



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Darius Poplavskij

**INTEGRUOTOS STEBĖJIMO IR SUSIDŪRIMO VENGIMO SISTEMOS TIKSLUMO  
POSŪKIŲ MANEVROUSE TYRIMAS**

**INTEGRATED SURVEILLANCE AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM ACCURACY IN  
TURNING MANEUVERS**

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 60103T101

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS  
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Darius Poplavskij

INTEGRUOTOS STEBĖJIMO IR SUSIDŪRIMO VENGIMO SISTEMOS TIKSLUMO  
POSŪKIŲ MANEVRUOSE TYRIMAS

INTEGRATED SURVEILLANCE AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM ACCURACY IN  
TURNING MANEUVERS

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 60103T101

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2015

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS  
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

valstybinis kodas 60103T101

(Data)

# Vilnius

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201...m. .... d.

.....  
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų  
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo  
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.  
2 priedas

**(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)**

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

Darius Poplavskij, 20102168  
Antano Gustaičio aviacijos institutas  
Orlaivių pilotavimo studijų programa, OPfa-10

**BAIGIAMOJO DARBO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

\_\_\_\_\_  
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Integruotos stebėjimo ir susidūrimo vengimo sistemos tikslumo posūkių manevruose tyrimas“, patvirtintas 20\_\_ m. \_\_\_\_\_ d. Dekano potvarkiu Nr. \_\_\_\_\_, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: \_\_\_\_\_

Mano darbo vadovas \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Antano Gustaičio aviacijos institutas**

**Aviacijos technologijų katedra**

**ISBN**

**ISSN**

Egz. sk. ....

Data ....-....-....

Orlaivių pilotavimo studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: Integruotos stebėjimo ir susidūrimo vengimo sistemos tikslumo posūkių manevruose tyrimas

Autorius: Darius Poplavskij

Vadovas: lekt. Sergejus Zakrevskis

**Kalba**

Lietuvių

Užsienio

### **Anotacija**

Darbe tiriamas integruotos ADS-B/TCAS II sistemos tikslumas posūkių manevruose. Panaudojus tikslius ADS-B sistemos duomenis apie orlaivio greitį, kryptį, aukštį bei remiantis taško judėjimo kinematikos principais 3D trajektorijoje, esant skirtingiems TCAS II jautrumo lygiams, buvo apskaičiuoti santykiniai atstumai tarp orlaivių, kai orlaiviai patariamąjį sprendimo zonoje (RA) buvo išskiriami horizontalėje, o eismo informacijos pranešimų zonoje (TA) gaudavo rekomenduojančią balso komandą apie greičio mažinimą. Taip pat nagrinėjamas siūlomo metodo veikimo principas, t. y. kokias skrydžio kryptis, balso komandas išsiųstų TCAS II kompiuteris, kai orlaiviai RA zonoje būtų išskiriami horizontalėje.

Gauti skaičiavimo duomenys parodė, kad orlaivių išskyrimas horizontalėje yra efektyvus, tačiau pagal tai, iš kurios krypties artėja kitas orlaivis, bei įvertinus galimas paklaidas tam tikrame sektoriuje optimalus išskyrimo būdas RA zonoje būtų – vertikalėje. Orlaivio greičio mažinimas TA zonoje taip pat yra efektyvus, bet tik tam tikrame sektoriuje.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tiriamoji dalis, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 74 p. teksto be priedų, 38 iliustr., 7 lent., 23 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

**Prasminiai žodžiai:** automatinė priklausomo stebėjimo sistema (ADS-B), susidūrimo ore vengimo sistema (TCAS), patariamasis sprendimas (RA), eismo informacijos pranešimai (TA), jautrumo lygis (SL), arčiausias sąlyčio taškas (CPA), orlaivio manevravimas horizontalėje

Vilniaus Gediminas Technical University  
**Antano Gustaičio aviation institute**  
**Department of aviation technologies**

**ISBN**                      **ISSN**  
Copies No. ....  
Date ....-....-....

Aircraft piloting study programme master thesis

Title: Integrated Surveillance and Collision Avoidance system accuracy in turning maneuvers

Author: Darius Poplavskij

Academic supervisor: lekt. Sergejus Zakrevskis

**Thesis language**

☐

Lithuanian

☐

Foreign

### **Annotation**

The paper studies ADS-B/TCAS II integrated system's accuracy in turning maneuvers. Using precise ADS-B system data like aircraft speed, heading, altitude and on the basis of point movement at 3D trajectory with different TCAS II sensitivity levels there were calculated relative distances between aircraft when aircraft at resolution advisory zone were separated on a horizontal plane, and in traffic resolution advisory zone – received recommendation from TCAS II for speed reduction. Alongside the paper examines a proposed collision avoidance system's operation method, i.e. what heading, voice commands TCAS II computer would send when aircraft would be separated horizontally.

The results show that horizontal aircraft separation is effective in a certain sector due to the fact that according to the direction of intruding aircraft and considering possible errors the most optimum extraction method is on a vertical plane. Aircraft's speed reduction is effective too but only in a particular sector.

The work consists of 5 parts: introduction, the review of literature, the part of research, conclusions and recommendations, bibliography.

The volume of work: 74 pages of text without appendixes, 38 pictures, 7 tables, 23 bibliographical sources.

2 appendixes.

**Keywords:** automatic dependant surveillance broadcast system (ADS-B), traffic collision avoidance system (TCAS), resolution advisory (RA), traffic advisory (TA), sensitivity level (SL), critical point of approach (CPA), aircraft maneuvering in horizontal position

# TURINYS

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....                                                                     | 1  |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS .....                                                                      | 3  |
| TERMINŲ IR JŲ APIBRĖŽIMŲ SĄRAŠAS .....                                                      | 4  |
| IVADAS.....                                                                                 | 6  |
| Orlaivių stebėjimo technologijų raida.....                                                  | 6  |
| Aktualumas .....                                                                            | 7  |
| Tikslas .....                                                                               | 9  |
| Praktinė nauda ir naujovės .....                                                            | 11 |
| 1    ADS-B ir TCAS II sistemų teorinės prielaidos.....                                      | 12 |
| 1.1    ADS-B sistemos veikimo principas .....                                               | 12 |
| 1.2    TCAS II sistemos veikimo principas .....                                             | 15 |
| 1.2.1    Paprastasis <i>Tau</i> kriterijus .....                                            | 15 |
| 1.2.2    Jautrumo lygis .....                                                               | 17 |
| 1.2.3    Saugomos oro erdvės plotas.....                                                    | 17 |
| 1.3    Integruota ADS-B/TCAS II sistema.....                                                | 18 |
| 2    Tiriamoji dalis.....                                                                   | 21 |
| 2.1    Tiriamosios dalies skaičiavimo metodikos aprašymas.....                              | 22 |
| 2.1.1    Kinematikos principas.....                                                         | 22 |
| 2.1.2    Skrydis posūkyje .....                                                             | 23 |
| 2.1.3    3D trajektorija .....                                                              | 27 |
| 2.1.4    Santykinio atstumo skaičiavimo principas patariamojo sprendimo zonoje (RA).....    | 29 |
| 2.2    Eismo informacijos pranešimo (TA) ir patariamojo sprendimo (RA) balso komandos ..... | 32 |
| 2.3    Patariamojo sprendimo (RA) horizontalios skrydžio krypties balso komandos .....      | 34 |
| 2.3.1    Skrydžio kurso, kampo $\theta$ nustatymas .....                                    | 34 |
| 2.4    Greičio mažinimo efektyvumas eismo informacijos pranešimų (TA) zonoje .....          | 37 |
| 2.4.1    Santykinis atstumas tarp orlaivių .....                                            | 38 |

|                                                                                                                                                      |                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5                                                                                                                                                  | Gauti tiriamosios dalies skaičiavimo rezultatai.....                                   | 42 |
| 2.5.1                                                                                                                                                | Santykinis atstumas tarp orlaivių RA zonoje.....                                       | 42 |
| 2.5.2                                                                                                                                                | Santykinis atstumas tarp orlaivių RA zonoje, kai yra skirtingi orlaivių greičiai ..... | 46 |
| 2.5.3                                                                                                                                                | Santykinis atstumas tarp orlaivių TA zonoje .....                                      | 46 |
| 2.5.4                                                                                                                                                | Orlaivių nukrypimas nuo skrydžio trajektorijos .....                                   | 48 |
| 2.6                                                                                                                                                  | Manevro pasirinkimas sprendimo patarėjo zonoje (RA) .....                              | 49 |
| 2.6.1                                                                                                                                                | Posūkio kryptis.....                                                                   | 49 |
| 2.6.2                                                                                                                                                | Skrydžio kursas .....                                                                  | 51 |
| 2.6.3                                                                                                                                                | Manevro pasirinkimo veiksmų seka .....                                                 | 52 |
| 2.7                                                                                                                                                  | Paklaidos .....                                                                        | 55 |
| 2.7.1                                                                                                                                                | Orlaivio įgulos reakcijos laikas manevrui atlikti .....                                | 55 |
| 2.7.2                                                                                                                                                | Navigacijos sistemos netikslumas.....                                                  | 56 |
| 2.7.3                                                                                                                                                | Neatlikus reikiamo manevro dėl tam tikrų veiksnių .....                                | 57 |
| 2.7.4                                                                                                                                                | Visos paklaidos .....                                                                  | 57 |
| IŠVADOS .....                                                                                                                                        |                                                                                        | 59 |
| Gautų rezultatų apibendrinimas .....                                                                                                                 |                                                                                        | 59 |
| Rekomendacijos .....                                                                                                                                 |                                                                                        | 62 |
| LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI.....                                                                                                                    |                                                                                        | 64 |
| 1 PRIEDAS .....                                                                                                                                      |                                                                                        | 66 |
| 1 lentelė. Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal $\alpha$ ir posvyrio kampų reikšmes esant 7-tam jautrumo lygiui .....                              |                                                                                        | 66 |
| 2 lentelė. Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal $\alpha$ ir posvyrio kampų reikšmes esant 5-tam jautrumo lygiui .....                              |                                                                                        | 67 |
| 3 lentelė. Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal $\alpha$ ir posvyrio kampų reikšmes esant 3-čiam jautrumo lygiui.....                              |                                                                                        | 68 |
| 4 lentelė. Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal $\alpha$ reikšmes ir jautrumo lygį, kai TA zonoje artėjantis orlaivis mažina skrydžio greitį ..... |                                                                                        | 69 |



|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5 lentelė. Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal $\alpha$ reikšmes ir jautrumo lygį, kai TA zonoje horizontu skrendantis orlaivis mažina skrydžio greitį, o artėjantis orlaivis artėja aukštėdamas arba žemėdamas ..... | 70 |
| 2 PRIEDAS .....                                                                                                                                                                                                          | 71 |
| 1 pav. Orlaivių manevrų pasirinkimas kalnuose .....                                                                                                                                                                      | 71 |
| 2 pav. Santykinis atstumas tarp orlaivių, kai II orlaivio yra vienas neveikiantis variklis.....                                                                                                                          | 72 |

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 pav.</b> Oro eismas virš Centrinės Europos dalies (FlightRadar 24).....                                                                                 | 7  |
| <b>2 pav.</b> Orlaivio įgulos pranešimų skaičius apie susidūrimo ore pavojų pagal metus (Statistics, 2014).....                                              | 8  |
| <b>3 pav.</b> ADS-B sistemos veikimo principas (LTD, 2013) .....                                                                                             | 13 |
| <b>4 pav.</b> Lėktuvo <i>Airbus A320</i> navigacinis ekranas (Flickr, 2012) .....                                                                            | 14 |
| <b>5 pav.</b> Orlaivių lėtas tarpusavio artėjimas .....                                                                                                      | 16 |
| <b>6 pav.</b> TCAS laiko ir atstumų ribos (Le Forum Des Pilotes Privés, 2012) .....                                                                          | 18 |
| <b>7 pav.</b> ADS-B/TCAS stebėjimo erdvė horizontalėje (Xu, 2013) .....                                                                                      | 19 |
| <b>8 pav.</b> ADS-B/TCAS II sistemos struktūrinė schema (Xu, 2013).....                                                                                      | 20 |
| <b>9 pav.</b> „Boeing 737-500“ matmenys (The Boeing Company, 2014).....                                                                                      | 21 |
| <b>10 pav.</b> Objektui judant, jo poslinkis – tai vektorius nuo pradinės iki galinės padėties.....                                                          | 23 |
| <b>11 pav.</b> Jėgos, veikiančios orlaivį posūkyje .....                                                                                                     | 24 |
| <b>12 pav.</b> Sferinės koordinatės.....                                                                                                                     | 27 |
| <b>13 pav.</b> Taško A koordinatinių nustatymas sferinėje koordinatinių sistemoje.....                                                                       | 28 |
| <b>14 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių skaičiavimo principas sferinėje koordinatinių sistemoje.....                                                 | 29 |
| <b>15 pav.</b> Taškų koordinatinių nustatymas sferinėje koordinatinių sistemoje.....                                                                         | 31 |
| <b>16 pav.</b> TCAS II v.7.1, patariamąjo sprendimo (RA) ir eismo informacijos pranešimų (TA) vertikalios balso komandos.....                                | 33 |
| <b>17 pav.</b> TCAS II, patariamąjo sprendimo (RA) ir eismo informacijos pranešimų (TA) horizontalios balso komandos .....                                   | 34 |
| <b>18 pav.</b> Kampų $\theta_A$ ir $\theta_B$ skaičiavimo principas Dekarto koordinatėse.....                                                                | 35 |
| <b>19 pav.</b> Eismo informacijos pranešimų zonoje II orlaivis pradeda mažinti skrydžio greitį .....                                                         | 37 |
| <b>20 pav.</b> Santykinio atstumo skaičiavimo principas Dekarto koordinatėse .....                                                                           | 39 |
| <b>21 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių nustatymas, kai artėjantis orlaivis (II orlaivis) aukštėja.....                                              | 41 |
| <b>22 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo $\alpha$ kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 7 ..... | 43 |
| <b>23 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo $\alpha$ kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 5 ..... | 43 |
| <b>24 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo $\alpha$ kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 3 ..... | 44 |
| <b>25 pav.</b> Didėjant $\alpha$ kampui, pradinis orlaivių atstumas mažėja.....                                                                              | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>26 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo vertikalios aukštėjimo / žemėjimo greičio, esant skirtingiems jautrumo lygiams.....                                                                     | 45 |
| <b>27 pav.</b> Santykinio atstumo priklausomybė nuo $\alpha$ kampų esant skirtingiems jautrumo lygiams bei skirtingiems artėjimo prie CPA orlaivių greičiams.....                                                         | 46 |
| <b>28 pav.</b> II orlaivis mažina skrydžio greitį TA zonoje .....                                                                                                                                                         | 47 |
| <b>29 pav.</b> Santykinio atstumo priklausomybė nuo $\alpha$ kampų esant skirtingiems jautrumo lygiams, kai TA zonoje artėjantis II orlaivis mažina skrydžio greitį .....                                                 | 47 |
| <b>30 pav.</b> Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo $\alpha$ kampų, kai I orlaivis, skrendantis horizontu, mažina skrydžio greitį, o II orlaivis aukštėja arba žemėja 1500 ft/min vertikaliuoju greičiu ... | 48 |
| <b>31 pav.</b> Atstumo (nukrypimo) priklausomybė nuo posvyrio kampo esant skirtingiems jautrumo lygiams                                                                                                                   | 48 |
| <b>32 pav.</b> Orlaivių posūkio kryptys priklausomai nuo $\beta$ kampo .....                                                                                                                                              | 49 |
| <b>33 pav.</b> Kampo $\theta$ nustatymas (pavaizduotas padidintas 17 pav.).....                                                                                                                                           | 51 |
| <b>34 pav.</b> TCAS II veiksmų seka TA ir RA zonose .....                                                                                                                                                                 | 54 |
| <b>35 pav.</b> Navigacijos sistemos netikslumo paklaidos .....                                                                                                                                                            | 58 |
| <b>36 pav.</b> Orlaivių išskyrimo būdas pagal orlaivių artėjimo $\alpha$ kampo reikšmės .....                                                                                                                             | 60 |
| <b>37 pav.</b> Orlaivių efektyvūs greičio mažinimo sektoriai pagal $\alpha$ artėjimo kampą.....                                                                                                                           | 61 |
| <b>38 pav.</b> Galimų paklaidų reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams .....                                                                                                                                         | 61 |

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 lentelė.</b> Orlaivio įgulos pranešimų skaičius apie susidūrimo ore pavojų (NMAC) pagal pavojingumo laipsnį (Statistics, 2014)..... | 8  |
| <b>2 lentelė.</b> Laiko ir atstumų ribos pagal jautrumo lygį.....                                                                        | 17 |
| <b>3 lentelė.</b> Orlaivių skrydžio kryptys, priklausomai nuo $\Delta\beta$ kampų skirtumo.....                                          | 50 |
| <b>4 lentelė.</b> Posvyrio kampo reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams .....                                                      | 55 |
| <b>5 lentelė.</b> Paklaidų reikšmės dėl orlaivio įgulos reakcijos laiko esant skirtingiems jautrumo lygiams.....                         | 56 |
| <b>6 lentelė.</b> Navigacijos sistemos netikslumo paklaidos esant skirtingiems jautrumo lygiams .....                                    | 56 |
| <b>7 lentelė.</b> Apibendrinamieji tiriamosios dalies rezultatai .....                                                                   | 59 |

## TERMINŲ IR JŲ APIBRĖŽIMŲ SĄRAŠAS

ADS – oro erdvės sistema (angl. *Aircraft Air Data Systems*).

ADS-B – automatinė priklausomo stebėjimo sistema (angl. *Automatic Dependant Surveillance Broadcast System*).

ADS-R – automatinės priklausomo stebėjimo sistemos informacijos retransliavimas (angl. *Automatic Dependent Surveillance – Re-broadcast*).

AHRS – erdvinės padėties ir kurso rodymo pamatinė sistema (angl. *Attitude and Heading Reference System*).

ARTCC – Oro erdvės eismo valdymo centras (angl. *Air Route Traffic Control Centers*).

ATC – Skrydžių valdymo tarnyba (angl. *Air Traffic Control*).

ATCRBS – oro eismo kontrolės radarų sistema (angl. *Air Traffic Control Radar Beacon System*).

ATIS – automatinė prieigos informacinė sistema (angl. *Automatic Terminal Information Service*).

CDTI – orlaivio kabinos eismo informacijos ekranas (angl. *Cockpit Display of Traffic Information*).

CPA – artimiausias sąlyčio taškas (angl. *Critical Point of Approach*).

EFIS – elektroninė skrydžių valdymo sistema (angl. *Electronic Flight Instrument System*).

ES – išplėstinis pranešimų atsakiklis (angl. *Extended Squitter*).

FAA – Federalinė aviacijos agentūra (angl. *Federal Aviation Administration*).

FIS – skrydžių informacijos perdavimo paslauga (angl. *Flight Information Service*).

FMS – skrydžio valdymo sistema (angl. *Flight Management System*).

ft – pėda (angl. *feet*).

GLONASS – globalioji navigacinė palydovinė sistema (rus. – ГЛОНАСС, Глобальная навигационная спутниковая система).

GPS – globalioji pozicionavimo sistema (angl. *Global Positioning System*).

HRA – horizontalus patariamasis sprendimas (angl. *Horizontal Resolution Advisory*).

IRS – inercinė atskaitos sistema (angl. *Inertial Reference System*).

kt – mazgas (angl. *knot*).

NACP – navigacinių vietos duomenų tikslumo kategorija (angl. *Navigation Accuracy Category for Position*).

NAS – nacionalinė oro erdvė (angl. *National Airspace*).

NAVC – greičio navigacijos duomenų tikslumo kategorija (angl. *Navigational Accuracy Category for Velocity*).

NIC – vientisos navigacijos kategorija (angl. *Navigation Integrity Category*).

NM – jūrmylė (angl. *Nautical Mile*).

NMAC – susidūrimo ore pavojus (angl. *Near Mid-Air Collision*).

NOTAM – pranešimai pilotams (angl. *A Notice to Airmen*).

PSR – pirminis stebėjimo radiolokatorius (angl. *Primary Surveillance Radar*).

RA – sprendimo patarėjas (angl. *Resolution Advisory*).

SIL – stebėjimo vientisumo lygis (angl. *Source Integrity Level*).

SL – jautrumo lygis (angl. *Sensitivity Level*).

SSR – antrinis stebėjimo radiolokatorius (angl. *Secondary Surveillance Radar*).

TA – eismo informacijos pranešimai (angl. *Traffic Advisory*).

TCAS – susidūrimo ore vengimo sistema (angl. *Traffic Collision Avoidance System*).

TIS-B – eismo informacijos perdavimo paslauga (angl. *Traffic Information Service – Broadcast*).

UAT – universalus priėmimo atsakiklis (angl. *Universal Access Transceiver*).

VRA – vertikalus patariamasis sprendimas (angl. *Vertical Resolution Advisory*).

## IVADAS

### Orlaivių stebėjimo technologijų raida

VI dešimtmečio pradžioje skrydžių valdymo tarnybos stotyse vis dažniau pradėta naudotis radarais. Iki tol orlaivio padėtį apskaičiuodavo jo įgula ir Skrydžių valdymo tarnybai radijo ryšiu pranešdavo koordinatas. Radarų technologijoms tobulėjant, skrydžių dispečeriai kaskart matydavo vis aiškesnį oro erdvės pateikimą. Pradžioje buvo naudojama pirminio stebėjimo radaro (PSR) technologija, kuri ekrane orlaivius atvaizduodavo paprasčiausių taškių pavidalu.

Prie pirminių radarų technologijų raidos prisidėjo oro eismo kontrolės radarų sistemos (ATCRBS) įdiegimas – sistema, geriau žinoma antrinių stebėjimų radarų (SSR) pavadinimu. Orlaivyje, kuriame įdiegta ši sistema, įmontuotas atsakiklis, reaguojantis į antžeminių radarų siunčiamą unikalią informaciją. Taip skrydžių dispečeriai atpažįsta, kam priklauso radaro ekrane matomas mirksintis taškelis. A režimo atsakikliai reaguoja į keturženklį skaitmeninį signalą, C režimo atsakikliai – į keturženklį skaitmeninį signalą, kuriuo perduodama informacija apie aukštį, S režimo atsakikliai – į keturženklį skaitmeninį signalą, kuriuo perduodama informacija apie aukštį, siunčiamas unikalus identifikavimo kodas ir su susidūrimo ore išvengimu susijusi informacija. SSR – tai priklausoma antrinių stebėjimų radarų technologija, kuri veikia tik tuo atveju, jei orlaivyje įmontuotas veikiantis atsakiklis ir SSR technologija jį atpažįsta.

Kitas evoliucinis žingsnis orlaivių stebėjimo technologijoje – susidūrimo ore vengimo sistema (TCAS). 1981 m. Federalinė aviacijos agentūra (FAA) davė leidimą naudoti susidūrimo ore vengimo sistemą (TCAS), kuri pilotams leidžia matyti aplink savo orlaivius esantį vaizdą, o TCAS II programa, teikianti pranešimus apie situaciją oro erdvėje virš orlaivio ir po juo, padeda išvengti susidūrimo, išduodant artėjančiam orlaiviui tam tikras manevro komandas. Ši sistema pralenkė visus savo pirmtakus, naudotus prieš tai, tačiau ji taip pat turi keletą svarbių trūkumų. Oro erdvėje kliūtimi tapęs orlaivis privalo turėti bent jau C režimo atsakiklius, bet jei abiejuose orlaiviuose TCAS programa neįdiegta, atsakikliai neatliks visų reikiamų funkcijų. TCAS II kompiuteris pateikia sprendimus, paremtus orlaivio buvimo padėtimi bei apskaičiuoja orlaivių greičius. Programa atpažįsta ir vertikalėje ir horizontalėje esantį orlaivį, tačiau neteikia informacijos apie orlaivio horizontalėje susidariusią padėtį. Ši funkcija buvo numatyta TCAS III projekte, tačiau jis buvo nutrauktas, pasirinkus automatinės priklausomo stebėjimo (ADS-B) sistemą.

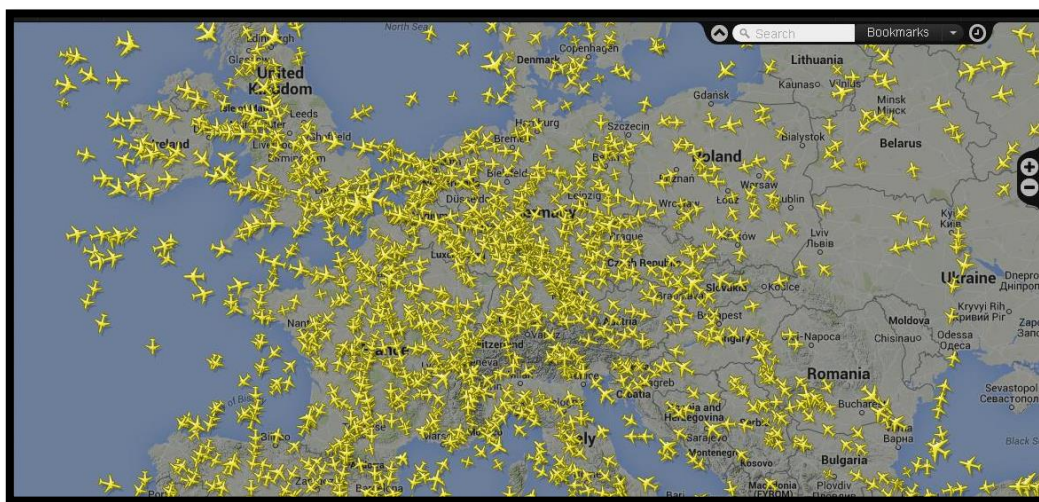
Kitas proveržis orlaivių stebėjimo technologijoje – automatinė priklausomo stebėjimo (ADS-B) sistema. Radare nematomame orlaivyje įrengtas įrenginys per duomenų perdavimo liniją „oras-oras“ (ADS-B „Out“ signalas) perduoda kitam orlaiviui kiekvieno lėktuvo padėties vektorių (trimačiu būdu

perteiktą padėtį ir greitį). Taip pat per duomenų perdavimo liniją „oras-žemė“ ta pati informacija yra siunčiama antžeminėms stotims.

ADS-B stebėjimo technologija į TCAS panaši tuo, jog norint, kad orlaiviuose jos veiktų visu pajėgumu, turi būti įdiegta atitinkama įranga. Jei viename orlaivyje nebus įdiegtas C režimo atsakiklis, o kitas orlaivis bus aprūpintas TCAS technologija, pastarasis negalės išvengti susidūrimo su reikiamos įrangos neturinčiu lėktuvu. ADS-B sistemos atveju lėktuvas privalo siųsti signalą apie savo padėtį ore, nes priešingu atveju kito lėktuvo, naudojancio tą pačią sistemą, oro eismo radare paprasčiausiai nesimatys. Be to, ADS-B nepakeis dabar nacionalinėje oro erdvės sistemoje (NAS) naudojamos SSR įrangos tol, kol visi lėktuvai nebus aprūpinti ADS-B įranga, teikiančia informaciją apie orlaivio padėtį ore.

## Aktualumas

Orlaivių susidūrimo ore problema buvo svarbi aviacijai nuo pat jos atsiradimo pradžios. Nors oro erdvė – tarsi beribis pasaulis, susidaro įspūdis, jog čia orlaiviams vis pritrūksta vietos. Šiais laikais erdvė šalia oro uostų kelia didelį nerimą. Oro erdvė naudojasi vis daugiau orlaivių, o tai didina nelaimingų įvykių ore tikimybę.



**1 pav.** Oro eismas virš Centrinės Europos dalies (FlightRadar 24)

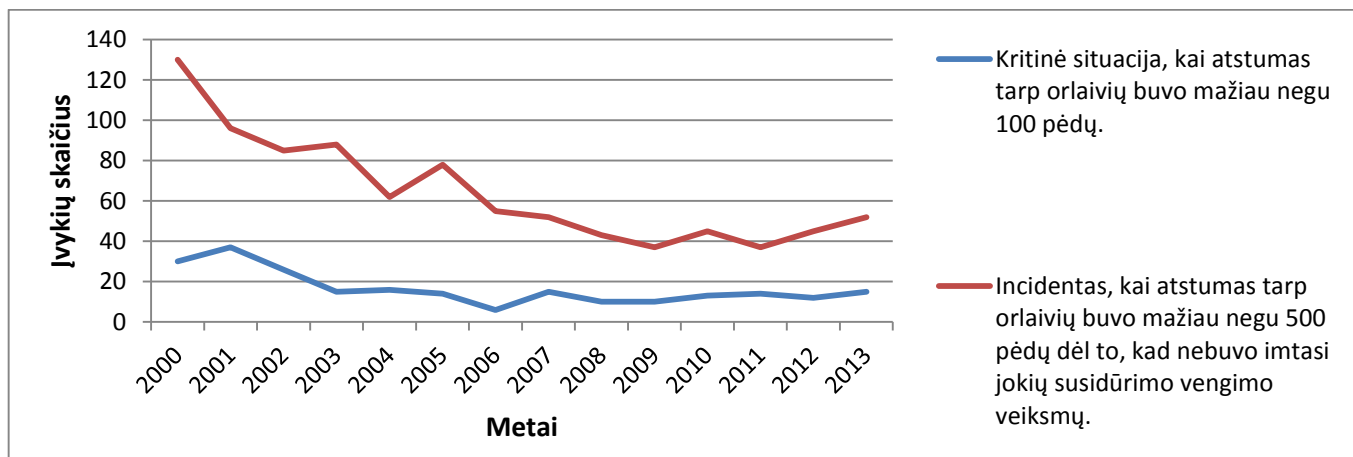
Oro erdvės stebėjimo sistemų tikslumas yra būtina aviacijos tobulinimo sritis – atsižvelgiant į vis didėjančius orlaivių srautus, kurie viršijo prognozuojamą 30 % padidėjimą orlaivių skrydžių skaičiuje nuo 2010 iki 2015 metų Lietuvoje (Kondroška, Stankūnas 2010).

