ph.D.
- [27] *Cost benefit analysis of ADS-B implementation for below FL-245* [online]. In: . 2017 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: www.nss.govt.nz%2Fdmsdocument%2F53-cost-benefit-analysis-on-ads-b-below-fl245-proposed-mandate&usg=AOv-Vaw17dCzQmawB78parJ6Hb1SK

Internetové stránky

- [28] Surface Movement Radar. In: *Skybrary.aero* [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Surface_Movement_Radar
- [29] Surface Movement Radar. In: *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Surface%20Movement%20Radar.en.html>
- [30] Multilateration Executive Reference Guide. In: *Multilateration.com* [online]. [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <http://www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf>
- [31] TURNER, Ron. Multilateration Technology Overview. In: *Icao.int* [online]. Syracuse, NY [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/2007/surv_semi/Day02_SENSIS_Turner.pdf
- [32] New Air Traffic Surveillance Technology. In: *Boeing.com* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_02_10/pdfs/AERO_Q2-10_article02.pdf
- [33] WOLFF, Christian. Uplink-Formats. In: *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr06.en.html>
- [34] Mode S. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Mode_S
- [35] Runway Markings. In: *Avweb.com* [online]. 2019 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://www.avweb.com/flight-safety/proficiency/runway-markings/>
- [36] Did You Know When Pilots Started To Communicate Using Radio? In: *Baa-training.com* [online]. 2019 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://www.baatraining.com/pilots-using-radio/>
- [37] Airport Surface Detection Equipment, Model X. In: *Faa.gov* [online]. 2020 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/asde-x/
- [38] Secondary surveillance radar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar
- [39] Runway Status Lights (RWSL). In: *Skybrary.aero* [online]. 2019 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Runway_Status_Lights_\(RWSL\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Runway_Status_Lights_(RWSL))

- [40] Accident and Serious Incident Reports: RI. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Accident_and_Serious_Incident_Reports:_RI#Ground_Collision
- [41] B742 / B741, Tenerife Canary Islands Spain, 1977. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/B742/_B741,_Tenerife_Canary_Islands_Spain,_1977
- [42] SŮSA, Richard. Srážka dvou Boeingů 747 v roce 1977 ukončila 583 životů. In: *Novinky.cz* [online]. 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/historie/clanek/srazka-dvou-boeingu-747-v-roce-1977-ukoncila-583-zivotu-40347503>
- [43] Ground Accident Prevention (GAP). In: *Flightsafety.org* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://flightsafety.org/toolkits-resources/past-safety-initiatives/ground-accident-prevention-gap/>
- [44] DC93 / B722, Madrid Spain, 1983. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/DC93/_B722,_Madrid_Spain,_1983
- [45] B733 / SW4, Los Angeles CA USA, 1991. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/B733/_SW4,_Los_Angeles_CA_USA,_1991
- [46] MD87 / C525, Milan Linate, 2001. In: *Skybrary.aero* [online]. 2016 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/MD87/_C525,_Milan_Linate,_2001
- [47] Milan Linate runway incursion, October 2001. In: *Icao.int* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2017/PANS%20AD%20Seminar-Workshop/Linate%20Case%20Study.pdf>
- [48] B744 / Vehicle, Luxembourg Airport, Luxembourg 2010. In: *Skybrary.aero* [online]. 2017 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/B744/_Vehicle,_Luxembourg_Airport,_Luxembourg_2010
- [49] FA50 / Vehicle, Moscow Vnukovo Russia, 2014. In: *Skybrary.aero* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/FA50/_Vehicle,_Moscow_Vnukovo_Russia,_2014
- [50] Letecké katastrofy: Ignorovali stížnosti dispečerů až do srážky letadel. In: *Idnes.cz* [online]. 2011 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/technika/letecke-katastrofy-ignorovali-stiznosti-dispeceru-az-do-srazky-letadel.A111118_162758_tec_technika_vse

