VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

IVAN SUZDALEV

TERMINIŲ SRAUTŲ APTIKIMAS IR PROGNOZAVIMAS TAIKANT DIRBTINIUS NEURONŲ TINKLUS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINIERIJA (10T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Jonas STANKŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2090-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-392-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2012
© Ivan Suzdalev, 2012
ivan.suzdalev@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

IVAN SUZDALEV

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO UPDRAFTS LOCALIZATION AND FORECASTING

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Jonas STANKŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos terminių srautų paieškos ir prognozavimo autonominio orlaivio skrydžio metu problemos. Pagrindinis tyrimų objektas yra terminių srautų aparatinis aptikimas ir prognozavimas. Terminiai srautai yra labai svarbus autonominio orlaivio skrydžio charakteristikų, kaip antai skrydžio laikas ir trukmė, gerinimo šaltinis.

Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti metodikas ir algoritmus, leidžiančius aptikti terminį srautą, nustatyti bei sėkmingai prognozuoti jo parametrus. Sukurtų metodų ir algoritmų taikymo sritis – autonominių orlaivių valdymo sistemų sintezė, meteorologiniai mezosastelinių meteorologinių reiškinių tyrimai, biologinius skaičiavimo modelius naudojančių sistemų sintezė.

Darbe sprendžiami keli uždaviniai: terminio srauto aptikimas naudojant orlaivio navigacinių parametrų matavimo duomenis, terminio srauto modeliavimas bei modeliui reikalingų duomenų pateikimas.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir tris priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir konferencijų pranešimai bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama su disertacijos objektais susijusių literatūros šaltinių apžvalga. Apžvelgiama literatūra apie atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą autonominių orlaivių skrydžio metu. Pateikiama dirbtinių neuronų taikymo duomenų apdorojimo bei prognostikos srityje literatūros šaltinių apžvalga. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje sudaromas terminio srauto empirinis modelis.

Trečiajame skyriuje nagrinėjamos terminiam srautui reikalingų duomenų matavimo bei apdorojimo metodikos.

Ketvirtajame skyriuje pristatomi atlikti eksperimentai ir jų rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: vienas – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į *Thomson ISI* sąrašą, du – konferencijų medžiagoje, referuotose *Thomson ISI* duomenų bazėje, du – *Inspec* duomenų bazėje cituojamame žurnale, trys – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų medžiagoje bei vienas – respublikinės konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti 9 pranešimai.

Abstract

The dissertation examines the thermal flow detection and prediction problems during an autonomous aircraft flight. The main research object is the thermal flows and artificial neural networks. Thermal flows are a very important source for improving autonomous aircraft flight parameters, such as flight time and duration.

The primary aim of the dissertation is to create methodologies and algorithms to detect, identify and to successfully predict the parameters the thermal flows. The application are of the methods and algorithms developed is autonomous aircraft control system synthesis, research on mesoscale meteorological phenomena and synthesis of computing systems using biological models.

The following objectives are carried out: thermal flow sensing using aircraft navigational parameters measurement data, thermal flow simulation modeling and data input necessary for modeling.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, bibliography, and list of author publications on the topic as well as three annexes.

The introductory chapter discusses the research problem and the relevance of the research described in the thesis, formulates the goal and objectives, describes the research methodology, scientific novelty, the practical significance of the results, hypotheses. In the end of the introduction a list of author's publications on the topic and the structure of the dissertation are presented.

The first section provides a review of previous research connected to the topic. Overview of the literature on the use of renewable energy sources in the autonomous aircraft during flight is presented. Review on research concerning availability of application of neural networks for processing of data and prediction is presented as well. The chapter ends with conclusions and revised dissertation objectives.

In the second chapter an empirical model of thermal flow is created.

The third chapter examines the techniques for measurement and processing of data required for thermal flow.

The fourth section presents the experiments that have been carried out and their results.

On the topic of the dissertation 6 articles have been published - one in the collection of articles included in the Thomson ISI, two - in conference proceedings, reviewed in Thomson ISI database, two - in Inspec database, cited journal, three - in reviewed international conference proceedings and one - in a national conference materials. 9 presentations of the topic of the dissertation have been given in conferences.

Žymėjimas

Simboliai

E – pilnutinės energijos kiekis

V – orlaivio skrydžio greitis

m – orlaivio masė

g – laisvojo kritimo pagreitis

h – orlaivio aukštis virš žemės gravitacijos centro

$\hat{E}$ – atsargoje esančios energijos kiekis

$\hat{w}$ – pilnutinės energijos greičio pokytis

t – laikas

w_T – terminio srauto vertikalioji greičio dedamoji

w_{pyk} – terminio srauto teorinė maksimali reikšmė

z_i – maksimalus terminio srauto aukštis

z^* – srauto modeliavimo aukštis

Dia – modeliuojamas srauto skersmuo pagal Alleno modelį

T_c – oro temperatūra Celsijaus laipsniais aukštyje, kur atmosferos slėgis 500 mb

T_p – temperatūra pagal drėgnąją adiabatę lygyje, kur atmosferos slėgis yra 500, mb

T_d – rasos taško aukštis

T_w – temperatūra prie žemės

Li – (angl. Lift index) konvekcinio stiprumo indeksas

K – aerodinaminės kokybės koeficientas

L – keliamoji jėga

D – pasipriešinimo jėga

G – orlaivio svoris

P_R – orlaivio horizontaliam skrydžiui reikalinga trauka

$C(I)$ – skaičiavimo pajėgumas

$\tau(x)$ – instrukcijos vykdymo laikas

$\tau_{ni}(y)$ – vieno taško, kurio eilės indeksas n iš N kiekio taškų, per iteraciją i laiko momentu t_i , skaičiavimo laikas

τ_{const} – pastovus vėlinimo laikas, reikalingas operacinės sistemos instrukcijoms vykdyti

τ_{sk} – pastovus skaičiavimo laikas, naudojamas kitoms modeliavimo algoritmo funkcijoms

N – modeliuojamųjų taškų skaičius

∇ – terminio srauto horizontaliojo skerspjūvio gradientas

Santrumpos

DNT – dirbtinių neuronų tinklas (angl. Artificial Neural Network)

AO – autonominis orlaivis (angl. *Unmanned aerial vehicle*)

DNT – dirbtinių neuronų tinklas (angl. Artificial Neural Network)

AOAVS – autonominio orlaivio automatinė valdymo sistema (angl. Automatic Control System of Unmanned aerial vehicle)

MLP – daugiasluoksnis perceptronas (angl. Multilayer perceptron)

RBF – radialinis baizisinis tinklas (angl. Radial Basis Function Networks)

GRNN – apibendrintas regresinis tinklas (angl. General Regression Neural Network)

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
1. TERMINIŲ SRAUTŲ PARAMETRŲ MATAVIMO IR APDOROJIMO TAIKANT DIRBTINIUS NEURONŲ TINKLUS APŽVALGA	7
1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimo autonominio orlaivio skrydžio metu apžvalga	7
1.2. Literatūros apie dirbtinius neuronų tinklus apžvalga	12
1.3. Dirbtinių neuronų tinklų mokymas	15
1.4. Dirbtinių neuronų tinklų pagrindų sudarytos skaičiavimo sistemos sintezė	17
1.5. Disertacijos uždavinių formulavimas	18
2. TERMINIO SRAUTO MODELIAVIMO METODIKŲ SUDARYMAS	21
2.1. Terminio srauto struktūra	21
2.2. Terminio srauto modeliavimui reikalingo skaičiavimo pajėgumo įvertinimas ...	24

2.3. Terminio srauto empirinio modelio kūrimas	25
2.4. Srauto centrinės ašies kreivės funkcijos nustatymas	31
2.5. Antrojo skyriaus apibendrinimas	35
3. TERMINIO SRAUTO APTIKIMO IR PROGNOZAVIMO METODIKŲ SUDARYMAS	37
3.1. Matuojamų bei prognozuojamų parametrų aibių pasirinkimas	37
3.2. Autonominio orlaivio skrydžio principai	41
3.3. Modeliuojamųjų parametrų zonos dydžio nustatymas	43
3.4. Terminio srauto atpažinimo uždavinys	45
3.5. Terminio srauto meteorologinių parametrų nustatymo uždavinys	49
3.6. Terminio srauto meteorologinių parametrų prognozavimo uždavinio sudarymas	52
3.7. Trečiojo skyriaus apibendrinimas	53
4. PRAKTINIAI EKSPERIMENTAI IR SUDARYTŲ METODIKŲ APROBAVIMAS	55
4.1. Kylančio oro srauto aptikimas	55
4.2. Kylančio oro srauto modeliavimas	65
4.3. Bikubinės interpoliacijos taikymas vykdant terminio srauto sektoriaus interpoliavimą	72
4.4. Skaiciavimo resursų sąnaudų vertinimas, taikant terminio srauto modelį	74
4.5. Kelių parametrų aproksimavimo funkcijos įgyvendinimas dirbtinių neuronų tinklų pagalba	75
4.6. Parametrų, reikalingų kylančiam oro srautui aptikti, matavimai	79
4.7. Ketvirtojo skyriaus apibendrinimas	88
BENDROSIOS IŠVADOS	89
LITERATŪROS SĄRAŠAS	91
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	97
PRIEDAI	99
A priedas. Terminio srauto modelio algoritmo funkcijos kodas	99
B priedas. Dirbtinių Neuronų Tinklų C++ funkcijos	101
C priedas. Autonominio orlaivio pagalba išmatuotų 2012-09-27 duomenų dalis	107

Contents

INTRODUCTION	1
Research Problem.....	1
Research Topicality	2
Research Object.....	3
Research Aim	3
Research Tasks	3
Research Methods	3
Scientific Novelty and Significance of Thesis.....	3
Practical Significance of Research Results.....	4
Arguments for Defence	4
Approval of Research Results	5
Structure of Dissertation.....	6
1. REVIEW OF THERMAL FLOW PARAMETER MEASUREMENTS AND PROCESSING APPLYING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS.....	7
1.1. Review of Application of Renewable Energy Sources for Autonomous Aircraft Flight	7
1.2. Review fo Literature on Artificial Neural Networks	12
1.3. Training of Artificial Neural Networks	15
1.4. Sinthesis of Computational System based on Artificial neural Netorks.....	17
1.5. Reformulation of Dissertation Tasks	18

2. CREATING A METHODOLOGY FOR UPDRAFT’S MODELING	21
2.1. Updraft’s Modeling Structure.....	21
2.2.Topicality of Updraft’s Modeling for low power	24
2.3. Designing An Empirical Model of Updraft.....	25
2.4. Determination of Flow's Central Axis Graph Function	31
2.5. Chapter 2 Conclusions.....	35
3. DESIGNING METHODOLOGY FOR THERMAL FLOW DETECTION AND PREDICTION	37
3.1. Selection of Measured and Predicted Parameter Sets.....	37
3.2. Autonomous Aircraft Flight Principles	41
3.3. Determination of Measured Parameter Zone Scope	44
3.4. Updraft Detection Task	46
3.5. Updraft meteorological Parameter Detection Task	49
3.6. Design of Updraft Measurement Parameter Prediction Task	52
3.7. Chapter 3 Conclusions.....	53
4. PACTICAL EXPERIMENTS AND APPROVAL OF DESIGNED METHODOLOGI.....	55
4.1. Detection of Updraft.....	55
4.2. Modeling of Updraft.....	65
4.3. Applicatyion of Bicube Interpolation During Updraft Section Interpolation.....	72
4.4. Assessment of Computation Resourse Expenditures Applying Updraft Model	74
4.5. Realisation of Several Parameter Approximation Function with Artificial Neural Networks	75
4.6. Measuremets of Data Required for Updraft Detection	79
4.7. Chapter 4 Conclusions.....	88
GENERAL CONCLUSIONS	89
LITERATURE AND SOURCES	91
LIST OF AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE TOPIC	97
ANNEXES.....	99
Annex A. Updraft Model Algorithm Code.....	99
Annex B. Artificial Neural Network C++ Functions.....	101
Annex C. Part of Data Measured with an Autonomous Aircrfat on 2012-09-27	107

Ivadas

Problemos formulavimas

Šiuo metu, vystantis intelektinėms dinaminių objektų autonominėms valdymo sistemoms, kai elektronikos ir kibernetikos pažanga viršijo drąsiausius praėjusio amžiaus mokslininkų lūkesčius, vis labiau plinta lengvieji autonominiai orlaiviai, galintys skristi pagal išankstinius navigacinius parametrus valdomi operatoriaus arba visiškai autonominiu valdymo režimu. Kylantys oro srautai, arba terminiai srautai (šiam darbe vartojamas terminų srautų terminas), yra perspektyvus, autonominiams orlaiviams naudoti tinkamas išorinis atsinaujinančios energijos šaltinis. Naudojant tokį energijos šaltinį autonominio orlaivio skrydžio metu gali gerokai padidėti skrydžio nuotolis ir (arba) skrydžio trukmė, taip pat kartu taupomi autonominio orlaivio energijos ištekliai.

Efektyvus terminų srautų naudojimas skrendant ilgesnį kaip tūkstančio kilometrų nuotolį praktiškai įmanomas tik vykdant pilotuojamąjį skrydį. Iki 2012 m. pilotuojamojo skrydžio naudojant atkuriamosios energijos šaltinius nuotolio rekordas siekia 3009 km (sklandytojas Klaus Olmann 2003).

Orlaivio pilotas, atsižvelgdamas į tikslinį kitų parametrų keitimą, gali keisti aerodinaminius orlaivio parametrus, t. y. orlaivio piloto veiksmai grindžiami išankstiniais tikslais ir (arba) priklauso nuo netikėtų aplinkos parametrų pokyčių. Taigi orlaivio pilotas geba prisiderinti prie iš anksto nežinomų aplinkos paramet-

rų pokyčių. Jis mokosi iš savo veiksmų pasekmių ir taip efektyviau įvykdo savo užduotį.

Autonominių orlaivių valdymo sistemos, palyginti su pilotuojamomis, negali efektyviai panaudoti terminių srautų energijos, nes terminių srautų naudojimas yra sudėtingas prognozavimo, atpažinimo ir valdymo uždavinys, vykdomas stochastinių daugiamatinių parametrų erdvėje.

Kai kuriuose darbuose (Брилюк *et al.* 2002 ir Солдатова *et al.* 2006) teigiama, kad atpažinimo uždavinius tikslinga atlikti naudojant dirbtinių neuronų tinklus (DNT) įgyvendinančias skaičiavimo sistemas. Šiuo metu vyksta tyrimai, kurių objektas – DNT taikymas aviacijos srityje.

Verta pažymėti, kad dirbtinių neuronų tinklų veikimas nėra analogiškas biologinių neuronų tinklų veikimui. Biologiniams neuronams būdingas kur kas sudėtingesnis matematinis modelis, biologinių neuronų tinklų elementų skaičius gali siekti dešimtis milijardų, t. y. aštuoniomis ar devyniomis eilėmis daugiau nei dirbtinių neuronų tinklų, todėl dirbtinių neuronų tinklus verta nagrinėti tik kaip polinominę funkciją, galinčią vykdyti regresijos ir klasifikavimo uždavinius (Каллан *et al.* 2001).

Disertacijoje nagrinėjama tik labai siaura terminių srautų naudojimo autonominio orlaivio skrydžio metu problemos sprendimų sritis – terminių srautų aptikimo, modeliavimo bei jų raidos prognozavimo metodikos, neatsižvelgiant į autonominių orlaivių valdymo sistemų sintezės klausimus, matuojamiems parametrams apdoroti naudojant dirbtinių neuronų tinklus.

Darbo aktualumas

Europoje ir JAV atliekami tyrimai (Allen 2005; Edwards 2008; Bower *et al.* 2006; Langelaan *et al.* 2008), kurių paskirtis – kylančių oro srautų energijos naudojimas. Šio tyrimo metu nagrinėjamos hibridinės ekspertinės sistemos, sudarytos iš klasikinių nuosekliųjų skaičiavimo sistemų, veikiančių kartu su dirbtinių neuronų tinklais. Darbe (Doncieux *et al.* 2007) buvo siūloma dirbtinėse ekspertinėse sistemose naudoti biologinių skaičiavimo sistemų struktūrą, tačiau iki nuodugnaus mokslinio tyrimo šie bandymai kol kas nebuvo išvystyti. Disertacijoje pristatomi empiriniai terminio oro srauto modeliai skirti taikyti autonominių orlaivių skaičiavimo įrangoje. Siūlomos srauto modeliavimo metodikos gali gerokai padidinti autonominių orlaivių skrydžio trukmę ir (arba) nuotolį. Disertacijoje siūlomos metodikos ateityje gali būti pritaikytos autonominių orlaivių automatinių valdymo sistemų sintezės uždaviniams įgyvendinti.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – terminių srautų aparatinis aptikimas ir prognozavimas.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – kurti matavimo ir skaičiavimo metodikas, leidžiančias aptikti terminį srautą, išmatuoti ir prognozuoti jo meteorologinius parametrus.

Darbo uždaviniai

Tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti esamų šios mokslo srities tyrimų apžvalgą, nustatyti tiriamos srities mokslo pasiekimus, išanalizuoti užduoties tikslams įvykdyti reikiamus išmatuojamus bei apskaičiuojamus parametrus. Suformuluoti tolesnių tyrimo metodikų reikalavimus.
2. Sudaryti terminio srauto empirinį modelį.
3. Sukurti terminio srauto aptikimo ir prognozavimo metodikas.
4. Naudojant sukurta programinę įrangą kompiuterinio modeliavimo būdu patikrinti siūlomų metodikų veiksmingumą ir efektyvumą. Naudojant turimą technologinę bazę bei programinę įrangą patikrinti gautų matavimo metodikų veiksmingumą realaus autonominio orlaivio skrydžio metu.

Tyrimų metodika

Tyrimo metu buvo naudojami laiko eilių apdorojimo metodai, lengvojo orlaivio aerodinamikos ir skrydžio dinamikos parametrų matavimo metodai, meteorologinių parametrų matavimo bei prognozavimo metodai, dirbtinių neuronų tinklų kūrimo metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie matavimų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatyti kylančių oro srautų paieškos ir prognozavimo reikalavimai tinkamam dirbtinių neuronų tinklui sukurti. Remiantis šiais reikalavi-

mais sukurtas dirbtinių neuronų tinklas, idealizuoto kompiuterinio modelio sąlygomis atpažįstantis terminį srautą su 99 % tikimybe.

2. Sukurtos empirinės lygtys, leidžiančios modeliuoti terminių srautų geometriją, judėjimo dinamiką, raidos dinamiką. Pasiūlytas terminių srautų modeliavimo metodas, paremtas baigtiniais apskritiminių elementais ir dirbtinių neuronų tinklais. Verta pažymėti, kad apskritiminiai baigtiniai elementai modeliuojant terminį srautą ankščiau nebuvo taikomi. Terminis srautas vertikalioje plokštumoje modeliuojamas taikant adaptatyviosios ekstrapoliacijos metodą. Dirbtinių neuronų tinklas teikia ekstrapoliaciniam algoritmui koeficientus, nusakančius terminio srauto modelio parametrus. Taip pat pažymėtina, kad adaptatyviosios ekstrapoliacijos metodo sąsaja su dirbtinių neuronų tinklais ankščiau nebuvo taikoma.
3. Nustatyti metodai, kuriais remiantis galima terminio srauto modelį pritaikyti prie konkrečių skaičiavimo sistemos skaičiavimo pajėgumų.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimo rezultatus galima naudoti autonominių orlaivių valdymo sistemų sintezės metu. Remiantis šiame darbe siūlomais skaitiniais metodais įmanoma atpažinti, modeliuoti ir prognozuoti terminius srautus lengvųjų autonominių orlaivių valdymo sistemose ir taip pailginti jų skrydžio nuotolį ir (arba) trukmę. Kylančių oro srautų modeliavimas atliekamas remiantis mažo skaičiavimo pajėgumo reikalavimais pasižyminčiomis empirinėmis lygtimis, ir tai atveria mažų energijos sąnaudų skaičiavimo sistemų taikymo autonominiuose orlaiviuose galimybę.

Ginamieji teiginiai

1. Terminiai srautai efektyviai aptinkami taikant dirbtinių neuronų tinklus.
2. Terminio srauto empirinis modelis, pagristas baigtiniais apskritiminių elementais ir dirbtinių neuronų tinklais, modeliuoja terminio srauto polinkį ir raidą.
3. Dirbtinių neuronų tinklų pagrindu sukurtas kylančio oro srauto empirinis modelis tinka realizuoti mažo pajėgumo skaičiavimo sistemose.
4. Matuojant orlaivio navigacinius parametrus, terminio srauto meteorologinius parametrus ir šių parametrų apdorojimui taikant dirbtinių neuronų tinklus įmanoma nustatyti visų terminių srautų modeliavimo matavimo zonoje reikiamus kintamuosius.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema išspausdinti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtraukta į Thomson ISI sąrašą (Stankūnas, J., Suzdalev, I., Komka, A. 2012); trys – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (autorius pavadė metai), du – kitoje tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje (Stankūnas, J., Suzdalev, I., 2012; Stankūnas, J., Suzdalev, I., Snieckus, V. 2012). Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti devyniose Lietuvoje ir užsienyje vykusiose mokslinėse konferencijose:

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti devyniose Lietuvoje ir užsienyje vykusiose mokslinėse konferencijose:

- 11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija MOKSLAS–LIETUVOS ATEITIS, įvykusi Vilniuje 2008 m. balandžio 17 d. Pranešimas „Jonosferinio modeliavimo pritaikymas mažinant plačių zonų DGPS paklaidas“
- 12-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2009. Pranešimas – „Kylančių oro srautų lokalizavimas ir maksimalios kilimo zonos nustatymo, panaudojant dirbtinių neuronų tinklus, modeliavimo aspektai“
- Pranešimas X Kijevo tarptautinėje konferencijoje „Poljot 2010“. Pranešimo tema – „Применение искусственных нейронных сетей для обнаружения восходящих потоков“
- Pranešimas respublikinėje mokslinėje konferencijoje AVIACIJA 2010. Pranešimo tema – „Terminių srautų aptikimas dirbtinių neuronų tinklų pagalba. Kompiuterinio modeliavimo eksperimentas“
- Pranešimas respublikinėje mokslinėje konferencijoje AVIACIJA 2011. Pranešimo tema – „Terminio srauto struktūros modeliavimo realiu laiku aspektai“
- Pranešimas 14-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis. AIACIJOS TECHNOLOGIJOS“. Pranešimo tema – „Terminio srauto matematinio aprašymo aspektai“
- Pranešimas respublikinėje mokslinėje konferencijoje AVIACIJA 2012. Pranešimo tema – „Terminio srauto dinaminio modelio kūrimo aspektai“
- Pranešimas respublikinėje mokslinėje konferencijoje „AVIACIJA 2012. Pranešimo tema – „Terminio srauto dinaminio modelio susiejimas su meteorologinėmis modeliuojamos erdvės sąlygomis“

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra trys priedai.

Darbo apimtis yra 103 puslapiai be priedų, tekste panaudotos 95 numeruotos formulės, 50 paveikslų ir 2 lentelės. Rašant disertaciją panaudota 70 literatūros šaltinių.

Terminių srautų parametrų matavimo ir apdorojimo taikant dirbtinius neuronų tinklus apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiamas atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas autonominių orlaivių skrydžio metu. Apžvelgiami dirbtinių neuronų tinklų taikymo duomenų apdorojimo bei prognostikos srityje literatūros šaltiniai. Skyriaus tema paskelbtos dvi mokslinės publikacijos (Suzdalev *et al.* 2012a ir Suzdalev *et al.* 2012b).

1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimo autonominio orlaivio skrydžio metu apžvalga

Dvidešimt pirmame amžiuje ištobulėjo orlaivių aparatinės valdymo sistemos. Vykstant šiam tobulėjimo procesui prasidėjo aktyvūs autonominių orlaivių kūrimo ir naudojimo įvairiose mokslo srityse tyrimai (Chiesa *et al.* 2007). Vienas iš lengvųjų autonominių orlaivių trūkumų yra maži energetiniai ištekliai. Šiuo metu tiriama išorinių atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimo AO skrydžio metu galimybė (Allen 2005; Edwards 2008; Bower *et al.* 2006; Langelaan

2008, Langelaan 2010a, Langelaan 2010b). Praktinis autonominių orlaivių, galinčių naudoti išorinius atsinaujinančius energijos šaltinius, pritaikymas yra kitų astronominių kūnų tyrimai (Noth *et al.* 2006; Young *et al.* 2005), vandenynų tyrimai, aplinkosauga, pasienio apsauga, stebėjimo uždaviniai (Woolsey 2005). Galimi įvairūs atkuriami energijos šaltiniai: antvėjo srautai, vertikalusis vėjo gradientas, dinaminiai užuovėjos rotorius srautai, terminiai srautai (Doncieux *et al.* 2007; Boslough 2002, Garratt 1994.). Šiuo metu mokslininkai ne tik tiria teorinį antvėjo srautų bei vėjo gradiento energijos naudojimą, bet ir įrodo išvestas skaitines tokios užduoties išraiškas eksperimentiškai (Boslough 2002).

Perspektyvus atsinaujinantis energijos šaltinis, pritaikytinas orlaiviams, yra terminiai srautai (Larry 2005). JAV mokslininkas Edwardsas atlieka terminių srautų panaudojimo autonominiuose valdymo sistemose tyrimus (Edwards 2008). Tyrimai taip pat turi ir praktinį rezultatą – esant tinkamoms terminiams srautams susidaryti oro sąlygoms, eksperimentinis autonominis orlaivis, skrydžio metų nenaudodamas varomosios jėgainės, atliko pusantros valandos trukmės skrydį, kurio nuotolis siekė 48 km; energija panaudota tik orlaiviui pakilti į 140 m aukštį virš žemės paviršiaus (Edwards 2008). Edwardsas savo eksperimente naudojo modifikuotas Alleno terminio srauto lygtis (Allen 2005).

Srauto aptikimas – viena iš terminio srauto panaudojimo uždavinio dalių. Terminio srauto aptikimas vykdomas matuojant orlaivio pilnutinės energijos E kiekį (1.1) (Allen 2005). Šis metodas taikomas ir kitų mokslininkų darbuose (Edwards 2008).

$$E = 0,5 \cdot mV^2 + mgh \quad (1.1)$$

čia V yra orlaivio skrydžio greitis, m yra orlaivio masė.