Prieš tai pateiktame 1 paveiksle yra pavaizduotas oro eismas virš Centrinės Europos dalies. Duomenys buvo gauti 2015 metais balandžio 14 dieną, 07:52 UTC laiku, naudojant viešąją skrydžių



stebėjimo paslaugą „FlightRadar 24“. Programa teikia skrydžių informaciją apie visus pasaulyje ore esančius orlaivius.

TCAS II technologija, naudojama jau ne vienus metus, įrodė savo svarbą, nes per tą laiką ji padėjo išvengti daugybės nelaimingų atsitikimų. Paskaičiuota, kad Europoje ši technologija susidūrimo ore riziką sumažino penkiais kartais. Vis dėl to tobulėjimui ribų nėra, todėl sustoti negalima – kuriant naujas susidūrimų vengimo programas reikia ir toliau žengti koja kojon su naujomis technologijomis (Eurocontrol, 2013).



**2 pav.** Orlaivio įgulos pranešimų skaičius apie susidūrimo ore pavojų pagal metus (Statistics, 2014)

**1 lentelė.** Orlaivio įgulos pranešimų skaičius apie susidūrimo ore pavojų (NMAC) pagal pavojingumo laipsnį (Statistics, 2014)

|                             | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Iš viso praneštų pavojų     | 239  | 211  | 180  | 161  | 144  | 137  | 106  | 108  | 92   | 72   | 90   | 101  | 85   | 112  |
| Kritiniai <sup>1</sup>      | 30   | 37   | 26   | 15   | 16   | 14   | 6    | 15   | 10   | 10   | 13   | 14   | 12   | 15   |
| Potencialūs <sup>2</sup>    | 130  | 96   | 85   | 88   | 62   | 78   | 55   | 52   | 43   | 37   | 45   | 37   | 45   | 52   |
| Jokio pavojaus <sup>3</sup> | 49   | 51   | 42   | 37   | 31   | 20   | 17   | 21   | 11   | 12   | 11   | 27   | 16   | 19   |
| Neklasifikuoti <sup>4</sup> | 30   | 27   | 27   | 21   | 35   | 25   | 28   | 20   | 28   | 13   | 21   | 23   | 12   | 26   |

<sup>1</sup> Kritinė situacija, kai atstumas tarp orlaivių buvo mažiau negu 100 pėdų.

<sup>2</sup> Incidentas, kai atstumas tarp orlaivių buvo mažiau negu 500 pėdų dėl to, kad nebuvo imtasi jokių susidūrimo vengimo veiksmų.

<sup>3</sup> Situacija, kai aukštis ir kryptis abiejų lėktuvų sutapdavo ties artimiausiu sąlyčio taško (CPA), bet kadangi iš anksto buvo imtasi susidūrimo vengimo manevro veiksmų, skrydžiui pavojaus nebuvo.

<sup>4</sup> Nėra nustatyta, nes nepakanka įrodymų arba incidentas vis dar yra tiriamas.

Dabar susidūrimo ore vengimo sistema (TCAS II), sumažinanti nelaimių ore tikimybę, veikia visuose komercinių oro linijų lėktuvuose. TCAS II sistema, siųsdama ir priimdama užklausas iš netoliese skrendančių lėktuvų, vadinamų įsibrovėliais (angl. *intruders*), atsakiklių nustato santykinį atstumą iki orlaivio. Potencialą grėsmę keliantis įsibrovėlis sužadina patariamojo sprendimo (RA) signalą, garsu perspėjantį pilotą taikyti išvengimo manevrą vertikalėje.

Peržiūrint TCAS II sistemą, pilotai tikisi naujos kartos TCAS II sistemos, kuri įtrauktų į maneuvrus išduodantį kompiuterį ne tik vertikalius ore vengimo maneuvrus, bet taip pat – horizontalius ir tuo pačiu padidintų vertikaliąją patariamojo sprendimo (RA) zoną.

## **Tikslas**

Darbo tikslas yra:

- Išnagrinėti ADS-B sistemos, TCAS II sistemos veikimo principą, remiantis moksliniais straipsniais, disertacijomis, mokslinėmis publikacijomis ir pan.
- Remiantis Minimaliais aviacijos sistemų darbo standartais (MAPS) DO-242A (3, pp. 27–48), reglamentuojančiais ADS-B sistemos veikimo reikalavimus, yra numatyta, kokia informacija turi būti pateikta ADS-B „Out“ žinutėje. Tačiau kai kurios programos siunčia ne visą numatytą informaciją, todėl siųstuvai-imtuvai gali perduoti arba gauti ne visus duomenis:
  - Taikymo laikas, kai buvo pritaikytos pateiktos reikšmės.
  - Šaukinys.
  - Unikalus 24 bitų ICAO adresas (galima perduoti ir anoniminiu režimu).
  - ADS-B emiterio kategorija – nurodo orlaivio rūšį. Visas sąrašas pateiktas A priede.
  - Orlaivio ilgis ir plotis – koduoti duomenys, kuriuos apdoroja antžeminės programos.
  - Padėtis – geografinė padėtis.
  - ADS-B padėties atskaitos taškas – padėtį nurodžiusio šaltinio vieta.
  - Aukštis – barometrinio slėgio amplitudė bei geometrinis aukštis virš jūros lygio.
  - Horizontalusis greitis – horizontalaus bei kreiserinio greičio duomenys.
  - Aukščio kitimo sparta – barometriniai arba geometriniai duomenys.
  - Kryptis.
  - Pritaikymo klasė – ADS-B programų elektronikos charakteristikos.
  - Darbo režimas – TCAS RA, identifikavimo ir kitos skrydžių valdymo tarnybos paslaugos.
  - Vientisos navigacijos kategorija (NIC) – aprėpties ribos, radiokompasas bei vertikalės apsaugos lygio dydis.

- Stebėjimo vientisumo lygis (SIL) – galimos padėties vietos, patenkančios į aprėpties zoną ar vientiso išlaikymo ribos cilindrą.
- Navigacinių vietos duomenų tikslumo kategorija (NACP) – tikslios padėties nustatymas, apskaičiuotas pagal apytikrės padėties koordinatas.
- Greičio navigacijos duomenų tikslumo kategorija (NAVC) – horizontalaus greičio paklaida.
- Barometrinio aukščio kokybės kodas – barometrinio aukščio duomenų pateikimas.
- Avarinis pirmumo statusas.
- Sukaupta informacija – dviejų rūšių: Tikslinių orlaivių, tuo metu skrendančių horizontalėje ir vertikalėje, būklės pranešimai, reikalingi aktyviojo skrydžio segmentui bei trajektorijos pokyčio pranešimai, pagal kuriuos nustatomi būsimi skrydžio segmentai (Lester, 2007).

Panaudoti reikiamus duomenis (t. y. duomenis paimtus iš ADS-B „Out“ sistemos) TCAS II RA kompiuteryje ir apskaičiuoti orlaivių išskyrimo efektyvumą, išskiriant orlaivius horizontalėje, bei remiantis gautais duomenimis, pasirinkti optimalų susidūrimo vengimo manevrą horizontalėje ar vertikalėje. Taip pat, atliekant matematinius skaičiavimus, išnagrinėti orlaivių išskyrimo galimybę, kai TCAS II eismo informacijos pranešimų zonoje (TA) artėjančiam orlaiviui (t. y. įsibrovėliui) būtų rekomenduojama mažinti greitį iki tol, kol orlaiviai sėkmingai prasilenktų.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

- Atlikti ADS-B ir TCAS II sistemų veikimo principo literatūros analizę.
- Aptarti ADS-B/TCAS II sistemų integravimo galimybę ir būdą.
- Remiantis taško judėjimo kinematika 3D sferinėse koordinatėse ir naudojantis „MathCad“ programa apskaičiuoti:

1. Santykinį atstumą tarp orlaivių esant skirtingiems jautrumo lygiams (SL): SL7, SL5, SL3.
2. Santykinį atstumą tarp orlaivių esant skirtingiems orlaivių posvyrio kampams: 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°.

3. Santykinį atstumą tarp orlaivių esant skirtingiems orlaivių artėjimo, išilginės ašies atžvilgiu, kampams: 0°–360°.

4. Santykinį atstumą tarp orlaivių, kai artėjančiam orlaiviui TCAS II TA zonoje būtų rekomenduojama mažinti greitį iki tol, kol orlaiviai sėkmingai prasilenktų tarpusavyje:

1. Esant skirtingiems orlaivių artėjimo, jų išilginės ašies atžvilgiu, kampams: 0°–360°.
2. Esant skirtingiems jautrumo lygiams: SL7, SL5, SL3.

- Iš gautų duomenų pasirinkti optimalų ir efektyviausią variantą, kuris geriausiai išskirtų orlaivius horizontalėje arba vertikalėje.

- Aptarti gautus duomenis, šios sistemos pritaikymo būtinybę, jos kokybės, saugumo ir patikimumo rodiklius.

- Suformuluoti išvadas, pateikti savo nuomonę atsižvelgiant į gautus rezultatus ir sistemos perspektyvas bei tyrimo pobūdį kartu su baigiamojo darbo tęstinumo perspektyva ir bandymų metodikų patobulinimo galimybėmis.

### **Praktinė nauda ir naujovės**

Pateiktas metodas padeda sumažinti susidūrimų ore tikimybę, nes šiuo atveju TCAS II RA ne tik sukuria, priima ar atmeta pasirinkimus, susijusius su orlaivio judėjimu vertikalėje, bet juos dar ir išanalizuoja ir tokiu būdu parenka optimalų susidūrimo išvengimo veiksmų planą (tiek vertikalėje, tiek ir horizontalėje). Sistema atpažįsta ne tik vertikalėje judantį orlaivį – ji geba sukurti veiksmų planą ir horizontalėje judančiam lėktuvui, o toks planas galėtų būti optimalus ir efektyvus.

Dabartinė TCAS II sistema eismo informacijos pranešimų zonoje (TA) tik informuoja orlaivio įgulą apie artėjantį orlaivį, tačiau jokių rekomendacijų arba reikalingų vengimo susidūrimo manevrų neišduoda.

Manevrų planas horizontalėje – visų itin pageidaujama sistemos funkcija. Remiantis Skrydžių valdymo tarnybos standartais, taikomais oro linijoms, orlaiviai vertikalėje vienas nuo kito turi būti nutolę mažiausiai per 1000–2000 pėdų, o horizontalėje – per 3–5 jūrmyles, antraip sistema nesugebės jų atskirti.

Jei orlaiviai vertikalėje juda per arti vienas kito, TCAS sistemos diktuojamų manevrų vertikalėje planas gali pastebimai skirtis nuo eismo kontrolės diktuojamų veiksmų sekos. Susiklosčius panašioms aplinkybėms horizontalėje, veiksmų planas dažniausiai nėra sutrikdomas. Be to, lakūnas, atlikdamas manevrą horizontalėje, įprastai mato artėjantį orlaivį, tačiau manevro vertikalėje atveju lakūnai artėjančio lėktuvo paprastai nepastebi.

Susidūrimo ore vengimo sistema – svarbi priemonė, užtikrinanti saugumą skrydžio metu. Viena iš priežasčių, užkertančių kelią nelaimei ore, – tikslus ir patikimas orlaivio stebėjimas, todėl būtina sukurti savarankišką ir patikimą stebėjimo sistemą, paremtą „oras-oras“ principu.

ADS-B/TCAS II sistema paremta originalia TCAS susidūrimo perspėjimo funkcija, integruota su ADS-B informacijos perdavimu. Pasitelkus esamą statistikos modelį ir sugretinus jį su duomenų algoritmais, integruota sistema gali optimaliau apskaičiuoti orlaivių kelius. Jungtinė sistema pagerina TCAS II sekimo tikslumą ir stebėjimo preciziškumą bei padidina susidūrimo išvengimo tikimybę. Ji taip pat geba atskirti orlaivius, judančius ne tik vertikalėje, bet ir horizontalėje.

Gautus duomenis ir rezultatus būtų galima pritaikyti kaip formuluojamas rekomendacijas tolesniam TCAS II sistemos patobulinimui.

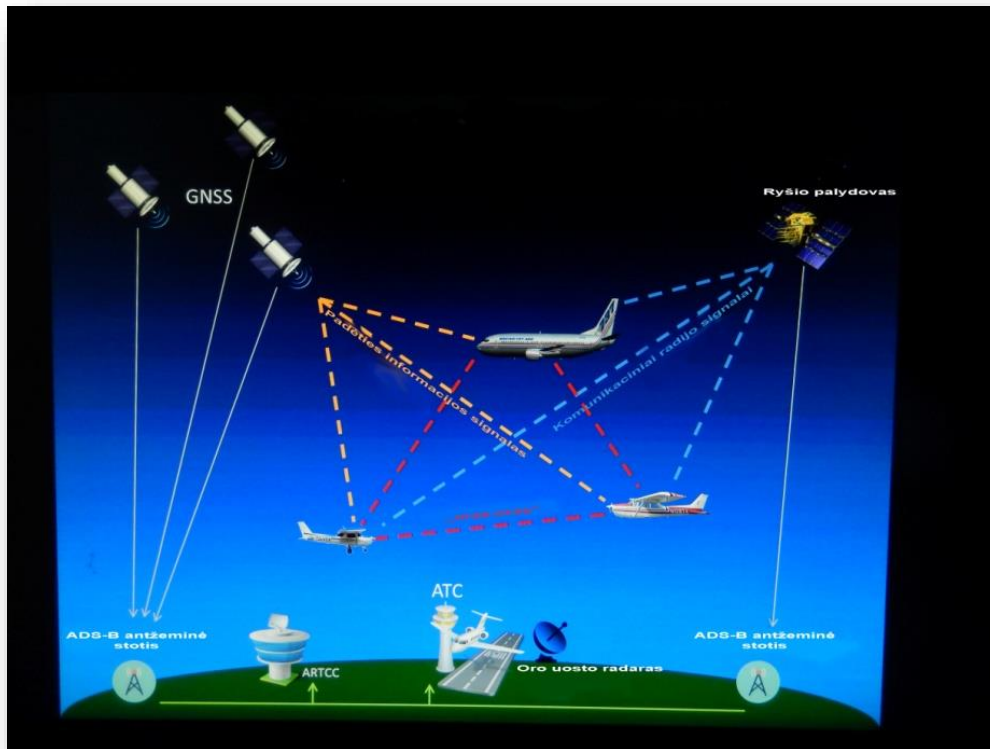
# **1 ADS-B ir TCAS II sistemų teorinės prielaidos**

## **1.1 ADS-B sistemos veikimo principas**

ADS-B sistema yra ateities oro transporto valdymo metodas. Apdorojant signalus, gautus iš GPS sistemos, skrydžių valdytojai gali daug tiksliau išlaikyti ir kontroliuoti judėjimą kontroliuojamoje oro erdvėje. Tai leidžia įgyvendinti mažesnius atstumus tarp orlaivių, suteikia daugiau galimybių tiesioginiam orlaivių valdymui tobulinti ir procedūrų modernizacijai atlikti. Visi šie privalumai galimi kai orlaiviai yra arti vienas kito visose skrydžio stadijose, įskaitant ir artėjimą, atvykimą ir išvykimą. Ši sistema modernizuos senstančią ir mažiau tikslią radarų stebėjimo sistemą visame pasaulyje (Vigier, 2011).

ADS-B sistema yra paremta duomenų perdavimu tarp orlaivio ir palydovo. Ši sistema pagal dvi pirmines funkcijas gali būti skirstoma į dvi dalis: ADS-B „Out“ ir ADS-B „In“. Orlaivyje įdiegtos ADS-B „Out“ funkcijos veikimo principas paprastas. Ji vieno lėktuvo padėties ir greičio duomenis, kuriuos pateikia GPS sistema skrydžių valdymo ir koordinavimo tikslais, per patobulintą ADS-B S režimo arba universalios priėmimo (UAT) atsakiklį, perduoda kitam lėktuvui, antžeminėms transporto priemonėms ir stotims. ADS-B „Out“ funkcija leidžia orlaiviui perduoti informaciją oro eismo kontrolės antžeminėms stotims ir kitam reikiama įranga aprūpintam orlaiviui. Lėktuvai, kuriuose veikia ADS-B „Out“ funkcija, automatiškai siunčia duomenis apie padėtį Skrydžių valdymo tarnybos antžeminėms stotims bei lėktuvams, aprūpintiems ADS-B „In“ funkcija (Team, 2014).

Automatinė priklausomo stebėjimo sistema (ADS-B) pateikia tikslesnį vaizdą, nes prisijungia prie palydovo, kuris siunčia informaciją radarui. ADS-B „Out“ signalas siunčiamas pasitelkus globaliosios pozicionavimo sistemos (GPS) technologija, kuri leidžia nustatyti orlaivio padėtį, greitį ir kitą informaciją. Tada informacija perduodama antžeminių stočių tinklui (stotys perduoda duomenis oro eismo radarams) ir ADS-B „In“ signalu pasiekia netoliese esančius, reikiama įranga aprūpintus orlaivius. Orlaivio, turinčio reikiamą įrangą šiam signalui priimti, pilotai tiesiai į kabiną gauna duomenis apie oro sąlygas ir kitų orlaivių padėtį ore. Numatyta, kad iki 2020 m. sausio 1 d. lėktuvai, skrendantys labiausiai reguliuojamose oro erdvėse – praktiškai ten pat, kur reikalaujama atsakiklius turėti ir šiandien – privalės turėti ADS-B „Out“ sistemą. Kol kas ADS-B „In“ sistemos naudojimas nėra privalomas (Federal Aviation Administration, 2014).



**3 pav.** ADS-B sistemos veikimo principas (LTD, 2013)

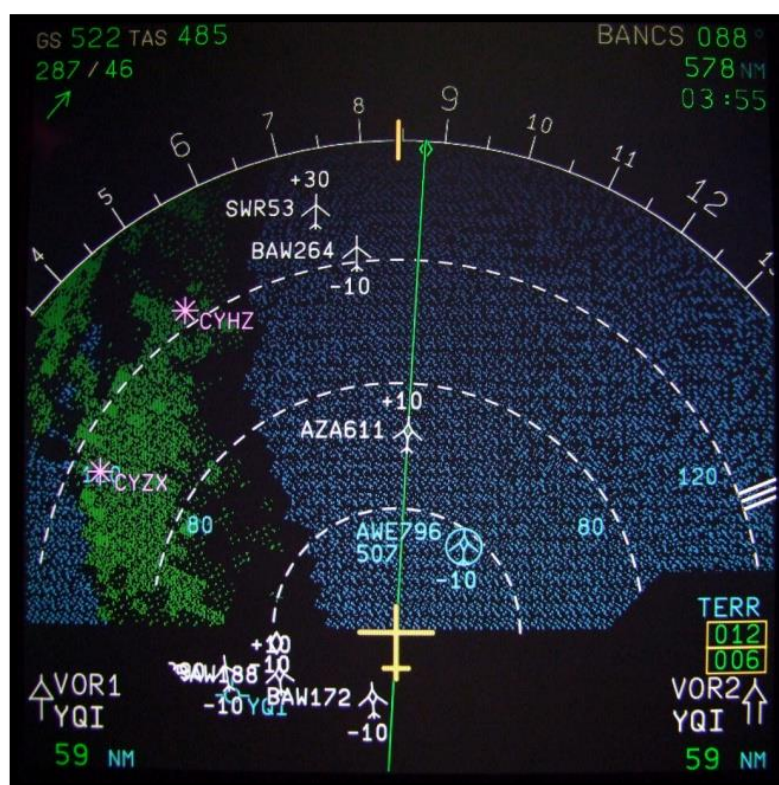
ADS-B „In“ ir „Out“ informacijos paketai yra išskirti į du skirtingus dažnių lygius:

- 1090 MHz – šį dažnį naudoja orlaiviai, turintys S režimo atsakiklius tik tokiu atveju, kai orlaiviuose yra sumontuota tam skirta įranga, pats atsakiklis gali veikti kaip ADS-B imtuvas siųstuvas.
- 978 MHz (tik FAA kontroliuojamoje erdvėje, bendrosios aviacijos orlaiviuose) – kartais dar vadinami universalios priėmimo atsakikliu, UAT šis dažnis rezervuotas orlaiviams, skraidantiems žemiau 180 skrydžio lygio. Šis dažnis turi didesnę pralaidumą nei 1090 MHz, taip pat jis yra mažiau perpildytas, todėl duomenys gali būti siunčiami orlaiviui iš antžeminių stočių patikimiau (Systems, 2009).

Orlaiviai, aprūpinti 1090 MHz dažnių išplėstinių pranešimų atsakikliais (ES) arba 978 MHz dažnių universaliais priėmimo imtuvais/siųstuvais (UAT) surenka informaciją iš orlaivyje įtaisytų FMS/GPS, inercinės atskaitos sistemos (IRS), erdvinės padėties ir kurso rodymo pamatinės sistemos (AHRS) bei oro erdvės sistemos (ADS) jutiklių ir duomenis perduoda signalu. Antžeminės stotys priima šiuos signalus ir sėkmingai persiunčia juos kitam orlaiviui, naudojančiam tiek 1090 MHz, tiek ir 978 MHz dažnių atsakiklius. Gauta informacija dar kartą apdorojama ir persiunčiama Skrydžių valdymo tarnybai. Informacija gali būti skelbiama internete skrydžio sekimo tikslais. Jeigu kiti orlaiviai yra aprūpinti tinkama įranga, jie šiuos signalus priima tiesiogiai. Ši paslauga vadinama eismo informacijos perdavimo paslauga (TIS-B). Dar viena paslauga, vadinama skrydžio informacijos perdavimo paslauga (FIS-B), lėktuvo įgulai grafiniu ir tekstiniu formatu teikia informaciją apie oro sąlygas kartu su

automatinės siųstuvų atpažinimo sistemos ATIS ir NOTAM duomenimis. Dažniausiai ši paslauga teikiama 978 MHz UAT atsakiklių režimu, nes dažnių aprėpties plotas daug didesnis. Prieš pradėdant naudotis FIS-B paslauga nereikia mokėti jokio abonementinio mokesčio, o orlaivio įgula gauna didesnę informacijos kiekį nei anksčiau, kai buvo naudojamos produktai, už kuriuos reikėdavo mokėti abonementą. Vienas iš tokių produktų – palydovinė oro sąlygų informavimo sistema (Team, 2014).

Senesniuose orlaiviuose daugiafunkcis ekranas teikia informaciją apie eismą kabinos ekranams (CDTI). Naujesni aviacijos elektronikos prietaisai visą šią informaciją gali be jokių kliūčių atvaizduoti elektroninės skrydžių valdymo sistemos (EFIS) ekrane. Vienoje vietoje yra rodomi dabartinių radarų ir FIS-B, TIS-B, vietovės bei transporto įspėjimo ir ore susidūrimo vengimo sistemos duomenys.



**4 pav.** Lėktuvo Airbus A320 navigacinis ekranas  
(Flickr, 2012)

Planuojama, jog iki 2025 metų ši stebėjimo sistema pakeis radarus, kaip pirminį stebėjimo metodą, skirta oro transportui valdyti. Ši sistema stipriai padidina saugumą aviacijos transporto sferoje. Ją naudojant stebėjimas yra abipusis – informacija apie aplinkoje esančius orlaivius gali matyti ne tik dispečeris, bet ir pilotas, tai yra didelis privalumas lyginant šią sistemą su senąja radarų sistema. Senoji radarų sistema galėjo atpažinti (matyti) orlaivius, tik turinčius suderintą borto įrangą, o su ADS-B sistema orlaivis gali matyti kitus orlaivius, netgi neturinčius ADS-B įrangos (Avionik, 2010).

## 1.2 TCAS II sistemos veikimo principas

TCAS II – visiškai nuo antžeminių stočių nepriklausoma Skrydžių valdymo tarnybos (ATC) sistema, laikoma atsargine priemone orlaivių susidūrimo tikimybei oro erdvėje mažinti. Kai toje pačioje oro erdvėje skrendantis orlaivis-įsibrovėlis laikomas rimta grėsme kitam toje pačioje oro erdvėje skrendančiam orlaiviui, TCAS II rekomenduoja atlikti nukreipiamąjį manevrą, o ši rekomendacija dar vadinama patariamuoju sprendimu (RA). Sistema pataria lėktuvą nukreipti aukštyn arba žemyn, arba leidžia išlaikyti esamą kursą.

Buvo priimtas sprendimas, jog susidūrimo ore vengimo sistema (TCAS) taps privaloma visiems pasaulyje skraidantiems dideliems komerciniams orlaiviams. Jie savarankiškai teiks papildomas saugumo paslaugas bei vykdys tas pačias procedūras, kaip ir Skrydžių valdymo tarnyba (ATC) ir gebės atskirti orlaivius. TCAS II sistema pasinaudoja ore skrendančių lėktuvų atsakikliais ir taip stebi orlaivių judėjimą. Jos veikimas pagrįstas loginėmis taisyklėmis, kurios teikia lakūnams pranešimus apie eismą ir patariamuosius sprendimus. Jau beveik du dešimtmečius veikianti TCAS II sistema gerokai sumažino orlaivių susidūrimo oro erdvėje riziką. Naujausias TCAS II sistemos atnaujinimas iki 7.1 versijos, bei jos įteisinimas truko beveik šešerius metus, nors pokyčiai buvo nežymūs. Oro erdvėje vykdomos procedūros nuolat plėtojamos, lėktuvo charakteristikos taip pat nuolat kinta, o tai reiškia, jog šį daug laiko reikalaujantį procesą dar teks pakartoti. Ateityje oro transporto maršrutams ir terminalų atskyrimo standartams taikomi reikalavimai bus sumažinti, o oro erdvėje bus integruotos naujos stebėjimo technologijos, tokios kaip automatinė priklausoma stebėjimo sistema (ADS-B) ir skraidys nepilotuojami orlaiviai. Integravus naujas stebėjimo sistemas ir iki tol nematytus orlaivius, specialistai, norėdami užtikrinti efektyvų TCAS II sistemos darbą, privalės nuolat peržiūrėti naudojamus logaritmus. TCAS II sistema besinaudojantys žmonės sutinka, jog ateityje susidūrimo išvengimo sistemas kuriančioms kartoms bus sunku užtikrinti pastovų logaritmų atnaujinimą (Kochenderfer, Holland, Oslon 2013).

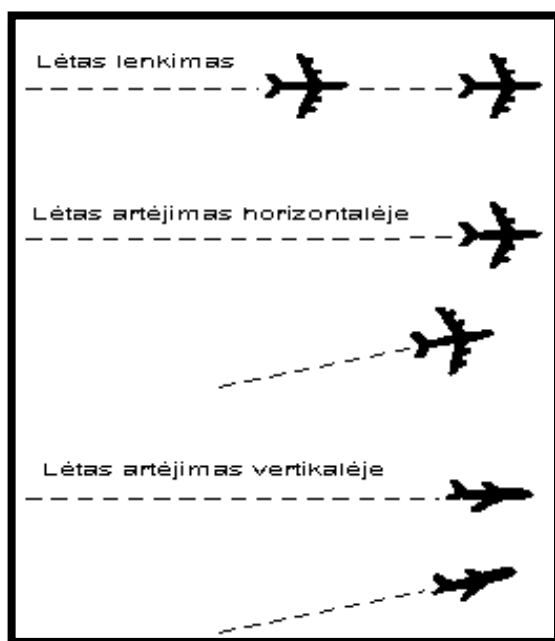
### 1.2.1 Paprastasis *Tau* kriterijus

Siekiant išvengti nelaimės, laikas, likęs iki artimiausio sąlyčio taško (CPA), yra daug svarbesnis, nei iki artimiausio sąlyčio taško esantis atstumas. 1956 m. šiai idėjai plėtoti buvo sukurtas *tau* metodas. Paprastąja  $t_{CPA}$  išreiškta apytikrė laiko, likusio iki artimiausio sąlyčio taško, reikšmė sekundėmis yra lygi įžambiajam nuotoliui  $r$  ir yra dalijama iš orlaivių santykinio greičio  $\dot{r}$  (Munoz†, Narkawicz, Chamberlain).



$$\tau_u = t_{CPA} = -\frac{r}{\dot{r}} \leq \tau; \quad (1)$$

Kita problema – pernelyg arti orlaivio atliekamas manevras, pavaizduotas 5 pav.. Objektas nepastebėtas galėtų prisiartinti pernelyg arti ir keltų rimtą pavojų, nepažeisdamas  $\tau$  laiko ribų ir nesužadindamas eismo informacijos pranešimo (TA) ar patariamąjo sprendimo (RA) išsiuntimo. Dėl šios priežasties  $\tau$  ribos yra kuo įmanoma labiau priartinamos prie orlaivio. Ši modifikacija privertė pakeisti  $\tau$  ir *Bramsono* kriterijų. Pastarieji yra integruojami į TCAS II sistemos logaritmus (Munoz†, Narkawicz, Chamberlain).



