

Lennunduse sidesüsteemid ja tema eripärad

Raadioamatöörade ühingu talvepäev 2025

Toomas Ruuben/Mati Tarlap



Teemad

1. Lennunduse telekommunikatsiooni süsteemid
2. VHF (VDL, ACARS, CPDLC)
3. HF
4. SATCOM

Kontaktinfo

Toomas Ruuben

Side- ja navigatsioonisüsteemide teadur, PhD

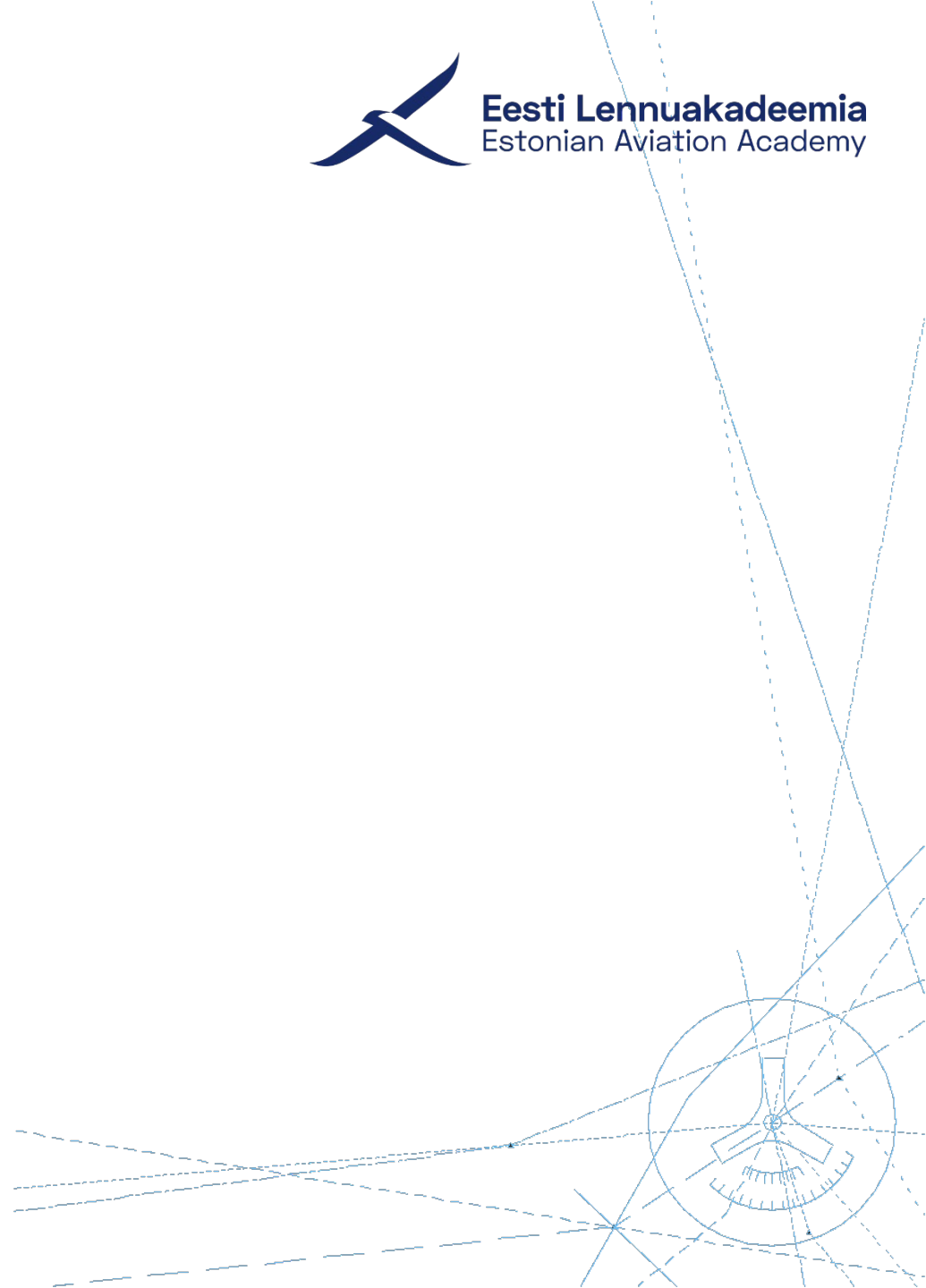
Eesti Lennuakadeemia

E-post: toomas.ruuben@eava.ee

Ruum: C-111



Eesti Lennuakadeemia
Estonian Aviation Academy



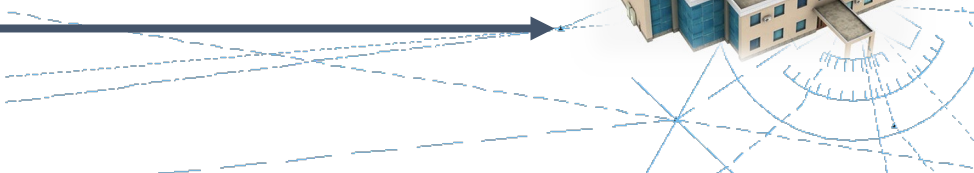
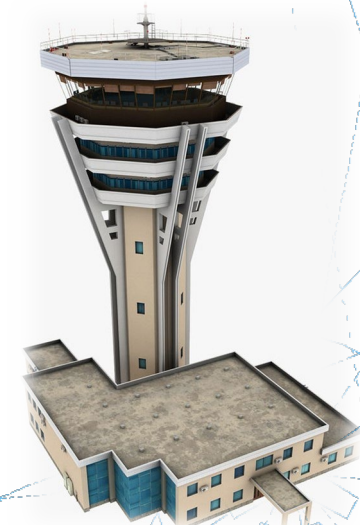
Lennunduse telekommunikatsiooni teenused



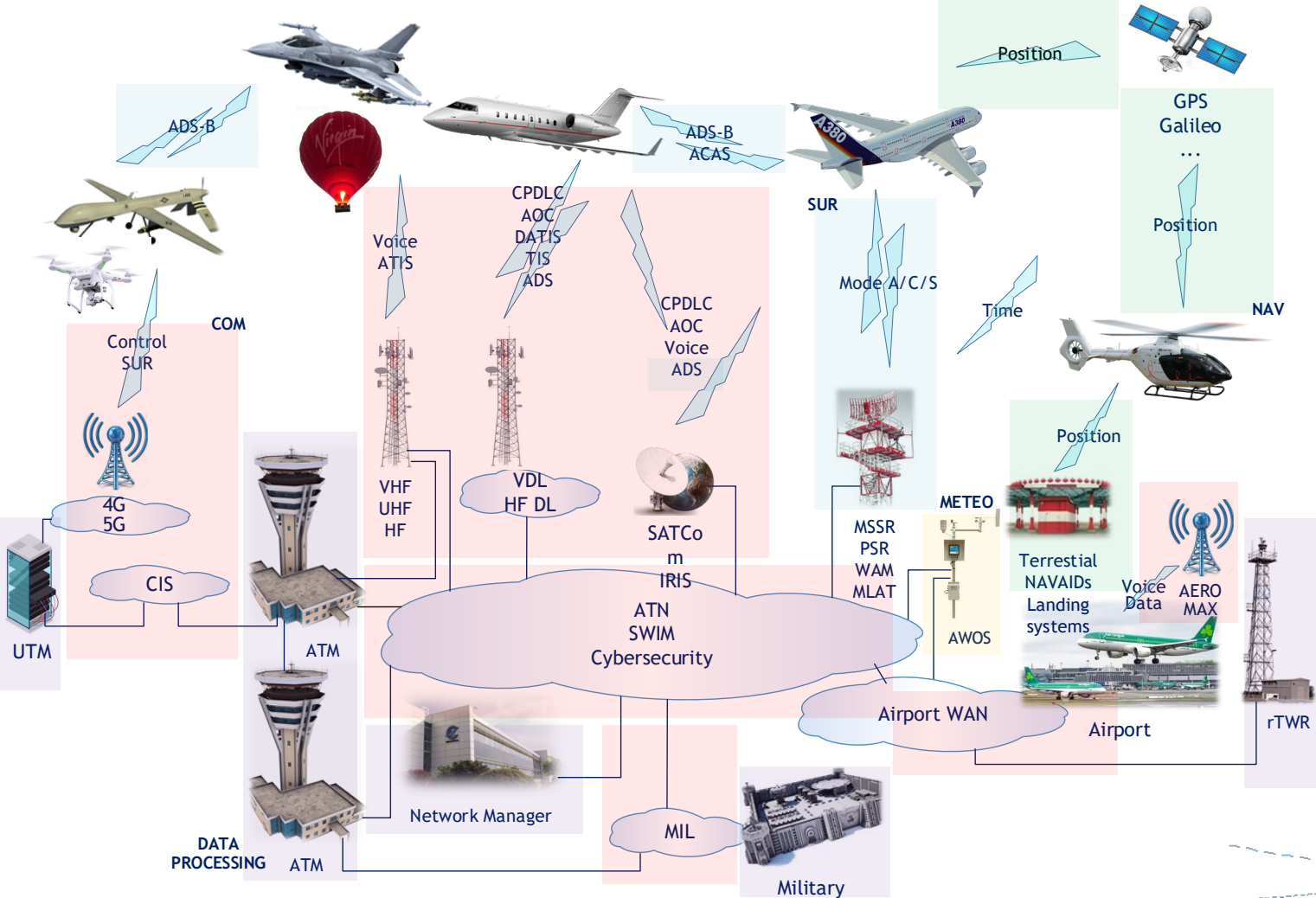
Aeronavigatsiooniline mobiilteenindus
(Aeronautical Mobile Service)
A-G; A-A; G-A kõne ja andmed

Lennuliikluse raadioüldsade
(Aeronautical Broadcasting Service)
A-G; kõne ja andmed

Aeronavigatsiooniline fikseeritud teenindus
(Aeronautical Fixed Service)
G-G kõne ja andmed



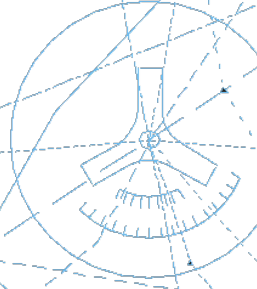
CNS infrastruktuur



AI - Artificial Intelligence



U-Space (UTM+ATM)
ATC Virtual Centre

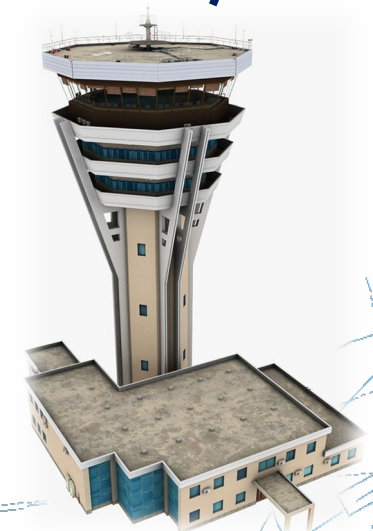


Lennuliikluse raadioüldsaaade (*aeronautical broadcasting service*)