Orlaivis, naudojantis sklandytuvo skrydžio principus, statiniame ore savo kinetinę energiją gali su nuostoliais paversti potencine ir atvirkščiai, bet pilnutinės energijos kiekis nedidėja. Sklandytuvo pilnutinės energijos kiekio padidėjimas rodo oro masių vertikalųjį judėjimą orlaivį supančioje erdvėje. Orlaivio skrydžio aukštis atitinka atsargoje esančios potencinės energijos kiekį (Thomas Fred 1999):

$$\hat{E} = \frac{E}{mg} \quad (1.2)$$

Didėjant pilnutinės energijos kiekiui, tiesiogiai arba po konversijos iš kinetinės energijos, padidės ir potencinės energijos kiekis, kuriuo galima disponuoti kuriant tolesnio skrydžio taktiką bei strategiją.

Edwardsas (Edwards 2008) terminio srauto nustatymo uždaviniui išspręsti siūlo taikyti pilnutinės energijos kiekio pokyčio greičio sąvoką (1.3):

$$\hat{w} = \frac{\Delta \hat{E}}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{mg \Delta t} \quad (1.3)$$

Matuojant pilnutinės energijos kiekį palei AO trajektoriją ir matuojamus duomenis apdorojant naudojant Kalmano filtrą įmanoma identifikuoti terminio srauto parametrus (Matthew 2010). Matthew siūlomas Kalmano filtras skiriasi nuo klasikinio. Šis Kalmano filtras leidžia atlikti duomenų, pasiskirsčiusių erdvėje pagal netiesinį dėsnį, skaičiavimus. Tipinis išplėstasis Kalmano filtras irgi leidžia skaičiuoti pagal netiesinį dėsnį pasiskirsčiusius duomenis, tačiau tam netiesines lygtis reikia linearalizuoti, o dėlto sumažėja skaičiavimo tikslumas (Grewal *et al.* 2001).

Nustatant galimą terminių srautų buvimo vietą įmanoma panaudoti skirtingų šaltinių matavimo duomenis. Allenas (Allen 2005) taiko NOAA SURFRAD žemės šiluminio spinduliavimo aktyvumo duomenų bazę, kurioje yra žemės šiluminio spinduliavimo pasiskirstymo stebimame plote bei šį plotą atitinkantys oro drėgmės duomenys. Dėl terminių srautų raidos meteorologinių ypatumų SURFRAD duomenys yra puikus terminių srautų galimo formavimosi vietų aptikimo šaltinis (Allen 2005).

Viena iš terminio srauto energijos naudojimo užduoties dalių yra maksimalios kėlimo zonos aptikimas apdorojant matavimų duomenis, gautus naudojant AO. Srauto maksimalios kėlimo zonos paiešką įmanoma vykdyti taikant matematinius RAPF filtrus. Šiai užduočiai tinkami keli filtrų porūšiai: *Particle Filter* (PF), *Adaptive Particle Filter* (APF), *Regularized Particle Filter* (RPF), *Regularized Adaptive Particle Filter* (RAPF)) (Bencatel 2010).

Terminio srauto maksimalaus kėlimo zoną įmanoma nustatyti visą orlaivių skrydžio plokštumą padalijus į dešimties metrų pločio kvadratinis elementus. Taikant tokią metodiką maksimalios terminio srauto kėlimo zonos paieška veda prie paieškos metodų stochastinių parametrų aibėje, paveiktoje atsitiktinių triukšmų, optimumo (Antal *et al.* 2010). Mokslininkas Antalis pateikė nuodugnius algoritmus, leidžiančius jo srauto aptikimo modelius patikrinti praktiškai (Antal *et al.* 2010).

Doncieux (Doncieux *et al.* 2007) matuojamiems parametrų apdoroti siūlo taikyti dirbtinius neuronų tinklus, naudojančius genetinius algoritmus (Krishnakumar 2000). Siūloma DNT architektūra sudaryta pagal daugiasluoksnią schemą su keliais paslėptaisiais sluoksniais.

Srauto empirinis modelis teikia galimybę būsimą AO skrydžio taktiką bei strategiją planuoti siekiant efektyviai panaudoti terminių srautų energiją (Allen 2005). Terminių srautų modeliai kuriami jau keletą dešimtmečių. Sudėtingi dujų skysčių dinamikos diferencinių lygčių pagrindu sudaryti modeliai įvykiams modeliuoti tikroju laiku reikalauja didelių skaičiavimo išteklių (Humerp 1972). Šie modeliai pasižymi daugelio fizikinių procesų, vykstančių terminiuose srau-

tuose, įvertinimu. Ypač atsižvelgiama į fazinius vandens garų virsmus, oro įtraukimą į terminį srautą iš aplinkinės erdvės. Nagrinėjami burbulų bei vamzdžių pavidalo terminiai srautai. Burbulų pavidalo terminiams srautams būdingas skersmens didėjimas sulig aukščiu pagal tiesinį dėsnį (Шметер 1972). Nagrinėjama terminio srauto vertikalių greičių priklausomybė nuo meteorologinių aplinkos bei paties srauto parametrų.

Terminių srautų maksimalūs vertikalieji greičiai turi sąsajas su temperatūros gradiento priklausomybe nuo aukščio (Allen 2005). Nuo temperatūrinio gradiento dydžio priklauso galima maksimali teorinė terminio srauto reikšmė. Allen'o darbuose pateikta empirinė priklausomybė tarp srauto reikšmės w_T ir aukščio z^* :

$$w_T = w_{pyk} \left(\frac{z^*}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - 1,1 \cdot \frac{z^*}{z_i} \right), \quad (1.4)$$

čia z^* yra aukštis, kuriame modeliuojamas srautas, w_{pyk} – didžiausia teorinė srauto reikšmė, z_i – maksimalus srauto aukštis. Koeficientai w_{pyk} ir z_i nustatomi remiantis antžeminiais matavimais.

Allenas teigia, kad terminis srautas pasižymi vertikalios oro greičio dedamosios silpnėjimu sulig didėjančiu aukščiu ir skerspjūvio padidėjimu didėjant aukščiui.

1.1 pav. Terminio srauto stiprio pokytis skirtinguose srauto aukščiuose

Fig 1.1. Updraft streng changing by height

Allen (Allen 2005) siūlomas terminio srauto skerspjūvio vertikalioje plokštumoje empirinis modelis paremtas empirine lygtimi, turinčia nekintamus svertinius koeficientus (1.2 pav.). Allenas teigia, kad šis modelis yra gautas atliekant terminių srautų meteorologinius matavimus ir tolesnį meteorologinių duomenų apdorojimą:

$$Dia = 0,0203 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \frac{z}{z_i} \right) * z_i \quad (1.5)$$

čia z yra orlaivio, skrendančio per terminį srautą, aukštis, Dia – terminio srauto skersmuo.

Mokslininkai empiriniuose modeliuose vertina terminio srauto poslinkį pavėjui, tačiau kol kas nebuvo įvertintas terminio srauto polinkis pavėjui. Edwardso terminio srauto atpažinimo algoritme įvertinamas terminio srauto poslinkis pavėjui, atsirandantis dėl vėjo nuonašos (Edwards 2008). Srauto nuonašos greitį pavėjui galima pasirinkti ir iš statistinių duomenų, pavyzdžiui, esant 13 m/s modeliuojamam vėjo greičiui buvo tiesiog pasirinktas 6 m/s terminio srauto nuonašos greitis (Bencatel 2010). Bencatelis savo tyrimuose naudojo Allen darbuose (Allen 2005) pateiktą terminio srauto modelį.

Nagrinėjant terminio srauto vertikalųjų greičių pasiskirstymą pagal horizontaliąją plokštumą srauto skerspjūvyje galima teigti, kad realiame sraute jis nebus simetrinis (Шметреп 1972). Tačiau modeliuojant galima taikyti supaprastintus idealizuotus terminio srauto horizontaliojo skerspjūvio modelius.

1.2 pav. Terminio srauto vertikalusis skerspjūvis pagal Alleno modelį

Fig. 1.2. Updraft vertical cross-section by Allen model

Edwardsas teigia, kad teorinį terminio srauto horizontalųjį vertikalųjį greičių gradientą galima apibūdinti Gauso dėsnio (Edwards 2008). Kitų mokslininkų darbuose minimas terminio srauto gradientas pagal horizontaliąją plokštumą taip pat nusakomas Gauso dėsnio (Matthew 2010; Allen 2005).

Terminių srautų aptikimo ir modeliavimo tyrimuose naudojami orlaivių, naudojančių terminių srautų energiją, modeliai (Doncieux *et al.* 2007). Mokslininkas Doncieux modeliavo autonominio orlaivio skrydį zonoje su modeliuojamais terminiais srautais naudodamas pusiau empirinį kvazistabilios skrydžio dinamikos orlaivio modelį. Orlaivio sparnai ir stabilizatoriai buvo modeliuojami kaip nepriklausomos aerodinaminės plokštumos. Modeliuojama buvo diskreitiniais laiko momentais, kas 0,02 s. Šiais laiko momentais buvo perskaičiuojamos aerodinaminių plokštumų keliamoji bei pasipriešinimo jėgos, atitinkančios esamą oro greitį. Mokslininkas Mortonas, atlikdamas terminio srauto energijos naudojimo tyrimus, taip pat taiko AO skaitinį modelį. Pažymėtina, kad Mortono orlaivio modelis paremtas realiu Marko Drella suprojektuotu sklandytuvo modeliu, pritaikytu skrydžiui terminiuose srautuose (Morton 2010). Terminiams srautams modeliuoti gali būti taikomas bendrinis atmosferos modelis ARDC 1959, kurį naudojant modeliuojamas atmosferos temperatūros vertikalusis gradiento pokytis, santykinai aukščio (Morton 2010).

Dar viena iš terminių srautų energijos AO skrydžio metu panaudojimo uždavinio dalių yra terminių srautų aptikimo priklausomai nuo AO skrydžio trajektorijos pasirinkimo tikimybės tyrimas (Doncieux *et al.* 2007).

Šiuo metu pasaulyje atliekami tyrimai, skirti AO skrydžių terminiaame sraute keliams, atsižvelgiant į dalijimosi informacija tarp šių AO klausimų, siekiant bendrai išnaudoti aptikto terminio srauto energiją (Antal *et al.* 2010).

Perspektyviausiuose tyrimuose taikomas nemodifikuotas arba nedaug modifikuotas Alleno (Allen 2005) terminio srauto modelis. Šis modelis įvertina terminio srauto judėjimą, raidą, formą, tačiau nėra galimybės įvertinti terminio srauto polinkio pavėjui. Terminio srauto gradientas pagal vertikaląją plokštumą taip pat nekeičiamas. Vėjo įtakos terminio srauto polinkiui įvertinimas leistų gerokai patobulinti esamus empirinius terminius srautų modelius.

1.2. Literatūros apie dirbtinius neuronų tinklus apžvalga

Pastaraisiais dešimtmečiais pasaulyje vystosi nauja taikomosios matematikos sritis, kurios tyrimo objektas yra DNT. Tokio dėmesio DNT susilaukė dėl labai įvairių pritaikymo galimybių. DNT pritaikomi ekonominėms prognozėms, vaizdų atpažinimo procesams, adaptatyviojo valdymo, funkcionalų aproksimavimo, ekspertinių sistemų kūrimo, asociatyvinių atminties įtaisų projektavimo, savi-

mokos sistemų kūrimo srityse. DNT – tai vienas iš dirbtinio intelekto sukūrimo būdų, kurio esmė yra signalų apdorojimas modeliuojant procesus vykstančius biologiniuose neuronuose (Reed 1998).

Dirbtinių neuronų tinklai padeda įveikti daugelio kintamųjų funkcijų lygčių sistemų sprendimo sudėtingumo problemą. Jie gali apibendrinti įėjimo duomenis. Dirbtinių neuronų tinklo apibendrinimu vadinama savybė atlikti reikiamą užduotį su įėjimo uždaviniais, kurių nebuvo mokymo metu. Sukūrus atitinkamą architektūrą šie tinklai gali be išankstinio programavimo išskirti stebimo reiškinių dėsningumų funkcijas. Nors dirbtinių neuronų tinklai modeliuoja biologinių neuronų tinklų veikimą, tačiau jie neturi biologinių neuronų tinklų architektūros (Медведев *et al.* 2002).

Į DNT įėjimą nukreipiamas duomenų srautas. Apdorojant šiuos duomenis DNT išskiria dvi aibes – vieną su ieškomu požymiu, kitą be šio požymio. Praktiškai vyksta duomenų aibės dalijimas hiperplokštumoje (1.3 pav.). Jei įėjimo duomenys sudaro tris ir daugiau parametrų, vyksta N-matės erdvės dalijimas į N skaičių hiperplokštumų. Taigi DNT sprendžia daugiamatės klasifikacijos uždavinius (Каллан 2001; Комарцова *et al.* 2002; Круглов *et al.* 2001).

Pagrindinė neuronų tinklo savybė yra lygiagretusis informacijos apdorojimas, kuris labai pagreitina informacijos apdorojimą. Taip pat neuroninis tinklas yra labai atsparus klaidoms, esančioms gaunamame signale (Mohamad 1995; Ясницкий 2005).

1.3 pav. Tiesinis parametrų plokštumos atskyrimas
Fig. 1.3. Linear separation of parameters space

Veikiantys neuronų tinklų modeliai gali būti įgyvendinti programiniu ir aparatinio lygmenimis. Neuroniniai tinklai gali aproksimuoti bet kokią nenutrūks-

tamą funkciją, gali atlikti automatinį jautrumo pagal įėjimo duomenis suderinimą, yra atsparus gaunamų duomenų išsibarstymo triukšmui (Медведев *et al.* 2002).

DNT daug kur pritaikomi aviacijos srityje, pavyzdžiui, tiriant DNT panaudojimo didinant skrydžių saugą galimybes (Kharchenko *et al.* 2010), prarastos daviklių informacijos atkūrimo tikruoju laiku metodikoms (Жернаков *et al.* 2006).

Kad būtų galima naudojant DNT atkurti prarastus matavimo duomenis, reikia atlikti toliau nurodytus žingsnius: statistiškai apdoroti matuojamus duomenis, pasirinkti DNT architektūrą, pasirinkti DNT struktūrą, atlikti DNT mokymą, DNT veikimo testavimą, DNT efektyvumo įvertinimą (Жернаков *et al.* 2006).

Prognostikos uždaviniai naudojant DNT gali būti sprendžiami naudojant tezę, teigiančią, kad prognostika yra dalinis regresijos uždavinio atvejis. Tokius regresijos uždavinius gerai sprendžia daugiasluoksnis perceptronas (MLP), radialinis baizisinis tinklas (RBF), apibendrintas regresinis tinklas (GRNN), taip pat Volterri ir Elmano tinklai (Королева *et al.* 2006).

Taikant GRNN tinklą regresijos uždaviniams spręsti DNT išėjimas gali būti įsivaizduojamas kaip tikėtina modelio reikšmė duotoje įėjimų reikšmių aibėje. Į kiekvieną tinklo mokymo tašką yra įkelta Gauso branduolinė funkcija. GRNN tinklas kopijuoja į save visus mokymo stebėjimus ir naudoja šiuos stebėjimus atsakui atsitiktiniame taške analizuoti. Galutinė tinklo išėjimo vertė gaunama kaip išėjimų pagal visus mokymo stebėjimus verčių vidurkis. GRNN tinklas turi du paslėptus arba vidinius sluoksnius – radialinių elementų sluoksnį ir sluoksnį, formuojantį svertinę sumą atitinkamam išėjimo sluoksnio elementui. GRNN tinklo išėjimo reikšmė turi tikimybinę prasmę. Kai įėjimo duomenų kiekis yra mažas, tinklas labai greitai mokosi. Tinklo mokymą reikia vykdyti atskirai kiekvienai imčių sekai. Jei imčių seka pakito, neuroninis tinklas gali išduoti klaidingą išėjimo rezultatą (Королева *et al.* 2006). Priimtinas prognozavimo uždavinio sprendimas įmanomas tik tada, jei neuroninis tinklas mokosi iš didelės duomenų apimties. Jei mokymo duomenų apimtis yra nedidelė, net tobuliausias tinklas nesuteiks priimtino darbo rezultato (Королева *et al.* 2006).

Diagnosticos uždaviniai sprendžiami taikant statistinius modelius, siejančius kriterijų nuokrypius, ir taip įvertinant mazguose esančius defektus. Tokių diagnostikos parametrų vertinimas yra regresijos uždavinys. Vertinamų parametrų koeficientų lentelės vadinamos diagnostine matrica (Копытов 2001).

Atgalinio uždavinio sprendimas plačiai taikomas sprendžiant tomografijos uždavinius. Tačiau kylančio oro srautų meteorologinių parametrų nustatymo uždavinį taip pat galima laikyti atgalinio uždaviniu sprendimu. DNT gali atlikti nelinijinių rekonstrukcinės tomografijos uždavinių sprendimo metodus. Dirbtinių neuronų tinklų pagrindą šiuo atveju gali sudaryti perceptronai (Кульчин *et al.* 2006). Matematiškai tomografijos uždavinys suvedamas į objekto paramet-

rų atkūrimo uždavinį pagal gautus integrinius duomenis. Paprastai tomografijos uždaviniuose matavimo kanalų skaičius yra daug mažesnis nei tiriamo lauko elementų skaičius. DNT tinka tomografijos uždaviniams spręsti dėl adaptacijos ir apibendrinimo savybių. Neuronų tinklo adaptacija yra mokymo rezultatas. Apibendrinimo savybė pasireiškia tuo, kad neuronų tinklas gali spręsti uždavinį net tada, jei tokie uždaviniai nebuvo žinomi, tačiau yra tos pačios, mokymo metu spęstų uždavinių klasės (Кульчин *et al.* 2006).

DNT sintezės uždavinys reikalauja didelio skaičiavimo pajėgumo (Минухин 2011), nes tinklo tinkamumas užduočiai tikrinimas eksperimentiškai po DNT mokymo etapo (Krug 2002; Уоссермен 1992). Tačiau įmanomas DNT architektūros parinkimas, nereikalaujantis tinklo mokymo kiekvieną kartą, kai vykdomas architektūros parinkimas. Šio metodo esmė – dirbtinių neuronų tinklo aproksimacijos galimybių įvertinimas. Naudojant tokį įvertinimą galima atlikti skirtingų neuronų tinklų architektūros įvertinimus kiekvieną kartą pasirenkant naują neuronų tinklo architektūrą. Aproksimavimo įvertinimas skirstomas pagal įvertinimo taiklumą ir apskaičiavimo sudėtingumą. Toks skirstymas leidžia palaipsniui siaurinti optimalios dirbtinių neuronų tinklo architektūros paiešką (Ломоносова *et al.* 2000).

Informacijos įsidėmėjimas naudojant DNT yra vienas iš mokslininkų tyrimo objektų. Kompiuterio atmintinėje informacija įsidėmima aiškiai, nuosekliai ir sparčiai. Kompiuteris tiesiog įrašo informaciją į savo atmintinę ir šiai informacijai priskiria klasifikavimo bitus. Prireikus reikiamos informacijos, tiesiog sukurama užklausa, atitinkanti klasifikavimo bitus, ir informacija iš kompiuterio atmintinės prieinama tolesnio naudojimo reikmėms. Bitų skaičius, reikalingas tokiam pačiam informacijos kiekiui išsaugoti neuronų tinkle, turėtų būti mažesnis už bitų skaičių kompiuterio atmintinėje, tačiau Minskis savo darbe (Minsky 1967) įrodė, kad kai kuriais atvejais bitų skaičius, reikalingas informacijai išsaugoti, gali didėti sparčiau nei eksponente (Каллан 2001).

DNT tinka matuojamų terminų srautų parametrų apdoroti, matavimo metu gautiems duomenims apdoroti, siekiant kompensuoti galimą duomenų praradimą, sprendžiant atgalinį uždavinį. Tačiau DNT veikimo efektyvumui užtikrinti būtina parinkti tinkamą DNT architektūrą, mokymo algoritmus ir užtikrinti įėjimo duomenų kokybę.

1.3. Dirbtinių neuronų tinklų mokymas

DNT mokomi tam, kad iš kelių įėjimų išgautų reikiamas išėjimų vertes. Kiekvienas įėjimo arba išėjimo verčių rinkinys gali būti nagrinėjamas kaip vektorius. Neuronų tinklo mokymas vyksta dauginant įėjimo duomenų vektorius iš kintančių svertinių koeficientų. Mokymo procese svertiniai koeficientai įgauna reikšmes, išgaunančias tinkamus išėjimo vektorius (Braspenning 1995).

Neuronų tinklo mokymo algoritmai skirstomi į mokymą su mokytoju ir be jo. Mokymu su mokytoju vadinamas įėjimo vektoriaus perkėlimas į neuroną ir gautojo išėjimo palyginimas su etaloniniu išėjimo vektoriumi. Gaunama klaida per atgalinį ryšį koreguoja svertinius koeficientus. Įėjimo vektorius ir etaloninis išėjimo vektorius vadinami mokomąja pora. Mokymas be mokytojo labiau atitinka biologinį neurono prototipą. Mokymo be mokytojo metu dirbtiniam neuronui duodamas tik įėjimo vektorių rinkinys. Tokiu atveju išėjimo vektorius tinkamas būna tada, kai keli panašūs įėjimo vektoriai sugeneruoja tą patį išėjimo vektorių (Krug 2002).

Chebbo pasiūlytas mokymo modelis remiasi sinapsinio svorio padidėjimu, jei neuronas imtuvas ir neuronas siųstuvus yra aktyvinti signalo. Taip dažnai besikartojantys procesai sustiprina tas neuronų tinklo dalis, į kurias dažniausiai kreipiamasi, o tai yra atminties funkcija (Каллан 2001).

Dirbtiniuose neuronų tinkluose mokymo Chebbo būdu metu svertinių koeficientų didėjimas remiasi priimančio ir siunčiančio neurono sužadavimo lygių dauginimu:

$$w_{ij}(n+1) = w(n) + \alpha \cdot OUT_i \cdot OUT_j \quad (1.6)$$

čia $w_{ij}(n)$ – svorio reikšmė nuo i prie j neurono iki suderinimo, $w_{ij}(n+1)$ – svorio reikšmė nuo i prie j neurono po suderinimo α – mokymo greitis, OUT_i i – neurono įėjimas, OUT_j j – neurono išėjimas.

Keičiantis dirbtinių neuronų tinklų architektūrai ir / arba sprendžiamam uždaviniui, keičiasi ir dirbtinių neuronų tinklų mokymo algoritmai. Chebbo mokymo būdas yra tik vienas iš daugelio galimų neuronų tinklo mokymo būdų (Каллан 2001; Krug 2002).

Kai mokymo aibę sudaro daugiamatė laiko eilė (Gheys 2009), svarbu nustatyti, ar visos sudėtinės laiko eilės atitinka tikslų vektorių A, B, C aibes. $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n, c_a\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n, c_b\}$, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n, c_c\}$ ir t. t. Arba daugiamatei laiko eilei išreikšti galima naudoti išmatavimų duomenų masyvo išraišką:

$$\delta_{ab} = \left| \frac{c_a - c_b}{n_c - 1} \right| \quad (1.7)$$

čia δ_{ab} – poaibių a ir b prieštaravimas, n_c – bendras klasių kiekis mokymo aibėje.

Mokymo aibės prieštaravimas išreiškiamas taip:

$$\delta_l = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_l} \delta_{ij} \quad (1.8)$$

čia n_l – rinkinių skaičius mokymo aibėje.

Rinkiniai A ir B laikomi pasikartojančiais, jei $a'_i = b'_i (i \in 1;n)$ ir $c_a = c_b$. Rinkinių pasikartojimas klasei c_i išreiškiamas lygtimi

$$\rho_i = \frac{n_i^p}{n_i^c} \quad (1.9)$$

čia n_i^p — besikartojančių rinkinių skaičius klasėje i ; n_i^c — bendras rinkinių skaičius klasėje i .

Bendras mokymo aibės kiekis

$$\rho_l = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} \rho_i \quad (1.10)$$

čia n_c – bendras klasių kiekis apmokymo aibėje (Тарасенко et al. 2001).

Svarbiausias veiksnys mokant neuronų tinklą yra įėjimo duomenų kokybė. Duomenų kokybė apibūdinama duomenų prieinamumu ir nenutrūkstamumu. Duomenys, skirti dirbtinių neuronų tinklui mokyti, turi charakterizuoti visą aibę, kurią galima įtraukti į atskirą klasę. Duomenys dažniausiai reikalauja mastelio parinkimo (Каллан 2001).

1.4. Dirbtinių neuronų tinklų pagrindų sudarytos skaičiavimo sistemos sintezė

Nagrinėjant įėjimo duomenų klasifikavimą būtina pasirinkti neuronų tinklo struktūrą. Jei įėjimo duomenų klasė nežinoma arba ne visiškai apibrėžta, tokiu atveju taikomas klasterinės analizės metodas. Dažnai dirbtinių neuronų tinklas pasirenkamas remiantis asmenine specialisto nuomone. Kitais atvejais tinklo struktūros pasirinkimą riboja sprendžiamas uždavinys (Кириевский 2001). Pavyzdžiui, tikimybinis neuronų tinklas pasižymi architektūra, apibūdinama vien tik mokymo duomenimis. Tinklo su tiesioginių klaidų sklidimu įėjimo ir išėjimo struktūrinių elementų skaičius irgi yra veikiamas nagrinėjamos užduoties (Каллан 2001).

Naudojant tinklo architektūrą su atgalinių klaidų sklidimu bloga apibendrinimo savybė gaunama tada, kai yra per daug paslėptųjų sluoksnių arba buvo per ilga mokymo trukmė. Jei yra per daug paslėptųjų sluoksnių, tinklas gali tiesio įsidėmėti visą mokymo duomenų aibę. Kartais ištaisyti tokią situaciją padeda atsitiktinio triukšmo įmaišymas į mokymo duomenis. Per ilgas dirbtinių neuronų tinklo mokymo laikas reiškia, kad tinklas lanksčiai nereaguoja į naujus duomenis (Каллан 2001).

Atsitiktiniam triukšmui iš įėjimo duomenų pašalinti DNT gali vykdyti įėjimo duomenų funkcijų aproksimavimo uždavinius. Tai įrodo Stouno teorema. Dirbtinių neuronų aktyvinimo funkcija turi būti netiesinė (pvz., sigmoidalinė funkcija arba hiperbolinis tangentas). Tada DNT gali aproksimuoti bet kokią nenutrūkstamą funkciją. Laiko eilėms prognozuoti svarbu vykdyti ne dvejų laiko intervalų aproksimavimą, o atsižvelgti į ateitį (Soleimanbeigi *et al.* 2006). Tam atliekamas įėjimo funkcijos ekstrapoliavimas – funkcijos reikšmės prognozavimas remiantis funkcijos reikšmėmis praeities ir dabarties laiko intervaluose (Брилюк *et al.* 2002).