**5 pav.** Orlaivių lėtas tarpusavio artėjimas

Modifikuota Bramsono kriterijaus  $\tau$  laiko reikšmė:

$$\tau_b = -\frac{r - \frac{D_m}{r}}{\dot{r}} \leq \tau; \quad (2)$$

Bramsono kriterijų realizavimas buvo išbandytas kartu su TCAS/ACAS standartų bandymais.

### 1.2.2 Jautrumo lygis

Efektyvios susidūrimo eliminavimo sistemos loginės operacijos reikalauja, kad tarp nustatyto saugumo lygio užtikrinimo ir nebūtinų pranešimų siuntimo būtų rastas kompromisas. Tai gali būti pasiekta suregulius jautrumo lygį (SL), nuo kurio priklauso  $t_{CPA}$  ir tuo pačiu saugomos oro erdvės mastas aplink kiekvieną TCAS sistema aprūpintą orlaivį. Kuo didesnis jautrumo lygis nustatytas, tuo aukštesnis yra ir saugumo lygis. Tačiau aukštesnio saugumo lygio nustatymas gali padidinti avarių, įvykusių dėl nebūtinų perspėjimų siuntimo, skaičių.

**2 lentelė.** Laiko ir atstumų ribos pagal jautrumo lygį

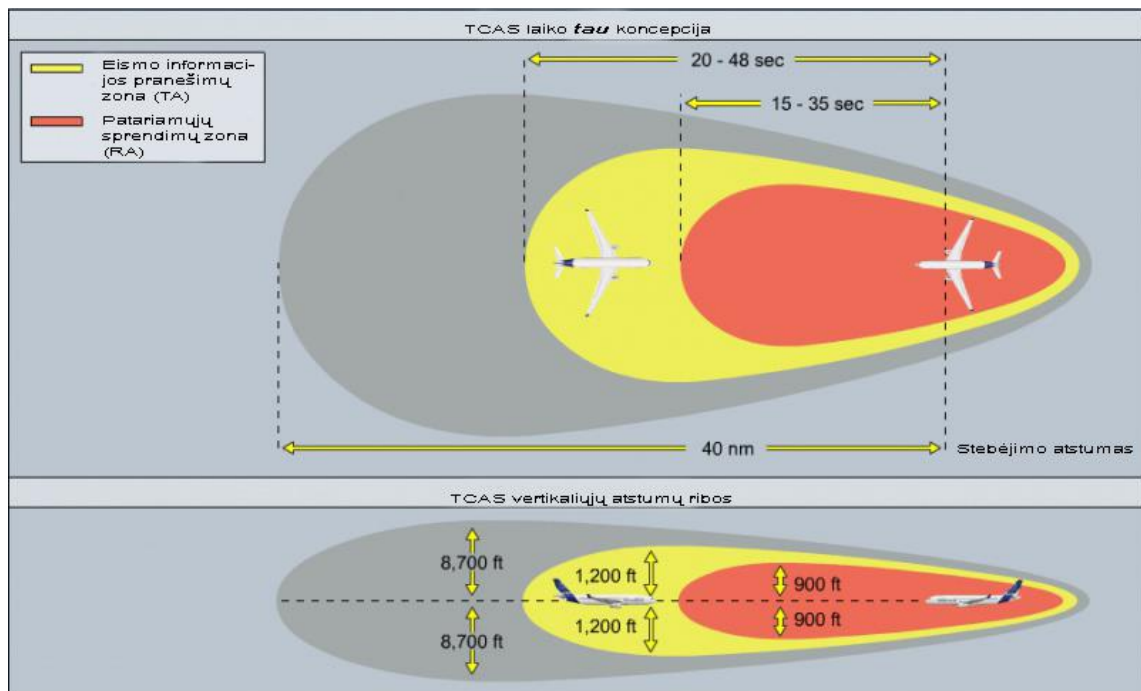
| Aukštis (pėdos)                   | Jautrumo lygis (SL) | Tau laikas (sekundės) |      | Atstumo riba $D_{MOD}$ (jūrmylės) |      | Aukščio riba $Z_{THR}$ (pėdos) |      | Saugus vertikalus atstumas $ALIM$ (pėdos) |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|------|-----------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------------------------|
|                                   |                     | TA                    | RA   | TA                                | RA   | TA                             | RA   | RA                                        |
| <1000 (virš žemės paviršiaus)     | 2                   | 20                    | Nėra | 0,30                              | Nėra | 850                            | Nėra | Nėra                                      |
| 1000–2350 (virš žemės paviršiaus) | 3                   | 25                    | 15   | 0,33                              | 0,20 | 850                            | 600  | 300                                       |
| 2350–5000                         | 4                   | 30                    | 20   | 0,48                              | 0,35 | 850                            | 600  | 300                                       |
| 5000–10000                        | 5                   | 40                    | 25   | 0,75                              | 0,55 | 850                            | 600  | 350                                       |
| 10 000–20 000                     | 6                   | 45                    | 30   | 1,00                              | 0,80 | 850                            | 600  | 400                                       |
| 20 000–42 000                     | 7                   | 48                    | 35   | 1,30                              | 1,10 | 850                            | 700  | 600                                       |
| >42 000                           | 7                   | 48                    | 35   | 1,30                              | 1,10 | 1200                           | 800  | 700                                       |

### 1.2.3 Saugomos oro erdvės plotas

Kiekvieną lėktuvą, kuriame įdiegta TCAS sistema, supa tam tikros apimties saugomos oro erdvės plotas. Ploto ribos nustatomos pagal anksčiau aprašytus  $\tau$  arba  $D_{MOD}$  kriterijus.

Kad būtų išsiųstas eismo informacijos pranešimas (TA), susidūrimo prie pat orlaivio ribų matmenys vertikalėje bei saugomos vertikalės erdvės ribos turi būti ne didesniame ar ne mažesniame kaip

1 200 pėdų aukštyje virš arba po pilotuojamu orlaiviu. Patariamųjų sprendimų atveju (RA), vertikalės matmenys svyruoja tarp 750 ir 950 pėdų, priklausomai nuo pilotuojamo lėktuvo aukščio režimo. Vertikalėje atstumui iki orlaivio stipriai svyruojant, eismo informacijos pranešimas arba patariamasis sprendimas bus išsiųstas tada, kai bendras aukščio rodiklis nukris žemiau jautrumo lygį rodančių *tau* reikšmių.



**6 pav.** TCAS laiko ir atstumų ribos (Le Forum Des Pilotes Privés, 2012)

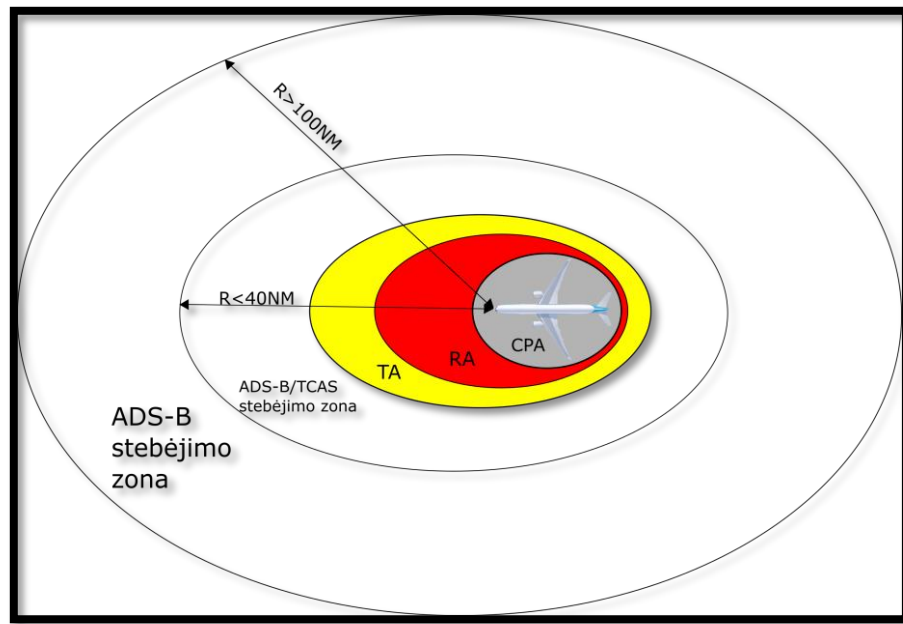
Horizontalės matmenys yra paremti ne tikrais atstumais, o laiko tarpu, likusiu iki susidūrimo su artimiausiu sąlyčio tašku. Taigi saugomos oro erdvės apimtis priklauso nuo orlaivio greičio ir krypties bei nustatyto jautrumo lygio. Iš esmės saugomos erdvės dalis panaši į perpus perpjautą sferą, kurios spindulys lygus didžiausiam atstumui, kokį orlaivis nuskristų per tą laiką, kai gautų eismo informacijos pranešimą.

### 1.3 Integruota ADS-B/TCAS II sistema

Integruota ADS-B/TCAS II stebėjimo sistema yra paremta originalia TCAS II sistemos susidūrimo vengimo funkcija. Ši integruota stebėjimo sistema slapta seka tikslinio orlaivio ADS-B sistemai perduodamą informaciją ir sugretindama TCAS II duomenis su ADS-B duomenimis, kad būtų kuo mažiau trukdoma radijo dažnių signalams, pagerina stebėjimo tikslumą ir praplečia šios technologijos galimybes. Integruota stebėjimo sistema kartu stebi TCAS II ir ADS-B sistemų darbą ir sugretina jų turimus duomenis pagal svertinio vidurkio principą. Integruota ADS-B/TCAS II stebėjimo sistema,

pasinaudodama TCAS II, gali sužinoti tikslinio orlaivio padėtį ir informaciją apie greitį tiesiogiai perduodamą iš ADS-B, nesiųsdama užklausų atsakikliui. Taigi, ši sistema sumažina TCAS II užklausų siuntimo dažnį, radijo dažnių trikdžius, prižiūri nepriklausomos TCAS II susidūrimo išvengimo sistemos darbą ir pagerina stebėjimo tikslumą (Xu, 2013).

Didžiausias TCAS II sistemos stebėjimo laukas lėktuvo priekyje siekia 40 NM, gale ir šonuose stebima zona yra mažesnė (žr. 7 pav.). ADS-B stebėjimo laukas siekia ne mažiau kaip 100 NM visomis kryptimis.



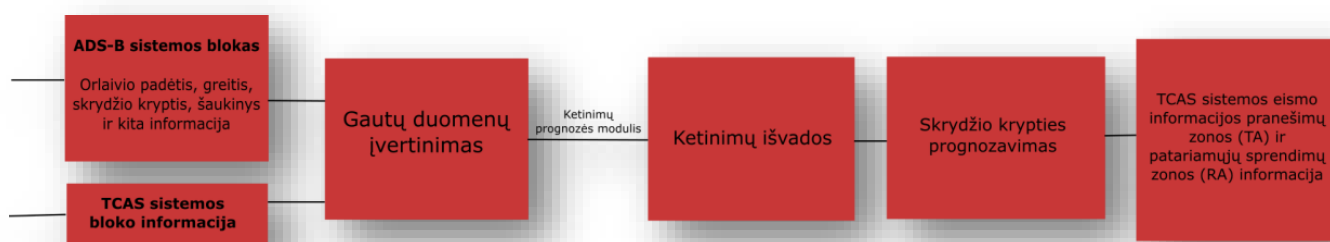
**7 pav.** ADS-B/TCAS stebėjimo erdvė horizontalėje (Xu, 2013)

Integruota ADS-B/TCAS II stebėjimo sistema skirstoma į dvi zonas: vien ADS-B sistemos stebimą zoną ir integruotos ADS-B/TCAS II sistemos stebėjimo zoną:

- Vien ADS-B stebima zona priklauso ADS-B sistemos stebimam plotui ir yra už TCAS II stebėjimo zonos ribų.
- Integruotos ADS-B/TCAS II sistemos stebėjimo plotas priklauso originaliai TCAS II sistemos stebėjimo zonai.

Vien ADS-B sistemos stebimoje zonoje ADS-B gali gauti duomenis apie tikslinio orlaivio padėtį ir greitį, siunčiamus tiesiogiai per šių tikslinių orlaivių ADS-B sistemas. Sistemos kompiuteris, pasinaudodamas šiais duomenimis, gali įvertinti tikslinio orlaivio būklę ir kelią. Pastarajam kirtus integruotos ADS-B/TCAS II sistemos stebėjimo zonos ribas, TCAS II pirmiausiai pradeda siųsti žemo dažnio užklausas kartą per 10 sekundžių. Šiame etape TCAS II duomenys naudojami ADS-B turimai

informacijai patvirtinti, tada palyginami su pastaruoju metu efektyviai panaudotais TCAS II ir ADS-B sistemų duomenimis, jie sugretinami ir galiausiai gaunamas sugretintas orlaivio kelias. Kai tikslinis orlaivis patenka į apsaugą, užtikrinančią TCAS II eismo informacijos pranešimų arba TCAS II patariamųjų sprendimų zoną, TCAS II sistema vėl grįžta prie įprasto dažnio užklausų siuntimo ir siunčia jas kartą per sekundę. Šiame etape sugretinami TCAS II ir ADS-B sistemų duomenys, tada atidžiai įvertinama tikslinio orlaivio būklės ir padėties informacija. Kitame žingsnyje tikslinio orlaivio padėties informacija perduodama sprendimų priėmimo programai, integruotai TCAS II. Tada TCAS II sistema skrydžio įgulai garso arba vaizdo išraiškos būdu pateikia patariamąjį susidūrimo išvengimo sprendimą (Xu, 2013).



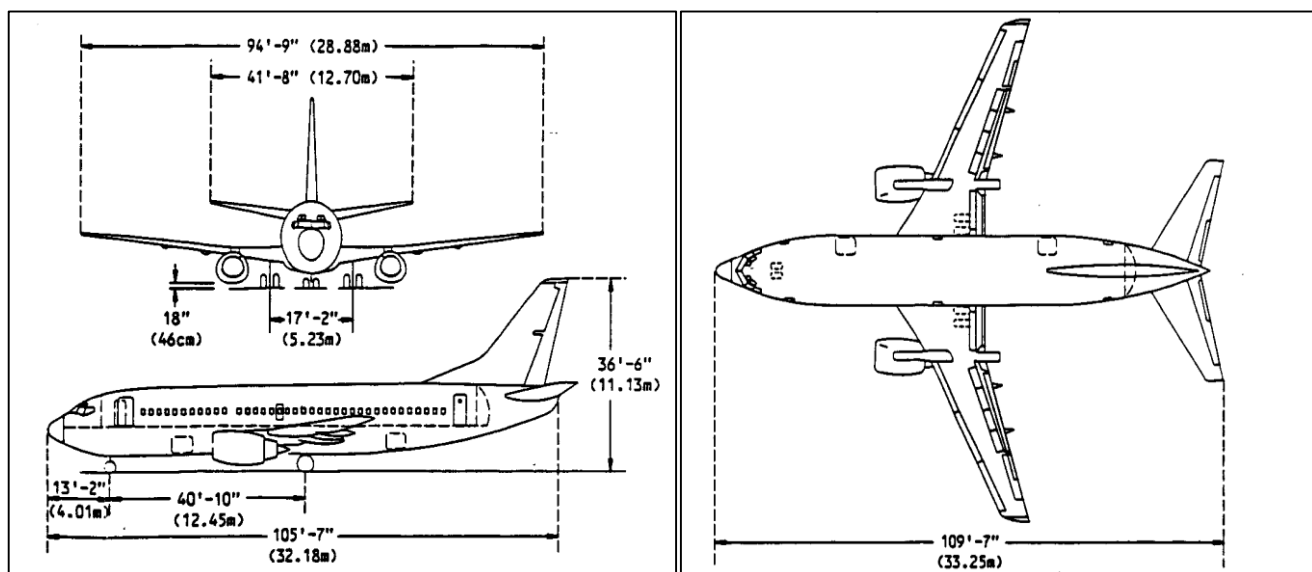
**8 pav.** ADS-B/TCAS II sistemos struktūrinė schema (Xu, 2013)

Šio modelio integruota ADS-B/TCAS II stebėjimo sistema galutinai sugretintus duomenis perduoda TCAS II sistemoje integruotai sprendimų priėmimo programai. ADS-B sistema naudojama tik kaip įvesties sąsaja išorinei TCAS II informacijai gauti. Taigi, TCAS II vis vien toliau vykdo savo pagrindinę funkciją – saugo nuo orlaivių susidūrimo. Sutrumpinta skrydžio kelio informacija ir apytikriai apskaičiuoto tikslinio orlaivio kelio informacija gali būti rodoma kabinoje įrengtuose skrydžio informacijos ekranuose (CDTI). Šiuose ekranuose informacija pateikiama tam tikrais simboliais. Skrydžio įgula, stebėdama skrydžio informacijos ekranuose (CDTI) pateikiamus rodmenis, gali vizualiai sekti tikslinio orlaivio judėjimą, tad esama situacija tampa aiškesnė, o susidūrimo išvengimas dar labiau palengvinamas.

## 2 Tiriamoji dalis

Tiriamosios dalies tikslui pasiekti buvo priimta, kad:

- Oro erdvėje skrenda 2 vienodo modelio orlaiviai. Nagrinėjamuoju atveju – „Boeing 737-500“ orlaiviai. Tiriamosios dalies atžvilgiu orlaivio tipas nėra svarbus. Svarbiau yra orlaivio dydis ir matmenys, nes orlaiviams prasilenkiant horizontalėje ir tokiam pačiame aukštyje, sparnų mojaus matmenys turės įtaką santykiniam atstumui tarp orlaivių.



9 pav. „Boeing 737-500“ matmenys (The Boeing Company, 2014)

- Orlaivių skrydžio greičiai yra nekintamo (t. y. pastovaus) dydžio:
  - Aukštyje 20 000–42 000 pėdų greitis 0,74 Macho skaičiaus.
  - Aukštyje 5000–10 000 pėdų greitis 250 mazgų. Pagal Federalinės aviacijos taisykles greitis žemiau 10 000 pėdų negali būti didesnis kaip 250 mazgų.
  - Aukštyje 1000–2350 pėdų virš žemės paviršiaus – greitis 180 mazgų. Kadangi tokiuose skrydžio aukščiuose orlaiviai dažniausiai yra artėjimui tūpti stadijoje, tai jų greitis turėtų būti mažinamas iki minimalaus leidžiamo. Kiekviena orlaivio įgula greitį pasirenka skirtingą. Nagrinėjamuoju atveju buvo pasirinktas tiesiog mažesnis už 250 mazgų greitis, tam, kad gautuose skaičiavimų rezultatuose būtų matomas skirtumas.
- Orlaivio maksimali pakilimo masė yra 56 472 kg (The Boeing Company, 2014).
- Orlaiviai skrenda tarptautinės standartinės atmosferos (ISA) sąlygomis. Oro temperatūra – 15°C ir atmosferos slėgis - 1013,25 hPA.
- Oro sąlygos:

- vėjas – 0 mazgų/s;
  - matomumas – neturi įtakos;
  - turbulencija – nėra turbulencijos;
  - debesuotumas – neturi įtakos;
  - krituliai – be kritulių;
  - debesys – nėra pavojingų apledėjimui ir turbulencijai debesų;
  - kalnai – orlaiviai skrenda nekalnuotoje vietovėje.
- Tiriamoji dalis atlikta remiantis matematiniais skaičiavimais, t. y. realus skrydis nebuvo atliktas.

## 2.1 Tiriamosios dalies skaičiavimo metodikos aprašymas

### 2.1.1 Kinematikos principas

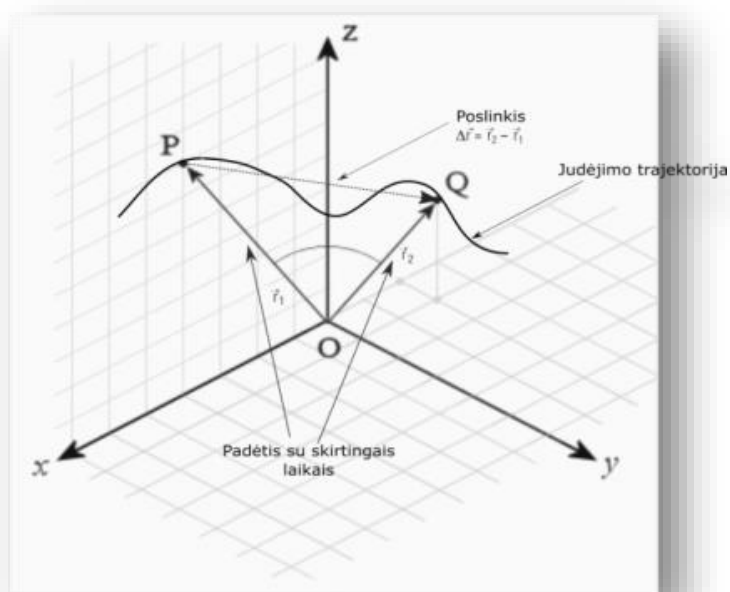
Kinematika – matematiškas judėjimo pavaizdavimas. Terminas kilęs iš graikų kalbos žodžio *kinema*, reiškiančio judėjimą. Judėjimui nustatyti naudojama matematinė koordinačių sistema, vadinama tiesiog koordinačių sistema, kuri padeda atvaizduoti erdvę ir laiką. Pasinaudojus koordinačių sistema, galima pateikti matematiškai tikslius padėties, greičio bei pagreičio duomenis (Van Ausdal, 2001).

#### 2.1.1.1 Padėties pasikeitimas

Nurodo objekto pajudėjimą tam tikru dydžiu. Poslinkiu yra vadinamas padėties pasikeitimas erdvėje:

$$\text{poslinkis} = \Delta \vec{r}; \quad (3)$$

Formulė (3) parodo padėties vektorių. Taikant tinkamą poslinkio apibrėžimą, galima teigti, kad poslinkis turi dydį ir kryptį. Reikia atkreipti dėmesį, kad poslinkis – atstumas ne išilgai judėjimo trajektorijos.



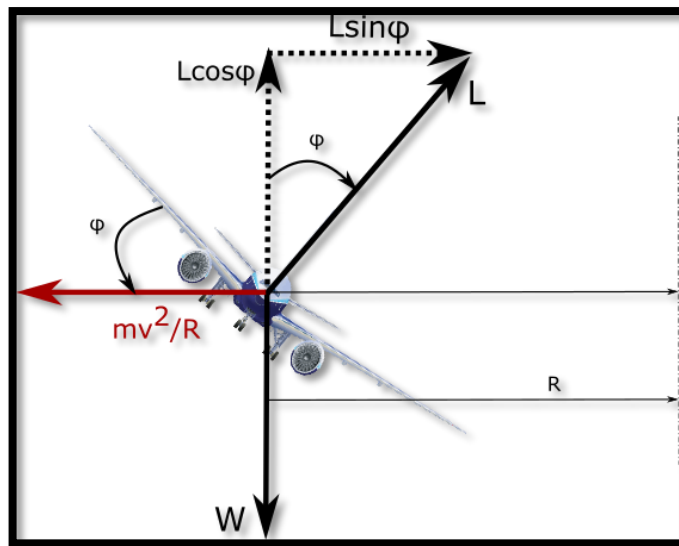
**10 pav.** Objektui judant, jo poslinkis – tai vektorius nuo pradinės iki galinės padėties

### 2.1.2 Skrydis posūkyje

Jeigu skrydis vyksta pastoviu greičiu, toks skrydis vadinamas stabiliu skrydžiu posūkyje. Jei skrydžio metu orlaivis išlieka pastoviam aukštyje, toks skrydis vadinamas tolygiu skrydžiu posūkyje. Jeigu orlaivis posūkį atlieka neslysdamas šonu, toks manevras vadinamas koordinuotu skrydžiu posūkyje. Atliekant koordinuotą skrydį posūkyje, orlaivio išilginė ašis visuomet sutampa su greičio vektoriumi. Kalbant apie stabilų, lygų, koordinuotą skrydį posūkyje, galima paminėti dar du aspektus:

- Įcentrinė jėga, reikalinga posūkiui atlikti, atsiranda pakreipus lėktuvo sparną. Pakilimo vektoriaus horizontalusis komponentas sukuria įcentrinę jėgą, o vertikalusis komponentas subalansuoja orlaivio svorį. Todėl pakilimo jėga, atliekant posūkį, yra didesnė už svorį.
- Orlaivis, atliekantis posūkį, visuomet slysta šonu. Norint, kad lakūnas skrydžio metu atliktų koordinuotą posūkį, jis, dėl anksčiau minėtų veiksnių, privalo mokėti tinkamai naudotis aukščio vairu ir vairalazde. Koordinuotas posūkis dar vadinamas „tinkamo pakrypimo posūkiu“. Šioje tyrimo dalyje bus pateikti tik su stabiliu ir koordinuotu skrydžiu posūkyje susiję svarstymai.





**11 pav.** Jėgos, veikiančios orlaivį posūkyje

11 pav. paaiškinimas:

- Įcentrinės jėgos matematinė formulės išraiška:

$$F_c = \frac{mv_{\infty}^2}{R}; \quad (4)$$

Čia:

$F_c$  – įcentrinė jėga;

$m$  – orlaivio masė;

$v$  – orlaivio greitis;

$R$  – posūkio spindulys.

- Apkrovos koeficientas yra apskaičiuojamas:

$$n = \frac{L}{W}; \quad (5)$$

Čia:

$n$  – apkrovos koeficientas;

$L$  – keliamoji jėga;

$W$  – svoris.

- Tolygaus skrydžio posūkyje apkrovos koeficientas:

$$W = L \cdot \cos\varphi; \quad (6)$$

Čia:

$\varphi$  – orlaivio posvyrio kampas.

- Įrašius (6) formulės išraišką į (5) formulę, gaunama:

$$n = \frac{1}{\cos\varphi}; \quad (7)$$

Kadangi reikšmė  $n$  yra  $\varphi$  kampo funkcija tik tolygaus skrydžio posūkyje. Tai tada:

$$\cos\varphi = \frac{1}{n}; \quad (8)$$

Čia:

$$1 \leq n \leq n_{max}.$$

Apkrovos koeficientas  $n$  negali būti viršijamas dėl to, kad orlaivis gali patirti struktūrinių pažeidimų. Todėl kiekvienam orlaiviui yra priskiriamas maksimalus apkrovos koeficientas, nuo kurio priklauso maksimalus posvyrio kampas ir orlaivio skrydžio charakteristika:

$$n_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{C_{Lmax}}{W/S}; \quad (9)$$

Čia:

$n_{max}$  – maksimalus apkrovos koeficientas;

$\rho$  – oro tankis;

$C_{Lmax}$  – maksimalus keliamosios jėgos koeficientas;

$S$  – orlaivio sparno plotas.

Iš aerodinamikos skrydžio principų žinoma, kad keliamosios jėgos koeficientas gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_L = \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot S} \cdot \frac{1}{v^2 \cdot \cos \varphi}; \quad (10)$$

Jėgos, veikiančios orlaivį atliekant stabilų, tolygų ir koordinuotą posūkį, pateiktos 11 pav.. Judėjimo formulės, naudojamos atliekant išvardintus posūkius, gaunamos suskirsčius veikiančias jėgas pagal tris kryptis, kuriomis jėgos bendrai sąveikauja:

- stabilaus skrydžio posūkyje metu:

$$T - D = 0; \quad (11)$$

- tolygaus skrydžio posūkyje metu:

$$W - L \cos \varphi = 0; \quad (12)$$

- koordinuoto skrydžio posūkyje metu, kas leidžia manyti, jog čia nesąveikauja netolygi šoninė jėga:

$$L \cdot \sin \varphi = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R}; \quad (13)$$

Čia:

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Pastebėjimai:

- Iš pateiktų (11), (12) formulių galima pastebėti, kad  $L = W / \cos \varphi$ , todėl posūkio metu  $L$  dydis didesnis už  $W$ . Dėl šios priežasties, oro pasipriešinimas tokio skrydžio metu bus didesnis, nei pastoviu greičiu atliekamo tolygaus skrydžio atveju. Apkrovos faktorius  $n$  lygus  $1 / \cos \varphi$  ir yra didesnis už 1.