- [51] WOLFF, Christian. Surface Movement Radar ASDE. In: *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/03.atc/karte002.en.html>
- [52] Airborne Collision Avoidance System (ACAS). In: *Skybrary.aero* [online]. 2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Airborne_Collision_Avoidance_System_\(ACAS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Airborne_Collision_Avoidance_System_(ACAS))
- [53] TCAS II Activation. In: *Skybrary.aero* [online]. 2014 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/TCAS_II_Activation
- [54] ŠTROP, Marek. Není důležité vidět, ale být viděn. In: *Aeroweb.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/2195-neni-dulezite-videt-ale-byt-viden>
- [55] Global Navigation Satellite System (GNSS). In: *Princeton.edu* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>
- [56] Global Navigation Satellite System(GNSS) Manual. In: *Icao.int* [online]. 2012 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Documents/Doc.%209849.pdf>
- [57] ALI, Ershad. Global Positioning System (GPS): Definition, Principles, Errors, Applications & DGPS. In: *Researchgate.net* [online]. 2020 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340514635_Global_Positioning_System_GPS_Definition_Principles_Errors_Applications_DGPS
- [58] GPS Control Segment. In: *Gps.gov* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/multimedia/images/GPS-control-segment-map.pdf>
- [59] Section 3. Airport Marking Aids and Signs. In: *Faa.gov* [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap2_section_3.html
- [60] ICAO recommended airport signs, runway and taxiway markings. In: *Jeppesen.com* [online]. 2004 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://www1.jeppesen.com/documents/aviation/business/ifr-paper-services/airport-signs.pdf>
- [61] Garmin Expands GDL 88 ADS-B Display Compatibility. In: *Sarasotaavionics.com* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://sarasotaavionics.com/whats-new-in-avionics/garmin-expands-gdl-88-ads-b-display-compatibility>
- [62] BROUWER, Mark. Ground radar EHAM. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006 [cit. 2021-11-13].

Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ground_radar_EHAM.jpg

- [63] X-band Solid-state Surface Movement Radar “ALCOR”. In: *Lemz.ru* [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://lemz.ru/en/alcor/>
- [64] Does a secondary surveillance radar need the support of a primary surveillance radar? In: *Aviation.stackexchange.com* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/37132/does-a-secondary-surveillance-radar-need-the-support-of-a-primary-surveillance-r>
- [65] RWY – místo, kde vzlétají a přistávají letadla. In: *Inadhled.cz* [online]. 2014 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.inadhled.cz/zajimavosti/rwy-misto-kde-vzletaji-a-pristavaji-letadla/>
- [66] Airport Lighting. In: *Cfnotebook.net* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.cfnotebook.net/notebook/aircraft-operations/terminal/airport-lighting>
- [67] Taxiway in airport. In: *Aviajoin.com* [online]. 2019 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://aviajoin.com/taxiway-in-airport/>
- [68] BREAKING Cathay Dragon aircraft collision with ground vehicle at HongKong airport. In: *Airlive.net* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.airlive.net/breaking-dragonair-collision-with-ground-vehicle-at-hongkong-airport/>
- [69] NOËTH, Bart. Ground collision between two Kenya Airways Embraer ERJ-190’s at Nairobi Airport; both aircraft seriously damaged. In: *Aviation24.be* [online]. 2019 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.aviation24.be/airlines/kenya-airways/ground-collision-two-embraer-erj-190-nairobi-airport-both-aircraft-seriously-damaged/>
- [70] British Airways – Boeing B747-400 (G-BNLL) flight BA034. In: *Aviation-accidents.net* [online]. 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.aviation-accidents.net/british-airways-boeing-b747-400-g-bnll-flight-ba034/>
- [71] Secondary surveillance radar. In: *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/Secondary_surveillance_radar
- [72] JANDORA, Adam. Zpověď odpovídače. *Airguru.cz* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.airguru.cz/clanky/odpovidace>
- [73] Mode S Reply Encoding. *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr24.en.html>

Seznam zkratek

Zkratka	Význam zkratky	Význam v češtině
ACAS	Airborne Collision Avoidance System	Palubní antikolizní systém
A-SMGCS	Advanced Surface Movement and Guidance Control System	Pokročilý systém pro navádění a řízení pozemních pohybů
A-VDGS	Advanced - Visual Docking Guidance System	Systém pro navádění letadel na stání
AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring	Autonomní monitorování správnosti dat
ABAS	Aircraft Based Augmentation System	Rozšiřovací systém umístěný na letadle
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast	Automatický závislý přehled - vysílání
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance - Contract	Automatický závislý přehled - dohoda
ADS-R	Automatic Dependent Surveillance - Rebroadcast	Automatický závislý přehled - převysílání
AIP	Aeronautical Information Publication	Letecká informační příručka
AsCAD	Airside Collision Avoidance Device	Antikolizní systém
ASDE-X	Airport Surface Detection Equipment Model-X	Letištní zařízení pro detekci kolíží Model-X
ASTERIX	All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange	Standard pro výměnu informací o letových provozních službách
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATIS	Automatic Terminal Information Service	Automatická informační služba TMA
CAT	Category	kategorie
CATC	Conflicting ATC Clearances	Systém na řešení konfliktů mezi vydanými povoleními
CMAC	Conformance Monitoring Alerts for Controllers	Systém pro varování před neschválenými pohyby pro řídicího
CWP	Controller Working Position	Pracovní místo řídicího
dB	deciBell	Jednotka hlasitosti
DCB	Display Control Bar	Lišta ovládání obrazovky
DME	Distance Measuring Equipment	Zařízení pro měření vzdálenosti
DOP	Dilution of Precision	Snižování přesnosti
ECI	Electronic Clearance Input	Elektronické vkládání povolení
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Evropská aplikace pro vylepšení vlastností GPS