Dirbtinių neuronų tinklas, sudarytas iš vieno sluoksnio, gali formuoti tiesines hiperplokštumas, atskiriančias skirtingas aibes daugiamatųjų parametrų terpėje. Vieno sluoksnio tinklas negali spręsti uždavinių, kuriems netinka tiesiniai aibių atskirimo būdai. DNT su dviem sluoksniais ir netiesine aktyvinimo funkcija gali formuoti bet kokias išgaubtas operatorių aibes sprendimo erdvėje. Taip pat dviejų sluoksnių DNT geba aproksimuoti bet kokių dimensijų skaičių turinčią daugiamatę funkciją. DNT, turintis tris sluoksnius, gali formuoti bet kokio sudėtingumo plokščias arba išgaubtas operatorių sritis (Каллан 2001).

1.5. Disertacijos uždavinių formulavimas

Apžvelgtuose darbuose terminio srauto aptikimas dažniausiai atliekamas naudojant patį autonominį orlaivį kaip meteorologinį zondą, kertantį terminį srautą. Navigaciniai AO duomenys, kuriuos išmatuoja orlaivio sistemos, leidžia modeliuoti terminius srautus ir taip planuoti autonominio orlaivio skrydžio taktiką bei strategiją. Formuluojuant disertacijos uždavinį tikslinga atkreipti dėmesį į būtinybę tobulinti esamus terminių srautų modelius. Atsižvelgiant į tai, kad esami terminių srautų empiriniai modeliai neišvengia srauto polinkio dėl vėjo įtakos, disertacijoje siūloma įvertinti srauto polinkio dėl vėjo įtaką individualius meteorologinius parametrus turinčiam terminiam srautui. Kuriant pirmiau minėtą modelį tikslinga įvertinti ribotus AO skaitmeninės įrangos skaičiavimo išteklius. Išmatuotieji AO navigaciniai ir aplinkinės erdvės meteorologiniai duomenys yra stochastinio pobūdžio. Stochastiniams meteorologiniams duomenims apdoroti ir prognozuoti tikslinga taikyti dirbtinių neuronų tinklus.

Rašant disertaciją tikslinga išnagrinėti matuojamų parametrų aibių paruošimo DNT metodikas. Galutinis disertacijos praktinis pritaikymas turėtų būti terminio srauto modelis, galintis veikti autonominio skaičiavimo sistemose.

Apibendrinus disertacijoje siekiama įgyvendinti šiuos uždavinius:

1. Sukurti terminio srauto modeliavimo metodikas, leidžiančias įgyvendinti modelį, gebantį įvertinti vėjo įtaką.
2. Sukurti meteorologinių derinių parametrų matavimo naudojant autonominį orlaivį metodikas.
3. Sukurti metodikas, leidžiančias įvertinti modelio naudojamus skaičiavimo išteklius
4. Sukurti dirbtinių neuronų tinklų taikymo matuojamiems stochastiniams duomenims apdoroti ir prognozuoti metodiką.

Terminio srauto modeliavimo metodikų sudarymas

Skyriuje analizuojama terminio srauto modeliavimo metodika, apžvelgiama terminių srautų meteorologija, siūlomi empiriniai terminio srauto modeliai, gebantys modeliuoti netiesinius srauto polinkius pavėjui. Siūlomi modeliai kuriami atsižvelgiant į ribotus modeliuojančios sistemos skaičiavimo išteklius.

Skyriuje pateikiama medžiaga publikuota trijuose mokslo leidiniuose (Stankūnas, Suzdalev 2011; Stankūnas, Suzdalev, Komka 2012; Suzdalev 2008) ir aprobuota trijose mokslinėse konferencijose.

2.1. Terminio srauto struktūra

Terminio srauto struktūrai įtaką daro du labai svarbūs meteorologiniai indeksai. CAPE (*Convective Available Potential Energy*) konvekcinio nestabilumo indeksas rodo terminio aktyvumo dydį konkrečią dieną ir yra matuojamas [J/kg] arba [°C • km] (Blanchard 1998). Kitas indeksas yra SRH (*Storm-Relative Helicity*). SRH matavimo vienetai yra [m²/s²] (Kumjian *et al.* 2009). Nuo šio indekso priklauso terminių srautų kamuoliniuose debesyse stipris, terminio srauto polinkis vėjo kryptimi. Tačiau šie indeksai aktualūs sąlyginai dideliame meteorologi-

nių reiškinių plotui, siekiančiam šimtus ar tūkstančius kvadratinį kilometrų. Nagrinėjamu atveju terminis srautas yra mezomastelinis meteorologinis reiškinys. Konvekcinis nestabilumas – tokios atmosferos sąlygos, kai galimas vertikalus oro masių pernešimas, kartais lemiantis kamuolinių ir / arba lietaus kamuolinių debesų susidarymą. Sausą adiabatinį procesą lemia tik oro masės plėtimasis bei oro masių susimaišymas.

Konvekcinis nestabilumas susijęs su vertikaliojo temperatūros gradiento didėjimu troposferoje. Konvekcinis nestabilumas gali būti terminio pobūdžio (dienos metu dėl saulės įkaitinto žemės paviršiaus) ir dinaminio pobūdžio (ciklonuose, žemo slėgio, atmosferos frontų zonose, taip pat vietose, kur dėl didelio masto vertikaliojo oro masių judėjimo gali atsirasti vertikalusis temperatūros gradientas).

Konvekcinio nestabilumo energija aerologinėje diagramoje nustatoma kaip plotas tarp stratifikacijos kreivės ir būsenos kreivės. Jei kylanti konvekcinė dalelė yra šiltesnė už aplinkinį orą, tai ši energija yra teigiama (ir atvirkščiai). Konvekcinio nestabilumo energiją gerai išreiškia LI (*Lift Index*) indeksas (Charles *et al.* 2006):

$$E_w = 6,1078 \cdot e^{\left(\frac{9,5939 \cdot T_w - 307,004}{0,556 \cdot T_w + 219,522} \right)} \quad (2.1)$$

$$E = E_w - 0,35 \cdot (T_d - T_w) \quad (2.2)$$

$$T_p = -1 \cdot \left(\frac{[\ln(E/6,1078) \cdot 219,522] + 307,004}{\ln((E/6,1078) \cdot 0,0556 - 9,59539)} \right) \quad (2.3)$$

$$Li = T_c(500mb) - T_p(500mb) \quad (2.4)$$

čia T_c – oro temperatūra Celsijaus laipsniais 500, mb slėgio aukštyje; T_p – temperatūra pagal drėgnąją adiabatę 500, mb slėgio lygyje; T_d – rasos taško aukštis; T_w – temperatūra prie žemės paviršiaus

2.1 lentelė. LI indekso reikšmės interpretavimas

Table 2.1. LI index interpretation

LI reikšmė	Tikėtina prognozė
>4	Gili konvekcija nelaukiama
2–4	Tikėtini izoliuotieji lietaus kamuoliniai debesys
0–2	Reta perkūnija
0–2	Tikėtina perkūnija
-2–-5	Tikėtina stipri perkūnija
-5–-7	Stipri perkūnija, tikėtini viesulai

Pirmiau pateiktų LI indekso apskaičiavimo lygčių įėjimo parametrus galima nustatyti iš aerologinės diagramos.

Aerologinė diagrama rodo vėjo stiprį ir kryptį įvairiuose aukščiuose (Matbеев 1965). Šie duomenys nusako terminio srauto polinkio kryptį bei stiprį. Tačiau srauto polinkio stipris nepriklauso vien tik nuo vėjo stiprio (Шметер 1972). Galima pažymėti, kad aerologinėje diagramoje (2.1 pav.) vėjo stipris žymimas diskrečiomis reikšmėmis kas 1000 m ar daugiau. Autonominis orlaivis, naudojantis terminio srauto energiją, skrenda iki debesų pado esančiame aukštyje. Debesų padas aerologinėje diagramoje (2.1 pav.) yra ties 1200 m lygiu (1-osios kreivės lūžis į dešinę). Taigi, siekiant patikslinti (2.1 pav.) vėjo stiprį ir kryptį aukštyje tarp žemės ir debesų pado, kad būtų galima tiksliau modeliuoti terminius srautus, tikslinga atlikti matavimus. Terminų srautų stipris priklauso nuo temperatūros gradiento dydžio. Kuo didesnis temperatūros gradientas, tuo stipresnė yra gili vertikalioji konvekcija (Шметер 1972, Stull 1988). Tačiau, jei terminiai srautai dėl inversijos ir mažo temperatūros gradiento nesieks vandens garų kondensacijos lygio, kamuoliniai debesys bus labai reti arba išvis nesusidarys (Шметер 1972). Atitinkamai neišsilaivins paslėptoji šiluma – stiprus terminų srautų energijos šaltinis.

2.1 pav. Aerologinė diagrama 2012-06-17, 15 val.

Fig 2.1. Aerologic diagram 2012-06-17 15 p. m.

2.2. Terminio srauto modeliavimui reikalingo skaičiavimo pajėgumo įvertinimas

Kad išsilaikytų ore tiesiai skrendantis aukštos aerodinaminės kokybės orlaivis, nereikia didelio energijos kiekio. Aerodinaminę kokybę galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$K = \frac{L}{D} = \frac{G}{P_R} \quad (2.5)$$

čia L – keliamoji jėga, D – pasipriešinimo jėga, G – orlaivio svoris, P_R – orlaivio horizontaliam skrydžiui reikalinga trauka.

Šiuolaikinių orlaivių aerodinaminės kokybės koeficiento reikšmės neretai siekia 40 vienetų. Pavyzdžiui, autonominio orlaivio, kurio masė yra 10 kg, o aerodinaminės kokybės koeficientas siekia 30 vienetų, horizontaliam skrydžiui palaikyti reikalinga tokia trauka (pagal 2.5):

$$P_R = \frac{G}{K} = \frac{10}{30} \approx 0,33 \quad (2.6)$$

Trauką, siekiančią 0,33 kg, sukuria elektros variklis, naudojantis dešimčių vatų per valandą eilės galia. Tokia suvartojama galia atitinka šiuolaikinių našių skaičiavimo sistemų galia. Todėl lengvųjų autonominių orlaivių skrydžio trukmei pailginti tikslinga mažinti skaičiavimo sistemos sunaudojamą galia.

Tarkime, skaičiavimo sistema su instrukcijų rinkiniu I atlieka instrukciją $x \in I$ per laiką $\tau(x)$. Tam tikram uždaviniui spręsti reikia skirti laiko T . Per šį laiką T bus atliktas tam tikras skaičius $N(T)$ instrukcijų $x \in I$.

Tada skaičiavimo pajėgumas $C(I)$ šioje sistemoje bus nustatomas pagal lygtį:

$$C(I) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log N(T)}{T} \quad (2.7)$$

Šiuo atveju riba (2.7) egzistuos, jei I yra baigtinė aibė, instrukcijos vykdymo laikas $\tau(x)$, $x \in I$ yra lygus 1 (Ryabko 2010).

Galima per laiką $\tau(x)$ vykdomos instrukcijos $x \in I$ sampratą pakeisti vieno vektorinių parametrų erdvės taško, kuris modeliuojamas per vieną skaičiavimo iteraciją, užimančią laiką $\tau(y)$, samprata. Kadangi modeliavimas atliekamas skaičiavimo sistemoje su pastoviu skaičiavimo pajėgumu, viso terminio srauto, sudaryto iš daugelio modeliuojamų diskrečių erdvės taškų, modeliavimo laikas turėtų priklausyti tik nuo šių taškų skaičiaus. Visi taškai turi būti modeliuojami

pagal tą patį algoritmą su pastoviu instrukcijų skaičiumi. Tada visos modeliuojamos taškų aibės modeliavimo laiką $\tau(Y)_i$ per vieną modeliavimo ciklą (iteraciją), atitinkantį laiko momentą t_i , galima būtų išreikšti tokia priklausomybe:

$$\tau(Y)_i = \sum_{n=1}^N \tau_{ni}(y) + \tau_{sk} + \tau_{const} \quad (2.8)$$

čia N – modeliuojamų taškų skaičius; $\tau_{ni}(y)$ – vieno taško, kurio eilės indeksas n iš N skaičiaus taškų per iteraciją i laiko momentu t_i , skaičiavimo laikas; τ_{const} – pastovus vėlinimo laikas, reikalingas operacinės sistemos instrukcijoms vykdyti, τ_{sk} – pastovus skaičiavimo laikas, naudojamas kitoms modeliavimo algoritmo funkcijoms.

Vienu metu modeliuojant daugelį terminių srautų skaičiavimo sistemos našumo reikalavimai yra dar didesni, nes didėjant kylančių oro srautų skaičiui modelyje, atitinkamai didėja ir juos sudarančių vektorinių erdvės taškų skaičius.

2.3. Terminio srauto empirinio modelio kūrimas

Pilnas terminių srautų modelis, taikomas terminių srautų paieškai ir naudojimui, turėtų modeliuoti bei prognozuoti toliau nurodytus srauto parametrus: terminių srautų geometrinius parametrus, terminių srautų raidos dinamiką, terminių srautų judėjimo dinamiką, terminio srauto aptikimo statistinius parametrus, terminių srautų energetinį potencialą.

Vadovaujantis Alleno terminio srauto modelio koncepcija ir papildant jį baigtinių elementų, adaptyviojo ekstrapoliavimo (Чернухин *et al.* 2004) ir dirbtinių neuronų tinklų metodais (Allen 2005) galima sukurti kokybiškai tobulesnį terminio srauto modelį.

Vertikaloje plokštumoje srautas gali būti pakrypęs dėl vėjo nuonašos (Шмереп 1972). Šis pokrypis priklauso nuo modelio parametrų gali būti tiesinis ir netiesinis.

Vertikaloje plokštumoje srautas gali turėti spindulio pokytį pagal tiesinius ir netiesinius dėsnius atitinkamai duotiems modelio parametrams.

2.2 Pav. Terminio srauto modelio koncepcija

Fig. 2.2. The concept of updraft

Horizontalioje ir vertikalioje plokštumoje srautas turi vertikaliosios oro greičio dedamosios gradientą (2.9) (2.2 pav.) (Илметеп 1972) .

$$\nabla h = R/V_Y \quad (2.9)$$

$$\nabla v = Z^*/V_Y \quad (2.10)$$

Laikant terminį srautą apskritimo formos pagal horizontalią plokštumą, galima patį srautą modeliuoti dviejų matavimų erdvėje. Nebūtina modeliuoti kiekvieno taško srauto plokštumoje. Jei srautas simetrinis, užtenka tik žinoti atstumą nuo srauto centro ir vertikalios oro greičio dedamosios pasiskirstymo dėsnį palei srauto spindulio liniją. Siūloma terminį srautą modeliuoti koncentriniais apskritimais. Disertacijoje šiuos modeliuojamus apskritimus siūloma vadinti orbitalėmis. Orbitalės sudaro plokščiuosius diskus. Jas galima modeliuoti nuosekliai vieną paskui kitą nuo terminio srauto centro jo ribos link diskrečiais atstumais (2.3 pav.). Kiekvieną orbitalės tašką galima modeliuoti nuosekliai, per kiekvieną iteraciją duotuoju kampu pajudant orbitalės apskritimo linijoje.

Kiekvieno plokštumos taško $T(x, y)$ su koordinatėmis x, y orbitalėje, esančioje atstumu r^* nuo savo centro, vertikaliojo oro srauto greičio reikšmę $T(w_T)$ galima nustatyti žinant orbitalių centro oro srauto vertikaliojo greičio reikšmę w_{TC} , srauto spindulį R , srauto horizontaliojo gradiento funkciją $f(r^*)$.

2.3 pav. Nuoseklusis orbitalių modeliavimas
Fig 2.33. Secuential modeling of orbitals

Jei srauto plokščiojo elementų centro koordinatės yra koordinatės sistemos centre, o modeliavimas vyksta orbitalės apskritimu, polinėje koordinatės sistemoje ir laiko momentu t modeliavimo taškas yra ties φ kampu, tada kiekvieno taško koordinatės bei judėjimas:

$$T(x) = \sin(\varphi) \cdot R \quad (2.11)$$

$$T(y) = \cos(\varphi) \cdot R \quad (2.12)$$

$$Tv_y(r^*) = f(r^*) \quad (2.13)$$

Jei terminio srauto horizontaliojo gradiento pasiskirstymo dėsnį priimtas Gauso pasiskirstymas, tai vertikalioji srauto greičio reikšmė atstumu r^* nuo centro bus lygi (Matthew 2010):

$$Tv_y(r^*) = w \cdot e^{-\left(\frac{r^*}{R}\right)^2} \quad (2.14)$$

Jei srauto plokščiojo elementų centro koordinatės pasislinkusios nuo koordinatės sistemos centro per x^* ir y^* , tada taško orbitalėje koordinatės nustatomos taip:

$$T(x) = \sin(\varphi) \cdot R + x^* \quad (2.15)$$

$$T(y) = \cos(\varphi) \cdot R + y^* \quad (2.16)$$

Kiekvienas diskas yra dvimatis baigtinis srauto elementas. Šių dvimačių elementų visuma trimatėje erdvėje sudaro terminio srauto modelį. Kiekvienos orbitalės terminio srauto vertikaliojo greičio reikšmę galima apskaičiuoti taikant interpoliavimo metodą palei srauto spindulio liniją arba taikant standartinį pasi-

skirstymo dėsnį. Interpoliavimas būtų reikalingas, jei srautas horizontaliojoje plokštumoje būtų nesimetrinis. Terminio srauto, esančio tarp orbitalių, reikšmės galima nustatyti interpoliavimo metodais. Didesnis orbitalių bei dvimačių baigtinių elementų skaičius leidžia padidinti terminio srauto modeliavimo tikslumą, bet kartu padidėja skaičiavimo sistemos naudojami ištekliai. Tačiau šis teiginys galioja tuo atveju, jei modeliavimo metu naudojami skaičiavimo ištekliai yra daug didesni už interpoliavimo algoritmo išteklius.

Ekstrapoliavimo metodais plokštieji dvimačiai elementai gali būti modeliuojami pagal išilginę srauto ašį (2.4 pav.).

2.4 pav. Plokščiųjų elementų ekstrapoliavimas

Fig. 2.4. Extrapolation of plate elements

Ekstrapoliavimo metodas labai artimas interpoliavimo metodams. Labiausiai paplitęs parabolinis ekstrapoliavimas: kaip $f(x)$ reikšmė taške x pasirenkama polinomo $P_n(x)$ laipsnio n reikšmė. Šis polinomas taške x_n momentu $n + 1$ įgauna reikšmę $y_i = f(x_i)$. Parabolinio ekstrapoliavimo metodai naudoja interpoliavimo funkcijas.

Šiame darbe siūlomas ekstrapoliavimo metodas, pagrįstas ekstrapoliavimu, atliekamu atsižvelgiant į tam tikrus meteorologinius aplinkinės erdvės parametrus. Kadangi terminio srauto geometrija per visą srauto ilgį gali būti aprašoma sudėtingomis priklausomybėmis nuo meteorologinių parametrų (Morton 2010; Bougeault 1985; Tiedtke 1993, Schols 1991), tikslinga srautą vertikalioje plokštumoje skaldyti į atskiras dedamąsias, kurioms būtų galima taikyti paprastesnius formas aprašymo dėsnius. Šį metodą siūloma pavadinti adaptaciniu terminio srauto ekstrapoliavimu.

Terminio srauto formą bei kitus meteorologines charakteristikas nusakančius parametrus srautą modeliuojančiai skaičiavimo sistemai galima suteikti iš meteorologinių zondų matavimo duomenų, meteorologiniams matavimams at-

likti naudojant orlaivį ir kitais būdais matuojant ar prognozuojant konkrečios dienos ir vietovės meteorologines sąlygas.

Norint terminį srautą nagrinėti kaip vienetinio skersmens cilindą iš diskinių baigtinių elementų, turintį pastovų polinkį pavėjui su polinkio kampu α vertikaliai ir pastovią posvyrio kryptį horizontaliai, diskinių elementų centrų koordinatės pagal x ašį aukštyje z^* nuo koordinatinių sistemos centro, esančio srauto žemiausiam diskiniame elemente, galima rasti pagal tokią priklausomybę:

$$x = \frac{\tan(\alpha)}{z^*} \quad (2.17)$$

Jei srauto polinkio kampas turi pokytį skirtinguose aukščiuose pagal tam tikrą nenutrūkstamą funkciją, galiojančią nuo z_i iki z_{i+n} , tai lygtį (2.17) galima transformuoti tokia forma:

$$x = \frac{\tan(f\alpha(z^*))}{z'}, \text{ jei } z_i < z^* < z_{i+n} \quad (2.18)$$

Tada, kai žinomas terminio srauto polinkio kampo pokytis skirtinguose aukščiuose, taikant atitinkamas srauto polinkio kampo funkcijas skirtingiems aukščių intervalams galima ekstrapoliuoti centrinę srauto ašį srauto gyvavimo aukščiuose.

Terminio srauto vertikalioji greičio dedamoji pagal (Allen 2005) darbą priklauso nuo aukščio. Disertacijos uždaviniui išspręsti tikslinga naudoti (Allen 2005) darbe siūlomą srauto greičio gradiento pagal vertikalą ašį išraišką, kol nebus atlikti papildomi meteorologiniai tyrimai, papildantys ar patvirtinantys arba paneigiantys Alleno darbe siūlomą modelį.

Terminio srauto skersmuo taip pat yra nepastovus skirtinguose aukščiuose ir kinta pagal nenutrūkstamos funkcijos dėsnį $fR(z^*)$. Galima taikyti matavimų metu gautus terminio srauto skersmens pokyčio pagal aukštį duomenis arba

naudoti šaltinyje (Lenschow *et al.* 1980; Childress 2010) pateiktas lygtis terminio srauto skersmens pokyčiui aukščio diapazone nuo z_0 iki z_n išreikšti:

$$dR/dz = f(z^*), \text{ jei } z_0 < z^* < z_n \quad (2.19)$$

Pagal (Lenschow *et al.* 1980; Childress 2010) darbą srautas tam tikrame aukštyje z nyksta. Iki srauto nykimo greitės w_d mažėja:

$$w_d = \frac{-z_i}{\rho \cdot w^2} \times \frac{\partial P_T}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$w_d = \frac{-z_i}{1,75 \cdot w^2} \times \frac{12,192}{z} \quad (2.21)$$

Galima rasti greitį, kai terminis srautas kolapsuoja:

$$w_D = w_d(z^* + 0,45) - 0,5 \cdot w_{pyk} \quad (2.22)$$

Kai kuriuose darbuose (Lenschow *et al.* 1980; Childress 2010) kalbama, kad terminio srauto spindulys R turi priklausomybę nuo srauto greičio dR/dw :

$$w(r_1) = \frac{w_D}{2} \cdot \cos\left(\frac{r}{r_1} \cdot \frac{\pi}{2}\right); \text{ kai } 0 < r < r_1 \quad (2.23)$$

$$w(r_2) = (1 - z^*) \cdot w_{pik} \cdot \sin\left(\left(\frac{r - r_1}{r_2} \cdot 1,212 \cdot \pi\right)\right); \text{ kai } r_1 < r < r_1 + r_2 \quad (2.24)$$

Pagal Lenschow ir Childress (Lenschow *et al.* 1980; Childress 2010) terminio srauto greitis priklauso nuo srauto skersmens, bet tikslus šios priklausomybės dėsnis yra individualus kiekvienam terminiam srautui (2.5 pav.).

2.5 pav. Srauto greičio priklausomybė nuo srauto skersmens

Fig 2.5. Thermal speed dependence by thermal diameter

Bendrinėje formoje terminio srauto baigtinių elementų taškus erdvėje iteraciniu metodu galima išdėstyti pradedant nuo pirmojo baigtinio elemento centro

kaip atskaitos taško, esančio koordinatų centre. Jei žinomas srauto polinkio kampas bei šio kampo pokytis pagal aukštį, taip pat srauto polinkio kryptis pavėjui, kiekvieno taško T koordinatėms (x , y , z) nustatyti galima sudaryti tokią lygčių sistemą:

$$T_{ij}(x) = R_{term} \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{Pi}{180}\right) + \\ + Z_j \cdot \tan\left(\lambda \cdot \frac{Pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\beta_V \cdot \frac{Pi}{180}\right) \quad (2.25)$$

$$T_{ij}(y) = R_{term} \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{Pi}{180}\right) + \\ + Z_j \cdot \tan\left(\lambda \cdot \frac{Pi}{180}\right) \cdot \sin\left(\beta_V \cdot \frac{Pi}{180}\right) \quad (2.26)$$

$$T_{ij}(z) = Z_j \quad (2.27)$$

čia R_{term} – terminio srauto skersmuo [m], Z_j – termino srauto aukštis [m] esamos iteracijos metu, θ – iteracijos kampas horizontalioje plokštumoje [laips], λ – terminio srauto polinkio pavėjui kampas [laips], β_V – vėjo krypties kampas [laips], i – iteracijos numeris vieno disko ribose, j – disko eilės numeris. Tikslinga pažymėti, kad srauto modeliavimo lygtys (2.25 ir 2.26) reikalauja tikslios polinkio kampo λ reikšmės, atitinkančios aukštį H_j . Šį kampą galima nustatyti modeliuojant srauto centrinės ašies kreivę.

2.4. Srauto centrinės ašies kreivės funkcijos nustatymas

Jei vertinamas konkretus srautas ir žinomas šio srauto polinkio kampas srauto gyvavimo aukščiuose, įmanoma srauto centrinės ašies kreivę ekstrapoliuoti palei visą srauto aukštį. Jei atitinkamai yra žinomas srauto polinkio kampas tam tikruose srauto ašies taškuose diskrečiuose aukščiuose, galima ekstrapoliuoti visą srauto ašį, tačiau su tam tikra absoliutine klaida $\delta\lambda$, priklausančia nuo aukščių diskretiškumo ΔH . Jei žinoma trijų taškų padėtis plokštumoje, taikant polinominės išraiškas įmanoma tarp šių taškų sudaryti kreivę. Kuo aukštesnės eilės polinomas naudojamas, tuo sudėtingesnės formos kreivę galima sudaryti taikant interpoliavimo metodus.