- Iš pateiktų (12) ir (13) formulių galima matyti, kad posūkio spindulys  $R$  randamas:

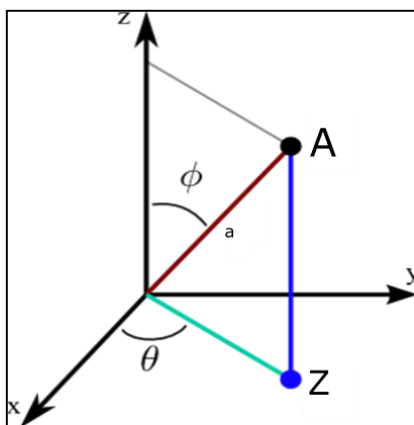
$$R = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{L \cdot \sin \varphi} = \frac{v^2}{g \cdot \tan \varphi}; \quad (14)$$

Žinant, kad  $\cos \varphi = \frac{1}{n}$ , tai  $\tan \varphi = \sqrt{n^2 - 1}$ . Tada gauname:

$$R = \frac{v^2}{g \cdot \sqrt{n^2 - 1}}; \quad (15)$$

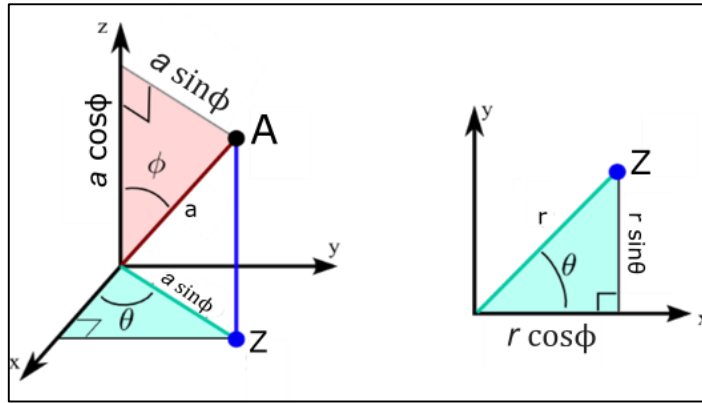
### 2.1.3 3D trajektorija

Orlaivis juda trimatėje skrydžio trajektorijoje, t. y. keičiasi ne tik skrydžio kryptis ir padėtis, bet ir gali keistis aukštis. Norint gauti orlaivio padėtį po tam tikro nuskrusto atstumo  $S$  per laiką  $t$ , skaičiavimus reiktų atlikti sferinėse koordinatėse vektorių pagalba. Sferinėmis koordinatėmis nustatoma trimačio taško padėtis trimatėje erdvėje. Taško padėtis pagrįsta  $a$  ir dviejų kampų  $\theta$  ir  $\phi$  atstumu nuo pirminio taško. Jei kurio nors iš dviejų kampų polinės koordinatės sutampa, tai reiškia, jog kampo  $\theta$  koordinatės bus tokios pat, kaip ir kampo  $\theta$  polinės koordinatės. Tačiau kai kam daug problemų kelia kampas  $\phi$ .



**12 pav.** Sferinės koordinatės

Sferinės koordinatės nustatomos taip, kaip parodyta 12 pav., kuriame pavaizduotos taško A sferinės koordinatės.  $a$  koordinatė žymi atstumą nuo taško A iki susikirtimo taško. Jeigu taškas Z yra taško A projekcija, atvaizduota  $xy$  plokštumoje, tuomet kampu  $\theta$  vadinamas kampas tarp teigiamos  $x$  ašies ir atkarpos, einančios nuo pradinio taško Z. Galiausiai, kampu  $\phi$  vadinamas kampas tarp teigiamos  $z$  ašies ir atkarpos, einančios nuo pradinio taško A.



**13 pav.** Taško A koordinačių nustatymas sferinėje koordinačių sistemoje

Pasitelkus trigonometriją, galima apskaičiuoti Dekarto koordinatėmis  $(x, y, z)$  pažymėto taško A santykį su sferinėmis koordinatėmis  $(a, \theta, \phi)$ . Viršuje rožine spalva pažymėtas trikampis vadinamas taisyklinguoju, o jo viršūnės yra taško A susikirtimo taškas. Taško projekcija atvaizduota ant  $z$  ašies. Kadangi įžambinės ilgį žymi  $a$ , o  $\phi$  žymi kampą, kurį įžambinė sudaro su taisyklingojo trikampio  $z$  ašies atrama, A taško  $z$  koordinatė (t. y. trikampio aukštis) yra  $z = a \cdot \cos \phi$ . Kitos taisyklingojo trikampio atramos ilgis žymi atstumą nuo taško A iki  $z$  ašies, kuris yra  $r = a \cdot \sin \phi$ . Z taško atstumas nuo susikirtimo taško yra vienodas.

Žalsvai mėlynas trikampis, pavaizduotas tiek originalioje trimatėje koordinačių sistemoje kairėje pusėje, tiek ir  $xy$  plokštumoje dešinėje pusėje, vadinamas taisyklinguoju, o jo viršūnės yra taško Z susikirtimo taškas. Taško projekcija atvaizduota ant  $x$  ašies. Taisyklingame brėžinyje atstumas, kuris taip pat žymi taisyklingojo trikampio įžambinės ilgį, nuo taško Z iki susikirtimo taško, paprasčiausiai pažymėtas  $r$ . Kadangi  $\theta$  žymi kampą, kurį įžambinė sudaro su  $x$  ašimi, taško Z  $x$ - ir  $y$ - komponentai (jie tokie patys, kaip ir taško A  $x$ - ir  $y$ - komponentai) nustatomi pagal formulę:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = r \cdot \sin \theta \\ r = a \cdot \sin \phi \end{cases} \quad (16)$$

Šiuos komponentus galima perrašyti taip:

$$x = a \cdot \sin \phi \cdot \cos \theta; \quad (17)$$

$$y = a \cdot \sin \phi \cdot \sin \theta; \quad (18)$$

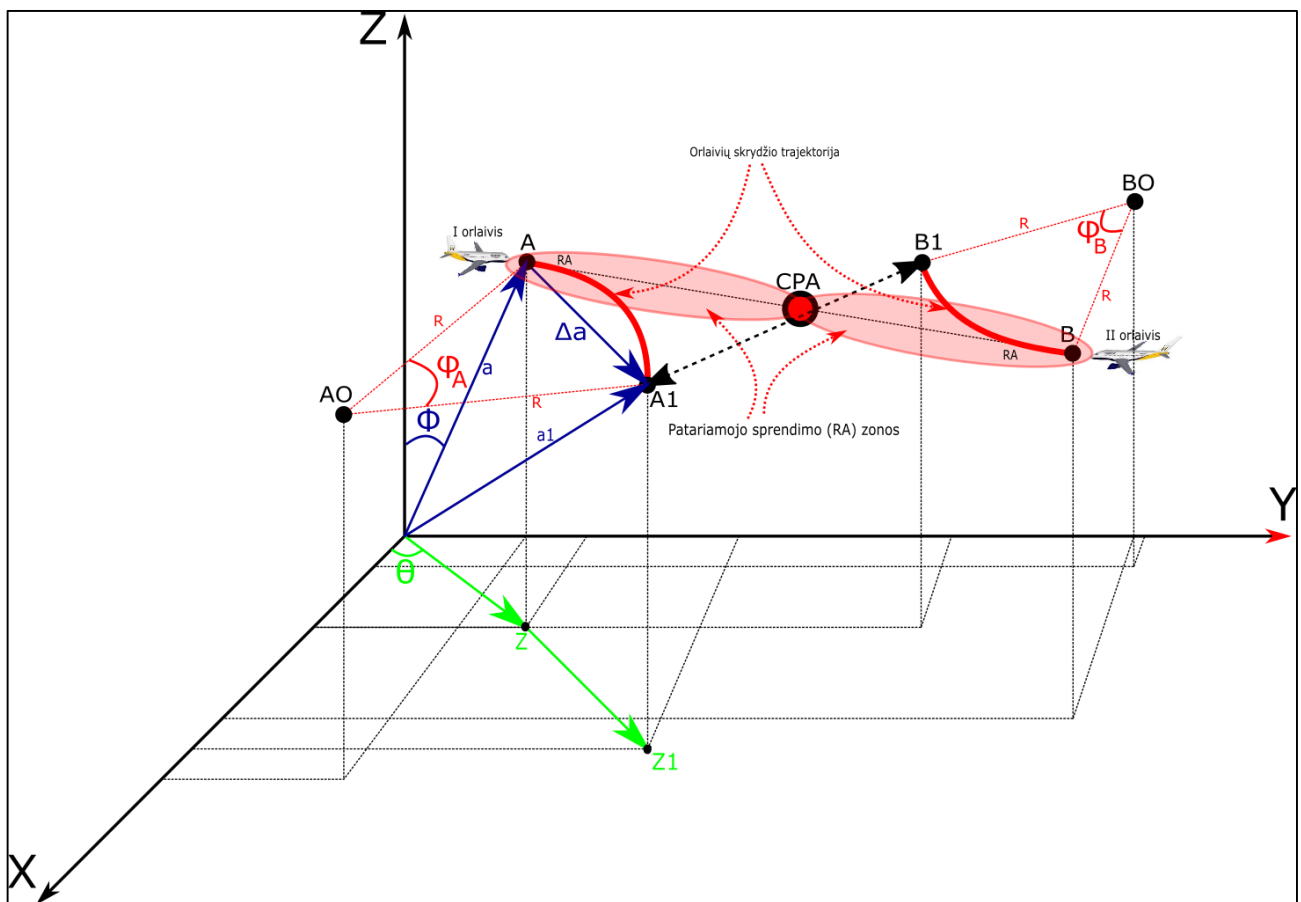
Taigi, galiausiai, Dekarto formulės, sferinių koordinačių atžvilgiu, yra:

$$\begin{cases} x = a \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ y = a \cdot \sin\phi \cdot \sin\theta ; \\ z = a \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (19)$$

Tokiu principu, žinant taško A pradinės koordinatės (taško A pradinės koordinatės nagrinėjamoju atveju gali būti pasirinktos bet kokios reikšmės) bei remiantis skaičiavimo ypatumais sferinėje koordinatinių sistemoje, lygčių pagalba, gali būti išvestos ir kitų reikalingų taškų koordinatės.

#### 2.1.4 Santykinio atstumo skaičiavimo principas patariamojo sprendimo zonoje (RA)

Tarkime A taško koordinatės yra  $A(x_A; y_A; z_A)$ . Šiame taške I orlaivis gautų, balso komandos pavidale, patariamąjį sprendimo manevrą (RA), kuris patartų I orlaiviui atlikti manevrą į dešinę ar tai kairę pusę. A taške, I orlaivis būtų nutolęs nuo CPA (t. y. artimiausio sąlyčio taško) per  $\tau$  laiką  $t_{CPA}$ . Analogiškai būtų nutolęs nuo CPA taško ir II orlaivis, nes B( $x_B; y_B; z_B$ ) taške, II orlaivis taip pat gautų patariamojo sprendimo balso komandą – atlikti manevrą į dešinę ar tai kairę pusę. Iš to nesudėtinga būtų apskaičiuoti B( $x_B; y_B; z_B$ ) taško koordinatės.



14 pav. Santykinio atstumo tarp orlaivių skaičiavimo principas sferinėje koordinatinių sistemoje

Iš anksčiau aptartų kinematikos ir skrydžio charakteristikos posūkyje principų galima apskaičiuoti taško  $A1(x_{A1}; y_{A1}; z_{A1})$  ir  $B1(x_{B1}; y_{B1}; z_{B1})$  koordinates. Žinant šių taškų koordinates – beliktų apskaičiuoti tik santykinį tarp orlaivių  $A1B1$  atstumą ( $\Delta S$ ), kuris mums ir parodytų, kiek efektyvus yra orlaivių išskyrimas horizontalėje.

#### 2.1.4.1 Taškų $A1$ ir $B1$ koordinačių nustatymas

Siekiant palengvinti skaičiavimus, taško  $A$  koordinatės buvo pasirinktos ašių susikirtimo taške, t. y.  $A(0;0;0)$ . Šiuo atveju orlaivių aukščiai nėra keičiami (skaičiavimus būtų galima atlikti dvimatėje Dekarto koordinačių sistemoje), bet tolesniems skaičiavimams reiktų atsižvelgti ir į kampo  $\phi$  pokytį (t. y. aukščio pokytį). Iš to galima sudaryti lygtis:

$$\begin{cases} x_B = x_A + t_{CPA} \cdot v_I \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta + t_{CPA} \cdot v_{II} \cdot \sin\phi \cdot \cos\alpha \\ y_B = y_A + t_{CPA} \cdot v_I \cdot \sin\phi \cdot \sin\theta + t_{CPA} \cdot v_{II} \cdot \sin\phi \cdot \sin\alpha ; \\ z_B = z_A + t_{CPA} \cdot v_I \cdot \cos\phi + t_{CPA} \cdot v_{II} \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (20)$$

Čia:

$\alpha$  – orlaivių artėjimo, išilginės ašies atžvilgiu, kampas;

$v_I$  – I-ojo orlaivio skrydžio greitis;

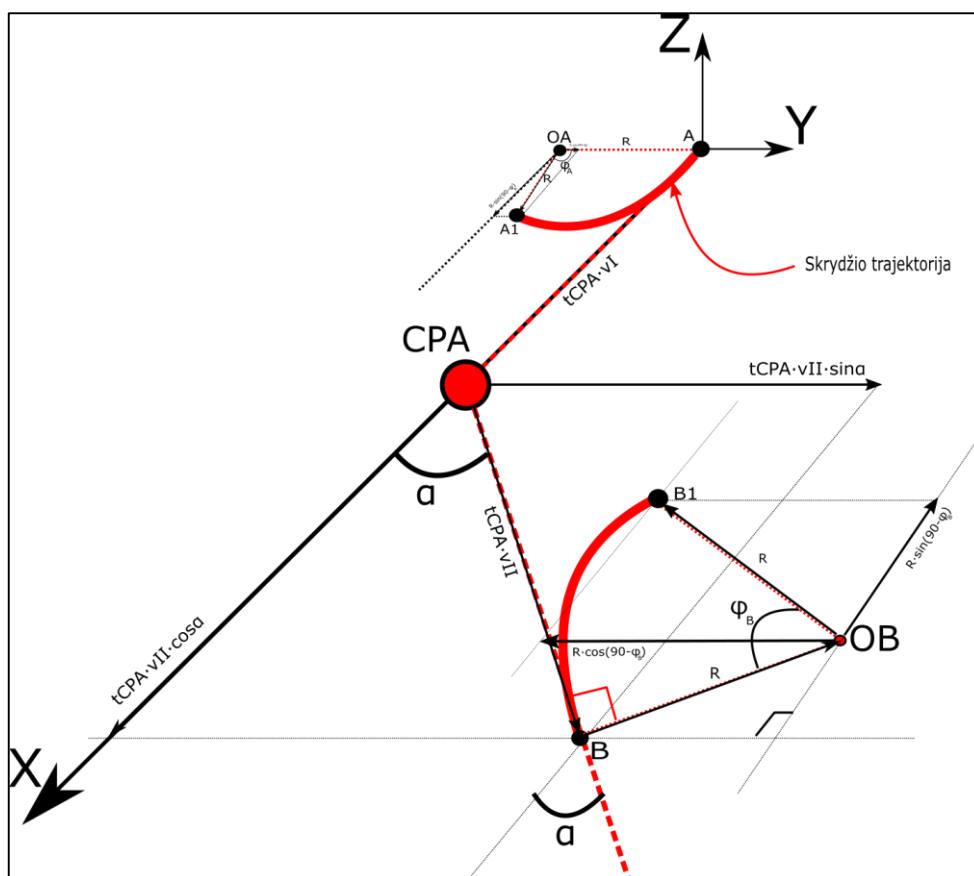
$v_{II}$  – II-ojo orlaivio skrydžio greitis;

$t_{CPA}$  – laikas iki artimiausio sąlyčio taško CPA.

Priimta, kad artėjantis II orlaivis artės link mūsų ne tik mums priešinga kryptimi, bet ir tam tikru artėjimo, orlaivių išilginės ašies atžvilgiu, kampu –  $\alpha$  (žr. 15 pav.).

Žinant, kad I orlaivis taške  $A$  suktų į tam tikrą reikiamą kryptį ir atliktų tolygų skrydžio posūkį su tam tikru posvyrio kampu  $\varphi$ , per laiką  $t_{CPA}$  nukeliautų tam tikrą atstumą iki taško  $A1$ . Aptarta, kad orlaivio posūkio spindulys gali būti rastas remiantis (15) formule. Apskaičiuojant orlaivio posūkio spindulį, galima būtų surasti orlaivio posūkio centro taško  $OA$  koordinates:

$$\begin{cases} x_{OA} = x_A + R \cdot \sin\phi \cdot \cos 90^\circ \\ y_{OA} = y_A - R \cdot \sin\phi \cdot \sin 90^\circ ; \\ z_{OA} = z_A + R \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (21)$$



**15 pav.** Taškų koordinacių nustatymas sferinėje koordinacių sistemoje

Galima pastebėti, kad skaičiuojant tašką OA yra priimta, kad I orlaivio skrydžio trajektorija pradiniam taške A yra statmena spinduliui, nubrėžtam į lietimosi tašką A.

Analogiški skaičiavimai atlikti ir taško OB koordinatėms nustatyti:

$$\begin{cases} x_{OB} = x_B - R \cdot \sin\phi \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \\ y_{OB} = y_B - R \cdot \sin\phi \cdot \sin(90^\circ - \alpha); \\ z_{OB} = z_B + R \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (22)$$

Turint orlaivių posūkio centrų taškų koordinates, galima būtų nustatyti kitų reikalingų taškų koordinates. A1 taško koordinatės:

$$\begin{cases} x_{A1} = x_{OA} + R \cdot \sin\phi \cdot \sin\varphi_A \\ y_{A1} = y_{OA} + R \cdot \sin\phi \cdot \cos\varphi_A; \\ z_{A1} = z_{OA} + R \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (23)$$

B1 taško koordinatės:



$$\begin{cases} x_{B1} = x_{OB} + R \cdot \sin\phi \cdot \sin(\varphi_B - \alpha) \\ y_{B1} = y_{OB} + R \cdot \sin\phi \cdot \cos(\varphi_B - \alpha); \\ z_{B1} = z_{OB} + R \cdot \cos\phi \end{cases} \quad (24)$$

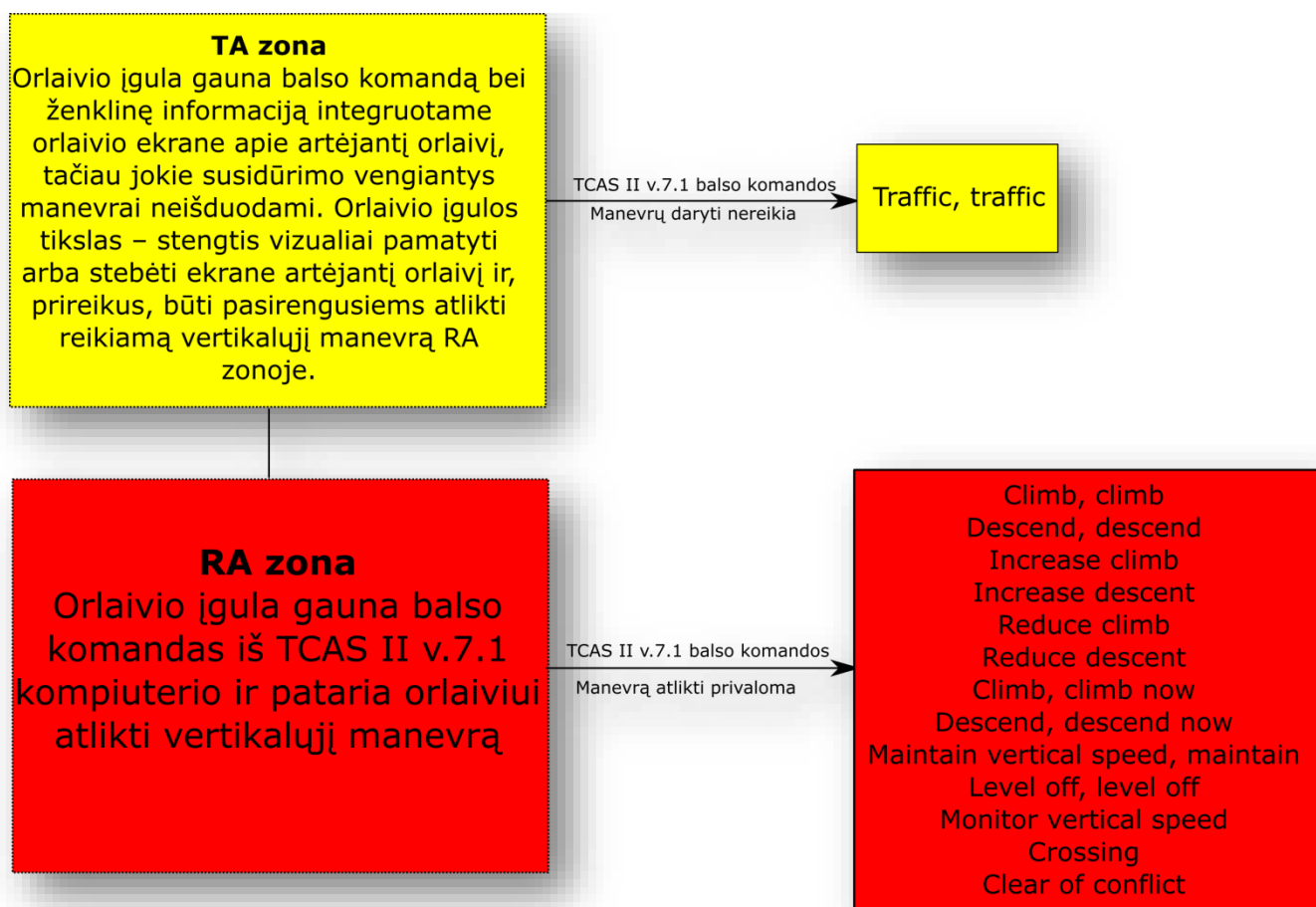
Santykinį atstumą tarp orlaivių arba tarp taškų A1 ir B1 galime rasti pagal formulę:

$$\Delta S = \sqrt{(x_{A1} - x_{B1})^2 + (y_{A1} - y_{B1})^2 + (z_{A1} - z_{B1})^2}; \quad (25)$$

## 2.2 Eismo informacijos pranešimo (TA) ir patariamąjo sprendimo (RA) balso komandos

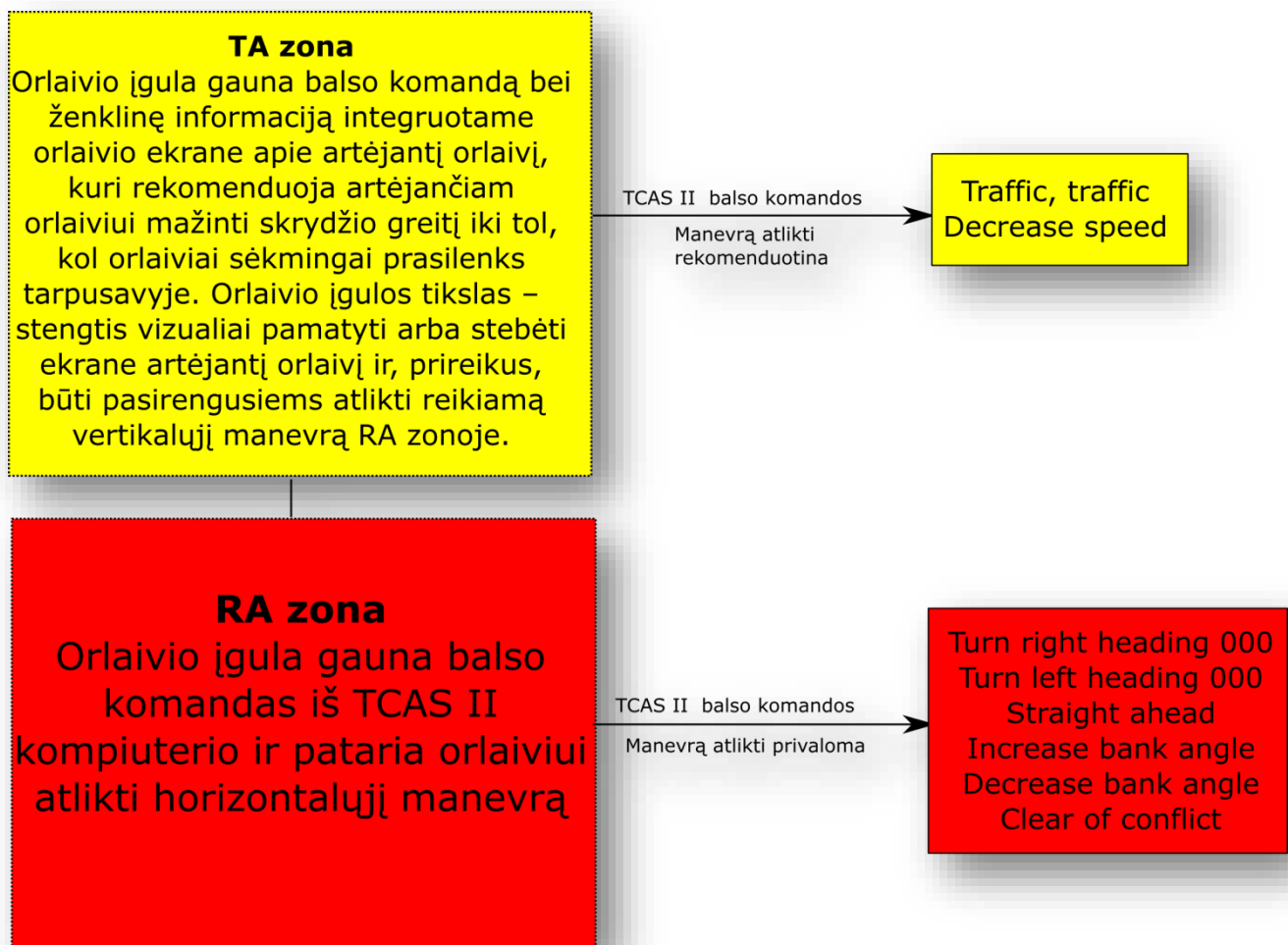
Dabar yra naudojama naujausia TCAS II v.7.1 versija, kuri patariamąjo sprendimo zonoje (RA) siunčia orlaivių įgulai tam tikras vertikalios balso komandas, tam, kad būtų išvengta susidūrimo tarp orlaivių, o eismo informacijos pranešimo zonoje (TA) – perspėjančią informaciją apie oro eismą, kur orlaivio įgula neprivalo daryti jokių manevrų, išskyrus – stebėti artėjantį orlaivį. Darbo režimu (t. y. suveikus TCAS II patariamajam sprendimui ir besiskiriant orlaiviams vertikalėje), susidūrimo ore vengimo sistema turėtų užtikrinti minimalų saugų atstumą tarp orlaivių, kuris yra tarp 300 ir 700 pėdų, priklausomai nuo jautrumo lygio (žr. 2 lentelę).

Toliau esančiame paveiksle yra pavaizduotos TCAS v.7.1 RA vertikalios balso komandos ir TA informuojančios balso komandos.



**16 pav.** TCAS II v.7.1, patariamąjį sprendimą (RA) ir eismo informacijos pranešimų (TA) vertikalios balso komandos

Siūlomos koncepcijos atveju RA ir TA balso komandos turėtų skirtis nuo dabartinės TCAS II versijos, nes manevrai būtų atliekami horizontalėje, o ne vertikalėje. Toliau esantis 17 pav. parodo siūlomos koncepcijos modelį. Palyginus 16 ir 17 pav. matyti, kad horizontaliųjų manevrų (t. y. balso komandų) yra gerokai mažiau, negu vertikalųjų, o pradėjus mažinti skrydžio greitį TA zonoje, būtų galimybė išvengti manevrų RA zonoje. Orlaiviams atsidurus RA zonoje būtų siunčiamos horizontaliųjų manevrų balso komandos. Norint sužinoti, kokią skrydžio kryptį išduos patariamąjį sprendimą (RA) patarėjas ir ar greičio mažinimas TA zonoje bus efektyvus, reikėjo atlikti tam tikrus matematinius skaičiavimus.



**17 pav.** TCAS II, patariamąjo sprendimo (RA) ir eismo informacijos pranešimų (TA) horizontalios balso komandos

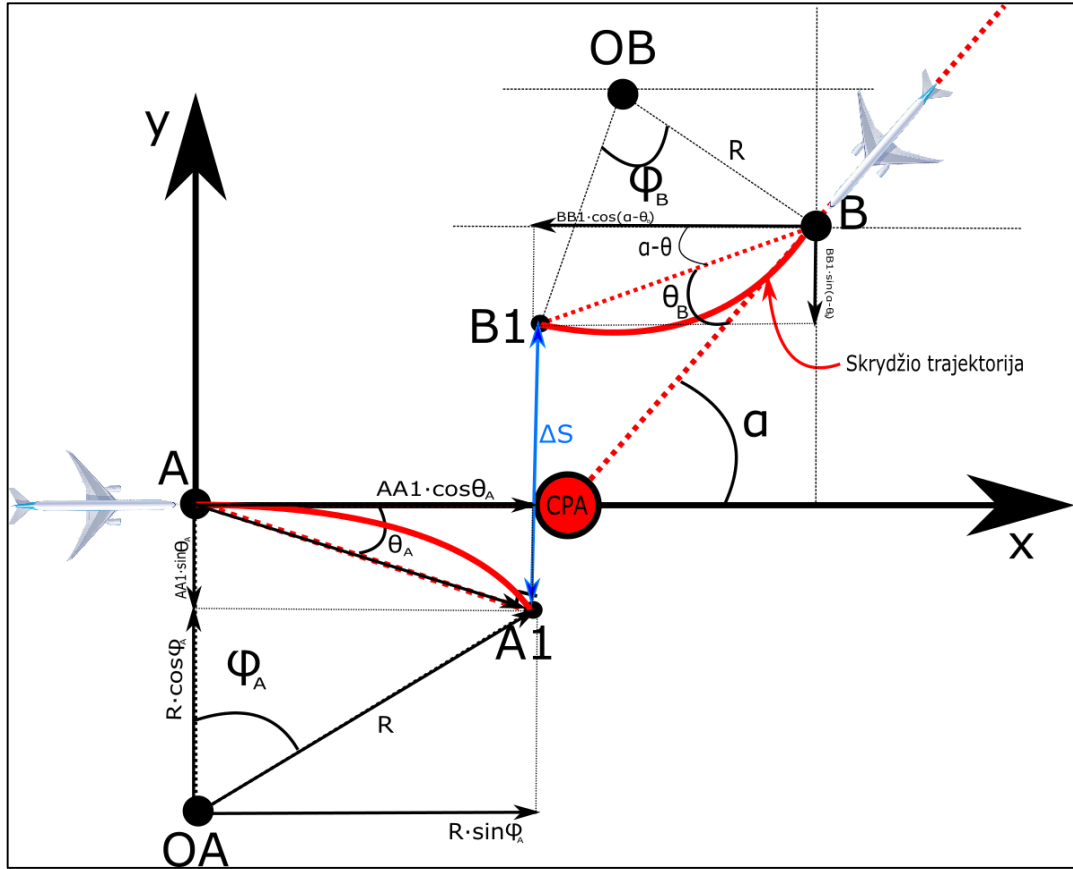
## 2.3 Patariamąjo sprendimo (RA) horizontalios skrydžio krypties balso komandos

### 2.3.1 Skrydžio kurso, kampo $\theta$ nustatymas

Suveikus patariamąjo sprendimo patarėjui (RA), orlaivio įgula turėtų gauti balso komandą, kuri patartų atlikti tam tikrą manevrą horizontalėje. Pvz.: TURN RIGHT HEADING 145.