- **ATIS** lennupälja automaatinfoteenindus
 - Voice-ATIS
 - D-ATIS (Ilmateated, ka NOTAM-id, vabad maandumisrajad jne.)
- **VOLMET** (otsetõlge prantsuse keelest lennuilm, täpsem teave)
 - õhus olevale õhusõidukile edastatav meteoroloogiateave
 - TAF - Terminal Area Forecast
 - SIGMET - Significant Meteorological Information
 - METAR- Meteorological Terminal Air Report (Ilmateabe edastamise formaat)

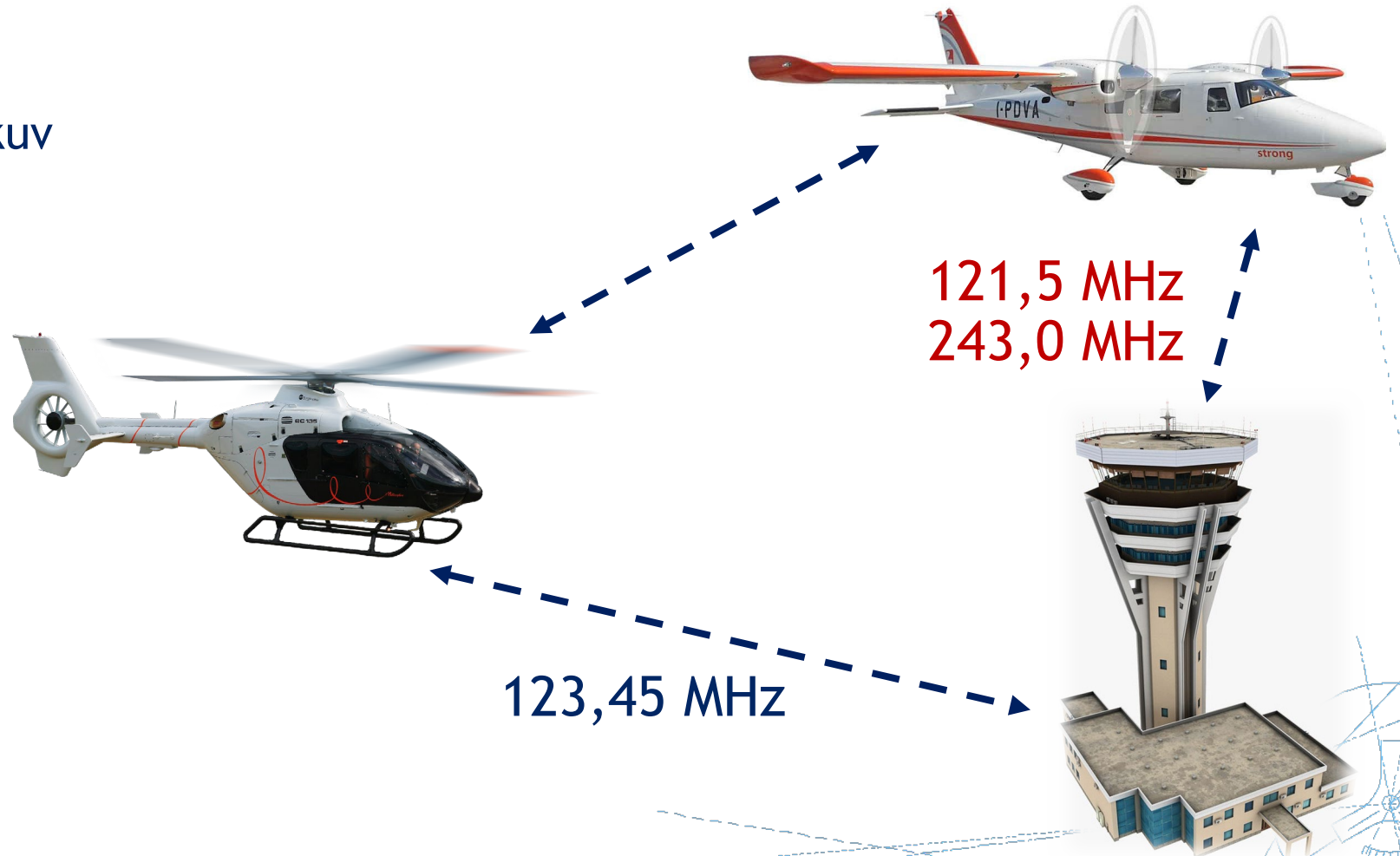


Frankfurt ATIS
118,025 MHz



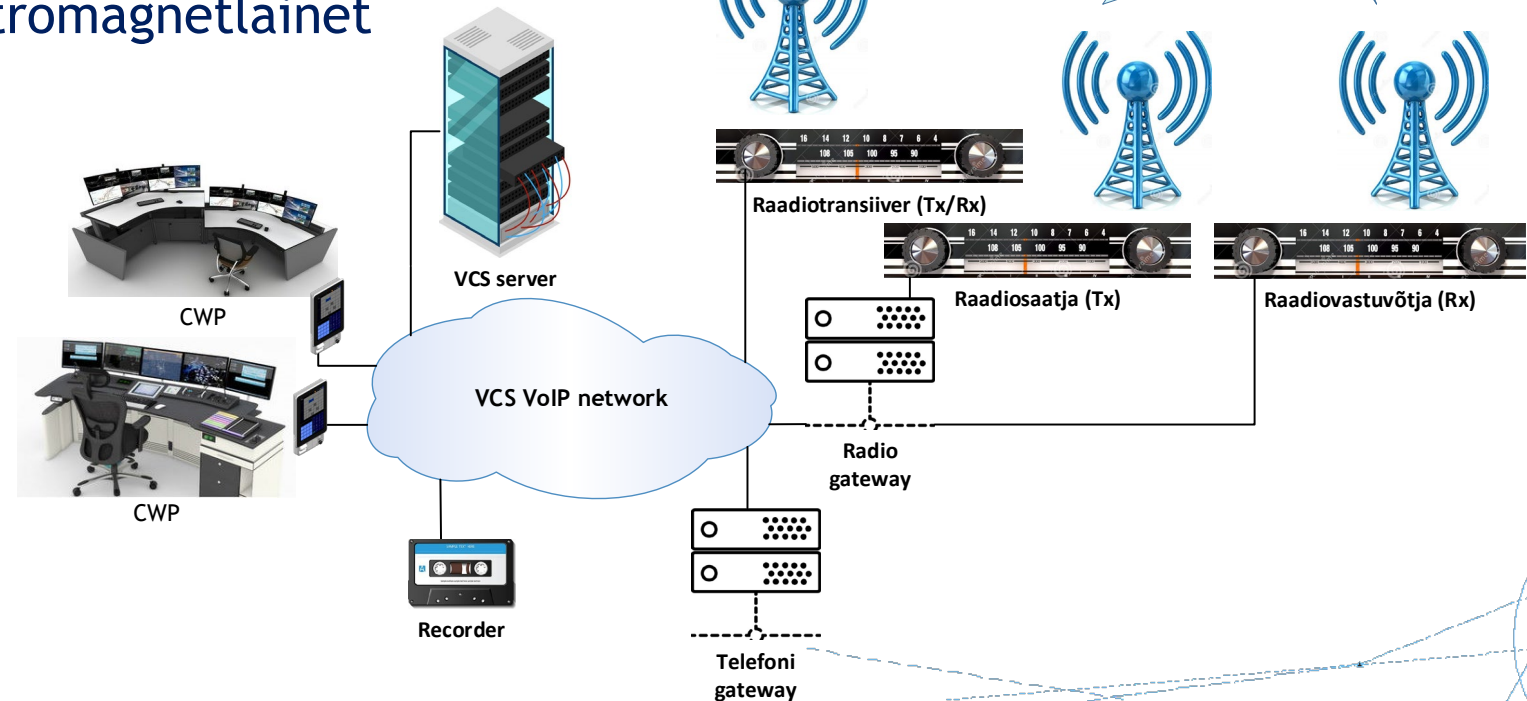
Aeronavigatsiooniline mobiilteenindus (*aeronautical mobile service*)

- Vähemalt üks punkt liikuv
- kõne ja andmed



Raadiosideteenus

- Informatsiooni edastamise eesmärgil ühenduse loomine ja signaalide edastamine, milles kasutatakse informatsiooni kandjana avatud keskkonnas levivat elektromagnetlainet



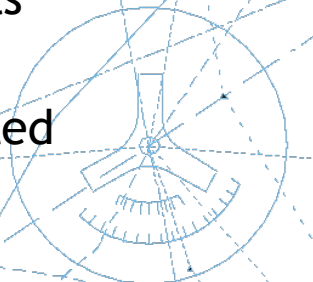
Lühendid ja mõisteid 1/3

- **NDB**- Non-Directional Beacon. Radio beacons are radio transmitters at a known location.
- **Marker beacon** is a particular type of VHF radio beacon used in aviation, usually in conjunction with an instrument landing system (ILS).
- **EPIRB** - Emergency Position-Indicating Radiobeacon. Activated by water when the beacon is out of the bracket or manually by the ON switch on the EPIRB.
- **ELT** - Emergency Locator Transmitter. Activated by G-switch (crash sensor) or manually by cockpit remote switch or ON switch on ELT.
- **LDACS** - L-band digital aeronautical communication system.
- **MTSAT** - Multifunctional Transport Satellites were a series of weather and aviation control satellites.
- **AeroMACS** - Aeronautical Mobile Airport Communication System is a wireless broadband technology that supports the increasing need for data communications and information sharing on the airport surface for both fixed and mobile applications.
- **UAS** - Unmanned Aerial System
- **VOR** - The Very High Frequency Omni-Directional Range is a ground-based electronic system that provides azimuth information for high and low altitude routes and airport approaches.