Dažniausiai taikomi interpoliavimo algoritmai yra šie: tiesinis interpoliavimas (Linear interpolation), kubinis interpoliavimas (Cubic interpolation), Shepardo interpoliavimas (Shepard's Interpolation), radialinės bazės (Radial Basis), kosinuso skleidinys (Cosine Expansion), polinomas (Polynomial), trianguliacija (Triangulations), Mask Method. Pastarasis metodas laikomas lanksčiu ir užtikrinančiu kokybiškus skaičiavimo rezultatus. Taip pat skaičiavimo našumui padidinti naudojami daugiapakopiai interpoliacinio skaičiavimo metodai, kaip antai: vidurkinis konvergavimas (Converging Average), lokalusis B splainas (Local B-spline), globalusis B splainas (Global B-spline) (Wang et al. 2002, Jonathan 1997).

Pagal skaičiavimo išteklių sąnaudas ekonomiškiausi yra tiesinio bei kubinio interpoliavimo metodai. Interpoliavimo klaidų tikslumo ir skaičiavimo pajėgumų naudojimo požiūriu kubinis interpoliavimas yra optimalus metodas. Mažesnio skaičiavimo pajėgumo reikalauja tik tiesinis interpoliavimas (Gerald 2007). Kai taikoma dvimatė erdvė, tiesinis ir kubinis splainai vadinami bitiesiniu ir atitinamai bikubiniu.

Bitiesinio splaino pranašumas – didelis veikimo greitis. Bitiesinio splaino trūkumas – stačiakampio tinklo ląstelių ribose nutrūkstanti interpoliavimo funkcijos išvestinė. Kartais bitiesinio interpoliavimo algoritmo tikslumo nepakanka. Taip pat, sprendžiant tam tikrus uždavinius, didelis trūkumas yra interpoliavimo funkcijos išvestinės nutrūkstumai. Bikubinis splainas nenutrūkstumą užtikrina tik mišriai išvestinei ir gradientui, bet antros eilės išvestinių nenutrūkstumai neužtikrinami. Bikubiniam splainui realizuoti reikia žinoti interpoliavimo funkcijos reikšmes stačiakampio tinklo mazguose, gradiento reikšmę ir mišrios išvestinės reikšmę (Роджерс 2001).

Nagrinėjamu atveju, žinant srauto polinkio kampą tarp taškų $T_1(x_1, y_1)$ ir taško $T_2(x_2, y_2)$ bei tarp taškų $T_2(x_2, y_2)$ ir $T_3(x_3, y_3)$, galima sudaryti tokią lygtį, leidžiančią nustatyti bet kokio taško, esančio kreivėje tarp taškų $T_1(x_1, y_1)$ ir $T_3(x_3, y_3)$, reikšmę:

$$y^* = y_1 + (x^* - x_1) \cdot \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + (x^* - x_1) \cdot (x^* - x_2) \cdot \frac{\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}}{x_3 - x_1} \quad (2.28)$$

Ši lygtis galioja, kai $y_1 < y_2 < y_3$, $y_1 < y^* < y_3$, $x_1 < x_2 < x_3$, $x_1 < x^* < x_3$, čia y^* – apskaičiuojamo taško reikšmė, judant funkcijai nuo x_1 iki x_3 per x_2 .

2.6 pav. Srauto ašies interpoliavimas įvertinant srauto polinkio kampą
Fig 2.6. Updraft axis interpolation, graduate updraft inclination angle

Šią parabolės lygtį vadinsime kvadratinio interpoliavimo formule, o antrojo laipsnio daugianarį – kvadratinio interpoliavimo polinomu. Kai atliekamas interpoliavimas per tris taškus, skaičiuojamas tolesnis, aukščiau pagal Y ašį esantis interpoliantas. Apskaičiuotojo interpolianto paskutinis taškas $T(x_3, y_3)$ bus tolesnio interpolianto pirmasis taškas.

Galima daryti prielaidą, kad masyvesnis srautas vėjo bus palenkiamas mažesniu kampu. Tada galima įvesti masės koeficientą m , atvirkščiai proporcingą srauto masei, ir nuo šio koeficiento m tiesiškai priklausys srauto polinkio kampas pavėjui.

Jei vėjo greitis v veikia srauto polinkio kampą α ir polinkio kampas α priklauso nuo srauto masės m koeficiento, tai galima išreikšti tokia lygtimi:

$$\frac{d\alpha}{dv} = \frac{m}{v} \quad (2.29)$$

Šiuo atveju srauto masė koeficientas m laikomas konstanta. Masės koeficientą galima nustatyti ne tik žinant srauto skersmenį didžiausios įmanomos srauto vertikaliojo greičio reikšmės aukštyje, bet ir nustačius didžiausią įmanomą srauto reikšmę, nes, kaip jau buvo minėta pirmiau, srauto spindulys priklauso nuo srauto vertikaliojo greičio (Lenschow *et al.* 1980, Childress 2010).

Integruojamos abi lygties dalys:

$$\int d\alpha = m \int \frac{dv}{v} + c \quad (2.30)$$

čia c – konstanta, nustatoma konkrečiomis meteorologinėmis sąlygomis. Tada srauto polinkio kampas α išreiškiamas taip:

$$\alpha = m \cdot (\ln|v| + \ln|c|) \quad (2.31)$$

Kadangi c – konstanta, išraiška įgauna tokį pavidalą:

$$\alpha = c \cdot m \cdot \ln(v) \quad (2.32)$$

Daroma išvestis:

$$\alpha = c \cdot \ln(v^m) \quad (2.33)$$

Paslinkus α reikšmę per $\frac{\pi}{2}$, gaunama tokia lygtis:

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{2} - c \cdot m \cdot \ln|v| \right) \quad (2.34)$$

Jei $\alpha = \frac{\pi}{2}$, x koordinačių nustatyti negalima, ir tokiu atveju gali būti naudojama paskutinė prieš tai buvusi x reikšmė, nes

$$x^* = \frac{z^*}{tg(\alpha)} \quad (2.35)$$

Galima teigti, kad, žinant terminio srauto masės koeficientą m , kuris bus pastovus šiam srautui visuose aukščiuose bei atvirkščiai proporcingas srauto skerspjuviui maksimalaus vertikaliojo greičio aukštyje ir išmatavus srauto polinkio kampą aukštyje Z^* ties tam tikru vėjo greičiu v , galima nustatyti srauto c koeficientą, kuris leis pagal (2.34) atkurti visą srauto centrinės ašies kreivę.

Galima daryti prielaidą, kad konstanta c priklauso nuo terminio srauto ir aplinkinio oro meteorologinių bei kitų sunkiai įvertinamų stochastinių parametrų. Iš meteorologinių parametrų, kuriuos galima apibrėžti, būtų maksimalus konkretaus oro srauto kylimo greitis, kuris pagal Alleną (Allen 2005) yra ties pirmuoju ketvirtadaliu srauto aukščio, konvekcinio stiprumo indeksas LI bei kiti neįvertinti stochastiniai kintamieji. Tikslinga pažymėti, kad konstanta c turi būti ta pati visiems srautams vietovėje, kurioje atliekami srautų matavimai.

Vertinant terminio srauto raidą, reikia vertinti srauto skersmens ir branduolio vertikalios srauto greičio dedamosios tarpusavio sąveikos priklausomybę, fazinius vandens garų virsmus, aplinkinio oro įtraukimą į srauto vidurį, turbulencijos ties srauto ir aplinkinio oro riba įtaką. Aplinkinio oro įtraukimo į terminį srautą poveikis srauto raidos dinamikai nėra griežtai apibūdinamas kokia nors

viena priklausomybė ir priklauso nuo daugelio veiksnių, kaip antai srauto vertikaliojo ir horizontaliojo greičių profilio, atmosferos stratifikacijos bei kitų veiksnių (Шметер 1972). Nagrinėjant terminį srautą tik kaip tam tikro tūrio oro masę, kurios kilimą sukėlė tik konvekcijos procesai, bet ne procesai, vykstantys kamuolinio debesies viduje, jo skersmuo didėja dėl oro iš aplinkinės erdvės įtraukimo pagal tiesinį dėsnį. Tačiau, kai terminis srautas maitinamas dėl paslėptosios šilumos, sudėtinga nustatyti srauto geometrijos bei vertikalinių greičių profilių vystymosi mechanizmus (Шметер 1972). Literatūroje nuodugniai tyrinėjami kamuoliniai bei lietaus kamuoliniai debesys. Nagrinėjama šių meteorologinių derinių raida, modeliai, pateikiami praktinių matavimų rezultatai.

Jei reikia surasti srauto greičių vektoriaus reikšmės konkrečiame taške, galima taikyti aproksimacijos metodus ir ieškomo taško srauto greičių reikšmės skirti tokiais pat, kaip ir artimiausio sumodeliuoto taško. Taip pat modeliuojant gaunamų duomenų konkrečiame taške $T(x,y,z)$ tikslumui padidinti galima naudoti dvimačio bei trimačio interpoliavimo metodus.

2.5. Antrojo skyriaus apibendrinimas

Terminiams srautams apskaičiuoti orlaivyje su ribotais skaičiavimo ištekliais tikslinga taikyti modelį, sudarytą apskritiminių baigtinių elementų, adaptyviojo ekstrapoliavimo ir sunaudojamų skaičiavimo išteklių įvertinimo metodikų pagrindu. Skaičiavimo išteklių sąnaudos tiesiškai priklauso nuo modeliuojamų taškų skaičiaus, todėl sistemos su ribotais skaičiavimo ištekliais modelis turi būti optimizuojamas. Terminio srauto modeliavimas apskritiminiais baigtiniais elementais ir srauto polinkio pavėjui nustatymo metodikos kitų mokslininkų darbuose nesutinkamos.

Terminio srauto aptikimo ir prognozavimo metodikų sudarymas

Skyriuje pateikiamos matuojamų oro srauto, orlaivį supančios erdvės meteorologinių, orlaivių navigacinių duomenų apdorojimo metodikos, apibrėžtos matuojamų ir prognozuojamų parametrų aibės, metodikos, leidžiančios naudojant DNT aptikti terminį srautą, nustatyti jo meteorologinius parametrus ir vykdyti srauto raidos ir judėjimo prognozavimą.

Skyriuje pateikiama medžiaga aprobuota trijose mokslo konferencijose, publikuota dviejuose mokslo leidiniuose (Suzdalev *et al.* 2009; Suzdalev *et al.* 2011).

3.1. Matuojamų bei prognozuojamų parametrų aibių pasirinkimas

Srautui aptikti gali būti taikomos trys pagrindinės metodikos: tiesioginis oro erdvės zondavimas, terminių srautų atsiradimą ar buvimo vietą žyminčių reiškinių nuotolinė paieška, statistinis tikėtinas terminio srauto buvimo vietos nustatymas. Pirmosios metodikos susijusios su tam tikrų meteorologinių arba žemės paviršiaus parametru matavimu. Trečioji metodika susijusi su meteorologinių parametrų statistiniu apdorojimu.

Tiesioginio oro erdvės zondavimo metu naudojami autonominiai orlaiviai, tiesiogiai ar nuotoliniu būdu pilotuojami orlaiviai, meteorologiniai zondai. Ši metodika taikoma kaip pagrindinė terminio srauto aptikimo metodika (Morton 2010; Allen 2005; Edwards 2008).

Ieškant terminio srauto pagal šalutinius egzistavimo požymius atliekama žemės paviršiaus terminio atvaizdo analizė (Allen 2005). Kiekvienas besivystantis kamuolinis debesis yra terminio srauto viršūnė (Шметер 1972). Taikant vaizdo duomenų apdorojimo metodus galima ieškoti terminių srautų ir nustatyti debesų, esančių vystymosi stadijos, buvimo vietą. Taip pat, taikant radiolokacinius metodus ir analizuojant iš meteorologinių radarų gautą vaizdinę informaciją, įmanoma dar tiksliau nustatyti debesų buvimo vietą, vystymosi stadiją, terminio srauto, maitinančio debesį, stiprį (Калинин *et al.* 2005).

Nagrinėjant mezomastelinius meteorologinius derinius kaip bendrą didesnio ploto meteorologinę sistemą galima nuspėti tikėtiną terminio srauto buvimo vietą, nes terminiai srautai dažnai sudaro tam tikrus geometriškai aprašomus meteorologinius derinius. Vienas iš tokių pavyzdžių – kamuolinių debesų virtinės, esančios tam tikrais atstumais viena nuo kitos. Kitas pavyzdys – terminiai srautai gali būti pasiskirstę ląstelių briaunose, ir šių ląstelių viduje arba oras bus su beveik nuline vertikaliojo greičio dedamąja, arba besileidžiantys srautai (Шметер 1972). Taikant statistinius metodus įmanoma nuspėti tikėtiną terminių srautų buvimo vietą pagal konkrečios dienos ir vietovės meteorologines sąlygas.

Galima teigti, kad terminio srauto aptikimo ir prognozavimo uždavinys pagrįstas dviejų pagrindinių parametru – orlaivio navigacinių ir meteorologinių aplinkos parametru – aibių matavimų ir prognozavimu.

Orlaivio navigaciniai parametrai susiję su orlaivio skrydžio dinamikos parametrais. Orlaivio aerodinaminių plokštumų padėties duomenys, variometro, aukštimačio ir palydovinės navigacijos sistemos leidžia nustatyti orlaivio pilnutinės energijos kiekio pokytį. Kadangi atsiranda netolygus keliamosios jėgos pasiskirstymas orlaivio aerodinaminėse plokštumuose, giroskopinės sistemos ir orlaivio aerodinaminių plokštumų padėties duomenys koreliuoja su vertikaliojo oro srauto gradientu horizontalioje plokštumoje. Greitmatės rodo orlaivio oro greitį ir leidžia apskaiciuoti kylančio ar besileidžiančio srauto skrydžio laiką. Naudojant palydovinės navigacijos sistemą, taip pat oro greičių matuoklių duomenis įmanoma nustatyti vėjo nuonašos dydį ir vėjo kryptį.

Galima apibrėžti išmatuojamus orlaivio navigacinius parametrus, kurie reikalingi ieškant terminių srautų ir juos ir prognozuojant:

- horizontaliosios oro greičio dedamosios duomenys
- vertikaliosios oro greičio dedamosios duomenys
- kelio greičio duomenys
- orlaivio aerodinaminių plokštumų padėties duomenys
- orlaivio koordinatės

- orlaivio padėtis erdvėje

Autonominio orlaivio valdymo sistemos, gebančios panaudoti terminių srautų energiją, supaprastinta struktūrinė schema pavaizduota 3.1 paveiksle.

3.1 pav. Autonominio orlaivio aparatinės valdymo sistemos struktūra

Fig 3.1. Structure of the Autonomous aircraft automatic control system

Matavimo duomenis vertinant kaip daugiamates laiko eiles pirmiausia reikia išnagrinėti kiekvieno parametro matavimo tikslumą. Matuojamuosius parametrus pateikiant laiko eilių pavidalu dėl diskretizavimo pagal laiko skalę atsiranda metodinė matavimo klaida. Tarp realių laiko sekos gretimų elementų matuojamojo parametro funkcija paprasčiausiu atveju gali būti skaidoma į antros eilės polinomus, tačiau atliekant tiesinę interpoliaciją tarp šių dviejų elementų absoliutinė interpoliacijos klaida Δ_{int} bus nustatoma pagal tokią lygtį:

$$\Delta_{\text{int}} = \frac{x^n(t) \cdot t_0^2}{8} \quad (3.1)$$

čia $x^n(t)$ – tiriamo proceso dėsnių antros eilės išvestinė, arba proceso funkcijos kreivumas, t_0 – maksimalus diskretizavimo periodas, kai dėl diskretizavimo gaunama interpoliavimo klaida neviršys didžiausios leistinosios absoliutinės klaidos Δ_m (Новицкий П. В. 1991).

Šiuo atveju, taikant matavimo prietaiso matavimo ribos dydį X , galima užrašyti normotąją matavimo klaidą γ_m :

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{X} \quad (3.2)$$

Norint užtikrinti reikiamą normuotąjį matavimo interpoliacijos tikslumą γ_m , matuojamųjų duomenų laiko eilei reikia taikyti tam tikrą maksimalųjį laiko diskretizavimo periodą t_{0MAX} :

$$t_{0MAX} \leq \sqrt{\frac{8 \cdot \gamma_m}{f''(x)}} \quad (3.3)$$

čia $f''(x)$ yra matuojamojo proceso funkcijos antros eilės išvestinė.

Tarkime, kad matuojamasis procesas turi periodinę dėsnį su periodu T . Tada minimalaus matavimo diskretizavimo dažnį galima būtų išreikštas tokia lygtimi:

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot t_{0MAX}} \quad (3.4)$$

Tokiu atveju diskretizavimo dažniui f_d pasirinkti pagal didžiausią leistiną matuojamo parametro normuotąją klaidą galima taikyti pirmiau pateiktas diskretizavimo periodo lygtimi aprašomos funkcijos atkarpas (3.3).

Viena vertus, didesnio diskretizavimo dažnio reikia matavimo tikslumui padidinti, tačiau dėl didesnio diskretizavimo dažnio kartu padidėja laiko eilių duomenų masyvas, matavimo įrangos sparta, skaičiavimo sistemos skaičiavimo pajėgumas. Skaičiavimo pajėgumo padidėjimas susijęs su didesniu skaičiavimo sistemos energijos sunaudojimu iš vidinio orlaivio energijos šaltinio.

Didinant matuojamųjų duomenų matavimo tikslumą didėja terminio srauto meteorologinių parametrų matavimo bei prognozavimo tikslumas. Vertinant reikiamą terminių srautų meteorologinių parametrų matavimo bei prognozavimo tikslumą reikia įvertinti orlaivio aerodinaminis bei skrydžio dinamikos rodmenis ir terminio srauto skersmenį.

Pirmiau minėtų matuojamųjų parametrų paklaidas galima nustatyti taikant toliau nurodomus žingsnius ir eliminuoti jas tokiu konkrečiu pavyzdžiu.

Tarkime, matuojamas orlaivio barometrinis aukštis. Matavimas atliekamas tame pačiame aukštyje, nekintančiame matavimo metu. Apskaičiuojama visų aukščio matavimų vidutinė vertė.

$$\bar{H} = \frac{\sum H_k}{N} \quad (3.5)$$

Apskaičiuojama aukščio matavimų dispersija

$$\sigma_{|H|}^2 = \frac{\sum [H_k - \bar{H}]^2}{N(N-1)} \quad (3.6)$$

Apskaičiuojama standartinė nuokrypa

$$s = \sqrt{\sigma_{|H|}^2} \quad (3.7)$$

Nustatomas Stjudento koeficientas, priklausantis nuo pasikliaujamosios tikimybės ir matavimų skaičiaus N . Pavyzdžiui, pasirenkama standartinė pasikliaujamoji nuokrypa $\alpha = 68\%$, kai $N = 4$, kuriai esant Stjudento koeficientas lygus $t_{\alpha, N} = t_{0.68, 4} = 1,3$.

Atsitiktinė matavimo klaidą galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\Delta H_{inc} = t_{\alpha, N} \cdot \sigma_{(H)} \quad (3.8)$$

Neįvertinus aukščio reikšmės matavimų prietaisų klaidos ΔH_{pr} , aukščio matavimo klaida gali būti užrašyta pagal tokią lygtį:

$$H = \bar{H} + \Delta H_{inc} \quad (3.9)$$

Įvertinus prietaisų klaidą ΔH_{pr} , visa aukščio matavimo klaida apskaičiuojama sudedant atskiras klaidas, pakeltas antruoju laipsniu:

$$\Delta H = \sqrt{\Delta H_{inc}^2 + \Delta H_{pr}^2} \quad (3.10)$$

Taikant tokią metodiką galima statistiškai apdoroti ir kitų matavimo duomenų laiko sekas. Tačiau, esant dinamiškai besikeičiantiems laike parametrų, reikia pasirinkti ribotą matavimo imčių skaičių N .

3.2. Autonominio orlaivio skrydžio principai

Orlaivio judėjimas trimatėje erdvėje kartu su evoliucijomis aplink orlaivio ašis aprašomas diferencinių lygčių sistema. Tačiau yra ir dalinis sprendimas, tinkamas orlaiviui, naudojančiam sklandytuvo skrydžio principus, ir su tam tikrais supaprastinimais aprašantis tokio orlaivio skrydžio dinamiką (Thomas 1999).

Vidutinis sklandytuvo skrydžio greitis V_{avg} gali būti išreikštas priklausomybe nuo žemėjimo greičio V_S , greičio skrendant tarp terminų srautų V_g bei kilimo greičio V_C :

$$\frac{V_{avg}}{V_g} = \frac{V_C}{V_C + V_S} \quad (3.11)$$

Terminio srauto poveikį orlaiviui galima aprašyti kaip priklausomybę nuo terminio srauto kilimo greičio V_T , orlaivio kilimo sraute V_S ir orlaivio žemėjimo greičio V_c :

$$V_c = V_T - V_{sc} \quad (3.12)$$

Sklandytuvui esant spiralėje ir tolygiai sukantis vienodu spinduliu r , jį veikiančios jėgos sudaro kvazipusiausvyrą, t. y. kilimo jėga L turi atverti orlaivio, skrendančio su posvyrio kampą ϕ , sunkio jėgą W ir išcentrinę jėgą CF , tačiau orlaivis, nenaudojantis variklio statiniame ore, skrenda tik žemėdamas su žemėjimo greičio dedamąja Ω (Thomas 1999).

3.2 pav. Sklandytuvo jėgų pusiausvyros diagrama
Fig 3.2. The Glider force equilibrium diagram

Sunkio jėgą galima išreikšti masės ir laisvojo kritimo pagreičio sandauga arba naudojant kilimo jėgos kosinusą (3.2 pav.)

$$W = mg \quad (3.13)$$

$$W = L \cdot \cos \phi \quad (3.14)$$

Taip pat orlaivį veikianti išcentrinė jėga priklausys nuo kilimo jėgos ir posvyrio kampo sinuso:

$$CF = L \cdot \sin \phi \quad (3.15)$$

Žemėjimo greitis

$$V_{Sc} = \frac{C_D}{C_L^{3/2} \cdot \cos^{3/2} \phi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot W}{\rho \cdot S}} \quad (3.16)$$

Išcentrinė jėga priklausys nuo orlaivio masės, esamo tiesinio greičio ir sukimosi spindulio pagal tokią lygtį:

$$CF = \frac{mV_K^2}{r} \quad (3.17)$$

Naudojant orlaivio pokrypio kampo tangentą galima išreikšti sunkio ir išcentrinę jėgas, taip pat tiesinio greičio priklausomybę nuo sukimosi spindulio:

$$\tan \varphi = \frac{CF}{W} = \frac{V_K^2}{rg} \quad (3.18)$$

Tada esamas tiesinis orlaivio greitis

$$V_K = \sqrt{r \cdot g \cdot \tan \varphi} \quad (3.19)$$

Iš lygties galima išreikšti orlaivio sukimosi spindulio lygtį:

$$r = \frac{V_K^2}{g \cdot \tan \varphi} \quad (3.20)$$

Pilnutinė energija priklauso nuo orlaivio masės, aukščio ir greičio.

$$E_{p\ln} = \frac{m \cdot V^2}{2} + mgh \quad (3.21)$$

Nagrinėjant skrydį be papildomos jėgainės galima teigti, kad orlaivio tiesinis greitis bus išreiškiamas taip:

$$V_K = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{\rho \cdot S_C \cdot L \cos \varphi}} \quad (3.22)$$

Terminis srautas turi arba lygią nulinei reikšmei, arba labai mažą horizontaliojo oro srauto greičio dedamąją, palyginti su vertikaliąja oro srauto dedamąją. Todėl orlaivio pilnutinę energiją terminis srautas galės didinti praktiškai didindamas orlaivio potencinę energiją.

3.3. Modeliuojamųjų parametrų zonos dydžio nustatymas

Orlaivis vykdo maneversus trimatėje erdvėje. Modeliavimo zona turi baigtinius matmenis, ribojamus kompiuterinio skaičiavimo našumo ir prognozavimo klai-

dų. Galima pasirinkti geometrinę prognozuojamųjų parametrų formą – sferą (toliau – prognozavimo sfera), nes tokią geometrinę formą paprasta naudoti sprendžiant modeliavimo ir prognozavimo užduotis trimatėje erdvėje. Į visas puses nuo sferos centro iki ribos susidarys vienodas modeliavimo atstumas ir kartu – vienodas modeliavimo laikotarpis.

Prognozavimo sferos matmenys veikia maksimalus orlaivio skrydžio greitis, orlaivio sukimosi spindulys, vertikalusis orlaivio greitis, terminių srautų matmenys.

Kuo didesnė prognozuojamųjų parametrų klaida, tuo mažesnis gali būti prognozavimo sferos spindulys R_{SF} , nes yra tam tikra ribinė klaida, kai prognozavimas praranda tikslingumą. Galima įvesti sąlyginį klaidos koeficientą μ . R_{SF} ribojamas skaitmeninės prognozavimo sistemos našumo, kuri galima išreikšti sąlyginiu našumo koeficientu K_{PR} . Užduočiai praktiškai įgyvendinti vykdant modeliavimo uždavinius reikia panagrinėti kompiuterinių sistemų našumą. Įvertinus veiksnius, veikiančius prognozavimo sferos spindulį R_{SF} , galima sudaryti tokią lygtį:

$$R_{SF} = \frac{r + R_{Tvid} + (V_K + V_{Sc}) \cdot t}{\mu} \cdot K_{PR} \quad (3.23)$$

čia V_K – esamas tiesinis orlaivio skrydžio greitis bus lygus, V_{Sc} – žemėjimo greitis.

3.3 pav. Prognozuojamųjų parametrų sfera
Fig 3.3. The sphere of the parameters of prognostics

Maksimalus orlaivio oro greitis ribojamas orlaivio galios jėgainės bei mechaninių orlaivio konstrukcijos nešančiųjų elementų charakteristikų. DNT išėjimo duomenų atnaujinimo laikas turi būti trumpesnis nei laikas, reikalingas terminiam srautui aptikti.

Kuo tikslesnės prognozės reikia, tuo sudėtingesnius prognostikos algoritmus reikia naudoti. Sudėtingesni prognozavimo algoritmai reikalauja didesnio juos vykdančios skaičiavimo sistemos našumo.

Jei orlaivio apsisukimo spindulys didesnis už maksimalų terminio srauto kilimo zonos skersmenį, aptikimo ir prognozavimo sistemai reikia atlikti tikslesnes prognozes, leisiančias efektyviai prognozuoti maksimalią kilimo zonos vietą.