Žinoma, kad taškų A1 ir B1 koordinatės nesikeis ir priklausys nuo  $\theta$  ir  $\varphi$  kampų reikšmių.

Tam, kad būtų lengviau viską suprasti, taškų koordinatės gali būti pavaizduotos  $xy$  plokštumoje, Dekarto koordinatėse (žr. 18 pav.). Kaip ir anksčiau buvo nagrinėta, A taško koordinatės yra  $xy$  ašių susikirtimo taške, taigi, visų taškų koordinatės yra randamos tokiu pačiu principu kaip ir jau nagrinėtame santykinio atstumo tarp orlaivių skaičiavimo metodikos skyriuje.



**18 pav.** Kampų  $\theta_A$  ir  $\theta_B$  skaičiavimo principas Dekarto koordinatėse

Turint visas reikalingas taškų koordinates, galima išvesti formules  $\theta_A$  ir  $\theta_B$  kampams skaičiuoti:

$$\begin{cases} x_{A1} = x_{OA} + \sin\varphi_A \cdot R; \\ y_{A1} = y_{OA} + \cos\varphi_A \cdot R; \end{cases} \quad (26)$$

Taip pat A1 taško koordinates galima rasti remiantis  $\theta_A$  kampo reikšme:

$$\begin{cases} x_{A1} = x_A + \cos\theta_A \cdot AA1; \\ y_{A1} = y_A - \sin\theta_A \cdot AA1; \end{cases} \quad (27)$$

Iš apskritimo atkarpų savybių žinoma, kad apskritimo stygos ilgis yra lygus:

$$AA1 = 2 \cdot R \cdot \sin\varphi_A; \quad (28)$$

Sulyginus (26) ir (27) formules gauta:

$$\cos\theta_A = \frac{x_{OA}-x_A+\sin\varphi_A\cdot R}{2\cdot R\cdot\sin\varphi_A}; \quad (29)$$

$$\sin\theta_A = \frac{y_A-y_{OA}-\cos\varphi_A\cdot R}{2\cdot R\cdot\sin\varphi_A}; \quad (30)$$

Panašiu skaičiavimo principu buvo rasta kampo  $\theta_B$  reikšmė:

$$x_{B1} = x_{OB} + R \cdot \sin(\varphi_B - \alpha); \quad (31)$$

$$y_{B1} = y_{OB} + R \cdot \cos(\varphi_B - \alpha); \quad (32)$$

Arba:

$$x_{B1} = x_B - \cos(\alpha - \theta_B) \cdot BB1; \quad (33)$$

$$y_{B1} = y_B - \sin(\alpha - \theta_B) \cdot BB1; \quad (34)$$

Sulyginus (31), (32), (33), (34) formulių reikšmes gauta:

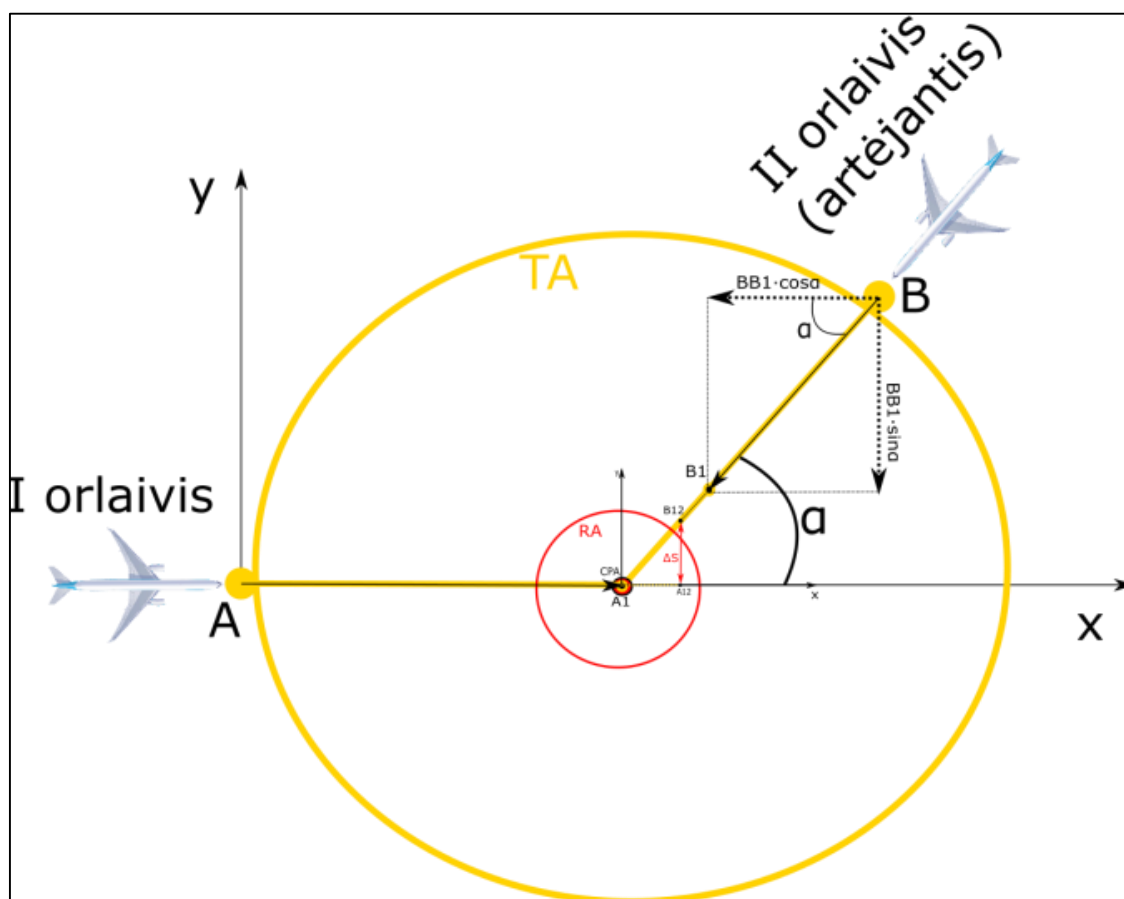
$$\cos(\alpha - \theta_B) = \frac{x_B - x_{OB} - R \cdot \sin(\varphi_B - \alpha)}{2 \cdot R \cdot \sin\varphi_B} \quad (35)$$

$$\sin(\alpha - \theta_B) = \frac{y_B - y_{OB} - R \cdot \cos(\varphi_B - \alpha)}{2 \cdot R \cdot \sin\varphi_B} \quad (36)$$

Iš ADS-B sistemos žinodami tikslią orlaivio skrydžio kryptį (taip pat ir kitus reikalingus skrydžio parametrus) bei TCAS II kompiuteriui apskaičiavus  $\theta_A$  ir  $\theta_B$  reikšmes, orlaiviai privalėtų atlikti reikiamą manevrą horizontalėje, nukrypstant tam tikra skrydžio kryptimi (t. y. skrydžio kursu) ir sugrįžti atgal į skrydžio trajektoriją tik tada, kai gautų balso komandą apie saugų sugrįžimą į prieš tai buvusią skrydžio trajektoriją.

## 2.4 Greičio mažinimo efektyvumas eismo informacijos pranešimų (TA) zonoje

Siūlomo metodo atveju artėjančiam orlaiviui siūloma TA zonoje pradėti mažinti skrydžio greitį iki tol, kol sėkmingai prasilenks su kitu orlaiviu. Dideliems orlaiviams, dėl savo inercinio momento sudėtinga yra greitai sumažinti skrydžio greitį, tačiau, priimta, kad dideli orlaiviai letėja 1 mazgu per sekundę. TA zonos suveikimo laikas, taip pat kaip ir RA zonos suveikimo laikas, priklauso nuo jautrumo lygio. Galima numatyti, kuo TA zonos  $\tau$  laikas yra didesnis, tuo orlaivis turės daugiau laiko greičio mažinimui. Suveikus eismo informacijos pranešimui (TA), artėjantis orlaivis (II orlaivis) gautų rekomendaciją apie greičio mažinimą (žr. 19 pav.). Pradėjęs mažinti skrydžio greitį, II orlaivis per  $\tau$  laiką sumažintų tam tikrą greitį.



19 pav. Eismo informacijos pranešimų zonoje II orlaivis pradeda mažinti skrydžio greitį

BB1 atkarpoje, žinant pradinį II orlaivio ir galutinį greičius, galima apskaičiuoti vidutinį BB1 atkarpos greitį:

$$v_{vid.} = \frac{v_{II_B} + v_{II_{B1}}}{2}; \quad (37)$$

Čia:

$v_{II_B}$  – II orlaivio greitis B taške;

$v_{II_{B1}}$  – II orlaivio greitis B1 taške.

Iš to galima apskaičiuoti BB1 atkarpos nuskristą atstumą:

$$BB1 = v_{vid.} \cdot t_{CPA(TA)}; \quad (38)$$

Čia::

$t_{CPA(TA)}$  – tau laikas iki artimiausio sąlyčio taško TA zonoje;

$BB1$  – nuskristas II orlaivio atstumas.

B1 ir A1 taškų koordinatų nustatymui buvo naudojama prieš tai jau nagrinėta taškų koordinatų skaičiavimo koncepcija:

$$\begin{cases} x_{B1} = x_B - \cos\alpha \cdot BB1 \\ y_{B1} = y_B - \sin\alpha \cdot BB1 \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} x_{A1} = x_A + \cos 0^\circ \cdot AA1 \\ y_{A1} = y_A + \sin 0^\circ \cdot AA1 \end{cases} \quad (40)$$

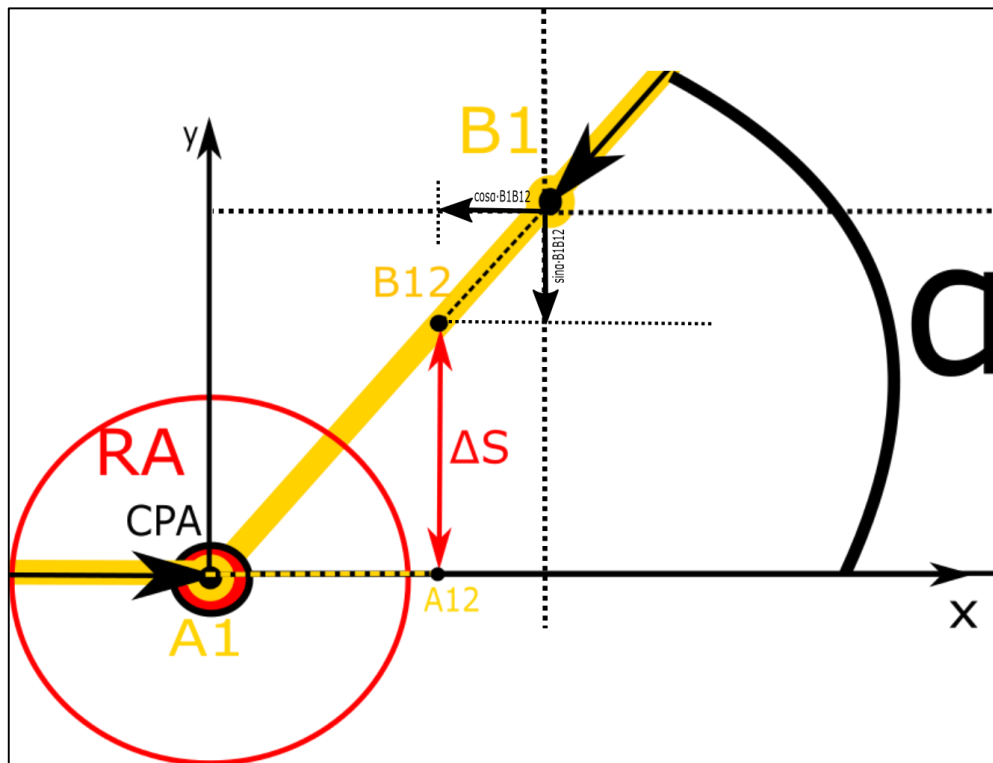
II orlaiviui (t. y. artėjančiam orlaiviui) pradėjus mažinti skrydžio greitį, būtų galima išvengti horizontaliųjų arba vertikalųjų manevrų patariamojo sprendimo (RA) zonoje. Nagrinėjamoju atveju reiktų atsižvelgti ir į santykinį atstumą tarp orlaivių, kuris užtikrintų saugų minimalų atstumą tarp orlaivių, todėl reikėjo atlikti tam tikrus matematinius skaičiavimus.

#### 2.4.1 Santykinis atstumas tarp orlaivių

##### 2.4.1.1 Santykinio atstumo tarp orlaivių nustatymas, kai orlaivių aukščiai yra pastovūs

Iš toliau pateikto 20 pav. matyti, kad A1B1 atstumas (atkarpa) turėtų užtikrinti mums saugų minimalų atstumą, tačiau žinoma, kad orlaiviai ir toliau tęsia skrydį savo skrydžio trajektorija. Santykinio

Norint sužinoti santykinį atstumą tarp orlaivių, reiktų apskaičiuoti A12B12 atkarpos atstumą.



Apskaičiuota susitikimo laiko reikšmė (angl. *time to meet*), kur orlaiviai priartėtų arčiausiai vienas kito atžvilgiu:

Čia:

$v_I$  – I orlaivio greitis.

$$\begin{cases} x_{B12} = x_{B1} - \cos\alpha \cdot B1B12 \\ y_{B12} = y_{B1} - \sin\alpha \cdot B1B12 \end{cases}; \quad (42)$$



Čia:

$B1B12$  – II orlaivio nukeliamas atstumas greičiu  $v_{II_{B1}}$  per laiką  $t$ .

Taško A12 koordinatės:

$$\begin{cases} x_{A12} = x_{A1} + \cos 0^\circ \cdot A1A12; \\ y_{A12} = y_{A1} + \sin 0^\circ \cdot A1A12; \end{cases} \quad (43)$$

Čia:

$A1A12$  – I orlaivio nukeliamas atstumas greičiu  $v_I$  per laiką  $t$ .

Nagrinėjamoju atveju abu orlaiviai artėja vienas prie kito tame pačiame aukštyje (t. y. orlaivių aukščiai nekinta). Tačiau gali pasitaikyti, kad orlaiviai artės prie CPA taško ne tik iš skirtingų skrydžio kryptų, bet ir aukščių. Kadangi kylantiems ar tai besileidžiantiems orlaiviams greičio mažinimas nėra aktualus, nes kylančiam orlaiviui yra pavojinga staigiai mažinti greitį, dėl to, kad gali būti pasiektas smukos greitis, o žemėjančiam orlaiviui bus sudėtinga efektyviai sumažinti skrydžio greitį, todėl buvo išnagrinėtas atvejis, kai vienas orlaivis skrenda horizontu, o artėjantis link jo, kyla arba leidžiasi.

#### 2.4.1.2 *Santykinio atstumo tarp orlaivių nustatymas, kai artėjantis orlaivis aukštėja arba žemėja*

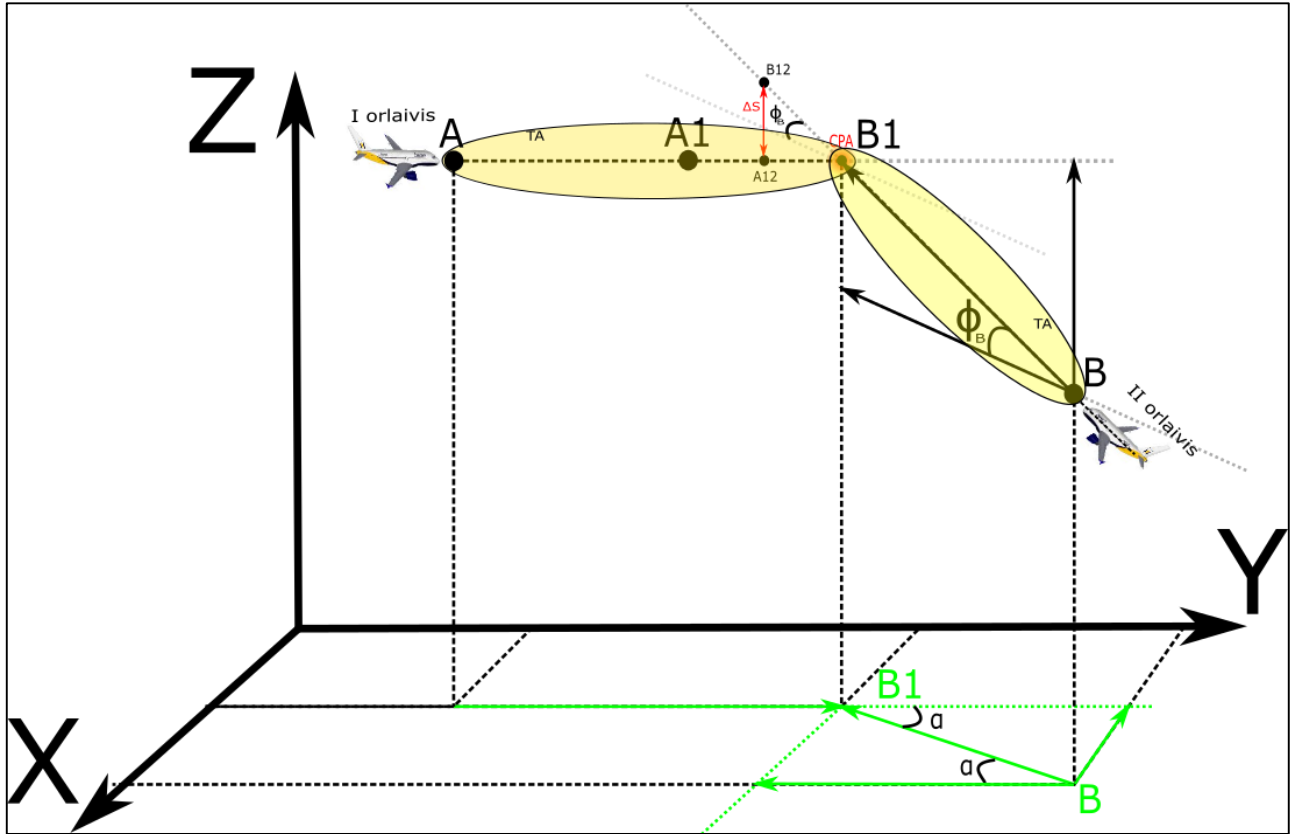
Šiuo atveju, norint sužinoti santykinį atstumą tarp orlaivių (t. y. A12B12 atkarpos atstumą) reikėjo atsižvelgti į kylančio orlaivio (II orlaivio)  $\phi_B$  kampą (t. y. aukščio pokyčio kampą per tam tikrą laiką). Buvo išvestos lygtys B taško koordinatės nustatyti:

$$\begin{cases} x_B = x_A + v_{I_{pradinis}} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin 0^\circ \cdot \cos 0^\circ + v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \phi_B \\ y_B = y_A + v_{I_{pradinis}} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \cos 0^\circ \cdot \cos 0^\circ + v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \phi_B; \\ z_B = z_A + v_{I_{pradinis}} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin 0^\circ - v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin \phi_B \end{cases} \quad (44)$$

Čia:

$v_{I_{pradinis}}$  – pradinis I orlaivio greitis;

$v_{II}$  – II orlaivio greitis.



**21 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių nustatymas, kai artėjantis orlaivis (II orlaivis) aukštėja

Per laiką  $t_{CPA(TA)}$  orlaiviai nukeliautų tam tikrą atstumą. Kadangi I orlaivis pradėtų mažinti savo skrydžio greitį, tai jo nukeliamas atstumas būtų AA1, o II orlaivis per laiką  $t_{CPA(TA)}$  nukeliautų BB1 atstumą ir atsikurtų CPA taške:

$$\begin{cases} x_{A1} = x_A + v_{vid.} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin 0^\circ \cdot \cos 0^\circ \\ y_{A1} = y_A + v_{vid.} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \cos 0^\circ \cdot \cos 0^\circ; \\ z_{A1} = z_A + v_{vid.} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin 0^\circ \end{cases} \quad (45)$$

Vidutinis I orlaivio greitis atkarpoje AA1:

$$v_{vid.} = \frac{v_{IA} + v_{IA1}}{2}; \quad (46)$$

Čia:

$v_{IA}$  – pradinis I orlaivio greitis taške A;

$v_{IA1}$  – I orlaivio greitis A1 taške.

Analogiškai buvo rastos B1 koordinatės:

$$\begin{cases} x_{B1} = x_B - v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\phi_B \\ y_{B1} = y_B - v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\phi_B; \\ z_{B1} = z_B + v_{II} \cdot t_{CPA(TA)} \cdot \sin\phi_B \end{cases} \quad (47)$$

Iš 21 pav. matoma, kad A1B1 atkarpos atstumas yra didesnis negu A12B12 atkarpos atstumas ( $\Delta S$ ). Svarbiau yra žinoti A12B12 atkarpos atstumą, kuris užtikrintų minimalų saugų atstumą tarp artėjančių orlaivių. Per tam tikrą laiką  $t$  orlaiviai prasilenktų A12B12 atstumu:

$$t = \frac{x_{B1} - x_{A1}}{v_{vid.} + \cos\phi_B \cdot v_{II}}; \quad (48)$$

A12 ir B12 taškų koordinatės:

$$\begin{cases} x_{B12} = x_{B1} - v_{II} \cdot t \cdot \sin\alpha \cdot \cos\phi_B \\ y_{B12} = y_{B1} - v_{II} \cdot t \cdot \cos\alpha \cdot \cos\phi_B; \\ z_{B12} = z_{B1} + v_{II} \cdot t \cdot \sin\phi_B \end{cases} \quad (49)$$

Taško A12 koordinačių lygtis:

$$\begin{cases} x_{A12} = x_{A1} + v_{IA1} \cdot t \cdot \sin 0^\circ \cdot \cos 0^\circ \\ y_{A12} = y_{A1} + v_{IA1} \cdot t \cdot \cos 0^\circ \cdot \cos 0^\circ; \\ z_{A12} = z_{A1} + v_{IA1} \cdot t \cdot \sin 0^\circ \end{cases} \quad (50)$$

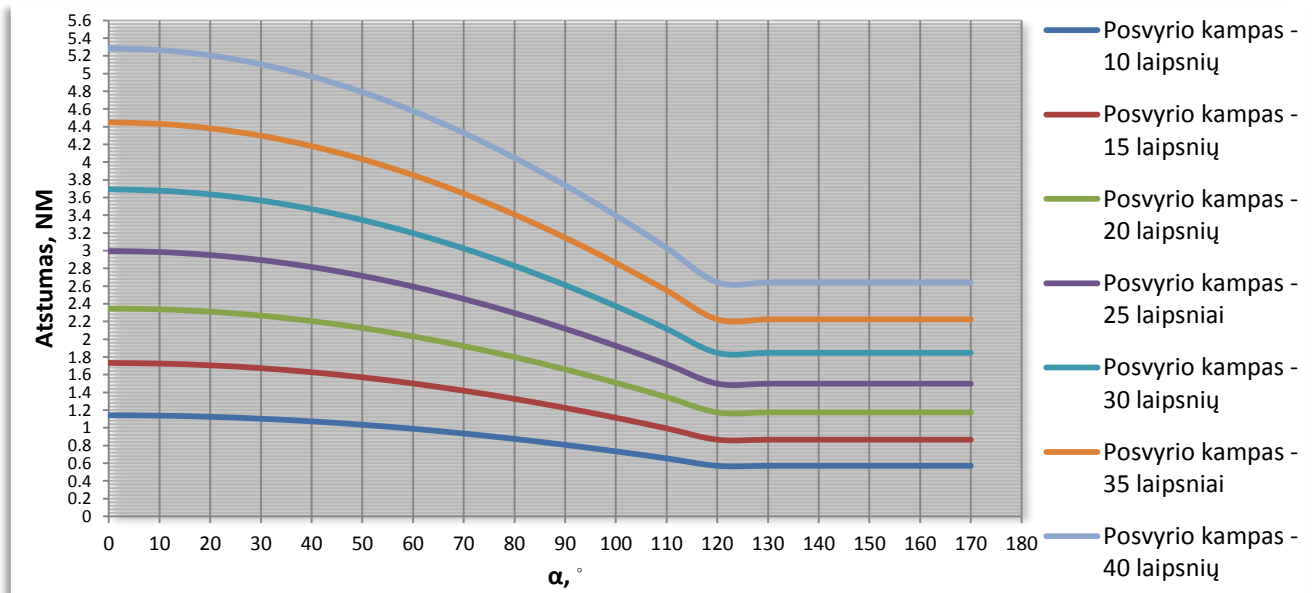
Santykinis atstumas tarp orlaivių:

$$\Delta S = \sqrt{(x_{A12} - x_{B12})^2 + (y_{A12} - y_{B12})^2 + (z_{A12} - z_{B12})^2} \quad (51)$$

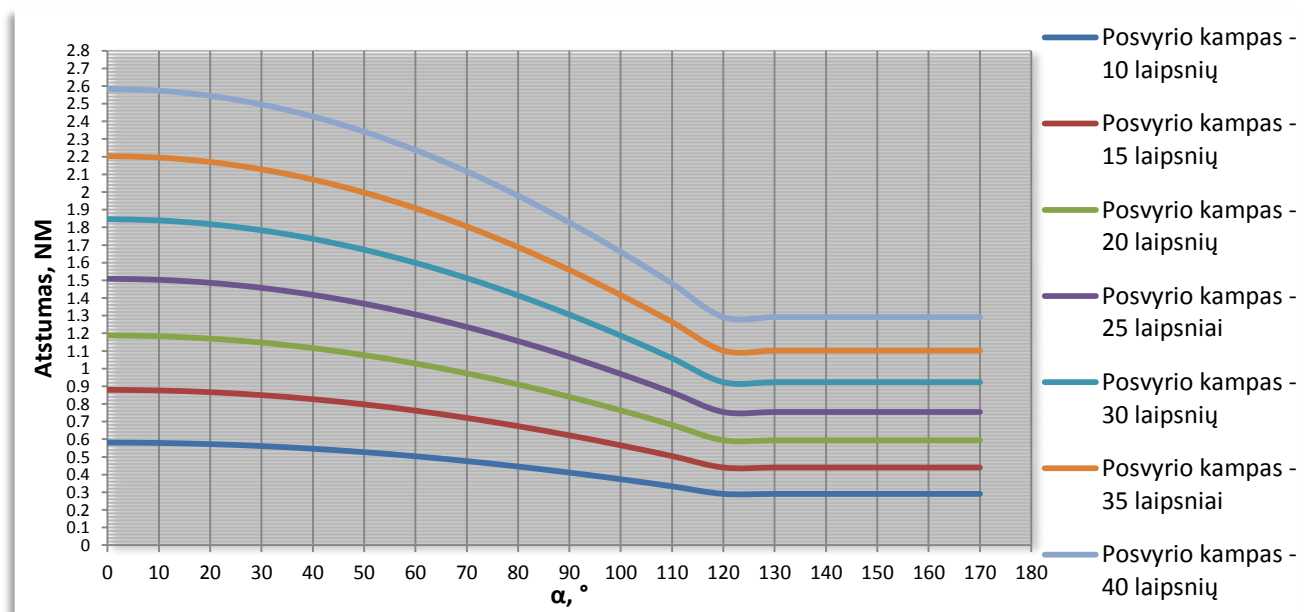
## 2.5 Gauti tiriamosios dalies skaičiavimo rezultatai

### 2.5.1 Santykinis atstumas tarp orlaivių RA zonoje

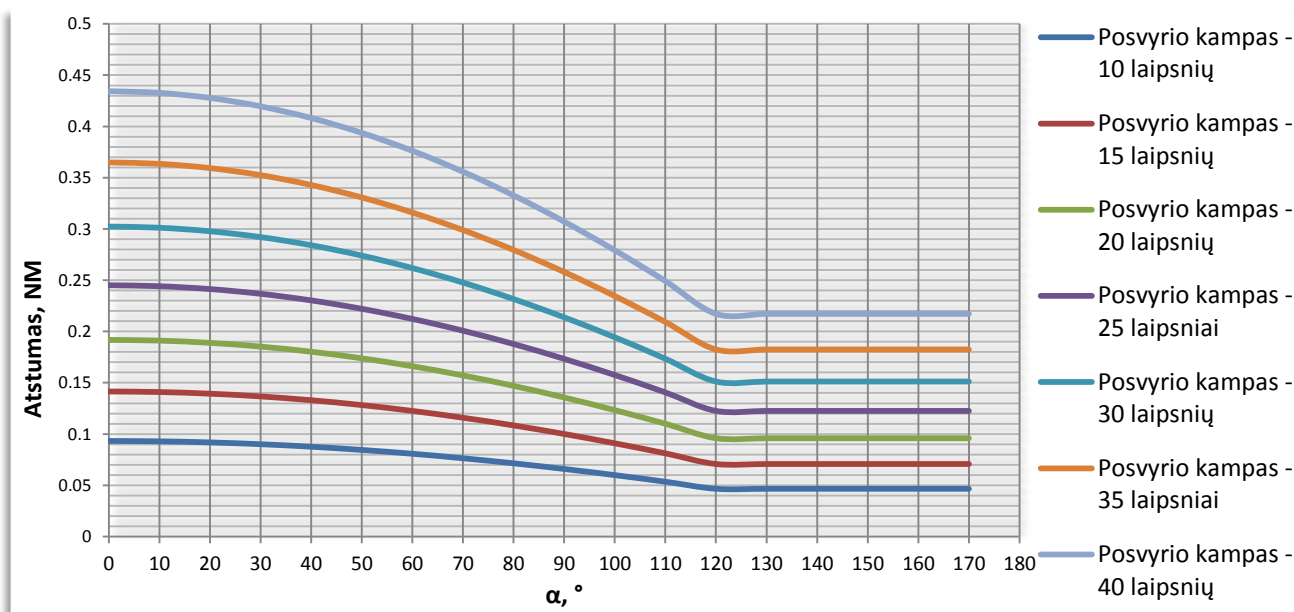
Atlikus visus reikiamus skaičiavimus bei remiantis anksčiau nagrinėtomis formulėmis *MathCAD* programa buvo gauti skaičiavimų rezultatai, kuriuose pateiktos santykinio atstumo tarp orlaivių reikšmės patariamąjo sprendimo (RA) zonoje, orlaiviams atlikus tam tikrą posvyrio manevrą horizontalėje.