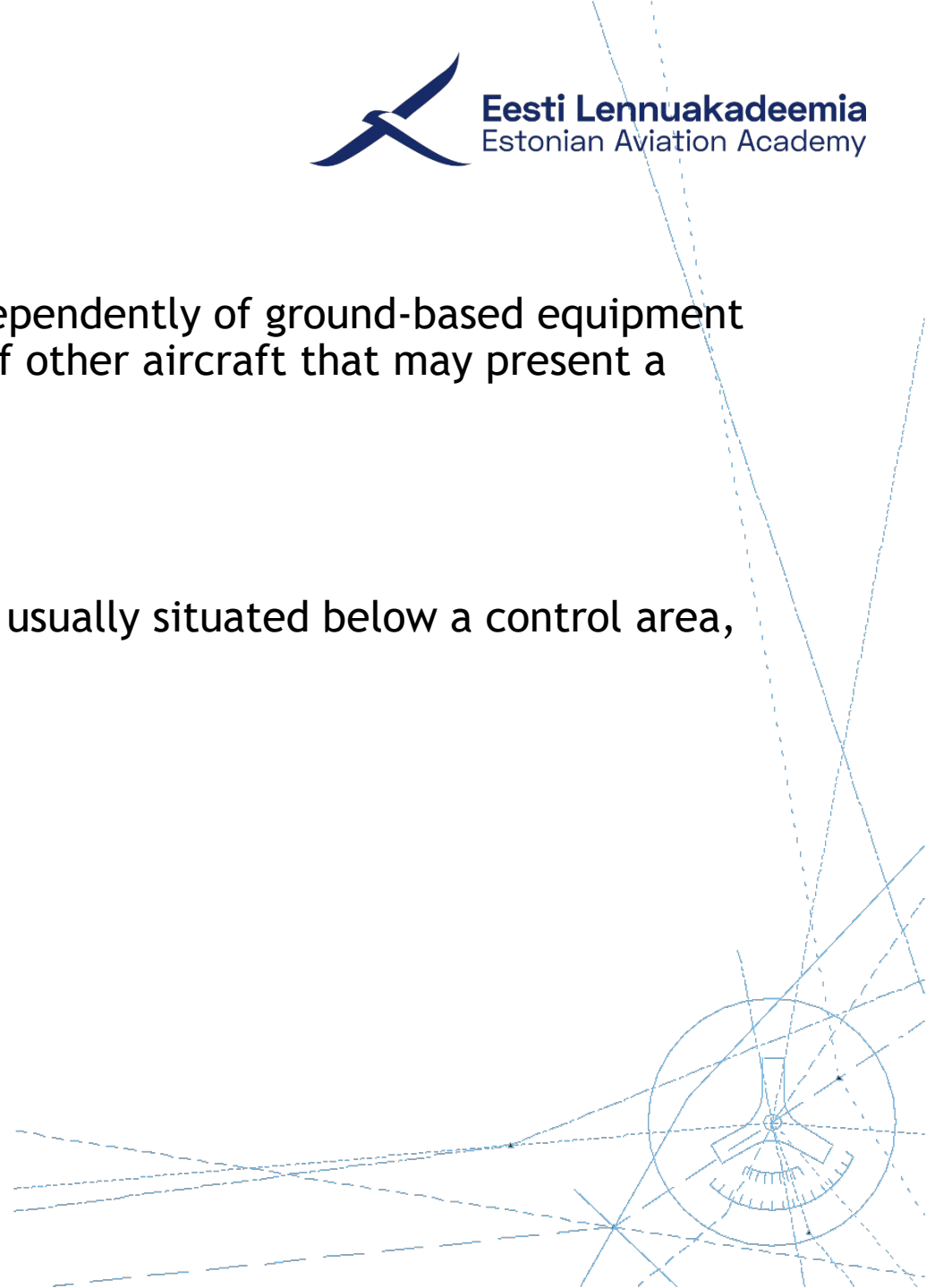
Lühendid ja mõisteid 2/3

- **GBAS** - Ground Based Augmentation System is one which provides differential corrections and integrity monitoring of Global Navigation Satellite Systems data using as input data either three or four GNSS satellite signals received at three of four antenna.
- **Glide Path** - A system of vertical guidance embodied in the instrument landing system which indicates the vertical deviation of the aircraft from its optimum path.
- **DME** - Distance Measuring Equipment (DME) is defined as a navigation beacon, usually coupled with a VOR beacon, to enable aircraft to measure their position relative to that beacon. Aircraft send out a signal which is sent back after a fixed delay by the DME ground equipment.
- **MLS**- Microwave Landing System is an all-weather, precision radio guidance system intended to be installed at large airports to assist aircraft in landing, including 'blind landings'.
- **SSR** - Secondary surveillance radar.
- **PSR** - Primary Surveillance Radar is a conventional radar sensor that illuminates a large portion of space with an electromagnetic wave and receives back the reflected waves from targets within that space.
- **ASDE** - Airport Surface Detection Equipment Model 3 (ASDE-3) radar that provides automated aural alerts to potential runway incursions and other hazards.
- **VDL** - Very High Frequency Data Link

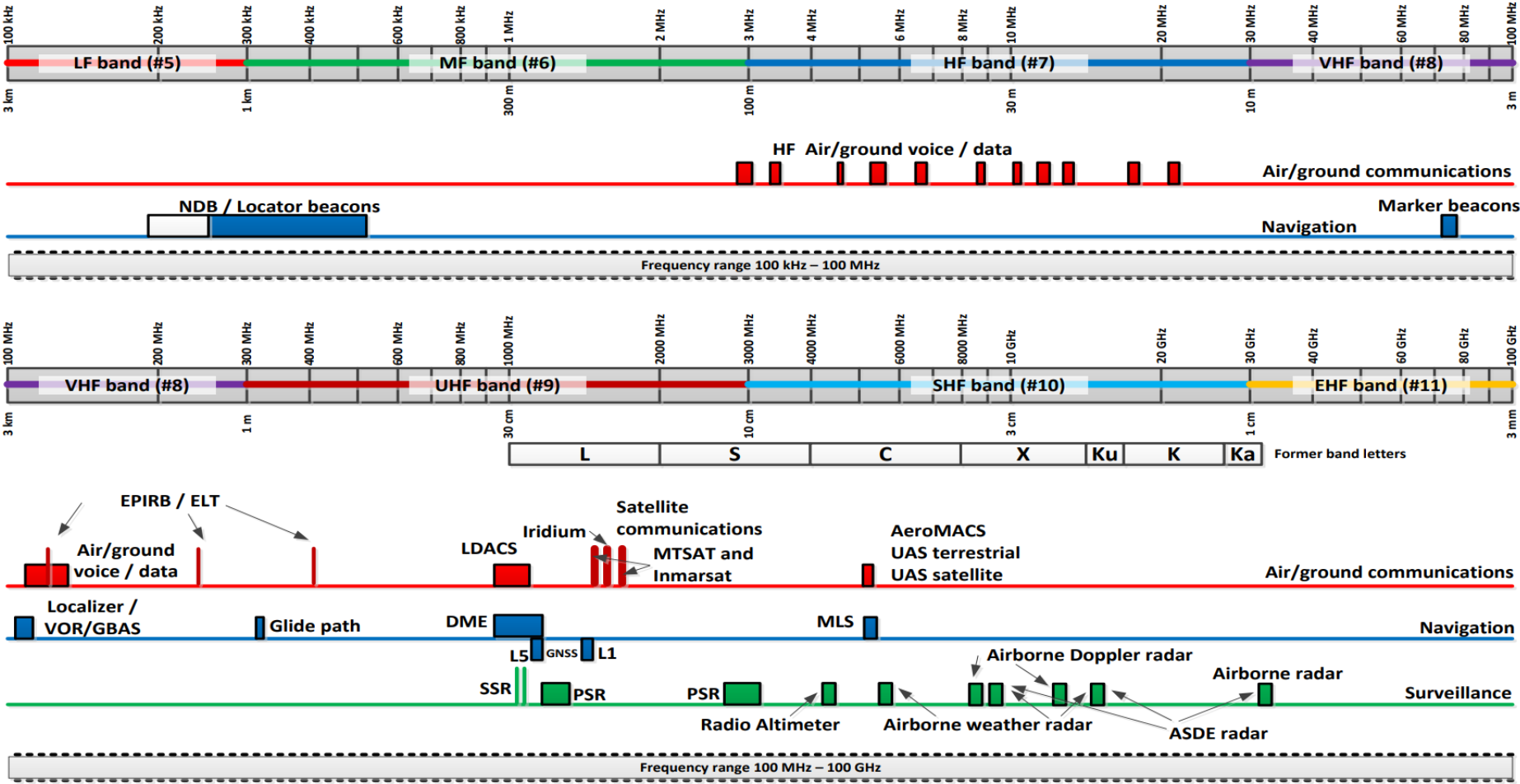


Lühendid ja mõisteid 3/3

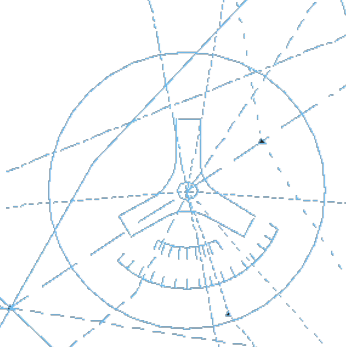
- ACAS - Airborne Collision Avoidance System operates independently of ground-based equipment and air traffic control in warning pilots of the presence of other aircraft that may present a threat of collision.
- ADSP - Aeronautical Data Service Providers.
- ACC - Area Control Center.
- CTR - Control Area, it is a volume of controlled airspace, usually situated below a control area, normally around an airport.
- CWP - Controller Working Position.
- eAIP - The electronic aeronautical information package.
- ATIS - Automatic terminal information service.
- AVBL - Available in Aviation terms.
- APP - Approach control office



Lennunduse raadiosageduste sagedusvahemikud



Notes:
 Drawing not to scale
 Not all Regional or sub-Regional allocations are shown
 Band identification (e.g. VHF) and band # per Radio Regulations
 The satellite communication bands used by MTSAT and Inmarsat are not allocated to the Aeronautical Mobile Satellite (R) Service



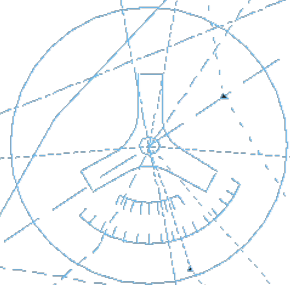
Lennunduse raadioside põhiliigid

- **Lennuliikluse VHF side** (ATC - Air Traffic Control). Kasutatakse lennujuhtimiskeskuste, tornijuhtimisteenuste ja pilootide vaheliseks sideks.
 - Sagedusvahemik: 118-136.975 MHz
 - Kanalisamm: 8.33 või 25 kHz (Euroopas põhiliselt 8.33 kHz)
- **HF** (High Frequency) raadioside. Kasutatakse peamiselt ookeanilendudel ja piirkondades, kus VHF - raadioside pole kättesaadav.
 - Sagedusvahemik: 2.8-22 MHz, jagatud tsoonideks
- **SATCOM** (satelliitside). Kasutatakse pikamaalendudel, kus puudub HF või VHF levi
 - Sagedusvahemik: L -, Ku- ja Ka bänd.