Terminio srauto geometriniai duomenys taip pat veikia skaičiavimo sistemos našumo reikalavimus. Jei skrydis atliekamas plačiame lėtame terminiam sraute su mažu horizontaliuoju oro greičio gradientu, maksimalią kilimo zoną galima nustatyti ilgesniais laiko tarpais. Taip pat terminis srautas įgauna polinkį dėl vėjo nuonašos. Atitinkamai reikia prognozuoti optimalias būsimas orlaivio skrydžio trajektorijas tokiam palinkusiam sraute.

DNT įėjimo duomenų šaltinis yra orlaivio avionikos prietaisai.

Terminis srautas juda erdvėje, veikiamas vėjo. Taip pat vėjas sukelia terminio srauto posvirį pavėjui. Galima teigti, kad prognozavimo sferos dydis yra kintamas ir priklauso nuo orlaivio skrydžio dinamikos, srauto meteorologinių bei prognozavimą atliekančios sistemos skaičiavimo našumo parametrų.

3.4. Terminio srauto atpažinimo uždavinys

Sprendžiant terminio srauto atpažinimo uždavinį tikslinga išnagrinėti daugiamatį laiko eilių apdorojimo uždavinį naudojant dirbtinius neuronų tinklus. Tačiau disertacijoje nagrinėjamo uždavinio atveju galima imti matuojamus parametrus tik vienu laiko momentu ir šių parametrų visumą nagrinėti kaip šio laiko momento vaizdinę informaciją (Weigend 1994).

Paprasčiausi vaizdinių atpažinimo metodai pagrįsti atpažįstamo objekto skaitinių požymių vertinimu. Etaloninių objektų mažiausio nuokrypio sąvoką, laikomą pagrindu, galima apibrėžti kaip atpažįstamo objekto parametrų išdėstymą kelių dimensijų erdvėje šalia etaloninio objekto požymių. Erdvės dimensijų skaičius būtų lygus objektų požymių parametrų skaičiui. Jei yra m etaloninių požymių skaičius ir kiekvienam iš jų turi išmatuotą požymį, tai bendras požymių skaičius bus lygus n . Tada nenormuotas atstumas požymių erdvėje nuo objekto iki etalono bus apskaičiuojamas lygtimi:

$$D_i = \sum_{j=1}^n (f_j - f_{ij})^2 \quad (3.24)$$

Artimiausias objektas požymių erdvėje atpažįstamam objektui bus etalonas. Jei požymiai nuo etalono labai skiriasi, dispersijos lygčiai įtakos turės tik smarkiai išsiskiriantys požymiai, o mažai nuo etalono besiskiriantys požymiai išsiskiriančių fone bus nepastebimi. Kad būtų galima teisingai įvertinti atpažįstamo objekto sutapimo su etalonu dispersiją, įvedami normuojantys daugikliai N_j , kai $j = 1, \dots, n$, o n atitinka atpažįstamo objekto požymių skaičių. Taikant normuojamuosius daugiklius dispersijos lygtis įgauna tokį pavidalą:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{f_j - f_{ij}}{N_j} \right)^2 \quad (3.25)$$

Normuojamieji koeficientai N nustatomi remiantis tikėtiniu matuojamųjų požymių diapazonu arba, esant neapibrėžtam matavimo diapazonui, nustatomi DNT mokymo metu (Каллан 2001).

Kai vertinamas vienas daugiamatės autonominio orlaivio navigacinių parametrų laiko eilės momentas, vertinamas stochastinių parametrų poaibis: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n, c_a\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n, c_b\}$, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n, c_c\}$ ir t. t.

Kiekvienu laiko momentu išmatuojamus orlaivio navigacinius parametrus galima priskirti prie vienos iš dviejų daugiamatinių aibių – ir kai terminis srautas veikia orlaivio navigacinius parametrus, ir kai terminis srautas neveikia orlaivio navigacinių parametrų. Vadovaujantis pirmiau atlikta orlaivio, naudojančio sklandytuvo skrydžio principus, skrydžio dinamikos analize, pagal orlaivio navigacinių parametrų matavimus ir šių parametrų apdorojimo naudojant dirbtinius neuronų tinklus duomenis galima suformuluoti terminio srauto paieškos metodiką.

Terminio srauto buvimas orlaivį supančioje erdvėje susijęs su orlaivio pilnutinės energijos kiekio padidėjimu arba, jei srautas silpnas, – su mažėjimo sulėtėjimu. Galima operuoti pilnutinės energijos kiekio pokyčio greičio terminu:

$$\Delta E = \frac{dE}{dt} \quad (3.26)$$

Vienas iš duomenų šaltinių turi būti orlaivio aukščio, kitas – orlaivio oro greičio rodmenys. Šių dviejų duomenų šaltinių pakanka įgyvendinti pilnutinės energijos matavimo funkcijai, kai orlaivis atlieka skrydį su nusistovėjusiais skrydžio dinamikos parametrais. Pažymėtina, kad, kadangi orlaiviui atliekant manevrus, gali kisti jo aerodinaminės charakteristikos, vadinasi, priklausomai nuo padidėjusio ar sumažėjusio aerodinaminio papriešinimo, gali kisti ir pilnutinės energijos kiekio pokytis.

Vertinant neigiamo ΔE nusistovėjusio skrydžio metu priežastis, neigiamą ΔE galima skirstyti į energijos nuostolius dėl pasipriešinimo ir energijos nuostolius dėl besileidžiančio oro srauto, kuriame atsidūrė orlaivis:

$$\Delta E = \frac{dE_o}{dt} + \frac{dE_s}{dt} \quad (3.27)$$

čia $\frac{dE_o}{dt}$ – dėl orlaivio suminio pasipriešinimo atsiradęs pilnutinės energijos pokytis, $\frac{dE_s}{dt}$ – dėl oro srauto atsiradęs pilnutinės energijos pokytis.

Norint nustatyti kylančio ar besileidžiančio oro srauto buvimą reikia iš lygties (3.27) eliminuoti pilnutinės energijos kiekio pokytį dėl orlaivio suminio pasipriešinimo. Tokiu atveju liktu tiksliai dedamoji tiesiogiai bylojanti apie aplinkinio oro įtaką orlaiviui:

$$\Delta E = \frac{dE_s}{dt} \quad (3.28)$$

Norint eliminuoti visus šalutinius veiksnius, veikiančius dE_s/dt , tikslinga įvertinti orlaivio aerodinaminių parametrų bei skrydžio dinamikos duomenis.

Matuojamųjų parametrų laiko eilėms atpažinti naudojant DNT ir taikant vaizdinių atpažinimo metodus, tinka įvairios architektūros dirbtinių neuronų tinklai (Брилюк *et al.* 2002). Vienas iš tokio tipo tinklų yra daugiasluoksnis neuronų tinklas su tiesioginiais ryšiais ir atgalinio sklaidimo mokymosi algoritmu. Tokio tipo neuronų tinklas teoriškai gali aproksimuoti bet kurią nenutrūkstamą funkciją.

Praktinio pritaikymo reikmėms dirbtinių neuronų tinklas, priklausomai nuo įėjimo duomenų aibės dimensijų skaičiaus, gali atlikti pilnutinės energijos arba (kitu atveju) NETO variometro, matuojančio tik aplink esančio oro vertikaliąją greičio dedamąją, funkciją.

Tinkamesnis yra NETO variometro funkcijos įgyvendinimas, nes šiuo atveju nustatoma terminio srauto vertikaliąją greičio dedamąją. NETO variometro rodmenys naudojami kompensuoti orlaivio skrydžio poliarėms esant tam tikroms aerodinaminių plokštumų nuostatoms, kai iš vertikaliojo greičio rodmenų paliekamas tik išorinio oro vertikalusis greitis. Tikėtina, kad vieno sluoksnio DNT, atliekantis NETO variometro funkciją, gebės atskirti dvi aibės: kai terminio srauto nėra arba oro srautas leidžiasi ir kai terminis srautas viršija nustatytąją ribinę reikšmę. Kadangi šiuo atveju atliekamas atpažinimo uždavinys, NETO variometro funkciją galima įgyvendinti tik diskrečiosios terminio srauto reikšmėms. Taikant kelis dirbtinių neuronų tinklus, išmokytus atpažinti terminį

srautą, viršijantį tam tikrus ribinius greičius, įmanoma nustatyti terminio srauto vertikalųjį greitį tam tikrame greičių diapazone: $W_{DLA} = W_{V \max} - W_{V \min}$ su tikslumu $\bar{b}$ esant diskrečiosioms srauto vertikaliojo greičio reikšmėms W_{Vi} , kur i yra diskrečiosios srauto reikšmės W_V eilės numeris. Galima įvesti srauto reikšmės W_V diskretizavimo dydžio sąvoką:

$$WD = W_{Vi} - W_{Vi-1}, \text{ kai } i > 0 \quad (3.29)$$

Dėl apibendrinimo savybės DNT nustato terminį srautą, net jei įėjimo duomenų aibė yra atstumu D_d nuo etaloninės duomenų aibės. Kitaip tariant, terminio srauto apibendrinimo gebėjimas – tai gebėjimas operuoti daugiamačiais duomenimis, turinčiais dispersiją D_d . Daugiamačių duomenų dispersija gali būti aprašyta pagal tokią lygtį (Боровков 1999):

$$D_d = \left[\sum_{i=1}^n c_i X_i \right] = \sum_{i=1}^n c_i^2 D[X_i] + 2 \cdot \sum_{1 \leq i < j \leq n} c_i \cdot c_j \cdot \text{cov}(X_i, X_j) \quad (3.30)$$

Akivaizdu, kad esant ribinei dispersijai, didesnei už deskretųjį terminio srauto vertikaliojo greičio dydį WD , DNT negalės vienareikšmiškai nustatyti,

kokį būtent W_{Vi} atitinka neuronų tinklo įėjimo vektorius $\vec{X}_i$. Taigi, siekiant vienareikšmiško atsakymo iš DNT, būtina užtikrinti tokią nelygybę $D_d < WD$.

Pažymėtina, kad tuo atveju, kai įėjimo vektorius $\vec{X}_i$ atitinka vidurinę parametų W_{Vi} ir W_{Vi+1} reikšmę, abu DNT išėjimo neuronai vektorių $\vec{X}_i$ klasifikuos kaip priklausantį jiems abiem.

Kai atsakymas iš DNT teikiamas tik diskrečiosiomis W_{Vi} reikšmėmis, DNT turi gebėti apibendrinti įėjimo vektorius $\vec{X}_i$, esantį tarp dviejų diskrečiųjų W_{Vi} reikšmių, kad šis vektorius tikrai būtų priskirtas vienai ar abiem W_{Vi} reikšmėms $\vec{X}_i$. Priešingu atveju įėjimo vektorius liks nepriskirtas nė vienai W_{Vi} reikšmei.

3.5. Terminio srauto meteorologinių parametru nustatymo uždavinys

Vienas iš uždavinių, kurių sėkmingas sprendimas leis panaudoti terminių srautų energiją autonominio orlaivio skrydžio metu, yra terminio srauto maksimalios kėlimo zonos vietos nustatymas. Šį uždavinį galima įgyvendinti taikant terminio srauto gradiento krypties nuostatą naudojant DNT. Jei orlaivio trajektoriją terminio sraute nagrinėtume kaip vaizdinį, srauto branduolio kryptčiai nustatyti galima taikyti DNT, atliekančius vaizdo atpažinimo uždavinį.

Taikant įvairias DNT architektūras galima išspręsti srauto branduolio kryptties uždavinį naudojant vieno išėjimo DNT, kurio išėjimo aktyvinimo funkcijos reikšmė atitinka srauto centro kryptties kampą θ_i , arba naudoti diskrečiąją kampe θ_i nuostatą. Antruoju atveju DNT turės n išėjimo neuronų, kiekvienas iš kurių atitinka savo nustatomą θ_i reikšmę. Tada, jei kampų skaičius atitiks n skaičių, dirbtinių neuronų tinklas turės n išėjimų. Tokio tinklo įėjimo vektorius būtų dviejų dimensijų matrica su $[x, y]$ elementų skaičiumi. Kiekvienas elementas gali turėti informaciją apie terminio srauto vertikaliosios greičio dedamosios reikšmę orlaivio skrydžio trajektorijos kreivėje. Jei netaikomi papildomi interpoliacijos metodai, matricos elementai už trajektorijos ribų turės nulines reikšmes.

Srauto maksimalią reikšmę W_{pik} galima nustatyti žinant srauto branduolio vertikaliojo greičio W_T priklausomybę nuo aukščio Z^* ir, naudojantis autonominiu orlaiviu, išmatavus W_T reikšmę pasirinktame aukštyje. Tada aproksimuojant terminio srauto reikšmę W_T pagal aukštį Z^* , naudojant funkciją $W_T = f(Z^*)$, galima nustatyti maksimalią konkretaus srauto reikšmę. Funkciją $W_T = f(Z^*)$ galima nustatyti matavimų metų pasirinktoje vietovėje, vykdant matavimus naudojantis autonominiu orlaiviu. Kitas būdas – taikyti srauto empirinį modelį, pvz., lygtį (1.4) iš Alleno darbo (Allen 2005), pateiktą disertacijos literatūros šaltinių apžvalgoje. Taip pat didžiausią įmanomą srauto vertikaliosios greičio dedamosios reikšmę W_{pik} galima nustatyti iš statistinių duomenų (Allen 2005).

Naudojant DNT įmanoma $W_T = f(Z^*)$ priklausomybę aproksimuoti visame Z^* diapazone. Tačiau, jei žinoma funkcija $W_T = f(Z^*)$, įprastais skaitiniais metodais galima aproksimuoti tiksliau. Tačiau ši funkcija, paimta iš empirinių modelių, gali ne visiškai tiksliai nurodyti konkrečios dienos meteorologinę padė-

tį. Tikėtina, kad, naudojant DNT ir papildomai į DNT įvedant meteorologinius duomenis, galima tiksliau aproksimuoti funkciją $W_T = f(Z^*)$. Didžiausią įmanomą W_{pik} reikšmę galima pasirinkti iš statistinių duomenų arba vykdant terminų srautų meteorologinių parametrų matavimus konkrečioje teritorijoje ir turint konkrečių tos dienos meteorologinių sąlygų duomenis.

Teoriškai daugiamatei funkcijai aproksimuoti turi pakakti dviejų sluoksnių neuronų tinklo (Медведев *et al.* 2002; Терехов 2002). Bendrai sintetintą DNT, tinkamą terminų srautų meteorologiniams parametrams nustatyti, galima aprašyti tokia lygtimi:

$$F_j = \sum_{k=1}^N W_{kj}^2 \tanh \left[\sum_{i=1}^N W_{ik}^1 \cdot \alpha + W_{0k}^1 \right] + W_{0j}^2 \quad (3.31)$$

čia N yra neuronų skaičius slaptajame sluoksnyje (Медведев *et al.* 2002).

Neuronų skaičius slaptajame dviejų sluoksnių DNT nustato DNT aproksimavimo galimybę. Jei neuronų nepakanka, neįmanoma tinkamai atlikti aproksimavimo uždavinio, o dėl pernelyg didelio dirbtinių neuronų skaičiaus blogėja tinklo mokymosi gebėjimas. Taraseno savo darbe (Тарасенко 2001b) pažymi, kad DNT neuronų skaičius pasirenkamas eksperimentiškai pasitelkus patirtį ir intuiciją. Toks DNT neuronų skaičiaus parinkimo metodas nėra mokslinis.

Terminio srauto masės koeficientas m pagal disertacijos 2-ojo skyriaus medžiagą laikomas konstanta per visą srauto aukštį Z_i . Tačiau dėl aplinkinio oro įtraukimo į srautą efekto oro masė sraute nuolat kinta (Шмереп 1972). Įtraukimas priklauso ne tik nuo terminio srauto skersmens, bet ir nuo greičio. Srauto greitis ir skersmuo kinta su aukščiu (Allen 2005). Praktinį terminio srauto modelį galima supaprastinti ir tada tarti, kad terminio srauto masės koeficientas nustatomas ties didžiausio įmanomo srauto vertikaliojo greičio W_{pik} reikšmės aukščiu Z_{pik} ir yra atvirkščiai proporcingas srauto spinduliui R_{pik} šiame aukštyje, laikant, kad visų terminų srautų spindulys kinta pagal vienodą dėsnį, priklausomai nuo aukščio. Atitinkamai, naudojant mastelinį koeficientą K_m , galima išreikšti srauto masės koeficientą:

$$m = \frac{1}{K_m \cdot R_{pik}} \quad (3.32)$$

Srauto polinkio kampui nustatyti tam tikrame aukštyje Z_i pagal dėsnį, pateiktą 2-ame skyriuje (2.34), reikia vėjo greičio v , srauto masės koeficiento m bei konstantos c . Siekiant visą srauto centrinės ašies kreivę atkurti pagal lygtį

(2.28), reikia žinoti srauto polinkio kampą α_i , atitinkantį aukštį Z_i . Tačiau, jei matuojant tam tikrame aukštyje Z_i jau yra nustatytas srauto polinkio kampas, iš aerologinės diagramos žinomas vėjo greitis v_i ir apskaičiuotas srauto masės koeficientas, iš lygties (2.34) galima nustatyti konstanta c :

$$c = \frac{-1 \cdot \left(\alpha_i - \frac{\pi}{2} \right)}{m \cdot \ln|v_i|} \quad (3.33)$$

Nustačius konstantą c ir žinant vėjo greitį įvairiose aukščiuose, galima tiesėmis atkurti srauto ašies laužtinę. Šią laužtinę, naudojantis 2.28 lygtimi, galima paversti kreive.

Vertinant srauto skersmens pokyčio dėsnį galima taikyti jau esančią empirinę priklausomybę $dR/dZ = f(Z)$ arba naudojant matavimo metu gautus duomenis išmokyti DNT aproksimuoti naują srauto skersmens pokyčio priklausomybę $dR/dZ^* = f(Z^*)$.

Terminis srautas juda pavėjui. Jei vėjo greičiai įvairiame aukštyje nevienodas, skirtingoms srauto dalims būdingas skirtingas judėjimo pavėjui greitis. Tada kyla klausimas, kaip toks srautas gali išlikti vientisas. Literatūroje teigiama, kad srautas į atskirus burbulus išyra tik esant stipriam vėjui, priešingu atveju srautas lieka vientisas (Шмереп 1972). Galima daryti prielaidą, kad vientiso srauto judėjimo greitis horizontalioje plokštumoje viename aukštyje atitiks judėjimo greitį kitame aukštyje. Tačiau šis teiginys tėra tik modelio supaprastinimas. Tada, išmatavus srauto poslinkį pavėjui, galima nustatyti srauto kaip pilnutinio objekto, horizontalųjį greitį, sudarytą iš dviejų dedamųjų $dX/dt^* = Vh_x$ ir $dY/dt^* = Vh_y$. Modeliavimo metu galima laikyti, kad koordinatų sistemos centras horizontalioje plokštumoje juda erdvėje tokiu pačiu greičiu, kaip ir srautas. Tada, sprendžiant srauto judėjimo kompensavimo uždavinį, susijusį su autonominio skrydžiu, tereikia autonominio orlaivio koordinatų sistemą konvertuoti į srauto koordinatų sistemą. Planuojant trumpą skrydį sraute galima laikyti, kad srautas orlaivio atžvilgiu nejuda, tačiau tokiu atveju bus gaunama vis didėjanti nuo laiko koordinatų centrų priklausanti nesutapimo klaida.

3.6. Terminio srauto meteorologinių parametru prognozavimo uždavinio sudarymas

Paprasciausi prognozavimo metodai pagrįsti skaitiniais prognozuojamo parametro ar parametru požymiais, invariantiškais santykinai stebimo objekto padėties matuojamų parametru erdvėje atžvilgiu.

Laiko eilių prognozavimas – tai jo būsimų reikšmių ar charakteristikų, leidžiančių nustatyti minėtas reikšmes, apskaičiavimas remiantis jau žinomomis reikšmėmis. Dydis ar dydžiai, kurie yra prognozuojami, vadinami prognozuojamaisiais dydžiais (Тарасенко 2001b; Zhang 2007).

Prognozuojant turima omenyje, kad prognozuojamojo dydžio reikšmė priklauso nuo kokių nors reikšmių, vadinamų prognozavimo požymiais

Dinaminėms sistemoms galioja Takenso teorema: jei laiko eilė yra dinaminės sistemos pasekmė, t. y. laiko eilės reikšmės yra tam tikra sistemos funkcija, tai yra laiko eilių sekos reikšmės apibūdina sistemos būsenos funkciją, tai laiko seka gali būti nagrinėjama kaip tokia priklausomybė:

$$b_i = f(b_k, b_{k+1}, \dots, b_{k+(n-1)}) \quad (3.34)$$

čia $\{b_k, b_{k+1}, \dots, b_{k+(n-1)}\}$ yra situacijos aprašymas, kai prognozuojamasis dydis priėmė reikšmę b_i ir yra žymimas $\bar{b}_i^n$, n – aprašomos situacijos dydis,

$k = i - \frac{p}{t}$ – matavimo eilės, priklausančios eilei B, numeris, nuo kurio pradedamas situacijos aprašymas, p – prognozavimo periodas, t – laiko intervalo žingsnis (Тарасенко 2001).

Šiuo atveju aprašant situaciją $\bar{b}_i^n$ egzistuoja panėrimo į praeitį gylis n , užtikrinantis vienareikšmišką eilės reikšmės b_i priklausomybę nuo nagrinėjamos eilės n praėjusių reikšmių (Тарасенко 2001b).

Lygtyse (2.23 ir 2.24) parodyta, kad terminio srauto skersmuo R priklauso nuo srauto vertikaliosios greičio dedamosios. Atitinkamai ir modeliuoti raidai reikia žinoti tik vieno parametro – maksimalaus vertikaliojo srauto greičio w_T raidos laike funkciją $d w_T / dt$. Šią funkciją galima nustatyti išmatavus srauto greičio w_T pokytį laike. Atliekant šiuos matavimus viename aukštyje Z_i galima neįvertinti srauto greičio w_T priklausomybės nuo aukščio Z_i funkcijos.

Taigi terminio srauto prognozavimo uždavinys susiveda į vienmatės w_T laiko eilės prognozavimo uždavinį. Tačiau w_T priklauso nuo daugelio meteoro-

loginių parametrų. Taigi, prognozuojant vienmatę laiko eilę, įėjimo duomenims reikės naudoti D skaičiaus dimensijų laiko eilės.

Jei yra dirbtinių neuronų tinklas, kuris atlieka vienos daugiamatės eilės, turinčios j parametrų skaičių ir n laiko atkarpų skaičių, atpažinimo uždavinį laiko momentu $t+i$ pagal praeities laiko momentus, tai atpažinimas vykdomas su tam tikru tikslumu $\bar{b}_i^n$.

Įėjimo neuronų, nekeičiančių signalo, skaičius turi atitikti įėjimo vektoriaus $\vec{X}_i$ elementų skaičių D , padaugintą iš panirimo į praeitį gylių n :

$$D = f(\vec{X}_i) = n \cdot N \quad (3.35)$$

Išėjimo vektorius gali būti sutelktas viename neurone arba diskrečiosiomis $\vec{Y}_i$ reikšmėmis suskirstytas per kelis išėjimo neuronus. Taikant kelių sluoksnių neuronų tinklą su N skaičiumi neuronų slaptajame sluoksnyje, tinklo veikimą galima aprašyti 3.31 lygtimi.

3.7. Trečiojo skyriaus apibendrinimas

Terminių srautų modeliavimo erdvė turi ribinius matmenis. Siūloma terminių srautų modeliavimo erdvės geometrinė konfigūracija – sfera, kurios spindulys priklauso nuo modeliujamų srautų reikalaujamo modeliavimo tikslumo, orlaivio greičio bei kitų orlaivio skrydžio dinamikos charakteristikų, modeliavimą atliekančios sistemos skaičiavimo pajėgumų.

Terminio srauto aptikimo uždavinys sprendžiamas apdorojant matuojamų parametrų laiko sekas naudojant DNT. DNT apibendrinimo savybė yra prieštaringa DNT gebėjimo požiūriu pirmiau nurodytos funkcijos įgyvendinimo metu. Viena vertus, DNT apibendrinimo savybė leidžia veikti tinklui, kai įėjimo duomenys turi tam tikrų klaidų, tačiau ši savybė daro tinklą mažiau jautrų nežymiems įėjimo duomenų pokyčiams, todėl blogėja terminio srauto vertikaliosios greičio dedamosios nustatymo tikslumas. Todėl tikslinga visą srauto vertikalųjų greičių matavimo diapazoną skaidyti į mažesnius diapazonus, kiekvienas iš kurių bus nustatomas naudojant atskirą išėjimo neuroną.

Terminio srauto raidai modeliuoti taikant DNT reikalinga tik vieno parametro – maksimalaus vertikaliojo srauto greičio w_T – raidos laike funkcija $w_T(t) = d w_T / dt$.

Terminio srauto meteorologinių parametrų prognozavimo uždavinys išsprendžiamas taikant DNT, kurio įėjimo vektorius yra daugiamatė stochastinių parametrų laiko seka.

Praktiniai eksperimentai ir sudarytų metodikų aprobavimas

Skyriuje pateikiama kylančio oro srautų aptikimo, modeliavimo, dirbtinių neuronų tinklų taikymo ir duomenų, reikalingų terminiam srautui aptikti matavimo rezultatų analizė.

Skyriuje pateikta medžiaga yra aprobuota trijose mokslo konferencijose, publikuota dvejuose mokslo leidiniuose (Suzdalev, Stankūnas 2009; Suzdalev Stankūnas 2011).

4.1. Kylančio oro srauto aptikimas

Modeliuojant buvo siekiama nustatyti, ar įmanoma realiu laiku vykdyti terminių srautų aptikimo DNT pagalba uždavinį, panaudojant orlaivyje esančią matavimo įrangą.

Siekiant pašalinti galimus neapibrėžtumo faktorius, buvo vykdomas orlaivio skrydžio dinamikos modeliavimas idealizuotose skrydžio sąlygose. Buvo atliekamas orlaivio skrydžio modeliavimas su nusistovėjusiais parametrais, kai nevyksta pereinamieji skrydžio dinamikos procesai. Tokio skrydžio metu sklaidytuvo skrydžio principus naudojantis orlaivis skrenda pastoviu pilnutiniu greičiu,

pilnutinio greičio vektoriaus kampas horizontalės atžvilgiu sutampa su sklandymo kampu. (Lasauskas 2008) Taip pat buvo nuspręsta, kad orlaivio stabilizatorius, liemuo ir kilis neturi įtakos pasipriešinimo bei kilimo koeficiento reikšmėms. Tokio sprendimo motyvas yra aukščiau minėtasis, skrydį įtakančių veiksnių, supaprastinamas ir idealizmas.