**22 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo  $\alpha$  kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 7



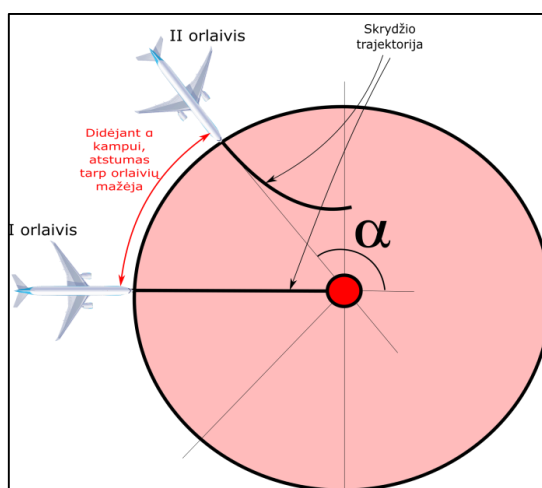
**23 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo  $\alpha$  kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 5



**24 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo  $\alpha$  kampo, esant tam tikriems orlaivių posvyrio kampams, kai jautrumo lygis – 3

Galima pastebėti (prieš tai pateiktų 22, 23 , 24 pav.), kad kuo jautrumo lygis mažesnis, tuo santykinis atstumas tarp orlaivių – mažesnis. Iš teorijos ir TCAS II veikimo koncepcijos žinoma, kad kuo jautrumo lygis mažesnis, tuo  $\tau$  laikas yra trumpesnis. Taigi, tuo pačiu mažėja ir santykinis atstumas.

Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad esant  $\alpha$  kampui daugiau negu  $120^\circ$  – santykinis atstumas išlieka pastovus.

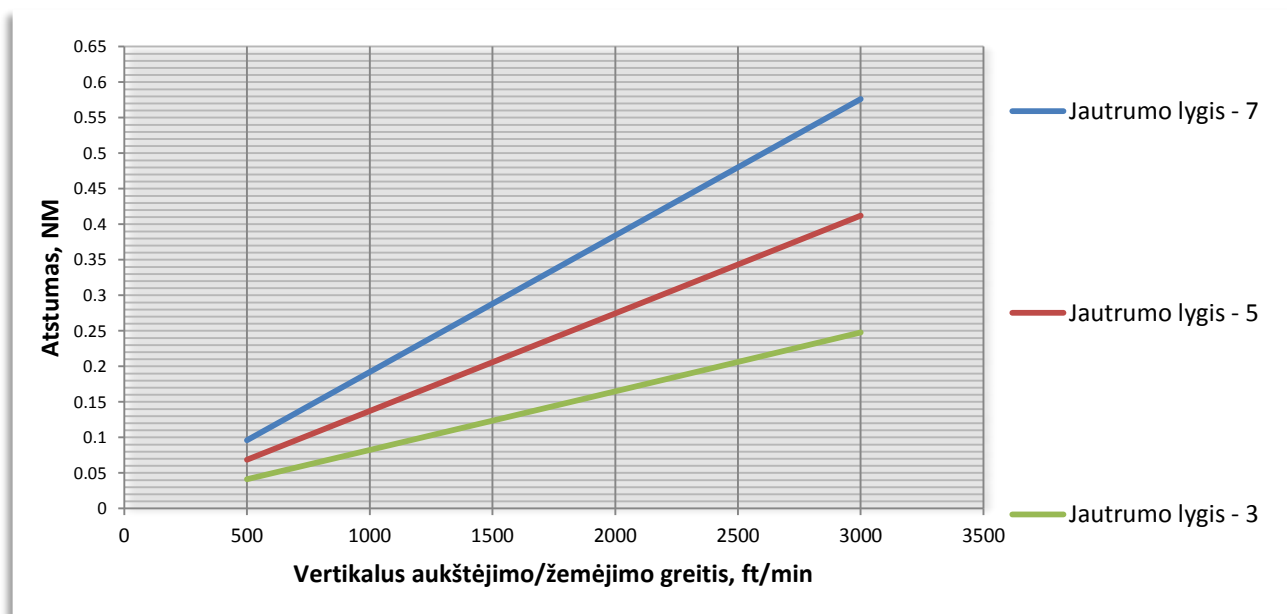


**25 pav.** Didėjant  $\alpha$  kampui, pradinis orlaivių atstumas mažėja

Kadangi didėjant  $\alpha$  kampui, pradinis atstumas (t. y. atstumas, kai suveikia sprendimo patarėjas (RA)) tarp orlaivių mažėja, reikia naudoti loginį manevro pasirinkimo modelį, t. y. kai  $170^\circ \geq \alpha \geq 120^\circ$ ,

tai šiuo atveju I orlaivis turėtų gauti balso komandą skristi tiesiai ir nekeisti skrydžio krypties, o II orlaivis turėtų sukti į kairę (jeigu II orlaivis artėtų iš dešinės – į dešinę). Bet kai  $0^\circ \leq \alpha < 120^\circ$  ir suveikus patariamajam sprendimui, orlaiviai (I ir II orlaiviai), saugiam prasilenkimui, atliktų posūkius į dešinę arba kairę. Skaičiavimai buvo atlikti su maksimalia  $\alpha$  kampo reikšme –  $170^\circ$ , nes ties  $\alpha$  kampų reikšmėms, artimoms  $180^\circ$ , TCAS II RA sprendimo patarėjas suveiks ne dėl  $\tau$  laiko kritinės reikšmės, bet dėl minimalaus saugaus atstumo tarp orlaivių ( $D_{MOD}$  arba  $Z_{THR}$ ). Pvz.:  $\alpha$  kampo reikšmė  $180^\circ$ , o  $t_{CPA} = 35s$ . Tai reiškia, kad I ir II orlaiviams lieka 35 s iki artimiausio sąlyčio taško (CPA). Matyti, kad nėra tikslo atlikti skaičiavimus, kadangi šiuo atveju orlaiviai jau yra kritiškai prisiartinę vienas kito atžvilgiu (teoriškai – jau susidūrę). Todėl ir yra naudojama  $D_{MOD}$  arba  $Z_{THR}$  koncepcija, kuri aptarta literatūros apžvalgos dalyje. Iš praktikos yra žinoma, orlaiviams skrendant instrumentinių taisyklių skrydžio sąlygomis, tikimybė, kad orlaiviai artės vienas kito atžvilgiu tokiais kampais, kaip pavaizduota 25 pav. (t. y.  $\alpha \leq 140^\circ$ ), yra labai maža arba lygi 0.

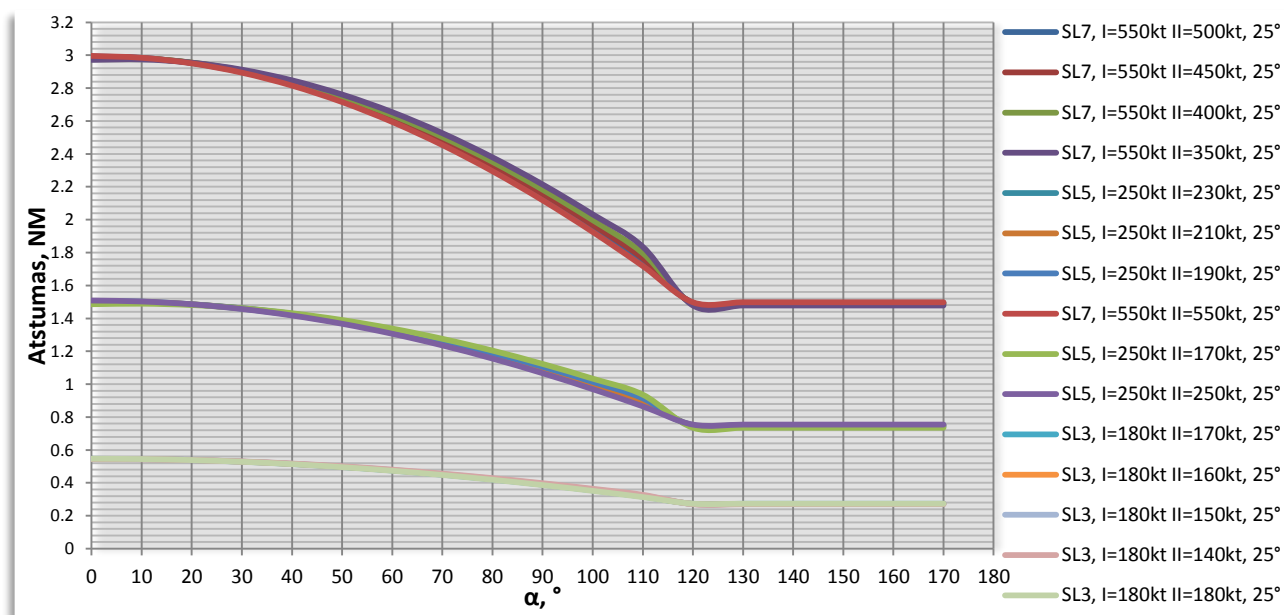
Santykinių atstumų (horizontalėje) rezultatams palyginti buvo apskaičiuotas santykinis atstumas tarp orlaivių, kai sprendimo patarėjo zonoje (RA) orlaiviai būtų išskiriami vertikalėje (dabartinis TCAS II orlaivių išskyrimo metodas). Toliau pateiktame 26 pav. matoma santykinio atstumo priklausomybė nuo vertikalios aukštėjimo ar žemėjimo greičio esant skirtingiems jautrumo lygiams. Susidarė ta pati situacija: kuo jautrumo lygis mažesnis, tuo santykinis atstumas – mažesnis.



**26 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo vertikalios aukštėjimo / žemėjimo greičio, esant skirtingiems jautrumo lygiams

### 2.5.2 Santykinis atstumas tarp orlaivių RA zonoje, kai yra skirtingi orlaivių greičiai

Orlaiviams artėjant prie artimiausio sąlyčio taško (CPA), jų greičiai ne visada bus vienodi, tačiau gali skirtis tam tikru dydžiu. Toliau pateiktame 27 pav. yra pavaizduota santykinio atstumo priklausomybė nuo  $\alpha$  kampų, esant skirtingiems jautrumo lygiams bei skirtingiems artėjimo prie CPA orlaivių greičiams. Gauti skaičiavimo duomenys buvo apskaičiuoti esant  $25^\circ$  posvyrio kampui.

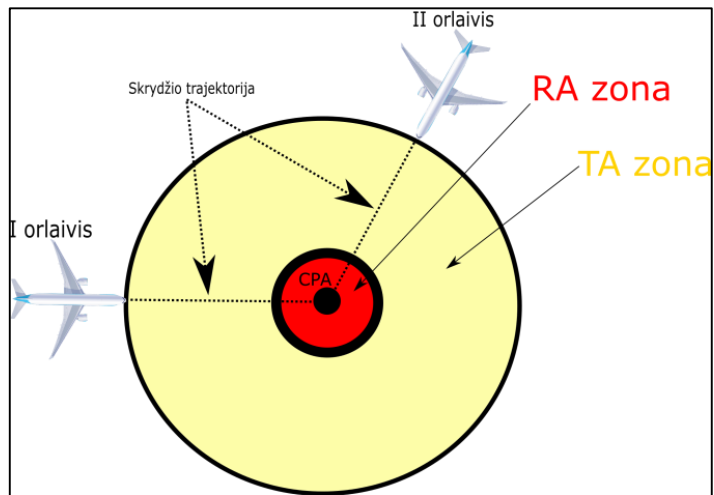


**27 pav.** Santykinio atstumo priklausomybė nuo  $\alpha$  kampų esant skirtingiems jautrumo lygiams bei skirtingiems artėjimo prie CPA orlaivių greičiams

Kaip matyti, santykinis atstumas mažai priklauso (beveik visai nepriklauso) nuo orlaivių artėjimo greičių, todėl nebuvo tikslo skaičiuoti santykinio atstumo priklausomybės su kitais posvyrio kampų dydžiais. Nagrinėjamuoju atveju, taip pat ir dabartinės TCAS II v.7.1, santykinis atstumas tarp orlaivių priklauso nuo orlaivių santykinio greičio.

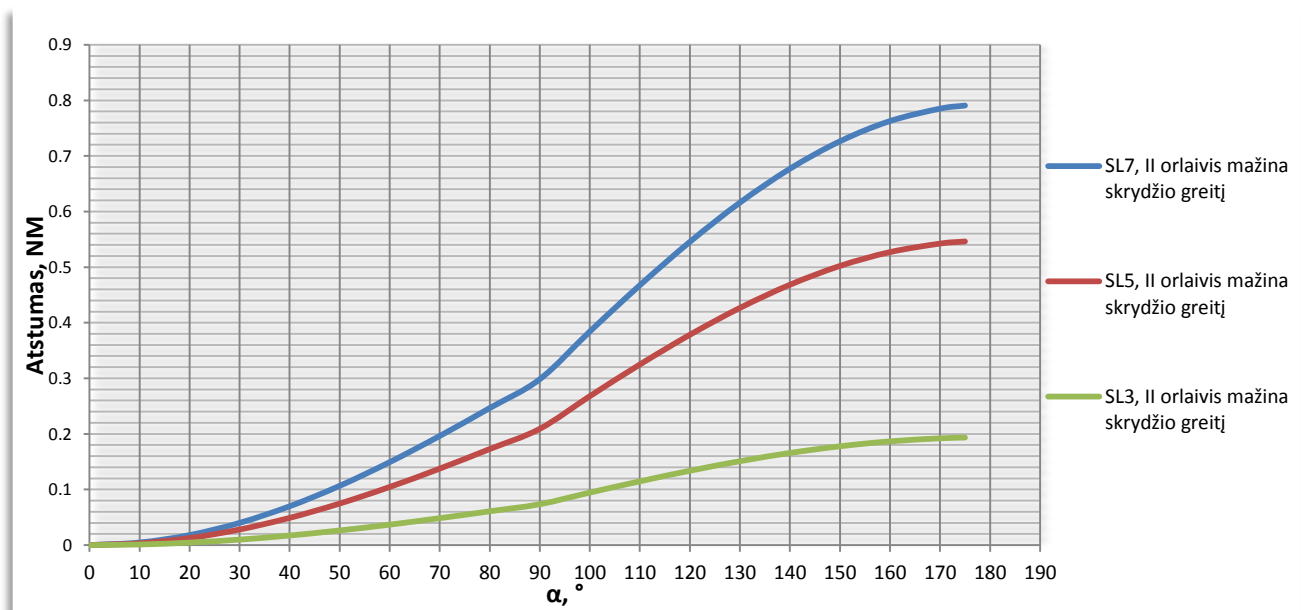
### 2.5.3 Santykinis atstumas tarp orlaivių TA zonoje

Siūlomo metodo atveju nagrinėjama galimybė orlaiviui išduoti rekomenduojančią balso komandą eismo informacijos pranešimų zonoje (TA) apie greičio mažinimą. Pirmuoju nagrinėjamuoju atveju du orlaiviai skrenda horizonte pastoviam aukštyje, o balso komandą apie greičio mažinimą gautų artėjantis II orlaivis. Taip pat balso komandą apie greičio mažinimą galėtų gauti ir I orlaivis, nes santykinio atstumo reikšmė nuo to nepasikeistų.



**28 pav.** II orlaivis mažina skrydžio greitį TA zonoje

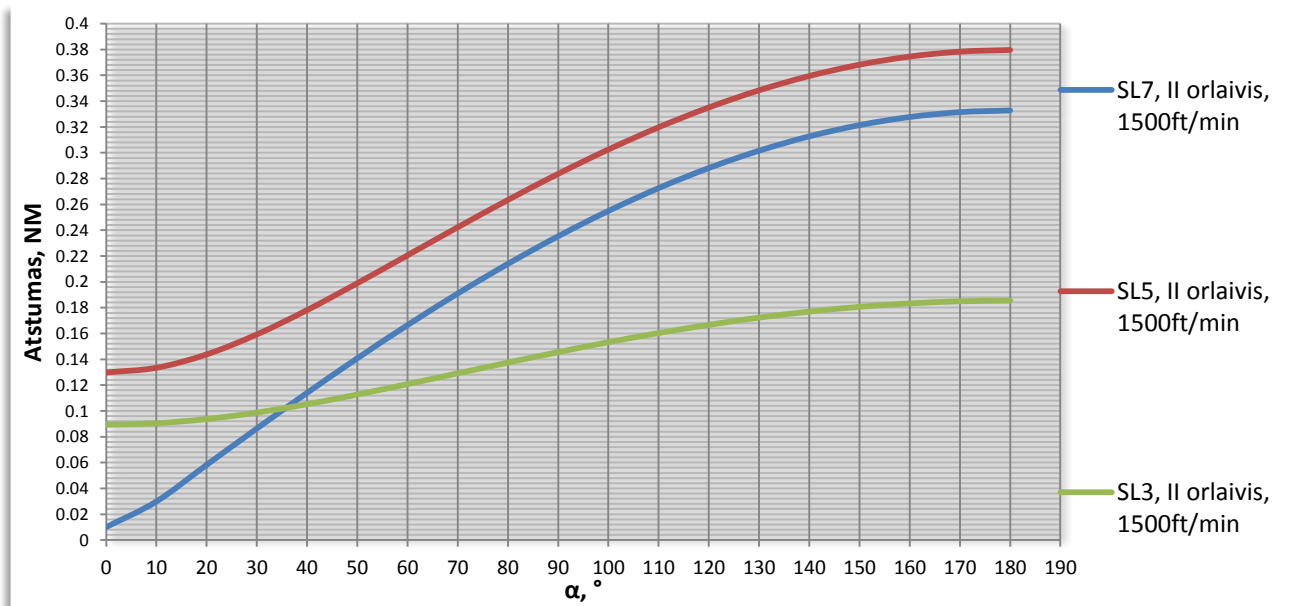
Toliau yra pateikti gauti rezultatai.



**29 pav.** Santykinio atstumo priklausomybė nuo  $\alpha$  kampų esant skirtingiems jautrumo lygiams, kai TA zonoje artėjantis II orlaivis mažina skrydžio greitį

Buvo minėta, kad aukštėjančiam ir žemėjančiam orlaiviui nėra tikslo mažinti skrydžio greitį, tad išnagrinėtas atvejis, kai skrydžio greitį mažino I orlaivis (t. y. orlaivis skrendantis horizonte), II orlaivis artėjo CPA taško link aukštėdamas arba žemėdamas. Toliau yra pateikti rezultatai, kai I orlaivis mažina skrydžio greitį, o II orlaivis – žemėja arba aukštėja 1500 ft/min. Buvo apskaičiuota esant skirtingiems jautrumo lygiams.

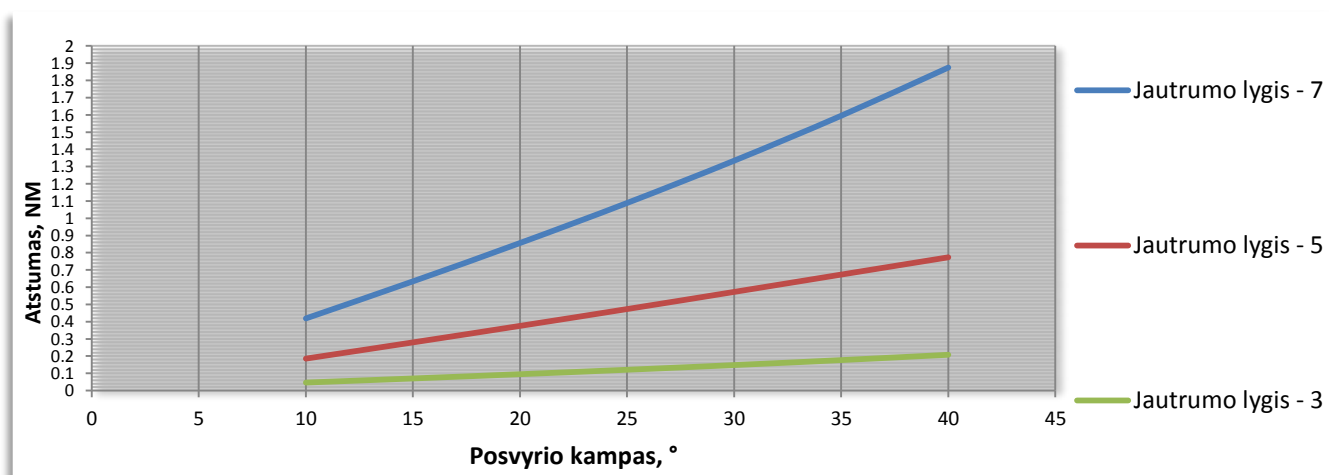




**30 pav.** Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo  $\alpha$  kampų, kai I orlaivis, skrendantis horizontu, mažina skrydžio greitį, o II orlaivis aukštėja arba žemėja 1500 ft/min vertikaliuoju greičiu

#### 2.5.4 Orlaivių nukrypimas nuo skrydžio trajektorijos

Žinoma, kad skrydžių vadovų darbas – koordinuoti orlaivius erdvėje ir skirstyti juos saugiais minimaliais atstumais tarpusavyje (tiek horizontalios erdvės atžvilgiu, tiek vertikalios). Jau aptarta – orlaiviai horizontalėje yra skirstomi minimaliu 3–5 jūrmylių atstumu (pagal oro erdvės zoną), todėl yra svarbu žinoti, kiek daug orlaiviai nukryps nuo savo skrydžio trajektorijos per laiką  $t_{CPA}$ , kai, suveikus RA patarėjui, atliks tam tikrą posūkį su tam tikru posvyrio kampu.



**31 pav.** Atstumo (nukrypimo) priklausomybė nuo posvyrio kampo esant skirtingiems jautrumo lygiams

Gauta, kad su didžiausiu jautrumo lygiu ir posvyrio kampu, atstumo (nukrypimo) reikšmė neviršijo 2 jūrmylių.

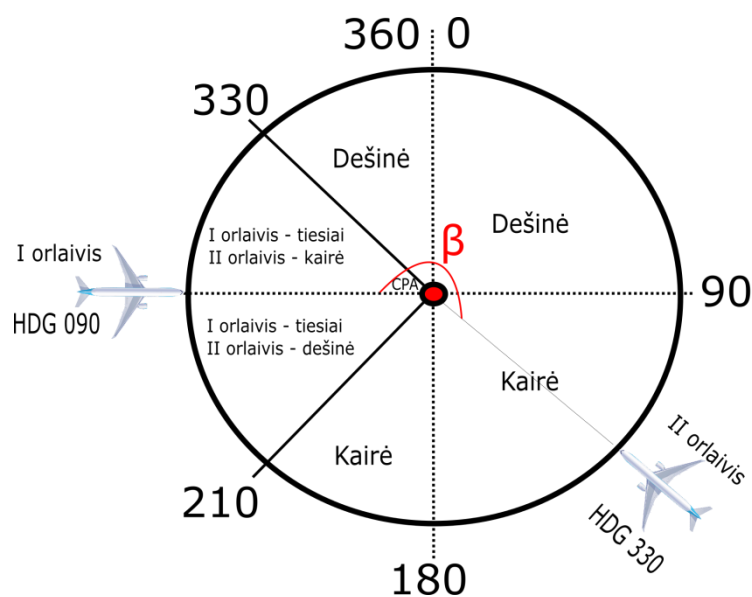
## 2.6 Manevro pasirinkimas sprendimo patarėjo zonoje (RA)

### 2.6.1 Posūkio kryptis

Suveikus TCAS II RA patarėjui orlaivio įgula turėtų gauti nukreipiančią balso komandą, kurią išduotų sprendimo patarėjas, o tam turi būti žinomas  $\theta$  kampas, kuriuo orlaivis turėtų nukrypti.

Iš ADS-B sistemos orlaiviai žinotų tikslią informaciją apie kitų orlaivių skrydžio kryptis, o kompiuteriui apskaičiavus skrydžio krypčių kampų skirtumus, būtų galima sužinoti kuria kryptimi orlaiviams reiktų sukti. Ar tai būtų dešinė ar – kairė, o gal visai – tiesiai.

Orlaiviai gali artėti vienas prie kito maksimaliu  $\alpha = 180^\circ$  kampu. Tačiau žinoma, kad dėl žemės rutulio formos (apskritimo formos) orlaiviai skraido  $360^\circ$  oro erdvėje. Taigi panagrinėkime apskritimą, kuriame artėjantis orlaivis artėtų iš tam tikrų skrydžio krypčių CPA taško link.



**32 pav.** Orlavių posūkio kryptys priklausomai nuo  $\beta$  kampo

Iš 32 pav. galima matyti, kad orlaivių krypčių pasirinkimas priklausys nuo orlaivių skrydžio krypčių skirtumo (t. y.  $\beta$  kampo). Gauta, kad:

$$HDG I_{orlaivis} \pm 180^\circ = x^\circ; \quad (52)$$

$$HDG II_{orlaivis} \pm 180^\circ = y^\circ; \quad (53)$$

Čia:

$HDG I_{orlaivis}$  – I orlaivio skrydžio kryptis;

$HDG II_{orlaivis}$  – II orlaivio skrydžio kryptis.

(52) ir (53) formulėse yra naudojamas „ $\pm$ “ ženklas dėl to, kad yra reikalinga ne tikroji skrydžio kryptis, bet priešpriešinė (angl. *outbound course*).

Žinant orlaivių skrydžio priešpriešines kryptis, galima apskaičiuoti skrydžio krypčių kampų skirtumą:

$$\Delta\beta = x^\circ - y^\circ; \quad (54)$$

Čia:

$\Delta\beta$  – orlaivių priešpriešinių skrydžio krypčių kampų skirtumas, nuo kurio priklausys posūkio kryptis.

Orlaivių skrydžio kryptys, priklausomai nuo  $\Delta\beta$  kampų skirtumo, yra pateiktos 3 lentelėje.