VHF

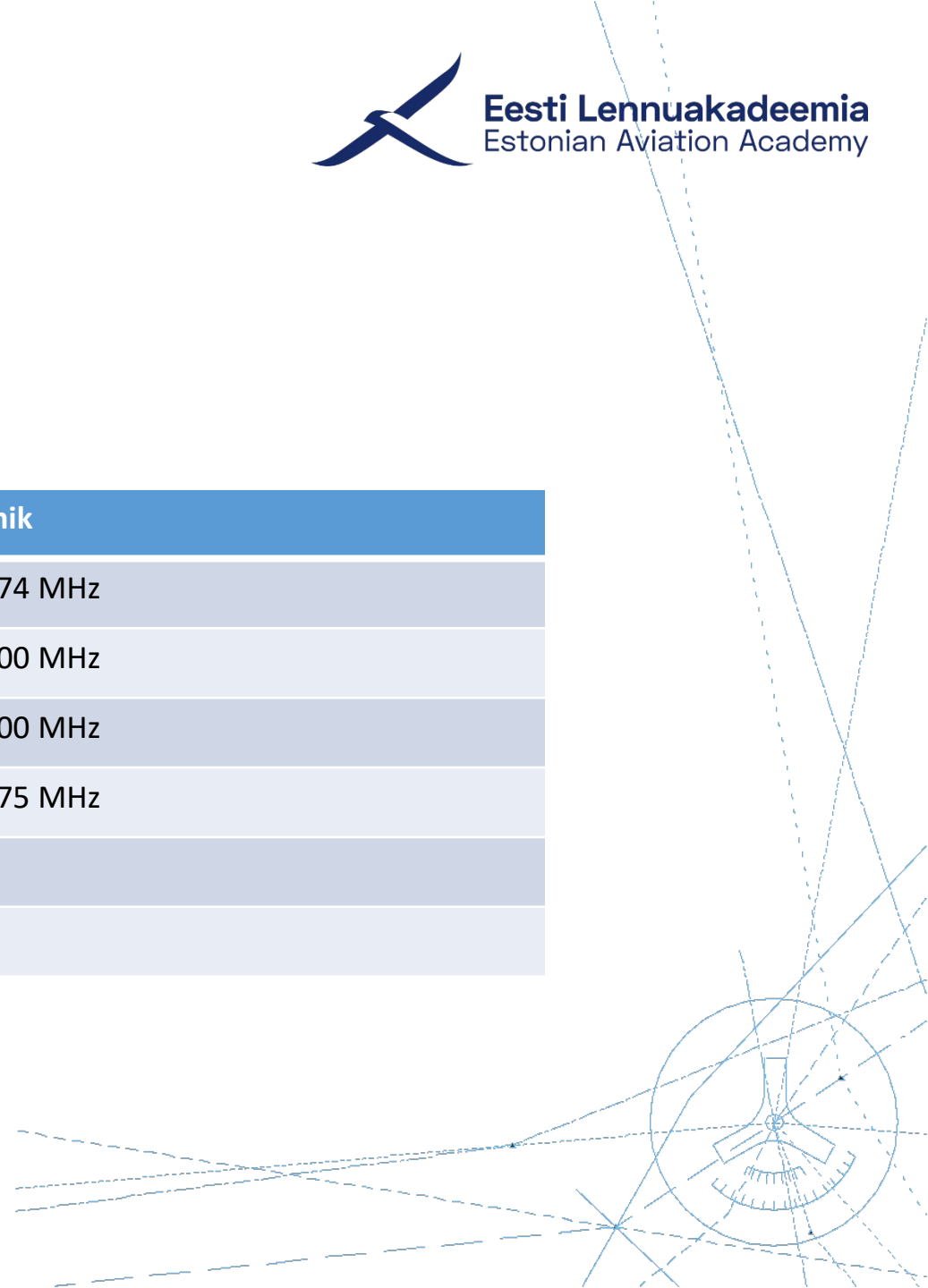
- Levib otsenähtavuse piires (200-460 km lennukite korral sõltuvalt)
- Modulatsioon: Topeltküljalaga amplituudmodulatsioon (AM-DSB) või digitaalne.
- **Miks AM endiselt kasutusel:**
 - Kui mitu pilooti räägivad korraga, on mõlemad signaalid korraga kuuldavad. FM korral jääks domineerima tugevam signaal ja nõrgemad kaoksid mis võib tähendada ohtu.
 - Töökindlus ja lihtsus.
 - Parem töökindlus pika vahemaa ja halva levi korral. AM jääb kuuldavaks ka nõrga signaali korral kuid FM ja digitaalside võib täielikult kaduda.
 - Rahvusvaheliselt standardiseeritud rahvusvahelise tsiviillennunduse organisatsiooni ICAO poolt.
- **VHF sidet kasutatakse:**
 - Stardi, maandumise ja ruleerimise juhendamiseks.
 - Lennujaama lähedal saabuvate ja lahkuvate lennukite suunamiseks.
 - Piirkondlikuks lennujuhtimiseks suurematel kõrgustel väljaspool lennujaama alasid.
 - Lennufirmade sisemine side, meeskonnad, hoolduspersonal küstuse ja pagasiinfo
 - Automaatne lennujaama ilmateate ja operatiivinfo edasamine ATIS.
 - Andmeside süsteem ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System)



VHF

- Sageduste jaotus lennunduse VHF süsteemis.

Funktsioon	Sagedusvahemik
Lennujuhtimise side (ATC)	118.000-136.974 MHz
Lennufirmade ja hooldusmeeskondade side	128.825-132.000 MHz
ATIS (ilma- ja lennujaama info)	118.000-136.000 MHz
ACARS (andmeside)	129.125-136.975 MHz
Hädaabisagedus (Guard)	121.500 MHz
Otsingu ja päästeteenused (SAR)	123,100 MHz



Digitaalne side: ACARS

- **ACARS** (Aircraft Communications Addressing and Reporting System)
- ACARS on digitaalne andmesidesüsteem mida kasutatakse lennukite ja maapealsete süsteemide vaheliseks tekstipõhiseks suhtluseks
 - Lennuoperatiivsed teated (saabumise aeg, pagasiinfo, kütuseandmed).
 - Tehnilised ja hooldusraportid (veateated, hooldusvajadused).
 - Meteroloogiline info.
- ACARS töötab kõigi eelpooltoodud raadioside tehnoloogiate kaudu (VHS, HF, SATCOM)
- Näide ACARS sõnumist
 - ETA EKCH 1425Z - Saabumine Kopenhaagenisse kell 14:25 UTC
 - FOB 7800 KG - Pardal on 7800 kg kütust
 - REQ 2500 KG FUEL -Vajatakse lisaks 2500 kg kütust

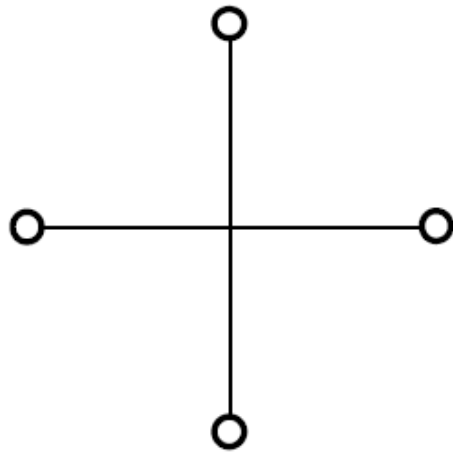


Digitaalne side: CPDLC

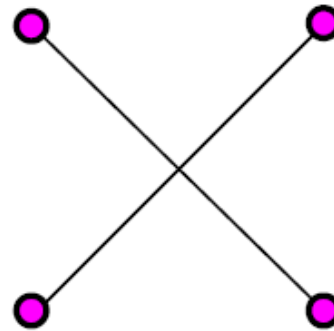
- **CPDLC** (**C**ontroller-**P**ilot **D**ata **L**ink **C**ommunication) on digitaalne kommunikatsioonisüsteem mis võimaldab lennujuhtidel ja pilootidel suhelda tekstipõhiste sõnumitega. On alternatiiviks VHF või HF häälsidele lennujuhtimiskeskuse ja piloodi vahel.
- Vähendab raadioside koormust.
- Vähendab vigade riski.
- Töötab ka väljaspool VHF leviala.
- Kasutab VHF Data Link (VDL Mode 2) sidesüsteemi või sattelliitsidet (SATCOM).
- Sõnumid liiguvad läbi ACARS võrgu. Näited standardiseeritud tekstidest:
 - „Climb to FL350,, - Tõuse lennutasandile FL350;
 - „Turn left heading 270“ - Pööra vasakule kurss 270;
 - „Wilco“ - Piloodi vastussõnum - teostan operatsiooni.
- **VDL** (**V**H**F** **D**ata **L**ink) **Mode 2** on levinuim digitaalne andmeside süsteem mis kasutab 31.5 kbits kiirusega digitaalset modulatsiooni. Toetab APDLC ja ACARS sideprotokolle.
- Modulatsioonitüüp D8PSK (Differential 8 Phase Shift Keying) Ka25 kHz

Digitaalsed modulatsioonid

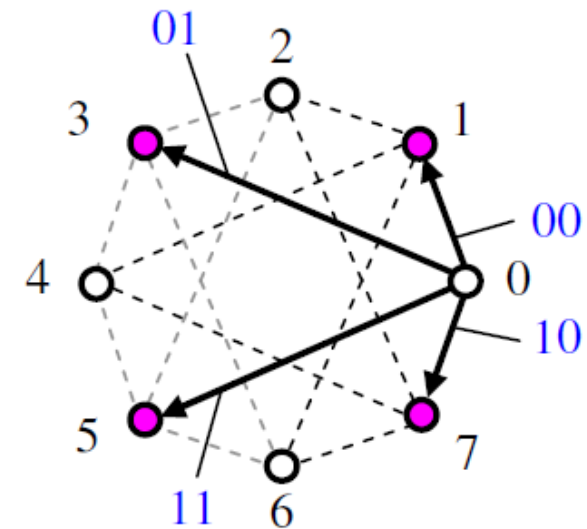
- **DQPSK** - *Differential Quadrature Phase-Shift Keying*, diferentsiaalne kvadratuurne faasimanipulatsioon