Matematinį orlaivio skrydžio modelį sudaro kelios sudėtinės dalys. Skrydžio dinamikos modeliavimui atlikti yra reikalingi orlaivio aerodinamikos duomenys. Modeliuojamo orlaivio aerodinaminius parametrus įtakoja sparno geometrija, aerodinaminis profilis ir skrydžio greitis. Remiantis orlaivio geometrijos, skrydžio greičio duomenimis ir oro, kaip dujų-skysčių dinamikos terpės, parametrais, galima apskaičiuoti aerodinaminius orlaivio parametrus. (Eduardas Lasauskas. 2008).

Šie duomenys buvo gauti programos XFLR5 pagalba. Modeliavimui buvo nustatomi sekantys aerodinaminiai orlaivio parametrai: keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo pasipriešinimo jėgos koeficiento, keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo sparno atakos kampo, kokybės koeficiento priklausomybė nuo sparno atakos kampo.

Panaudojant šiuos duomenis buvo atlikti sklandymo kampo bei pilnutinio greičio vektoriaus dydžio skaičiavimai konkrečiam orlaivio modeliui, esant užduotiems išoriniams oro parametrams, pavyzdžiui, vertikalioji oro srauto dedamoji.

4.1 pav. Orlaivio koordinačių sistemos
Fig 4.1. The coordinate systems of the aircraft

Modeliavimo metu atakos kampo reikšmė buvo keičiama nuo minus vieno iki penkių laipsnių. Tokios atakos kampo pokyčio ribos buvo pasirinktos todėl, kad atakos kampo pokytis lemia skrydžio greičio pokytį, bei Reinoldso skaičiaus pokytį. Reinoldso skaičiaus reikšmė atitinkamai keitėsi nuo 216 000, esant minus vienam laipsniui, nuo 172 000, esant vienam laipsniui iki 139 000, esant sparno atakos kampui lygiam penkiems laipsniams.

Tačiau, esant kelių dešimčių procentų Reinoldso skaičiaus pokyčiui, kiti orlaivio aerodinamikos parametrais yra mažai besikeičiantys nuo Reinoldso skaičiaus reikšmės (Lasauskas 2008). Taip pat modeliuojant skrydį skirtingais greičiais, esamos klaidos neįtakos dirbtinių neuronų tinklo veikimo, nes DNT apmokymui taip pat buvo panaudoti skrydžio duomenys su tom pačiom klaidom kaip ir modeliavimo eksperimento metu. Dirbtinių neuronų tinklo užduotis yra išskirti iš skrydžio trajektorijos funkcijos terminio srauto dedamosios reikšmę.

Keičiant aukštumos vairo padėtį, galima keisti orlaivio sparno atakos kampą. Pagal gautas XFLR5 programos pagalba poliares, priklausomai nuo atakos kampo α , buvo nustatomos reikiamos aerodinaminės charakteristikos. Sklandymo kampas nustatomas pagal lygtį (Thomas 1999):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{D}{L} = \frac{1}{K} = \frac{C_D}{C_L} \quad (4.1)$$

čia θ yra sklandymo kampas, D – aerodinaminio pasipriešinimo jėga, L – aerodinaminė keliamoji jėga, K – kokybės koeficientas, C_D – Pasipriešinimo jėgos koeficientas, C_L – keliamosios jėgos koeficientas (Thomas Fred 1999).

Orlaivio skrydžio greitis, kai oro klampos koeficientas lygus $\rho_0 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ nustatomas pagal lygtį:

$$V_{SL} = 1,278 \sqrt{\frac{G}{S \cdot C_L}} \quad (4.2)$$

čia G – orlaivio svoris, S – orlaivio aerodinaminių plokštumų plotas, V_{HS} – horizontalioji orlaivio oro greičio dedamoji (Thomas 1999).

Vertikaliąją orlaivio greičio dedamoją V_Y , kai $\rho_0 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ nustatoma remiantis lygtimi:

$$V_Y = 1,278 \sqrt{\frac{G}{S \cdot C_y}} \cdot \frac{1}{K} \quad (4.3)$$

Priklausomai nuo atakos kampo, kinta ir orlaivio sklandymo kampas bei oro greitis. Oro greitis susideda iš vertikaliosios ir horizontaliosios dedamųjų. Pridedant prie vertikaliosios oro greičio dedamosios atsitiktinę reikšmę galima modeliuoti kylančio ar besileidžiančio oro srauto įtaką orlaivio skrydžiui. (Lasauskas 2008).

Po autonominio orlaivio skrydžio dinamikos modeliavimo yra atliekamas dirbtinio neuronų tinklo inicializavimas. T. y. iš anksto sukurtos struktūros dirbtinių neuronų tinklo atsitiktinių svertinių elementų uždavimas.

Kitas žingsnis yra dirbtinių neuronų tinklo apmokymo įėjimo parametrų aibės sukūrimas. Įėjimo duomenų aibė susideda iš skrydžio dinamikos modeliavimo duomenų: vertikaliosios oro greičio dedamosios, horizontaliosios oro greičio dedamosios, orlaivio atakos kampo, orlaivio skrydžio kampo.

Pasirinkta hiperbolinio tangento funkcija sukuria nelineinę priklausomybę tarp dirbtinio neurono įėjimo ir išėjimo duomenų. (Брилюк *et al.* 2002) Jei pakeisti hiperbolinį tangentą kokia nors linijine funkcija, gautųsi autoregresinės sistemos modelis (linear prediction model). (Солдатова *et al.* 2006).

Į kiekvieną dirbtinių neuronų tinklo elementą patenka skaliarinis įėjimo signalo vektoriaus ir svertinio koeficiento sandauga, kuri yra hiperbolinio tangento aktyvacijos funkcijos argumentas.

$$f(a) = A \tanh(S_a) \quad (4.4)$$

čia $f(a)$ – hiperbolinio tangento aktyvacijos funkcijos reikšmė, S_a – hiperbolinio tangento aktyvacijos funkcijos argumentas, A – mastelinis koeficientas.

Vieno sluoksnio dirbtinių neuronų tinklų mokymui tinka sekantys algoritmai: Mokytojo ir mokinio metodas, Rosenblato (F.Rosenblatt), Vindorv – Hofo (Widrow-Hoff) apmokymo metodas. (Брилюк; Старовойтов *et al.* 2002)

Modeliavimo metu buvo pasirinktas mokymo su mokytoju algoritmas, nes iš anksto buvo žinomas terminio srauto greitis ir jo įtakojami orlaivio skrydžio dinamikos parametrai. Apmokymui buvo skirtos dvi aibės: mokymo duomenų aibė ir rezultato kontrolės duomenų aibė. Mokymo duomenys buvo orlaivio oro greičio vektorius, atakos kampas, ir kiti, remiantis šiais parametrais, apskaičiuojami skrydžio dinamikos parametrai. Gautų rezultatų kontrolės aibei buvo panaudoti tie patys duomenys ir papildomai naudojamas terminio srauto vertikalus greitis.

Santykinei klaidai rasti, buvo naudojami DNT išėjimo duomenys ir juos atitinkanti terminio srauto vertikaliosios greičio dedamosios reikšmė.

$$\delta_x = \frac{X_k}{X_t} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

čia δ_x yra santykinė terminio srauto, turinčio teigiamą oro srauto vertikalų greičio reikšmę, nustatymo klaidą, išreikšta procentais, X_k - klaidingų oro srauto vertikalų dedamosios vektoriaus krypties nustatymų skaičius, X_t - teisingų oro srauto vertikalų dedamosios vektoriaus krypties nustatymų skaičius.

4.2 pav. Dirbtinių neuronų tinklo struktūra

Fig. 4.2. Artificial neural network's structure

Santykinė klaida buvo nustatoma, vykdant po 500 DNT įėjimo duomenų iteracijų. Kiekvienos iteracijos metu DNT praeidavo pilna apmokymo ciklą. Tokiu būdu buvo siekiama sumažinti nesėkmingo DNT apmokymo etapo įtaką modeliavimo eksperimento rezultatams.

Sudarytas DNT, tinkantis terminio srauto atpažinimui (4.2 pav).

Sukurtas dirbtinių neuronų tinklas yra be grįžtamųjų ryšių ir sudarytas iš kelių sluoksnių. Įėjimo sluoksnis nekeičia įėjimo duomenų. Paslėptasis sluoksnis skirtas duomenų apdorojimui. Išėjimo sluoksnis susideda iš vieno neurono ir yra skirtas apskaičiuoti išėjimo duomenų vektorius.

Orlaivio aerodinamikos ir skrydžio dinamikos modeliavimo metu gauti reikalingi DNT įėjimo vektorių formavimui duomenys, kurie yra imami iš skrydžio poliarių (4.2 pav., 4.3 pav., 4.4 pav.).

Dirbtinių neuronų tinklo veikimo modeliavimas buvo atliekamas naudojant nuoseklią skaičiavimo sistemą, atitinkančią IBM kompanijos skaičiavimo mašinų architektūrą. Buvo naudojamos lygiagrečios skaičiavimo sistemos, veikiančios dirbtinių neuronų tinklų pagrindu, simuliacijos. Programos algoritmas parašytas C++ programavimo kalba, panaudojant standartines matematines bibliotekas.

4.3 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo pasipriešinimo jėgos koeficiento ir sparno profilio

Fig. 4.3. Lift coefficient dependence on the coefficient of drag force and the wing profile

4.4 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo ir sparno profilio

Fig. 4.4. Lift force dependence on the angle of attack and wing profile

4.5 pav. Kokybės koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo ir sparno profilio
Fig. 4.5. Quality factor dependence on the angle of attack and wing profile

Dirbtinių neuronų tinklo išėjime yra reikšmių laiko seka nuo -1 iki +1. Tokios reikšmės gaunasi dėl dirbtinio neurono hiperbolinio tangento aktyvacijos funkcijos. Teigiamos DNT išėjimo reikšmės atspindi terminio srauto teigiamą vertikalųjį greitį, neigiamos reikšmės atspindi terminio srauto neigiamas arba nulines vertikaliojo greičio reikšmes. Kuo reikšmės artimesnės nulinei vertei, tuo mažesnė tikimybė, kad DNT teisingai aptiko terminio srauto buvimą.

Modeliavimo metu buvo nustatyta, kad esant oro srauto greičio vertikalajai dedamajai, atpažinimo sistema, sudaryta dirbtinių neuronų tinklų pagrindu, sėkmingai atpažįsta kylantį arba besileidžiantį oro srautą. Dėl DNT išėjimo neuronų hiperbolinio tangento aktyvacijos funkcijos (4.44) vyksta DNT išėjimo reikšmės svyravimas tarp reikšmių nuo -1 iki +1. Buvo nutarta, kad teisingos DNT terminio srauto atpažinimo reikšmės lygios sveikiesiems skaičiams 1 ir -1, nes esant šioms reikšmėms, DNT 100% tikslumu nustato terminio srauto buvimą. DNT išėjimo reikšmės, esančios tarp -1 ir 1, laikomos klaidingomis ir esančiomis neapibrėžtumo zonoje. Arti nulio esančios oro srauto vertikalios greičio dedamosios reikšmės sukuria DNT išėjime duomenis, esančius neapibrėžtumo zonos ribose.

4.6 pav. Neapibrėžtumo zonos dydžio priklausomybė nuo atakos kampo

Fig. 4.6. Uncertainty area the size dependence of the angle of attack

Atlikto modeliavimo eksperimento metu buvo nustatyta, kad neapibrėžtumo zonos dydis nėra pastovus ir kinta priklausomai nuo orlaivio sparno atakos kampo (4.6 pav.) ir vertikaliosios greičio dedamosios reikšmių.

Nuo orlaivio aerodinamikos ir sparno atakos kampo priklauso orlaivio skrydžio dinamikos parametrai. Taigi, galima teigti, kad terminio srauto vertikaliajam greičiui esant arti nulinės reikšmės, dirbtinių neuronų tinklas turi tam tikrą, kintančią jautrumo ribą, žemiau kurios yra įmanomas klaidingas atpažinimas.

Darbo metu buvo nustatytas terminio srauto aptikimo klaidos dydis, kai DNT įėjimo reikšmių vektorius yra reikšmių srityje, atitinkančioje vertikalaus terminio srauto greičio teigiamą, neigiamą ar nulinę dedamąją (4.7 pav., 4.8 pav., 4.9 pav., 4.10 pav.).

4.7 pav. Santykinė terminio srauto aptikimo klaida, kai sparno atakos kampas yra $-0,5^\circ$

Fig. 4.7. The relative thermal error detection, when the wing angle of attack is 1.0°

4.8 pav. Santykinė terminio srauto aptikimo klaida, kai sparno atakos kampas yra $0,0^\circ$

Fig. 4.8. The relative thermal error detection, when the wing angle of attack is 0.0°

4.9 pav. Santykinė terminio srauto aptikimo klaida, kai sparno atakos kampas yra $1,0^\circ$

Fig. 4.9. The relative thermal error detection, when the wing angle of attack is 1.0°

4.10 pav. Santykinė terminio srauto aptikimo klaida, kai sparno atakos kampas yra $2,0^\circ$

Fig. 4.10. The relative thermal error detection, when the wing angle of attack is 2.0°

Analizuoiant gautus tyrimo rezultatus, nustatyta:

1. Modeliavimo metu buvo praktiškai realizuotas dirbtinių neuronų tinklo modelis, įgyvendinantis atpažinimo funkciją.
2. Dirbtinių neuronų tinklas atlieka funkcijas, atitinkančias pilnos energijos variometro atliekamas funkcijas.
3. DNT nustato terminio srauto buvimą už neapibrėžtumo zonos ribų 99% tikslumu.
4. Kai vertikalioji oro srauto greičio dedamoji yra artima nulinėms reikšmėms, atpažinimo algoritmas, veikiantis dirbtinių neuronų tinklą pagrindu, pa-

tenka į neapibrėžtumo sritį ir atpažinimo prognozės reikšmė pradeda svyruoti į neigiamą arba teigiamą pusę ties nulio riba. 5. Neapibrėžtumo zonos dydis nėra pastovus ir kinta priklausomai nuo orlaivio aerodinamikos ir dinamikos parametrų reikšmių. 6. Maksimalus, terminio srauto atpažįstamos neapibrėžtumo zonos, dydis yra lygus 0,6 m/s. 7. Neapibrėžtumo zona nėra simetrinė nulinėms terminio srauto vertikalios greičio reikšmės ir priklauso nuo orlaivio skrydžio dinamikos ir aerodinamikos parametrų. Tokio asimetriškumo buvimas reikalauja papildomų tyrimų.

4.2. Kylančio oro srauto modeliavimas

Kaip buvo minėta, plokštieji diskiniai srauto elementai sudaryti iš koncentrinų žiedų – orbitalių. Kiekviena orbitalė yra sudaryta iš diskrečių taškų, turinčių terminio srauto vertikaliosios oro greičio dedamosios reikšmės. Srauto apatinio plokščiojo elemento centras sutampa su koordinačių sistemos centru. Kiekvienos orbitalės taškų koordinatės buvo nustatomos pagal sekančią lygčių sistemą.

Plokštieji srauto elementai buvo modeliuojami per tam tikrą atstumą vertikalyje plokštumoje. Šį atstumą sąlygojo diskrečios aukščio reikšmės H_D (4.11 pav.).

$$H_i = H_{i-1} + H_D \quad (4.6)$$

čia H_i – aukščio reikšmė esamame modeliuojame diske, H_D - aukščio diskrečią užduodantis kintamasis.

Iteracijos kampas θ buvo didinamas nuo nulio iki 360° diskrečiais žingsniais θ_D , kiekvieną sekančią iteraciją kampo θ_i reikšmė buvo didesnė kampu θ_D , nei θ_{i-1} .

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \theta_D \quad (4.7)$$

Tokiu būdu sumodeliuoti gradientinių parametrų lauko taškai visame vienos orbitalės apskritimo ilgyje. Kampo θ diskretiškumas įtakoja modeliavimo tikslumą.

4.11 pav. Terminio srauto modelis su nekintančiu polinkio kampu ir srauto pločiu

Fig. 4.11. Thermal updraft model with constant pitch angle and with constant width

Atvaizde (4.12 pav.) yra pateiktas modeliuojamo terminio srauto plokščiojo elemento 90° sektorius, kai $\theta_D = 0.1^\circ$ (kairėje) ir $\theta_D = 5^\circ$ (dešinėje) (4.12 pav.).

4.12 pav. Kampo diskretizacijos įtaka modeliuojamoms orbitalėms

Fig. 4.12. Angle discretization's influence to modeled orbital's

Sekantis žingsnis buvo kintančio srauto polinkio kampo modeliavimas. Toks kintantis polinkio kampas gali būti sąlygojamas vėjo greičio gradiento pagal vertikaliąją ašį. Polinkio kampo modeliavimas buvo įgyvendintas, įvedus į modelį sekančią polinkio kampo nuo aukščio priklausomybę:

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \frac{\lambda_i \cdot H_i}{K} \quad (4.8)$$

čia λ_i – polinkio kampo reikšmė esamos iteracijos metu, λ_{i-1} – polinkio kampo reikšmė praeitos iteracijos metu, K – pastovus koeficientas, užduodantis aukščio įtaką polinkio kampo reikšmei, H_i – aukščio reikšmė esamos iteracijos metu.

Terminio srauto su tolygiai didėjančiu polinkiu λ_i , pagal (4.8) priklausomybę, modelis yra pateiktas Error! Reference source not found. paveiksle.

Srauto pločio pokytis, kintant aukščiui, buvo modeliuojamas pagal tiesinį ir netiesinį dėsnį. Pagal tiesinį dėsnį, srauto plokščio disko skersmuo R_i buvo keičiamas sulig aukščiu H_i pagal dėsnį:

$$R_i = R_0 + \frac{H_i}{K} \quad (4.9)$$

čia R_i – srauto spindulys esant atitinkamam modeliuojamam aukščiui H_i , R_0 – pradinis srauto spindulys koordinatų pradžioje, K – pastovus koeficientas.

4.13 pav. Terminio srauto polinkio pokytis

Fig. Error! Reference source not found.4.13. Change of updraft inclination

Modeliavimo rezultatas, kai srauto plotis didėja tiesiškai, sulig aukščiu, yra pateiktas 4.13 paveiksle.

4.14 pav. Terminis srautas su tiesiškai kintančiu pločiu

Fig. 4.14. Updraft with linearly varying width

Taip pat buvo naudojamas netiesinis srauto pločio pokyčio pagal vertikalę dėsnis (8). Modeliavimo rezultatas, kai srauto spindulys, sulyg aukščiui, kinta netiesiškai yra pateiktas 4.14 **Error! Reference source not found.** pav.

$$R_i = R_0 + \frac{\cos\left(\frac{R_0 + H_i/L}{J}\right)}{K} \quad (4.10)$$

čia R_0 – pradinė terminio srauto spindulio reikšmė koordinatų pradžioje; R_i – terminio srauto spindulio reikšmė; H_i - esamas modeliuojamas aukštis; L, J, K – mastelio koeficientai.

4.15 pav. Srautas su netiesiškai kintančiu pločiu
Fig.4.15. Updraft with non-linearly varying width

Srauto raidos modeliavimas buvo atliekamas, taikant kosinusinę priklausomybę srauto pokyčio funkcijai pagal aukštį $\frac{dw_i}{dz_i}$ nuo laiko t :

$$\frac{d\left(\frac{dw_i}{dz_i}\right)}{dt} = \left(\frac{dw_i}{dz_i}\right) \cdot \cos(t) \quad (4.11)$$

Srauto stiprio pokyčio modeliavimo rezultatas yra matomas 4.16, 4.17, 4.18 ir 4.19 pav. paveiksluose. Šiuose paveiksluose modeliuojamas terminio srauto vertikalusis greitis kinta nuosekliai nuo nulinės reikšmės iki 10 m/s. Tamsiais apskritimais pažimėta didžiausia įmanoma srauto rybą, viduje esančiais šviesiais apskritimais pažimėtas modeliuojamas terminis srautas.

4.16 pav. Srauto maksimali greičio w_{pyk} reikšmė lygi 2,17 m/s

Fig. 4.16. Maximal updraft speed w_{pyk} equal 2,17 m/s

4.17 pav. Srauto maksimali greičio w_{pyk} reikšmė lygi 4,02 m/s

Fig. 4.17. Maximal updraft speed w_{pyk} equal 4,02 m/s

4.18 pav. Srauto maksimali greičio w_{pyk} reikšmė lygi 6,44 m/s

Fig. 4.18. Maximal updraft speed w_{pyk} equal 6,44 m/s

4.19 pav. Srauto maksimali greičio w_{pyk} reikšmė lygi 9,07 m/s

Fig. 4.19. Maximal updraft speed w_{pyk} equal 9,07 m/s

Atlikus skaičiavimo rezultatų analizę, nustatyta:

1) Modeliuojant kylančius oro srautus plokščiaisiais apskritimniais baigtiniais elementais, kurie išdėstomi trijų matavimų erdvėje, ir taikant adaptatyvios ekstrapoliacijos metodą atsiranda galimybė modeliuoti tiesiškai ir netiesiškai kintančio pločio bei nekintamo ir kintamo polinkio kampo srautus. 2) Pasiūlyta metodika tinka modeliuoti terminius srautus, turint riboto pajėgumo skaičiavimo resursus pasiekiant taikymui skraidančiame aparate reikiamą, srauto modelio detalumą ir priimtinas laiko sąnaudas vienai modelio iteracijai sukurti.

4.3. Bikubinės interpoliacijos taikymas vykdant terminio srauto sektoriaus interpoliavimą

Terminio srauto simetrija horizontalioje plokštumoje yra tik modelio supaprastinimas. Pagal (Шмереп 1972), terminis srautas gali būti nesimetrinis dėl vėjo įtakos. Turint srauto matavimus plokštumoje, keliuose stačiakampio tinklo mazgų taškuose, galima atlikti interpoliacijos veiksmus, siekiant atkurti visą srauto dalies vaizdą.

Šiame eksperimente buvo atliktas vieno terminio srauto plokščiojo elemento 90° sektoriaus dvimatis kubinis interpoliavimas. Dvimačiam kubiniam interpoliavimui buvo nustatomi vienmačiai kubiniai splainai pagal X ir Y ašis. Toliau vyko šių vienmačių splainų diferencijavimas, kuriuo pagalba ir buvo gaunamas interpoliacijos funkcijos gradientas ir antros eilės išvestinės reikiamuose taškuose. Panaudojus dvimatį stačiakampį parametų tinklą, buvo sumodeliuotas vienas plokščiasis terminio srauto elemento 90° sektorius. Buvo pasirinkta dvimatis šešiolikos taškų matrica, pagal kurią ir buvo atlikta bikubinė interpoliacija. Interpoliacijai atlikti buvo sudaryta sekanti 4×4 duomenų matrica:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 8 \\ 0 & 5 \\ 0 & 2 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \\ & 0 & 2 \\ & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Interpoliacija buvo vykdoma rekurentiniu metodu, interpoliuojant kiekvieną tašką su koordinatėmis $w(y,x)$ visame sektoriaus plote, tarp koordinatinių -1...2 pagal x ašį, atitinkamai -1...2 pagal y ašį. Kiekvieno taško $w(x,y)$ interpoliantai buvo surasti, apskaičiavus šešiolikos koeficientų reikšmes:

$$\begin{aligned}
w(x, y) = & b_1 f(0,0) + b_2 f(0,1) + b_3 f(1,0) + \\
& b_4 f(1,1) + b_5 f(0,-1) + b_6 f(-1,0) + \\
& + b_7 f(1,-1) + b_8 f(-1,1) + b_9 f(0,2) + \\
& + b_{10} f(2,0) + b_{11} f(-1,-1) + b_{12} f(1,2) + \\
& + b_{13} f(2,1) + b_{14} f(-1,2) + b_{15} f(2,-1) + \\
& + b_{16} f(2,2)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

čia $b(i,j)$ - mazgų koeficientai.

Arba, bendrinėje formoje interpoliuojamo paviršiaus, lygtis yra:

$$w(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \tag{4.13}$$

(Роджерс Д., *et al.* 2001)

Matricos dvimatės kubinės interpoliacijos rezultatas yra pateiktas 4.20 paveiksle.

4.20 pav. Srauto sektoriaus dvimatė kubinė interpoliacija

Fig 4.20. 2D cubic interpolation of the updraft sector

Pasiūlytas interpoliacijos metodas, pats savaime, nepasižymi moksliniu naujumu, tačiau, tiriamos problemos kontekste, turi platų praktinį pritaikymą. Jei terminis srautas yra nesimetrinis, srauto skerspjūvį pagal horizontaliąją plokštumą galima nustatyti atliekant, matavimų metu gautų, duomenų interpoliaciją.

4.4. Skaičiavimo resursų sąnaudų vertinimas, taikant terminio srauto modelį

Eksperimento metu buvo tiriamas vienos terminio srauto modeliavimo iteracijos laikas, priklausomai nuo modeliuojamų taškų kiekio.

4.1 lentelė. Modeliavimo laiko priklausomybė nuo modeliuojamų taškų kiekio

Table 4.1. Modelling the time dependence of the computed points for

Taškų kiekis x 1000, vnt	Iteracijos laikas, ms
684	407
272,16	180
149,04	109
90,72	78
64,8	63
46,8	55
39,6	47
28,8	40

4.1 lentelėje pateikti duomenys rodo tiesinę priklausomybę tarp modeliuojamų taškų kiekio ir vienos iteracijos vėlinimo laiko (4.21 pav.). Atsižvelgiant į lengvųjų autonominių orlaivių pilnutinių greičių diapazoną, dešimčių milisekundžių srauto modeliavimo laikas prilygsta kelių decimetrų arba metrų nuotoliui, kurį orlaivis įveiks per vieną srauto modeliavimo iteraciją.

4.21 pav. Modeliavimo laiko priklausomybė nuo modeliujamų taškų kiekio
Fig. 4.21. The model used for the time dependence of the computed points for

Pasiūlyta modelio naudojamų skaičiavimo resursų nustatymo metodika tinka modeliuojant terminius srautus, kai yra riboti skaičiavimo pajėgumo resursai. Ši metodika pasiekia, taikymui skraidančiame aparatereikiama, srauto modelio detalumą ir priimtinas laiko sąnaudas, vienai modelio iteracijai sukurti.