Zkratka	Význam zkratky	Význam v češtině
EHS	Enhanced Surveillance	Vylepšený přehled
ELS	Elementary Surveillance	Základní přehled
EU	European Union	Evropská Unie
FAA	Federal Aviation Administration	Federální úřad pro letectví
FIS-B	Flight Information Service-Broadcast	Letová informační služba-vysílání
FL	Flight Level	Letová hladina
GBAS	Ground Based Augmentation System	Rozšiřovací systém umístěný na zemi
GDOP	Geometric Dilution of Precision	Geometrická chyba měření polohy
GHz	Giga Hertz	Jednotka frekvence
GLONASS	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma	Globální družicový navigační systém
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální navigační satelitní systém
GPS	Global Positioning System	Globální navigační systém
GS	Ground Speed	Rychlost letadla vzhledem k povrchu Země
HDOP	Horizontal Dilution of Precision	Horizontální chyba měření přesnosti
HMI	Human Machine Interface	Rozhraní mezi člověkem a strojem
Hz	Hertz	Jednotka frekvence
hPa	hectoPascal	Jednotka tlaku
IAS	Indicated Air Speed	Indikovaná rychlost
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní organizace leteckých dopravců
ICAO	Internacional Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ILS	Instrumental Landing System	Systém pro přesné přístrojové přiblížení
INS	Inertial Navigation System	Inerciální navigační systém
IRS	Inertial Reference System	Inerciální referenční systém
kHz	kiloHertz	Jednotka frekvence
KLM	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij	Královské Nizozemské Aerolinie
km	kilometer	kilometr
kts	knots	uzly (jednotka rychlosti)
kW	kilowatt	kilowatt
LORAN	Longe Range Air Navigation	Navigace na velké vzdálenosti
m	meter	metr
METAR	Meteorological Aerodrome Report	pravidelná hlášení meteorologických informací

Zkratka	Význam zkratky	Význam v češtině
MLAT	Multilateration	Multilaterace
μs	microsecond	mikrosekunda
ms	milisecond	milisekunda
NextGen	Next Generation Air Transportation System	Program nové generace letecké navigace
NM	Navy Mile	Námořní míle
NOTAM	Notice to Airman	Zprávy pro letce
ns	nanosecond	nanosekunda
PDOP	Position Dilution of Precision	Snížení přesnosti způsobené 3D pozicí
PPS	Precision Positioning Service	Precizní informování o poloze
PRF	Pulse repetition frequency	Frekvence opakování vysílání pulzu
PSR	Primary Surveillance Radar	Primární přehledový radar
PZ90	Parametry Zemli 1990 goda	Referenční systém z roku 1990
RA	Resolution Advisory	Druh varování před kolizí
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring	Autonomní monitorování správnosti dat
RADAR	Radio Detection and Ranging	Radiolokátor
REL	Runway Entrance Lights	Návěstidla vstupu na dráhu
RIRP	Runway Incursion Reduction Programme	Program pro omezení počtu narušení RWY
RMCA	Runway Monitoring and Conflict Alert	Systém k monitorování RWY a varování před konflikty
RPM	Rotation Per Minute	Otáčky za minutu
RWSL	Runway Status Lights	Návěstidla Stavů RWY
RWY	Runway	Vzletová a přistávací dráha
s	second	sekunda
SBAS	Satellite Based Augmentation System	Rozšiřovací systém umístěný na družici
SESAR	Single European Sky ATM Research	Program jednotného evropského nebe
SMGC	Surface Movement Guidance and Control	Řízení letištních pohybů a navádění
SMR	Surface Movement Radar	Letištní přehledový radar
SPI	Special Pilot Identificaton	Speciální pulz vysílání SSR
SPS	Standard Positioning Service	Standardní informování o poloze
SSR	Secondary Surveillance Radar	Sekundární přehledový radar
SSSR	-	Svaz sovětských socialistických republik

Zkratka	Význam zkratky	Význam v češtině
TA	Traffic Advisory	Druh varování před kolizí
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System	Palubní antikolizní systém
TDOA	Time Difference of Arrival	Rozdíl časů příchodu signálů
TDOP	Time Dilution of Precision	Časová chyba měření polohy
THL	Take Off Hold Lights	Vyčkávací návěstidla pro vzlet
TIS-B	Traffic Information Service - Broadcast	Dopravní informační služba - vysílání
TMA	Terminal Area	Koncová řízená oblast
TOA	Time of Advance	Čas příchodu signálu
TWY	Taxiway	Pojezdová dráha
UAT	Universal Access Transceiver	Univerzální vysílač připojení
USA	United States of America	Spojené státy americké
VDL	VHF datalink	VKV datalink
VDOP	Vertical Dilution of Precision	Vertikální chyba měření polohy
VHF	Very High Frequency	Velmi krátké vlny (VKV)
VOR	VHF Omni-directional Radion Range	VKV všesměrový radiomaják
WAAS	Wide Area Augmentation System	Americký systém pro vylepšení vlastností GPS
WAM	Wide Area Multilateration	Multilaterační systém pro rozsáhlé oblasti
WGS-84	World Geodetic System 1984	Referenční systém z roku 1984

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek	2.1	Značení RWY
Obrázek	2.2	Světla na RWY
Obrázek	2.3	Návěstidla stavu RWY
Obrázek	2.4	Značení pojezdové dráhy
Obrázek	2.5	Značení vyčkávacího místa
Obrázek	2.6	Světla na TWY
Obrázek	2.7	Příklady příkazových znaků
Obrázek	2.8	Příklady informačních znaků
Obrázek	3.1	Anténa SMR
Obrázek	3.2	Obrazovka A-SMGCS
Obrázek	3.3	Anténa PSR a SSR Sky Search-3000
Obrázek	3.4	Vysílání pulzů P1, P2 a P3 v módu A/C
Obrázek	3.5	Formát odpovědi módu S
Obrázek	3.6	Střídání All-Call Period a Roll-Call Period
Obrázek	3.7	Princip Multilaterace
Obrázek	3.8	Zobrazení velikosti chyby MLAT v jednotlivých částech letiště
Obrázek	3.9	Rozmístění pozemních stanic MLAT a WAM v Evropě
Obrázek	3.10	Geodetický souřadnicový systém
Obrázek	3.11	Rozmístění stanic řídicího segmentu GPS
Obrázek	3.12	Budoucí pokrytí SBAS
Obrázek	3.13	Princip funkce ADS-B
Obrázek	3.14	Zobrazení informací z ADS-B na displeji Garmin GDL 88
Obrázek	3.15	Schéma postupného přechodu na ADS-B
Obrázek	3.16	Popisky letadel a vozidel
Obrázek	3.17	Trať vytvořená pomocí služby Směrování v systému A-SMGCS
Obrázek	3.18	Blokové přepínání osových světel TWY
Obrázek	4.1	Příklady kolizí
Obrázek	4.2	Příklad varování ALARM
Obrázek	4.3	Výstražná tabulka na monitoru řídicího
Obrázek	4.4	Příklad varování systémem CMAC
Obrázek	4.5	Zobrazení informací ASDE-X v denní a noční verzi
Obrázek	4.6	Ikony cílů na obrazovce ASDE-X
Obrázek	4.7	Vzdálenost pro varování před kolizí systémem TCAS/ACAS
Obrázek	4.8	Umístění systému AsCAD
Tabulka	3.1	Pásma radarů
Tabulka	3.2	Charakteristiky SMR
Tabulka	3.3	Výkony multilateračního systému
Tabulka	3.4	Kmitočtová pásma GPS
Tabulka	3.5	Podrámce navigační zprávy GPS
Tabulka	4.1	Druhy povolení, která mohou vyvolat upozornění systémem CATC
Tabulka	5.1	Srovnání potřebného vybavení a poskytovaných informací
Tabulka	5.2	Porovnání výkonů přehledových systémů
Tabulka	5.3	Srovnání nákladů na přehledové systémy