QPSK I



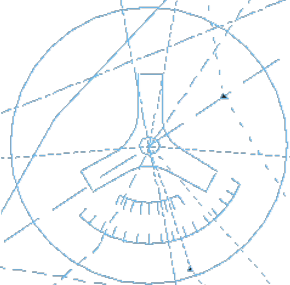
QPSK II



$\pi/4$ QPSK

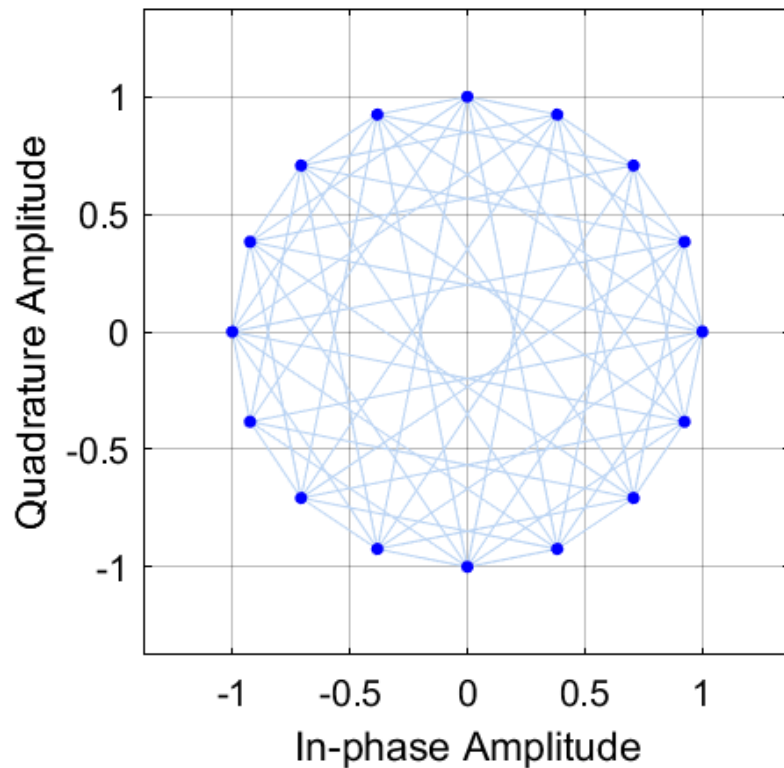
Sisendsignaali dibitile vastavad **faasi muutused** on järgmised:

$$00 : \Delta\varphi = 45^{\circ} \quad 01 : \Delta\varphi = 135^{\circ} \quad 11 : \Delta\varphi = -135^{\circ} \quad 10 : \Delta\varphi = -45^{\circ}$$

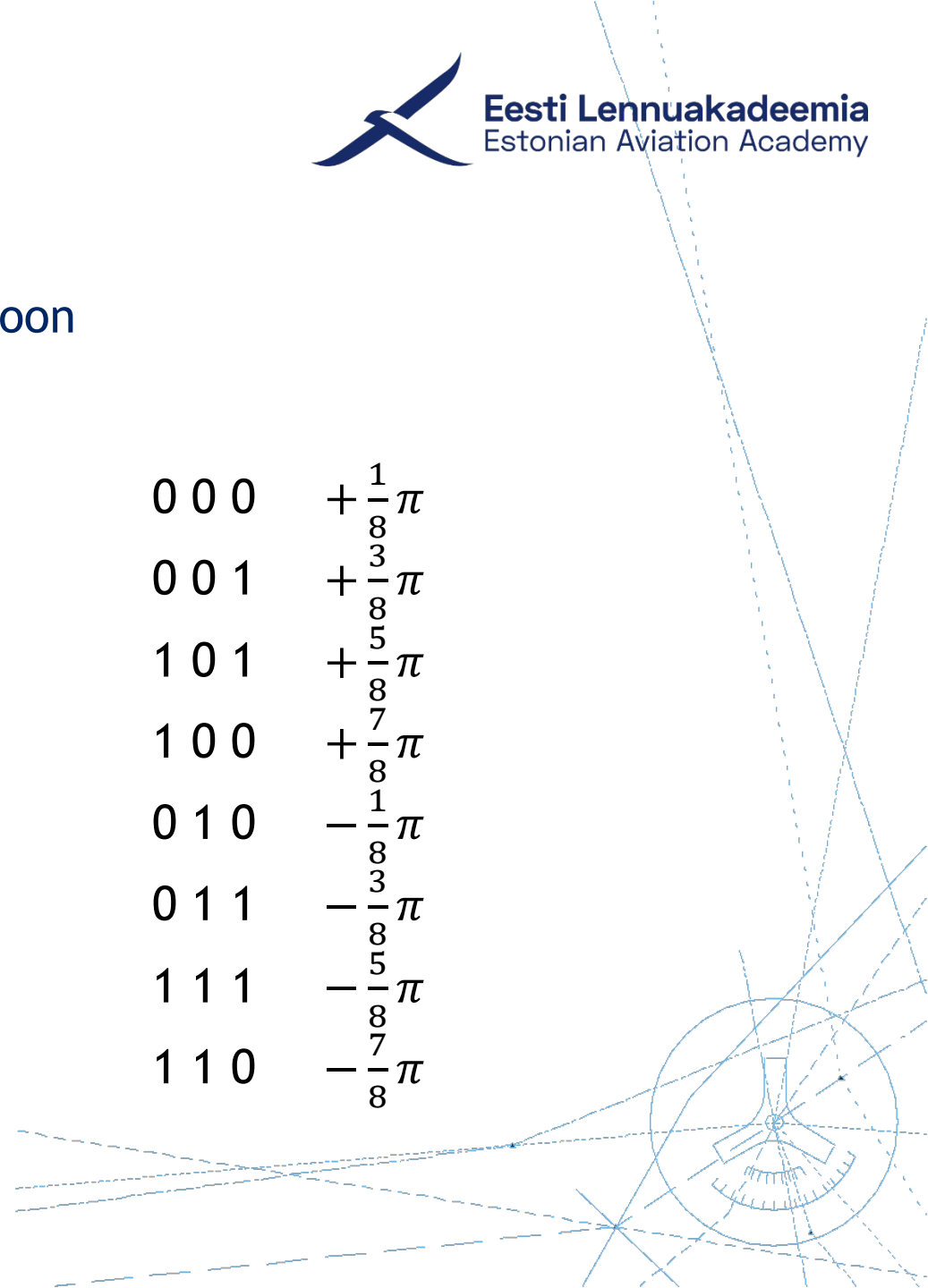


Digitaalsed modulatsioonid

- **D8PSK** - 8-faasiline diferentsiaalne faasimanipulatsioon



0 0 0	$+\frac{1}{8}\pi$
0 0 1	$+\frac{3}{8}\pi$
1 0 1	$+\frac{5}{8}\pi$
1 0 0	$+\frac{7}{8}\pi$
0 1 0	$-\frac{1}{8}\pi$
0 1 1	$-\frac{3}{8}\pi$
1 1 1	$-\frac{5}{8}\pi$
1 1 0	$-\frac{7}{8}\pi$



Otsenähtavus (raadiorisont)

(Line of Radio Sight (LOS), Radio Horizon)



h_{RX}

D_{RH}

$$D_{RH} = 1,23(\sqrt{h_{TX}} + \sqrt{h_{RX}})$$

D_{RH} [NM]

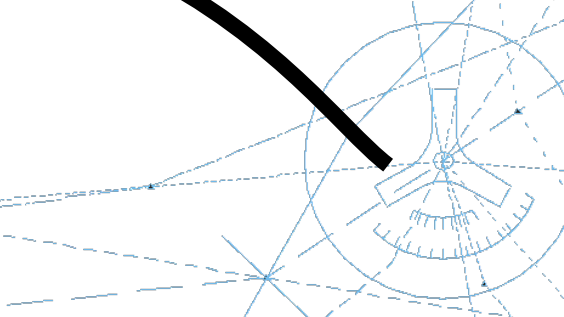
h_{TX} ja h_{RX} [feet]



Radio horizon calculations						CONVERSIONS			
dRH [NM]	dRH [km]	hTX [m]	hTX [feet]	hRX [m]	hRX [feet]	m to NM		m to ft	
33.4	61.9	25	82	100	328.1	1000	0.54	1	3.28
61.0	112.9	25	82	500	1640.4				
81.6	151.1	25	82	1000	3280.8				
168.7	312.4	25	82	5000	16404.2				
229.4	424.9	25	82	9600	31496.1				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				
0.000	0.000		0.000		0.000				

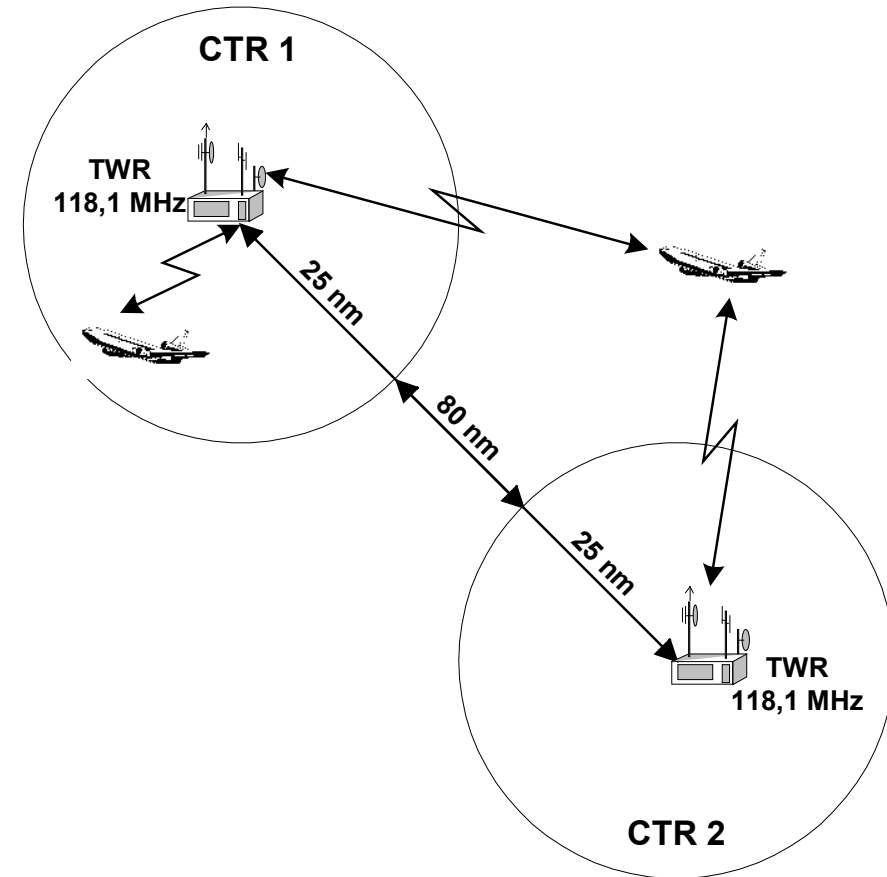


VHF / UHF
1 NM = 1,852 km
1 feet = 0,3048 m



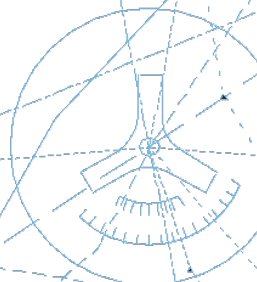
Sageduste geograafiline eraldatus

- Nii kaua kuni lennukid jäävad CTR alasse, on sageduste geograafiline eraldatus tagatud.
- Tihti toimub raadioside aga enne alasse sisenemist ja seetõttu toimub vastuvõtt mõlemas lennujaamas ja tulemuseks on lennujaama B töö häirimine
- Kaitseala suurus sõltub sektorite tüübist (kui kõrgel õhusõidukid lendavad)



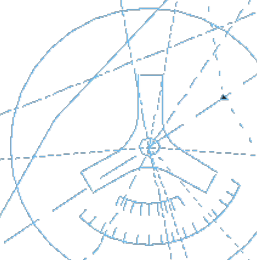
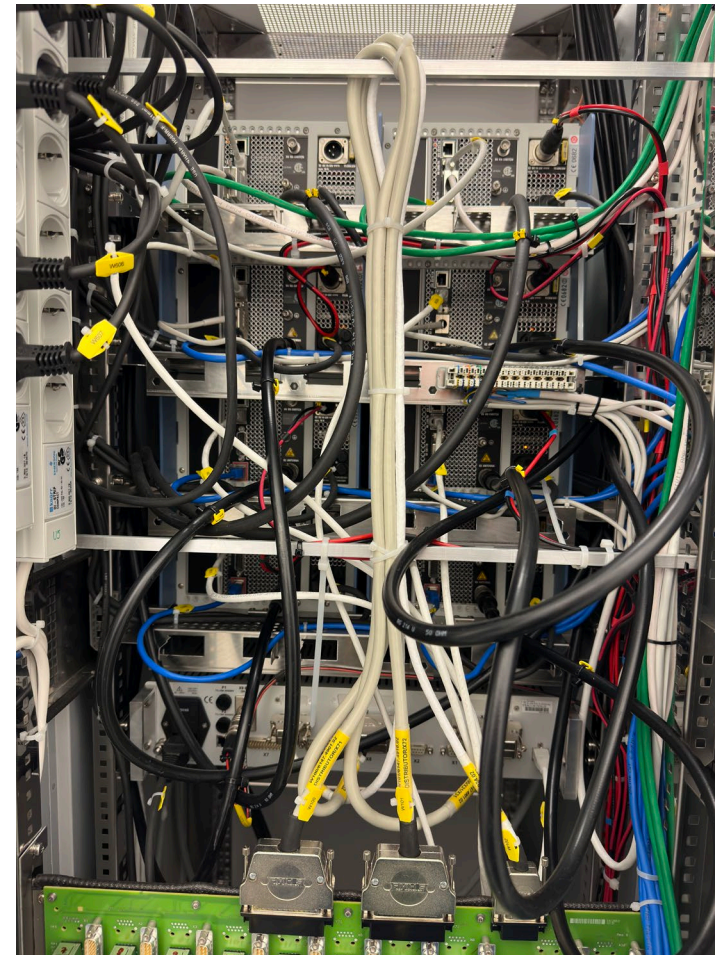
VHF radioseadmed

- Lennuki parda raadiod. Allikas: Max Kingsley-Jones/FlightGlobal



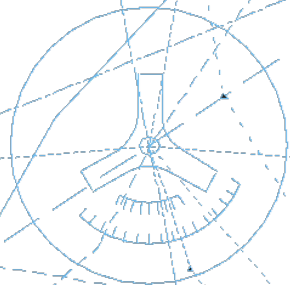
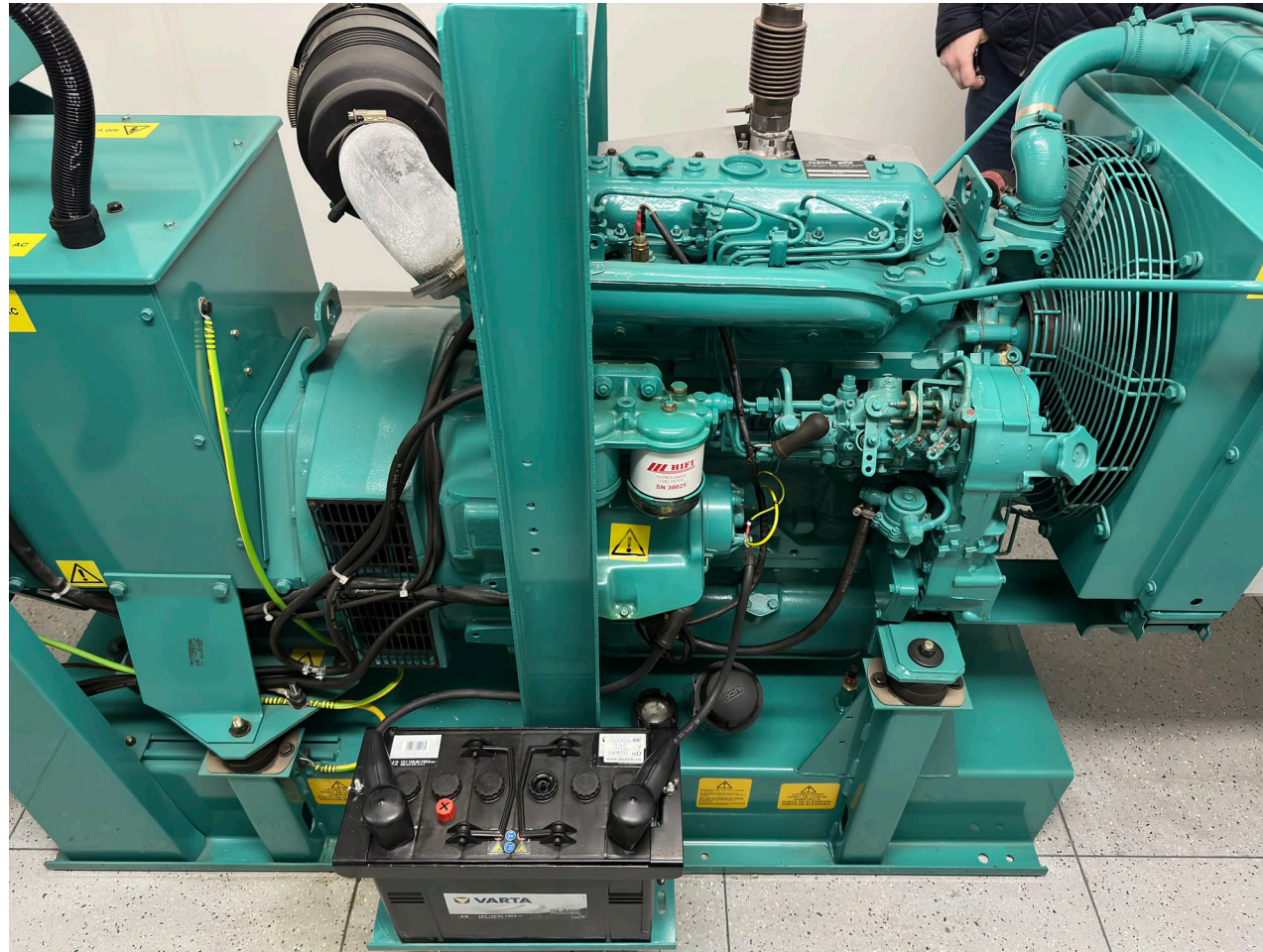
VHF raadioseadmed

- > VHF Raadiosaatjad Peetri saatekeskuses



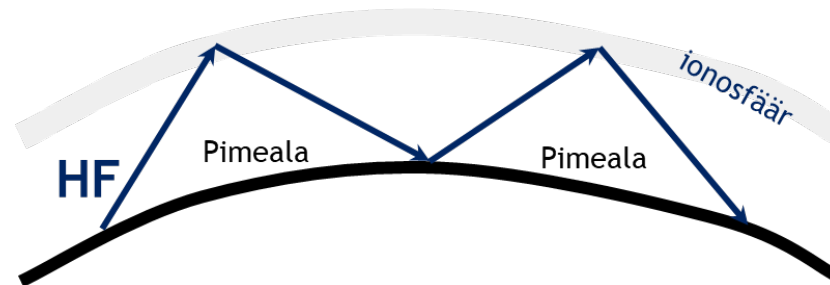
Ülikõrgsagedusallas (VHF) lennundusside (*very high frequency*)

- > Varutoide Peetri saatekeskuses



HF

- Lennunduses kasutatavad sagedused on määratud regioonide, mitte riikide tasandil ITU poolt (SSB modulatsioon).
- Kasutusel ookeanide ja polaarlendude sides.
- Kasutatakse lennujuhtimiskeskustega (ATC) suhtlemisel North Atlantic Track System (NATS) piirkonnas ning Aafrika ja Vaikse ookeani lendudel.
- Varuside hädaolukordade tarbeks kui VHF või satelliitside puudub.

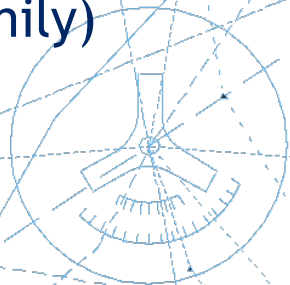


- Kasutusel tavaliselt SELCAL (Selective Calling System). See võimaldab lennujuhil kutsuda konkreetset lennukit, ilma et piloot peaks pievalt raadiot jälgima.
- Kutsung koosneb neljast erineva sagedusega signaalist, mis edastatakse maapealse saatja poolt 2 sek jooksul. SELCAL kood lisatakse lennuplaani.



MWARA

- Lennunduse HF side korraldamiseks on kasutusel rahvusvaheline kõrgsageduslik raadiosidevõrk **MWARA** (Major World Air Route Areas).
- MWARA jaguneb geograafilisteks tsoonideks millest igaüks teenindab kindlat lennuala.
- HF-sagedused nendes tsoonides varieeruvad sõltuvalt ajast ja ionosfääri tingimustest.
- Peamised MWARA sagedused ja tsoonid:
 - Põhja atlandi tsoon (North Atlantic - NAT) : 2,3,5,8,11,13 MHz
 - Vaikse ookeani tsoon (Pacific - PAC): 3,5,8,11,13,18 MHz
 - Lõuna-Atlandi tsoon (South Atlantic - SAT): 3,5,8,11 13 MHz
 - Arktika tsoon (Arctic - ARC): 3,5,7,11 Mhz
- Piloodid saavad hää- või tekstipõhiseid sõnumeid vastvatele lennujuhtimis keskustele (Shanwick, Gander, New York, San Francisco)
- Põhja atlandi (NAT) piirkonnas on kasutusel HF raadiosageduste rühmad (NAT Family) mida kasutatakse MWARA süsteemi raames.
- Nende rühmade kasutamine võimaldab paremini HF sagedusi hallata ja neid kasutatakse vastavalt kellaajale ja atmosfääri tingimustele.



NAT raadiosageduste rühmad

- NAT Family A - 2899,5616,8864,13291,17946 kHz
- NAT Family B - 2962,5649,8879,13306,17946 kHz
- NAT Family C - 3016,5598,8906,13291,17946 kHz
- NAT Family D - 2866,5616,8879,13306,17946 kHz
- Neid sagedusi kasutavad lennujuhtimiskeskused:
 - Shanvik (UK),
 - Gander (Kanada),
 - New York (USA),
 - Santa Maria (Portugal),
 - Reykjavik (Island)
- Piloodid häälestavad raadioside konkreetsele sagedusrühmale mis sõltub nende asukohast ja kellaajast
- Pilootide teateid võtavad vastu ja edastavad lennujuhtimise raadiooperaatorid



NAT radiosageduste rühmad

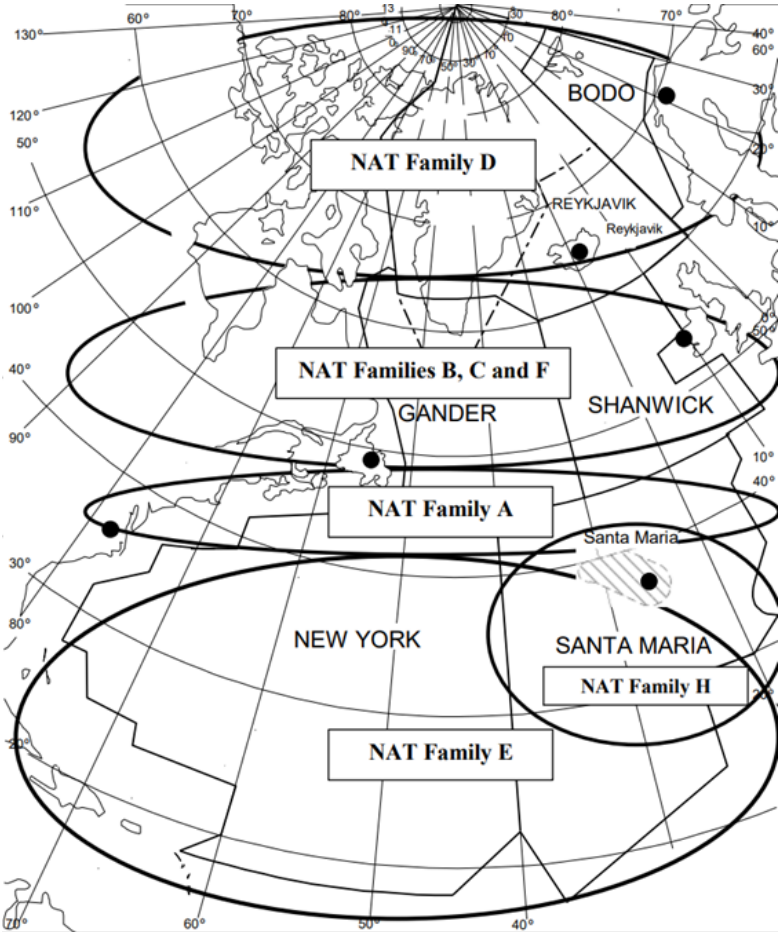
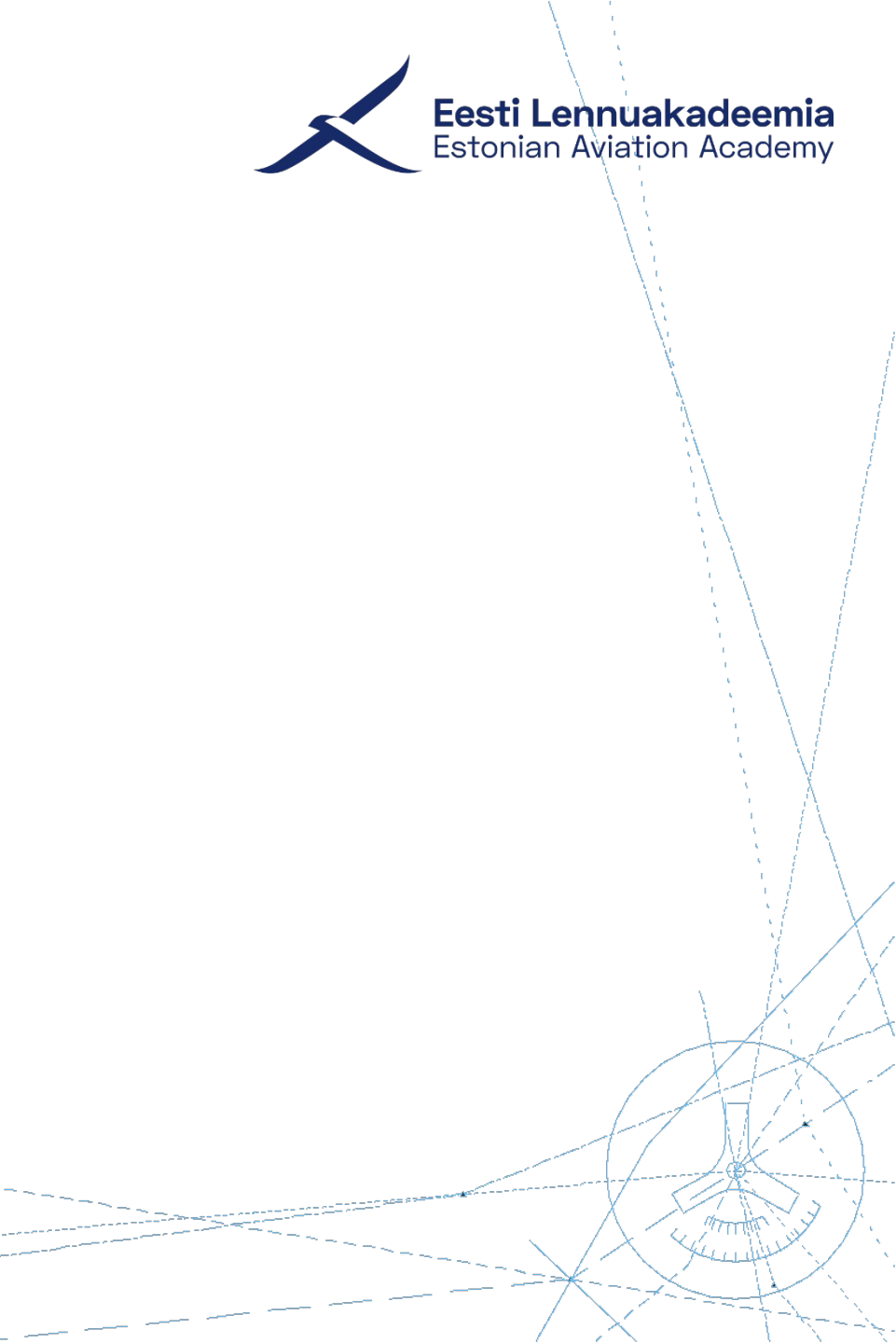
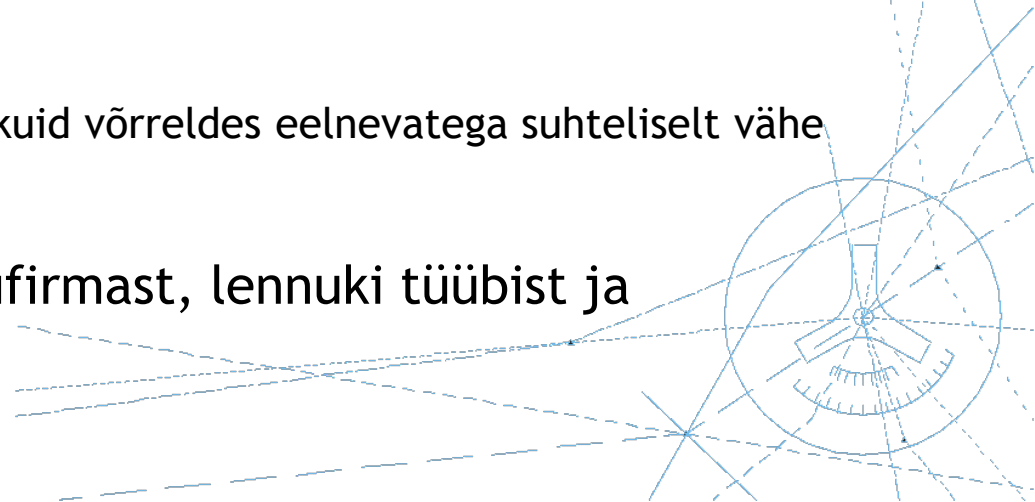