4.5. Kelių parametrų aproksimavimo funkcijos įgyvendinimas dirbtinių neuronų tinklų pagalba

Eksperimento tikslas sudaryti DNT, gebantį vykdyti kelių parametrų funkcijos aproksimavimą. Turintis daugiasluoksnio perceptrono architektūrą DNT buvo pasirinktas su 4 sluoksniais ir po 15 neuronų kiekviename sluoksnyje. DNT apibendrinta architektūra pateikta 4.22 paveiksle. Iš viso DNT turėjo trys paslėptuosius sluoksnius. Išėjimo sluoksnyje neuronai neaktyvūs, išskyrus vieną išėjimo neuroną, kuris ir atliko viso tinklo išėjimo funkciją. Visų paslėptojo sluoksnio ir išėjimo sluoksnio neuronų aktyvacijos funkcija – loginis sigmoidas.

4.22 pav. Bendrinis, eksperimento metu naudojamo, DNT modelis

Fig. 4.22. General ANN model used in the experiment

Apmokymo aibės generavimui buvo pasirinkta srauto vertikaliojo greičio pokyčio pagal aukštį funkcija su papildomu svertiniu koeficientu X . Funkcijos grafikas yra pateiktas 4.23 pav.. Apmokymo etapas truko $5 \cdot 10^5$ iteracijų. Po apmokymo srautas pradėjo vykdyti aproksimavimo funkciją nuo įėjimo duomenų aibės (4.24 pav). Įėjimo vektoriaus generavimui buvo naudojama funkcija:

$$Y = X \cdot \left(\frac{z^*}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - 1,1 \cdot \frac{z^*}{z_i} \right) \quad (4.14)$$

čia Y – funkcijos duomenys pagal Y ašį, X pasirinktas mastelinis koeficientas

Funkcijos grafikas yra pavaizduotas 4.23 paveiksle. Ši funkcija atitinka Allen'o darbuose (Allen 2005) pateiktą terminio srauto vertikaliosios greičio dedamosios pasiskirstimą pagal aukštį. Allen'o darbuose pateikta empirinė priklausomybė tarp srauto reikšmės w_T ir aukščio z^* (1.4). Funkcija (4.14) yra artima priklausomybei (1.4).

4.23 pav. Apmokymo metu naudojamos funkcijos grafikas
Fig. 4.23. Input function, used in learning

Po DNT apmokymo tinklas buvo patikrintas panaudojant įėjimo duomenų aibę. DNT atkuriamos funkcijos grafikas yra pavaizduotas (4.24 pav.)

4.24 pav. Išėjimo vektoriaus funkcijos grafikas
Fig. 4.23. Output function

Terminio srauto raidai modeliuoti, buvo pasirinkta sinusinė funkcija. Buvo sudarytas DNT, turintis vieną paslėptąjį neuronų sluoksnį, su 60 dirbtinių neuronų kiekviename sluoksnyje, iš viso buvo įėjimo ir išėjimo sluoksniai, turintys du, trys bei keturis sluoksnius.

Visų paslėptojo sluoksnio ir išėjimo sluoksnio neuronų aktyvacijos funkcija – loginis sigmoidas.

$$f(a) = \frac{\sin(a) + 1}{2} \quad (4.15)$$

čia a – kampas, matuojamas laipsniais

4.25 pav. Apmokymo metu naudojamos funkcijos grafikas

Fig. 4.25. Input function, used in learning

4.26 pav. Išėjimo vektoriaus funkcijos grafikas (2 sluoksniai)

Fig. 4.26. Output function (2 layers)

4.27 pav. Išėjimo vektoriaus funkcijos grafikas (3 sluoksniai)

Fig. 4.27. Output function (3 layers)

4.28 pav. Išėjimo vektoriaus funkcijos grafikas (4 sluoksniai)

Fig. 4.28. Output function (4 layers)

Taikant DNT yra įmanomas daugiamachių funkcijų aproksimavimas. Šis DNT gebėjimas yra naudingas aproksimuojant įvairias terminio srauto parametrų funkcijas, priklausančias nuo daugelio parametrų kintamųjų. Tačiau atlikto

eksperimento metu gauta funkcija ne visada atitinka atitinkamos įėjimos funkcijos mastelį, pavyzdžiui (4.27 pav. ir 4.28 pav.).

4.6. Parametrų, reikalingų kylančiam oro srautui aptikti, matavimai

Eksperimento metu buvo tiriamos statinio slėgio daviklio duomenų atitikimas palydovinės navigacijos duomenims, AO realaus skrydžio metu.

4.29 pav. Matavimo įrangos montavimas į AO

Fig. 4.29. Measurement device mounting to the autonomous aircraft

Eksperimento tikslas ištirti įrangos, skirtos terminių srautų parametrų matavimui, veikimą lauko sąlygomis ir panagrinėti terminio srauto matavimui reikalingų parametrų matavimo bei apdorojimo ypatumus.

4.30 pav. Matavimo įranga

Fig. 4.30. Measurement devices

Matavimo įrangą sudaro: palydovinės navigacijos imtuvas Royaltec 2000, analoginiai slėgio davikliai MPX5100 ir MPX5700, skirti pilnutiniam ir statiniam slėgiui matuoti, 16 skilčių analoginiai skaitmeniniai keitikliai (ASK), skaitmeninė įranga, skirta duomenims apdoroti, telemetrijos siūstuvai, skirtas duomenų perdavimui į antžeminę įrangą.

4.31 Pav. Supaprastinta struktūrinė matavimo įrangos schema

Fig 4.31. Simple structural circuit of the measurement device

Matavimo įranga matavo sekančias duomenų sekas: GPS laiką, GPS koordinates WGS-84 sistemoje, GPS aukštį virš jūros lygio, statinį slėgį, pilnutinį slėgį, barometrinį aukštį, matomų palydovų skaičių, maitinimo baterijos įtampą, aplinkinio oro temperatūrą. Slėgio daviklių duomenys buvo suvidurkinti, atliekant 100 matavimų ir išvedant aritmetinį vidurkį. Tokių būdu, antrojo laipsnio šaknėmis iš matavimo kiekio, buvo sumažinama atsitiktinių fluktuacijų įtaka matavimo duomenims. Kas sekundę buvo atliekami 100 statinio ir 100 pilnutinio slėgio matavimai, tačiau telemetrijos kanalu buvo perduodama tik aritmetiniai matavimų vidurkiai.

Aukščio bei matomų palydovų skaičiaus matavimai atlikti 2012-09-21. Autonominio orlaivio skrydžio metu buvo tiriamas galimas, palydovinės navigacijos imtuvo gaunamų, navigacinių duomenų praradimas, vykdant įvairius skrydžio manevrus.

Analoginių slėgio daviklių duomenys suskaitmeninami ir apdorojami. Apdorojimas vykdomas, suvydurkinant 200 gautų duomenų.

Matuojant skrydžio aukštį barometrinio daviklio ir iš palydovinio imtuvo matuojamų duomenų išgaunant aukščio parodymų duomenis, buvo atliktas matuojamų parametrų palyginimas (4.28 pav.). Tikslinga atkreipti dėmesį į matuojamo GPS aukščio duomenų praradimą, ypač pirmame skrydžio laiko trečdalyje (4.32 pav.).

4.32 pav. Aukščio pokytis skrydžio metu

Fig. 4.32. Height change during the flight

Apskaičiuojama visų GPS aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hg_{ps}} = 206,2$. Apskaičiuojama visų barometrinių aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hbar} = 265,8$. Apskaičiuojama barometrinio aukščio matavimų dispersija $\sigma_{|Hbar|}^2 = 1921,1$. Apskaičiuojama GPS aukščio matavimų dispersija $\sigma_{GPS}^2 = 6936$. Apskaičiuojamas koreliacijos koeficientas tarp dvejų kreivių $K = 0,38$.

Esant koreliacijos koeficientui, kuris artėja link 0 reikšmės, palydovinės navigacijos įrangos matavimų pagalba, gautieji aukščio duomenys neatitinka, slėgio daviklio pagalba išmatuotų, orlaivio barometrinio aukščio duomenų. Tikėtina, kad toks žemas koreliacijos koeficientas sąlygotas GPS aukščio duomenų praradimu, orlaiviui vykdant manevrus ir GPS antenos kryptingumo diagramai išeinant už navigacinio signalo matomumo ribų. Šis reiškinys turi koreliuoti su navigacijai tinkamų palydovų skaičiumi AO skrydžio metu (4.33 pav.).

Atlikus statistinę, GPS imtuvo pagalba gautų, aukščio duomenų analizę, buvo nustatytas koreliacijos tarp GPS aukščio ir GPS palydovų kiekio duomenų koreliacijos koeficientas $K = 0,81$. Galima daryti išvadą, kad GPS aukščio kreivės nulinės reikšmės turi statistines sąsajas su matomų palydovų skaičiumi AO skrydžio metu.

4.33 pav. Matomų GPS palydovų skaičius skrydžio metu

Fig. 4.33. Number of Gps satellites during the flight

Duomenų praradimas matavimo aibėje gali būti kompensuojamas, taikant įvairias metodikas: interpoliacijos bei ekstrapoliacijos metodus (Brezinski 2009), Kalmano filtrus (Ducard 2009; Stankunas *et al.* 2011). Vienas iš paprasčiausių duomenų suglotninimo metodų yra prieš duomenų praradimą esančios matavimo reikšmės taikymas, pakeičiant toliau esančias nulines duomenų reikšmes. Apdoroți aukščio matavimo duomenys, gauti taikant šią metodiką, yra pateikti diagramoje 4.34 pav.

4.34 pav. Matavimo duomenys po atkūrimo

Fig. 4.34. Measurement data after recovery

Apskaičiuota visų GPS aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hgps} = 235,2$. Apskaičiuota visų barometrinių aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hbar} = 270,8$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų dispersija $\sigma_{[Hbar]}^2 = 490$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{BAR} = 22,14$. Apskaičiuota GPS aukščio matavimų dispersija $\sigma_{[GPS]}^2 = 375,9$. Apskaičiuota GPS aukščio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{GPS} = 19,388$. Apskaičiuotas koreliacijos koeficientas tarp dvejų (4.34 pav.) kreivių $K = 0,96$. Esant koreliacijos koeficientui artimam 1, galima teigti, kad palydovinės navigacijos įrangos matavimų pagalba gautieji aukščio duomenys atitinka slėgio daviklio pagalba išmatuotus orlaivio barometrinio aukščio duomenis.

Vertinant matomų palydovų kiekio pokyčius skrydžio metu, galima teigti, kad matomų palydovų kiekis besikeičia skrydžio metu ir įtakoja matuojamų orlaivių navigacinių duomenų tikslumą. Tarp GPS aukščio duomenų praradimo skrydžio metu ir matomų palydovų skaičiaus pokyčio skrydžio metu yra statistinis sąryšis. Taikant prarastų duomenų atkūrimo metodikas, matuojamų duomenų matavimo tikslumas didėja, atitinkamai didėja koreliacijos koeficientas tarp to pačio, skirtingais šaltiniais matuojamo parametro duomenų.

Temperatūros bei aukščio matavimai atlikti 2012-09-27. Autonominio orlaivio skrydžio metu, buvo matuojamas temperatūros pokytis pagal aukštį. Nėvykdamt duomenų suglotninimo, temperatūros ir aukščio laiko eilių duomenys yra pateikti 4.35 pav.

Apskaičiuota visų barometrinių aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hbar} = 354,7$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų dispersija $\sigma_{[Hbar]}^2 = 16542$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{BAR} = 128,6$. Apskaičiuota visų temperatūros matavimų vidutinė vertė $\overline{T} = 27,9$. Apskaičiuota temperatūros matavimų dispersija $\sigma_{[T]}^2 = 370$. Apskaičiuota temperatūros matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_T = 19,2$. Apskaičiuotas koreliacijos tarp 1-osios kreivės, žyminčios temperatūros pokytį laike (4.33 pav.) ir 2-osios kreivės žyminčios barometrinio aukščio pokytį laike koreliacijos koeficientas $K = 0,35$.

4.35 pav. Temperatūros nuo aukščio pokytis skrydžio metu

Fig. 4.35. Temperature change during the flight

Pastebima silpna teigiama koreliacija tarp dvejų kreivių (4.33 pav.). Kadangi, nesant inversijai atmosferoje, oro temperatūra turi mažėti su aukščiu, temperatūros priklausomybė nuo aukščio turi būti atvirkštinė, atitinkamai ir koreliacijos koeficientas turi būti neigiamas. Taikant paprasčiausią laiko sekos duomenų sugltoninimo metodiką – nulinių duomenų pakeitimą prieš tai esančia paskutine neprarasta matavimo imtimi, gaunamos temperatūros ir aukščio matavimo laiko eilių kreivės (4.34 pav.).

Po matavimo duomenų sugltoninimo gaunamos sekančios statistinės reikšmės. Apskaičiuota visų barometrinių aukščio matavimų vidutinė vertė $\overline{Hbar} = 296,7$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų dispersija $\sigma^2_{|Hbar|} = 2754,3$. Apskaičiuota barometrinio aukščio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{BAR} = 52,48$. Apskaičiuota visų temperatūros matavimų vidutinė vertė $\overline{T} = 31,1$. Apskaičiuota temperatūros matavimų dispersija

$\sigma^2_{|T|} = 263,7$. Apskaičiuota temperatūros matavimų vidutinė kvadratinė

nuokrypa $s_T = 19,2$.

4.36 pav. Matavimo duomenys po atkūrimo

Fig. 4.36. Measurement data after recovery

Apskaičiuotas koreliacijos tarp 1-osios kreivės, žyminčios temperatūros pokytį laike (4.36 pav.) ir 2-osios kreivės žyminčios barometrinio auščio pokytį laike koreliacijos koeficientas $K = -0,77$. Tokia koreliacijos koeficiento reikšmė žymi stiprią atgalinę priklausomybę tarp matuojamų temperatūros ir aukščio reikšmių.

Pilnutinio slėgio matavimai atlikti 2012-09-21. Autonominio orlaivio skrydžio metu buvo matuojamas pilnutinis oro slėgis. Matavimai buvo vykdomi naudojant Pitoto vamzdelį. Pilnutinis slėgis yra statinio ir dinaminio slėgių suma. Pilnutinis slėgis keisis priklausomai nuo meteorologinių sąlygų, skrydžio aukščio, Pitoto vazdį atakuojančio oro srauto. Pilnutinio slėgio matavimo duomenys pateikti 4.37 pav.

Apskaičiuota visų pilnutinio slėgio matavimų vidutinė vertė $\overline{P_p} = 955,9$ [kPa]. Apskaičiuota pilnutinio slėgio matavimų dispersija $\sigma_{|P_p|}^2 = 14865,8$. Apskaičiuota pilnutinio slėgio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{P_p} = 121,9$.

Tokia aukšta pilnutinio slėgio dispersijos matavimų reikšmė atsirado dėl telemetrijos duomenų praradimo. Pilnutinio slėgio matavimo duomenys reikalauja suglوتينimo. Taikant paprasčiausią laiko sekos duomenų suglوتينimo metodiką – nulinių duomenų pakeitimą prieš tai esančia, paskutine, neprarasta matavimo imtimi, gaunama pilnutinio slėgio matavimo laiko eilių kreivė (4.38 pav.).

4.37 pav. Pilnutinis slėgis skrydžio metu
Fig. 4.37. Total pressure during the flight

4.38 pav. Matavimo duomenys po atkūrimo
Fig. 4.38. Measurement data after recovery

Po matavimo duomenų suglotninimo gaunamos sekančios statistinės reikšmės. Apskaičiuota visų pilnutinio slėgio matavimų vidutinė vertė $\overline{P_p} = 971,47$, kPa. Apskaičiuotapilnutinio slėgio matavimų dispersija $\sigma_{|P_p|}^2 = 6,17$. Apskaičiuota pilnutinio slėgio matavimų vidutinė kvadratinė nuokrypa $s_{P_p} = 2,48$.

Pilnutinis slėgis gali būti taikomas orlaivio oro greičio matavimuose. Panaudojant palydovinės navigacijos duomenis ir orlaivio oro greičio duomenis, galima apskaičiuoti vėjo stiprį bei kryptį (Langelaan 2010).

4.7. Ketvirtojo skyriaus apibendrinimas

DNT yra tinkamas terminio srauto paieškai. DNT geba aproksimuoti funkcijas, artimas terminio srauto meteorologinių parametrų funkcijoms. Sukurtas terminio srauto empirinis modelis geba modeliuoti terminį srautą, atsižvelgiant į skaičiavimo sistemos skaičiavimo resursus. Panaudojus pilnutinio bei statinio slėgio matavimo duomenis galima apskaičiuoti orlaivio oro greitį. Taikant pilnutinio ir statinio slėgio matavimo duomenis bei palydovinės navigacijos navigacinių parametrų matavimo duomenis, galima apskaičiuoti vėjo kryptį ir stiprį. Duomenų suglotninimas žymiai sumažina matuojamos duomenų sekos dispersiją. Matavimų rezultate gaunami duomenys tinka terminio srauto aptikimo uždavinio sprendimui po prarastų imčių atkūrimo.

Bendrosios išvados

1. Disertacijos rengimo eigoje buvo pasiūlytas lankstus terminio srauto modelis, tinkantis pritaikymui autonominio orlaivio skaičiavimo sistemoje. Buvo pasiūlyta nauja terminio srauto modeliavimo metodiką, taikant apskritiminius baigtinius elementus. Siūlomas šioje disertacijoje terminio srauto modelis geba modeliuoti srautą, įvertinti jo posvyrį atsižvelgiant į vėjo stiprį bei kryptį skirtinguose aukščiuose bei į aplinkinės erdvės meteorologines sąlygas.
2. Apskritiminius baigtiniais elementais ir dirbtiniais neuronų tinklais pagristas terminio srauto modelis pritaikomas mažo pajėgumo skaičiavimo sistemoms, dėka modelyje esančių baigtinių elementų kiekio keitimo, kas praplečia tokio modelio pritaikymo galimybių sritis.
3. Apskritiminius baigtiniais elementais ir dirbtiniais neuronų tinklais pagristas terminio srauto modelis suteikia autonominių orlaivių aparatinėms valdymo sistemoms galimybę, vykdant navigacinius ir meteorologinius matavimus, panaudoti terminių srautų energiją skrydžio metu.
4. Praktiniu eksperimentu buvo patvirtintas DNT gebėjimas aproksimuoti srauto meteorologinių parametrų funkcijas, atpažinti kylančio oro srautą. Esant idealizuotoms modeliavimo eksperimento sąlygoms DNT geba atpažinti terminį srautą 99% tikslumu.

Literatūros sąrašas

Michael, A. J. 2005. *Autonomous Soaring for Improved Endurance of a Small Uninhabited Air Vehicle*. AIAA-2005-1025.

Antal, C; Granichin, O.; Levi, S. 2010. Adaptive Autonomous Soaring of Multiple UAVs Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation. [URL](#)

Bencatel, R. 2010. Thermal localization Autonomous and Intelligent Systems (AIS), International Conference. X(X): 1–6. ISBN 978-1-4244-7104-1

Blanchard, O. D. 1998. Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy, *Weather and Forecasting* 13. NOAA / National Severe Storms Laboratory, Boulder, Colorado.

Bougeault, P. A. 1985. Simple Parameterization of the Large-Scale Effects of Cumulus Convection, *Monthly Weather Review* 113: 2108–2120.

Bower, G.; Naiman, A. 2006. Just Keep Flying: Machine Learning for UAV Thermal Soaring. <http://www.stanford.edu/class/cs229/proj2006/BowerNaiman-ustKeepFlyingMachineLearningforUAVGustSoaring.pdf>

Braspenning, P. J.; Thuijsman F.; Weijters A. J. M. M. 1995. Artificial Neural Network – An Introduction to ANN Theory and Practice, Springer. p.11–18. ISBN 3-540-59488-4

Brezinski, C.; Michela R. Zaglia, 1991. *Extrapolation Methods: Theory and Practice*. North-Holland. Amsterdam. ISBN 0-444-88814-4

Charles, A.; Doswell III; David M.; **Schultz**. 2006. On the Use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms, *E-Journal of Severe Storms Meteorology*. ISSN 1559-5404

Chiesa, S.; Corpino, S.; Fioriti, M.; Viola, N. 2007. Virtual and Flying Models for Aircraft Development, *Aviation* 11(2): 3–12. Vilnius: Technika, 2007, ISSN 1648-7788 print / ISSN 1822-4180 online

Childress, C. E. 2010. An Empirical Model of Thermal Updrafts Using Data Obtained From a Manned Glider: Master's Thesis. University of Tennessee. Prieiga per internetą: http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/612 [žiūrėta 2012-03-05].

Doncieux, S. M.: Meyer, J. 2007. Soaring behaviors in UAVs 'animat' design methodology and current results. 3rd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicle Systems (MAV07) & European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (EMAV2007), 17–21 September 2007, Toulouse, France

Ducard, G. 2009. Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems: Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles. 1 edition. Springer. 266 p. ISBN 978-1-84882-560-4.

Edwards, D. J. 2008 „Results of an Autonomous Soaring Controller Design of a bio-inspired controller for dynamic soaring in a simulated UAV „ *North Carolina State University, Raleigh, NC, 27604* Implementation Details and Flight Test Renaud Barate, Doncieux, S., Meyer, J. „Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight“ Universit'e Pierre et Marie Curie - Paris 6, UMR 7606, AnimatLab/LIP6, 8 rue du Capitaine Scott, Paris, 75015 France E-mail: Renaud.Barate@ensta.fr, Stephane.Doncieux@lip6.fr, Jean-Arcady.Meyer@lip6.fr

Garratt, J., R. 1994. The Atmospheric Boundary Layer ISBN-13: 978-0521467452

Gerald, C. 2007 Applied Numerical Analysis, Pearson Education. ISBN8131717402

Gheyas, A., Leslie S. 2009 “A Neural Network Approach to Time Series Forecasting” Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II WCE 2009, July 1–3, 2009 London, U.K. Laikmena
http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1292-1296.pdf Žiūrėta 2011-01-25

Grewal, M., S., Andrews, A., P. 2001. Kalman filtering: Theory and practice. — Wiley-Interscience, 2001.

Jonathan, C., Carr, W., Fright, F. 1997 Member, IEEE, and Richard K. Beatson Surface Interpolation with Radial Basis Functions for Medical Imaging IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, VOL. 16, NO. 1, FEBRUARY 1997

Kharchenko, V., Aexeiev, O. 2010. Interpretation of neural network technologies for prediction and management of risk factors // *Aviation*. Vilnius: Technika, 2010, Vol. 14, No. 1, p. 19-23. DOI: 10.3846/aviation.2010.03 ISSN 1648-7788 print / ISSN 1822-4180 online

Krishnakumar, K. 2000 “Micro-Genetic Algorithms for Stationary and Non-Stationary Function Optimization”, Proceedings of SPIE's Intelligent Control and Adaptive Systems Conference, 2000 - pp.289-296 .

- Krug, P., G. 2002. The Neural Networks and The Neural Computers. Moscow: Publishing House of MPEI. 2002 – 176 pp. ISBN 5-7046-0832-9
- Kumjian, Matthew, R., Ryzhkov, A., V. 2009 Storm-Relative Helicity Revealed from Polarimetric Radar Measurements. J. Atmos. Sci., 66, Volume 66, Issue 3 Online ISSN: 1520-0469, Print ISSN: 0022-4928, 2009, p. 667–685.
- Langelaan, J., W., Anjan, C. 2010 Flight Path Planning for UAV Atmospheric Energy Harvesting Using Heuristic Search AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2 - 5 August 2010, Toronto, Ontario Canada
- Langelaan, J., W. 2010 Wind Field Estimation for Small Unmanned Aerial Vehicles The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA Nicholas Alley Area-I Inc., Canton, GA 30115 USA James Neidhoefer Aerotonomy, Inc., Lithia Springs, GA 30122 USA. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Canada American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper 2010-8177.
- Langelaan, J., W. 2008 “Gust Energy Extraction for Mini- and Micro- Uninhabited Aerial Vehicles,” AIAA.-2008-0223,
- Larry, A., Y., „Aerial vehicle surveys of other planetary atmospheres and surfaces: imaging, remote-sensing, and autonomy technology requirements“ Gregory Pisanichb, Corey Ippolitob, Rick Alena 2005. Army/NASA Rotorcraft Division, MS 243-12, b QSS Group, Inc. Computational Sciences Division, MS 269-3, c Computational Sciences Division, MS 269-4, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA USA 94035-1000
- Lasauskas, E. 2008. Skrydžio principai: mokomoji knyga. Vilnius:Technika, 2008. 182 p. ISBN 978-9955-28-255-6
- Lenschow, D. H., and Stephens, P., L. 1980 “The Role of Thermals in the Convective Boundary Layer,” Boundary-Layer Meteorology, 19, 1980, pp. 509–532.
- Mark, B., E. 2002 Autonomous Dynamic Soaring Platform for Distributed Mobile Sensor Arrays Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 SAND REPORT SAND2002-1896
- Matthew, W., H. 2000. „Unscented Kalman Filter for Thermal Parameter Identification“ *North Carolina State University, Raleigh, NC, 27695* 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2010, Orlando, Florida mmorrow@vt.edu
- Minsky, M., L, Papert S. 1969. Perceptrons. Cambridge, MA: MIT Press Neural Networks at Pacific Northwest National Laboratory <http://www.emsl.pnl.gov:2080/docs/cie/neural/neural.homepage.html>, žiūrėta 2008-08-09
- Mohamad, H., 1995. Fundamentals of artificial neural networks Cambridge, Mass. : MIT Press, ©1995. ISBN 026208239X 9780262082396
- Morton, L., Z. 2010. Modeling and Simulation of Autonomous Thermal Soaring with Horizon Simulation Framework URL: <http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/442>
- Noth, S. B., Michaud, S., Siegwart, R., Engel, W. 2006. „SKY-SAILOR DESIGN OF AN AUTONOMOUS SOLAR POWERED MARTIAN AIRPLANE“ Autonomous Sys-

tems Lab, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL) CH-1015 Lausanne
andre.noth@epfl.ch

Reed., R., D., Marks, R., J. 1998. Neural Smithing: Supervised Learning in Feedforward Artificial Neural Networks. MIT Press Cambridge, MA, USA ©1998 ISBN:0262181908

Ryabko, B. 2010 Using Information Theory to Study Efficiency and Capacity of Computers and Similar Devices Information 2010, 1, 3-12; doi:10.3390/info1010003 ISSN 2078-2489

Schols, J., L., E., W. 1992 Eloranta Calculations of Area-Averaged Vertical Profiles of the Horizontal Wind Velocity from Volume-Imaging Lidar Data, in the Journal of Geophysical Research, vol. 97, pp.18,395-18,407, 1992.