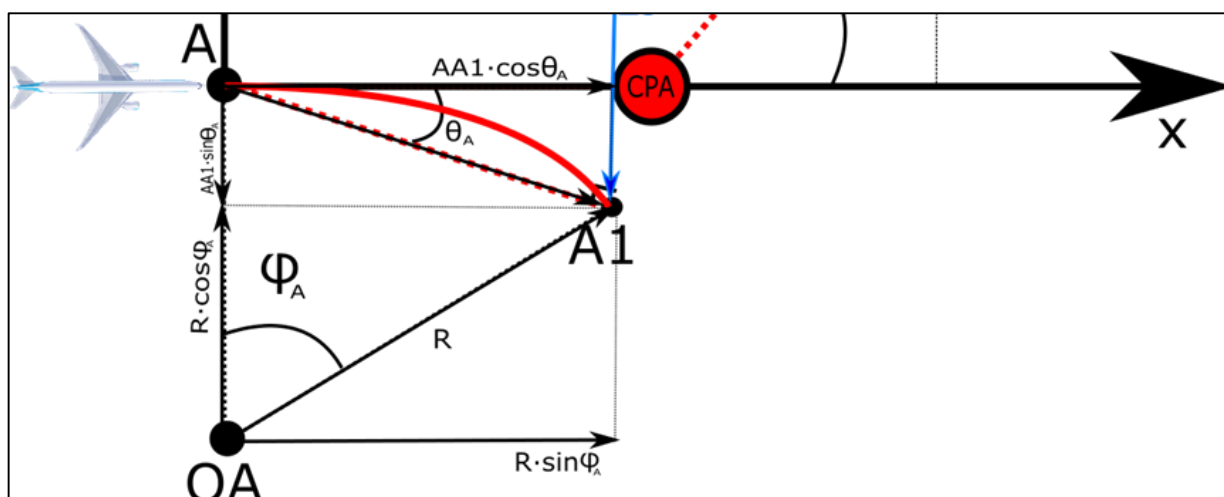
**3 lentelė.** Orlaivių skrydžio kryptys, priklausomai nuo  $\Delta\beta$  kampų skirtumo

| $\Delta\beta$                   | Kryptis                    | Paaiškinimas                                                                                                              |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\pm 60^\circ - \pm 180^\circ$  | Dešinė                     | I ir II orlaiviai turėtų atlikti posūkį į dešinę                                                                          |
| $0^\circ - \pm 59^\circ$        | Loginis manevro parinkimas | I orlaivis – tiesiai<br>II orlaivis – kairė<br>Tiesiai turėtų skristi orlaivis, kurio skrydžio kryptis yra <u>mažesnė</u> |
| $\pm 181^\circ - \pm 300^\circ$ | Kairė                      | I ir II orlaiviai turėtų atlikti posūkį į kairę                                                                           |

|                                 |                            |                                                                                                                                        |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\pm 301^\circ - \pm 359^\circ$ | Loginis manevro parinkimas | I-as orlaivis – tiesiai<br>II-as orlaivis – dešinė<br>Tiesiai turėtų skristi orlaivis,<br>kurio skrydžio kryptis yra<br><u>didesnė</u> |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 2.6.2 Skrydžio kursas

Žinant skrydžio posūkio kryptį, svarbu žinoti skrydžio kursą, kurį išduos patariamąjo sprendimo (RA) kompiuteris. Skrydžio krypties kampo  $\theta$  nustatymo tiriamojoje dalyje nustatytos ir išvestos formulės, pagal kurias TCAS II kompiuteris galėtų apskaičiuoti  $\theta$  kampo reikšmę.



**33 pav.** Kampo  $\theta$  nustatymas (pavaizduotas padidintas 17 pav.)

Buvo galima pasirinkti bet kurią iš 4 žinomų formulių (t. y. (29), (30), (35), (36) formulę), nes  $\theta$  kampo reikšmė turėtų susidaryti visais atvejais tokia pati. Iš (29) formulės matyti, kad  $x_{OA} - x_A = R$ . Iš 33 pav. matyti, kad  $x_{OA} - x_A$  yra apskritimo spindulys. Todėl:

$$\cos \theta_A = \frac{R + \sin \varphi_A \cdot R}{2 \cdot R \cdot \sin \varphi_A}; \quad (55)$$

Iš čia gauta:

$$\cos\theta_A = \frac{R(1+\sin\varphi_A)}{2\cdot\sin\varphi_A}; \quad (56)$$

Žinoma, kad spindulys gali būti rastas remiantis (15) formule, o posūkio kampo spindulio matematinė išraiška:

$$\sin\varphi_A = \frac{v\cdot t}{R}; \quad (57)$$

Iš čia galima teigti, kad  $t = t_{CPA}$ , nes skaičiuojant santykinį atstumą tarp orlaivių įvertintas laikas iki artimiausio sąlyčio taško.

Sulyginus (15) ir (57) formulių reikšmes gauta:

$$\cos\theta = \frac{\frac{v^2}{g\cdot\sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2-1}}(1+\sin\frac{g\cdot t_{CPA}\cdot\sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2-1}}{v}}{2\cdot\sin\frac{g\cdot t_{CPA}\cdot\sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2-1}}{v}}; \quad (58)$$

Remiantis (58) formule, TCAS II kompiuteris galėtų apskaičiuoti skrydžio kryptį, nes žinotų ne tik posvyrio kampą, bet ir posūkio kampą. Atliekant susidūrimo vengimo manevrą, RA zonoje, į dešinę, prie tikrosios skrydžio krypties (t. y. prie skrydžio krypties, kuria skrendama) būtų pridėta krypties kampo  $\theta$  reikšmė, o į kairę – atimta krypties kampo reikšmė.

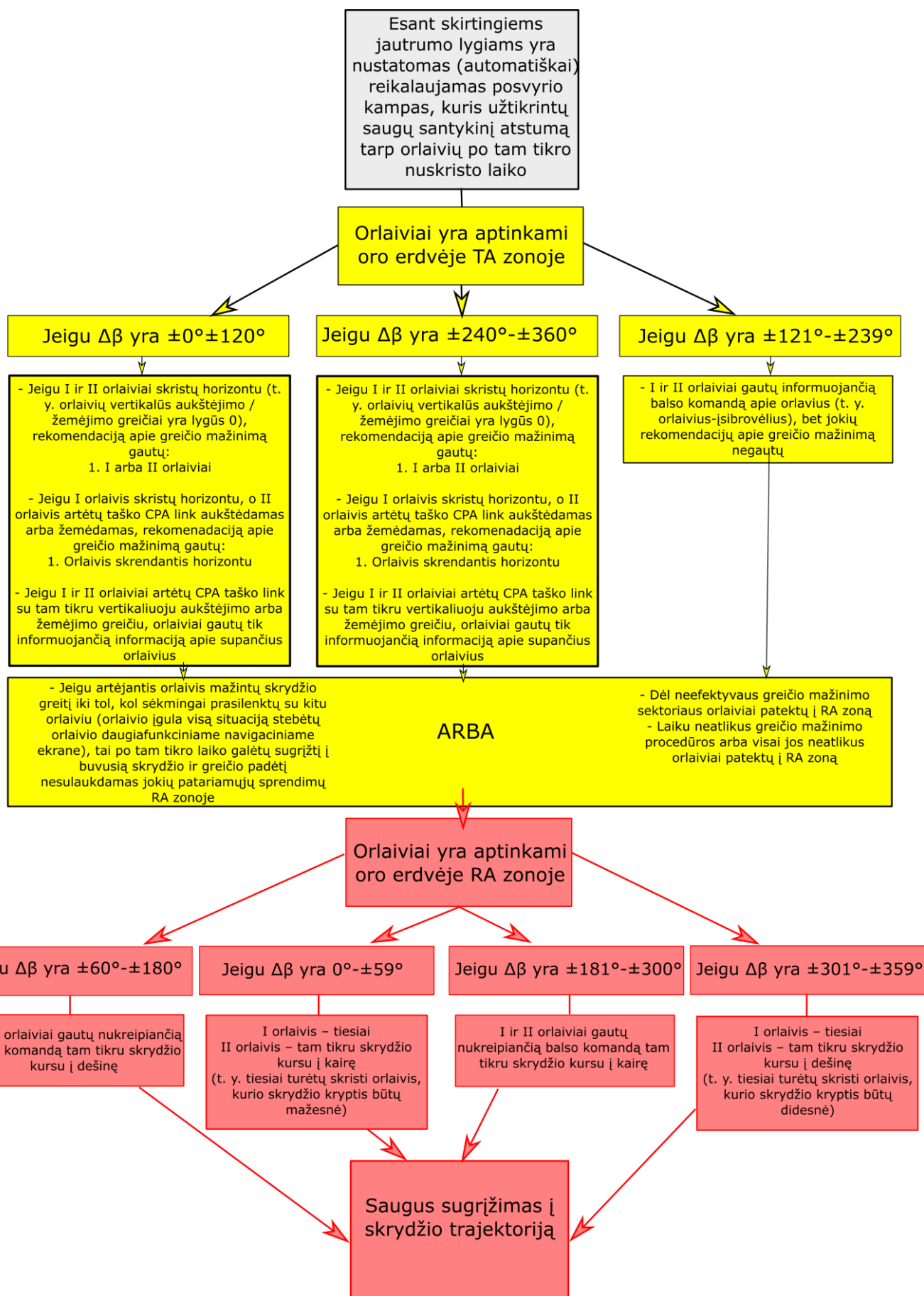
### 2.6.3 Manevro pasirinkimo veiksmų seka

Dabar jau žinoma, kokių principu TCAS II kompiuteris išduotų skrydžio krypties balso komandą TA ir RA zonose. Toliau pateiktame 34 pav. yra sudaryta veiksmų seka.

Iš 34 pav. matyti, kad norint sužinoti skrydžio kryptį RA zonoje (t. y. skrydžio kursą patariamąjo sprendimo zonoje) iš anksto TCAS II kompiuteryje turi būti įvestos tam tikros posvyrio kampų reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams. Jau nagrinėta – norint sužinoti krypties kampo  $\theta$  reikšmę, reikia žinoti optimalų posvyrio kampo reikšmę.

Orlaiviams, gavus informuojančią balso komandą TA zonoje ir vienam iš orlaivių (atsitiktine TCAS II kompiuterio tvarka) rekomendaciją apie greičio mažinimą, būtų galima išvengti horizontaliųjų

manevrų RA zonoje. Kuris orlaivis pradėtų mažinti savo skrydžio greitį, nėra svarbu (yra svarbu tuo atveju, kai vienas orlaivis skris horizontu, o antras orlaivis artės link jo aukštėdamas arba žemėdamas), nes nuo to santykinis atstumas tarp orlaivių po tam tikro nusukimo laiko nepasikeis. Matyti (žr. 34 pav.), kad tam tikrame sektoriuje greičio mažinimas yra neefektyvus, todėl orlaiviams ir toliau artėjant vienas kito atžvilgiu horizontalūs manevrai bus neišvengiami.



34 pav. TCAS II veiksmų seka TA ir RA zonose

Iš gautų skaičiavimo duomenų žinoma: kuo jautrumo lygis mažesnis, tuo didesnis yra reikalingas posvyrio kampas. Įvertinus santykinį atstumų reikšmes buvo priskirtos posvyrio kampų reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams.

**4 lentelė.** Posvyrio kampo reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams

| Jautrumo lygis (SL) | Posvyrio kampas | Paiškinimas                                                       |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|
| SL7                 | 10°             | Užtikrina santykinį atstumą<br>$0,57077 \leq \Delta S \text{ NM}$ |
| SL5                 | 20°             | Užtikrina santykinį atstumą<br>$0,59387 \leq \Delta S \text{ NM}$ |
| SL3                 | 30°             | Užtikrina santykinį atstumą<br>$0,33575 \leq \Delta S \text{ NM}$ |

## 2.7 Paklaidos

Tiriamuoju atveju buvo išskirtos kelios galimų paklaidų grupės:

1. Orlaivio įgulos reakcijos laikas manevrui atlikti.
2. Navigacijos sistemos netikslumas.
3. Vienam iš orlaivių neatlikus reikiamo manevro dėl tam tikrų veiksnių.
4. Kitos paklaidos.

### 2.7.1 Orlaivio įgulos reakcijos laikas manevrui atlikti

Dabartinės TCAS II v.7.1 sistemos veikimo atveju orlaivio įgula, gavusi nukreipiamąją balso komandą, turėtų atlikti vertikalųjį manevrą kuo įmanoma greičiau. Tačiau dėl tam tikro žmogiškojo faktoriaus ar kito veiksnio manevras gali būti atliktas vėliau. TCAS II v.7.1 loginis kompiuteris leidžia orlaivio įgulai atlikti manevrą po 5 s (t. y. kompiuteris „tikisi“, kad orlaivis reikiamą manevrą atliktų po vėliausiai 5 s nuo to laiko, kai gautų nukreipiamąją balso komandą RA zonoje). Laiku neatlikus reikiamo manevro, RA patarėjas pakartotinai išsiųstų balso komandą, kuriai atlikti yra skirtas 2 s laikas. Atlikus manevrą vėliau negu TCAS II sistema leidžia, būtų didelis susidūrimo pavojus.

Taigi didžiausiai paklaidai įvertinti buvo priimta, kad I ir II orlaivio įgula sureaguos į sprendimo patarėją (RA) po 7 s (blogiausiu atveju):



$$\delta_{\Delta S} = \frac{\Delta S_{t_{CPA}} - \Delta S_{t_{CPA}-7s}}{\Delta S_{t_{CPA}}}; \quad (59)$$

Čia:

$\delta_{\Delta S}$  – santykinio atstumo tarp orlaivių paklaida;

$\Delta S_{t_{CPA}}$  – santykinis atstumas tarp orlaivių, kai dviejų orlaivių įgula atliktų manevrą iš karto;

$\Delta S_{t_{CPA}-7s}$  – santykinis atstumas tarp orlaivių, kai dviejų orlaivių įgula atliktų manevrą po 7 s;

Apskaičiuoti duomenys pateikti toliau esančioje 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Paklaidų reikšmės dėl orlaivio įgulos reakcijos laiko esant skirtingiems jautrumo lygiams

| Jautrumo lygis (Laikas likęs iki CPA) | Paklaida, % |         |
|---------------------------------------|-------------|---------|
|                                       | Po 7 s      | Po 14 s |
| SL7 ( $t_{CPA(RA)} = 35 s$ )          | 26,51       | 63,97   |
| SL5 ( $t_{CPA(RA)} = 25 s$ )          | 35,93       | 80,59   |
| SL3 ( $t_{CPA(RA)} = 15 s$ )          | 55,50       | 99,55   |

Kadangi prie mažesnio jautrumo lygio laikas iki artimiausio sąlyčio taško yra mažesnis, tai paklaidos reikšmė didėja. Lentelėje yra pateiktos maksimaliai galimos paklaidos. Praktikoje jos yra daug mažesnės, kadangi tikimybė, kad į patariamąjį sprendimą balsu komandas nesureaguos dvi orlaivių įgulos – artima 0.

#### 2.7.2 Navigacijos sistemos netikslumas

Kadangi ADS-B sistema yra priklausoma nuo GPS sistemos, taigi reikėjo įvertinti GPS sistemos netikslumo parametrus. Yra žinoma, kad GPS veikia iki 20 metrų tikslumu, o GLONASS – 60 metrų.

**6 lentelė.** Navigacijos sistemos netikslumo paklaidos esant skirtingiems jautrumo lygiams

| Jautrumo lygis (SL) | Didžiausia gauta paklaidos reikšmė, % |         |
|---------------------|---------------------------------------|---------|
|                     | GPS                                   | GLONASS |
| SL7                 | 1,89                                  | 5,68    |
| SL5                 | 3,24                                  | 11,15   |
| SL3                 | 7,29                                  | 21,87   |

Kuo mažesnis jautrumo lygis tuo mažesnis užtikrinamas santykinis atstumas tarp orlaivių, todėl paklaidos reikšmė sulig mažesniu jautrumo lygiu – didėja.

### 2.7.3 Neatlikus reikiamo manevro dėl tam tikrų veiksnių

Idealiu atveju abu orlaiviai atliktų atitinkamus horizontalius maneversus (suveikus RA patarėjui) ir taip sėkmingai prasilenktų tarpusavyje erdėje. Gali pasitaikyti, kad kuris nors iš orlaivių negalėtų atlikti reikiamo manevro reikiama kryptimi dėl tam tikrų veiksnių:

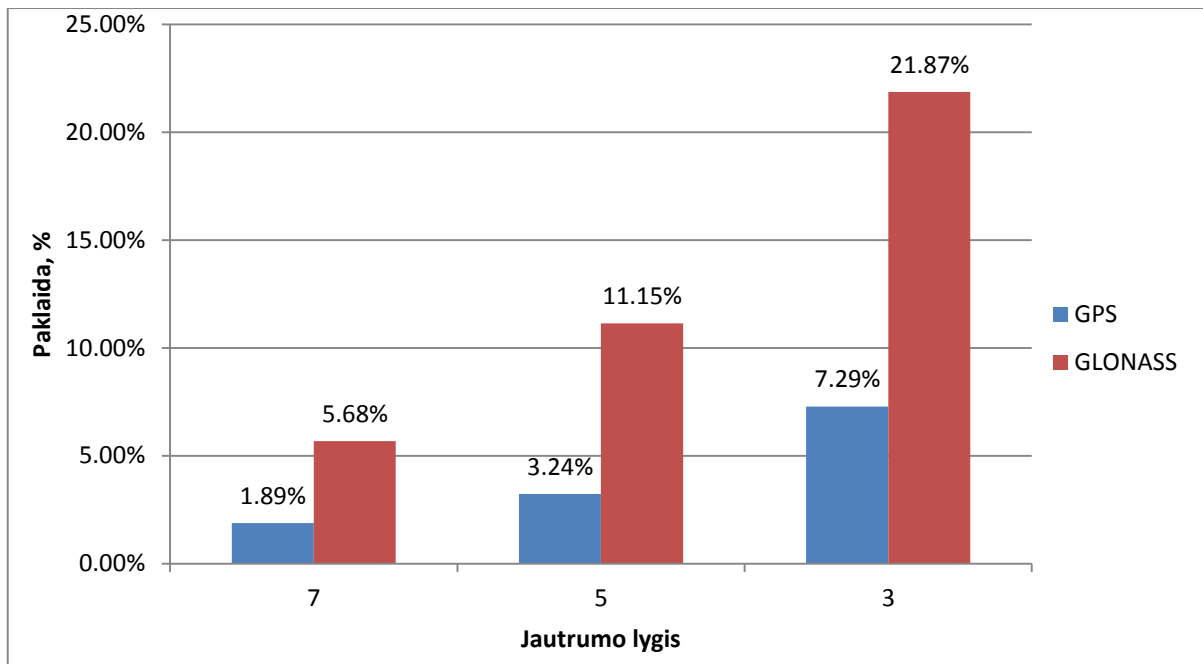
- techninis gedimas (žr. 2-o priedo 2 pav.);
- pavojingos skrydžio sąlygos (t. y. orlaivis negalėtų nukrypti horizontalėje į tam tikrą kryptį dėl pavojingų skrydžiui sąlygų);
- kalnai (t. y. orlaiviams skrendant kalnuotoje vietovėje kur kalnų viršūnių aukščiai būtų aukščiau skrendamo skrydžio lygio (žr. 2-o priedo 1 pav.)).

Gauta, kad maksimali santykinio atstumo tarp orlaivių galima paklaida gali siekti 50 %, kadangi vienam iš orlaivių neatlikus jokio manevro santykinis atstumas tarp orlaivių sumažėtų dvigubai. Nesudėtinga pastebėti, jeigu ir kitas orlaivis neatliktų reikiamo manevro, paklaida gali siekti 100 % reikšmę.

Norint apskaičiuoti paklaidas tiksliau, reiktų įvertinti visų prieš tai minėtų veiksnių tikimybę, kuri yra artima 0.

### 2.7.4 Visos paklaidos

Nagrinėjamoju atveju yra neįmanoma įvertinti tiksliai visas galimas paklaidas, kadangi paklaidos dėl orlaivio įgulos reakcijos ir paklaidos neatlikus reikiamo manevro kažkuriam iš orlaivių yra kintamos reikšmės bei priklauso nuo daugybės veiksnių. Galima teigti, kad paklaidos dėl GPS ar GLONASS navigacijos netikslumo yra pastovios reikšmės, kadangi nepriklauso nuo: žmogiškojo faktoriaus (reakcijos), žemės reljefo (kalnų), pavojingų debesų, techninio gedimo (sugedus varikliui) ir kitų veiksnių.



**35 pav.** Navigacijos sistemos netikslumo paklaidos

Buvo minėta, kad orlaivio įgulos reakcijos laikas turėtų būti nedidesnis kaip 5 s (idealiu atveju). Laikui didėjant, santykinio atstumo tarp orlaivių reikšmė mažės, t. y. paklaida didės. Vienam iš orlaivių neatlikus reikiamo manevro santykinis atstumas sumažėtų dvigubai, todėl paklaidos reikšmė yra 50 %. Iš 2-o priedo 2 pav. galima pastebėti, kad paklaidos reikšmė gali būti ir mažesnė priklausomai nuo to, kiek efektyviai II orlaivis atliks posvyrio manevrą į tam tikrą kryptį (2-o priedo 2 pav. atveju į dešinę).

## IŠVADOS

### Gautų rezultatų apibendrinimas

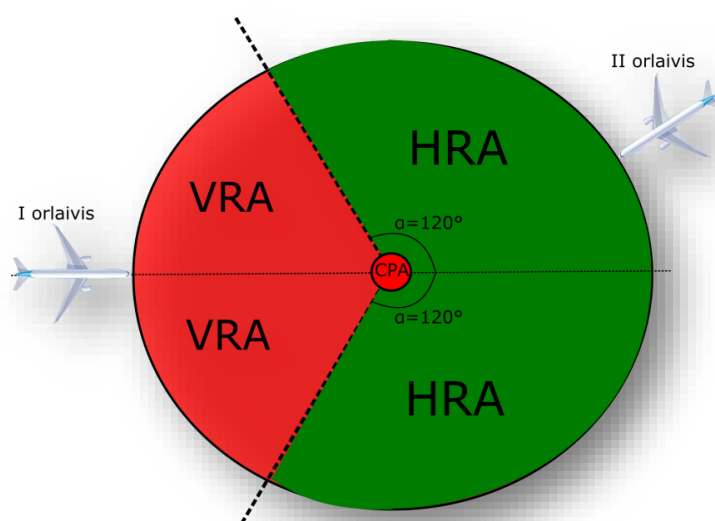
Apžvelgus visą tiriamąją dalį galima teigti, kad TCAS II RA zonoje horizontalus orlaivių išskyrimas yra gana efektyvus ir užtikrina ne mažesnę santykinę atstumą tarp orlaivių, palyginti su dabartiniu TCAS II RA vertikaliuoju išskyrimu. Toliau esančioje 7 lentelėje yra pateikti apibendrinamieji rezultatai.

**7 lentelė.** Apibendrinamieji tiriamosios dalies rezultatai

| Išskyrimo būdas                                                                                            |     | Horizontalus                                                                        | Vertikalus                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Sąlygos                                                                                                    |     |                                                                                     |                                                                           |
| Santykinis atstumas tarp orlaivių pagal jautrumo lygį (SL)                                                 | SL7 | <u>0,57 NM – 1,14 NM</u> (pagal $\alpha$ kampą), kai posvyrio kampas yra $10^\circ$ | <u>0,49 NM</u> , kai vertikalus aukštėjimo / žemėjimo greitis 3000 ft/min |
|                                                                                                            | SL5 | <u>0,59 NM – 1,19 NM</u> (pagal $\alpha$ kampą), kai posvyrio kampas yra $20^\circ$ | <u>0,33 NM</u> , kai vertikalus aukštėjimo / žemėjimo greitis 3000 ft/min |
|                                                                                                            | SL3 | <u>0,34 NM – 0,67 NM</u> (pagal $\alpha$ kampą), kai posvyrio kampas yra $30^\circ$ | 0,16 NM, kai vertikalus aukštėjimo / žemėjimo greitis 3000 ft/min         |
| Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo orlaivių artėjimo kampų (t. y. $\alpha$ kampų)          |     | PRIKLAUSO                                                                           | NEPRIKLAUSO arba TURI LABAI MAŽĄ ĮTAKĄ                                    |
| Santykinio atstumo tarp orlaivių priklausomybė nuo orlaivių pradinės padėties vertikalios erdvės atžvilgiu |     | NEPRIKLAUSO arba TURI LABAI MAŽĄ ĮTAKĄ                                              | PRIKLAUSO                                                                 |
| Galimybė išskirti orlaivius mažuose skrydžio aukščiuose                                                    |     | YRA (besiskiriant su orlaiviu aukštis nebus keičiamas)                              | NĖRA (žemiau 1000 ft virš žemės paviršiaus sistema yra neveiksni)         |
| Loginis-matematinis manevrų pasirinkimo modelis                                                            |     | Sudėtingas                                                                          | Paprastas                                                                 |
| Orlaivių skirstymas oro erdvėje                                                                            |     | 3 NM – 5 NM                                                                         | 500 ft – 1000 ft                                                          |

|                          |           |                                                                                                              |
|--------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balso komandos RA zonoje | Paprastos | Paprastos, bet jų skaičius gerokai didesnis palyginti su horizontaliosiomis balso komandomis RA zonoje (HRA) |
|--------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

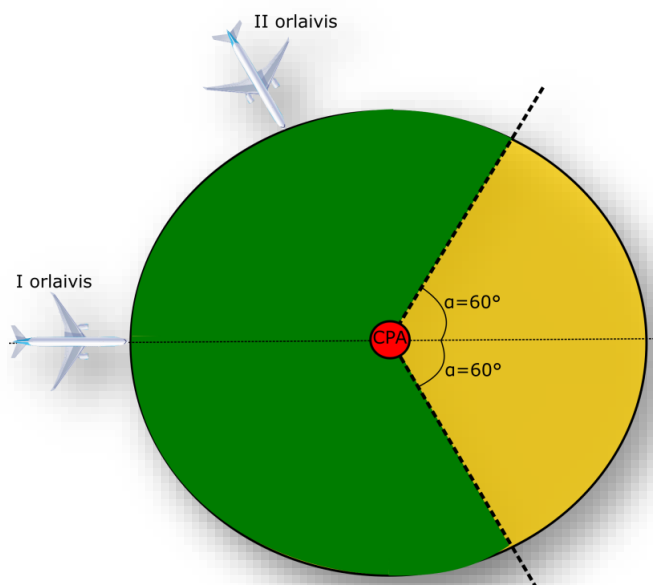
Iš anksčiau pateiktos 7 lentelės matyti, kad horizontalus išskyrimo metodas yra daug efektyvesnis (palyginus santykinų atstumų reikšmes), tačiau reikia nepamiršti, kad vertikalus išskyrimo atveju yra pateikti atstumai vertikaliosios oro erdvės atžvilgiu. Santykinis atstumų skirtumas, išskiriant orlaivius horizontalėje, priklauso nuo orlaivių  $\alpha$  artėjimo kampo, todėl įvertinus santykinio atstumo pokytį sulig  $\alpha$  kampo didėjimu (t. y. didėjant  $\alpha$  kampui, atstumas mažėja), galima daryti išvadas.



**36 pav.** Orlaivių išskyrimo būdas pagal orlaivių artėjimo  $\alpha$  kampo reikšmės

36 pav. pavaizduotas efektyvus (žalia spalva) horizontaliojo išskyrimo sektorius patariamąjo sprendimo zonoje (HRA). Raudonai pažymėtame sektoriuje horizontalus orlaivių išskyrimas taip pat yra efektyvus, tačiau įvertinus galimas paklaidas, efektyviau būtų orlaivius išskirti vertikalėje (VRA), t. y. dabartiniu TCAS II v.7.1 taikomu metodu.

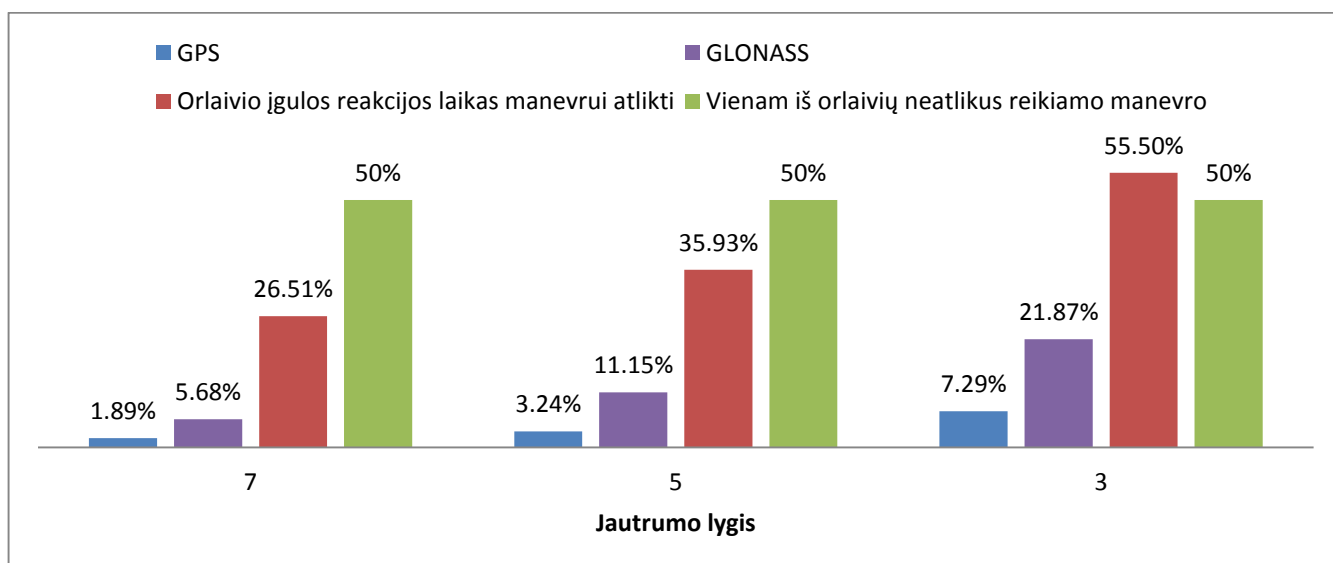
Buvo apžvelgta galimybė orlaiviui išsiųsti rekomenduojančią balso komandą apie greičio mažinimą TA zonoje.



**37 pav.** Orlaivių efektyvūs greičio mažinimo sektoriai pagal  $\alpha$  artėjimo kampą

37 pav. žaliai pažymėtame sektoriuje orlaivio greičio mažinimas būtų efektyvus ir būtų išvengta patariamųjų manevrų RA zonoje. Geltoname sektoriuje greičio mažinimas, atvirkščiai, būtų neefektyvus, nes santykinis atstumas tarp orlaivių (t. y. orlaiviams prasilenkiant tarpusavyje) užtikrintų labai mažos reikšmės santykinį atstumą, todėl šiame sektoriuje TCAS II TA tik išsiųstų informaciją apie artėjantį orlaivį, o priartėjus iki RA zonos, patarimojo sprendimo patarėjas patartų keisti skrydžio kryptį ar tai aukštį, pagal situaciją.

Mažėjant jautrumo lygiui, paklaidos didėja (t. y. mažėjant  $\tau$  laikui iki CPA, paklaidos didėja). 40 pav. pavaizduotas paklaidų santykis su jautrumo lygiu.



**38 pav.** Galimų paklaidų reikšmės esant skirtingiems jautrumo lygiams

Paklaidos, kai laiku neatlikus manevro arba jo visai neatlikus dėl tam tikrų veiksmų gali būti labai didelės (t. y. mažėjant laikui – didėja), tačiau tikimybė – labai maža (t. y. artima 0). Deja, tokios informacijos (t. y. informacijos apie tikimybę, kad orlaivio įgula nesureaguotų į patariamą sprendimą balsu komandą arba dėl tam tikrų veiksmų orlaivis neatliktų reikiamo susidūrimo vengimo manevro) nėra ir reiktų atlikti tyrimą pasauliniu mastu.

Galima teigti, kad tiksliai gali būti įvertinta tik paklaida dėl navigacijos sistemos netikslumo (GPS arba GLONASS).

## **Rekomendacijos**

Šiais laikais oro erdvę kontroliuoja Skrydžių valdymo tarnybos ir orlaivis negali nukrypti savo pasirinkta skrydžio kryptimi be skrydžio vadovo sutikimo, išskyrus TCAS II RA patarėjo suveikimo atveju. Kadangi buvo išnagrinėta galimybė orlaivius išskirti horizontalėje, tai tuo pačiu gali būti padidintos patariamą sprendimą galimybės. Įdiegus į dabartinį TCAS II kompiuterį horizontaliojo išskyrimo skaičiavimo funkcijas, orlaiviai galėtų būti išskiriami optimaliu būdu. Pagal situaciją – horizontalėje, vertikalėje arba horizontalėje ir vertikalėje (t. y. orlaivis galėtų atlikti susidūrimo vengimo manevrą į kurią nors kryptį aukščiau ar žemiau), o naujausiomis navigacinėmis technologijomis, tokiomis kaip ADS-B, orlaivio įgula daugiafunkciame kabinos ekrane (CDTI) galėtų matyti aplink save vykstantį orlaivių eismą.

Tik vertikaliojo orlaivių išskyrimo atveju RA zonoje sistemos prijungimas prie autopiloto nėra galimas (t. y. yra galimas, bet nėra tikslus ir reikalingas), ir orlaivio įgula, gavusi patariamą sprendimą tam tikrą manevrą, turi atjungti autopilotą ir vykdyti RA balsu komandas. Taip yra todėl, kad dabartinė TCAS II v.7.1 sistema tiksliai neįvertina supančios oro eismo situacijos horizontalėje. Būtent horizontaliojo ir vertikaliojo orlaivių išskyrimo atveju būtų galimybė (t. y. būtų veiksminga) prijungti TCAS II sistemą prie autopiloto, kadangi orlaivio TCAS II sistema tiksliai įvertintų ne tik supantį oro eismą vertikalėje, bet ir – horizontalėje.

Apkrautuose Europos oro uostuose, kaip ir visuose didžiųjų miestų oro uostuose, dažniausiai yra naudojami 2 ar net 4 paraleliniai takai. Dabartinė TCAS II v.7.1 sistema neturi galimybės išskirti orlaivių aukščiau, žemesniuose negu 1000 pėdų (virš žemės paviršiaus). Horizontaliojo išskyrimo atveju tokia galimybė būtų, ir jeigu orlaiviai priartėtų vienas kito atžvilgiu per arti dėl tam tikrų priežasčių, tai orlaiviai nekeisdami savo aukščio galėtų saugiai nukrypti reikiama kryptimi, o orlaiviams kylant – tiesiog pakeisti skrydžio kryptį.

Iš praktikos yra žinoma, kad orlaivio įgula dažnai gauna skrydžio vadovo nurodymus apie greičio sumažinimą, krypties pakeitimą tam, kad sėkmingai būtų prasilenkta su kitu artėjančiu orlaiviu ir

nepatekta į RA patarėjus zoną. Siūlomu atveju TCAS II TA išsiųstų ne tik informuojančią eismo informaciją, bet ir – rekomenduojančią informaciją apie greičio mažinimą. Jeigu būtų pasiekta, kad TA zonos greičio mažinimas būtų efektyvus visais atvejais, tai orlaivio įgulai beliktų tik bendradarbiauti su Skrydžio valdymo tarnybomis ir tiesiog informuoti apie greičio sumažinimą dėl artėjančio orlaivio. O praplėtus TCAS II TA galimybes (pvz., trumpalaikis krypties pakeitimas) būtų galimybė ne tik mažinti skrydžio greitį, bet ir keisti skrydžio kryptį iš anksto ir tuo pačiu išvengti patekimo į RA zoną.



## LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

- ADS-B Background and Definitions* [interaktyvus]. 2009. Free Flight Systems. Prieiga per internetą:  
<<http://www.freeflightsystems.com/adsb.htm>>
- Deistler, M. 1998. *Rule Optimization for Airborne Aircraft Separation*. Wien: Institut für Ökonometrie.
- Department of Transportation, *Bureau of Transportation Statistics* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. spalio 24 d.]. Prieiga per internetą:  
<[http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_02\\_15.html](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_02_15.html)>
- Eurocontrol, 2013. ACAS X – the future of airborne collision avoidance. *NETALERT – the Safety Nets Newsletter* 17: 1–2.
- Federal Aviation Administration, 2014. *Next Gen*. USA. 4–5.
- Federal Aviation Administration, 2015. *Aeronautics and Space. Aircraft speed*. USA; Washington.
- Flickr* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. gegužės 2 d.]. Prieiga per internetą:  
<<https://www.flickr.com/photos/26436024@N06/7138309561/in/photostream/>>
- FlightRadar 24* [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą:  
<<http://www.flightradar24.com/49.4,5.09/5>>
- Kochenderfer, M. J., Holland, J. E., Oslon, W. A. 2013. Optimizing the Next Generation Collision Avoidance System for Safe, Suitable, and Acceptable Operational Performance. *Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. Lexington, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology. 1–2.
- Kondroška, V., Stankūnas, J. 2010. Lietuvos Respublikos oro erdvės reorganizavimas. *Aviacijos technologijos*. 103–109.
- Gleason, S., Gebre-Egziabher, D. 2009. *GNSS Applications and methods*. Norwood: Artech House.
- Le Forum Des Pilotes Prives* [interaktyvus], [žiūrėta 2012. balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą:  
<<http://www.pilotes-prives.fr/viewtopic.php?f=2&p=264999>>
- Lester, E. A. Benefits and Incentives for ADS-B Equipage in the National Airspace System. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Munoz†, C., Narkawicz, A., Chamberlain, J. *A TCAS-II Resolution Advisory Detection Algorithm*. Langley Research Center. Hampton, VA, 23681, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Pakrijauskas, V., Rudinskas D. 2014. Automatinės priklausomo stebėjimo sistemos (ADS-B) analizė. *Aviacijos technologijos*. 2 tomas, Nr. 2., 7–8.

*Real - life ADS-B Applications* [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. rugpjūčio 12 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://ih.constantcontact.com/fs188/1103180588651/img/536.jpg>>

Team, D. A. 2014. *Straight Talk About ADS-B*. Lincoln.

The Boeing Company. 2014. *Flight Crew Operations Manual*. Washington: The Boeing Company.

*TRX-1090 - ADS-B Receiver Data Port Specification* [interaktyvus], [žiūrėta 2010. lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą:

<[http://www.aeroshop.eu/media/upload/dokumentacija/Garrecht/Garrecht\\_TRX->](http://www.aeroshop.eu/media/upload/dokumentacija/Garrecht/Garrecht_TRX->)

Turner, J. 2014. ADS-B - A Boeing Perspective. *ICAO ADS-B Seminar and SITF/13*. Hong Kong: Boeing Commercial Airplanes.

Van Ausdal, R. G. 2001. *Kinematics of motion in three dimensions*. Johnstown: University of Pittsburgh at Johnstown.

Vigier, C. 2011. Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B). *Surveillance development for air traffic management*. 8–13.

Xu, Y. 2013. *TCAS/ ADS-B Integrated Surveillance and Collision Avoidance System*. 1–4.

Авиатехника [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. balandžio 2 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://www.aviapages.ru/aircrafts/952949732.shtml>>

## 1 PRIEDAS

**1 lentelė.** Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal  $\alpha$  ir posvyrio kampų reikšmes esant 7-tam jautrumo lygiui

| Posvyrio kampas, $^{\circ}$<br>$\alpha, ^{\circ}$  | 10°      | 15°      | 20°      | 25°      | 30°         | 35°         | 40°         |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 0                                                  | 1,141534 | 1,731811 | 2,34659  | 2,995956 | 3,691841747 | 4,448755635 | 5,284654225 |
| 10                                                 | 1,13719  | 1,725221 | 2,337661 | 2,984555 | 3,677793174 | 4,431826776 | 5,26454452  |
| 20                                                 | 1,124191 | 1,705501 | 2,31094  | 2,950441 | 3,635754375 | 4,38116904  | 5,204368452 |
| 30                                                 | 1,102637 | 1,672801 | 2,266632 | 2,893871 | 3,56604529  | 4,297167962 | 5,104583999 |
| 40                                                 | 1,072691 | 1,62737  | 2,205073 | 2,815278 | 3,469196446 | 4,180462841 | 4,965950578 |
| 50                                                 | 1,034581 | 1,569554 | 2,126733 | 2,715258 | 3,345944924 | 4,031941874 | 4,789523276 |
| 60                                                 | 0,988597 | 1,499792 | 2,032207 | 2,594574 | 3,197228739 | 3,852735395 | 4,576644809 |
| 70                                                 | 0,93509  | 1,418616 | 1,922214 | 2,454143 | 3,024179714 | 3,644207273 | 4,328935311 |
| 80                                                 | 0,874465 | 1,326644 | 1,797592 | 2,295035 | 2,828114855 | 3,407944533 | 4,048280003 |
| 90                                                 | 0,807186 | 1,224575 | 1,65929  | 2,118461 | 2,610526334 | 3,145745277 | 3,736814838 |
| 100                                                | 0,733764 | 1,113186 | 1,508359 | 1,925763 | 2,373070132 | 2,859605    | 3,396910257 |
| 110                                                | 0,654757 | 0,993326 | 1,345949 | 1,71841  | 2,117553433 | 2,551701403 | 3,031153138 |
| 120                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 130                                                | 0,482433 | 0,731895 | 0,991712 | 1,266146 | 1,560239742 | 1,880125373 | 2,233391382 |
| 140                                                | 0,390427 | 0,592314 | 0,802581 | 1,024677 | 1,262684243 | 1,52156404  | 1,807458195 |
| 150                                                | 0,295451 | 0,448226 | 0,607342 | 0,77541  | 0,955518956 | 1,151422685 | 1,36776916  |
| 160                                                | 0,198225 | 0,300726 | 0,407481 | 0,520242 | 0,641081592 | 0,772518309 | 0,917670576 |
| 170                                                | 0,099491 | 0,150937 | 0,204519 | 0,261115 | 0,32176521  | 0,387734602 | 0,460587964 |
| 175                                                | 0,049793 | 0,075541 | 0,102357 | 0,130682 | 0,161035875 | 0,194051995 | 0,23051338  |
| <i>Naudojant loginį manevro pasirinkimo modelį</i> |          |          |          |          |             |             |             |
| 110                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 120                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 130                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 140                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 150                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 160                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |
| 170                                                | 0,570767 | 0,865905 | 1,173295 | 1,497978 | 1,845920873 | 2,224377817 | 2,642327112 |

**2 lentelė.** Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal  $\alpha$  ir posvyrio kampų reikšmes esant 5-tam jautrumo lygiui

| Posvyrio kampas, °<br>$\alpha$ , °                 | 10°         | 15°         | 20°         | 25°         | 30°         | 35°         | 40°         |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0                                                  | 0,581329472 | 0,879776105 | 1,18774651  | 1,508681541 | 1,8461323   | 2,203545722 | 2,583669932 |
| 10                                                 | 0,579117338 | 0,876428291 | 1,183226776 | 1,502940553 | 1,839107209 | 2,195160566 | 2,573838287 |
| 20                                                 | 0,572497771 | 0,866410329 | 1,169701971 | 1,485761279 | 1,818085402 | 2,170068911 | 2,54441818  |
| 30                                                 | 0,56152115  | 0,849798461 | 1,147275029 | 1,457274464 | 1,783226867 | 2,128461723 | 2,495633514 |
| 40                                                 | 0,546271015 | 0,826719114 | 1,11611663  | 1,417696912 | 1,734796899 | 2,070655655 | 2,427855569 |
| 50                                                 | 0,526863427 | 0,797347935 | 1,076463911 | 1,367329829 | 1,673164079 | 1,997090647 | 2,341600178 |
| 60                                                 | 0,503446091 | 0,761908457 | 1,028618651 | 1,306556541 | 1,59879747  | 1,908326574 | 2,237523796 |
| 70                                                 | 0,476197225 | 0,720670395 | 0,972944981 | 1,235839569 | 1,512263047 | 1,805038983 | 2,116418506 |
| 80                                                 | 0,445324212 | 0,673947596 | 0,909866614 | 1,155717111 | 1,41421939  | 1,688013956 | 1,979205994 |
| 90                                                 | 0,411062012 | 0,62209565  | 0,839863611 | 1,066798949 | 1,305412668 | 1,558142123 | 1,826930529 |
| 100                                                | 0,373671382 | 0,56550918  | 0,76346874  | 0,969761802 | 1,186670968 | 1,416411888 | 1,66075102  |
| 110                                                | 0,333436887 | 0,504618843 | 0,68126341  | 0,865344182 | 1,058897986 | 1,263901903 | 1,481932192 |
| 120                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 130                                                | 0,245680451 | 0,371809448 | 0,501963365 | 0,637596371 | 0,780209223 | 0,931258663 | 1,091906095 |
| 140                                                | 0,198826389 | 0,30090115  | 0,406233231 | 0,515999477 | 0,631414434 | 0,753657024 | 0,88366716  |
| 150                                                | 0,150459139 | 0,227702811 | 0,307411417 | 0,390475516 | 0,477814199 | 0,5703196   | 0,668702985 |
| 160                                                | 0,100946803 | 0,152771517 | 0,206250017 | 0,2619798   | 0,32057751  | 0,382641699 | 0,448649575 |
| 170                                                | 0,050666202 | 0,07667754  | 0,103518929 | 0,13149026  | 0,160901032 | 0,192051664 | 0,225181672 |
| 175                                                | 0,025357235 | 0,038375295 | 0,051808775 | 0,065807765 | 0,08052716  | 0,096117314 | 0,1126981   |
| <i>Naudojant loginį manevro pasirinkimo modelį</i> |             |             |             |             |             |             |             |
| 110                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 120                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 130                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 140                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 150                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 160                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |
| 170                                                | 0,290664736 | 0,439888052 | 0,593873255 | 0,754340771 | 0,92306615  | 1,101772861 | 1,291834966 |

**3 lentelė.** Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal  $\alpha$  ir posvyrio kampų reikšmes esant 3-čiam jautrumo lygiui

| Posvyrio kampas, °<br>$\alpha$ , °                 | 10°         | 15°         | 20°         | 25°         | 30°         | 35°         | 40°         |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0                                                  | 0,209479225 | 0,317421427 | 0,429340969 | 0,54678869  | 0,671505447 | 0,805448472 | 0,950759285 |
| 10                                                 | 0,208682093 | 0,316213543 | 0,427707197 | 0,544707994 | 0,668950166 | 0,802383497 | 0,947141359 |
| 20                                                 | 0,206296765 | 0,312599083 | 0,422818315 | 0,538481741 | 0,66130377  | 0,793211899 | 0,936315115 |
| 30                                                 | 0,202341394 | 0,306605554 | 0,414711531 | 0,528157317 | 0,648624454 | 0,77800348  | 0,918362948 |
| 40                                                 | 0,196846082 | 0,298278573 | 0,403448541 | 0,513813297 | 0,631008713 | 0,756873985 | 0,893421484 |
| 50                                                 | 0,189852653 | 0,287681511 | 0,389115064 | 0,495558848 | 0,608590616 | 0,729984222 | 0,861680544 |
| 60                                                 | 0,18141433  | 0,27489502  | 0,371820186 | 0,473532896 | 0,581540776 | 0,697538838 | 0,823381694 |
| 70                                                 | 0,171595335 | 0,260016411 | 0,351695533 | 0,447903073 | 0,55006506  | 0,659784762 | 0,778816412 |
| 80                                                 | 0,160470396 | 0,243158921 | 0,328894264 | 0,418864437 | 0,514403016 | 0,617009326 | 0,728323867 |
| 90                                                 | 0,148124181 | 0,224450844 | 0,303589911 | 0,386637991 | 0,474826055 | 0,569538076 | 0,672288338 |
| 100                                                | 0,13465065  | 0,204034561 | 0,275975055 | 0,351468995 | 0,431635381 | 0,517732298 | 0,611136288 |
| 110                                                | 0,120152347 | 0,182065451 | 0,246259863 | 0,313625108 | 0,385159701 | 0,461986264 | 0,545333123 |
| 120                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 130                                                | 0,088529746 | 0,134148092 | 0,181447334 | 0,231082886 | 0,283790465 | 0,340397233 | 0,401808236 |
| 140                                                | 0,071646115 | 0,108564522 | 0,14684326  | 0,187012746 | 0,229668389 | 0,275479602 | 0,325178827 |
| 150                                                | 0,054217213 | 0,082154711 | 0,11112162  | 0,141519327 | 0,173798399 | 0,208465404 | 0,24607461  |
| 160                                                | 0,036375686 | 0,055119652 | 0,074554277 | 0,09494886  | 0,116605697 | 0,139864659 | 0,165097617 |
| 170                                                | 0,018257317 | 0,0276651   | 0,037419531 | 0,047655774 | 0,058525556 | 0,07019946  | 0,082864132 |
| 175                                                | 0,009137355 | 0,013845728 | 0,01872759  | 0,023850588 | 0,029290656 | 0,035133169 | 0,041471538 |
| <i>Naudojant loginį manevro pasirinkimo modelį</i> |             |             |             |             |             |             |             |
| 110                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 120                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 130                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 140                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 150                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 160                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |
| 170                                                | 0,104739613 | 0,158710714 | 0,214670485 | 0,273394345 | 0,335752723 | 0,402724236 | 0,475379643 |

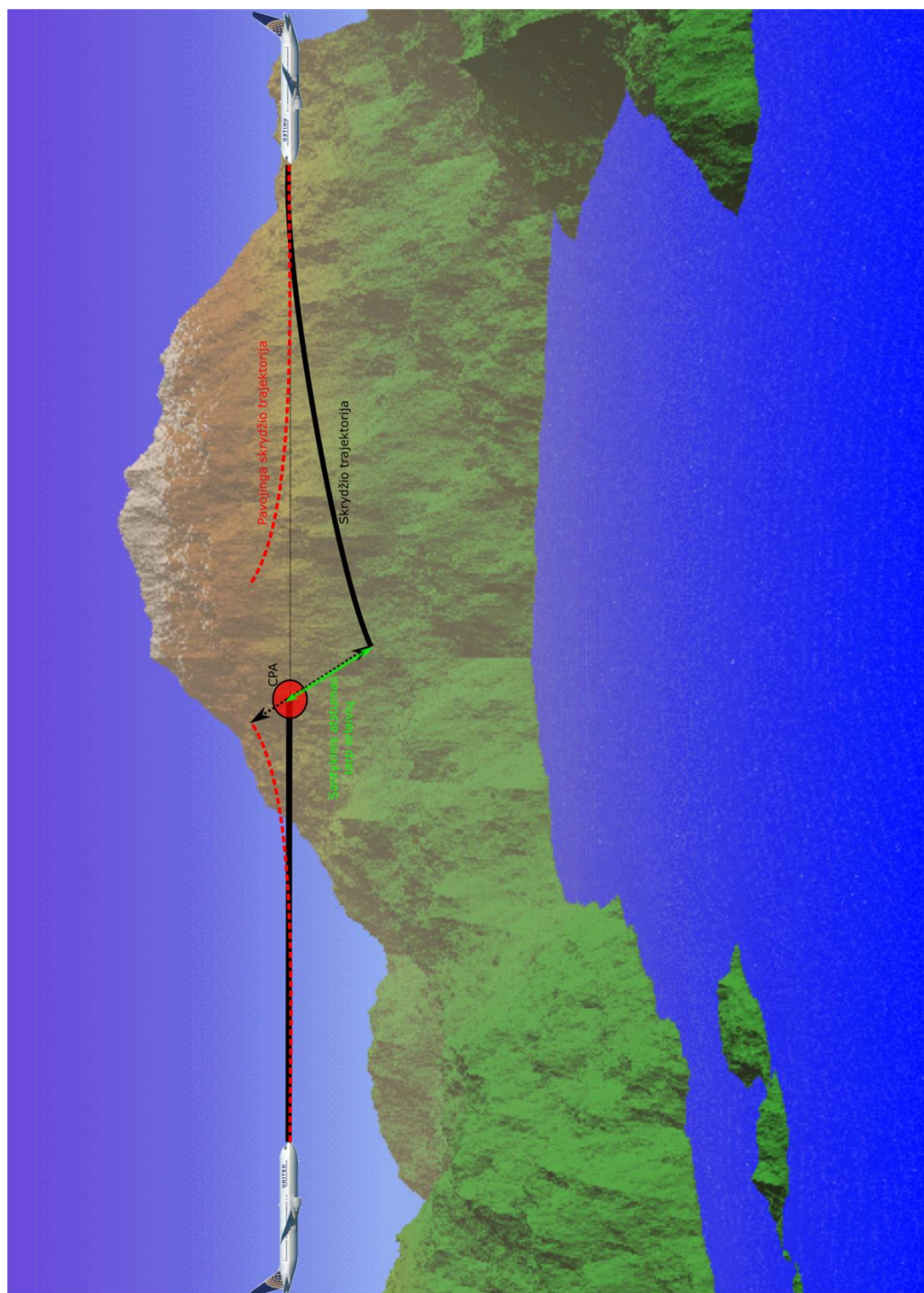
**4 lentelė.** Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal  $\alpha$  reikšmes ir jautrumo lygi, kai TA zonoje artėjantis orlaivis mažina skrydžio greitį

| Jautrumo lygis<br>$\alpha, ^\circ$ | SL7         | SL5         | SL3         |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0                                  | 0           | 0           | 0           |
| 10                                 | 0,004532282 | 0,003176396 | 0,001117077 |
| 20                                 | 0,017991416 | 0,01260907  | 0,004434366 |
| 30                                 | 0,039968454 | 0,028011415 | 0,009851073 |
| 40                                 | 0,069795634 | 0,048915439 | 0,017202614 |
| 50                                 | 0,106566673 | 0,074685984 | 0,026265617 |
| 60                                 | 0,149164301 | 0,104540024 | 0,036764706 |
| 70                                 | 0,196294211 | 0,13757046  | 0,048380872 |
| 80                                 | 0,246524385 | 0,172773679 | 0,060761163 |
| 90                                 | 0,298328603 | 0,209080048 | 0,073529412 |
| 100                                | 0,384149383 | 0,267835505 | 0,094422313 |
| 110                                | 0,467362543 | 0,324805708 | 0,114680393 |
| 120                                | 0,545439692 | 0,378259645 | 0,133688122 |
| 130                                | 0,616008495 | 0,426573146 | 0,150867959 |
| 140                                | 0,676924756 | 0,468278229 | 0,165697904 |
| 150                                | 0,726337564 | 0,502107707 | 0,177727355 |
| 160                                | 0,762745536 | 0,527033687 | 0,186590805 |
| 170                                | 0,785042435 | 0,542298807 | 0,192018941 |
| 175                                | 0,790670116 | 0,546151684 | 0,193388989 |

**5 lentelė.** Santykinio atstumo reikšmės (NM) pagal  $\alpha$  reikšmes ir jautrumo lygį, kai TA zonoje horizontu skrendantis orlaivis mažina skrydžio greitį, o artėjantis orlaivis artėja aukštėdamas arba žemėdamas

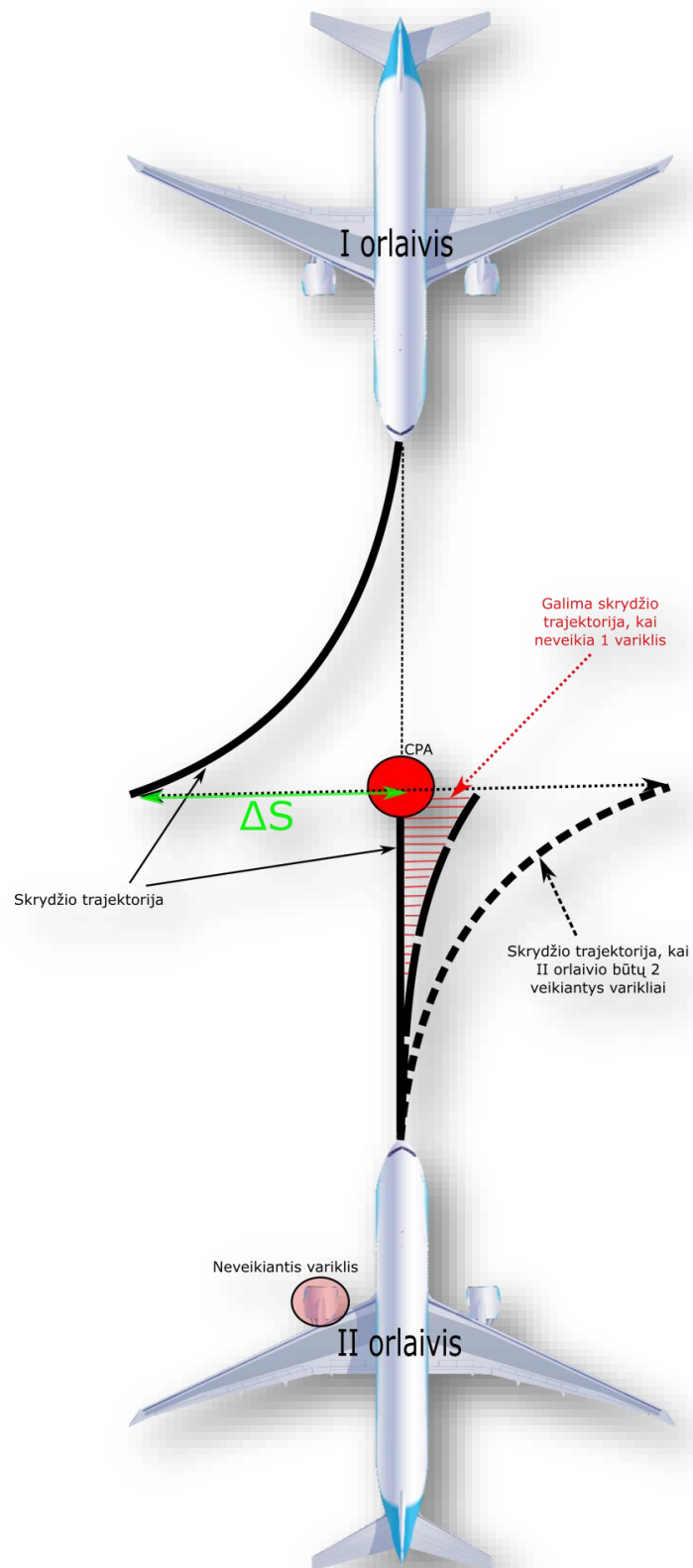
| Jautrumo lygis<br>$\alpha, ^\circ$ | SL7         | SL5         | SL3         |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0                                  | 0,005838347 | 0,129646907 | 0,089310214 |
| 10                                 | 0,029581525 | 0,13332436  | 0,090427018 |
| 20                                 | 0,058072842 | 0,143691319 | 0,093665044 |
| 30                                 | 0,086315522 | 0,159174408 | 0,098724296 |
| 40                                 | 0,113951325 | 0,178047168 | 0,105202233 |
| 50                                 | 0,140740528 | 0,198863584 | 0,112676844 |
| 60                                 | 0,166469311 | 0,220535462 | 0,120758799 |
| 70                                 | 0,190937548 | 0,242264566 | 0,129112491 |
| 80                                 | 0,213956835 | 0,263457512 | 0,137457963 |
| 90                                 | 0,235350752 | 0,283660818 | 0,145564628 |
| 100                                | 0,254955734 | 0,302517865 | 0,153243043 |
| 110                                | 0,272622094 | 0,31974177  | 0,160337414 |
| 120                                | 0,288215062 | 0,335098537 | 0,166719628 |
| 130                                | 0,301615744 | 0,348396605 | 0,172284796 |
| 140                                | 0,312721999 | 0,359480355 | 0,176948049 |
| 150                                | 0,321449193 | 0,368226055 | 0,180642285 |
| 160                                | 0,327730832 | 0,374539349 | 0,183316616 |
| 170                                | 0,331519059 | 0,378353716 | 0,18493533  |
| 175                                | 0,332785016 | 0,379629555 | 0,185477243 |

## 2 PRIEDAS



**1 pav.** Orlaivių manevrų pasirinkimas kalnuose





**2 pav.** Santykinis atstumas tarp orlaivių, kai II orlaivio yra vienas neveikiantis variklis