Figure 3 – NAT Family usage areas



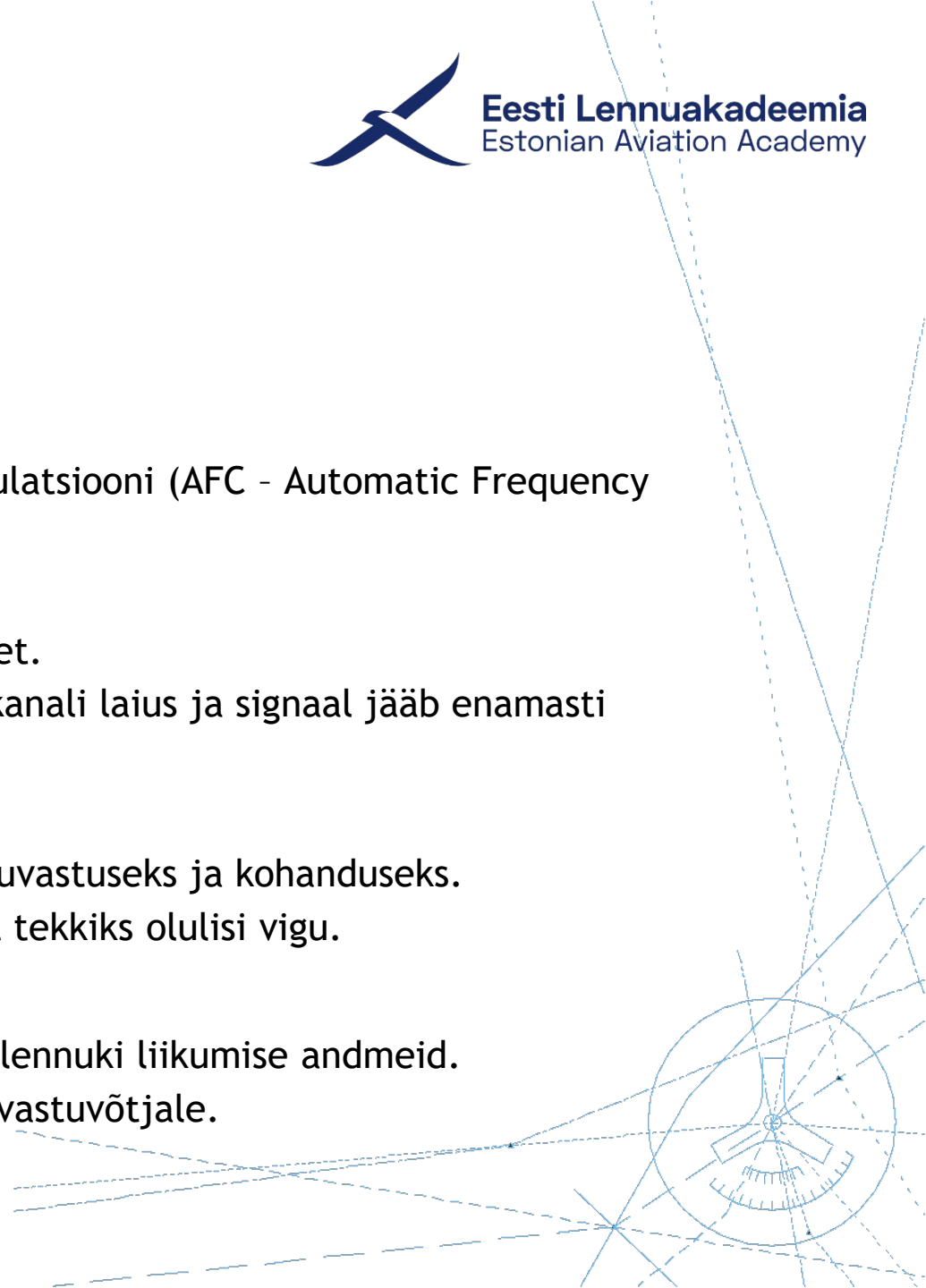
SATCOM

- **L-bänd** (1-2 GHz)
 - Kasutusel mobiilses satelliitsides (MSS), sealhulgas lennunduse kommunikatsioonis.
 - Hää- ja andmeside pilootidele ja lennujuhtimisele Inmarsat ja Iridium satelliitside süsteemide kaudu.
 - Aeronautiline satelliitkommunikatsioon (Aero-Satcom). Pakub ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) teenuseid.
- **Ku-bänd** (12-18 GHz)
 - Satelliitinterneti ja meelelahutussüsteemide pakkumiseks lennukite pardal (Viasat, Panasonic Avionics, Gogo).
- **Ka-bänd** (26.5-40 GHz)
 - Kiire interneti pakkumine lennukitele (Inmarsat GX, Viasat).
- **C-bänd** (4-8 GHz)
 - Kasutatakse mõningates lennunduse kaugside süsteemides kuid võrreldes eelnevatega suhteliselt vähe
- Lennunduse satelliitside teenuste valik sõltub lennufirmast, lennuki tüübist ja geograafilisest asukohast.



Doppleri efekt

- **HF sides:**
 - Doppleri nihe suhteliselt väike (1-5 Hz/s).
 - Toimub aeglane Doppleri kompensatsioon.
 - Kompenseerimiseks kasutatakse automaatset sageduse regulatsiooni (AFC - Automatic Frequency Control)
- **VHF sides:**
 - Doppleri nihe jääb alla 100 Hz ja ei mõjuta oluliselt AM sidet.
 - 25 kHz või 8.33 kHz kanalite korral ei ole nihe suurem kui kanali laius ja signaal jääb enamasti kanalisse.
- **VDL (VHF Data link Mode 2)**
 - Kasutatakse digitaalseid signaalitöötlusalgoritme sagedustuvastuseks ja kohanduseks.
 - D8PSK modulatsioon talub väikeseid sagedusnihkeid ilma et tekkiks olulisi vigu.
- **SATCOM**
 - Toimub Doppleri kompensatsioon lennuki pardal kasutades lennuki liikumise andmeid.
 - Satelliidid arvutavad Dopplero nihet reaajas ja saadavad vastuvõtjale.
 - CDMA ja FDMA tehnoloogiate kasutamine.



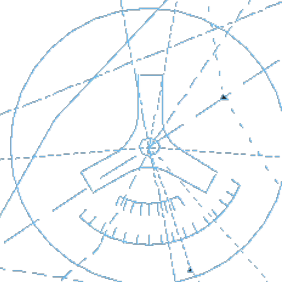
Doppleri efekt

- **Näide:** Leiame Doppleri sagedusnihke suuruse kui lennuk läheneb lennujuhtimistornile kiirusega 300 km/h ja kasutatav sagedus on 130 MHz.
- Antud juhul vastuvõtja kiirus $v_r = 0$ (lennujuhtimistorn on paigal)
- Kuna allikas (lennuk) liigub vastuvõtja suunas siis on allika kiirus v_0 negatiivne ehk:


$$v_0 = -300 \text{ km/h} = -300000 \text{ m/h} = -83.3 \text{ m/s}$$

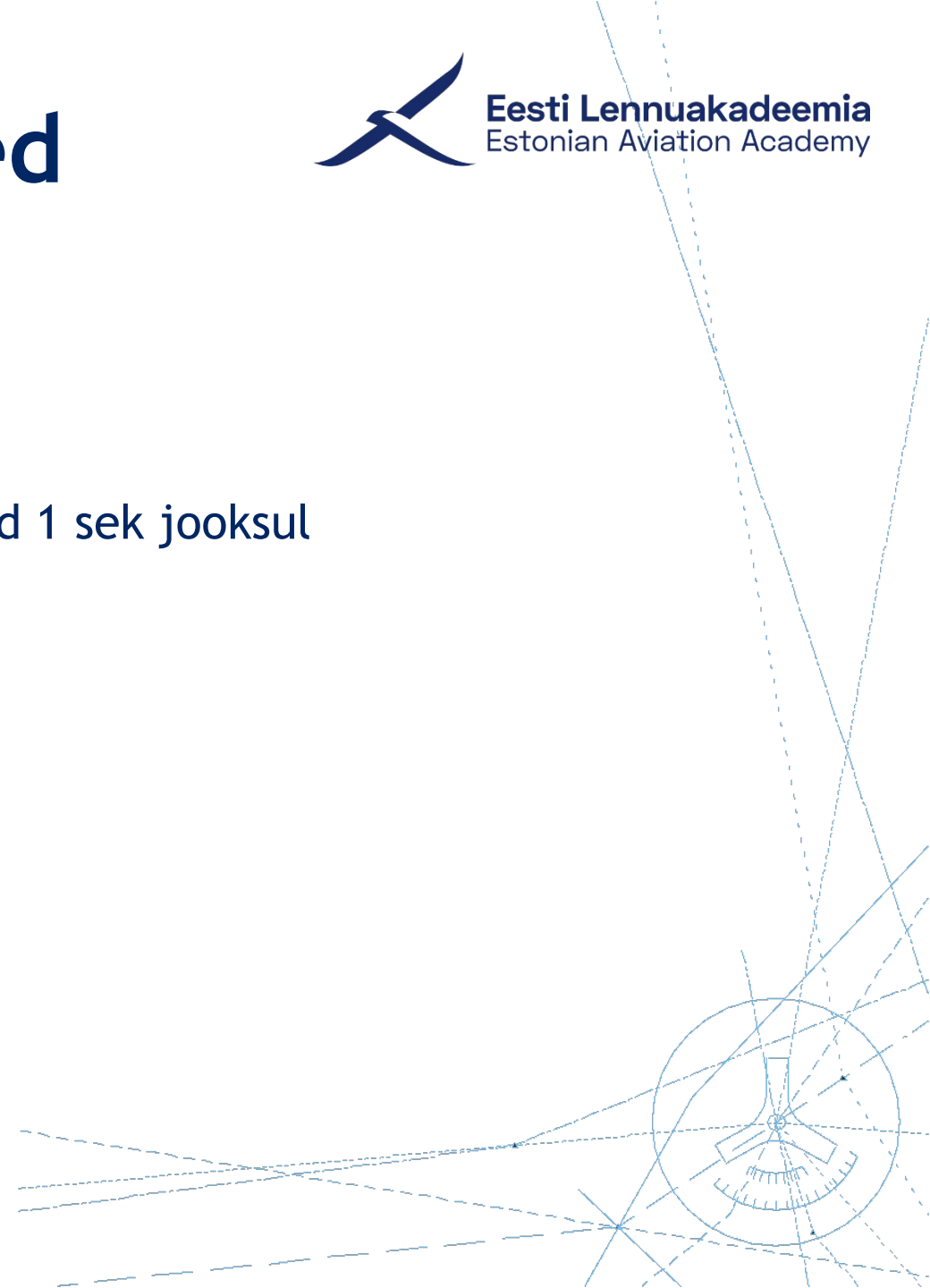
$$\Delta v = v_r - v_0 = 0 - (-83.3) = 83,3 \text{ m/s}$$

$$f_d = \frac{\Delta v}{c} f_0 = \frac{83.3 \text{ m/s}}{300000000 \text{ m/s}} \cdot 130000000 \text{ Hz} = 36 \text{ Hz}$$



Sideteenuse kvaliteedinõuded

- Teenusekvaliteet (quality of service)
- Katteala (coverage)
- Kättesaadavus (availability) - 100%, ühendus loodud 1 sek jooksul
- Terviklikkus (integrity)
- Hilistus (latency)
- Turvalisus (security)
-  ohutus (safety)

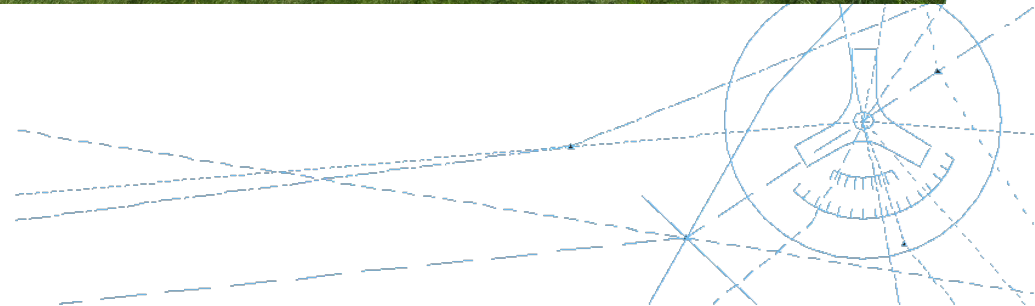


Sideteenuste kvaliteedinõuded

- Mõningaid arve

Application	Latency	Jitter	Packet loss rate
Telephone voice	100 ms	15 ms	0.5 %
Radio voice	50 ms	15 ms	0.5 %
Telephone signalling	100 ms	50 ms	0.5 %
Radio signalling	50 ms	50 ms	0.5 %
Recording	100 ms	50 ms	0.5 %

[ED-138]



Küsimused ?