Soleimanbeigi A. and Hataf, N. 2006. Prediction of settlement of shallow foundations onreinforced soils using neural networks Geosynthetics International, 2006, 13, No. 4 Received 13 August 2005, revised 8 May 2006, accepted 14 May 2006

Stankunas, J., Rudinskas, D., Lasauskas, E. 2011. Experimental Research of Wireless Sensor Network Application in Aviation // Electronics and Electrical Engineering – Kaunas: Technologija. No. 5(111). p. 41–44 (Thomson ISI Web of Science).

Stull. R., B. 1998. An Introduction to Boundary Layer Meteorology ISBN-13: 978-9027727688

Thomas, F., and Miligram, J. (contributor) 1999; „Library of Congress catalog Card Number: 99-61150 „Fundamentals of Sailplane Design“, College Park Press, College park Maryland, USA, 1999. ISBN 0-9669553-0-7

Tiedtke, M. 1993 Representation of Clouds in Large-scale Models // Monthly Weather Review. – 1993. – Vol. 121. – P. 3040–3061.

Wang, J., G. and Liu, G., R. 2002 A point interpolation meshless method based on radial basis functions INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING Int. J. Numer. Meth. Engng 2002; 54:1623–1648 (DOI: 10.1002/nme.489)

Weigend, A., S. 1994 “Time series prediction: Forecasting the future and understanding the past”. — Boston: Addison—Wesley, 1994.

Woolsey, C., Ph.D. 2005 „A self-sustaining, boundary-layer-adapted system for terrain exploration and environmental sampling Phase I Final Report“ Aerospace & Ocean Engineering Virginia Tech Randolph Hall, Room 217-D Blacksburg, VA 24061 cwoolsey@vt.edu G. Hagerman Alexandria Research Institute Virginia Tech 206 North Washington Street, Suite 400 Alexandria, VA 22314 hagerman@vt.edu M. Morrow Aerospace & Ocean Engineering Virginia Tech Randolph Hall, Room 1 Blacksburg, VA 24061

XFLR programos nuoroda [interaktyvus] [žiūrėta 2011-04-10]. Prieiga per internetą: <http://xflr5.sourceforge.net/xflr5.htm>

Zhang, Q., D.-M. Li, X.-H. Liu, S. Mei and J. Wu 2007. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Energy 160 November 2007 Issue EN4 Pages 145–149 doi: 10.1680/ener.2007.160.4.145 Z.-S. Li, G.- Neural network prediction of energy demand and supply in China

Боровков, А., А. 1999 Теория вероятностей. - 3-е изд. М. Эдиториал УРСС, 1999. – 472 с, ISBN 5-901006-66-6

Брилюк, Д. В.; Старовойтов, В. В. 2002. Распознавание человека по изображению лица нейросетевыми методами. Минск. 54 с. УДК 681.3.01+681.327.12.

Жернаков, С., В., Муслухов, И., И. 2006, „Нейровычислитель для восстановления потерянной информации со штатных датчиков бортовой системы контроля и диагностики“ isbn 5-7262-0634-7 Нейроинформатика – 2006. Часть 3. Уфимский государственный авиационный технический университет.

Калинин, Н., А., Смирнова, А., А. 2005. Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды Пермский государственный университет УДК 551.501.8:551.5761

Каллан, Р. 2001. „Основные концепции нейронных сетей „, The Essence of Neural Networks First Edition. – 1-е. – «Вильямс», 2001. – С. 288. – ISBN 5-8459-0210-X

Кириевский, В. 2001. Нейросетевая реализация систем измерения параметров движения плазмы в электродинамических ускорителях масс УДК 621.384.6+65.012.12 Е.

Комарцова, Л. Г.; Максимов А. В. 2002. *Нейрокомпьютеры*. 1-е изд-е. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. ISBN 5-7038-1908-3

Копытов, Е., Лабендик В., Кабелев Н. 2001. Особенности диагностических систем с элементами искусственного интеллекта Computer Modelling & New Technologies, 2001, Volume 5, No.1, 119-123 Transport and Telecommunication Institute, Lomonosov Str.1, Riga, LV-1019, Latvia

Круглов, В., В., Борисов, В., В. 2001 Искусственные нейронные сети. Теория и практика. — 1-е. — М.: Горячая линия - Телеком, 2001. — С. 382. — ISBN 5-93517-031-0

Кульчин, Ю., Н., Денисов, И., В., Панов, А., В., Рыбальченко, Н., А. 2006. Применение персептронов для нелинейной реконструктивной томографии. — Проблемы управления, 2006, № 4, с. 59–63.

Матвеев, Л., Т. 1965 Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 876 с.

Медведев, В., С., Потемкин, В., Г. 2002. Нейронные сети. Matlab 6. - М.: Диалог-МИФИ, 2002. - 496 с. ISBN 5-86404-163-7

Минухин, С., В., 2011. Оптимизация энергопотребления вычислительных ресурсов при изменении спроса и предложения на них в системе экономических отношений двухуровневого GRID Харьковский национальный экономический университет ISSN 1996-1588

Новицкий, П., В., Зограф, И., А. 1991 Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. –Л.: Энергоатомиздат.Ленинградское отделение, 1991. – 304 с.: ил. ISBN 5-283-04513-7

Роджерс, Д., Адамс, Дж. 2001. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001. — ISBN 5-03-002143-4

- Солдатов, О., П., Семенов, В., В. 2006. Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ) <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/136.pdf> žiūrėta 2008-09-08
- Тарасенко, Р., А., Крислов, В., А. 2001. “Выбор размера описания ситуации при формировании обучающей выборки для нейронных сетей в задачах прогнозирования временных рядов“ УДК 681.322:517.444 Laikmena <http://neuroschool.narod.ru/pub/rto02.html> Žiūrėta 2012-01-02
- Терехов, В., А., Ефимов, Д., В., Тюкин, И. Ю. 2002. Нейросетевые системы управления. — 1-е. — Высшая школа, 2002. — С. 184. — ISBN 5-06-004094-1
- Уоссермен, Ф. 1992. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. Перевод на русский язык, Ю. А. Зуев, В. А. Точенов
- Чернухин, Ю., В., Писаренко, С., Н. 2004. Алгоритм адаптивной экстраполяции для нейросетевых систем управления Таганрогский государственный радиотехнический университет, Россия chernukhin@dce.tsure.ru, sergpisarenko@mail.ru УДК 621.865.8
- Шмeтер, С., М. 1972. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 229с.
- Ясницкий, Л., Н. 2005. Введение в искусственный интеллект. — 1-е. — Издательский центр "Академия", 2005. — С. 176. — ISBN 5-7695-1958-4

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Suzdalev, I., Stankūnas J., Lasauskas, E. 2009. Kylančių oro srautų lokalizavimas ir maksimalios kilimo zonos nustatymo, panaudojant dirbtinių neuronų tinklus, modeliavimo aspektai. Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Transporto inžinerija Vilnius : Technika. ISSN 2029–2341. T. 1, nr. 6 (2009), p. 129–132.

Stankūnas, J., Suzdalev, I. 2011. Detection of atmospheric thermal flows by use of artificial neural network / Jonas Stankūnas, Ivan Suzdalev // Aviation. Vilnius : Technika. ISSN 1648–7788. Vol. 15, no. 3 (2011), p. 57–62.

Stankūnas, J., Suzdalev, I., Komka, A. 2012. Approach to modeling of thermal airflow dynamics Journal of Vibroengineering, ISSN 1392–8716, Vol. 14, iss. 1 (2012), p. 440–449.

Straipsniai kituose leidiniuose

Suzdalev, I. 2008. „Jonosferinio modeliavimo pritaikymas mažinant plačių zonų DGPS paklaidas „11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2008 metų teminės konferencijos AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS (2008 m.

balandžio 17 d.) straipsnių rinkinys / Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Antano Gustaičio aviacijos institutas. Vilnius : Technika, 2008. ISBN 9789955283089. p. 42–48.

Suzdalev, I., Stankūnas J. 2012. „Dirbtinių neuronų tinklų taikymo apžvalga“ Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2012 metų teminės konferencijos „AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS“ straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika, 2012. 110 p. UDK 629.7(474.5)(06) P 31–35.

Suzdalev I., Stankunas J., Snieckus V. 2012. „Meteorologinių derinių, kaip atsinaujinančių energijos šaltinių, taikymo autonominio orlaivio skrydžio metu metodu apžvalga“ Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2012 metų teminės konferencijos „AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS“ straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika, 2012. 110 p. UDK 629.7(474.5)(06) P 36–40.

Priedai

A priedas. Terminio srauto modelio algoritmo funkcijos kodas

```
double cubicInterpolate (double p[4], double x) {  
    return p[1] + 0.5 * x*(p[2] - p[0] + x*(2.0*p[0] - 5.0*p[1] + 4.0*p[2] - p[3]  
        + x*(3.0*(p[1] - p[2]) + p[3] - p[0])));  
}
```

```
public: double color;  
public: double R,G,B;
```

```
public: void getcol(double color)  
{  
    if (color<0) color=0;  
  
    if (color>120) color=120;  
  
    if (color>=0 && color<=24) {R=0.0f; G=0.0f; B=color/24;}
```

```

    if (color>24 && color<=48) {R=0.0f; G=(color-24)/24; B=1;}

    if (color>48 && color<=64) {R=0.0f; G=1.0f; B=(64-color)/24;}

    if (color>64 && color<=96) {R=(color-64)/24; G=1.0f; B=0.0f;}

    if (color>96 && color<=120) {R=1.0f; G=(120-color)/24; B=0.0f;}
    }
};
col rgb;

glBegin(GL_POINTS);
Rconst=termik.R/5;
termik.Time=clock();//termik.R=(Rconst-vysota/5);
// Rconst=Rconst-sin(termik.Time/1000);

for (float vysota=vincr;vysota<termik.H/600;vysota=vysota+vincr)
{
    Wt= Wmax*pow(Z/Zi,0.3333)*(1-1.1*Z/Zi);
    termik.R=Rconst+Rconst*vysota/5;
    Z=vysota;
    Zi= termik.H/600;
    lin[2]=10*Wt;
    for (float radius=termik.R;radius>0;radius=radius-rincr)
    {
        rgb.getcol(cubicInterpolate(lin,1-radius/termik.R));
        if (Wt<0.2)  glColor3f(1,1,1);
        for (float angle=0;angle<360;angle=angle+rdiskr)
        {
            glColor3f(rgb.R,rgb.G,rgb.B);

            glVertex3f(radius*sin(angle*PI/180.0)+vysota*tan(termik.naklon*PI/180.0)*cos
            (termik.wind*PI/180.0),(radius)*

            cos(angle*PI/180.0)+vysota*tan(termik.naklon*PI/180.0)*sin(termik.wind*PI/1
            80.0),vysota);
        }
    }
    termik.naklon=m*log(vind)*c;
    vind=vind+5;

```



```
//termik.naklon=1;  
if (termik.naklon<0) termik.naklon=0;  
if (termik.naklon>70) termik.naklon=70;  
}  
glEnd();
```

B priedas. Dirbtinių Neuronų Tinklų C++ funkcijos

```
class Neur {  
public:  
float w[16];  
float x[16];  
float b;  
float beta;  
//funkcija aktivacii  
float NET()  
{  
    int count=sizeof(x)/sizeof(x[0]);  
    float NET=0;  
    for (int i=0;i<count;i++) NET=NET+x[i]*w[i];  
    return(NET+b);  
}
```

```
float OUT()  
{  
    float OUT=0;  
    OUT=1/(1+exp(-1*NET()));  
    return (OUT);  
}
```

```
float dOUT()  
{  
    return(OUT)*(1-OUT());  
}
```

```
////////////////////////////////
```

```
//vvod dannyx
float in(float vect[])
{
    int count=sizeof(x)/sizeof(x[0]);
    for (int i=0;i<count;i++) x[i]=vect[i];
}
```

```
};
```

```
Neur
neuron[2][16];
```

```
// Klass seti
```

```
class Net {
public:
```

```
    float q;
    //funkcija aktivacii dlja vsej seti
    float OUT()
    {
        float OUT;
        int neurons=0;
        int layers=0;
        int sinaps=0;
        neu-
        rons=(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0][0]))/(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]));
        layers=sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]);
        sinaps=sizeof(neuron[0][0].x)/sizeof(neuron[0][0].x[0]);
```

```
    if (layers==2)
    {
        for (int z=0;z<neurons;z++)
        {
            neuron[1][0].x[z]=neuron[0][z].OUT();
        }
    }
```

```
if (layers==3)
{
    for (int y=0;y<neurons;y++)
    {
        for (int z=0;z<neurons;z++)
        {
            neuron[1][y].x[z]=neuron[0][z].OUT();
        }
    }
    for (int z=0;z<neurons;z++)
    {
        neuron[2][0].x[z]=neuron[1][z].OUT();
    }

}

if (layers==4)
{
    for (int y=0;y<neurons;y++)
    {
        for (int z=0;z<neurons;z++)
        {
            neuron[1][y].x[z]=neuron[0][z].OUT();
        }
    }
    for (int y=0;y<neurons;y++)
    {
        for (int z=0;z<neurons;z++)
        {
            neuron[2][y].x[z]=neuron[1][z].OUT();
        }
    }
    for (int z=0;z<neurons;z++)
    {
        neuron[3][0].x[z]=neuron[2][z].OUT();
    }

}
```

```

    OUT=neuron[layers-1][0].OUT();
    return OUT;
}
/////////////////////////////////

//funkcija zadaci randomnyx vesov
float randx()
{
    int neurons=0;
    int layers=0;
    int sinaps=0;
    neurons=(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0][0]))/
/(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]));
    layers=sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]);
    sinaps=sizeof(neuron[0][0].x)/sizeof(neuron[0][0].x[0]);

    for (int i=0;i<layers;i++)
    {
        for (int y=0;y<neurons;y++)
        {
            for (int z=0;z<sinaps;z++)
            {
                neuron[i][y].x[z]=(float)(rand() % 10)/1000;
                neuron[i][y].w[z]=(float)(rand() % 10)/1000;
            }
        }
    }
}
/////////////////////////////////

//vvod dannyx
float in(float vect[])
{
    int neurons=0;
    int layers=0;
    int sinaps=0;

    neurons=(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0][0]))/

```

```

/(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]));
layers=sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]);
sinaps=sizeof(neuron[0][0].x)/sizeof(neuron[0][0].x[0]);
cout<<"layers "<< layers<<"\n";
cout<<"neurons "<< neurons<<"\n";
cout<<"sinaps "<< sinaps<<"\n";

for (int y=0;y<neurons;y++)
{
    for (int z=0;z<neurons;z++)
    {
        neuron[0][y].x[z]=vect[z];
    }
}
}
////////////////////

float uchenie(float vect[], float rez)
{

    int neurons=0;
    int layers=0;
    int sinaps=0;
    float nu=0.05;
    float nub=0.08;

    neu-
rons=(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0][0]))/(sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]));
layers=sizeof(neuron)/sizeof(neuron[0]);
sinaps=sizeof(neuron[0][0].x)/sizeof(neuron[0][0].x[0]);

in(vect);

// obnulenie bet*****
for (int y=layers-2;y>=0;y--)
{
    for (int i=0;i<neurons;i++)
    {
        neuron[y][i].beta=0;
    }
}
}

```

```

neuron[layers-1][0].beta=(rez-OUT());

//Pogreshnosti
for (int y=layers-2;y>=0;y--)
{
    for (int i=0;i<neurons;i++)
    {
        for (int z=0;z<sinaps;z++)
        {
            neuron[y][i].beta=
neuron[y][i].beta + neuron[y+1][i].w[z];
            //cout<<"sinaps="<<z<<" neuron= "<<i<<" Layers= "<<y<<"\n";
            // getch();
        }
    }
}

cout <<"rez= "<<rez<<" Out="<<OUT()<<" Beta="<<neuron[layers-1][0].beta;
cout << "\n";

//popravki

for (int y=0;y<layers;y++)
{
    for (int z=0;z<neurons;z++)
    {
        for (int i=0;i<sinaps;i++)
        {
            neuron[y][z].w[i]=
neuron[y][z].w[i] + nu*neuron[y][z].beta*neuron[y][z].dOUT()*neuron[y][z].x[i];
        }
    }
}

for (int y=0;y<layers;y++)
{
    for (int z=0;z<neurons;z++)
    {
        neuron[y][z].b=
neuron[y][z].b + nub*neuron[y][z].beta*neuron[y][z].dOUT();
    }
}

```

```

}
}
cout << "\n";
}
//////////
};
Net net;

```

C priedas. Autonominio orlaivio pagalba išmatuotų 2012-09-27 duomenų dalis

GPS laikas	Šiaurės platuma [°]	Rytų ilguma [°]	Palydovų kiekis	GPS aukš- tis [m]	Barometrinis aukštis [m/10]	Statinis slėgis [kPa/100]	Pilnutinis slėgis [kPa/100]	Temperatūra [C°/20]
121114.399	5443.5295	02509.2841	7	213.8	2404	9707	9746	370
121115.399	5443.5295	02509.2839	8	213.4	2407	9707	9747	351
121116.399	5443.5296	02509.2842	8	212.5	2408	9707	9747	351
121117.399	5443.5297	02509.2847	5	211.4	2407	9707	9747	354
121118.399	5443.5297	02509.2847	1	0.0	2410	9706	9746	352
121119.399	5443.5296	02509.2854	0		2407	9707	9746	353
121120.399	5443.5295	02509.2856	6	208.1	2407	9707	9746	351
121121.399	5443.5294	02509.2858	6	208.2	2410	9716	9746	352
121122.399	5443.5294	02509.2860	6	208.1	2407	9707	9746	352
121123.399	5443.5295	02589.2865	7	207.5	2408	9707	9746	352
121124.399	5443.5298	02509.2868	6	207.1	2408	9707	9745	350
121125.399	5443.5298	02509.2868	1	0.0	2407	9707	9746	352
121126.399	5443.5307	02509.2863	5	205.7	2411	9706	9746	353
121127.399	5443.5307	02509.2863	1	0.0	2411	9706	9746	352
121128.399	5443.5313	02509.2862	4	205.5	2408	9707	9747	352
121129.399	5443.5316	22509.2867	4		2408	9707	9747	353
121130.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2408	9707	9746	353
121131.398	5443.5316	02509.2867	2	0.0	2410	9706	9746	351
121132.398	5443.5316	02509.2867	2	5.0	2407	9707	9747	352
121133.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2408	9707	9747	351
121134.398	5443.5316	02509.2867	0	8.0	2408	9707	9747	352
121135.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2407	9707	9747	351
121137.398	5443.5316	02509.2867	0	2.0	2410	9706	9747	353
121136.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2407	9707	9747	351
121138.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2408	9707	9746	353
121139.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2407	9707	9747	354
121140.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2407	9707	9746	352
121141.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2408	9707	9746	352
121142.398	5443.5316	02509.3867	0	0.0	2407	9707	9746	353
121143.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2411	9706	9747	353
121144.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2408	9707	9747	353
121145.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2417	9705	9747	351
121146.398	5443.5316	02509.2867	0	0.0	2415	9706	9752	353
121147.397	5443.5297	02509.3068	8	204.0	2438	9703	9751	354
121148.397	5443.5287	02509.3149	6	203.6	2443	9702	9755	354

C priedo tęsinys

GPS laikas	Šiaurės platumą [°]	Rytų ilgumą [°]	Palydovų kiekis	GPS aukštis [m]	Barometrinis aukštis [m/10]	Statinis slėgis [kPa/100]	Pilnutinis slėgis [kPa/100]	Temperatūra [C°/20]
121149.397	5443.5287	02509.3149	0	0.0		9701	9752	352
121150.397	5443.5259	02509.3371	8	206.2				
121151.397	5443.5248	02509.3499	8	209.2	2548	9690	9745	353
121152.397	5443.5247	02509.3616	8	212.8				
121153.397	5443.5267	02509.3706	6	0.0	2650	9677	9725	
121155.397	5443.5379	02509.3779	7	219.7	2683	9673	9719	353
121156.397	5443.5445	02509.3777	5	221.4	2700	9671	9717	354
121157.397	5443.5445	02509.3777	0	0.0	2704	9671	9717	
121158.397	5443.5445	02509.3777	0	0.0			9717	352
121159.397	5443.5596	02509.3507	9	231.2	2717	9669	9717	351
121200.397	5443.5601	02509.3353	0□	232.7	2721	9669	9715	351
121201.397	5443.5593	02509.3222	8	234.0	2743			
121202.397	5443.5571	02509.3103	9	236.3	2675	9665	9710	352
121203.397	5443.5545	02509.3004	9	238.4	2771	9662	9707	352
121204.396	5443.5515	02509.2920	9	239.6	2768	9663	9708	351
121205.396	5443.5481	02509.2836	9	240.2	2770	9663	9708	
121206.396	5443.5442	02509.2752	8	240.7	2771	9662	9708	353
121207.396	5443.5399	02509.2676	7	241.4	2777	9662	9708	351
121208.396	5443.5353	02509.2618	5	242.2	2781	9661	9708	352
121209.396	5443.5305	02509.2576	5	242.7	2788	9660	9707	352
121210.396	5443.5255	02509.2559	7	243.4	2782	9661	9708	351
121211.396	5443.5208	02509.2564	6	243.7	2775	9662	9709	352
121212.396	5443.5161	02509.2573	2	0.0	2775	9662	9708	352
121213.396	5443.5114	02509.2582	2	0.0	2775	9662	9709	352
121214.396	5443.5100	02509.2712	7	243.3	2778	9662	9710	353
121215.396	5443.5081	02509.2789	8	242.6	2784	9661	9708	353
121216.396	5443.5081	02509.2880	6	242.3	2799	9659	9707	351
121217.396	5443.5098	02509.2971	7	242.5	2805	9658	9704	352
121218.396	5443.5124	02509.3055	7	242.3	2809	9658	9704	350
121219.396	5443.5163	02509.3128	6	242.0	2813	9657	9706	352
121220.396	5443.5205	02509.3165	2	0.0	2810	9658	9704	353
121221.396	5443.5277	02509.3255	7	240.9	2809	9658	9706	353
121222.395	5443.5337	02509.3310	7	241.9	2808	9658	9704	351
121223.395	5443.5396	02509.3370	8	242.7	2820	9656	9702	351
121224.395	5443.5451	02509.3432	4	243.2	2826	9656	9701	351
121225.395	5443.5500	02509.3500	6	243.8	2834	9655	9701	352
121226.395	5443.5532	02509.3586	8	243.9	2837	9654	9702	352
121227.395	5443.5541	02509.3685	9	243.9	2841	9654	9702	352
121228.395	5443.5527	02509.3778	9	244.3	2842	9654	9701	353
121229.395	5443.5492	02509.3852	9	244.9	2849	9653	9700	351
121230.395	5443.5442	02509.3896	8	245.4	2851	9653	9700	353
121231.395	5443.5387	02509.3901	7	245.8	2858	9652	9700	352
121232.395	5443.5331	02509.3858	6	246.2	2868	9651	9700	353
121233.395	5443.5276	02509.3782	8	247.0	2882	9649	9697	352
121234.395	5443.5232	02509.3686	9	247.7	2880	9649	9695	351
121235.395	5443.5201	02509.3571	9	248.3	2883	9649	9695	351
121236.395	5443.5182	02509.3440	9	248.9	2886	9649	9695	352
121237.395	5443.5175	02509.3300	9	249.3	2877	9650	9696	352
121238.395	5443.5184	02509.3159	7	249.3	2877	9650	9696	351
121239.394	5443.5214	02509.3021	8	249.2	2879	9649	9697	353
121240.394	5443.5264	02509.2897	9	249.0	2869	9651	9698	350
121241.394	5443.5327	02509.2793	9	248.5	2861	9652	9698	351

C priedo pabaiga

GPS laikas	Šiaurės platumą [°]	Rytų ilguma [°]	Palydovų kiekis	GPS aukštis [m]	Barometrinis aukštis [m/10]	Statinis slėgis [kPa/100]	Pilnutinis slėgis [kPa/100]	Temperatūra [C°/20]
121242.394	5443.5401	02509.2719	9	248.1	2862	9651	9698	
121243.394	5443.5478	02509.2680	9	248.1	2870	9650	9698	352
121244.394	5443.5556	02509.2677	9	248.1	2875	9650	9698	351
121245.394	5443.5632	02509.2713	6	247.7	2863	9651	9702	352
121246.394	5443.5701	02509.2751	4	247.2	2844	9654	9703	351
121247.394	5443.5753	02509.2822	7	246.5	2865	9651	9701	351
121248.394	5443.5771	02509.2943	9	246.6	2895	9647	9694	352
121249.394	5443.5755	02509.3053	9	247.6	2912	9645	9692	350
121250.394	5443.5719	02509.3136	9	248.4	2923	9644	9694	351
121251.394	5443.5672	02509.3204	9	249.2	2928	9643	9690	352
121252.394	5443.5624	02509.3266	8	250.7	2939	9642	9689	351
121253.394	5443.5579	02509.3326	8	252.8	2950	9641	9689	352
121254.394	5443.5542	02509.3389	9	254.7	2960	9640	9688	352
121255.394	5443.5509	02509.3454	8	256.2	2965	9639	9686	350
121256.393	5443.5479	02509.3522	8	257.7	2969	9638	9686	351
121257.393	5443.5451	02509.3587	9	259.6	2981	9637	9682	352
121258.393	5443.5421	02509.3648	8	261.1	3000	9635	9680	351
121259.393	5443.5392	02509.3702	8	262.7	3013	9633	9678	352
121300.393	5443.5364	02509.3755	6	264.1	3017	9633	9677	350
121301.393	5443.5341	02509.3811	7	264.7	3022	9632	9676	351
121302.393	5443.5327	02509.3869	7	265.3	3021	9632	9676	350
121303.393	5443.5318	02509.3929	8	265.8	2989	9636	9679	350

IVAN SUZDALEV

Terminių srautų aptikimas ir prognozavimas,
taikant dirbtinius neuronų tinklus

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
matavimų inžinerija (10T)

Artificial neural networks to updrafts
localization and forecasting

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement engineering (10T)

2012 12 14. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius